

# 40

## ცხოველთა თვრემებისა და თუნდციის სათუბელოები



▲ სურათი 40.1 პეპელა სფინქსი ორქიდეის ნექტარით იკვებება.

### ბიტითადი კონცეფციები

- 40.1** ცხოველის ზომა და ფორმა ყალიბდება ფიზიკური კანონებისა და გარემოს მიხედვით
- 40.2** ცხოველის ფორმა და ფუნქცია დაკავშირებულია ერთმანეთთან ორგანიზაციის ყველა დონეზე
- 40.3** ცხოველები იყენებენ საკვების ქიმიურ ენერგიას ფორმისა და ფუნქციის შესანარჩუნებლად
- 40.4** ბევრი ცხოველი არეგულირებს თავის შინაგან გარემოს შედარებით ვიწრო საზღვრების ფარგლებში
- 40.5** თერმორეგულაცია, რომელიც განპირობებულია ორგანიზმის აგებულებით, ფიზიოლოგიითა და ქცევით, ხელს უწყობს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას

### შესავალი

## განსხვავებული თვრემები, სქტოლ ამოცანები

ცხოველები ბინადრობენ ბიოსფეროს თითქმის ყველა ნაწილში. მათი საარსებო გარემო, ფიზიოლოგია და ფორმა დიდი მრავალფეროვნებით ხასიათდება. მიუხედავად ამისა, ყველა ცხოველმა უნდა გადაწყვიტოს რამდენიმე საერთო ამოცანა: მიიღოს ჟანგბადი, გამოკვებოს საკუთარი თავი, გამოყოს ნივთიერებათა ცვლის შედეგად წარმოქმნილი ნარჩენები და იმოძრაოს. როგორ წყვეტენ განსხვავებული ევოლუციური ისტორიისა და სირთულის ცხოველები ამ ამოცანებს? ამ საკითხების განხილვისას მე-7 ნაწილში ისევ შევხვებით ბუნებრივი გადარჩევისა და შეგუებულობის თემას.

მოცემული თავი გავაცნობს ზოგიერთ საერთო კონცეფციებს, რომლებიც გამოიყენება ცხოველთა სამყაროს ანალიზისთვის. მაგალითად, ცხოველების შედარებითმა შესწავლამ აჩვენა, რომ ფორმა და ფუნქცია მჭიდროდ კორელირებს (ურთიერთკავშირშია). განვიხილოთ სფინქსების ოჯახის პეპელას გრძელი, თხელი, ენის მსგავსი ხორთუმი, რომელიც ნაჩვენებია 40.1. სურათზე. წაგრძელებულ ხორთუმს პეპელა იყენებს როგორც „საწრუპს“:

ხორთუმის საშუალებით პეპელა ყვავილის სიღრმიდან ნექტარს იღებს. ყვავილს მილის ფორმა აქვს. ამრიგად, ხორთუმის ფორმა კვებისადმი მორფოლოგიური ადაპტაციაა. ბიოლოგიური სტრუქტურის (როგორც არის პეპელას ხორთუმი) ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ, რისთვის არის იგი და როგორ მოქმედებს. ორგანიზმის სტრუქტურას შეისწავლის ანატომია, ხოლო ორგანიზმის ფუნქციებს – ფიზიოლოგია. ბუნებრივ გადარჩევას სტრუქტურა ფუნქციასთან მოჰყავს შესაბამისობაში. ბუნებრივი გადარჩევისას შენარჩუნდება სტრუქტურები, რომლებიც მოცემულ პირობებში პოპულაციაში არსებულ ყველა სხვა შესაძლო სტრუქტურებზე უკეთ მუშაობს. ამგვარი შერჩევა მრავალი თაობის განმავლობაში მიმდინარეობს.

ცხოველს სჭირდება „საწვავი“ ქიმიური ენერგიის სახით. ამ თეზისის კარგი ილუსტრაციაა პეპელას კვება. იმის გასარკვევად, როგორ იღებს, აწარმოებს და იყენებს ორგანიზმი ენერგეტიკულ რესურსებს, გამოვიყენებთ ბიოენერგეტიკის კონცეფციებს. აღნიშნულ თემას განვიხილავთ ცხოველთა შედარების მეთოდით. ცხოველის ენერგეტიკული რესურსების ერთ-ერთი გამოყენებაა საკუთარი შინაგანი გარემოს რეგულაცია ანუ ჰომეოსტაზის შენარჩუნება. ამ თავში ჰომეოსტაზის კონცეფციას შევისწავლით სხეულის ტემპერატურის რეგულაციის მაგალითზე.

### კონცეფცია 40.1

## ფიზიკური კანონებისა და გატემის მიხედვით ყალიბდება ცხოველის ზომა და ფორმა

ცხოველების „სხეულის გეგმა“ არის ფუნდამენტური თვისებები, რომლითაც ხასიათდება ცხოველების ფორმისა და ფუნქციის ერთობლიობა. აგებულება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ცხოველის ურთიერთობაზე გარემოსთან. ტერმინში „სხეულის გეგმა“ არ ვგულისხმობთ, რომ ცხოველის სხეულის „აგება“ გაცნობიერებული მოქმედების შედეგია. სხეულის აგებულების თავისებურებები ყალიბდება გენომის პროგრამით ორგანიზმის განვითარების პროცესში. თვითონ გენომი მრავალი მილიონი წლის ევოლუციის შედეგია. განვითარების შესაძლებლობები ამოუწურავი არ არის – ფიზიკური კანონები და გარემოსთან ურთიერთქმედება გარკვეულ ჩარჩოებს აწესებს ცხოველთა ფორმებისთვის.



(ა) თინუსი



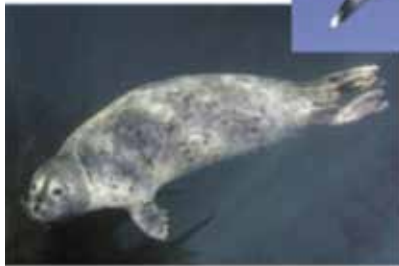
(ბ) ზვიგენი



(გ) პინგვინი



(დ) დელფინი



(ე) სელაპი

▲ **სურათი 40.2** სწრაფად მოცურავეების ევოლუციური კონვერგენცია (მიმსგავსება).

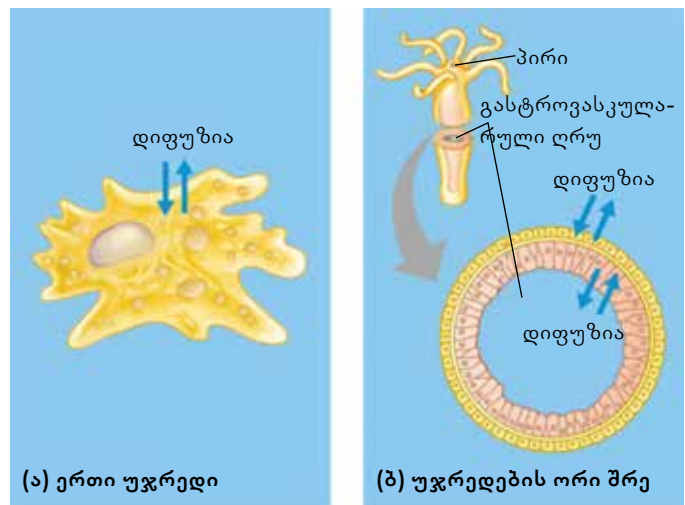
## ფიზიკური კანონები და ცხოველთა ფორმები

წარმოდგინეთ ჰაერში მფრინავი რამდენიმე მეტრის სიგრძის ფრთოსანი გველი, რომელიც ასობით კილოგრამს იწონის. საბედნიეროდ, ასეთ სანახაობას მხოლოდ კინოში თუ იხილავთ. ფიზიკური კანონები განსაზღვრავს იმას, თუ რა შეიძლება „შექმნას“ ბუნებრივმა გადარჩევამ – მფრინავი ცხოველების ზომისა და ფორმის ჩათვლით. ცხოველი, რომელსაც მთითური დრაკონის ზომა და ფორმა ექნებოდა, ვერ შეძლებდა საკმარისი ამწევი ძალის განვითარებას და მიწიდან აფრენას. ეს მხოლოდ ერთ-ერთი მარტივი მაგალითია იმისა, როგორ ზღუდავს ფიზიკის კანონები – ამ შემთხვევაში ფრენის ფიზიკის კანონები – ორგანიზმის ფორმის ევოლუციას.

განვიხილოთ სხვა მაგალითი: რამდენად განაპირობებს ჰიდროდინამიკის კანონები იმ წყლის ცხოველთა ფორმას, რომლებსაც სწრაფად ცურვა შეუძლიათ. წყლის სიმკვრივე ათასჯერ აღემატება ჰაერის სიმკვრივეს, ამიტომ სხეულის ზედაპირზე ნებისმიერი ამოზრუნვა, რომელიც შეფერხებას იწვევს, წყალში მცურავ ორგანიზმს ხელს მეტად შეუშლის, ვიდრე მორბენალს ან მფრინავს. თინუსს და სხვა სწრაფ სხივფარფლიან თევზებს შეუძლიათ 80 კმ/ს სიჩქარით ცურვა. ზვიგენები, პინგვინები (ფრინველები) და ზღვის ისეთი ძუძუმწოვრები, როგორიცაა დელფინები, სელაპები და ვეშაპები, ასევე სწრაფად მცურავ ორგანიზმებს მიეკუთვნებიან. ყველა ჩამოთვლილ ცხოველს თითოთაობაზე მოყვანილობა აქვს, რომელიც თავისა და ბოლოსკენ ვიწროვდება (სურ. 40.2). ის მოვლენა, რომ ყველა სწრაფ მოცურავეს აქვს სხეულის მსგავსი ფორმა, კონვერგენტული ევოლუციის მაგალითია (იხ. თავი 25). კონვერგენციას ადგილი აქვს იმიტომ, რომ ბუნებრივი გადარჩევა ერთნაირ გარემოში მოზინადრე განსხვავებულ ორგანიზმებში მსგავსი ადაპტაციების ჩამოყალიბებას უწყობს ხელს, როდესაც მათ ერთნაირი ამოცანების გადაწყვეტა უწევთ, მაგალითად, წყლის წინააღმდეგობის დაძლევა გადაადგილების დროს.

## უტოიოტიქმედება გატემოსთან

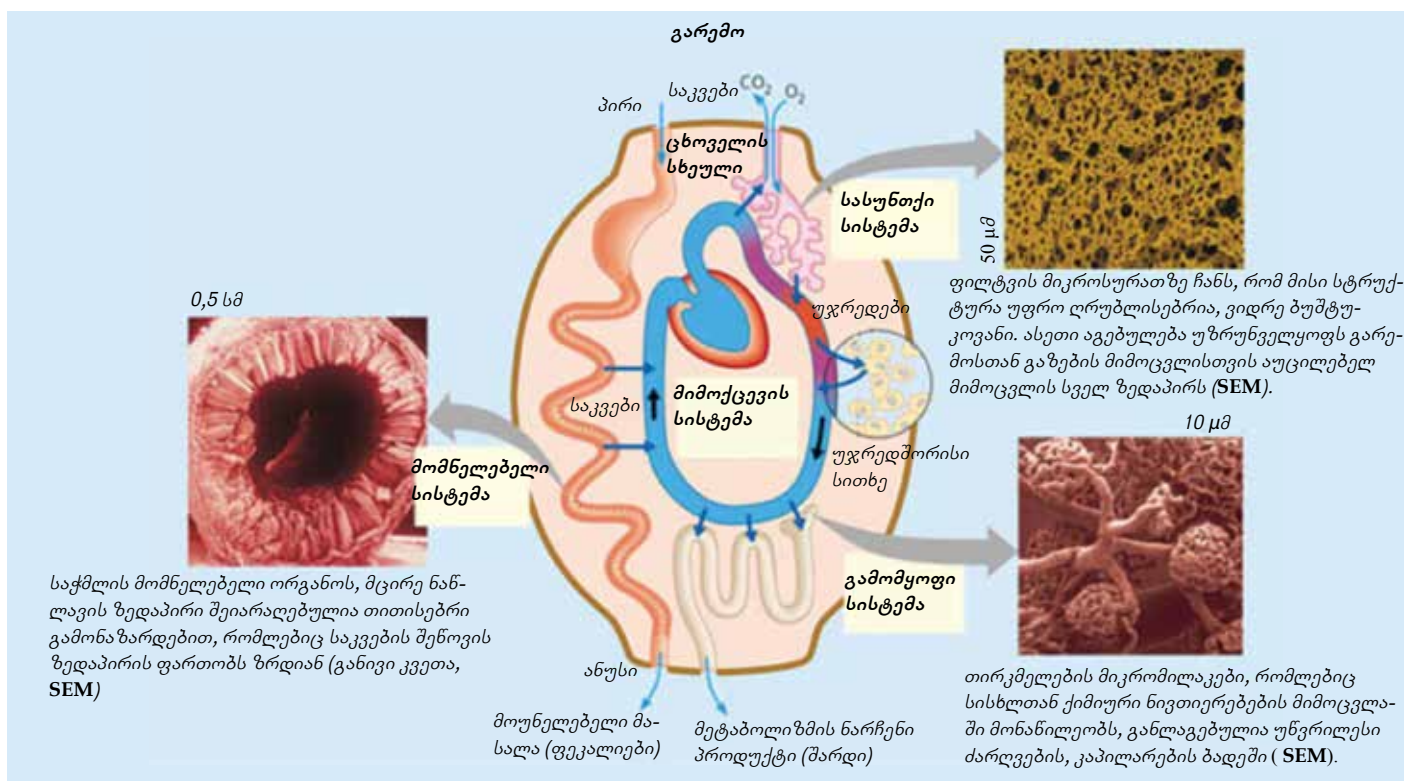
ცხოველის ზომა და ფორმა პირდაპირ გავლენას ახდენს ენერგიისა და ნივთიერებების მიმოცვლაზე ცხოველსა და გარემოს შორის. ცხოველის ცოცხალი უჯრედები მოთავსებულია თხევად გარემოში. ეს აუცილებელია იმისთვის, რომ არ დაირღვეს პლაზმური მემბრანის მთლიანობა. გარემოსთან საკვები ნივთიერებების მიმოცვლა ხდება მაშინ, როცა ნივთიერებები იხსნება თხევად გარემოში და ტრანსპორტირდება პლაზმური მემბრანის გავლით. როგორც ნაჩვენებია 40.3ა სურათზე, წყალში მოზინადრე ერთუჯრედიანების უმარტივესების უჯრედის პლაზმური მემბრანას აქვს



(ა) ერთი უჯრედი

(ბ) უჯრედების ორი შრე

▲ **სურათი 40.3 კონტაქტი გარემოსთან.** (ა) ერთუჯრედიანი უმარტივესის, ამებას შემთხვევაში გარემოსთან კავშირი მთელ ზედაპირს აქვს. (ბ) ჰიდრას სხეულში უჯრედების ორი შრისგან შედგება. წყალი ჰიდრას სხეულში პირის გავლით ცირკულირებს, ამიტომ მისი სხეულის ყველა უჯრედი გარემოსთან კონტაქტშია და მასთან ნივთიერებებს ცვლის.



▲ **სურათი 40.4** რთულად აგებული ცხოველის მიმოცვლის შინაგანი სისტემის ზედაპირი. ამ სქემატური ცხოველის მაგალითზე ასახულია ძუძუმწოვრების მიერ გარემოსთან ქიმიური ნივთიერებების მიმოცვლის ლოგისტიკა. ცხოველების უმეტესობის ორანოების ზედაპირები სპეციალიზირებულია გარემოსთან კონკრეტული ქიმიური ნივთიერებების მიმოცვლისთვის. როგორც წესი, ეს შინაგანი ზედაპირებია, მაგრამ ისინი სხეულის ზედაპირს გასასხნელების საშუალებით უკავშირდება (მაგალითად პირით). როგორც წესი, მიმოცვლის ზედაპირები იტოვება ან ნაკეცებს ქმნიან, რაც მათ არეაღს მნიშვნელოვნად ზრდის. ასეთი მიმოცვლის ზედაპირები როგორც საჭმლის მომწებებელ, ასევე სასუნთქ და გამომყოფ სისტემებს აქვს. ამ სისტემების გავლით მოხვედრილი ქიმიური ნივთიერებები მთელს სხეულში მიმოქცევის სისტემის საშუალებით ცირკულირებს.

საკმარისად დიდი ზედაპირი, რათა შეძლოს ციტოპლაზმის მთელი მოცულობის მოთხოვნილებების დაკმაყოფილება (ზედაპირის შეფარდება მოცულობასთან ზღუდავს ერთუჯრედიანი უმარტივესების ზომას).

მათგან განსხვავებით, მრავალუჯრედიან ცხოველებში, თითოეული პლაზმური მემბრანა ზომიერი მოცულობის ციტოპლაზმის მოთხოვნილებებს აკმაყოფილებს. ეს პროცესი (მემბრანაში ნივთიერებების გადაადგილება) მუშაობს მხოლოდ მაშინ, როდესაც ცხოველის ყველა უჯრედს კავშირი აქვს შესაბამის თხიერ გარემოსთან. ჰიდრას ტომრისებური სხეულის კედელი უჯრედების მხოლოდ ორი წყებისგან შედგება (სურ. 40.3 ბ). მისი როგორც გარე, ასევე შიდა შრის უჯრედები განლაგებულია წყალში: მისი ნაწილის ღრუ გახსნილია და დაკავშირებულია გარემოსთან. სხეულის ბრტყელი ფორმა ცხოველებს გარემოსთან მაქსიმალური შეხების შესაძლებლობას აძლევს. მაგალითად, პარაზიტული თას-მა ჭიები შეიძლება აღწევდნენ რამდენიმე მეტრ სიგრძეს, მაგრამ ისინი იმდენად თხელი არიან, რომ მათი სხეულის ყველა უჯრედს შეხება აქვს მასპინძლის ნაწილის თხიერ გარემოსთან, რომელიც მათი საკვების წყაროა.

ორშრიანობა და სხეულის ზედაპირის ბრტყელი ფორმა იძლევა გარემოსთან მაქსიმალური შეხების შესაძლებლობას, მაგრამ არ

იძლევა შინაგანი ორგანიზაციის გართულების საშუალებას. მრავალი ცხოველი ბევრად უფრო რთული აგებულებისაა და უჯრედების კომპაქტური გროვებისგან შედგება. მათი ზედაპირის შეფარდება მოცულობასთან არის ძალიან პატარა. მაგალითად, ვეშაპებში ზედაპირის შეფარდება მოცულობასთან ასი ათასჯერ ნაკლებია, ვიდრე დაფინებში (მცირე ზომის კიბოსნაირი). ამავდროულად, ვეშაპის თითოეული უჯრედი უნდა იყოს მოთავსებული სითხეში, რათა მიიღოს საკვები და ჟანგბადი. ძლიერ დანაოჭებული და განტოტვილი შიდა ზედაპირი აადვილებს გარემოსთან მიმოცვლას ვეშაპებში და სხვა რთული აგებულების ცხოველებში (სურ. 40.4).

მიუხედავად გარემოსთან ურთიერთქმედების გართულებისა, სხეულის რთულ ფორმას გარკვეული სარგებელი მოაქვს. მაგალითად, გარე მფარავი შრე იცავს ორგანიზმს მტაცებლებისგან, ძლიერი კუნთები სწრაფი გადაადგილების საშუალებას იძლევა, რთული საჭმლის მომწებლებელი სისტემა უზრუნველყოფს საკვების თანდათანობით გადამუშავებას და აკონტროლებს ენერგიის გამოთავისუფლებას. რადგან უჯრედის უშუალო გარემო სხეულის შინაგანი სითხეა, ცხოველის ორგანოთა სისტემამ შესაძლებელია მოახდინოს გავლენა სითხის შემადგენლობაზე. ეს ცვალებად გარემოში მცხოვრებ ცხოველს შედარებით სტაბილური შინაგანი გარემოს შენარჩუნების შესაძლებლობას აძლევს. სხეულის რთული აგე-

ბულება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ხმელეთზე მობინადრე ცხოველებისთვის, რადგან გარემო, რომელშიც მათ უწევთ არსებობა, ძლიერ ცვალებადია.

## ▶ ჯანცოცია ცესცი 40.1

1. როგორ უწყობს ხელს ზედაპირის დიდი ფართობი ნვრილი ნაწლავის, ფილტვების და თირკმელების ფუნქციების განხორციელებას?

## ▶ ჯანცოცია 40.2

### ცხოველის ფარმა და ფუნქცია ერთმანეთთან დაკავშირებულია ორგანიზაციის ყველა დონეზე

ცოცხალი ორგანიზმებისთვის დამახასიათებელია იერარქიული ორგანიზაცია. ორგანიზაციის თითოეულ დონეს აქვს მისთვის დამახასიათებელი სპეციფიკური თვისებები (იხ. თავი 1). ცხოველების უმრავლესობა შედგება სხვადასხვა ტიპის უჯრედებისგან, რომლებიც ქმნიან სხვადასხვა ფუნქციის მქონე ქსოვილს. ქსოვილები ერთიანდება ფუნქციურ ერთეულებად – ორგანოებად.

ორგანოთა ჯგუფები, რომლებიც ერთად ფუნქციონირებენ, ორგანოთა სისტემებს ქმნიან. მაგალითად, საჭმლის მომნელებელი სისტემა შედგება კუჭის, წვრილი ნაწლავის, მსხვილი ნაწლავისა და სხვა ორგანოებისგან, რომლებიც, თავის მხრივ, სხვადასხვა სახის ქსოვილისგან არის აგებული.

### ქსოვილის სტრუქტურა და ფუნქციები

ქსოვილი ერთნაირი აგებულებისა და ფუნქციის მქონე უჯრედების ჯგუფია. სხვადასხვა ტიპის ქსოვილებს სხვადასხვა აგებულება აქვს, რომელიც შესაბამისობაშია მათ ფუნქციებთან. ქსოვილები დაჯგუფებულია ოთხ ძირითად კატეგორიად: ეპითელიური ქსოვილი, შემაერთებელი ქსოვილი, კუნთოვანი ქსოვილი და ნერვული ქსოვილი (აღწერილია 40.5 სურათზე, მომდევნო სამ გვერდზე).

### ეპითელიური ქსოვილი

ეპითელიური ქსოვილი შედგება მჭიდრო ზოლებად ჩაწყობილი უჯრედებისგან. იგი ფარავს სხეულს გარედან, გამოყოფს ორგანოებს და სხეულის ღრუებს. ეპითელიუმის უჯრედები ერთმანეთთან დაკავშირებულია მჭიდრო კავშირებით (იხ. სურ. 6.31). უჯრედშორისი ნივთიერება ძალზე ცოტაა. მჭიდროდ ორგანიზებული ეპითელიუმი იცავს ორგანიზმს მექანიკური დაზიანებისგან, მიკრობების შეჭრისა და სითხის დაკარგვისგან. ეპითელიუმის ერთ-ერთი სახე, **ჯირკვლოვანი ეპითელიუმი** შეიწოვს ან/და გამოყოფს ქიმიურ სითხეებს. მაგალითად, საჭმლის მომნელებელი და სასუნ-

თქი ტრაქტის ღრუს ამომფენი ჯირკვლოვანი ეპითელიუმი ქმნის **ლორწოვან შრეს**, რომელიც გამოყოფს ლორწოს, რაც ატენიანებს და სრიალას ხდის ზედაპირს.

ეპითელიუმის ტიპების კლასიფიკაციისთვის ორი კრიტერიუმი გამოიყენება: უჯრედების შრეების რაოდენობა და უჯრედების ფორმა ზედაპირზე (იხ. სურ. 40.5). ერთშრიანი ეპითელიუმი უჯრედების ერთი შრე აქვს, ხოლო **მრავალშრიანი ეპითელიუმი** უჯრედების რამდენიმე შრისგან შედგება. „ცრუ მრავალშრიანი“ ეპითელიუმი სინამდვილეში წარმოქმნილია უჯრედების ერთი შრით, მაგრამ ეს უჯრედები სხვადასხვა სიგრძისაა, რაც მრავალშრიანობის შთაბეჭდილებას ქმნის. ზედაპირზე არსებული უჯრედების ფორმა შეიძლება იყოს **კუბური** (კუბის მაგვარი), **ცილინდრული** და **ბრტყელი**.

### შემაერთებელი ქსოვილი

**შემაერთებელი ქსოვილის** ძირითადი ფუნქციაა სხვა ქსოვილების ერთმანეთთან დაკავშირება და მათთვის საყრდენის უზრუნველყოფა. ეპითელიუმისგან განსხვავებით, შემაერთებელი ქსოვილისთვის დამახასიათებელია უჯრედების ფაშარი განლაგება უჯრედშორისი ნივთიერებაში ანუ მატრიქსში. უჯრედშორისი ნივთიერება ძირითადად შედგება ბოჭკოების ქსელისგან, რომელიც მოთავსებულია თხიერ, მყარ ან ლაბისებურ გარემოში. უჯრედშორისი ნივთიერებას გამოყოფს შემაერთებელი ქსოვილის უჯრედები.

შემაერთებელი ქსოვილის ბოჭკოები, რომლებიც ცილისგან შედგება, სამი სახისაა: კოლაგენის, ელასტიური და რეტიკულური.

**კოლაგენის ბოჭკოები** შედგება ცილა კოლაგენისგან, რომელიც ყველაზე უხვად გვხვდება ცხოველთა სამყაროში. კოლაგენის ბოჭკო არ არის ელასტიური და გაჭიმვისას ადვილად არ წყდება. თუ ხელის ზურგზე კანის გაჭიმვას შეეცდებით, კოლაგენი არ მოგცემთ საშუალებას ხორცი კანს მოაგლიჯოთ. **ელასტიური ბოჭკოები** გრძელი ძაფებია, რომელიც ნივთიერება ელასტინისგან შედგება. ელასტიური ძაფები ქსოვილს წელვადობას ანიჭებს და კოლაგენს ფუნქციურად ავსებს. ხელის ზურგზე კანის გამოწევის შემდეგ ელასტინის მეშვეობით იგი ძველ ფორმას უბრუნდება.

**რეტიკულური ბოჭკოები** ძალზე თხელი და დატოტვილია. კოლაგენისგან და გრძელი კოლაგენის ბოჭკოებისგან შემდგარი რეტიკულური ბოჭკოები ქმნიან მჭიდროდ ნაქსოვ სტრუქტურას, რომელიც შემაერთებელ ქსოვილს მიმდებარე ქსოვილებთან აკავშირებს.

ხერხედიანებში ვხვდებით შემაერთებელი ქსოვილის შემდეგ ძირითად ტიპებს: ფაშარი შემაერთებელი ქსოვილი, ცხიმოვანი ქსოვილი, ბოჭკოვანი ქსოვილი, ხრტილი, ძვალი და სისხლი (იხ. სურ. 40.5). ფაშარ შემაერთებელ ქსოვილს ძირითადად ორი ტიპის უჯრედები შეადგენს: ფიბრობლასტები და მაკროფაგები. **ფიბრობლასტები** გამოყოფს უჯრედშორისი ბოჭკოების ცილოვან ინგრედიენტებს. **მაკროფაგები** ამებოიდური უჯრედებია, რომლებიც ბოჭკოების ლაბირინთში მოგზაურობენ და უცხო ნაწილაკებსა და მკვდარ უჯრედებს ყლაპავენ ფაგოციტოზის საშუალებით (იხ. თავი 6). ამ თავში მოგვიანებით გაცნობით ამ უჯრედების დამახასიათებელ ფუნქციებს და სხვადასხვა ტიპის შემაერთებელ ქსოვილებს.

### კუნთოვანი ქსოვილი

**კუნთოვანი ქსოვილი** შედგება გრძელი უჯრედებისგან,

რომლებსაც კუნთოვანი ბოჭკოები ეწოდება. ბოჭკოები იკუმშება ნერვული სიგნალების საპასუხოდ. ბოჭკოების ციტოპლაზმაში ერთმანეთის პარალელურად განლაგებულია მიოფიბრილები – შეკუმშვის უნარის მქონე ერთეულები. მიოფიბრილები ცილების – აქტინისა და მიოზინისგან შედგება (კუნთის შეკუმშვის შესახებ შეგიძლიათ წაიკითხოთ 49-ე თავში). კუნთოვანი ქსოვილი ცხოველთა ქსოვილებს შორის ყველაზე მეტი რაოდენობით გვხვდება. კუნთის შეკუმშვა დიდი რაოდენობით ენერგიას საჭიროებს. ხერხემლიან ცხოველთა სხეულში სამი სახეობის კუნთოვან ქსოვილს გამოყოფენ: ჩონჩხის (განვიზოლიანი) კუნთები, გულის კუნთი და გლუვი კუნთები (**სურ. 40.5**).

## ნერვული ქსოვილი

**ნერვული ქსოვილი** შეიგრძნობს სტიმულებს და გადასცემს სიგნალებს (ნერვული იმპულსების ფორმით) ცხოველის სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეში. ნერვული ქსოვილის ფუნქციური ერთეული არის ნეირონი, ანუ ნერვული უჯრედი. ნეირონი სპეციალიზებული უჯრედი, რომელიც ღებულობს და აგზავნის ნერვულ სიგნალებს. ეს დეტალურად განხილულია 48-ე თავში. ცხოველების უმრავლესობაში ნერვული ქსოვილი კონცენტრირებულია ტვინში, რომელიც ფუნქციონირებს, როგორც ცხოველთა აქტივობის მაკონტროლებელი ცენტრი.

## ორგანოები და ორგანოთა სისტემები

მრავალ ცხოველში სხვადასხვა ქსოვილი წარმოქმნის **ორგანოებს**. მხოლოდ განვითარების დაბალ საფეხურზე მყოფ ცხოველებს (ღრუბელები და ზოგიერთი ნაწლავღრუიანები) არა აქვთ მსგავსი ორგანიზაცია. ზოგიერთ ორგანოში ქსოვილები შრეებს ქმნიან. მაგალითად, ხერხემლიანების კუჭს აქვს ოთხი ქსოვილის შრე (**სურ. 40.6**). თხელი ეპითელიუმი გამოფენს კუჭის ღრუს და გამოყოფს ლორწოს და მომწებებელ წვეს. ამ შრის გარეთ მოთავსებულია შემაერთებული ქსოვილის შრე, რომელიც გარშემორტყმულია გლუვი კუნთებით. შემაერთებული ქსოვილის მომდევნო შრე კი მთლიანად კუჭს ფარავს. შემაერთებული ქსოვილის გარსებით, **მეზენტერიუმით**, ხერხემლიანი ცხოველების მრავალი ორგანო დამაგრებულია სხეულის სითხით სავსე ღრუებში. ძუძუმწოვრებს აქვთ **გულმკერდის ღრუ**, სადაც მდებარეობს გული და ფილტვები და რომელიც გამოყოფილია მის ქვემოთ მდებარე **მუცლის ღრუსგან** კუნთოვანი შრით – დიაფრაგმით.

ორგანოები ქმნიან ორგანოთა სისტემებს (**იხ. ცხრილი 40.1**), რომლებიც ორგანიზმის ცხოველმყოფელობისთვის აუცილებელ ძირითად ფუნქციებს ასრულებს.

თითოეული **ორგანოთა სისტემა** რამდენიმე ორგანოსგან შედგება და მისთვის დამახასიათებელ ფუნქციას ახორციელებს. აგრეთვე, ყველა სისტემის კოორდინირებული მოქმედება აუცილებელია ცხოველის არსებობისთვის. მაგალითად, საჭმლის მომწებელი ტრაქტის მიერ შეწოვილი საკვები ნივთიერებები ვრცელდება მთელ ორგანიზმში სისხლის მიმოქცევის სისტემის დახმარებით. გული, რომლის შეკუმშვის შედეგადაც სისხლი სისხლძარღვებში მოძრაობს, დამოკიდებულია საჭმლის მომწებებელი სისტემის მიერ შეთვისებულ საკვებ ნივთიერებებზე. ასევე დამოკიდებულია

უანგბადზე, რომლის მოწოდებასაც სუნთქვის სისტემა უზრუნველყოფს. ნებისმიერი ორგანიზმი, იქნება ეს ერთი უჯრედი, თუ ორგანოთა სისტემების ნაკრები, ინარჩუნებს სიცოცხლეს თავისი შემადგენელი ნაწილების კოორდინირებული მოქმედების საშუალებით. ამგვარი მოქმედება ბევრად უფრო რთულია, ვიდრე ცალკეული შემადგენელი ნაწილების მოქმედების უბრალო ჯამი.

## კონცეფცია ცისტი 40.2

1. აღწერეთ, როგორ შეესაბამება კუჭის ღრუს ამომფენი ეპითელიური ქსოვილის აგებულება მის მიერ შესრულებულ ფუნქციას
2. გამოთქვით მოსაზრება, რატომ წარმოადგენს საფრთხეს შემაერთებული ქსოვილის დაავადება სხეულის ორგანოთა უმრავლესობისთვის
3. როგორ ურთიერთქმედებენ კუნთოვანი და ნერვული ქსოვილები?

## კონცეფცია 40.3

## ცხოველები იყენებენ საკვების ქიმიურ ენერგიას ფორმისა და ფუნქციის შესანარჩუნებლად

ყველა ორგანიზმი საჭიროებს ქიმიურ ენერგიას ზრდისთვის, აღდგენისთვის და სხვა ფიზიოლოგიური პროცესისთვის. როგორც აღვნიშნეთ, ორგანიზმების განსხვავება შეიძლება ენერგიის მიღების ფორმების მიხედვით. აუტოტროფები (მცენარეები) გამოიყენებენ სინათლის ენერგიას იმისთვის, რომ ააგონ ორგანული მოლეკულები, რომლებიც, თავის მხრივ, დიდწილად ენერგიას შეიცავს. შემდგომში მცენარეები იყენებენ მათ მიერვე სინთეზირებულ ორგანულ მოლეკულებს საწვავად. მათგან განსხვავებით, ჰეტეროტროფები (ცხოველები) მათთვის საჭირო ენერგიას საკვებიდან იღებენ, რომელიც სხვა ორგანიზმების მიერ სინთეზირებულ ორგანულ მოლეკულებს შეიცავს.

## ბიოენერგეტიკა

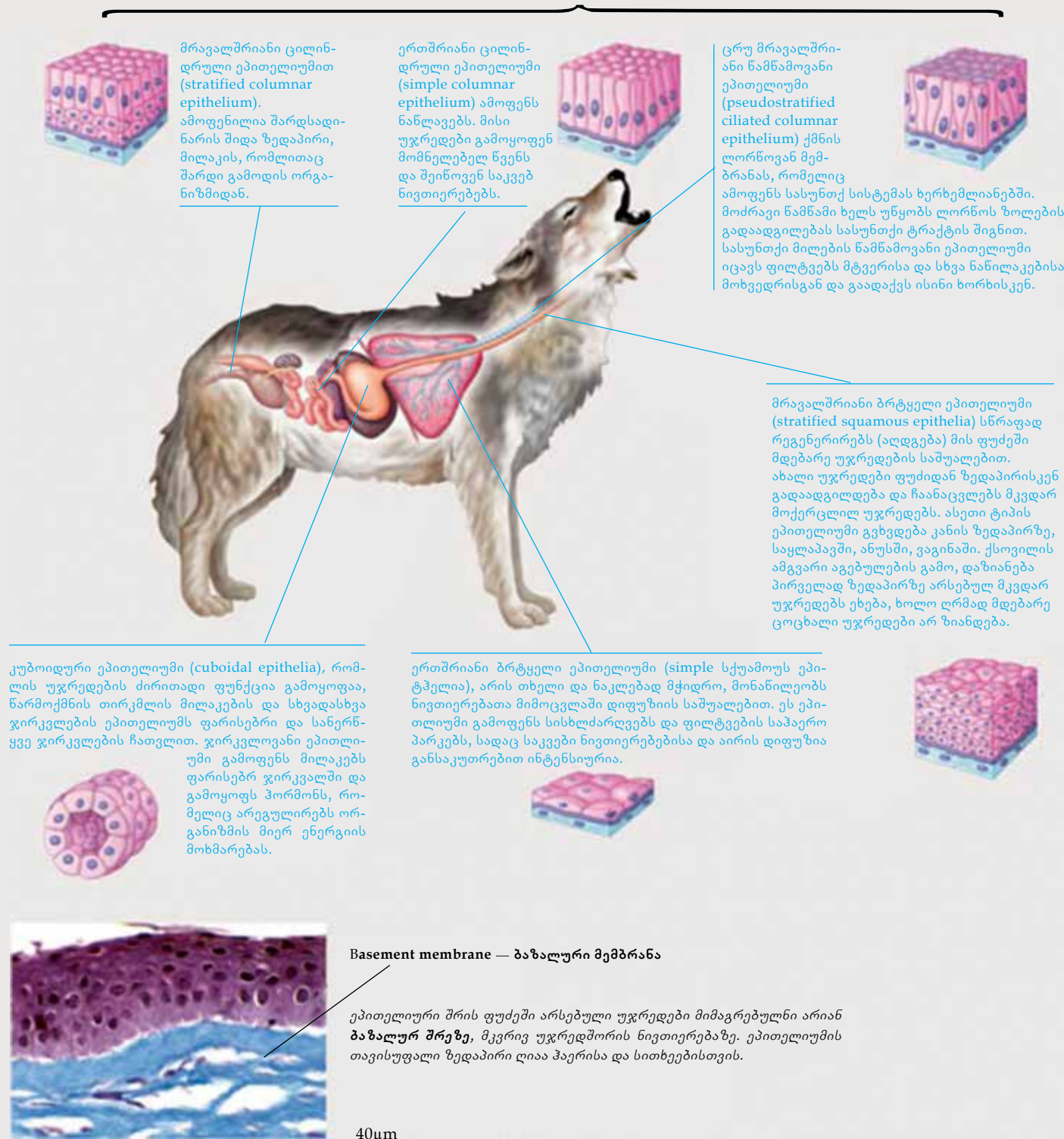
ენერგიის დინება ცხოველურ ორგანიზმში – მისი **ბიოენერგეტიკა**, განსაზღვრავს ცხოველის ქცევას, ზრდას, გამრავლებასა და საკვების მოთხოვნილებას. ცხოველთა ბიოენერგეტიკის შესწავლა ძალზე გვეხმარება ცხოველის ადაპტაციის თავისებურებების გარკვევაში.

## ენერგიის წყაროები და მათი მდებარეობა

ცხოველები იღებენ ქიმიურ ენერგიას საკვებიდან. ფერმენტული ჰიდროლიზი მომწებებელ ღრუში შლის საკვებს შემადგენელ მონომერებათ (**იხ. სურ. 5.2ბ**). ენერგიის შემცველ მოლეკულებს

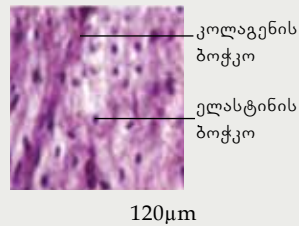
ეპითელიური ქსოვილი

(Columnar epithelia) ცილინდრული ეპითელიუმი, რომლის უჯრედები ციტოპლაზმას დიდი ოდენობით შეიცავენ. იგი გვხვდება ჩვეულებრივ იმ ორგანოებში, სადაც ნივთიერებების გამოყოფა ან აქტიური შეწოვა (აბსორბცია) მნიშვნელოვან ფუნქციას წარმოადგენს.

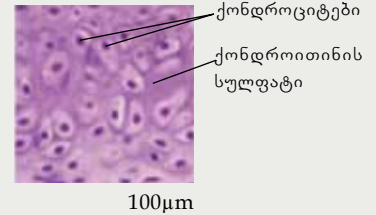


## შემაერთიებელი ქსოვილი

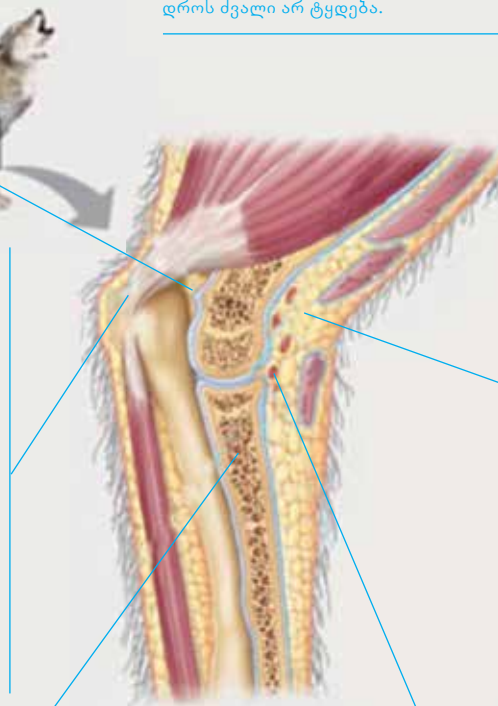
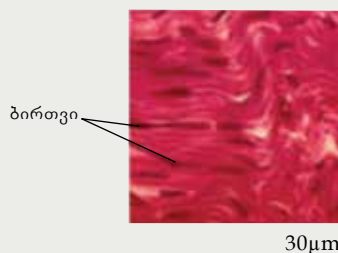
ცხოველის ორგანიზმში ყველაზე დიდი ოდენობით გვხვდება შემაერთებელი ქსოვილის ერთ-ერთი სახე: ფაშარი შემაერთებელი ქსოვილი. იგი აერთებს ეპითელიუმს მიმდებარე ქსოვილებთან და „შესაფუთი მასალის“ როლს ასრულებს, ორგანოებს თავიანთ ადგილებზე აჩერებს. შემაერთებელ ქსოვილს ფაშარი ეწოდება იმიტომ, რომ მისი ბოჭკოები ფაშარად არის განლაგებული. აქ სამივე ტიპის ბოჭკოები გვხვდება: კოლაგენის, ელასტიური და რეტიკულური. ფიბრობლასტები და მაკროფაგები განლაგებულია ბოჭკოების მასაში.



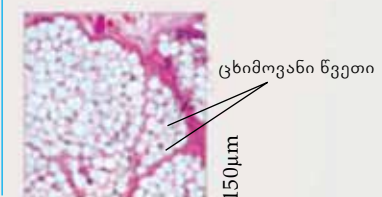
ხრტილში (Cartilage) უხვად არის კოლაგენის ბოჭკოები, რომლებიც მოთავსებულია წელვად უჯრედშორის ნივთიერებაში. ეს ნივთიერება შედგება ცილოვან-ნახშირწყლოვანი კომპლექსისგან, სახელწოდებით ქონდროიტინ სულფატი. ქონდროიტინ სულფატს და კოლაგენს გამოყოფს უჯრედები, რომლებსაც ქონდროციტები ეწოდება. აღნიშნული ნივთიერებების შემადგენლობა ისეთია, რომ ხრტილს სიმკვრივეს და მოქნილობას ანიჭებს. ხერხემლიანების უმრავლესობას ემბრიონალური განვითარების პერიოდში ხრტილოვანი ჩონჩხი აქვს. ხერხემლიანების ნაწილში ემბრიონალური განვითარების ბოლოს ხდება ხრტილოვანი ქსოვილის ძვლოვანი ჩანაცვლება. მიუხედავად ამისა, ხრტილი ზოგიერთ ადგილებში რჩება, მაგალითად: ხრტილოვანი დისკები მალბეს შორის, რომლებიც ბალიშის ფუნქციას ასრულებენ; ზოგიერთი ძვლის თავი. ამგვარი სტრუქტურების მოქნილობა ამორტიზაციის საშუალებას იძლევა. ამიტომ ფიზიკური ზემოქმედების დროს ძვალი არ ტყდება.



ბოჭკოვანი შემაერთებელი ქსოვილი (Fibrous connective tissue) ძალზე მჭიდროა, დიდი რაოდენობით კოლაგენის ბოჭკოების შემცველობის გამო. ბოჭკოები ქმნიან პარალელურ გროვებს, რომლებიც ქსოვილს ძალას ანიჭებს. ბოჭკოვანი შემაერთებელი ქსოვილი მოთავსებულია მყესებში, რომლითაც კუნთები ძვლებს ემაგრება და ლიგამენტებში, მათი საშუალებით კი სახსრებში ძვლები ემაგრება ერთმანეთს.

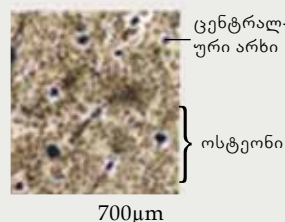


ცხიმოვანი ქსოვილი (adipose tissue) ფაშარი შემაერთებელი ქსოვილის ფორმაა. აქ ხდება ცხიმის დამარაგება ცხიმოვან უჯრედებში, რომლებიც უჯრედშორისში არიან განლაგებული. ცხიმოვანი ქსოვილი მოქმედებს როგორც გამომფენი და საიზოლაციო შრე, აგრეთვე მასში გროვდება ენერგია ცხიმოვანი მოლეკულების სახით (იხილეთ სურათი 4.6). ცხიმოვანი უჯრედები შეიცავენ ცხიმის მსხვილ წვეთებს. ცხიმოვანი უჯრედი იბერება, როცა მასში ცხიმი გროვდება და იჩუტება, როცა ცხიმი ენერგიის წყაროდ გამოიყენება.

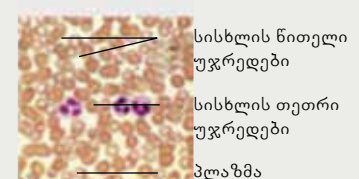


ხერხემლიანი ცხოველების უმრავლესობის სხეულის საყრდენია ძვლოვანი ჩონჩხი. ძვალი მინერალიზებული შემაერთებელი ქსოვილია. ძვლის წარმოქმნელ უჯრედებს ოსტეობლასტები ეწოდება. ისინი განთავსდება კოლაგენის უჯრედშორისში (მატრიქსში). კალციუმის, მაგნიუმისა და ფოსფატის იონები კომბინირდება და ქმნის მინერალურ ჰიდროქსიპატატის, რომელიც უჯრედშორის სიმყარეს ანიჭებს.

მყარი მინერალური მარილებისა და მოქნილი კოლაგენის ერთობლიობა ძვალს ხრტილზე მეტად მყარს ხდის. ძუძუმწოვრების ძვლის მიკროსკოპული სტრუქტურა წარმოდგენილია განმეორებადი ერთეულებით, რომლებსაც ოსტეონები (ანუ ჰავერსის სისტემები) ეწოდება. თითოეულ ოსტეონს აქვს მინერალიზებული უჯრედშორისის კონცენტრული შრეები, რომლებიც გარს ერტყმის ცენტრალურ არხს. ცენტრალურ არხში სისხლძარღვები და ნერვები გადის, რომლებიც ძვალს საკვებით ამარაგებენ და მისკენ და მისგან იმპულსები გადააქვთ.



სისხლი (Although blood...) განსხვავდება სხვა შემაერთებელი ქსოვილებისგან, მას აქვს ძალზე დიდი მოცულობის უჯრედშორისი ნივთიერება. ამ შემთხვევაში უჯრედშორისი თხევადია და მას პლაზმა ეწოდება. პლაზმა შედგება წყლის, მარილებისა და სხვადასხვა ხსნადი ცილისგან. პლაზმაში ვხვდებით სისხლის ორი ტიპის უჯრედებს: ერითროციტებს (სისხლის წითელ უჯრედებს) და ლეიკოციტებს (სისხლის თეთრ უჯრედებს), აგრეთვე უჯრედის ფრაგმენტებს, რომლებსაც თრომბოციტები (platelets) ეწოდება. სისხლის წითელ უჯრედებს გადააქვთ ჟანგბადი, თეთრი უჯრედები იცავენ ორგანიზმს ვირუსების, ბაქტერიებისა და სხვა უცხო სხეულებისგან, ხოლო თრომბოციტები კი სისხლის შედედებას უწყობენ ხელს. თხიერი უჯრედშორისი სისხლის უჯრედების, საკვები ნივთიერებების და ნარჩენების სწრაფ ტრანსპორტს უზრუნველყოფს.

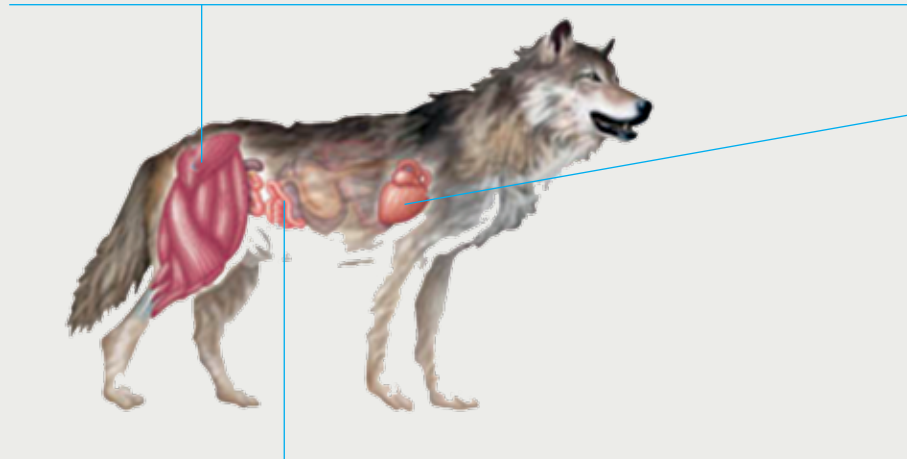
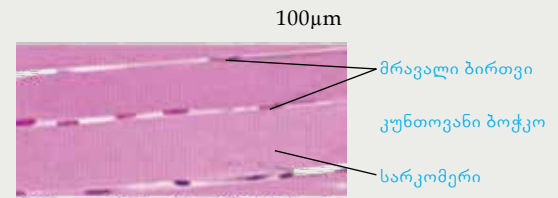


## სურათი 40.5 (გაგზბულა)

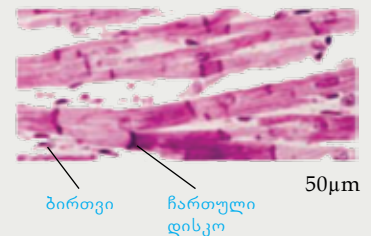
### კვლევა: ცხოველის ქსოვილების აგებულება და ფუნქცია

#### კუნთოვანი ქსოვილი

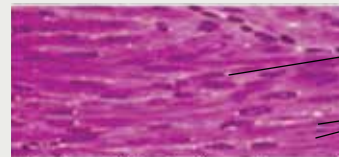
(Attached to bones...) ჩონჩხის კუნთები ძვლებს მყესების საშუალებით ემაგრებიან და სხეულს თავისუფალი მოძრაობის საშუალებას აძლევენ. ჩონჩხის კუნთები შედგება გრძელი უჯრედების გროვებისგან, რომლებსაც ბოჭკოები ეწოდება. ბოჭკო თავის მხრივ შედგება ჭიმების გროვებისგან, რომლებსაც მიოფიბრილები ეწოდება. შეკუმშვის უნარის მქონე ერთეულების, სარკომერების განივი განლაგება ბოჭკოების მთელ სიგრძეზე უჯრედს ზოლიან შესახედობას აძლევს მიკროსკოპის ქვეშ. ამიტომ, ხშირად ჩონჩხის კუნთებს განივზოლიანს უწოდებენ. ზრდასრულ ძუძუმწოვრებს აქვს კუნთოვანი უჯრედების ფიქსირებული რაოდენობა. კუნთების განვითარება არ ზრდის კუნთოვანი უჯრედების რაოდენობას, არამედ ზრდის უკვე არსებული უჯრედების ზომებს.



(Cardiac muscle) გულის კუნთი ქმნის გულის კედელს, რომელსაც შეკუმშვის უნარი აქვს. მას აქვს იგივე განივზოლიანობა, როგორც ჩონჩხის კუნთებს და მათთვის დამახასიათებელი შეკუმშვის თავისებურებები. თუმცა, ჩონჩხის კუნთებისგან განსხვავებით, გულის კუნთი უნებლიედ მოქმედებს. გულის კუნთის ბოჭკოები იტოტება და ერთმანეთს სპეციალური ჩართული დისკოების საშუალებით უკავშირდება, რომლებსაც გადააქეთ სიგნალები უჯრედიდან უჯრედზე და გულის ცემის სინქრონიზაციას უწყობენ ხელს.



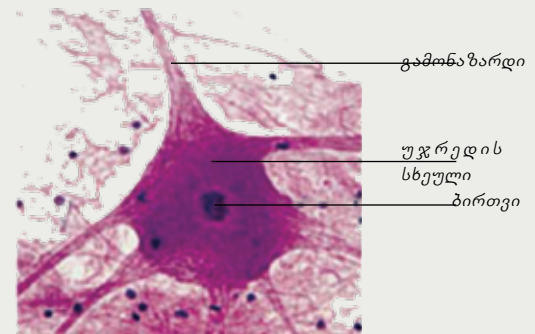
(Smooth muscle) გლუვი კუნთები, რომელსაც ასე იმიტომ ეწოდება, რომ იგი მოკლებულია ზოლიანობას, გვხვდება საჭმლის მომნელებელი სისტემის, შარდის ბუშტის, არტერიებისა და სხვა შინაგანი ორგანოების კედლებში. უჯრედები ამ ქსოვილში თითისტარისებურია. ისინი უფრო ნელა იკუმშება, ვიდრე ჩონჩხის კუნთებში, მაგრამ უფრო ხანგრძლივი დროის განმავლობაში შეუძლია შეკუმშვა. გლუვი კუნთებს, ისევე როგორც ჩონჩხის კუნთებს, ხსვად-სხვა ტიპის ნერვი აკონტროლებს, გლუვი კუნთების მოქმედება უნებლიეთ ხდება. მაგალითად, ისეთი მოქმედებების დროს, როგორიც არის სლოკინი ან არტერიების შევიწროვება.



#### ნერვული ქსოვილი



ნერვული უჯრედები (ნეირონები) ნერვული ქსოვილის ძირითად ერთეულს წარმოადგენენ. ნეირონი შედგება უჯრედის სხეულისგან და ორი ან მეტი გამონაზარდისგან, რომლებსაც აქსონი და დენდრიტი ეწოდება. აქსონი ზოგიერთ ნეირონებში შეიძლება რამდენიმე მეტრს აღწევდეს. დენდრიტებს გადააქეთ ინფორმაცია თავიანთი ბოლოებიდან ნეირონის დანარჩენ ნაწილზე. აქსონი ატარებს იმპულსს მეორე ნეირონის ან ეფექტორისკენ (მაგალითად, კუნთოვანი უჯრედისკენ). ზოგიერთი მოტორული ნეირონის გრძელი აქსონი შესაძლებელს ხდის კუნთების გაცნობიერებულ სწრაფ პასუხს.

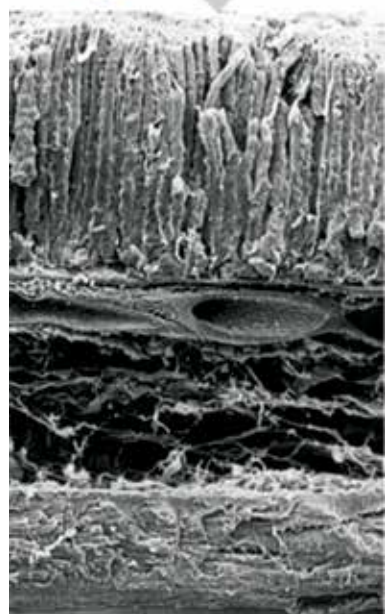


## ცხრილი 40.1 ორგანოთა სისტემები: მათი ძირითადი კომპონენტები და ფუნქციები ბუბრეჭოვარში და ფუნქციები

| ორგანოთა სისტემები            | ძირითადი კომპონენტები                                                                     | ძირითადი ფუნქციები                                                                                                    |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| საჭმლის მომნელებელი           | პირი, ხახა, საყლაპავი, კუჭი, ნაწლავები, ღვიძლი, პანკრეასი, ანუსი                          | საკვების გადამუშავება (დაქუცმაცება, მონელება, შეწოვა, ნარჩენების მოშორება)                                            |
| სისხლის მიმოქცევის სუნთქვის   | გული, სისხლძარღვები, სისხლი                                                               | ორგანიზმში ნივთიერებების ტრანსპორტირება                                                                               |
| იმუნური და ლიმფური            | ფილტვები, ტრაქეა, სხვა სასუნთქი მილები                                                    | აირთა ცვლა (ჟანგბადის შეთვისება, ნახშირორჟანგის გამოყოფა)                                                             |
| გამოყოფის                     | ძვლის ტვინი, ლიმფური კვანძები, თიმუსი, ელენთა, ლიმფური ძარღვები, სისხლის თეთრი ელემენტები | ორგანიზმის დაცვა (ინფექციებთან და კიბოსთან ბრძოლა)                                                                    |
| ენდოკრინული                   | თირკმელები, შარდსადენი, შარდის ბუშტი, ურეთერა                                             | მეტაბოლიზმის შედეგად წარმოქმნილი ნარჩენი ნივთიერებებისგან ორგანიზმის გათავისუფლება, სისხლის ოსმოსური წნევის რეგულაცია |
| გამრავლების                   | ჰიპოფიზი, ფარისებრი ჯირკვალი, პანკრეასი, სხვა შინაგანი სეკრეციის ჯირკვლები                | ორგანიზმის მოქმედების კოორდინაცია (როგორც არის საჭმლის მონელება, მეტაბოლიზმი)                                         |
| ნერვული                       | საკვერცხვები, სათესლეები და მათთან დაკავშირებული ორგანოები                                | გამრავლების კოორდინაცია, სტიმულების აღქმა და მათზე საპასუხო მოქმედების ჩამოყალიბება                                   |
| ინტეგუმენტის (მფარავი შრეები) | თავის ტვინი, ზურგის ტვინი, ნერვები, გრძნობათა ორგანოები                                   | ორგანიზმის მოქმედების კოორდინაცია, სტიმულების აღქმა და მათზე საპასუხო მოქმედების ჩამოყალიბება                         |
| ჩონჩხი                        | კანი და მისი დერივატები (თმა, ფრჩხილები, კანის ჯირკვლები)                                 | მექანიკური დაზიანებებისგან, ინფექციებისგან, გამომშრებისგან ორგანიზმის დაცვა, თერმორეგულაცია                           |
| კუნთოვანი                     | ჩონჩხი (ძვლები, მყესები, ლიგამენტები, ხრტილი)                                             | სხეულის საყრდენი, შინაგანი ორგანოების დაცვა, მოძრაობა                                                                 |
|                               | ჩონჩხის კუნთები                                                                           | მოძრაობა, გადაადგილება                                                                                                |



◀ **სურათი 40.6 კუჭის (საჭმლის მომნელებელი სისტემის ორგანოს) ქსოვილები.** კუჭსა და საჭმლის მომნელებელი სისტემის სხვა მილაკოვან ორგანოებს ოთხი ძირითადი ქსოვილოვანი შრე აქვთ.



0.2μm

**ლორწოვანი შრე (Mucosa).** იგი წარმოადგენს ეპითელიურ ქსოვილს, რომელიც ამოფენს კუჭის ღრუს

**ნახევრად ლორწოვანი შრე (Submucosa).** წარმოადგენს შემაერთებელი ქსოვილის უჯრედშორისით, რომელიც შეიცავს სისხლძარღვებსა და ნერვებს

**კუნთოვანი შრე (Muscularis).** შედგება ძირითადად გლუვი კუნთებისგან

**სეროზული შრე (Serosa).** შემაერთებელი და ეპითელიური ქსოვილების თხელი შრე

შთანთქავს სხეულის უჯრედები. შეწოვის შემდეგ ენერგიის შემცველი მოლეკულების ძირითადი ნაწილი გამოიყენება ატფ-ის სინთეზისთვის. (იხ. თავი 9). ატფ-ის ქიმიური ენერგია გამოიყენება უჯრედის ფუნქციონირებისთვის. ამის შედეგად, ორგანოები და ორგანოთა სისტემები ასრულებენ თავიანთ ფუნქციებს. ვინაიდან ატფ-ის წარმოქმნა და გამოყენება სითბოს გამოყოფას უკავშირდება, ცხოველები თავიანთ გარემოში გასცემენ სითბოს (სითბოს ბალანსი უფრო დეტალურად ამავე თავში მოგვიანებით განიხილება).

მას შემდეგ, რაც ენერგიის სასიცოცხლოდ აუცილებელი მოთხოვნილება დაკმაყოფილებულია, საკვების დარჩენილი მოლეკულები გამოიყენება ბიოსინთეზისთვის, მაგალითად, სხეულის ზრდისთვის, აღდგენისთვის, ცხიმის დამარაგებისთვის, გამეტების წარმოქმნისთვის (სურ. 40.7). ბიოსინთეზის პროცესში ახალი სტრუქტურების ასაგებად გამოიყენება ნახშირბადის ჩონჩხი და ატფ. ზოგჯერ ბიოსინთეზის პროდუქტები, მაგალითად, ცხიმი, იშლება შემადგენელ მარტივ მოლეკულებად დამატებითი ატფ-ის სინთეზისთვის (იხ. სურ. 9.19).

## ენერგიის მოხმარების განსაზღვრა

ცხოველის ბიოენერგეტიკის გაგება დამოკიდებულია მისი ენერგეტიკული მოთხოვნილებების განსაზღვრაზე. საკვებიდან მიღებული ენერგიის რა რაოდენობა სჭირდება ცხოველს სიცოცხლისთვის? რამდენი ენერგია იხარჯება სიარულის, სირბილის, ცურვის ან ფრენის დროს? მიღებული ენერგიის რა ნაწილი იხარჯება გამრავლებისთვის? ფიზიოლოგები ზომავენ ცხოველის მიერ ქიმიური ენერგიის მოხმარების სიჩქარეს და მის ცვალებადობას, რათა უპასუხონ დასმულ კითხვებს.

ენერგიის რაოდენობას, რომელსაც ცხოველი დროის ერთეულში იყენებს, **მეტაბოლიზმის სიჩქარე** ეწოდება. იგი წარმოადგენს ჯამურ ენერგიას, რომელიც იხარჯება დროის ერთეულის განმავლობაში ბიოქიმიური რეაქციების მსვლელობისას. ენერგია იზომება კალორიებში (კალ.) ან კილოკალორიებში (კკალ.). ერთი კილოკალორია უდრის 1000 კალორიას.

მეტაბოლიზმის სიჩქარის განსაზღვრის სხვადასხვა გზა არსებობს. რადგან უჯრედის სუნთქვისას ენერგიის ნაწილი გარდაიქმნება სითბოდ, მეტაბოლიზმის სიჩქარე გაიზომება ცხოველის მიერ სითბოს გაცემის მიხედვით. მეტაბოლიზმის სიჩქარის განსაზღვრის არაპირდაპირი მეთოდია უჯრედის სუნთქვისას მოხმარებული ჟანგბადის ან გამოყოფილი ნახშირორჟანგის გაზომვა (**სურ. 40.8**). ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში, საკვების მოხმარება და მისი ენერგიის შემცველობა (დაახლოებით 4,5-5 კკალ ცილისა და ნახშირწყლის, ხოლო 9 კკალ ცხიმის ერთ გრამზე) აგრეთვე გამოიყენება მეტაბოლიზმის სიჩქარის განსაზღვრისთვის. ამ მეთოდის გამოყენებისას უნდა გამოირიცხოს ენერგია, რომელიც იკარგება საჭმლის ნარჩენების (ექსკრემენტებისა და შარდის) სახით.

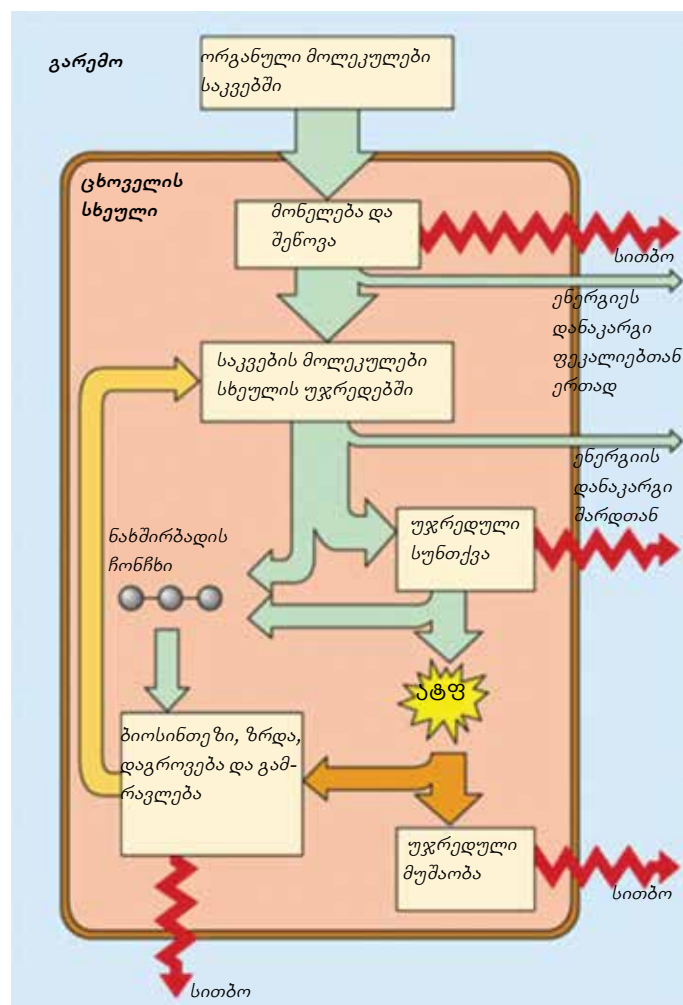
## ბიოენერგეტიკული სტრატეგიები

ცხოველების მეტაბოლიზმის სიჩქარე დაკავშირებულია მათ ბიოენერგეტიკულ სტრატეგიებთან.

ორი ტიპის ბიოენერგეტიკული სტრატეგია არსებობს: ენდოთერმული და ექტოთერმული თერმორეგულაცია. ფრინველები და ძუძუმწოვრები ენდოთერმული ცხოველებია. აღნიშნულ ცხოველებში სხეული თბება სითბოთი, რომელიც გამოიყოფა ნივთიერებათა ცვლის დროს და სხეულის ტემპერატურა მერყეობს ვიწრო ფარგლებში. ენდოთერმულობა ენერგეტიკულად ძვირი სტრატეგიაა, რომელიც აქტიური ცხოველების საშუალებას აძლევს ცხოველებს გარემოს ტემპერატურის მნიშვნელოვანი ცვალებადობის პირობებში. მათგან განსხვავებით, თევზები, ამფიბიები, რეპტილიები და უხერხემლოები ექტოთერმული ცხოველებია. აღნიშნული ცხოველები სითბოს ძირითადად გარემოდან იღებენ. ვინაიდან ტემპერატურის შენარჩუნება ენერგიის დიდ ხარჯთან არის დაკავშირებული, ექტოთერმულ ცხოველებს ნაკლები ენერგიის ხარჯი აქვთ, ვიდრე ენდოთერმულებს. ზოგადად, ექტოთერმულებთან შედარებით, ენდოთერმულ ცხოველებს უფრო მაღალი მეტაბოლოზმის სიჩქარე აქვთ.

## ზეგავლენა მეტაბოლიზმის სიჩქარეზე

მრავალ ფაქტორი ახდენს ზეგავლენას მეტაბოლიზმის სიჩქარეზე. ერთ-ერთი საინტერესო საკითხია ურთიერთკავშირი მეტაბოლიზმის სიჩქარესა და სხეულის ზომას შორის.

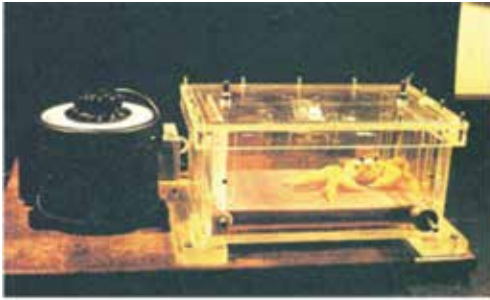


▲ **სურათი 40.7** ცხოველის ბიოენერგეტიკა: მიმოხილვა.

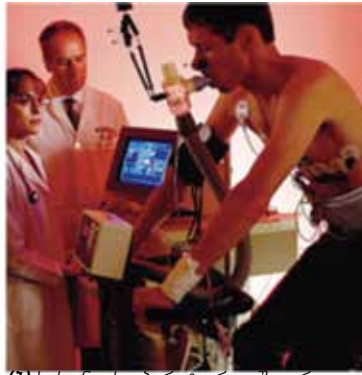
## ზომა და მეტაბოლიზმის სიჩქარე

მრავალ ცხოველზე ჩატარებულ ექსპერიმენტში ნაჩვენებია იყო, რომ ენერგიის მოხმარება დაანგარიშებული ერთ გრამ წონაზე უკუპროპორციულია სხეულის ზომის. მაგალითად, თავგში 20-ჯერ მეტი ენერგიის ხარჯი მოდის გრამ წონაზე, ვიდრე სპილოში. მაღალი მეტაბოლიზმის სიჩქარე პატარა ცხოველებში საჭიროებს მეტ ჟანგბადს. აგრეთვე, პატარა ცხოველებს აქვთ უფრო სწრაფი სუნთქვის რიტმი და გულის ცემა. ამის გარდა, ისინი მიირთმევენ მეტ საჭმელს დაანგარიშებულს ერთ გრამ წონაზე.

უკუპროპორციული კავშირის ზუსტი მიზეზი მეტაბოლიზმის სიჩქარესა და სხეულის ზომას შორის ბუნდოვანია. ერთი ჰიპოთეზის თანახმად, ვინაიდან პატარა ცხოველებში სხეულის ზედაპირის მოცულობასთან ფარდობა დიდია, ენდოთერმულ ცხოველებში ტემპერატურის შენარჩუნების ენერგეტიკული ხარჯიცი დიდი უნდა იყოს. თუმცა ეს ჰიპოთეზა ლოგიკურია, გაუგებარი რჩება, რატომ არსებობს აღნიშნული უკუპროპორციული ურთიერთობა ექტოთერმულ ცხოველებშიც. მეცნიერებები განაგრძობენ აღნიშნული საკითხების კვლევას.



(ა) ამ ფოტოსურათზე ნაჩვენებია რესპირომეტრში მოთავსებული მოჩვენება - კობორჩხალა. კამერაში მუდმივი ტემპერატურაა, ის ნიადაგზე  $O_2$  - ის ცნობილი კონცენტრაციის შემცველი გაზით. კობორჩხალას მეტაბოლიზმის სიჩქარე გამოითვლება შეღწეულ  $O_2$ -სა და რესპირომეტრიდან გამოყოფილი  $O_2$ -ის რაოდენობის სხვაობით. კრაბი იმყოფება სარბენ ბილიკზე და სანამ გაზომვები ტარდება მუდმივი სიჩქარით მირბის.



(ბ) სასუნთქი აპარატურით შეიარაღებული ადამიანის ნივთიერებათა ცვლის სიჩქარე იზომება უძრავ ველოსიპედზე ვარჯიშის მსვლელობისას.

▲ **სურათი 40.8 მეტაბოლიზმის სიჩქარის გაზომა**

## აქტივობა და მეტაბოლიზმის სიჩქარე

ყოველი ცხოველი ხასიათდება მეტაბოლიზმის სიჩქარის ცვალებადობით. მეტაბოლიზმის მინიმალური სიჩქარე საჭიროა ძირითადი სასიცოცხლო პროცესების შესანარჩუნებლად. ენდოთერმული ცხოველის მეტაბოლიზმის სიჩქარეს, რომელიც მოსვენებულ მდგომარეობაში იმყოფება ცარიელ კუჭზე და არ განიცდის სტრესს, **მეტაბოლიზმის ძირითადი სიჩქარე** ეწოდება (BMR – basal metabolic rate). ადამიანებში ძირითადი სიჩქარე შეადგენს 1,600-1,800 კკალ-ს დღის განმავლობაში ზრდასრულ მამაკაცებში და 1,300-1,500 კკალ-ს დღის განმავლობაში ქალებში. აღნიშნული სიჩქარე, დაახლოებით, 75-ვატის ელექტრონათურის ენერგეტიკული მოთხოვნილების ტოლფასია.

ექტოთერმულ ცხოველებში სხეულის ტემპერატურა იცვლება გარემოს ტემპერატურის მიხედვით, ასევე იცვლება მეტაბოლიზმის სიჩქარეც. მეტაბოლიზმის ძირითადი სიჩქარისგან განსხვავებით, რომელიც შესაძლებელია განისაზღვროს გარემოს ცვალებადი ტემპერატურის პირობებში, **ექტოთერმული ცხოველების მეტაბოლიზმის მინიმალური სიჩქარე** უნდა განისაზღვროს ფიქსირებულ ტემპერატურაზე. **ექტოთერმული ცხოველის მეტაბოლიზმის სიჩქარეს** გარკვეულ ტემპერატურაზე, იმ პირობით რომ ეს ცხოველი ისვენებს, საკვებს არ ინელებს და სტრესის ქვეშ არ იმყოფება, ეწოდება **მეტაბოლიზმის სტანდარტული სიჩქარე (SMR)**.

როგორც ექტოთერმულ, ისე ენდოთერმულ ცხოველებში, აქტივობა დიდ გავლენას ახდენს მეტაბოლიზმის სიჩქარეზე. ნებისმიერი ქცევის დროს, მაგალითად, წიგნის წყნარად კითხვისას ან მწერის ფრთების გაშლისას, ხდება ენერგიის მოხმარება, რომელიც აღემატება BMR-სა და SMR-ს. მეტაბოლიზმის სიჩქარის მაქსიმუმი (ატფ-ის მოხმარების მაქსიმალური სიჩქარე) თანხვდება აქტივობის პიკს, ისეთს, როგორიც არის მძიმე წონის აწევა, ან სწრაფი ცურვა.

ზოგადად, ცხოველის მეტაბოლიზმის მაქსიმალური შესაძლო სიჩქარე უკუპროპორციულია აქტივობის ხანგრძლივობისა. სურათი 40.9 გამოხატავს აქტივობის შენარჩუნების სტრატეგიებში განსხვავებას ექტოთერმულ და ენდოთერმულ ცხოველებს შორის,

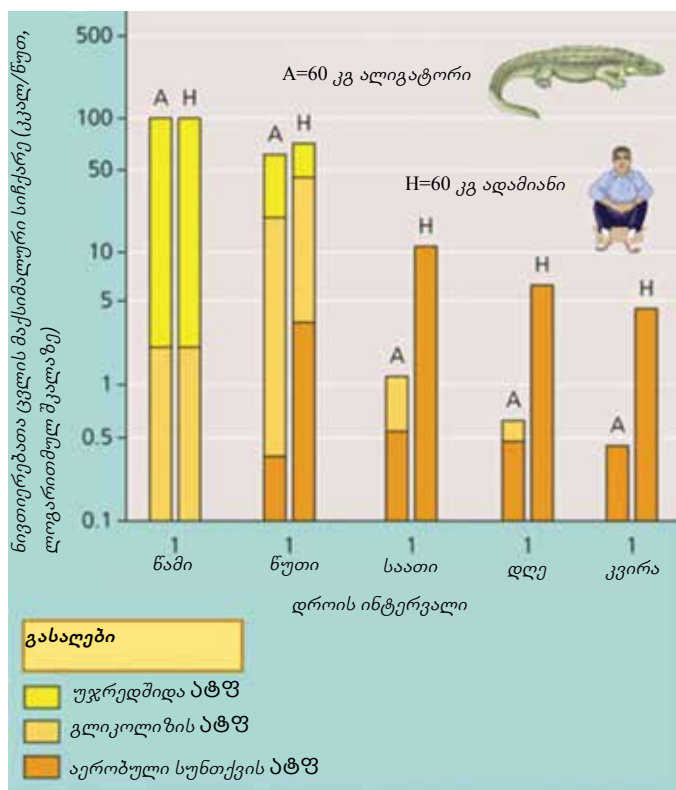
გაზომილს დროს სხვადასხვა ინტერვალებში. ალიგატორს (ექტოთერმული ცხოველი) და ადამიანს (ენდოთერმული ცხოველი) შეუძლიათ ძალზე ინტენსიური მოძრაობა, რაც 1 წუთი ან ნაკლები გრძელდება. ამგვარი „სპრინტის“ განმავლობაში კუნთის უჯრედში არსებული ატფ და ატფ, რომელიც ანაერობულად წარმოიქმნება გლიკოლოზის შედეგად, საკმარისია ინტენსიური მოძრაობისთვის. ცხოველებს არ შეუძლიათ შეინარჩუნონ მეტაბოლიზმის მაქსიმალური სიჩქარე და აქტივობის მაღალი დონე ხანგრძლივი დროის განმავლობაში. თუმცა, გამძლეობაზე გამოცდის დროს, ენდოთერმულ ცხოველებს უპირატესობა აქვთ. აქტივობის შენარჩუნება დამოკიდებულია უჯრედის სუნთქვის აერობულ პროცესზე, რომელიც უზრუნველყოფს უჯრედს ატფ-ით. ენდოთერმული ცხოველების სუნთქვის სიჩქარე 10-ჯერ მეტია, ვიდრე ექტოთერმულების. ხანგრძლივი აქტივობა მხოლოდ რამდენიმე ექტოთერმულ ცხოველს შეუძლია, მაგალითად,

პეპელა მონარქს, ან კალმასს, რომლებიც პერიოდულად დიდ მანძილზე მიგრირებენ.

ენერგეტიკულ მოთხოვნილებებზე ბევრი ფაქტორი მოქმედებს, მაგალითად, ასაკი, სქესი, სხეულისა და გარემოს ტემპერატურა, საკვების რაოდენობა და ყუათიანობა, აქტივობის დონე, ჟანგბადის რაოდენობა, ჰორმონალური ბალანსი. დღისა და ღამის მონაკვეთსაც მნიშვნელობა აქვს. ფრინველები, ადამიანები და მრავალი მწერი, ჩვეულებრივ, აქტიურები არიან დღის განმავლობაში (შესაბამისად, ამ დროს მათი მეტაბოლიზმის სიჩქარე მაღალია). მათგან განსხვავებით, ღამურები, თაგვები და ბევრი სხვა ძუძუმწოვარი ძირითადად აქტიურია საღამოს ან ღამეს და, შესაბამისად, მათი მეტაბოლიზმის სიჩქარე ამ დროს მაღალია. მეტაბოლიზმის სიჩქარე იზომება სხვადასხვა დღელაღმური აქტივობის დროს, რათა მოგვცეს წარმოდგენა ყოველდღიურ ენერგეტიკულ დანახარჯებზე. ხმელეთის ცხოველების უმრავლესობისთვის (როგორც ენდოთერმულების, ასევე ექტოთერმულების), ენერგიის მოხმარების დღიური სიჩქარე 2-ჯერ ან 4-ჯერ სჭარბობს BMR-ს ან SMR-ს. განვითარებულ ქვეყნებში მცხოვრები ადამიანების მეტაბოლიზმის საშუალო სიჩქარეა 1,5 BMR, რაც უჩვეულოდ დაბალია. აღნიშნული დაბალი დონე ადამიანებში მჯდომარე ცხოვრების ნირის შედეგია.

## ენჯიის ბიოქიმი

სხვადასხვა სახეობა საკვებით მიღებულ ენერგიას და ნივთიერებებს სხვადასხვა გზით იყენებს. გამოყენება დამოკიდებულია მათ საარსებო გარემოზე, ზომებზე, ქცევაზე და ენდოთერმულ ან ექტოთერმულ სტრატეგიაზე. ცხოველების უმრავლესობისთვის საკვების ძირითადი დანიშნულებაა ატფ-ის წარმოქმნა. მისი შედარებით მცირე ნაწილი გამოიყენება გამრავლებისა და ზრდისთვის. მიუხედავად ამისა, ენერგიის რაოდენობა, რომელიც გამოიყენება BMR-ისთვის (ან SMR) და სხეულის ტემპერატურის კონტროლისთვის განსხვავებულია სხვადასხვა სახეობაში. მაგალითად, განვიხილოთ ტიპური ენერგეტიკული ბიოქიმი ხმელეთის 4 ხერხემლიანისთვის: 25გ-იანი თავისთვის, 4კგ-იანი მდედრი პითონისთვის,



**▲ სურათი 40.9 მეტაბოლიზმის მაქსიმალური სიჩქარე დროის სხვადასხვა მონაკვეთში.** შედარებულია ექტოთერმული ცხოველის (ალიგატორის) და ენდოთერმულის (ადამიანის) მეტაბოლიზმის მაქსიმალური პოტენციური სიჩქარე და ატფ-ის წყაროები დროის სხვადასხვა პერიოდებში. ადამიანის მეტაბოლიზმის ბაზალური სიჩქარე (დაახლოებით 1.2 კკალ/წთ) ბევრად მეტია, ვიდრე ალიგატორის მეტაბოლიზმის სტანდარტული სიჩქარე. დაახლოებით 0.04 კკალ/წთ). ადამიანის მაღალი BMR ნაწილობრივ ხელს უწყობს, შეინარჩუნოს მეტაბოლიზმის სიჩქარის უფრო მაღალი მაჩვენებელი შედარებით ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში.

4კგ-იანი ადელის პინგვინისთვის და 60კგ-იანი ქალისთვის (სურ. 40.10).

ქალი ხარჯავს საკუთარი ენერგიის დიდ ნაწილს მეტაბოლიზმის ძირითადი სიჩქარისთვის და ენერგიის შედარებით მცირე ნაწილს – აქტივობასა და სხეულის ტემპერატურის რეგულირებისთვის. ზრდაზე მიდის ენერგეტიკული ბიუჯეტის ძალზე მცირე ნაწილი, წლიური ენერგიის ბიუჯეტის დაახლოებით 1%, რაც წელიწადში 1კგ ცხიმის, ან 5-6კგ სხვა ქსოვილების ეკვივალენტურია. ფეხმძიმობის 9 თვე და ძუძუთი კვება დედის წლიური ენერგეტიკული მოთხოვნილებების მხოლოდ 5-8%-ს შეადგენს.

მამრი პინგვინი გამოიყენებს თავისი ენერგეტიკული დანახარჯების დიდ ნაწილს მოძრაობისთვის, რადგან იგი ძალზე ბევრს ცურავს საკვების დასაჭერად. პინგვინის სხეულს კარგი სითბოიზოლაცია აქვს და შედარებით დიდი ზომისაა, ამიტომ, ნაკლებ ენერგიას ხარჯავს ტემპერატურის რეგულაციისთვის. იგი შეგუებულია ანტარქტიკის ცივ გარემოში ცხოვრებას. გამრავლებაზე მისი ენერგეტიკული დანახარჯი წლიური ენერგეტიკული დანახარჯის 6%-ს შეადგენს, რაც ძირითადად კვერცხის ინკუბაციაზე და წიწილების გამოკვებაზე იხარჯება.

თავის მდებრი ენერგეტიკული ბიუჯეტის დიდ ნაწილს ტემპერატურის რეგულაციაში ხარჯავს. ამ პატარა ცხოველის სხეულის ზედაპირის შეფარდება მის მოცულობასთან მეტია, ვიდრე დიდი ზომის ცხოველებში, ამიტომ თავი სითბოს სწრაფად კარგავს და გამუდმებით უნდა ახერხებდეს მეტაბოლური სითბოს წარმოქმნას სხეულის ტემპერატურის შესანარჩუნებლად. გამრავლებაზე მდებრი თავი თავისი წლიური ენერგეტიკული ბიუჯეტის 12%-ს ხარჯავს.

ზემოთ ჩამოთვლილი ენდოთერმული ცხოველებისგან განსხვავებით, ექტოთერმული პითონი ტემპერატურის რეგულაციაზე ენერგიას არ ხარჯავს. როგორც ყველა ქვეწარმავალი, ისიც მთელი ცხოვრების განმავლობაში იზრდება. **40.10 სურათზე** მოყვანილ მაგალითში გველი იმატებს 750გ სხეულის ახალ ქსოვილებს. აგრეთვე წარმოქმნის 650გ კვერცხებს. პითონის ეკონომიური ექტოთერმული სტრატეგია მას შესაძლებლობას აძლევს, ჰქონდეს ძალზე დაბალი ენერგეტიკული დანახარჯი მასის ერთეულზე. ეს დანახარჯი მსგავსი ზომის ენდოთერმული პინგვინის ენერგეტიკული დანახარჯის მხოლოდ 1/40 შეადგენს (იხ. სურ. 40.10 ბ).

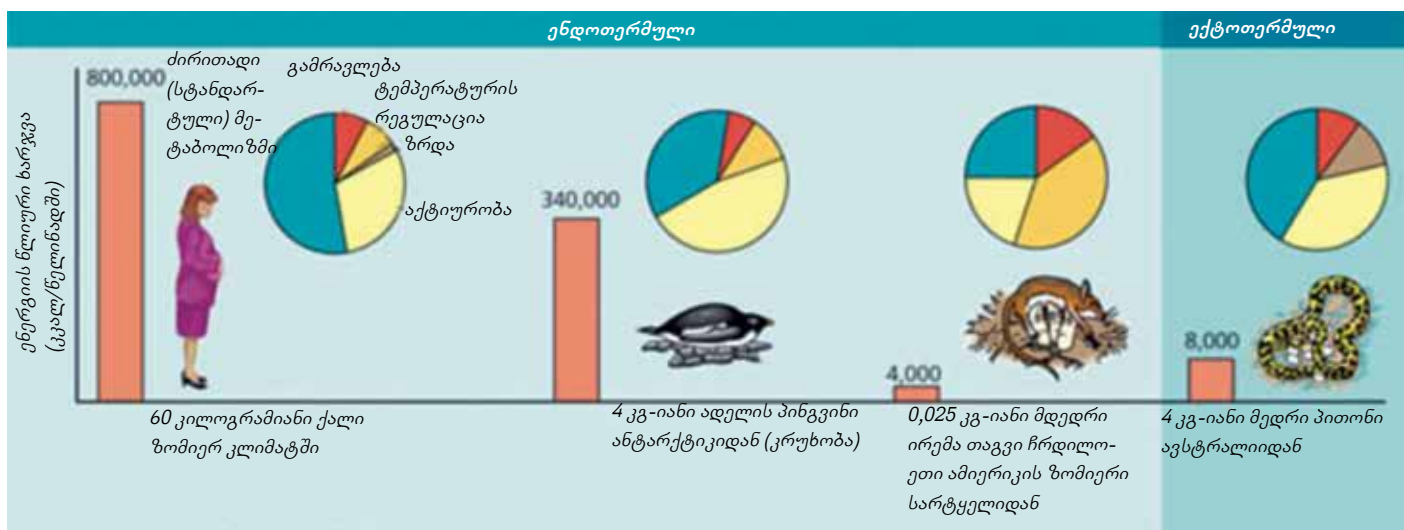
## ჯანცუფცია **40.3**

1. თუ თავგს და ხვლიკს (მსგავსი ზომა, მოსვენებული მდგომარეობა) რესპირომეტრში იდენტურ პირობებში მოგათავსებთ, რომელი ცხოველი ჟანგბადს უფრო ჩქარა მოიხმარს? ახსენით
2. რატომ არ შეუძლია ალიგატორს აქტიურობის შენარჩუნება ერთ საათზე მეტი დროის განმავლობაში?
3. რომელმა ცხოველმა უნდა მოიხმაროს დღეში სხეულის მასასთან შეფარდებით საკვების მეტი რაოდენობა: კატამ თუ ლომმა? ახსენით, რატომ?

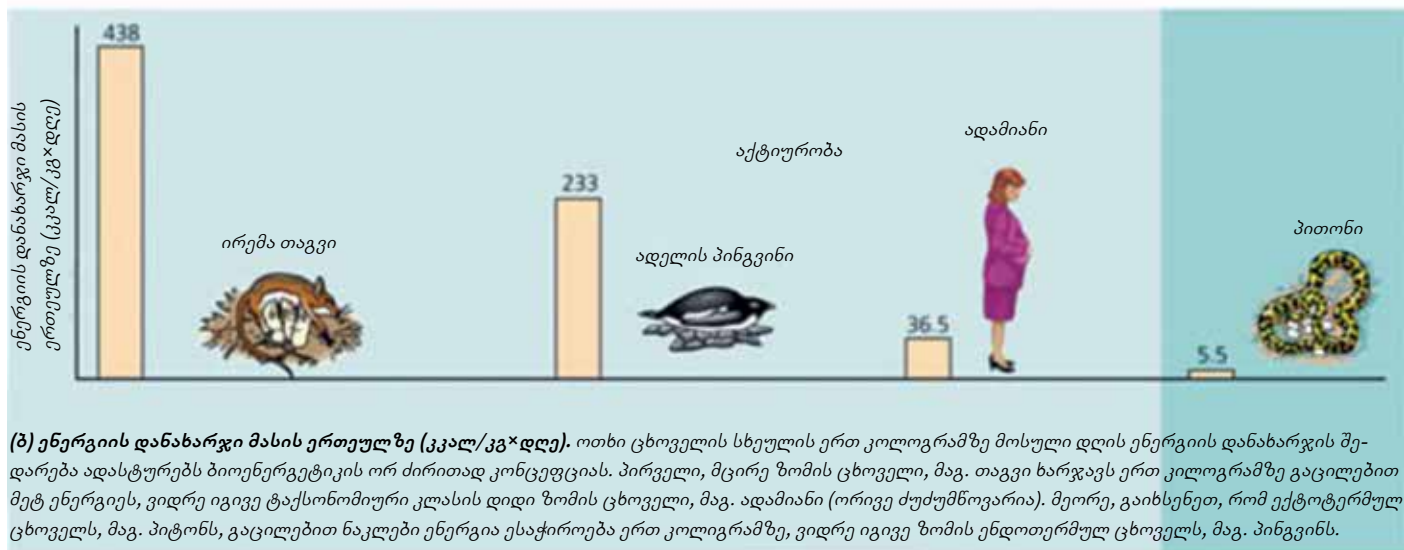
## ჯანცუფცია **40.4**

### მზავალი ცხოველი ატეგულირებს თავის შინაგან გატემის შედატებით ვიწბო ფატგლებში

საუკუნეზე მეტია, რაც ფრანგმა ფიზიოლოგმა კლოდ ბერნარმა განასხვავა გარეგანი გარემო, სადაც ცხოველი ბინადრობს და შინაგანი გარემო, სადაც ცხოველის უჯრედებია განლაგებული. ხერხემლიანი ცხოველების შინაგან გარემოს ეწოდება **ინტერსტიციალური სითხე** (სურ. 40.4). ეს სითხე ავსებს სივრცეს უჯრედებს შორის. ამ სითხის მეშვეობით ხდება საკვები ნივთიერებებისა და ნივთიერებათა ცვლის პროდუქტების მიმოცვლა სისხლთან მიკროსკოპული ჭურჭლების მეშვეობით, რომლებსაც კაპილარები ეწოდება. ბერნარმა ასევე დაადგინა, რომ ზოგი ცხოველი ინარჩუნებს შედარებით მუდმივ პირობებს თავიანთ შინაგან გარემოში, ზოგი კი – ვერა. მაგალითად, მტკნარი წყლის ჰიდრა უძლურია, შეინარჩუნოს იმ სითხის მუდმივობა, სადაც მისი უჯრედებია განლაგებული. ამ ცხოველისაგან განსხვავებით, ადამიანის ორგანიზმი



(ა) ენერგიის სრული წლიური ხარჯვა. წრის მონაკვეთები აღნიშნავს ენერგიის დანახარჯს სხვადასხვა ფუნქციების შესასრულებლად.



(ბ) ენერგიის დანახარჯი მასის ერთეულზე (კკალ/კგ\*დღე). ოთხი ცხოველის სხეულის ერთ კოლოგრამზე მოსული დღის ენერგიის დანახარჯის შედარება ადასტურებს ბიოენერგეტიკის ორ ძირითად კონცეფციას. პირველი, მცირე ზომის ცხოველი, მაგ. თავი ხარჯავს ერთ კოლოგრამზე გაცილებით მეტ ენერგიას, ვიდრე იგივე ტაქსონომიური კლასის დიდი ზომის ცხოველი, მაგ. ადამიანი (ორივე ძუძუმწოვარია). მეორე, გაიხსენეთ, რომ ექტოტერმულ ცხოველს, მაგ. პითონს, გაცილებით ნაკლები ენერგია ესაჭიროება ერთ კოლოგრამზე, ვიდრე იგივე ზომის ენდოტერმულ ცხოველს, მაგ. პინგვინს.

#### ▲ სურათი 40.10 ენერგიის დანახარჯი ოთხი ცხოველის მაგალითზე

ინარჩუნებს შინაგანი გარემოს შედარებით მუდმივ ტემპერატურას (დაახლოებით 37°C). ადამიანის ორგანიზმს ასევე შეუძლია აკონტროლოს სისხლისა და ინტერსტიციალური სითხის pH-ის (მუავიანობის) მაჩვენებელი და შეინარჩუნოს მისი მნიშვნელობა დაახლოებით 7,4. ასევე მას შეუძლია სისხლში შაქრის შემცველობის კონტროლი ისე, რომ იგი შეადგენდეს 90მგ გლუკოზას 100მლ სისხლში.

თუმცა, არსებობს პერიოდები ცხოველების განვითარებაში, როცა ცვლილებები შინაგან გარემოში აუცილებელად იქნეს თავს. ასე მაგალითად, ჰორმონების ბალანსი ადამიანის სისხლში რადიკალურად იცვლება სქესობრივი მომწიფებისა და ორსულობის პერიოდში. თუმცა შინაგანი გარემოს შედარებითი სტაბილურობა მაინც აღსანიშნავია.

დღეისთვის, ბერნარდისეული ტერმინი „მუდმივი შინაგანი გარემო“ შეცვალა ჰომეოსტაზის კონცეფციამ. ჰომეოსტაზი ნიშნავს „მდგრად, სტაბილურ მდგომარეობას“, ანუ შინაგან წონასწორობას. თანამედროვე ფიზიოლოგიის ერთ-ერთი მთავარი მიზანია ჰომეოსტაზის მექანიზმების შესწავლა. შესაბამისად, წინამდებარე თავის თემა ჰომეოსტაზის კონცეფციის განხილვა. ცხოველების შინაგანი გარემო ყოველთვის ოდნავ მერყეობს. ჰომეოსტაზი დინამიური მდგომარეობაა, რომელიც ყალიბდება გარემოს ფაქტორებსა და შიდა მაკონტროლებელ მექანიზმებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად.

მეოსტაზის მექანიზმების შესწავლა. შესაბამისად, წინამდებარე თავის თემა ჰომეოსტაზის კონცეფციის განხილვა. ცხოველების შინაგანი გარემო ყოველთვის ოდნავ მერყეობს. ჰომეოსტაზი დინამიური მდგომარეობაა, რომელიც ყალიბდება გარემოს ფაქტორებსა და შიდა მაკონტროლებელ მექანიზმებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად.

### ბიოლოგიური და ფიზიოლოგიური

რეგულირება და შეგუება ორი საწინააღმდეგო პროცესია, რომელთა საშუალებით ცხოველი უმკლავდება გარემოს ცვალებადობას. შეიძლება ითქვას, რომ ცხოველი წარმოადგენს გარემოს გარკვეული ცვლადის მარეგულირებელს, როდესაც ამცირებს ამ ცვლადის მერყეობით გამოწვეულ შინაგან ცვლილებას. აღნიშნული რეგულაცია ხდება შინაგანი მაკონტროლებელი მექანიზმების საშუალებით. მაგალითად, მტკნარი წყლის თევზს შეუძლია შე-

ინარჩუნოს სისხლში გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციის მუდმივობა, თუნდაც ეს კონცენტრაცია განსხვავდებოდეს გარემოში ამ ნივთიერების კონცენტრაციიდან. თევზის ანატომია და ფიზიოლოგია შესაძლებელს ხდის, შეასუსტოს ნივთიერებების კონცენტრაციის შინაგანი ცვლილებები (ამ რეგულაციის მექანიზმებზე უფრო ვრცლად წაიკითხავთ 44-ე თავში).

ცხოველი გარემოს შემგუებულია, თუ მისი შინაგანი გარემო იცვლება გარეგანი ცვლილებების შესაბამისად. მაგალითად, გვარი Libinia-ს კიბორჩხალები ბინადრობენ გარემოში, სადაც ხსნადი ნივთიერებების კონცენტრაცია (მარილიანობა) სტაბილურია. მტკნარი წყლის თევზებისგან განსხვავებით, კიბორჩხალები არ არეგულირებენ შინაგანი გარემოს ხსნადი ნივთიერებების კონცენტრაციას, მათი შინაგანი გარემო შეგუებულია გარე გარემოსთან. რეგულაცია და შეგუება წარმოადგენს კონტინუუმის (მნიშვნელობების უწყვეტი რიგი) უკიდურეს გამოვლინებებს. არცერთი ორგანიზმი არ არის აბსოლუტური „რეგულატორი“ ან „შემგუებელი“. გარდა ამისა, ცხოველს შეუძლია შეინარჩუნოს ჰომეოსტაზი ნაწილობრივ შინაგანი გარემოს რეგულირებით, ნაწილობრივ კი შეეგუოს გარეთა გარემოს. ასე მაგალითად, მტკნარი წყლის თევზი არეგულირებს შინაგან გარემოში ხსნადი ნივთიერებების კონცენტრაციას, ხოლო მისი შინაგანი ტემპერატურა ეგუება გარემოს წყლის ტემპერატურას. შემდგომში უფრო დაწვრილებით განვიხილავთ მექანიზმებს, რომელთა საშუალებით ცხოველები არეგულირებენ თავიანთ შინაგან გარემოს.

## ჰომეოსტაზის მექანიზმები

ჰომეოსტაზის მექანიზმები შინაგან გარემოში ცვლილებებს არეგულირებს. ჰომეოსტაზის მაკონტროლებელი ნებისმიერი სისტემა შედგება სამი ძირითადი ფუნქციური კომპონენტისგან: რეცეპტორი, კონტროლის ცენტრი და ეფექტორი. რეცეპტორი აფიქსირებს შინაგანი გარემოს ცვლილებას: მაგალითად, სხეულის ტემპერატურის ცვლილებას. კონტროლის ცენტრი გადაამუშავებს რეცეპტორიდან მიღებულ ინფორმაციას და უგზავნის შესაბამის ეფექტორს. განვიხილოთ ეს მექანიზმი ოთახის ტემპერატურის რეგულაციის „არაცოცხალ“ მაგალითზე (სურ. 40.11). ამ შემთხვევაში, კონტროლის ცენტრს წარმოადგენს თერმოსტატი, რომელიც შეიცავს ასევე რეცეპტორს – თერმომეტრს. როცა ოთახის ტემპერატურა გარკვეულ მაჩვენებელზე, ვთქვათ, 20 გრადუსზე დაბლა ეცემა, თერმოსტატი რთავს გამათბობელს (ეფექტორს). როდესაც ტემპერატურა 20 გრადუსზე ზემოთ იწევს, თერმოსტატი გამათბობელს გამორთავს. ამგვარი ტიპის კონტროლის სისტემას **უარყოფითი უკუკავშირის წრედი** ეწოდება. ცვლადის აღრიცხული ცვლილება იწვევს მაკონტროლებელი მექანიზმის გაშვებას, რომელიც ეწინააღმდეგება ცვლადის იმავე მიმართულებით შეცვლას. ცვლილების მიღებასა და პასუხს შორის არსებული დროის პერიოდის გამო, ცვლადი სუსტად მერყეობს, მაგრამ ეს მერყეობა უმნიშვნელოა. უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმი მცირე ცვლილებების დიდ ცვლილებებზე გარდაქმნას ეწინააღმდეგება. ცხოველებში ჰომეოსტატიკური მექანიზმების უმრავლესობა უარყოფითი უკუკავშირის პრინციპზეა აგებული. ფაქტობრივად, ადამიანის სხეულის ტემპერატურის შენარჩუნება 37 გრადუსის სიახლოვეს რამდენიმე უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმის შედეგად ხდება (უფრო დეტალურად ამის შესახებ მოგვიანებით წაიკითხავთ).

უარყოფითი უკუკავშირისგან განსხვავებით, **დადებითი უკუკავშირი** გულისხმობს ცვლადის ცვლილების საპასუხოდ ისეთი მექანიზმის ჩართვას, რომელიც აძლიერებს ამ ცვლილებას. მაგალითად, მშობიარობის დროს ბავშვის თავის დაწოლა საშვილოსნოს გახსნილი ყელის მიდამოებში იწვევს საშვილოსნოს კედლების შეკუმშვას, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს დაწოლას და, შესაბამისად, შეკუმშვას, რასაც საბოლოოდ ბავშვის დაბადება მოჰყვება.

არ უნდა ჩაითვალოს, თითქმის შიდა გარემო ყოველთვის უცვლელია. რეგულირებადი ცვლილებები აუცილებელია ორგანიზმის ნორმალური ფუნქციონირებისთვის. რიგ შემთხვევებში ეს ცვლილებები ციკლურია. მაგალითად, ჰორმონების დონის ცვლილება, რომელიც ქალის მენსტრუალური ციკლის დროს ხდება (იხ. სურ. 46.13). სხვა შემთხვევაში, რეგულირებადი ცვლილებები ორგანიზმის მოთხოვნილებებზე რეაქციაა. მაგალითად, ადამიანის ორგანიზმი რეაგირებს სხვადასხვა ინფექციაზე ტემპერატურის დროებითი აწევით. მაღალი ტემპერატურა ეხმარება ადამიანის ორგანიზმს ინფექციის დაძლევაში. თუ ხანმოკლე პერიოდის ჭრილში განვიხილავთ, ჰომეოსტატიკური მექანიზმის საშუალებით სხეულის ტემპერატურა შენარჩუნებულია ისეთ დონეზე, რომელიც საჭიროა ამ მოცემულ მომენტში. მაგრამ ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში იგივე მექანიზმები არეგულირებს ცვლილებებს შიდა გარემოში. შიდა რეგულაცია საკმაოდ ძვირია. ნებისმიერი, ვინც იხდის კომუნალური მომსახურების გადასახადებს, იცის, რამდენი ენერგია იხარჯება გათბობაზე ან გაგრილებაზე, რათა სახლში შენარჩუნებული იქნეს კომფორტული ტემპერატურა. ამის მსგავსად, ცხოველები მიღებული საკვების ენერგიის მნიშვნელოვან ნაწილს იყენებენ ოპტიმალური შინაგანი პირობების შესანარჩუნებლად. შემდეგ ნაწილში დეტალურად განვიხილავთ, როგორ ინარჩუნებს სხვადასხვა ცხოველი შედარებით მუდმივ სხეულის ტემპერატურას.

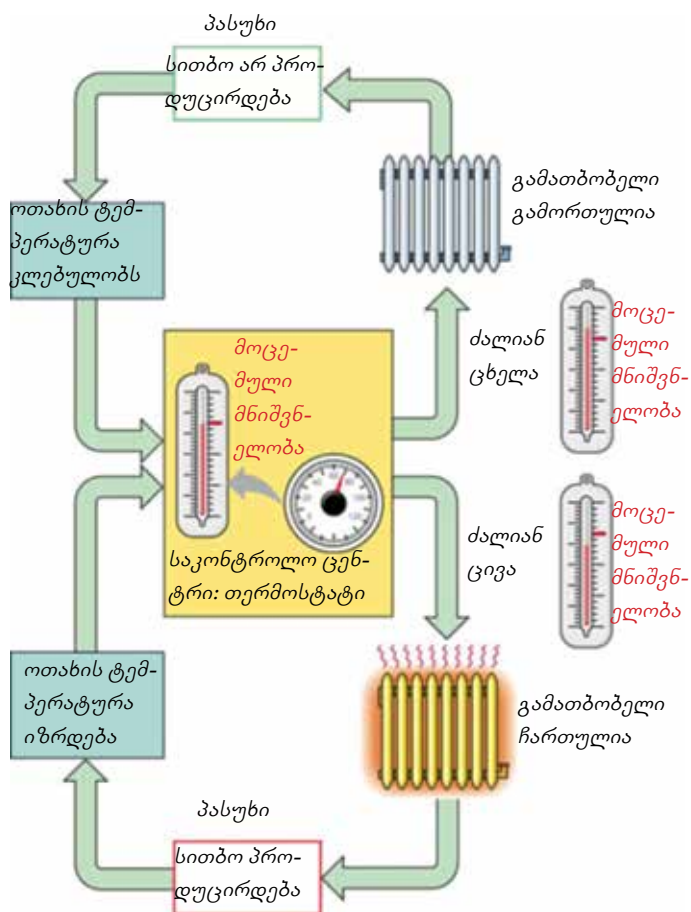
## ▶ კანცეფცია ცისტი 40.4

1. შეუძლია თუ არა რეგულატორს, შეინარჩუნოს მუმივი შიდა გარემო? ახსენით.
2. აღწერეთ განსხვავებები უარყოფით და დადებით უკუკავშირებს შორის.

## ▶ კანცეფცია 40.5

**თერმორეგულაცია, ბიომედიკალური განპირობებულია ორგანიზმის აგებულებით, ფიზიოლოგიითა და ქცევით, ხელს უწყობს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას**

ამ ნაწილში განვიხილავთ იმის მაგალითს, როგორ არეგულირებს სხეულის ფორმისა და ფუნქციების ადაპტაცია ცხოველის შინაგან გარემოს, კონკრეტულად, როგორ არეგულირებს იგი სხე-



▲ **სურათი 40.11 უარყოფითი უკუკავშირის მაგალითი არაცოცხალ მექანიზმზე.** ოთახის ტემპერატურის რეგულაცია დამოკიდებულია კონტროლის ცენტრზე, რომელიც აფიქსირებს ტემპერატურულ ცვლილებას და ააქტივებს მექანიზმს, რომელიც ამ ცვლილებას სანინაღმდეგო მიმართულებით ცვლის.

ულის ტემპერატურას. პომეოსტაზის შენარჩუნებაში მონაწილე სხვა პროცესები განხილული იქნება 44-ე თავში.

**თერმორეგულაცია** არის პროცესი, რომელიც ინარჩუნებს ორგანიზმის შინაგან ტემპერატურას მისაღებ ფარგლებში. თერმორეგულაცია მნიშვნელოვანია გადარჩენისთვის,

რადგან ბიოქიმიური და ფიზიოლოგიური პროცესები სხეულის ტემპერატურის ცვლილებისადმი ძალზე მგრძნობიარეა. ფერმენტებზე დამოკიდებული რეაქციების სიჩქარე 2-3-ჯერ იზრდება ტემპერატურის ყოველ 10 გრადუსზე მატებისას. უკიდურესად მაღალ ტემპერატურაზე ცილების დენატურაცია იწყება. ამგვარი თერმული ზეგავლენა უარყოფითად აისახება ცხოველის სიცოცხლისუნარიანობაზე.

ცხოველთა სხვადასხვა სახეობა შეგუებულია გარემოს სხვადასხვა ტემპერატურას და თითოეულ სახეობას ოპტიმალური ტემპერატურის დიაპაზონი აქვს. თერმორეგულაცია ინარჩუნებს სხეულის ტემპერატურას ოპტიმალური დიაპაზონის ფარგლებში, რაც უზრუნველყოფს ეფექტური ფუნქციონირების საშუალებას აძლევს, მაშინაც კი, როცა გარემოს ტემპერატურა მერყეობს.

## ექსოთერმული და ენდოთერმული ცხოველები

ცხოველთა სახეობები სხვადასხვანაირად მართავენ გამოყოფილ სითბოს. ცხოველების დაყოფა შეიძლება იმის მიხედვით, თუ რა როლს თამაშობს მეტაბოლური სითბო სხეულის ტემპერატურის განსაზღვრაში. როგორც აღვნიშნეთ, **ექსოთერმული** ცხოველები ძირითად სითბოს გარემოდან იღებენ. ექსოთერმების მეტაბოლიზმის სიჩქარე იმდენად დაბალია, რომ წარმოქმნილი სითბო არ არის საკმარისი მათი სხეულის ტემპერატურის რეგულაციისთვის. მათგან განსხვავებით, **ენდოთერმულ** ცხოველებს შეუძლიათ გამოიყენონ მეტაბოლური სითბო თერმორეგულაციისთვის. მეტაბოლიზმის მაღალი სიჩქარის შედეგად ენდოთერმები გამოიმუშავენ საკმარის სითბოს სხეულის გასათბობად ცივ გარემოში. მრავალი ენდოთერმული ცხოველი, მათ შორის ადამიანი, გარემოს ტემპერატურის მერყეობის დროსაც ინარჩუნებს სტაბილურად მაღალ შინაგან ტემპერატურას. ექსოთერმული ცხოველები თერმორეგულაციას ახერხებენ მზეზე გათბობით, ან ჩრდილში გაგრილებით. ზოგადად, ექსოთერმული ცხოველები უძლებენ ტემპერატურული ცვლილებების უფრო ფართო დიაპაზონს, ვიდრე ენდოთერმული ცხოველები (**სურ. 40.12**). უხერხემლოების უმრავლესობა: თევზები, ამფიბიები, რეპტილიები ექსოთერმული ცხოველებია. ძუძუმწოვრები და ფრინველები ენდოთერმულია.

მნიშვნელოვანია აღვნიშნოთ, რომ ცხოველების დაყოფა ექსოთერმებად და ენდოთერმებად სხეულის ტემპერატურის მუდმივობის ან ცვალებადობის საფუძველზე არასწორია. როგორც ადრე აღვნიშნა, კლასიფიკაციისთვის მთავარია სითბოს წყარო, რომელიც გამოიყენება სხეულის გასათბობად. იმის აღსანიშნავად, რომ ზოგი ცხოველი ინარჩუნებს სხეულის მუდმივ ტემპერატურას, ზოგ ცხოველში კი სხეულის ტემპერატურა მერყეობს, შემდეგი ტერმინები გამოიყენება: პოიკილოთერმული – ცხოველები, რომელთა სხეულის ტემპერატურა ძლიერ მერყეობს; ჰომოიოთერმული – ცხოველები, შედარებით მუდმივი სხეულის ტემპერატურით. თუმცა, მას მერე, რაც მეცნიერებმა მეტი ცოდნა შეიძინეს ცხოველების თერმორეგულატორულ მექანიზმებზე, ზემოაღნიშნული ტერმინები (პოიკილოთერმული და ჰომოიოთერმული) ხმარებიდან გამოვიდა. ზღვის მრავალი თევზი და უხერხემლო, რომელსაც პოიკილოთერმულ ცხოველებს მიაკუთვნებდნენ, იმდენად სტაბილური ტემპერატურის წყალში ბინადრობს, რომ მათი სხეულის ტემპერატურაც თითქმის სტაბილურია და უფრო ნაკლებად მერყეობს, ვიდრე ადამიანის ან სხვა ძუძუმწოვრების ტემპერატურა. გარდა ამისა, ზოგ ძუძუმწოვარში, რომლებიც ჰომოიოთერმულად ითვლებოდნენ, ტემპერატურის ძლიერ მერყეობას აქვს ადგილი. მაგალითად, ბურუნდუკები ინარჩუნებენ სხეულის მაღალ ტემპერატურას აქტივობის დროს, მაგრამ ჰიბერნაციის შემთხვევაში მათი სხეულის ტემპერატურა მკვეთრად ეცემა. ამგვარი გამონაკლისების გამო, რომლებიც არცთუ ისე ცოტაა, ძირითადად გამოიყენება ტერმინები ექსოთერმული (გარემოს მიერ რეგულირებადი ტემპერატურით) და ენდოთერმული (შიდა მექანიზმებით რეგულირებადი ტემპერატურით).

მეორე, ფართოდ გავრცელებული მცდარი კონცეფცია არის ის, რომ ექსოთერმული ცხოველები ცივისსხლიანები არიან, ხოლო ენდოთერმული ცხოველები კი თბილისხლიანები. არ არის აუცი-

ლებელი, რომ ექტოთერმებს ჰქონდეთ სხეულის დაბალი ტემპერატურა. როდესაც ისინი მზეზე თბებიან, მრავალი ექტოთერმული ხვლიკის ტემპერატურა უფრო მაღალია, ვიდრე ძუძუმწოვრებისა. ამიტომ დღეს მრავალი ბიოლოგი ერიდება ტერმინებს „თბილსისხლიანი“ და „ცივსისხლიანი“.

ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ ენდოთერმია და ექტოთერმია ურთიერთგამომრიცხველი არ არის. მაგალითად, ენდოთერმი ფრინველი შეიძლება მზეზე თბებოდეს ექტოთერმების მსგავსად.

ენდოთერმულობას აქვს რამდენიმე მნიშვნელოვანი უპირატესობა. ენდოთერმულ ცხოველებს შეუძლიათ მეტაბოლიზმის პროცესში დიდი რაოდენობით სითბოს წარმოქმნა.

ინტენსიური მეტაბოლიზმი და სხვა ბიოქიმიური და ფიზიოლოგიური ადაპტაციები, განსაკუთრებით სისხლის მიმოქცევისა და სუნთქვის სისტემაში, ხანგრძლივი ინტენსიური აქტივობის საშუალებას აძლევს ენდოთერმულ ცხოველებს (იხ. სურ. 40.9). ხანგრძლივი ინტენსიური სირბილი ან ფრენა გრძელ დისტანციებზე შეუძლიათ მხოლოდ იმ ცხოველებს, რომლებსაც ენდოთერმული ბინადრობის ნირი ახასიათებთ. აგრეთვე, ენდოთერმულობა უპირატესობას აძლევს ცხოველებს ხმელეთზე ცხოვრებაში.

მათ შეუძლიათ გაუძლონ ტემპერატურის ძლიერ ცვლილებებს, რაც ნაკლებად არის დამახასიათებელი წყლის გარემოსთვის. მაგალითად, არცერთი ექტოთერმული ცხოველი არ არის აქტიური ყინვის დროს. როცა ხმელეთის დიდ ნაწილზე ზამთარი დგება, აქტივობას მხოლოდ ენდოთერმული ცხოველები ინარჩუნებენ. დროის მეტი წილი ენდოთერმული ცხოველები – ფრინველები და ძუძუმწოვრები – თავიანთ გარემოზე უფრო თბილი არიან. აღსანიშნავია, რომ ამ ცხოველებს გაგრილების მექანიზმიც აქვთ: ისეთ გარემოში, სადაც ტემპერატურა ძალზე მაღალია, რაც დამლუპველი იქნებოდა ექტოთერმული ცხოველებისთვის, ენდოთერმულები უფრო დაბალ სხეულის ტემპერატურას ინარჩუნებენ. ენდოთერმული ცხოველები უფრო ადვილად იტანენ გარემოს ტემპერატურის ცვალებადობას, ვიდრე ექტოთერმულები. თუმცა, არ უნდა დაგვავიწყდეს, რომ ექტოთერმულები უძლებენ შინაგანი ტემპერატურის უფრო ძლიერ ფლუქტუაციას, ვიდრე ენდოთერმული ცხოველები.

ენდოთერმულობა ძალზე მოსახერხებელია, მაგრამ აგრეთვე ენერგეტიკულად ძვირია. მაგალითად, 20°C-ზე, მოსვენებულ მდგომარეობაში, ადამიანის მეტაბოლიზმის სიჩქარეა დღეში 1 300-დან 1800 კკალ (მეტაბოლიზმის ძირითადი სიჩქარე), იგივე წონის ექტოთერმული ცხოველის, ამერიკული ალიგატორის მეტაბოლიზმის სიჩქარე (მეტაბოლიზმის სტანდარტული სიჩქარე) კი დღეში 60 კკალ-ს შეადგენს. აქედან გამომდინარე, ენდოთერმულმა ცხოველმა ბევრად მეტი საკვები უნდა მიიღოს, ვიდრე იგივე ზომის ექტოთერმულმა ცხოველმა. ეს სერიოზულ პრობლემას წარმოადგენს ენდოთერმული ცხოველებისთვის, განსაკუთრებით, შეზღუდული საკვები რესურსების პირობებში. ამ და სხვა მიზეზების გამო, ექტოთერმულობა ეფექტურ და წარმატებულ სტრატეგიად შეიძლება ჩაითვალოს დედამიწის დიდ ნაწილში, რასაც ადასტურებს ექტოთერმული ცხოველების მრავალფეროვნება და სიუხვე.

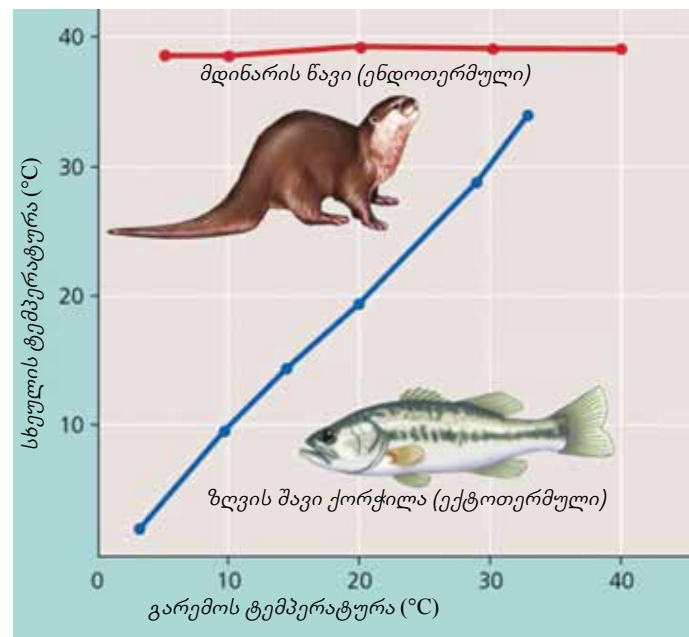
## სითბოს მიმდცელის საშუალებები

ორგანიზმი, ისევე როგორც ნებისმიერი საგანი, გასცემს და იღებს სითბოს ოთხი ფიზიკური პროცესის საშუალებით. ესენია: კონდუქცია, კონვექცია, რადიაცია და ევაპორაცია. **სურათი 40.13-**

ზე განმარტებულია, თუ რას წარმოადგენს თითოეული პროცესი. აღსანიშნავია, რომ სითბო ყოველთვის გადაადგილდება ცხელიდან ცივ სხეულზე.

## ბალანსი სითბოს კარგვასა და შენარჩუნებას შორის

ენდოთერმული ცხოველები და ის ექტოთერმული ცხოველები, რომლებიც თერმორეგულაციას ახერხებენ და ისე წარმართავენ თავიანთი სითბოს ბიუჯეტს, რომ სითბოს მიღების სიჩქარე სითბოს კარგვის სიჩქარის ტოლია. თუ სითბოს ბიუჯეტი დაბალანსებული არ არის, ცხოველი შეიძლება გადახურდეს ან გაგრილდეს. ადაპტაციის ხუთი ძირითადი სახე ეხმარება ცხოველებს თერმორეგულაციაში.



**▲ სურათი 40.12 დამოკიდებულება სხეულისა და გარემოს ტემპერატურის შორის წყლის ენდოთერმულ და ექტოთერმული ცხოველებში.** მეტაბოლიზმის მაღალი სიჩქარის შედეგად წარმოქმნილი სითბოს საშუალებით წავი ინარჩუნებს სხეულის სტაბილურ ტემპერატურას გარემოს ტემპერატურის ძლიერი ცვალებადობის დროსაც. ზღვის შავი ქორჭილა კი წარმოქმნის მცირეოდენ მეტაბოლურ სითბოს და ეგუება გარემოში არსებულ ტემპერატურას.

## იზოლაცია

ფრინველებში და ძუძუმწოვრებში თერმორეგულაციის ერთ-ერთ ძირითად მექანიზმს იზოლაცია წარმოადგენს. იზოლაცია ბეწვით, ბუმბულით ან ცხიმის ფენით ამცირებს სითბოს ნაკადს ცხოველსა და მის გარემოს შორის. ამის შედეგად სითბოს შენარჩუნებისთვის საჭირო ენერგეტიკული დანახარჯები შედარებით ცოტაა.

ძუძუმწოვრებში საიზოლაციო ფენა დაკავშირებულია **მფარავ სისტემასთან**, რომელიც შედგება კანის, თმისა და ფრჩხილისგან (ზოგ სახეობაში ბრჭყალი ან ჩლიქი). კანი ძირითადი ორგანოა მფა-

რაც სისტემაში. კანი მოქმედებს როგორც თერმორეგულატორული ორგანო, რომელშიც მოთავსებულია ნერვები, საოფლე ჯირკვლები, სისხლძარღვები და თმის ფოლიკულები. იგი აგრეთვე იცავს სხეულის შიდა ნაწილს მექანიკური დაზიანებისგან, ინფექციებისა და გამოშრობისგან. კანი შედგება ორი შრისგან: ეპიდერმისი და დერმა. ისინი ამოფენილია ქვემოთა ქსოვილოვანი შრით – ჰიპოდერმით (**სურ. 40.14**). ეპიდერმისი კანის ზედა შრეა და შედგება ძირითადად მკვდარი ეპითელიური უჯრედებისგან, რომლებიც დროთა განმავლობაში იქცევიან. ქვედა შრეებში წარმოქმნილი ახალი უჯრედები გადაადგილდება ეპიდერმისში და ჩაანაცვლებს მკვდარ უჯრედებს. დერმა ამოფენს ეპიდერმისს და შეიცავს თმის ფოლიკულებს, ცხიმოვან და საოფლე ჯირკვლებს, კუნთებს, ნერვებს და სისხლძარღვებს. ჰიპოდერმა შედგება ცხიმოვანი ქსოვილისგან, რომელიც მოიცავს ცხიმის დამგროვებელ უჯრედებს და სისხლძარღვებს. ცხიმოვანი ქსოვილი უზრუნველყოფს სხვადასხვა სიძლიერის თერმოიზოლაციას, რაც სახეობებზეა დამოკიდებული.

ბეწვისა და ბუმბულის იზოლაციის სიძლიერე ძირითადად დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად ინარჩუნებს ჰაერის შრეს (ბეწვი დასველებისას კარგავს საიზოლაციო თვისებებს). ხმელეთის მრავალ ძუძუმწოვარში და ფრინველებში ბეწვი და ბუმბული სიცივეში ყალყზე დგება (ვერტიკალურად იწევა), რათა მეტი ჰაერი შეაკავოს. ადამიანებში თბოიზოლაცია დამოკიდებულია ძირითადად კანქვეშა ცხიმოვან შრეზე (**სურ. 40.14**). სიცივეში ე.წ. „ბატის კანი“, ანუ ხორკლიანი კანი, ჩვენი წინაპრებისგან შემორჩენილი ბეწვის ყალყზე დადგომის გადმონაშთია.

ზღვის ცხოველებს, მაგალითად, ვეშაპებს და სელაპებს, საიზოლაციო ცხიმის სქელი ფენა უშუალოდ კანქვეშა აქვთ. ზღვის ძუძუმწოვრებს უწევთ ისეთ წყალში ბინადრობა, რომლის ტემპერატურა სხეულის შიდა ტემპერატურაზე ბევრად დაბალია. მრავალი სახეობა ყოველ წელს გარკვეულ პერიოდს ატარებს პოლარულ ზღვებში.

სითბოს გაცემა წყალში 50-100-ჯერ უფრო სწრაფად ხდება, ვიდრე ჰაერში. ზღვის ძუძუმწოვრების კანის ტემპერატურა ახლოს არის წყლის ტემპერატურასთან, მაგრამ ცხიმოვანი შრის იზოლაცია იმდენად ეფექტურია, რომ ზღვის ძუძუმწოვრები ინარჩუნებენ სხეულის შინაგან ტემპერატურას დაახლოებით 36-38°C გრადუსზე. ეს ხორციელდება მეტაბოლიზმის იმ სიჩქარით, რაც ახასიათებს ხმელეთის იგივე ზომის ძუძუმწოვრებს.

## ცირკულაციური ადაპტაციები

მრავალ ენდოთერმულ და ზოგ ექტოთერმულ ცხოველს შეუძლია სხეულის შიგნიდან კანისკენ სისხლის ნაკადის მოცულობის (შესაბამისად, სითბოს) ცვლა. სისხლის გაზრდილი მიწოდება კანში **ვაზოდilatაციის**, კანის ზედაპირული სისხლძარღვების დიამეტრის ზრდის შედეგია. ვაზოდilatაცია ხდება ნერვული სიგნალების საპასუხოდ, რომლებიც სისხლძარღვების კედლების კუნთების მოდუნებას იწვევენ. ენდოთერმულ ცხოველებში ვაზოდilatაცია ჩვეულებრივ კანს ათბობს, ვინაიდან ზრდის სხეულის შიგნიდან სითბოს გაცემას რადიაციის, კონდუქციისა და კონვექციის საშუალებით (**იხ. სურ. 40.13**). საწინააღმდეგო პროცესია **ვაზოკონსტრიქცია**, რომლის დროს ხდება სისხლის ნაკადის და სითბოს გაცემის შემცირება ზედაპირული სისხლძარღვების დიამეტრის შემცირების შედეგად.

სისხლძარღვების განლაგების თავისებურებით განპირობებული კიდევ ერთი ადაპტაციაა „**დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემა**“ (countercurrent heat exchanger). იგი მნიშვნელოვანია სითბოს კარგვის თავიდან ასაცილებლად მრავალ ენდოთერმულ ცხოველში, ზღვის ძუძუმწოვრების და ფრინველების ჩათვლით. სურათ 40.15-ზე ნაჩვენებია დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემის ორი მაგალითი. ზოგ სახეობაში სისხლმა შეიძლება გაიაროს სითბოს მიმოცვლის სისტემაში, ან მას შემოუაროს. სისხლის მოცულობა, რომელიც ამ ორი სხვადასხვა გზით მიედინება, იცვლება. ეს საშუალებას აძლევს ცხოველს, არეგულიროს სითბოს კარგვის სიჩქარე გარემო პირობების მიხედვით.

მრავალი თევზი თერმოკონფორმისტია, რომელთა სხეულის ტემპერატურა განსხვავდება მხოლოდ 1-2 გრადუსით საბინადრო წყლის ტემპერატურისგან. მათგან განსხვავებით, ზოგიერთ სპეციალიზებულ ენდოთერმულ ძელოვან თევზებს და ზოგიერთ ზვიგენებს აქვთ სისხლის მიმოქცევის ისეთი ადაპტაციები, რომელთა საშუალებით მეტაბოლური სითბო სხეულში გროვდება. ამგვარი ადაპტაციები აქვთ კარგ მცურავებს – თინუსს, ხმალთევზას, თეთრ ზვიგენს. მსხვილი არტერიები ცივ სისხლს ლაყურებიდან კანქვეშა ქსოვილებში გადასცემს. მათ განშტოებებს სისხლი მიაქვს ღრმა კუნთებისკენ, სადაც მცირე სისხლძარღვები (კაპილარები) ქმნიან დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემას (**სურ. 40.16**). ენდოთერმულობა ინტენსიური აქტივობის საშუალებას იძლევა, რადგან ენდოთერმულ ცხოველებს შეუძლიათ, შეინარჩუნონ უფრო მაღალი ტემპერატურა იმ კუნთებში, რომლებსაც ცურვის დროს იყენებენ. ამ დროს სხეულის ზედაპირის ტემპერატურა დაახლოებით წყლის გარემოს ტოლია.

ზოგიერთ ქვეწარმავალს აგრეთვე აქვს ფიზიოლოგიური ადაპტაციები, რომელთა შედეგად ხდება სითბოს კარგვის რეგულაცია. მაგალითად, გალაპავოსის კუნძულების ბინადარი ზღვის იგუანა (**სურ. 22.1**) სხეულის სითბოს ინარჩუნებს ზედაპირული სისხლძარღვების ვაზოკონსტრიქციის საშუალებით: ცივ ოკეანეში ცურვისას მეტი სისხლის გადასროლა ხდება სხეულის შუაგულისკენ (ცენტრისკენ).

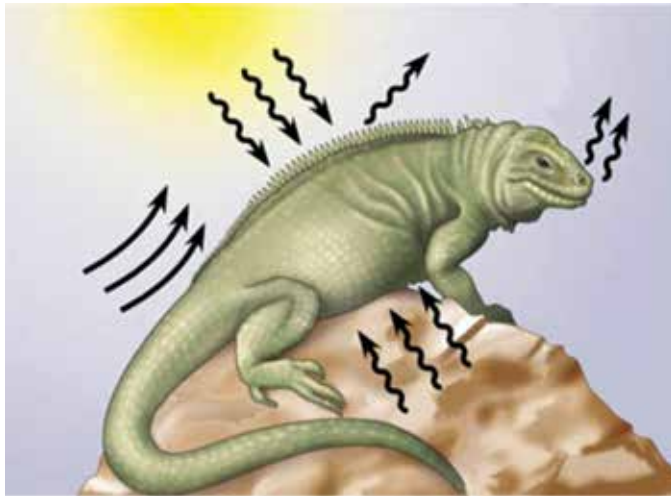
მრავალ ენდოთერმულ მწერს (ფუტკრები და ზოგიერთი ღამის პეპელა) აქვს დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემა, რომელიც ხელს უწყობს მკერდში მაღალი ტემპერატურის შენარჩუნებას, სადაც განლაგებულია საფრენი კუნთები. მაგალითად, დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემა ხელს უწყობს ზამთარში აქტიურ ღამის პეპელას, ფრენის დროს შეინარჩუნოს მკერდის ტემპერატურა 30°C-მდე თოვლიან ღამეებშიც, როცა გარემოს ტემპერატურა 0°C-ზე დაბალია (**სურ. 40.17**). თუ მწერები სიცხეში დაფრინავენ, მაშინ დინების საწინააღმდეგო სითბოს მიმოცვლის სისტემა „იკეტება“ და ფრენის დროს აქტიურად მომუშავე კუნთების მიერ წარმოქმნილი სითბო მკერდიდან მუცელში გადადის და იქიდან გარემოში გადაიცემა. ფუტკრების დედოფალი კვერცხების ინკუბაციისას სითბოს საფრენი კუნთების მოქმედების შედეგად წარმოქმნის. ეს სითბო შემდეგ მუცელს გადაეცემა, რომელსაც მდედრი კვერცხებს აჭერს.

## გაგრილება ევაპორაციის დროს სითბოს კარგვის შედეგად

მრავალი ძუძუმწოვარი და ფრინველი ისეთ გარემოში ბინად-

რადიაცია - აბსოლუტურ ნოლზე თბილი ყველა ობიექტის მიერ ელექტრო-მაგნიტური ტალღების გავრცელება. რადიაციას სითბო გადააქვს პირდაპირი კავშირის არმქონე ობიექტებს შორის. მაგალითად, ხვლიკი ითვისებს მზის მიერ გამოყოფილ სითბოს.

აორთქლება – სითხის ზედაპირის მიერ სითბოს დაკარგვა, რომელიც ზოგ მოლეკულას გაზის სახით კარგავს. წყლის აორთქლებას გარემოსთან კავშირში მყოფი ხვლიკის სველი ზედაპირიდან დიდი გამაგრილებელი ეფექტი აქვს.



კონვექცია- ზედაპირიდან ჰაერის ან სითხის მოძრაობის საშუალებით სითბოს გადატანა. მაგალითად ქარი მონაწილეობს ხვლიკის გამშრალი კანიდან სითბოს დაკარგვაში, სისხლს კი გადააქვს სითბო სხეულის ცენტრიდან კიდურებამდე

კონდუქცია – უშუალო კონტაქტში მყოფ ობიექტის მოლეკულებს შორის თერმული მოძრაობის (სითბოს) პირდაპირი გადატანა

▲ **სურათი 40.13** სითბოს მიმოცვლა ორგანიზმსა და გარემოს შორის.

რობს, სადაც თერმორეგულაციის შედეგად საჭიროა არა მარტო გათბობა, არამედ გაგრილებაც. თუ გარემოს ტემპერატურა სხეულის ტემპერატურაზე მაღალია, ცხოველი სითბოს გარემოსგან იღებს. აორთქლებით ხდება ორგანიზმის დაცვა ტემპერატურის სწრაფი ზრდისგან. ხმელეთის ცხოველები კარგავენ წყალს კანის ზედაპირიდან (აორთქლების გზით) და სუნთქვის დროს – პირიდან. წყალი აორთქლებისას სითბოს აბსორბციას ახდენს.

ზოგ ცხოველს ისეთი ადაპტაციები აქვს, რომელიც აძლიერებს გაგრილების ეფექტს. სწრაფი სუნთქვა მნიშვნელოვანია გაგრილებისთვის ფრინველებსა და ძუძუმწოვრებში.

ზოგ ფრინველს პირის ფსკერზე მოთავსებული აქვს სისხლძარღვებით მდიდარი ჩანთა, რომლის სწრაფი მოძრაობა ზრდის აორთქლების ინტენსიურობას. მაგალითად, მტრედები აორთქლების საშუალებით ინარჩუნებენ ტემპერატურას 40°C-ზე, როცა პა-

ერის ტემპერატურა 60°C-ის ტოლია. ეს შესაძლებელია, როდესაც წყალი ხელმისაწვდომია საკმარისი რაოდენობით. ოფლიანობა და აბაზანების მიღება ატენიანებს კანს და აძლიერებს აორთქლებას (**სურ. 40.18**). ხმელეთის ძუძუმწოვრების უმრავლესობას აქვს ნერვული სისტემის კონტროლის ქვეშ არსებული საოფლე ჯირკვლები (**სურ. 40.14**). აორთქლებით გაგრილება შესაძლებელია აგრეთვე ნერწყვის შესხურებით სხეულის ზედაპირზე – ზოგიერთი მღრღნელის ადაპტაცია სიცხისადმი. ზოგი ამფიბია ცვლის გამოყოფილი ლორწოს რაოდენობას აორთქლებით გაგრილების საჭიროების მიხედვით.

## ქცევითი პასუხები

როგორც ენდოთერმული, ისე ექტოთერმული ცხოველები სხვადასხვა ტიპის ქცევით პასუხობენ გარემოს ტემპერატურულ ცვლილებებს. მრავალ ექტოთერმულ ცხოველს შეუძლია შეინარჩუნოს სხეულის მუდმივი ტემპერატურა შედარებით მარტივი ქცევის საშუალებით. ზოგი ცხოველი რთული ქცევითი ადაპტაციით ხასიათდება – ასეთია ჰიბერნაცია (ძილქუში) ან მიგრაცია უფრო მოსახერხებელ კლიმატურ პირობებში.

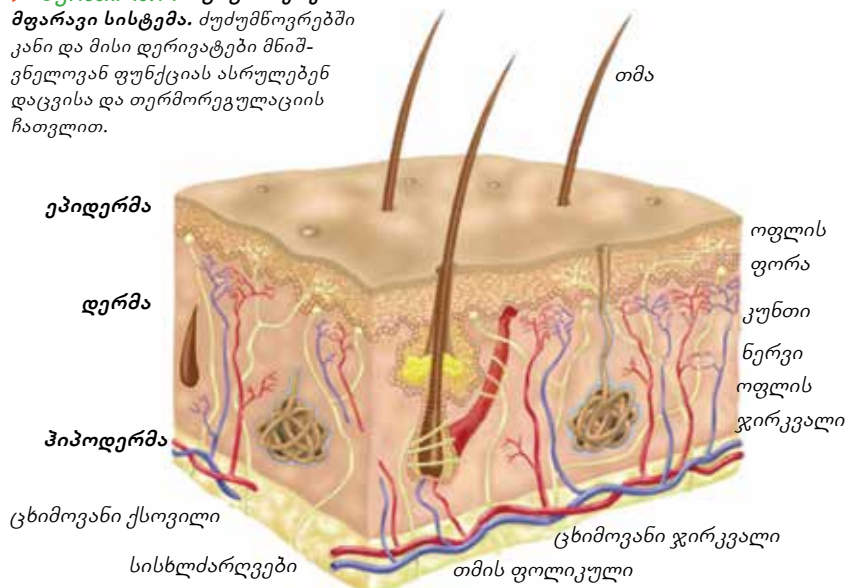
ყველა ამფიბია და ქვეწარმავლის დიდი ნაწილი ექტოთერმულია. ამიტომ ისინი აკონტროლებენ სხეულის ტემპერატურას ძირითადად ქცევის საშუალებით. ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონი ამფიბიებში მერყეობს სახეობების მიხედვით. მაგალითად, სალამანდრას რამდენიმე მსგავსი სახეობის სხეულის საშუალო ტემპერატურა მერყეობს 7°-25°C-ს შორის. ხმელეთზე ამფიბიების უმრავლესობა სითბოს კარგავს ტენიანი სხეულის ზედაპირიდან აორთქლებით, რაც ართულებს სხეულის გათბობას. თუმცა, იმ ადგილზე გადანაცვლებით, სადაც საკმარისი მზის სითბოა, ამფიბიას შეუძლია შეინარჩუნოს ოპტიმალური სხეულის ტემპერატურა. როცა გარემოს ტემპერატურა მაღულობს, ამფიბიები ეძებენ გრილ მიკროგარემოს, მაგალითად, ჩრდილს აფარებენ თავს.

ამფიბიების მსგავსად, ქვეწარმავლები თერმორეგულაციას ძირითადად ქცევის საშუალებით ახერხებენ. როდესაც ცივა, ისინი თბილ ადგილებს ეძებენ, გროვდებიან სითბოს წყაროსთან და სხეულს მას უშვებენ. სიცხეში ქვეწარმავლები გრილ ადგილებში გადაადგილდებიან, ან ისე ტრიალდებიან, რომ სითბო მათი სხეულისკენ აღარ მიდიოდეს. მრავალი ქვეწარმავალი მთელი დღის განმავლობაში ტემპერატურას ინარჩუნებს თბილიდან ცივ ადგილებში გადაადგილებით და პირიქით.

ხმელეთის უხერხემლოთა უმრავლესობა შინაგან ტემპერატურას ოპტიმალურ დონეზე ინარჩუნებს თითქმის იგივე ქცევითი მექანიზმის საშუალებით, როგორც ხერხემლიანი ექტოთერმები. უდაბნოს კუთკალია, მაგალითად, აქტივდება მაშინ, როცა გარკვეულ ტემპერატურას აღწევს. გრილ დღეებში იგი ისე აბრუნებს სხეულს, რომ მზის სხივების მაქსიმალური აბსორბცია შეძლოს. ხმელეთის სხვა უხერხემლოებს აქვთ სხვადასხვა პოზა, რომელთა საშუალებით ისინი მზის სითბოს აბსორბციას ამცირებენ ან ზრდიან (**სურ. 40.19**).

ფუტკრები იყენებენ თერმორეგულაციის ისეთ მექანიზმს, რომელსაც საფუძვლად სოციალური ქცევა უდევს. ცივ ამინდში ისინი მეტ სითბოს გამოყოფენ და ერთად გროვდებიან, რაც სითბოს შენახვას უწყობს ხელს. ინდივიდები ჯგუფში მუდმივად გადაადგილდებიან: ჯგუფის განაპირას, უფრო სიგრილეში მყოფი ინდივიდები

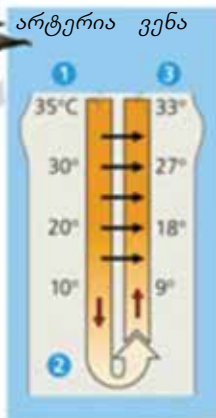
► **სურათი 40.14** ძუძუმწოვრების მფარავი სისტემა. ძუძუმწოვრებში კანი და მისი დერივატები მნიშვნელოვან ფუნქციას ასრულებენ დაცვისა და თერმორეგულაციის ჩათვლით.



ჯგუფის ცენტრისკენ მოძრაობენ, სადაც თბებიან, შემდეგ ისევ ჯგუფის განაპირას ბრუნდებიან და ადგილს სხვებს უთმობენ. ჯგუფებად შეკრებილი ფუტკრებიც კი ბევრ ენერგიას ხარჯავენ სითბოს შესანარჩუნებლად. სწორედ ამიტომ ინახავენ ფუტკრები სკაში დიდი რაოდენობით „საწვავს“ – თაფლს. ფუტკრები აკონტროლებენ სკის ტემპერატურასაც სიცხეში: მათ სკაში წყალი მოაქვთ და ფრთების სწრაფი მოძრაობით ფანტავენ. აღნიშნული ქცევა ხელს უწყობს აორთქლებას და კონვექციას, რომლებიც აგრილებს სკას. ამგვარად, ფუტკრების კოლონია თერმორეგულაციისთვის იყენებს ისეთ მექანიზმებსაც, რომლებითაც ცალკეული ინდივიდებიც ხასიათდებიან.

## მეტაბოლური სითბოს წარმოქმნის გაძლიერება

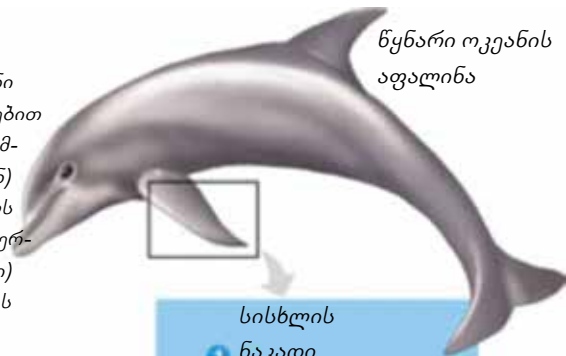
ვინაიდან ენდოთერმული ცხოველები ინარჩუნებენ გარემოზე მაღალ სხეულის ტემპერატურას, მათ უნდა შეეძლოთ სითბოს კარგვის თავიდან



1. არტერიებს თბილი სისხლი გადააქვთ ბატის კიდურებისკენ ან დელფინის ფარფლისკენ. ისინი ახლო მოპირდაპირე მიმართულებით კონტაქტშია ცივი სისხლის გადატანთან (უკან, სხეულის ცენტრისკენ) ვენებთან. ასეთი განლაგება ხელს უწყობს სითბოს გადატანას არტერიებიდან ვენებისკენ (შავი ისრები) სისხლძარღვების მთელი სიგრძის გასწვრივ.

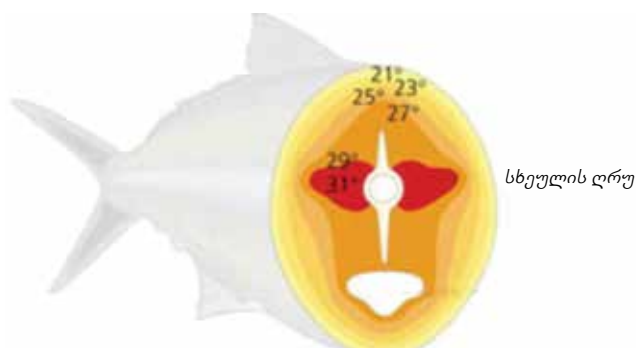
2. კიდურის ან ფარფლის ბოლოდან, სადაც არტერიული სისხლი ცივდება ცხოველის შინაგან ტემპერატურაზე დაბლა, არტერიას ჯერ კიდევ შეუძლია სითბოს გადატანა უფრო ცივ მიმდებარე ვენაში. ვენოზური სისხლი აგრძელებს სითბოს აბსორბციას, სანამ ის გადის მოპირდაპირე მიმართულებით გადაადგილებადი თბილი არტერიული სისხლის გასწვრივ.

3. როცა ვენოზური სისხლი უახლოვდება სხეულის ცენტრს, ის თითქმის ისეთივე თბილია, როგორც სხეულის შიგთავსი, რასაც მინიმუმამდე დაჰყავს სითბოს დანაკარგი, რომელიც გამოწვეულია ცივ წყალში მყოფი სხეულის ნაწილების სისხლით მომარაგებით.

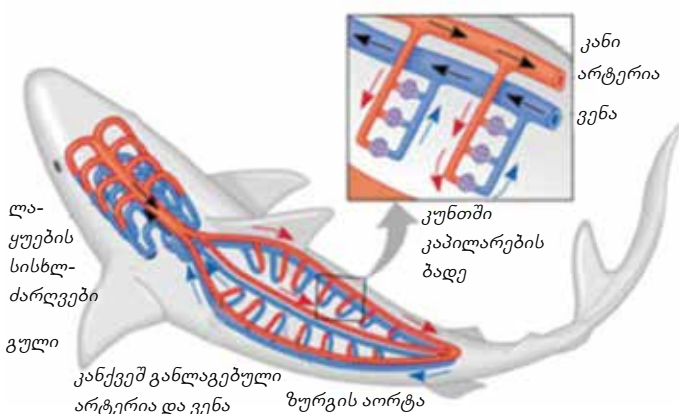


დელფინის ფარფლების ყოველი არტერია გარშემორტყმულია მოპირდაპირე მიმართულების სისხლის დინების მქონე რამდენიმე ვენით, რაც უზრუნველყოფს არტერიულ და ვენოზურ სისხლს შორის სითბოს ინტენსიურ მიმოცვლას.

▲ **სურათი 40.15** სითბოს მიმოცვლა საპირისპირო ნაკადის მექანიზმის შემთხვევაში. საპირისპირო ნაკადის მექანიზმის შემთხვევაში სითბოს მიმოცვლა იჭერს სითბოს სხეულის შიგთავსში, ანუ ამცირებს სითბოს დანაკარგს კიდურების მიერ, რომლებიც ხშირად ცივ წყალთან, ან ყინულთან, ან თოვლთან კონტაქტშია. სინამდვილეში სხეულის შოგთავსიდან არტერიულ სისხლში მოხვედრილი სითბო პირდაპირ გადადის დაბრუნებულ ვენურ სისხლში, იმის მაგივრად, რომ გარემოში მიმოიფანტოს.



(ა) **ლოურჯფარფლიანი თინუსი.** სხვა თევზებისგან განსხვავებით, ლურჯფარფლიანი თინუსი ინარჩუნებს მთავარი საცურავი კუნთების ტემპერატურას, რომელიც გაცილებით მაღალია წყლის ტემპერატურაზე (ფერებით ნაჩვენებია საცურავი კუნთების განივი ქრილი). ეს ტემპერატურა დაფიქსირდა 19°C –იან წყალში მყოფი თინუსისთვის.



(ბ) **დიდი თეთრი ზვიგენი.** ლურჯფარფლიანი თინუსის მსგავსად, დიდი თეთრი ზვიგენს საცურავი კუნთებში აქვს სითბოს მიმოცვლის საპირისპირო ნაკადის მექანიზმი, რაც ამცირებს მეტაბოლური სითბოს დანაკარგს. ყველა ძვლოვანი თევზი და ზვიგენი ლაყურებში სისხლის გავლისას კარგავს სითბოს გარემომცველ წყალთან. მაგრამ ენდოთერმულ ზვიგენებს აქვთ ვიწრო ღორსალური აორტა, რის შედეგად ლაყურებიდან პირდაპირ სხეულის შიგნით, მის ცენტრალურ მასაში, შედარებით ცოტა ცივი სისხლი მიედინება. ამის მაგივრად, ლაყურებიდან გამოსული ცივი სისხლის უმეტესი ნაწილი კანქვეშ მდებარე მსხვილ არტერიებში გადადის - სხეულის ცენტრალური მასიდან მოშორებით. მსხვილი კანქვეშა არტერიებიდან ცივი სისხლი წერილ არტერიებს გამოაქვთ და სხეულის შიგნით შეაქვთ. როგორც სურათის გადიდებულ დეტალზეა ნაჩვენები, კანქვეშ, მცირე არტერიების პარალელურად მოთავსებულია ვენები. ამ ვენებს სხეულის ძირითადი მასიდან თბილი სისხლი გამოაქვთ. თბილი სისხლის ეს საპირისპირო დინება ათბობს არტერიულ სისხლს და ამ გზით ინარჩუნებს სითბოს კუნთებში.

▲ **სურათი 40.16** თერმორეგულაცია დიდი ზომის, აქტიურ ძვლოვან თევზებში და ზვიგენებში.

► **სურათი 40.17** ზამთრის ღამის პეპელას შინა-განი ტემპერატურა. ინფრაგამოსხივების რუკაზე ნაჩვენებია ფრენის შემდეგ ღამის პეპელას სხეულში სითბოს განაწილება. გულკერდის რეგიონში ნითელი ფერი ყველაზე მაღალი ტემპერატურის მაჩვენებელია. შემდეგი სხვადასხვა შეფერილობის ზონები შეესაბამება სხეულის პროგრესულად შემცირებად ტემპერატურას.



აცილება. ენდოთერმული ცხოველები არეგულირებენ წარმოქმნილი სითბოს რაოდენობას იმისათვის, რომ კომპენსაცია მოახდინონ სითბოს დანაკარგისა. მაგალითად, სითბოს წარმოება იზრდება კუნთების ისეთი მოქმედებების დროს, როგორიც არის მოძრაობა ან კანკალი. ზოგ ძუძუმწოვრებში გარკვეულ ჰორმონებს შეუძლია გამოიწვიოს მიტოქონდრიის აქტივობის ზრდა და სითბოს გამოყოფა ატფ-ის გამოყოფის ნაცვლად. ამგვარ **თერმოგენეზს კანკალის გარეშე (NST)** ადგილი აქვს მთელს სხეულში. ზოგ ძუძუმწოვრებს აქვთ სპეციალური ქსოვილი – ყავისფერი ცხიმი კისერსა და ბეჭებში, რომლის ფუნქცია სითბოს სწრაფი წარმოქმნაა. კანკალისა და კანკალის გარეშე თერმოგენეზის საშუალებით ძუძუმწოვრებსა და ფრინველებს შეუძლიათ სიცივეში უფრო მეტი მეტაბოლური სითბო გამოიმუშაონ. ისინი სითბოს გამომუშავებას 5-10-ჯერ ზრდიან თბილ ამინდთან შედარებით. მაგალითად, მცირე ზომის წიწკანას მსგავს ფრინველს, რომელიც 20 გ-ს იწონის, შეუძლია შეინარჩუნოს აქტივობა და 40°C სხეულის ტემპერატურა მაშინ, როცა გარემოს ტემპერატურაა -40°C. ეს შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, თუ მას აქვს საკმარისი საკვები, რომელიც უზრუნველყოფს ენერგიით სითბოს წარმოსაქმნელად.

რამდენიმე დიდი ზომის ქვეწარმავალი გარკვეულ პირობებში ენდოთერმული ხდება. მაგალითად, მდებრი პითონი კვერცხის ინკუბაციის დროს ზრდის მეტაბოლიზმის სიჩქარეს კანკალის საშუალებით. ამ დროს გამომუშავდება იმდენი სითბო, რომ მისი სხეულისა და კვერცხის ტემპერატურა, 5-7°C, აღემატება გარემოს ტემპერატურას რამდენიმე კვირის განმავლობაში. დროებითი ენდოთერმულობის დროს საგრძნობლად დიდი ოდენობის ენერგიის მოხმარება ხდება. მეცნიერები დღემდე განაგრძობენ კამათს იმის თაობაზე, იყო თუ არა დინოზავრების ზოგიერთი ჯგუფი ენდოთერმული.

როგორც ადრე აღინიშნა, მფრინავი მწერების მრავალი სახეობა – ფუტკრები, ღამის პეპლები – ენდოთერმულია. ისინი ყველაზე მცირე ზომის ენდოთერმულ ცხოველებს განეკუთვნებიან. ენდოთერმული მწერების შესაძლებლობა, აიმაღლონ სხეულის ტემპერატურა, დამოკიდებულია ძლიერ საფრენ კუნთებზე. მუშაობის დროს ეს კუნთები დიდი რაოდენობით სითბოს გამოიმუშავებს. აფრენამდე მრავალი ენდოთერმული მწერი იყენებს კანკალს გახურებისთვის. ისინი საფრენ კუნთებს ისე კუმშავენ, რომ ფრთები მხოლოდ მსუბუქად ირხევა, სითბო კი ბევრი გამომუშავდება.

გახურებულ საფრენ „ძრავებში“ ქიმიური რეაქციების, და აქედან გამომდინარე, უჯრედული სუნთქვის სისწრაფე იზრდება, რაც მწერებს საშუალებას აძლევს, იფრინონ ცივ დღეებში (**სურ. 40.20**).

## უკუკავშირი თქმობა ფიზიოლოგიის დროს

სხეულის ტემპერატურის რეგულაცია ადამიანებში და სხვა ძუძუმწოვრებში წარმოადგენს რთულ სისტემას, რომლისთვისაც დამახასიათებელია უკუკავშირები (**სურ. 40.11**). ნერვული უჯრედები, რომლებიც თერმო-რეგულაციის და ჰომეოსტაზის მრავალ სხვა ასპექტს აკონტროლებენ, კონცენტრირებულია ტვინის რეგიონში, ჰიპოთალამუსში (დეტალურად განხილულია 48-ე თავში). ჰიპოთალამუსი შეიცავს ნერვული უჯრედების ჯგუფებს, რომლებიც თერმოსტატივით მოქმედებს, რეაგირებს ტემპერატურის ცვლილებაზე და მის გადახრა-

ზე ოპტიმალური წერტილიდან. აღნიშნული უჯრედები აქტივებენ მექანიზმს, რომელიც უზრუნველყოფს სითბოს შენარჩუნებას ან გაცემას (**სურ. 40.21**). ტემპერატურის ცვლილებისადმი მგრძნობიარე ნერვული რეცეპტორები განლაგებულია კანში, საკუთრივ ჰიპოთალამუსსა და სხეულის სხვა უბნებში. როდესაც ტემპერატურა მატულობს, სითბოს რეცეპტორები სიგნალს აგზავნიან ჰიპოთალამუსში არსებულ „თერმოსტატი“; ხოლო ტემპერატურის კლების შესახებ ინფორმაციას სიცივის რეცეპტორები აგზავნიან. თუ სხეულის ტემპერატურა ნორმალურზე ნაკლებია, თერმოსტატი ამცირებს სხეულის სითბოს გაცემას და აქტივებს სითბოს შენარჩუნების მექანიზმებს, მაგალითად, ზედაპირული სისხლძარღვების ვაზოკონსტრიქციას და ბეწვის ყალყზე დადგომას. ამავდროულად ხდება ორგანიზმში სითბოს გამომყოფი მექანიზმის აქტივაცია – კანკალი, კანკალის გარეშე თერმოგენები. თუ სხეულის ტემპერატურა მატულობს, თერმოსტატი კეტავს სითბოს შენახვის მექანიზმებს და ხელს უწყობს სხეულის გაგრილებას ვაზოდilatაციის, ოფლის გამომყოფის ან სუნთქვის საშუალებით. თერმოსტატი ასევე პასუხობს სხეულის პერიფერიაში მომხდარ ცვლილებებზე (მაგალითად, კანში, კიდურებში) მაშინაც კი, როდესაც სხეულის ცენტრში ტემპერატურა არ იცვლება.

## ცემპერატურის ცვლილებისადმი შეგუება

მრავალ ცხოველს შეუძლია შეეგუოს ტემპერატურის ახალ დიაპაზონს რამდენიმე დღის ან კვირის განმავლობაში. ამ ფიზიოლოგიურ პასუხს **აკლიმატიზაცია** ეწოდება. ექტოთერმული და ენდოთერმული ცხოველები გადიან აკლიმატიზაციას, თუმცა სხვადასხვაგვარად.

ფრინველებსა და ძუძუმწოვრებში აკლიმატიზაციის დროს ხდება იზოლაციის სიძლიერის ცვლილება – ზამთარში უფრო სქელი საფარველის (ბუმბულის ან ბეწვის) წარმოქმნა და მისი შეთხლება ზაფხულში. ზოგ შემთხვევაში სეზონების მიხედვით იცვლება მეტაბოლური სითბოს წარმოქმნა. ეს ცვლილებები უზრუნველყოფს სხეულის ტემპერატურის მუდმივობას ენდოთერმულ ცხოველებში ცივ და თბილ სეზონებში. ექტოთერმულ ცხოველებში აკლიმატიზაციის დროს ხდება ტემპერატურული ცვლილებების კომპენსირება. აკლიმატიზაცია ძლიერ მოქმედებს ცხოველის ფიზიოლოგიასა და ტემპერატურულ ტოლერანტულობაზე. მაგალითად, ზაფხულის აკ-



▲ **სურათი 40.18** ხმელეთის ძუძუმწოვრის ბანაობა — ადაპტაცია, რომელიც აძლიერებს ევაპორაციულ გაგრილებას.

კლიმატიზაციის შემდეგ, ლოქომ შეიძლება გაუძლოს  $36^{\circ}\text{C}$  წყლის ტემპერატურას, მაგრამ ამ დროს არ შეუძლია იცხოვროს ცივ წყალში. ზამთრის აკლიმატიზაციის შემდეგ კი ეს თევზი ცივ წყალს ადვილად უძლებს, მაგრამ მისთვის  $28^{\circ}\text{C}$ -ზე მაღალი ტემპერატურა სასიკვდილოა.

აკლიმატიზაცია ექტოთერმულ ცხოველებში, როგორც წესი, უჯრედის დონეზე ხდება. უჯრედებში იზრდება გარკვეული ფერმენტების გამოთქმა, რომლებსაც ერთი და იგივე ფუნქცია აქვთ, მაგრამ სხვადასხვა ტემპერატურაზე მოქმედებენ. მემბრანებს შეუძლიათ, შეცვალონ მათში შემავალი ნაჯერი და უჯერი ცხიმის შეფარდება, ამის შედეგად ისინი ინარჩუნებენ თხიერ მდგომარეობას სხვადასხვა ტემპერატურაზე (**იხ. სურ. 7.5**). ზოგი ექტოთერმული ცხოველი უარყოფით ტემპერატურას ეგუება ე.წ. „ანტიფრიზი“ სტრუქტურის წარმოქმნის საშუალებით, რომელიც ხელს უშლის უჯრედის შიგთავსის გაყინვას. არქტიკულ რაიონებში ან მთის ცივ მწვერვალებზე მოხინაღრე ექტოთერმული ცხოველების ორგანიზმის სითხეებში გაყინვის საწინააღმდეგო ნივთიერებები (კრიოპროტექტანტები) წარმოიქმნება, რომლებიც ცხოველებს გამოზამთრების საშუალებას აძლევს (მაგალითად, ზოგ ბაყაყებში და მრავალ ფეხსახსრიანში და მათ კვერცხში, რომლებსაც შეუძლიათ  $0^{\circ}\text{C}$ -ზე დაბალ ტემპერატურას გაუძლონ).

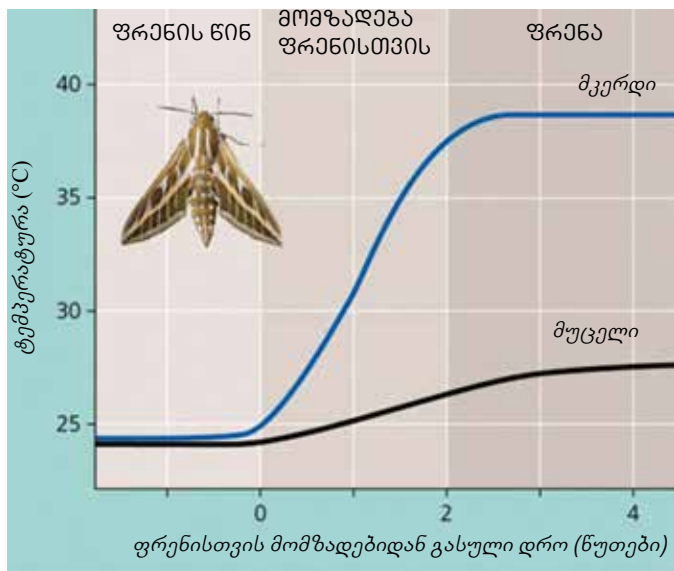
კრიოპროტექტანტები ნაპოვნია აგრეთვე არქტიკის და ანტარქტიკის ზღვის თევზებში, სადაც წყლის ტემპერატურა შესაძლებელია იყოს  $-1,8^{\circ}\text{C}$ , რაც სხეულის სითხეების გაყინვის ტემპერატურაზე დაბალია.

ხშირ შემთხვევაში უჯრედი სწრაფად ეგუება ტემპერატურულ ცვლილებებს. მაგალითად, ლაბორატორიაში გაზრდილი ძუძუმწოვრების უჯრედული კულტურა პასუხობს ტემპერატურის მნიშვნელოვან გაზრდაზე სპეციფიკური მოლეკულების დაგროვებით, რომლებსაც **სტრესით გამოწვეული ცილები** ეწოდება. აღნიშნული ცილების შემადგენლობაში შედის ე.წ. **სითბური შოკის ცილებიც**.  $37^{\circ}\text{C}$ -დან  $43^{\circ}\text{C}$ -მდე ტემპერატურის გაზრდით გამოწვეული სითბური შოკის რამდენიმე წუთის შემდეგ, უჯრედები იწყებენ აღნიშნული ცილების სინთეზს. ეს მოლეკულები ხელს უწყობს უჯრედის ცილების შენარჩუნებას, რომლებიც სხვა შემთხვევაში დაიშლებოდა. სტრესით გამოწვეული ცილები ნაპოვნია ბაქტერიებში, საფუარში, მცენარეულ და ცხოველურ უჯრედებში. ისინი იცავენ უჯრედებს განადგურებისგან მაშინ, როცა ძლიერი სტრესული ფაქტორები მოქმედებენ ორგანიზმზე.

### ▲ **სურათი 40.19** ნემსიყლაპიას თერმორეგულატორული ქცევა.

ნემსიყლაპიას ე.წ. „ობელისკისებური“ პოზა სპეციალურ ადაპტაციას წარმოადგენს, რომლის საშუალებით, მზეზე სხეული ზედაპირის ნაკლები ფართობის ექსპოზიცია ხდება. ეს პოზა ამცირებს სითბოს მიღებას რადიაციის საშუალებით.





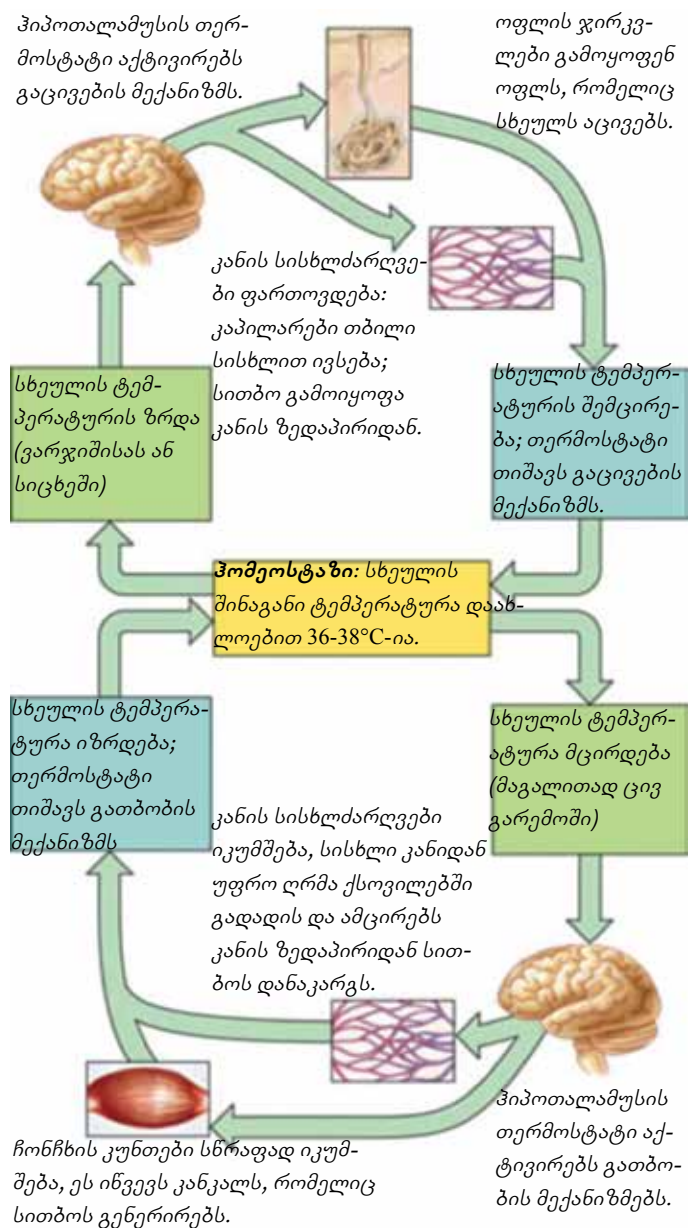
▲ **სურათი 40.20** წინასაფრენი გახურება ლამის პეპელა ბუსთვალაში (*Manduca sexta*). ბუსთვალა ერთ-ერთი სახეობაა მწერების მრავალი სახეობიდან, რომელიც იყენებს მკერდის კუნთების კანკალს ფრენისწინა გახურებისთვის. გახურება ეხმარება კუნთების მძლავრ მოქმედებას, რაც საჭიროა მწერის სხეულის ჰაერში ასაწევად. აფრენის შემდეგ მკერდის კუნთების მოქმედება უზრუნველყოფს მკერდის მაღალ ტემპერატურას.

## უბტაბა და ენტგის შენარჩუნება

მიუხედავად მრავალი ადაპტაციისა, რომელიც ცხოველებს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებაში ეხმარება, დროდადრო ისინი იმდენად მძიმე პირობებში ხვდებიან, რომ უჭირთ სითბოს, ენერგიისა და ნივთიერებათა ცვლის ბიოჯეტების რეგულირება. მაგალითად, წლის განსაზღვრულ სეზონზე (ან დღის გარკვეულ დროს) ტემპერატურა შეიძლება იყოს ექსტრემალურად მაღალი ან დაბალი, ან საკვები იმდენად მწირი, რომ ვერ დააკმაყოფილოს ცხოველთა მოთხოვნილებები. ადაპტაცია, რომელიც ცხოველებს მძიმე პირობებში ენერგიის შენარჩუნების შესაძლებლობას აძლევს, არის ე.წ. „უმოდრობა“: ფიზიოლოგიური მდგომარეობა, რომლის დროს მეტაბოლიზმის სიჩქარე ძალზე კლებულობს.

**ჰიბერნაცია** (ზამთრის ძილქუში) არის ხანგრძლივი უმოდრობა, ადაპტაცია ზამთრის სიცხისა და საკვების სიმცირისადმი. როდესაც ხერხემლიან ენდოთერმებს (ფრინველებს და ძუძუმწოვრებს) უმოდრობის, ანუ ჰიბერნაციის პერიოდი ეწყებათ, მათი სხეულის ტემპერატურა ეცემა. ფაქტობრივად „გამოირთვება“ მათი სხეულის თერმოსტატი. ტემპერატურის დაცემა ძალზე საგრძნობი შეიძლება იყოს 1-2°C-მდე, ზოგ შემთხვევაში 0°C-ზე დაბლა. მეტაბოლიზმის დაბალი სიჩქარის და ნაკლები სითბოს წარმოქმნის შედეგად შენარჩუნებული ენერგია ძალზე მნიშვნელოვანია. ჰიბერნაციის დროს ცხოველი ხარჯავს რამდენიმე ასეული კალორით ნაკლებ ენერგიას, ვიდრე მაშინ, როცა ინარჩუნებს სხეულის ტემპერატურას 36-38°C-ზე. ამის გამო, იმ ცხოველებს, რომლებსაც ჰიბერნაცია ახასიათებთ, შეუძლიათ გადარჩენენ არახელსაყრელ პირობებშიც და მოიხმარონ მცირეოდენი ენერგია, რომელიც მომარაგებულია სხეულის ქსოვილებში ან სოროში შენახულ საკვებში.

ზოგიერთი სახეობის ციყვი საყვარელი საკვლევი მოდელია



▲ **სურათი 40.21** ჰიპოთალამუსის, როგორც თერმოსტაზის მოქმედება თერმორეგულაციის დროს.

ბიოლოგებისთვის, რომლებიც ჰიბერნაციას შეისწავლიან (სურ. 40.22). მაგალითად, ციყვი, რომელიც ბინადრობს კალიფორნიის მაღალმთიანეთში არის აქტიური მხოლოდ გაზაფხულსა და ზაფხულში. იგი ამ დროს ინარჩუნებს სხეულის ტემპერატურას 37°C-ს, ხოლო მეტაბოლიზმის სიჩქარეს 85კკალ/დღეში. სექტემბერში ეს ცხოველი თავს აფარებს სოროს, სადაც იგი 8 თვეს ატარებს ჰიბერნაციაში. ამ პერიოდში ციყვის სხეულის ტემპერატურა ოდნავ აღემატება სოროში არსებულ ტემპერატურას, რომელიც შეიძლება ნული გრადუსიც კი იყოს. ასეთ დროს მეტაბოლიზმის სიჩქარე ექსტრემალურად დაბალია (სურ. 40.22). კვირაში ან ორ კვირაში ერთხელ იგი იღვიძებს რამდენიმე საათით, გამოიმუშავებს მეტაბოლურ სითბოს და სხეულის ტემპერატურა 37°C-მდე აჰყავს. ეს პერიოდული გაღვიძებები საჭიროა იმ ფუნქციების შესანარჩუნ-

ნებლად, რომლებიც მაღალ ტემპერატურას საჭიროებს. გვიან გაზაფხულზე, როდესაც გარემოს ტემპერატურა იზრდება, ციყვი იღვიძებს. ჰიბერნაციის საშუალებით ციყვი თავს იცავს ზამთრის სიცვიდან და საგრძნობლად ამცირებს ზამთარში გადარჩენისთვის საჭირო ენერგეტიკულ დანახარჯებს, მაშინ, როცა საკვები არ მოიპოვება. იმის ნაცვლად, რომ დახარჯოს 150 კკალ ენერგია დღეში, რათა შეინარჩუნოს სხეულის ნორმალური ტემპერატურა ზამთრის ამინდში, ციყვი თავის სოროში ჰიბერნაციის დროს დღეში მხოლოდ 5-8 კკალ-ს ხარჯავს და შეუძლია იარსებოს მხოლოდ მომარაგებული ცხიმის ხარჯზე.

**ესტივაცია**, ზაფხულის უმოძრაობა, ასევე ხასიათდება შენელებული მეტაბოლიზმით. ესტივაცია ცხოველებს საშუალებას აძლევს, გადაიტანონ მაღალი ტემპერატურა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში და მწირი წყლის რესურსებით. ჰიბერნაცია და ესტივაცია ირთვება დღის სინათლის ხანგრძლივობის ცვლილების შედეგად. როდესაც დღის ხანგრძლივობა მცირდება, ზოგი ჰიბერნაციის მქონე ცხოველი იწყებს საკვების მომარაგებას სოროებში, ზოგი ჭამს დიდი რაოდენობით საკვებს. მაგალითად, ციყვები ჰიბერნაციის წინა პერიოდში ერთ თვეში წონას იორმაგებენ.

მრავალ მცირე ზომის ძუძუმწოვარს და ფრინველს ახასიათებს **დღიური უმოძრაობა**, რაც საკვების მოპოვებასთან არის დაკავშირებული. მაგალითად, ღამურების უმრავლესობა ღამე იკვებება, ხოლო დღის განმავლობაში უმოძრაოდ არის. მეორე მხრივ, ფრინველი კოლიბრი იკვებება მთელი დღის განმავლობაში, ხოლო ღამით უმოძრაო მდგომარეობაში გადადის. ყველა ის ენდოთერმული ცხოველი, რომელსაც დღეღამური უმოძრაობა ახასიათებს, შედარებით მცირე ზომისაა. როდესაც ისინი აქტიურები არიან, მათ მეტაბოლიზმის მაღალი სიჩქარე ახასიათებთ და, შესაბამისად, ენერგიასაც დიდი რაოდენობით ხარჯავენ. იმ საათებში, როცა ამ

ცხოველებს საკვების მიღება არ შეუძლიათ, უმოძრაობა ეხმარებათ, გადარჩნენ მომარაგებული ენერგიის ხარჯზე.

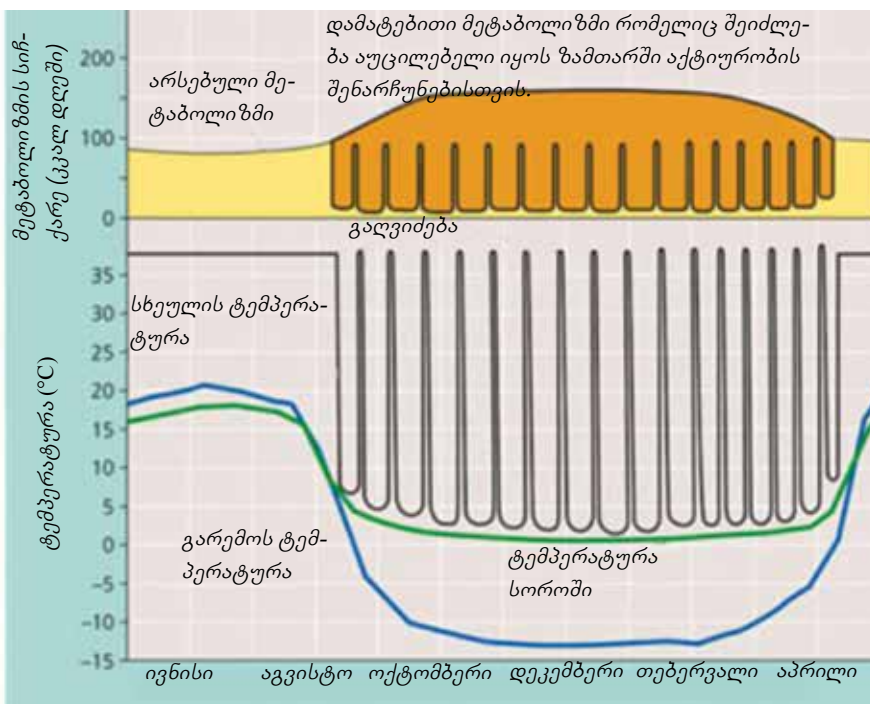
ცხოველებში აქტივობის და უმოძრაობის დღეღამურ ციკლს ბიოლოგიური საათი აკონტროლებს (**იხ. თავი 48**). ადამიანებში ძილის მოთხოვნილება და ძილის დროს სხეულის ტემპერატურის სუსტი კლება შესაძლებელია ოდესღაც ჩვენს ძუძუმწოვარ წინაპრებში არსებული უმოძრაობის პერიოდის გადმონაშთი იყოს.

განვიხილოთ ცხოველთა ბიოლოგიის ძირითადი პრინციპები. ახლა უკვე მზად ვართ, შევისწავლოთ ცხოველებში მიმდინარე ისეთი პროცესები, როგორიც არის საჭმლის მონელება, სისხლის მიმოქცევა, აირთა ცვლა, ნარჩენების გამოყოფა, გამრავლება და კოორდინაცია – მომდევნო თავების თემები.

## ჯანცუფცია ცყსცი **40.5**

1. შეუძლიათ თუ არა ექტოთერმებს, შეინარჩუნონ სხეულის სტაბილური ტემპერატურა? ახსენით, რატომ.
2. როგორ ხასიათს ატარებს სითბოს მიმოცვლა „ქარის ციების“ დროს (როდესაც ორგანიზმი შეიგრძნობს უფრო დაბალ ტემპერატურას, ვიდრე სინამდვილეშია)?
3. ზოგიერთი ფრინველი მშრალ ტროპიკულ ტყეებში პერიოდულად ტორპორში ვარდება, განსაკუთრებით მშრალ სეზონებზე. ახსენით, რატომ.

▼ **სურათი 40.22** ციყვის ტემპერატურა და მეტაბოლიზმი ჰიბერნაციის პერიოდში



## მიზნობრივი კანცეფციების მთავარი მიზანშეწონი

### კანცეფცია 40.1

ცხოველთა ზომა და ფორმა ცალიბდობა ფიზიკური კანონებისა და გარემოს მიხედვით

- **ფიზიკის კანონები და ცხოველთა ფორმები** უნარი, განახორციელოს გარკვეული მოქმედება, მაგალითად ფრენა, დამოკიდებულია ცხოველთა ზომასა და ფორმაზე. ევოლუციური კონვერგენცია არის სხვადასხვა სახეობის დამოუკიდებელი ადაპტაცია მსგავს გარემოსთან.
- **ურთიერთობა გარემოსთან** ცხოველის თითოეული უჯრედისთვის წყლის გარემო ხელმისაწვდომი უნდა იყოს. მარტივი ორშრიანი ჩანთები და ბრტყელი ფორმა ზრდის შეხების ზედაპირს გარემოსთან. უფრო რთული სხეულის მქონე ორგანიზმებს აქვთ დანაოჭებული შიგნითა ზედაპირი, რომელიც სპეციალიზირებულია ნივთიერებათა მიმოცვლაზე.

### კანცეფცია 40.2

ცხოველთა ფორმა და ფუნქცია დაკავშირებულია ერთმანეთთან ორგანიზაციის ყველა დონეზე

- ცხოველები უჯრედებისგან შედგებიან. მსგავსი სტრუქტურისა და ფუნქციის მქონე უჯრედთა ჯგუფები ქმნის ქსოვილებს. სხვადასხვა ქსოვილი ქმნის ორგანოებს. ორგანოები ერთად ორგანოთა სისტემას წარმოადგენს.
- **ქსოვილების სტრუქტურა და ფუნქცია** ეპითელური ქსოვილი ფარავს სხეულის ზედაპირს, ამოფენს შინაგან ორგანოებსა და ღრუებს. შემაერთებული ქსოვილი უკავშირდება და ამაგრებს სხვა ქსოვილებს. კუნთოვანი ქსოვილი იკუმშება ნერვული იმპულსის საპასუხოდ. ნერვული ქსოვილი ატარებს ნერვულ იმპულსს მთელ ცხოველში.
- **ორგანოები და ორგანოთა სისტემები** სხეულის ფუნქციები მთლიანობაში უფრო მეტია, ვიდრე მის ნაწილთა ჯამი, რადგან ყველა ქსოვილის, ორგანოსა და ორგანოთა სისტემების მოქმედება კოორდინირებულია.

### კანცეფცია 40.3

ცხოველები იყენებენ საკვების ქიმიურ ენერგიას ფორმისა და ფუნქციის შესანახად

- **ბიოენერგეტიკა** ცხოველები ქიმიურ ენერგიას იღებენ საკვებიდან. ენერგიის დიდი ნაწილი რჩება ატფ-ის სახით, რაც განაპირობებს უჯრედის ცხოველქმედებას. ცხოველის მეტაბოლური სიჩქარე არის ტოტალური ენერგიის რაოდენობა, რომელსაც იგი იყენებს დროის ერთეულში. მეტაბოლური სიჩქარე ზოგადად უფრო მაღალია ენდოთერმებში, რომლებიც ინარჩუნებენ სხეულის მუდმივ ტემპერატურას მეტაბოლური სითბოს საშუალებით, ვიდრე ექტოთერმებში, რომლებიც დამოკიდებული არიან სითბოს გარეგან წყაროზე სხეულის ტემპერატურის შესანარჩუნებლად.
- **გავლენა მეტაბოლურ სიჩქარეზე** მეტაბოლური სიჩქარე დაანგარიშებულია გრამ წონის ერთეულებზე უკუპროპორციულადაა დაკავშირებული სხეულის ზომასთან. ცხოველების აქტივობის დროს მეტაბოლური სიჩქარე აღემატება ძირითად სიჩქარეს (BMR ან SMR). ზოგადად, ენდოთერმებს შეუძლიათ შეინარჩუნონ ინტენსიური აქტივობა უფრო ხანგრძლივად, ვიდრე ექტოთერმებს.
- **ენერგეტიკული ბალანსი** ცხოველები ენერგიას იყენებენ ძირითადად (სტანდარტულად) მეტაბოლიზმისთვის, აქტივობისთვის, ჰომეოსტაზის შენარჩუნებისთვის, ზრდისა და გამრავლებისთვის.

### კანცეფცია 40.4

მეტი ცხოველი ატარებს თავის შინაგან გარემოს შედარებით მაღალ საზღვრებს ფაზაში

- ჰომეოსტაზი წარმოადგენს ცხოველის შიდა მუდმივ გარემოს. ეს არის ბალანსი გარეგან ცვლილებებსა და ცხოველის შინაგანი ჰომეოსტაზის მექანიზმებს შორის.
- **რეგულაცია და ადაპტაცია** ცხოველები გარემოს ცვლილებებს იტანენ შინაგანი ცვლილებების რეგულირებით ან ადაპტაციით.
- **ჰომეოსტაზის მექანიზმი** უჯრედშორისი სითხე, რომლის გარემოცვაშიც ცხოველის უჯრედებია, ჩვეულებრივ დიდად

განსხვავდება გარე გარემოსგან. ჰომეოსტაზის მექანიზმი არეგულირებს ცვლილებებს შიდა გარემოში და ჩვეულებრივ მოიცავს უარყოფით უკუკავშირს.

## ▶ პანცოფცია 40.5

**თერმორეგულაცია, ტემპერატურის განპირობებისა და მისი ცვლილების აგებულებით, ფიზიოლოგიური და ქიმიური, სხეულის უკუკავშირების მექანიზმების შენარჩუნება**

- ▶ ცხოველები ინარჩუნებენ შინაგან ტემპერატურას თერმორეგულაციის საშუალებით.
- ▶ **ექტოთერმები და ენდოთერმები** უხერხემლოების, თევზების, ამფიბიებისა და არამფრინავი რეპტილიების უმეტესობა ექტოთერმია. ენდოთერმია ენერგეტიკული თვალსაზრისით უფრო ძვირია, ვიდრე ექტოთერმია. სხეულის მაღალი ტემპერატურა ცხოველს შესაძლებლობას აძლევს, შეინარჩუნოს აერობული მეტაბოლიზმის მაღალი სიჩქარე.
- ▶ **სითბოს მიმოცვლის ხერხი** გამტარებლობა, კონვექცია, რადიაცია და აორთქლება უზრუნველყოფს სითბოს მიღებას ან გაცემას.
- ▶ **სითბოს მიღებისა და გაცემის ბალანსი** თერმორეგულაცია გულისხმობს ფიზიოლოგიისა და ქიმიური რეგულაციის. იზოლაციას, ვაზოდilatაციას და ვაზოკონსტრიქციას ზეგავლენა აქვს სითბოს გაცემის სისწრაფეზე. სუნთქვა, ოფლიანობა და სითბით დასველება ზრდის აორთქლებას, აგრილებს სხეულს. ექტოთერმებიც და ენდოთერმებიც არეგულირებენ სითბოს მიმოცვლის გარემოსთან ქიმიური საშუალებით. ზოგ ცხოველს შეუძლია მეტაბოლური სითბოს წარმოქმნის რეგულირება.
- ▶ **უკუკავშირის მექანიზმი თერმორეგულაციაში** ძუძუმწოვრები თავიანთი სხეულის ტემპერატურას არეგულირებენ რთული უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმებით. რეგულაცია მოიცავს ორგანოთა რამდენიმე სისტემას, მათ შორის ნერვული და სისხლის მიმოქცევის სისტემებს.
- ▶ **ტემპერატურის ცვლილებისადმი შეგუება** აკლიმატიზაცია საშუალებას აძლევს ენდოთერმებსა და ექტოთერმებს შეეგუონ გარემოს ტემპერატურის ცვლილებას. აკლიმატიზაციამ შეიძლება გამოიწვიოს უჯრედული რეგულაცია ან, ფრინველებისა და ძუძუმწოვრების შემთხვევაში, შეცვალოს იზოლაცია და მეტაბოლური სითბოს წარმოქმნა.
- ▶ **უძრაობა და ენერგიის შენარჩუნება** უძრაობა ინახავს ენერგიას გარემოს უკიდურესი ცვლილებების დროს. ცხოველები შეიძლება მიეცნენ უძრავ მდგომარეობას ზამთარში (ჰიბერნაცია), ზაფხულში (ესტივაცია) ან ძილის დროს (დღიური ტორპორი). ტორპორი მოიცავს მეტაბოლური სიჩქარის დაკლებას და საშუალებას აძლევს ცხოველს, დროულად გაუმკლავდეს არასასურველ ტემპერატურას, საკვების ან წყლის ნაკლებობას.

## მეამბნოთ სკუთაბი ცდნა

### თუთშეთასქმა

1. განიხილეთ ენერგეტიკული ბალანსი ადამიანში, სპილოში პინგვინში, თაგვსა და პითონში. ————— შეიძლება ჰქონდეს ენერგიის მაღალი, წლიური დანახარჯი, ————— კი ენერგიის მაღალი დანახარჯი მასის ერთეულზე.
  - ა. სპილო; თაგვი
  - ბ. სპილო; ადამიანი
  - გ. ადამიანი; პინგვინი
  - დ. თაგვი; პითონი
  - ე. პინგვინი; თაგვი
2. მოცემული სტრუქტურებიდან ან მასალისგან, რომელია არასწორად დანაწილებული ქსოვილთან?
  - ა. ოსტეონი — ძვალი
  - ბ. ფიბრობლასტები — ჩონჩხის კუნთები
  - გ. თრომბოციტები — სისხლი
  - დ. ქონდროციტების სულფატი — ხრტილი
  - ე. ბაზალური მემბრანა — ეპითელიუმი
3. მოცემული ცხოველებიდან, რომელი ხარჯავს ენერგიის პროცენტს ჰომეოსტაზის რეგულაციაზე უფრო მეტად?
  - ა. მტკნარი წყლის ამება
  - ბ. ზღვის მედუზა (უხერხემლო)
  - გ. ზომიერი სარტყლის გველი
  - დ. უდაბნოს მწერი
  - ე. უდაბნოს ფრინველი
4. უნებლიე კუნთები, რომლებიც ინვევენ საკვების მიღებისას ნაწლავების ტალღისებრ შეკუმშვას, არის
  - ა. განივზოლიანი კუნთები
  - ბ. გულის კუნთები
  - გ. ჩონჩხის კუნთები
  - დ. გლუვი კუნთები
  - ე. ჩართული კუნთები
5. ბიოენერგეტიკის შესახებ რომელი დებულებაა სწორი?
  - ა. ცხოველის მეტაბოლური დონე არასდროს იცვლება
  - ბ. BMR შეიძლება განსაზღვრული იყოს მხოლოდ სპეციფიკურ ტემპერატურაზე.
  - გ. ენდოთერმები თბებიან მეტაბოლური სითბოთი.
  - დ. SMR ყველაზე კარგად იზომება ექტოთერმების კვების შემდეგ.
  - ე. ექტოთერმებიც და ენდოთერმებიც იყენებენ ენერგიის იგივე ძირითად „სტრატეგიას“.
6. უმცირეს უჯრედთან შედარებით, იმავე ფორმის უდიდეს უჯრედს აქვს
  - ა. მცირე ზედაპირი
  - ბ. მცირე ზედაპირი მოცულობის ერთეულზე.
  - გ. იგივე ზედაპირი მოცულობის ბრუნვაზე.
  - დ. საშუალოდ მცირე მანძილი მიტოქონდრიასა და ჟანგბადის გარე წყაროს შორის.
  - ე. მცირე ციტოპლაზმა ბირთვის ბრუნვაზე.

7. მოცემულიდან, რომელი არ არის ადაპტაცია ცხოველსა და გარემოს შორის სითბოს მიმოცვლის დონის შესამცირებლად?
  - ა. ბუმბული ან ბალანი
  - ბ. ვაზოკონსტრიქცია
  - გ. თერმოგენეზი კანკალის გარეშე
  - დ. სითბოს საპასუხო მიმოცვლა
  - ე. კანქვეშა ცხიმი ან ცხიმის ფენა
8. ფიზიოლოგიური პასუხის რომელი მაგალითია დადებითი უკუკავშირი?
  - ა. სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციის მომატება ასტიმულირებს პანკრეასის მიერ ინსულინის სეკრეციას, ჰორმონის, რომელიც ამცირებს სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციას.
  - ბ. სისხლში CO<sub>2</sub>-ის მაღალი კონცენტრაცია იწვევს ღრმა, მეტად სწრაფ სუნთქვას, რაც გამოყოფს CO<sub>2</sub>-ს.
  - გ. ნერვული უჯრედის სტიმულაციას იწვევს უჯრედში შემავალი ნატრიუმის იონები, რომელთა ზეგავლენით შესვლა უჯრედში იზიდავს ნატრიუმის მეტ იონს.
  - დ. სხეულის მიერ სისხლის ნითელი უჯრედების წარმოქმნა, რასაც გადააქვს ჟანგბადი ფილტვებსა და სხვა ორგანოებში, სტიმულირდება ჟანგბადის მცირე კონცენტრაციით.
  - ე. ჰიპოფიზი ახდენს ჰორმონის TSH-ის სეკრეციას, რომელიც ასტიმულირებს ფარისებრ ჯირკვალს, წარმოქმნას სხვა ჰორმონი — თიროქსინი; თიროქსინის მაღალი კონცენტრაცია თრგუნავს ჰიპოფიზის მიერ TSH-ის სეკრეციას.
9. ცხოველის ენერგიისა და ნივთიერებების შენატანმა შეიძლება გადააჭარბოს მის შენატანს.
  - ა. თუ ცხოველი ენდოთერმია, რომელმაც ყოველთვის მეტი ენერგია უნდა მიიღოს მისი მაღალი მეტაბოლური დონის გამო.
  - ბ. თუ ის აქტიურად იკვებება საკვებით.
  - გ. თუ ის განიცდის ჰიპერნაციას.
  - დ. თუ ის იზრდება და ზრდის თავის ბიომასას.
  - ე. არასდროს — ჰომეოსტაზი მუდამ არეგულირებს ენერგიისა და საკვები ნივთიერებების ბალანსს.
10. თქვენ სწავლობთ ტროპიკულ, დიდ რეპტილიას, რომელსაც აქვს მაღალი და სხეულის მუდმივი ტემპერატურა. როგორ განსაზღვრავთ, ეს ცხოველი ენდოთერმია თუ ექტოთერმია?
  - ა. თქვენ იცით, რომ მას სხეულის მაღალი და მუდმივი ტემპერატურა აქვს, ამიტომ შეიძლება ის ენდოთერმი იყოს.
  - ბ. თქვენ იცით, რომ ის შეიძლება ექტოთერმი იყოს, რადგან არაა ფრინველი ან ძუძუმწოვარი.
  - გ. თქვენ მსჯელობთ, რომ რეპტილია სხვადასხვა ტემპერატურაზე მისი სხეულის ტემპერატურა და მეტაბოლური დონე იცვლება გარემოს ტემპერატურასთან ერთად. თქვენ ასკვნით, რომ ის ექტოთერმია.
  - დ. თქვენ შენიშნეთ, რომ გარემოს აქვს მაღალი და მუდმივი ტემპერატურა. რადგანაც სხეულის ტემპერატურა

ექვემდებარება გარემოს ტემპერატურას, ასკვნით, რომ ის ექტოთერმია.

- ე. თქვენ ზომავთ რეპტილიის მეტაბოლურ დონეს და რადგანაც ის უფრო მაღალია, ვიდრე მონათესავე სახეობებისა ზომიერი სარტყლის ტყეში, ასკვნით, რომ ეს რეპტილია ენდოთერმია და იგი კავშირშია ექტოთერმიასთან.

## უჯრედული კავშირი

ბიოლოგმა კ. ბერგმანმა აღნიშნა, რომ ძუძუმწოვრები და ფრინველები, რომლებიც ბინადრობენ მაღალ განედზე, არიან უფრო მოზრდილი ზომის, ვიდრე დაბალ განედზე მობინადრე იგივე სახეობები. გამოკვლევას, ზოგჯერ ბერგმანის წესად წოდებულს, გამოწვევას აქვს, მაგრამ ბევრ შემთხვევაში ჭეშმარიტია. გამოიყენეთ ევოლუციური თეორია ამ „წესში“.

## მცენიჭი კვლევა

აღმოსავლეთში მობინადრე მუხლუხო (*Malacosoma americanum*) ბინადრობს აბრეშუმის ბუდის მოზრდილ ჯგუფებში ან ალუბლის ხეში გაკეთებულ ბუდეებში. ისინი წარმოადგენენ პირველ მწერებს, რომლებიც გაზაფხულზე აქტივდებიან და ადრე ჩნდებიან სეზონზე, როდესაც დღის ტემპერატურა ყინვიდან ძლიერ სიცხემდე იცვლება. დღის განმავლობაში მათი კოლონიის შესწავლისას, დაინახავთ საოცარ სხვაობას მათ ჯგუფთა ქვეცვაში: დილით ადრე, შავი მუხლუხოები ისვენებენ მჭიდრო დაჯგუფებულები საბინადრო ზედაპირის აღმოსავლეთ ნაწილში. შუადღეს, ჯგუფები ინაცვლებენ ზედაპირის ქვეშ, თითოეული მუხლუხო ეკიდება რამდენიმე კიდურით. ჰიპოთეზის თანახმად ასხენით ეს ქცევა. როგორ შეგიძლიათ შეამოწმოთ თქვენი ჰიპოთეზა?

კვლევა როგორ მოქმედებს ტემპერატურა მეტაბოლურ დონეზე დაფინიაში?

## მცენიჭმა, ფიქნაღმა და საზღვარდმა

სამედიცინო კვლევები სწავლობს ადამიანის სხვადასხვა ქსოვილის ხელოვნურ პირობებში შენახვის შესაძლებლობებს. მაგალითს წარმოადგენს სითხე, რომელიც შეიძლება შეინახონ როგორც „ხელოვნური სისხლი“ და ხელოვნური კანი, რომელიც საჭიროებისამებრ გამოიყენება სერიოზული აფეთქებისას დაზარალებულთათვის. სხვა რა შემთხვევაში შეიძლება იყოს გამოყენებული ხელოვნური სისხლი ან კანი? რა მახასიათებლებია საჭირო სხეულის ნორმალური ფუნქციონირებისთვის? რატომ ფუნქციონირებს უკეთესად ნამდვილი ქსოვილი? რატომ არ გამოიყენება ბუნებრივი მასალა თუ იგი უკეთესად ფუნქციონირებს? შეგიძლიათ მოიფიქროთ სხვა რომელიმე ხელოვნური ქსოვილი, რომელიც მეტად გამოიყენება? რა პრობლემებია მოსალოდნელი მათი განვითარებისა და გამოყენების შემთხვევაში?

# 41

## ცხოველთა კვება



▲ სურათი 41.1 თანამედროვე ადამიანები საკვებს მალაზიებსა და ბაზრებში მოიპოვებენ.

### ბიტითადი კონცეფციები

- 41.1** ჰომეოსტაზის მექანიზმები აკონტროლებს ნივთიერებათა ცვლის ენერგიის ბალანსს
- 41.2** ცხოველის დიეტამ ორგანიზმში უნდა უზრუნველყოს აუცილებელი საკვებით და ნახშირბადის შემცველი ორგანული მონომერებით
- 41.3** საკვების გადამუშავების მთავარი სტადიებია მიღება, მონელება, შეწოვა და გამოყოფა
- 41.4** ძუძუმწოვართა საჭმლის მომნელებელ სისტემაში ყველა ორგანოს მისთვის დამახასიათებელი ფუნქცია აკისრია
- 41.5** ხერხემლიანთა მომნელებელი სისტემის ევოლუცია ხშირ შემთხვევაში საკვების თვისებებთან შეგუებაა

### შესავალი

#### კვების საჭიროება

საკვების მიღება გვახსენებს, რომ ჩვენ ჰეტეროტროფები ვართ და საკვების მუდმივ მომარაგებაზე ვართ დამოკიდებული (სურ. 41.1). ყველა ცხოველი იკვებება სხვა ორგანიზმებით – მკვდარით ან ცოცხალით, მათი მთლიანი ან დანაწევრებული სხეულით. ცხოველების სამ კვებით კატეგორიას გამოყოფენ: **ჰერბივორები** (მცენარის მჭამელები), მაგალითად გორილა, რქოსანი საქონელი, ლოკოკინები ძირითადად აუტოტროფებით (წყალმცენარეები ან უმაღლესი მცენარეები) იკვებებიან; **კარნივორები** (ხორცის მჭამელები), მაგალითად ზვიგენი, მიმინო, ობობა სხვა ცხოველებს ჭამენ; **ომნივორები** თანაბრად ან თითქმის თანაბრად მოიხმარენ ცხოველებს და მცენარეებს. ომნივორებს, მაგალითად, მიეკუთვნება ტარაკანი, ყვავი, დათვი, ადამიანი.

ტერმინები – ჰერბივორები, კარნივორები და ომნივორები – გამოხატავს საკვების ტიპს, რომელსაც ცხოველები ჩვეულებრივ გამოიყენებენ, და გულისხმობს იმ ადაპტაციების არსებობას, რომლებიც მათ შესაბამისი საკვებისთვისებაში უწყობს ხელს. ცხოველთა უმეტესობა შეგუებითი

ჰეტეროტროფია და საჭიროების შემთხვევაში იმ საკვებსაც გამოიყენებს, რომელიც მათი ჩვეულებრივი დიეტის ფარგლებში არ შედის. მაგალითად, რქოსანი საქონელი და ირემი, რომლებიც ჰერბივორებს მიეკუთვნებიან, ხანდახან მცენარეულ საკვებთან ერთად მცირე ზომის ცხოველებსაც მიირთმევენ, მაგალითად, მწერებს, ჭიებს ან ფრინველთა კვერცხებს. კარნივორების უმეტესობა საკვებ ნივთიერებებს იღებს არა მარტო მსხვერპლის სხეულიდან, არამედ იმ მცენარეული ქსოვილისგანაც, რომელიც მსხვერპლის მომნელებელ ტრაქტში რჩება. ყველა ცხოველი სხვა საკვებთან ერთად პროკარიოტებსაც (მაგალითად, ბაქტერიებსაც) მიირთმევს.

მიუხედავად იმისა, რას და როგორ ჭამს ცხოველი, ადეკვატურმა დიეტამ უნდა დააკმაყოფილოს სამი კვებითი მოთხოვნილება: საწვავის (ქიმიური ენერგია), რომელიც სხეულის ყველა უჯრედული პროცესისთვის აუცილებელია; ელემენტარული ორგანული მასალის, რომელსაც ცხოველები ბიოსინთეზში იყენებენ და აუცილებელი საკვები ნივთიერებების, მაგალითად, ვიტამინების, რომლებსაც ცხოველი თვითონ ვერ წარმოქმნის და ამიტომ მზა ფორმით უნდა მიიღოს. ამ თავში განვიხილავთ ცხოველთა კვებით მოთხოვნებს და საკვების მიღებისა და გადამუშავებისთვის საჭირო მრავალფეროვან ადაპტაციებს. შეგიძლიათ, დაიწყოთ **სურათი 41.2**-ით, რომელიც მიმოიხილავს ცხოველთა კვების ოთხ მთავარ მექანიზმს.

### კონცეფცია 41.1

#### ჰომეოსტაზის მექანიზმები აკონტროლებს ცხოველთა ნივთიერებათა ცვლის ენერგიის ბალანსს

კბიონერგეტიკის თემა დაკავშირებულია კვების საკითხების შესწავლასთან. როგორც მე-40 თავში განვიხილეთ, ენერგიის ათვისება სხეულში და მისგან გარემოში გამოსვლა შესაძლოა „ბიუჯეტად“ განვიხილოთ. აღნიშნულ ენერგიის დინებას თან ახლავს **აბჟ**-ის წარმოქმნა, რომელიც ენერგიის ბალანსის დიდი ნაწილია. **აბჟ** უზრუნველყოფს ენერგიას მეტაბოლიზმისთვის და უჯრედის სხვადასხვა აქტი-

## სურათი 41.2

ცხოველთა კვების ოთხი მთავარი მექანიზმის გამოკვლევა.

### სუსპენზიით მკვებავები



ვეშაპის უღვაში

წყლის ცხოველთა ბევრი სახეობა **სუსპენზიით იკვებება**. ამ ვეშაპს ზედა ყბაზე აქვს სავარცხლისებრი წარმონაქმნი, რომელსაც ვეშაპის უღვაშს უწოდებენ და რომელიც წყლის უზარმაზარი რაოდენობიდან ფილტრავს მცირე ზომის უხერხემლოებს. სხვა სუსპენზიით კვებავი ცხოველები მცირე ზომის საკვების მოსაპოვებლად ლაყურებს იყენებენ. ან წამწამებით ხვეტენ პატარა ნაწილაკებს პირის ლორწოვანი შრისკენ.

### სუბსტრატით მკვებავები



მუხლუხო ექსკრემენტები

**სუბსტრატით მკვებავები** ის ცხოველებია, რომლებიც საკვებზე ან საკვებში ბინადრობენ და გზად ამ სუბსტრატს ჭამენ. ეს მცენარის ტილის ლარვა იკვებება მუხის ხის ფოთლის მეზოფილით და ტოვებს ფეკალური მასების შავ ნაკვალევს. სხვა მაგალითი არის ბუზის ჭია, რომელიც ცხოველის კარკასში აკეთებს მსგავს არხებს.

### სითხით მკვებავები

**სითხით მკვებავები** წოვენ საკვები ნივთიერებებით მდიდარ წვენს მასპინძლის ორგანიზმიდან. ამ კოლოს განვრეტილი აქვს მასპინძელი ადმაიანის კანი, პირის წარმონაქმნით, რომელიც ცარიელი ნემსის მაგვარი სტრუქტურაა და ივსებს მომწელებელ არხს სისხლით (ფერადი SEM). ამის მსგავსად, მცენარის ტილიც სითხით მკვებავია და იწოვს ფლოემის წვენს.



ასეთი პარაზიტული სითხით მკვებავებისგან განსხვავებით, რომლებიც მათ მასპინძლებს აზიანებენ, არსებობენ ისეთებიც, რომლებმაც სარგებლობაც კი მოაქვს მასპინძელი ორგანიზმებისთვის. მაგალითად, ფუტკრებს გადააქვთ მტვერი ყვავილიდან ყვავილზე მაშინ, როდესაც ნექტრით იკვებებიან.

### დიდი ნაჭრებით მკვებავი ცხოველები



ცხოველთა უმეტესობა **დიდი ნაჭრებით იკვებება**.

მათი ადაპტაციები მოიცავს საცეცებს, მარწუხებს, შხამიან კბილებს, რომლითაც მსხვერპლს კლავენ და ცხოველს ან მცენარეს ნაჭრებად გლეჯენ. ამ არაჩვეულებრივ სცენაში

კლდის პითონი იწყებს ქურციკის გადაყლაპვას, რომელიც მან დაიჭირა და მოკლა. გველებს არ შეუღლიათ თავიანთი მსხვერპლის დაღეჭვა და ამიტომ, ის მთლიანად უნდა გადაყლაპონ, მაშინაც კი თუ მსხვერპლი გაცილებით უფრო დიდია, ვიდრე მათი დიამეტრი. თავისი მსხვერპლის გადაყლაპვის შემდეგ, რაც შეიძლება ერთი საათიც კი გაგრძელდეს, პითონი მიდის წყნარ ადგილას და ინელებს ამ მსხვერპლს ორი კვირის განმავლობაში.

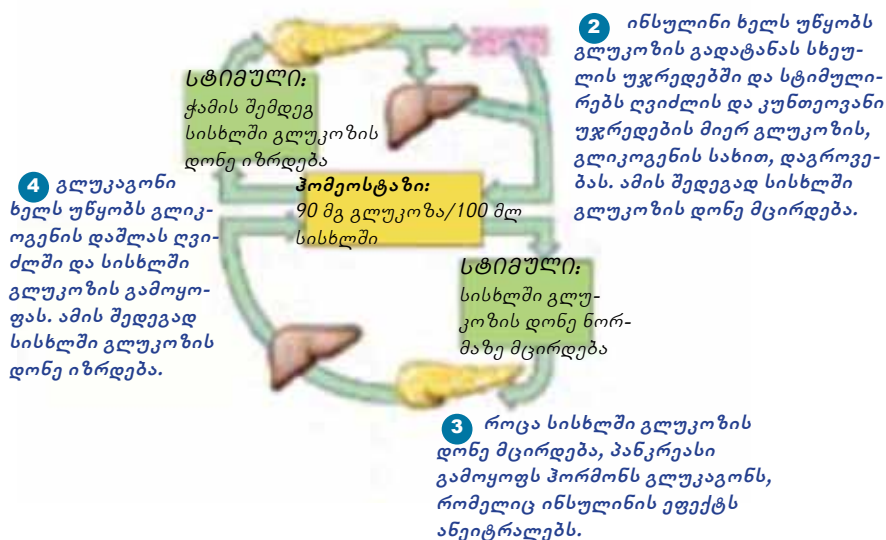
ვობისათვის; აგრეთვე, თბილისისხლიან ცხოველებში ის არის თერმორეგულაციისთვის საჭირო ენერგიის წყარო.

თითქმის ყველა ცხოველში **ატფ** წარმოიქმნება უჯრედის სუნთქვის პროცესში ენერგიით მდიდარი ორგანული მოლეკულების, კერძოდ ნახშირწყლების, ცილების და ცხიმების, დაჟანგვით. აღნიშნული ორგანული ნივთიერების მონომერები გამოიყენება სანვავად. ცხოველთა უმეტესობა ცილებს მხოლოდ ნახშირწყლების და ცხიმების მარაგის გამოლევის შემდეგ „წვავს“. ცხიმები ენერგიით განსაკუთრებულად მდიდარი ნაერთია. ერთი გრამი ცხიმის დაჟანგვა გამოათავისუფლებს ორჯერ მეტ ენერგიას, ვიდრე ერთი გრამი ცილისა და ნახშირწყლის დაჟანგვა.

## გლუკოზის ბეგულაცია, ბოგობტ ბომეოსცაზის მაგალითი

მიღებული ჭარბი კალორია, რომელიც ატფ-ის წარმოქმ-

**1** როცა სისხლში გლუკოზის დონე მატულობს, ჯირკვალის პანკრეასი სისხლში ჰორმონს ინსულინს გამოყოფს.

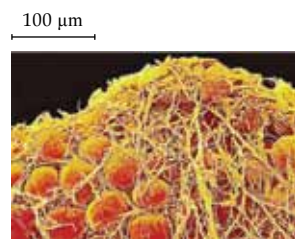


▲ **სურათი 41.3** უჯრედული სანვავის პომოსტატიკური რეგულაცია. მას შემდეგ, რაც საკვები მოწოდება, გლუკოზი და სხვა მონომერები მომწოდებელი ტრაქტიდან სისხლში შთაინთქმება. ადამიანის სხეული არეგულირებს გლუკოზის გამოყენებასა და დამარაგებას, რომელიც უჯრედის მთავარი სანვავია. მიაქციეთ ყურადღება, რომ რეგულაციის მარყუჟები არის უკუკავშირის კონტროლის მაგალითები, რომელიც მე-40 თავშია წარმოდგენილი.

ნის საჭიროებას აღემატება, შეიძლება იქნეს გამოყენებული ბიოსინთეზისთვის. ადამიანებში და ბევრ ცხოველში ზედმეტი ენერგიის რაოდენობა გროვდება გლიკოგენის და ცხიმის ფორმით. გლიკოგენი გროვდება ღვიძლში და კუნთებში. გლიკოგენი არის პოლიმერი, რომელიც გლუკოზის ბევრი ერთეულისგან შედგება (**იხ. სურ. 5.6 ბ**). გლუკოზი მეტაბოლიზმისთვის მთავარი სანვავია. ის ჰორმონების მოქმედებით რეგულირდება. გლუკოზის რეგულაცია პომოსტაზის კარგი მაგალითია (**სურ. 41.3**). იმ შემთხვევაში, როდესაც სხეულის

გლიკოგენის მარაგი სავსეა, კალორიული ნაჭარბი ცხიმის სახით მარაგდება.

როდესაც უფრო ნაკლები კალორია აითვისება, ვიდრე იხარჯება – მძიმე ფიზიკური ვარჯიშისა ან საკვების დეფიციტის დროს – სანვავი გადმოდის სამარაგო დეპოებიდან და იჟანგება. ეს ცხოველის წონის დაკლებას განაპირობებს. ადამიანი და ცხოველი ჯერ ღვიძლში არსებულ გლიკოგენს ხარჯავს, ხოლო შემდეგ კი ცხიმს და კუნთის გლიკოგენს. ჯანმრთელ ადამიანებს ცხიმის საკმარისი მარაგი აქვთ იმისთვის, რომ რამდენიმე კვირის შიმშილობას გაუძლონ (საშუალოდ ადამიანის ენერგეტიკული მოთხოვნა შეიძლება დაკმაყოფილდეს დღეში 0.3კგ ცხიმის დაჟანგვით).



▲ **სურათი 41.4** ადამიანის მუცლის ცხიმოვანი უჯრედები. შემაერთებული ქსოვილის ზოლები (ყვითელი) აკავებს ცხიმს – ადიპოზურ ანუ ცხიმოვან უჯრედებს ადგილზე ინარჩუნებს (ფერადი SEM).

## კალორიული დისბალანსი

მნიშვნელოვანი დარღვევები ჩნდება, როდესაც ორგანიზმის ენერგეტიკული ბიუჯეტი დისბალანსს განიცდის. თუ ადამიანისა და ცხოველების დიეტა ქრონიკულად ნაკლებ-კალორიულია, **არასაკმარისი გამოკვება** ვითარდება. ამ მდგომარეობაში გლიკოგენისა და ცხიმების მარაგი მთლიანად გამოიყენება და სხეული საკუთარი ცილების დაშლას იწყებს. ამის შედეგად კუნთები იკლებს ზომაში და ტვინი შესაძლოა ცილების მიმართ დეფიციტური გახდეს. თუ ენერგიის მიღება დიდი ხნის განმავლობაში უფრო ნაკლებია, ვიდრე მისი დანახარჯი, საბოლოოდ სიკვდილი ვითარდება. თუ ძლიერად ნაშიშილები ადამიანი გადარჩა, დარღვევების ნაწილი შეიძლება შეუქცევადი კი იყოს. მარცვლეულის დიეტას, მაგალითად, ბრინჯის და სიმინდის, შეუძლია საკმარისი კალორიებით უზრუნველყოფა. ამიტომ გამოკვების დარღვევები ხშირია მხოლოდ ისეთ ქვეყნებში, სადაც ომი ან სხვა სახის კრიზისი საკვებით მომარაგების შეწყვეტას იწვევს. არასაკმარისი გამოკვების სხვა

მიზეზი არის ნერვული ანორექსია, კვების დარღვევა, როდესაც ადამიანი (უმეტესად ქალი) წონის დაკლების მიზნით იწყებს შიმშილობას.

დამაზიანებელი ეფექტი მოაქვს საკვების გადაჭარბებულ მიღებასაც. აშშ-სა და სხვა მდიდარ ქვეყნებში ჭარბი კვება ან სიმსუქნე საზოგადო პრობლემაა. ადამიანის სხეული ამარაგებს ცხიმს (**სურ. 41.4**); მას აქვს ტენდენცია, დაიმარაგოს საჭმლით მიღებული ცხიმის ნებისმიერი ჭარბი მოლეკულა.

ამისგან განსხვავებით, როდესაც ადამიანი ნახშირწყლებს ჭარბად მიიღებს, სხეული ზრდის დაჟანგული ნახშირწყლების რაოდენობას. ამრიგად, ცხიმის რაოდენობას დიეტაში უფრო პირდაპირი ეფექტი აქვს წონის მომატებაზე, ვიდრე ნახშირწყლებს.

## სიმსუქნე, როგორც ადამიანის ჯანმრთელობის პრობლემა

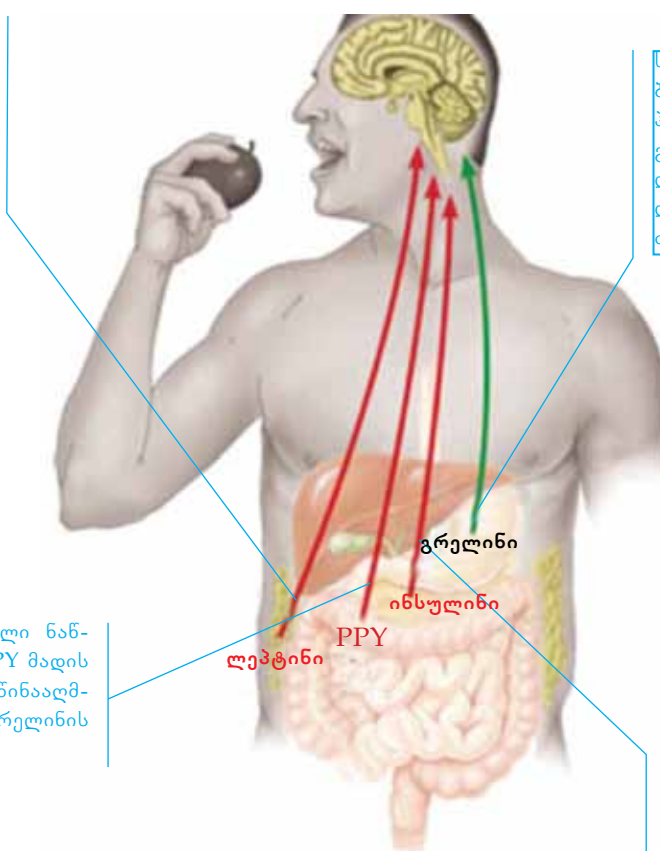
მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაციას სიმსუქნე მიაჩნია ჯანმრთელობის მთავარ გლობალურ პრობლემად. თანამედროვე პირობებში ცხიმოვანი საჭმლის მზარდი მოხმარება და ცხოვრების უფრო მჯდომარე სტილი ჭარბი წონის დაგროვების მიზეზია. აშშ-ში ჭარბწონიანი და მსუქანი (ზედმეტად ჭარბწონიანი) ადამიანების რიცხვი ბოლო ორ ათწლეულში გაორმაგდა. წონის პრობლემები ხშირად ადრეულ ასაკში იწყება. ამერიკაში ბავშვების და მოზარდების 15% ჭარბწონიანია.

სიმსუქნე ხელს უწყობს სხვა მთელი რიგი ჯანმრთელობის პრობლემების განვითარებას. მაგალითად, მსუქან ადამიანებს ხშირად აქვთ დიაბეტი, მსხვილი ნაწლავისა და მკერდის სიმსივნე, გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები. მხოლოდ აშშ-ში სიმსუქნე წელიწადში 300,000 სიკვდილის მიზეზია.

ფართომასშტაბიანი კვლევა მიმდინარეობს სიმსუქნის გამომწვევი მიზეზების და წონის კონტროლის ეფექტური გზების აღმოსაჩენად. მკვლევრებს უკვე აღმოჩენილი აქვთ რამდენიმე მექანიზმი, რომელიც სხეულის წონის რეგულაციას უზრუნველყოფს. აღნიშნული მექანიზმები არის ჰომეოსტაზის უკუკავშირის წრედები, რომლებიც აკონტროლებს სხეულის ორგანული ნივთიერებების მარაგს და ცხიმის მეტაბოლიზმს. აღმოჩენილი ჰორმონები გავლენას ახდენენ ტვინში „სიმძლავრის ცენტრზე“ და ამის შედეგად არეგულირებენ მადას (სურ. 41.5).

მემკვიდრეობა სიმსუქნის მთავარი გამომწვევი ფაქტორია. წონის მარეგულირებელი ჰორმონების უმეტესობა პოლიპეპტიდებია (ცილები). მკვლევრებმა აღმოაჩინეს ბევრი გენი,

ადიპოზური ანუ ცხიმოვანი ქსოვილით წარმოქმნილი ჰორმონი ლეპტინი, მისი დონის მომატებისას თრგუნავს მადას. როდესაც სხეულის ცხიმი მცირდება, ლეპტინის დონე ქვეითდება და მადაც იზრდება.



საკვების შილების დროის მოახლოებისას, კუჭის მიერ გამოყოფილი ჰორმონი გრელინი მოქმედებს როგორც მადის აღმძვრელი სიგნალი. დიეტის დაცვისას იზრდება გრელინის დონე, რაც არის დიეტის დაცვის გართულების ერთ-ერთი მიზეზი.

საჭმლის მიღების შემდეგ წვრილი ნაწლავით გამოყოფილი ჰორმონი PPY მადის დამთრგუნველად მოქმედებს, ეწინააღმდეგება რა მადის აღმძვრელი გრელინის მოქმედებას.

საკვების მიღების შემდეგ სისხლში გლუკოზის დონის გაზრდა იწვევს პანკრეასის ჰორმონის — ინსულინის გამოყოფას (იხ. სურათი 41.3). მის სხვა ფუნქციებთან ერთად, ინსულინი აქვეითებს მადას, მოქმედებს რა ტვინზე.

▲ **სურათი 41.5** მადის მარეგულირებელი რამდენიმე ჰორმონი. სხვადასხვა ქსოვილისა და ორგანოს მიერ გამოყოფილი ჰორმონი სისხლის საშუალებით აღწევს ტვინამდე. ჰორმონები მოქმედებენ ტვინის უბანზე, რომელიც, თავის მხრივ, აკონტროლებს „სიმძლავრის ცენტრს“. ეს უკანასკნელი წარმოქმნის ნერვულ იმპულსებს, რომელიც ჩვენ გვანიჭებს შიმშილის ან სიმძლავრის შეგრძნებას. მწვანე ისარი მადის აღმძვრელს აღნიშნავს, წითელი ისარი — მადის დამთრგუნველს.

რომელიც აღნიშნულ ჰორმონებს აკოდირებს. ეს მემკვიდრული კავშირი გვეხმარება ავსნათ, რატომ უნევს ზოგ ადამიანს ასეთი მძიმე ბრძოლა წონის შესანარჩუნებლად მაშინ, როცა სხვები აშკარად ბევრს ჭამენ წონის მომატების გარეშე.

მეცნიერებები განაგრძობენ წონის მარეგულირებელი გენებისა და სასიგნალო გზების შესწავლას. ადამიანები, რომლებმაც წონის დარღვევები მემკვიდრულად მიიღეს, შეიძლება მომავალში ახალი თაობის წამლებით განიკურნონ. მაგრამ ამჟამად ძნელია მსგავსი ფართოდ გამოყენებადი წამლის წარმოება. აღნიშნული ვითარება გამოწვეულია წონის რეგულაციის სირთულით და რეგულაციის მექანიზმების მრავალფეროვანი დარღვევებით.

წონის კონტროლის სირთულე ადამიანებში ნათელი ხდება ჰორმონ ლეპტინის გამოკვლევიდან.

ლეპტინი არის მადის მარეგულირებელი ჰორმონი ძუძუმწოვრებში. ლეპტინი ადიპოზური (ცხიმოვანი) უჯრედებიდან წარმოიქმნება. როდესაც ადიპოზური ქსოვილი იზრდება, ლეპტინის დონე სისხლში იზრდება, რაც ჩვეულებრივ ტვინის მიერ მადის დათრგუნვას განაპირობებს (იხ. სურ. 41.5). ეს არის ერთ-ერთი უკუკავშირის მექანიზმი, რომელიც იცავს ადამიანთა უმეტესობას გასუქებისგან, მიუხედავად იმისა, რომ ხელმისაწვდომი საკვები უხვად მოიპოვება. თავგები, რომლებსაც შთამომავლობით აღნიშნული გენი არ აქვთ, ძლიერ სუქდებიან (სურ. 41.6). მკვლევრებმა ნახეს, რომ ასეთი მსუქანი თავგების მკურნალობა შესაძლებელი იყო თავგებში ლეპტინის შეყვანით.



▲ **სურათი 41.6 ხარბი მღრღნელი.** მსუქან თავგს მარცხნივ, აქვს იმ გენის დეფექტი, რომელიც ჩვეულებრივ მადის დამთრგუნველ ჰორმონს, ლეპტინს წარმოქმნის.

ლეპტინის გენის დეფიციტის მუტაცია გაზეთების წინა გვერდებზე აღმოჩნდა და სიმსუქნის მკვლევრებს შორის დიდი ინტერესი გამოიწვია, რადგან ადამიანებსაც აქვთ ლეპტინის გენი. რა თქმა უნდა, მსუქანი ბავშვები, რომლებმაც ლეპტინის მუტანტური გენი მემკვიდრულად მიიღეს, ამ ნივთიერებით მკურნალობით წონაში იკლებენ. მაგრამ მსუქანი ადამიანების შედარებით მცირე რაოდენობას აქვს ლეპტინის წარმოების დეფექტი. მსუქანი ადამიანების უმრავლესობას აქვს ლეპტინის უზომოდ დიდი დონე, რომელიც ადიპოზური ქსოვილით წარმოიქმნება. გაურკვეველი მიზეზით, მსუქან ადამიანთა უმეტესობაში ტვინის სიმაძღრის ცენტრი არ პასუხობს ლეპტინის მაღალ დონეს.

ერთი ჰიპოთეზის მიხედვით, ადამიანებში, როგორც ჩანს, ბევრი ძუძუმწოვრისგან განსხვავებით, ლეპტინის სისტემის პირდაპირი ფუნქცია წონის მომატების ხელშეშლა არ არის. ლეპტინის სისტემის მთავარი ფუნქცია უნდა იყოს მადის სტიმულირება და წონის დაკარგვის ხელშეშლა, როდესაც სხეულის ცხიმის შემცირების შედეგად ჰორმონის დონე ქვეითდება. ეს ფიზიოლოგიური ნიუანსი ჩვენი ევოლუციური ისტორიის შედეგი უნდა იყოს.

## სიმსუქნე და ევოლუცია

ადამიანების უმეტესობას უყვარს ცხიმით მდიდარი საკვები, მაგალითად, ბურგერები, ყველი, ნაყინი. თუმცა ცხიმის დაგროვება დღეს ჯანმრთელობისთვის არცთუ ისე სახარბიელოა, ამ პროცესს ევოლუციურ წარსულში გარკვეული უპირატესობა უნდა ჰქონოდა. მხოლოდ გასულ რამდენიმე საუკუნეში ბევრი ადამიანისთვის შესაძლებელი გახდა მაღალკალორიული საკვების საკმარისი რაოდენობით რეგულარულად მიღება. ჩვენი წინაპრები აფრიკის სავანაში მონადირე-შემგროვებლები იყვნენ. ისინი, სავარაუდოდ, ძირითადად თესლით და სხვა მცენარეული პროდუქტით იკვებებოდნენ და მათი რაციონი იშვიათად შეიცავდა ხორცს. ისინი ნადირობით არასაკმარისი რაოდენობით მოიპოვებდნენ ცხოველებს, ხოლო მტაცებლისგან ნარჩენ მსხვერპლის ნაჭრებს მხოლოდ ზოგჯერ მიირთმევდნენ. ასეთ შემთხვევაში, ბუნებრივი გადარჩევა იმ ინდივიდებს აირჩევდა, რომლებიც, შესაძლებლობის შემთხვევაში, მეტ ცხიმოვან საკვებს ღებულობდნენ. ისეთი ადამიანები, რომელთა გენებიც ხელს უწყობდა მაღალენერგეტიკული მოღვაწეობის დაგროვებას, უკეთ გადარჩებოდნენ.

ასე რომ, ჩვენი დღევანდელი მიდრეკილება ცხიმით მდიდარი საკვებისკენ, რომელიც სიმსუქნის ეპიდემიურ ხასიათს უწყობს ხელს, ადრეული, საკვების დეფიციტის პერიოდის ევოლუციური ნაშთი უნდა იყოს.

ის, რაც სხეულის ჭარბ ცხიმად მიგვაჩნია, შესაძლოა, სასარგებლო იყოს ცხოველთა ზოგი სახეობისთვის. მაგალითად, ზღვის ფრინველებმა – ქარიშხალებმა, უნდა იფრინონ გრძელ მანძილზე საკვების მოსაპოვებლად. იმ საკვების უმეტესობა, რომელიც მშობელ ქარიშხალებს შვილებისთვის მოაქვთ, ლიპიდებით მდიდარია. ეს ამცირებს საკვების წონას, რომელიც მშობლებმა უნდა ატარონ მოგზაურობისას (გაიხსენეთ, რომ ერთ გრამზე ცხიმს ორჯერ უფრო მეტი კალორია აქვს, ვიდრე სხვა საწვავს).

ენერგიასთან ერთად, მოზარდ შვილებს ახალი ქსოვილის შენებისთვის ცილებიც სჭირდება. მათ ცხიმოვან საკვებში ცილების შედარებით ნაკლები შემცველობაა, ასე რომ, ყველა საჭირო ცილის მისაღებად ახალგაზრდებმა უფრო მეტი კალორია უნდა მიიღონ, ვიდრე მეტაბოლიზმში წვავენ და შედეგად ძალიან სუქდებიან (სურ. 41.7). ქარიშხალას ზოგ სახეობაში ზრდის პერიოდის დასრულებისას წინილები გაცილებით უფრო მეტს იწონიან, ვიდრე მათი მშობლები, და ზედმეტად მსუქნები არიან საიმისოდ, რომ იფრინონ. ამ მსუქან ახალგაზრდებს შიმშილი და წონაში სწრაფად დაკლება სჭირდებათ, რათა ფრენისუნარიანები გახდნენ. ასეა თუ ისე, ცხიმის დე-

პოეზი ახალგაზრდებში მნიშვნელოვან ფუნქციას ასრულებს. ენერგიის მარაგი ეხმარება მზარდ წინილებს, გადარჩენა იმ პერიოდში, როდესაც მშობლებს საკმარისი საკვების პოვნა არ შეუძლიათ. როგორც ხშირად ხდება ხოლმე, ბიოლოგიური უცნაურობები ხშირად ნაკლებად არაბუნებრივი ჩანს ბუნებრივი გადარჩევის კონტექსტში.



▲ **სურათი 41.7 მსუქანი ქარიშხალა.** ძალიან მძიმეა რომ იფრინოს, ამ წინილას (მარჯვნივ) მოუწევს წონაში დაკლება სანამ ფრთებს გაშლის გასაფრენად. მანამდე კი დაგროვილი ცხიმოვანი უზრუნველყოფს ენერგიას, როდესაც მშობელი საკმარისი საკვების მოძიებას ვერ ახერხებს.

## კონცეფცია ცუსტი 41.1

1. როგორი გავრცეებით არის სტაბილური წონა კალორიული ბალანსის კონცეფცია?
2. ახსენით, როგორ არის შესაძლებელი გასუქება, მაშინაც კი, როდესაც რაციონი ნახშირწყლებთან შედარებით ნაკლებ ცხიმს შეიცავს.
3. სურათ 41.5-ის მიმოხილვის შემდეგ, ახსენით ჰორმონები და ლეპტინი, როგორ ავსებენ ერთმანეთს სხეულის წონის რეგულაციაში.

## კონცეფცია 41.2

**დიუცამ ორგანიზმი უნდა უზრუნველყოს აუცილებელი საკვებითა და ნახშირბადის შემცველი ორგანული მონომერებით**

ზოგადად, ცხოველის დიეტა იძლევა საკმარის ენერგიას ატფ-ის სინთეზისთვის. დამატებით, საკვები უნდა იძლეოდეს ელემენტარულ მასალას ბიოსინთეზისთვის, რომელიც

აუცილებელია ცხოველის ზრდისა და გამრავლებისათვის. რთული მოლეკულების ასაშენებლად ცხოველმა საკვებიდან უნდა მიიღოს ორგანული მონომერები. აღნიშნული მონომერებისაგან ცხოველს შეუძლია ორგანული მოლეკულების დიდი მრავალფეროვნების წარმოქმნა, კერძოდ, ნახშირწყლების, ცილებისა და ცხიმების.

საწვავისა და ნახშირბადის მონომერების გარდა, ცხოველის დიეტა უნდა შეიცავდეს **აუცილებელ საკვებ ნივთიერებებს**. ეს ის ნივთიერებებია, რომლებიც უნდა მიიღებოდეს აწყობილ მდგომარეობაში, რადგან ცხოველის უჯრედებს არ შეუძლია მათი სინთეზირება. აღნიშნული კატეგორიიდან ზოგი ნივთიერება ყველა ცხოველისთვის აუცილებელია, მაგრამ სხვა აუცილებელი ნივთიერება მხოლოდ სახეობების გარკვეულ ჯგუფისთვის არის საჭირო. მაგალითად, ასკორბინის მჟავა (ჩ ვიტამინი) აუცილებელი საკვები ნივთიერებაა პრიმატებისთვის, ზოგი ფრინველისთვის, რეპტილიებისთვის, მაგრამ არა ბევრი სხვა ცხოველისთვის.

ცხოველი, რომლის დიეტაშიც არ შედის ერთი ან რამდენიმე აუცილებელი საკვები ნივთიერება, განიხილება როგორც



▲ **სურათი 41.8 მნიშვნელოვანი საკვები ნივთიერებების მიღება.** კარიბუ, არქტიკული მცენარეჭამია ცხოველი ლეჭავს სხვა ცხოველის რქას. რქა და ძვალი შეიცავს ფოსფატს და ოსტეოგენინ („ძვლის ჭამა“) ფართოდ არის გავრცელებული მცენარეჭამია ცხოველებში, სადაც ნიადაგი და მცენარეები არასაკმარის ფოსფატს შეიცავენ. ცხოველებს სჭირდება ფოსფორი, როგორც მინერალური საკვები ნივთიერება ატფ-ის, ნუკლეინის მჟავების, ფოსფოლიპიდების და ძვლების წარმოსაქმნელად.

ცუდად კვებადი (გაიხსენეთ, რომ არასაკმარისად კვებადი შეესაბამება კალორიულ დეფიციტს). მაგალითად, რქოსანი საქონელი და სხვა ბალახისმჭამელი ცხოველები მინერალების დეფიციტს განიცდიან, თუ ისინი იკვებებიან იმ მცენარეებით, რომლებიც იზრდება ნიადაგზე, რომელშიც მცირეა აუცილებელი მინერალები (**იხ. სურ. 41.8**). ადამიანთა პოპულაციებში ცუდად კვება უფრო ფართოდ არის გავრცელებული, ვიდრე არასაკმარისი კვება. თვით ზედმეტად მკვებავი ადამიანიც (მსუქანი) შეიძლება ცუდად კვებადი იყოს.

აუცილებელი საკვები ნივთიერებების ოთხი კლასი არსებობს: აუცილებელი ამინომჟავები, აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავები, ვიტამინები და მინერალები.

## აუცილებელი ამინომჟავები

ცხოველებს ცილების წარმოსაქმნელად 20 განსხვავებული ამინომჟავა სჭირდებათ. ცხოველთა უმეტესობას, იმ შემთხვევაში თუ მათი დიეტა შეიცავს ორგანულ აზოტს, თავად შეუძლია თორმეტამდე განსხვავებული ამინომჟავის სინთეზი.

დარჩენილი ნაწილი აუცილებელი ამინომჟავებია და ცხოველმა ისინი გამზადებულ მდგომარეობაში საკვებიდან უნდა მიიღოს. ზრდასრული ადამიანის დიეტაში რვა აუცილებელი ამინომჟავაა (მეცხრე, ჰისტიდინი ასევე აუცილებელია ბავშვებისთვის); იგივე ამინომჟავებია აუცილებელი ცხოველთა უმეტესობისთვისაც.

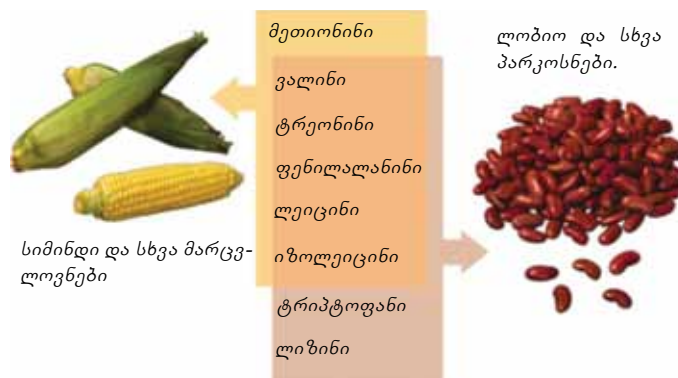
როცა საკვები რაციონი ვერ უზრუნველყოფს ერთ ან რამდენიმე ძირითად ამინომჟავას, ვითარდება კვების უკმარისობის ფორმა – ცილოვანი დეფიციტი (**სურ. 41.9**), რომელიც ადამიანებში ყველაზე გავრცელებული ფორმაა. დაზარალებულთა უმეტესობა ბავშვებია და თუ მათ შორის რომელიმე გადარჩება და მიაღწევს ზრდასრულობას, დიდია ალბათობა, რომ მისი ფიზიკური და გონებრივი განვითარება შეფერხდეს. ცილოვანი უკმარისობის ერთ-ერთი ფორმის დროს, რომელსაც კვაშიორკორი ეწოდება, დიეტა უზრუნველყოფს ორგანიზმისთვის საჭირო რაოდენობის კალორიებს, მაგრამ ახასიათებს ცილების სერიოზული დეფიციტი (**იხ. სურ. 41.9**). სინდრომის სახელწოდება განას ენაზე ნიშნავს „უარყოფილს“, რაც მინიშნებაა, რომ უკმარისობის დასაწყისი დაკავშირებულია იმ პერიოდთან, როდესაც ჩვილს დედის რძით კვებას შეუწყვეტენ.

აუცილებელი ამინომჟავების ყველაზე სანდო წყაროა ხორცი, კვერცხი და სხვა ცხოველური პროდუქტები. ცხოველურ პროდუქტებში ცილები „სრულფასოვანია“, რაც ნიშნავს, რომ ისინი ყველა აუცილებელ ამინომჟავას საჭირო პროპორციებით უზრუნველყოფს. მცენარეული ცილების უმეტესობა „არასრულფასოვანია“, რამდენადაც ერთი ან რამდენიმე აუცილებელი ამინომჟავა არ აქვს. მაგალითად, მარცვლეულს



◀ **სურათი 41.9 კვაშიორკორი (ცილების დეფიციტი) პაიტის მცხოვრებ ბავშვში.** მუცლის შესიება ოსმოსური ეფექტია: სისხლის უნარე, სხეულის სიღრუეებიდან ოსმოსის გზით შეითვისოს წყალი შემცირებულია ცილების დეფიციტის გამო.

## ზრდასრულებისთვის აუცილებელი ამინომჟავები



▲ **სურათი 41.10 ვეგეტარიანული დიეტის აუცილებელი ამინომჟავები.** ზრდასრულმა ადამიანმა შეიძლება მიიღოს ყველა საჭირო აუცილებელი ამინომჟავა მარცვლეულისა და პარკოსნების საკვებიდან.

(სიმინდს) არ აქვს ამინომჟავა ლიზინი. ადამიანებს, რომლებიც ეკონომიკური ვითარებიდან გამომდინარე ყველა საჭირო კალორიას მარცვლეულიდან იღებენ, ცილის დეფიციტი უვითარდებათ.

ასეთი მდგომარეობა ვითარდება იმ ადამიანებში, ვინც მხოლოდ ბრინჯს, ხორბალს ან კარტოფილს მიირთმევენ. შესაძლებელია აღნიშნული პრობლემის თავიდან აცილება თუ საკვებად მივიღებთ ისეთ მცენარეებს, რომლებიც ერთმანეთს შეავსებენ და ორგანიზმს მოამარაგებენ ყველა ძირითადი ამინომჟავით (**სურ. 41.10**). ბევრმა კულტურამ ცდებისა და შეცდომების საფუძველზე ცილოვანი დეფიციტის თავიდან ასაცილებლად განავითარა ბალანსირებული დიეტა. ზოგ ცხოველს განუვითარდა ცილის დეფიციტისგან თავდაცვის



▲ **სურათი 41.11 ზრდისთვის ცილების დაგროვება.** ისეთი პინგვინები, როგორიც არის Adélie ანტარქტიკიდან, დიდი რაოდენობით ცილას წარმოიქმნიან ბუმბულის ცვლისას. მათი საიზოლაციო საფარველის ცოტა ხნით მოცილების გამო, პინგვინებს ცურვა და კვება არ შეუძლიათ. რა არის ბუმბულის ცილების ამინომჟავების წყარო? სანამ ბუმბულის ცვლას დაიწყებს, პინგვინი ზრდის მის კუნთოვან მასას. შემდეგ იგი შლის ზედმეტ კუნთოვან ცილას, რომელიც ახალი ფრთებისთვის ამინომჟავების წყაროს წარმოადგენს.

ცხრილი 41.1 ადამიანისთვის საჭირო ვიტამინები

| ვიტამინი                              | ვიტამინის ძირითადი რესურსი                                                                         | ზოგი ძირითადი ფუნქცია                                                                                                                       | ნაკლებობის ან სიჭმარების შესაძლებელი სიმპტომები                                                                                                            |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>წყალში ხსნადი ვიტამინები</b>       |                                                                                                    |                                                                                                                                             |                                                                                                                                                            |
| ვიტამინი B <sub>1</sub> (თიამინი)     | ქონი, ბარდისებრები, არაჩხისი, დაუმუშავებელი მარცვლეული კულტურები                                   | კოფერფემენტი, რომელიც ორგანული ნაერთებიდან CO <sub>2</sub> -ს აცილებს                                                                       | ბერიბერი (ნერვული მოშლა, გახდომა, ანემია)                                                                                                                  |
| ვიტამინი B <sub>2</sub> (რიბოფლავინი) | რძის პროდუქტები, ხორცი, გამდიდრებული მარცვლეული, ბოსტნეული                                         | კოფერმენტი FAD და FMN-ის კომპონენტი                                                                                                         | კანის დაზიანება, მაგალითად პირის კუთხეებში კანის დახეთქვა.                                                                                                 |
| ნიაცინი                               | თხილეული, ხორცი მარცვლეული                                                                         | NAD+ და NADP+ კოფერმენტების კომპონენტი                                                                                                      | კანის და კუჭნალავენების დაზიანება, ნერვული მოშლილობა, <b>ლეილის დაზიანება</b> .                                                                            |
| ვიტამინი B <sub>6</sub> (პირიდოქსინი) | ხორცი, ბოსტნეული, დაუმუშავებული მარცვლეული                                                         | კოფერმენტი, რომელიც მონაწილეობს ამინომჟავების მეტაბოლიზმში                                                                                  | გალიზიანება, კონვულსიები, კუნთების ტოკვა, ანემია, <b>სიარულის დარღვევა, სიცივე კიდურებში, ცუდი კოორდინაცია</b>                                             |
| პანტოთენის მჟავა                      | საკვების უმეტესი ნაწილი, ხორცი, რძის პროდუქტები, დაუმუშავებული მარცვლეული, და ა. შ.                | კოფერმენტი A-ს კომპონენტი                                                                                                                   | დაღლილობის შეგრძნება, გაუძრევლობა, კიდურების კანკალი                                                                                                       |
| ფოლის მჟავა (ფოლაციინი)               | მწვანე ბოსნეული, ციტრუსები, კაკალი, ბარდისებრები, დაუმუშავებული მარცვლეული                         | ნუკლეინის მჟავისა და ამინომჟავის მეტაბოლიზმის კოფერმენტი                                                                                    | ანემია კუჭნალავის პრობლემები, <b>სიმპტომები შეიძლება B<sub>12</sub> ვიტამინის დეფიციტის ნაგავადეს.</b>                                                     |
| ვიტამინი B <sub>12</sub>              | ხორცი, კვერხი, რძის პროდუქტები                                                                     | ნუკლეინის მჟავების მეტაბოლიზმის კოფერმენტი; მონაწილეობს სისხლის ნითელი უჯრედების მომწიფებაში                                                | ანემია, ნერვული სისტემის მოშლილობა                                                                                                                         |
| ბიოტინი                               | ბარდისებრი, სხვა ბოსტნეული, ხორცი                                                                  | ცხიმის, გლიკოგენის და ამინომჟავების სინთეზის კოფერმენტი                                                                                     | კანის ანთებითი აქერცვლა, <b>ნგი-როკუნთოვანი მოშლილობა</b>                                                                                                  |
| C ვიტამინი (ასკორბინის მჟავა)         | ხილი და ბოსტნეული, განსაკუთრებით ციტრუსები, ბროკოლი, კომბოსტო, ტომატი, მწვანე წინაკა               | მონაწილეობს კოლაგენის სინთეზში (მაგ, ძვლების, ხრტილების, ღრღილების); ანტიოქსიდანტია, მონაწილეობს დეტოქსიკაციაში, ადიდებს რკინის აბსორბციას. | ცინგა (კანის, კბილების, სისხლძარღვების მოშლა), სისუსტე, ჭრილობების ცუდი შეხორცება, შესუსტებული იმუნიტეტი, <b>კუჭნალავის ფუნქციის მოშლილობა</b>             |
| <b>ცხიმში ხსნადი ვიტამინები</b>       |                                                                                                    |                                                                                                                                             |                                                                                                                                                            |
| A ვიტამინი (რეტინოლი)                 | A პროვიტამინი (ბეტა კაროტინი) მწვანე და წარინჯისფერ ბოსტნეულში და ხილში; რეტინოლი რძის პროდუქტებში | მხედველობის პიგმენტის კომპონენტი; ეპითელიური ქსოვილების სიჯანსაღის უზრუნველყოფს; ანტიოქსიდანტი; უჯრედის მემბრანის დაზიანების პრევენცია.     | მხედველობის პრობლემები; მშრალი, აქერცლილი კანი. <b>თავისტიკივილი, გალიზიანება. გულისრევა, თმისცვენა, ბუნდოვანი მხედველობა, ღვიძლისა და ძვლის დაზიანება</b> |
| ვიტამინი D                            | რძის პროდუქტები, კვერცხის გული (ასევე წარმოიქმნება ადამიანის კანში მზის სხივების მოქმედებით)       | მონაწილეობს კალციუმის და ფოსფორის აბსორბციაში და გამოყენებაში; ხელს უწყობს ძვლების ზრდას.                                                   | რაქიტი (ძვლის დეფორმაცია) ბავშვებში, ზრდასრულებში ძვლის დარბილება. <b>ტვინის გულისის-ლძარღვებისა და თირკმელების დაზიანება</b>                              |
| ვიტამინი E (ტოკოფეროლი)               | ბოსტნეულის ზეთები, კაკალი, მარცვლოვნები                                                            | ანტიოქსიდანტი, ხელს უწყობს უჯრედის მემბრანის დაზიანების პრევენციას.                                                                         | ადამიანის შემთხვევაში არ არის კარგად დადგენილი; ალბათ ანემია                                                                                               |
| ვიტამინი K (ფილოკინონი)               | მწვანე ბოსტნეული, ჩაი (ასევე ასინთეზებს ნაწლავის ჩხირი)                                            | მონაწილეობს სისხლის შედედებაში                                                                                                              | სისხლის შედედების დარღვევა <b>ლეილის დაზიანება და ანემია.</b>                                                                                              |

სპეციფიკური მექანიზმები. მაგალითად, პინგვინებს ბუმბულის შეცვლისას შეუძლიათ ახალი ცილის სინთეზისთვის ამინომჟავების წყაროდ მათი კუნთოვანი ცილების გამოყენება (სურ. 41.11).

აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავები

ცხოველებს შეუძლიათ უმეტესი საჭირო ცხიმოვანი მჟავების სინთეზი. აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავები ისეთი მჟავებია, რომლებსაც ისინი ვერ ასინთეზირებენ. მათ მიეკუთვნება

განსაზღვრული უჯერი ცხიმოვანი მჟავები (ორმაგი კავშირის მქონე ცხიმოვანი მჟავები) (იხ. სურ. 5.12). მაგალითად, ლინოლის მჟავა აუცილებლად უნდა შედიოდეს ადამიანის დიეტაში. ეს ცხიმოვანი მჟავა საჭიროა მემბრანის ფოსფოლიპიდების სინთეზისთვის. ადამიანის და სხვა ცხოველების დიეტა ჩვეულებრივ შეიცავს აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავების დიდ რაოდენობას, და, ამრიგად, დეფიციტი იშვიათი მოვლენაა.

## ვიტამინები

**ვიტამინები** ორგანული მოლეკულებია, რომლებიც ამინომჟავებისა და ცხიმოვანი მჟავების მოთხოვნილებასთან შედარებით ძალიან მცირე რაოდენობით არის საჭირო. ყოველდღიურად საკმარისია დაახლოებით 0.01-100მგ. მიუხედავად ამისა, ვიტამინის დეფიციტმა შესაძლოა სერიოზული პრობლემები გამოიწვიოს.

ადამიანისთვის 13 მნიშვნელოვანი ვიტამინია ნაპოვნი. მათ აქვს უკიდურესად მრავალფეროვანი ფიზიოლოგიური ფუნქციები. ვიტამინების ორ ჯგუფს გამოყოფენ: წყალში და ცხიმში ხსნად ვიტამინებს (ცხრილი 41.1). წყალში ხსნადი ვიტამინები მოიცავს ჯგუფს. იგი შედგება რამდენიმე ნაერთისგან და, ძირითადად, ფუნქციონირებს, როგორც მეტაბოლური პროცესების კოფერმენტი. C ვიტამინიც წყალში ხსნადია და შემადგენელი ქსოვილის წარმოქმნისთვის არის საჭირო. წყალში ხსნადი ვიტამინების ნაჭარბი შარდით გამოიყოფა. ზომიერი სიჭარბე კი, სავარაუდოდ, მავნე არ უნდა იყოს.

ცხიმში ხსნადი ვიტამინებია A, D, E და K. მათ მრავალფეროვანი ფუნქციები აკისრია. A ვიტამინი თვალის სინათლის მგრძნობიარე უჯრედების პიგმენტებში შედის. D ვიტამინი ხელს უწყობს კალციუმის აბსორბციას და ძვლის წარმოქმნას. E ვიტამინი, (C ვიტამინთან ერთად) იცავს მემბრანების ფოსფოლიპიდებს ოქსიდაციისგან („ანტიოქსიდანტური“ მოქმედებით ხასიათდება). K ვიტამინი საჭიროა სისხლის შედედებისთვის. ცხიმში ხსნადი ვიტამინების ნაჭარბი არ გამოიყოფა, ის სხეულის ცხიმოვან მარაგში გროვდება. ასე რომ, ჭარბად მიღებამ შეიძლება ამ ნაერთების მომწამვლელ ღონემდე დაგროვებაც კი გამოიწვიოს.

ვიტამინების დოზირების საკითხმა მეცნიერთა ცხარე კამათი წამოჭრა. ზოგი ფიქრობს, რომ ჯანმრთელობის შენარჩუნებისთვის საკმარისია დიეტოლოგების მიერ მოწოდებული დღის რეკომენდებული დოზის (დრდ) მიღება საკვებთან ერთად. სხვები კი ფიქრობენ, რომ დრდ-ში ვიტამინების არასაკმარისი რაოდენობაა. ამ მეცნიერთა ნაწილი (სავარაუდოდ, შეცდომით) თვლის, რომ ვიტამინების დიდი დოზები სიცოცხლისთვის სარგებლის მომტანია. კვლევა დასრულებისგან შორს არის და კამათიც გრძელდება, განსაკუთრებით C და E ვიტამინების ოპტიმალური დოზირების თაობაზე. ამჟამად, შეიძლება ითქვას, რომ ადამიანები, რომლებიც კარგად იკვებებიან, იშვიათად განიცდიან ვიტამინების დეფიციტს.

## მინერალები

**მინერალები** მარტივი არაორგანული საკვები ნივთიერებებია. მათზე დღიური მოთხოვნილება მცირეა: 1მგ-ზე ნაკ-

ლებიდან 2,500 მგ-მდე დღეში (ცხრილი 41.2). ვიტამინების მსგავსად, მინერალების საჭიროება განსხვავებულია ცხოველთა სხვადასხვა სახეობაში. ადამიანი და სხვა ცხოველები ძვლების ასაგებად და შესანარჩუნებლად შედარებით დიდი რაოდენობით კალციუმს და ფოსფორს საჭიროებენ. კალციუმში ასევე საჭიროა ნერვული სისტემის და კუნთების ნორმალური ფუნქციონირებისთვის. ფოსფორი კი ატფ-ისა და ნუკლეინის მჟავების შემადგენელი ნაწილია. რკინა ციტოქრომების (უჯრედის სუნთქვის პროცესებში მონაწილე ნაერთების) და ჰემოგლობინის (სისხლის წითელი უჯრედების ჟანგბადის დამაკავშირებელი ცილის) კომპონენტია (იხ. სურ. 9.13). მაგნიუმი, რკინა, თუთია, სპილენძი, მანგანუმი, სელენი და მოლიბდენი სხვადასხვა ფერმენტების კოფაქტორებია. მაგალითად, მაგნიუმი იმ ფერმენტებშია, რომლებიც ატფ-ს შლის. ხერხემლიანებს იოდი თიროიდული ჰორმონის წარმოსაქმნელად სჭირდებათ. ნატრიუმი, კალიუმი და ქლორი ნერვული სისტემის ფუნქციონირებისთვის და ოსმოსური ბალანსის შენარჩუნებისთვის არის მნიშვნელოვანი.

ბევრი ადამიანი გაცილებით მეტ მარილს (ნატრიუმის ქლორიდს) იღებს, ვიდრე საჭიროა. მაგალითად, ამერიკის მოქალაქეები საშუალოდ ჭამენ საკმარის მარილს იმისთვის, რომ დაახლოებით 20-ჯერ დააკმაყოფილონ ნატრიუმზე მოთხოვნა. ამ მარილის უმეტესი ნაწილი საკვებშია, ისეთშიც კი, რომელსაც მარილის გემო შეიძლება საერთოდაც არ ჰქონდეს. მარილისა და სხვა მინერალების ჭარბი რაოდენობით მიღებამ შესაძლოა ჰომეოსტაზის ბალანსი დაარღვიოს და ტოქსიკური გვერდითი ეფექტი გამოიწვიოს. მაგალითად, ნატრიუმის ზედმეტი რაოდენობა შეიძლება სისხლის მაღალ წნევას უკავშირდებოდეს და რკინის ჭარბმა რაოდენობამ შესაძლოა ღვიძლის დაზიანება გამოიწვიოს.

## ჯანსაღი ცხოვრება 41.2

1. შეადარეთ არასაკმარისი კვება, ცუდად კვებას.
2. ახსენით, როგორ მოახერხებს დაბალანსებული ვეგეტარიანული დიეტა ყველა აუცილებელი ამინომჟავით უზრუნველყოფას.
3. შეადარეთ ვიტამინები მინერალებს.

## ჯანსაღი ცხოვრება 41.3

**საკვების გადამუშავების მთავარი სტადიებია მიღება, მონღლება, აბსორბცია და გამოყოფა**

კვების მიმოხილვა ცხოველებში კვების სხვადასხვა მექანიზმის განხილვით დავიწყეთ (იხ. სურ. 41. 2). მიღება, ანუ ჭამის აქტი, საკვების გადამუშავების პირველი სტადიაა.

| ცხრილი 41.2 ადამიანისთვის საჭირო მინერალები                                                                   |                                                                             |                                                                                               |                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| მინერალი                                                                                                      | მინერალის ძირითადი რესურსი                                                  | ფიზიკური ძირითადი ფუნქცია                                                                     | მინერალების ნაკლებობის შესაძლებელი სიმპტომები *                                              |
| კალციუმი (Ca)                                                                                                 | რძის პროდუქტები, მუქი მწვანე ბოსტნეული, ბარდისებრები                        | ძვლის და კბილების ფორმირება, სისხლის შედედება, ნერვების და კუნთების ფუნქციონირება             | ზრდის შენელება, შესაძლებელია ძვლის მასის კარგვა                                              |
| ფოსფორი (P)                                                                                                   | რძის პროდუქტები, ხორცი, მარცვლეული                                          | ძვლების და კბილების ფორმირება, ტუტე-მჟავას ბალანსი, ნუკლეოტიდების სინთეზი                     | სისუსტე, ძვლებიდან მინერალების გამოდევნა, კალციუმის ნაკლებობა                                |
| გოგირდი (S)                                                                                                   | მრავალი ცილა                                                                | კონკრეტული ამინომჟავების კომპონენტი                                                           | ცილების ნაკლებობის სიმპტომები                                                                |
| პოტასიუმი (K)                                                                                                 | ხორცი, რძის პროდუქტები, მრავალი ხილი და ბოსტნეული, მარცვლეული               | ტუტე-მჟავას ბალანსი, წყლის ბალანსი, ნერვული სისტემის ფუნქციები                                | სისუსტე კუნთებში, პარალიჩი, გულისრევა, გულის პარალიჩი                                        |
| ქლორი (Cl)                                                                                                    | სუფრის მარილი                                                               | ტუტე-მჟავას ბალანსი, კუჭის წვენის ფორმირება, ნერვული სისტემის ფუნქციები, ოსმოსური ბალანსი     | კუნთების კრუნჩხვა, დაკნინებული მადა                                                          |
| ნატრიუმი (Na)                                                                                                 | სუფრის მარილი                                                               | ტუტე-მჟავას ბალანსი, წყლის ბალანსი, ნერვული სისტემის ფუნქციები                                | კრუნჩხვები, დაკნინებული მადა                                                                 |
| მაგნიუმი (Mg)                                                                                                 | დაუმუშავებელი მარცვლეული, მწვანე ფოთლოვანი ბოსტნეული                        | კოფაქტორი; ატფ-ის ბიოენერგეტიკა                                                               | ნერვული სისტემის მოშლილობა                                                                   |
| რკინა (Fe)                                                                                                    | ხორცი, კვერცხი, ბარდისებრები, დაუმუშავებელი მარცვლეული, ფოთლოვანი ბოსტნეული | ჰემოგლობინის და ენერგიის მეტაბოლიზმში ელექტრონების გადატანის კოფაქტორი, ფერმენტების კოფაქტორი | რკინის ნაკლებობით გამოწვეული ანემია, სისუსტე, დაკნინებული იმუნიტეტი                          |
| ფტორი (F)                                                                                                     | სასმელი წყალი, ჩაი, ზღვის პროდუქტები                                        | კბილების (და ალბათ ძვლების) სტრუქტურის შენარჩუნება                                            | კბილების დაშლის მაღალი სიხშირე                                                               |
| ცინკი (Zn)                                                                                                    | ხორცი, ზღვის პროდუქტები, მარცვლეული                                         | კონკრეტული მომწელებელი ფერმენტების და სხვა ცილების კომპონენტი                                 | ზრდის დარღვევა, კანის ანთებითი აქერცლა, გამრავლების ფუნქციის დარღვევა, დაკნინებული იმუნიტეტი |
| სპილენძი (Cu)                                                                                                 | ზღვის პროდუქტები, თხილეული, ბარდისებრები, ცხოველების შინაგანი ორგანოები     | რკინის მეტაბოლიზმის, მელანინის სინთეზის და ელექტრონების გადატანის ფერმენტული კოფაქტორი        | ანემია, ძვლებში და გულისხლ-ძარღვებში ცვლილებები                                              |
| მანგანუმი (Mn)                                                                                                | თხილეული, მარცვლეული, ბოსტნეული, ხილი, ჩაი                                  | ენზიმების კოფაქტორი                                                                           | ძვლების და ხრტილების ანომალიები                                                              |
| იოდი (I)                                                                                                      | ზღვის პროდუქტები, რძის პროდუქტები, იოდიზირებული მარილი                      | თიროიდული ჰორმონის კომპონენტი                                                                 | ფარისებრი ჯირკვლის გადიდება                                                                  |
| სელენიუმი (Se)                                                                                                | ზღვის პროდუქტები, დაუმუშავებელი მარცვლეული                                  | ფერმენტების კოფაქტორი; ე ვიტამინთან კავშირში მოქმედი ანტიოქსიდანტი                            | კუნთების ტკივილი, შესაძლებელია გულის კუნთის მუშაობის დარღვევები                              |
| კობალტი (Co)                                                                                                  | ხორცი და რძის პროდუქტები                                                    | B <sub>12</sub> ვიტამინის კომპონენტი                                                          | არაფერი, B <sub>12</sub> -ის ნაკლებობის გარდა                                                |
| ქრომი (Cr)                                                                                                    | ლუდის საფუარი, ღვიძლი, ზღვის პროდუქტები, ხორცი, ზოგი ბოსტნეული              | ჩართულია გლუკოზის და ენერგიის მეტაბოლიზმში                                                    | გლუკოზის დაკნინებული მეტაბოლიზმი                                                             |
| მოლიბდენი (Mo)                                                                                                | ბარდისებრები, მარცვლეული, ზოგი ბოსტნეული                                    | ფერმენტების კოფაქტორი                                                                         | აზოტის შემცველი კომპონენტების გამოყოფის დარღვევა                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>ყველა ამ მინერალის ჭარბი მოხმარება ასევე იწვევს დარღვევებს.</li> </ul> |                                                                             |                                                                                               |                                                                                              |

საჭმლის ორგანული მასალა ძირითადად შედგება ცილების, ცხიმებისა და ნახშირწყლებისგან. ცხოველებს არ შეუძლიათ აღნიშნული ორგანული ნივთიერებების გადაუმუშავებლად გამოყენება ორი მიზეზის გამო. პირველი, პოლიმერები ძალიან დიდია იმისთვის, რომ მემბრანებში გავიდეს და ცხოველის უჯრედში მოხვდეს. მეორე, ცხოველის საკუთარი ორგანული ნივთიერებები (ცილა, ცხიმი, ნახშირწყლები) არ არის საკვებში არსებული ნივთიერებების იდენტური.

აღნიშნული პოლიმერების ასაშენებლად ყველა ორგანიზმი ერთსა და იმავე მონომერებს იყენებს. მაგალითად, სოია, ხილის ბუზი და ადამიანები, ყველანი აწყობენ ცილებს ერთი და იგივე 20 ტიპის ამინომჟავისგან.

**მონელება** საჭმლის გადამუშავების მეორე სტადიაა. აღნიშნულ ეტაპზე საკვები იშლება ისეთ მცირე ზომის მოლეკულებად, რომ სხეულმა აბსორბცია მოახერხოს (**იხ. სურ. 41.12**). მონელება ხლენს მაკრომოლეკულებს მათ შემადგენელ მონომერებამდე. მიღებულ ელემენტარულ მასალას ცხოველი საკუთარი მაკრომოლეკულების სინთეზისათვის ან ატფ-ის წარმოქმნისთვის სანვავად იყენებს. პოლი და დისაქარიდები იშლება მარტივ შაქრებამდე, ცხიმები გლიცეროლამდე და ცხიმოვან მჟავებამდე, ცილები ამინომჟავებამდე და ნუკლეინის მჟავები ნუკლეოტიდებამდე.

მე-5 თავიდან გაიხსენეთ, რომ უჯრედი მაკრომოლეკულებს მონომერების კოვალენტური ბმით ერთმანეთთან დაკავშირებით ქმნის. ამ დროს ყოველი ბმის წარმოქმნისას ადგილი აქვს წყლის მოლეკულების მოცილებას. მონელება ამ პროცესს წყლის დამატებით და ბმების დაშლით აბრუნებს (**იხ. სურ. 5.2**). ამ დაშლის პროცესს ფერმენტული ჰიდროლიზი ეწოდება. ჰიდროლიზური ფერმენტების მრავალფეროვნება მონელებისას საკვებში არსებული ყოველი კლასის მაკრომოლეკულების დაშლას აჩქარებს. ამ ქიმიურ მონელებას ხშირად წინ უსწრებს საკვების მექანიკური ფრაგმენტაცია, მაგალითად, ლეჭვით. საკვების დაშლა მცირე ნაჭრებად ზრდის ზედაპირის ფართობს, რომელზეც ჰიდროლიზური ფერმენტების შემცველი მომწელებელი წვენები მოქმედებს.

საჭმლის გადამუშავების ბოლო ორ სტადიას ადგილი აქვს საჭმლის მონელების დასრულების შემდეგ. მესამე სტადიაზე,

**აბსორბციისას**, ცხოველის უჯრედები შთანთქმავს, აბსორბირებს მცირე ზომის მოლეკულებს, მაგალითად, ამინომჟავებს და მარტივ შაქრებს. საბოლოოდ, ბოლო ეტაპზე, ხდება საკვების ნარჩენის **გამოყოფა** მომწელებელი ტრაქტიდან (**იხ. სურ. 41.12**).

## მომწელებელი კომპარტმენტები

რა განაპირობებს იმას, რომ ცხოველები ინელებენ საკვებს და ამავე დროს საკუთარ უჯრედებს და ქსოვილებს არ შლიან? მომწელებელი ფერმენტები ხომ იგივე ბიოლოგიურ მასალას ამუშავებს (როგორიც არის ცილები, ლიპიდები და ნახშირწყლები), რისგანაც შედგება ცხოველის ორგანიზმი. რატომ უნდა, ძალიან მნიშვნელოვანია თავიდან იქნეს აცილებული საკუთარი უჯრედების მონელება. ცხოველთა უმეტესობა საკუთარი მონელების რისკს ამცირებს სპეციალურ კომპარტმენტებში (განყოფილებებში) საკვების მონელებით.

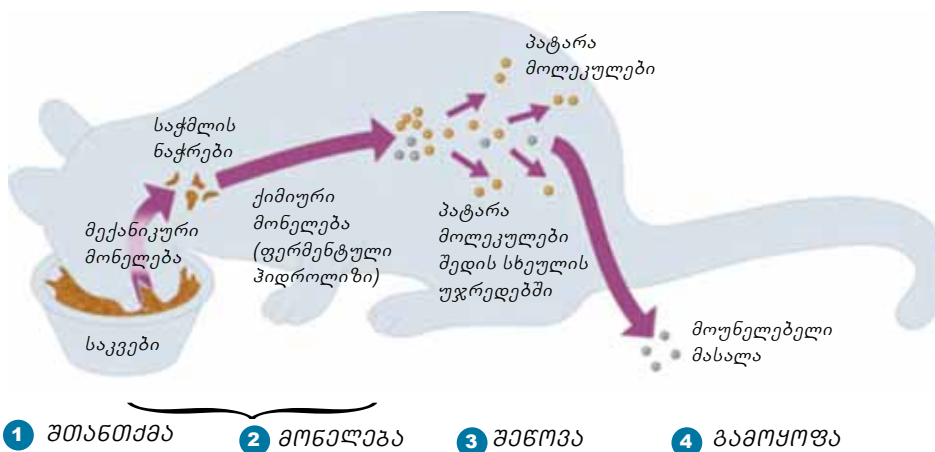
## უჯრედშიდა მონელება

საკვების ვაკუოლები პრიმიტიული უჯრედული ორგანიზმებია, რომლებშიც ჰიდროლიზური ფერმენტების საშუალებით ხდება მონელება. იგი წარმოადგენს უმარტივეს მომწელებელ კომპარტმენტს. მასში ხდება საკვების დაშლა უჯრედის ციტოპლაზმის მონელების გარეშე. უჯრედშიდა მონელება იწყება მას შემდეგ, რაც უჯრედი შთანთქმავს საკვებს ფაგო ან პინოციტოზის გზით (**იხ. სურ. 7.20**). ახლადწარმოქმნილი საკვების ვაკუოლები ერწყმის ლიზოსომებს, რომლებიც ჰიდროლიზური ფერმენტების შემცველი ორგანიზმებია. შერწყმა ურევს საკვებს ფერმენტებთან და იქმნება მონელების შესაძლებლობა ვაკუოლის დამცველი მემბრანის შიგნით. ღრუბლები არაჩვეულებრივია ცხოველებს შორის იმ გაგებით, რომ ისინი ინელებენ საკვებს მთლიანად უჯრედშიდა მექანიზმებით (**იხ. სურ. 33.4**).

## უჯრედგარეთა მონელება

ცხოველთა უმეტესობაში მონელების ნაწილი მაინც, თუ არა მთლიანად, უჯრედგარეთ ხდება ჰიდროლიზის გზით. უჯრედგარე მონელებას ადგილი აქვს კომპარტმენტებში, რომლებიც უწყვეტად გრძელდება სხეულის გარე ზედაპირამდე. ასეთი უჯრედგარე ღრუს არსებობა საშუალებას აძლევს ცხოველს შეჭამოს ისეთი მსხვერპლი, რომელსაც ვერ მიიღებდა ფაგოციტოზის გზით და მოინელებდა უჯრედშიდა ვაკუოლით.

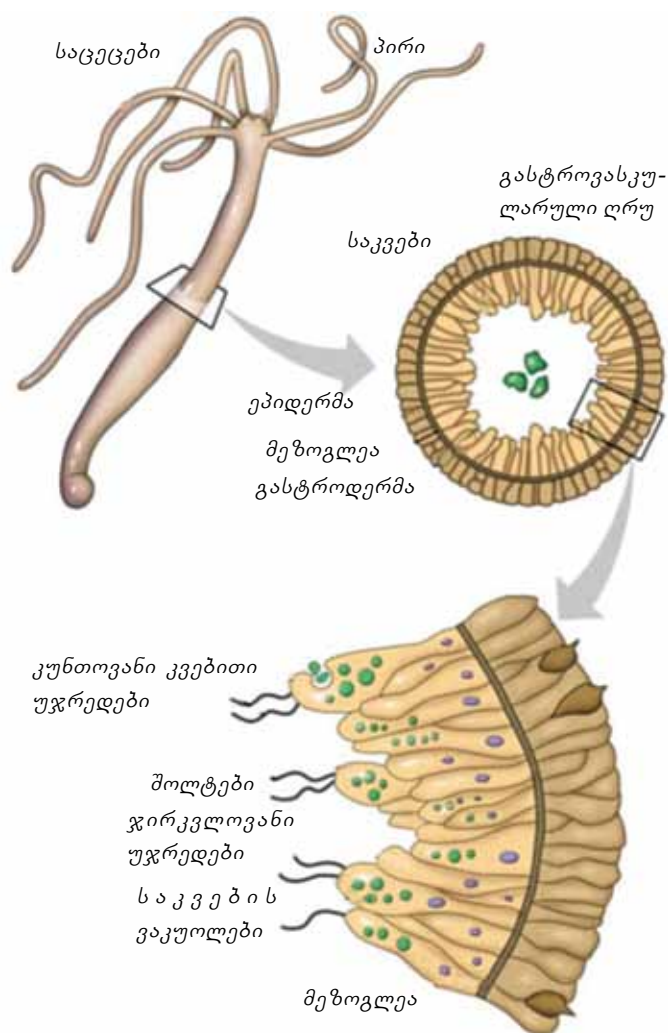
სხეულის შედარებით მარტივი აგებულების მქონე ბევრ ცხოველს აქვს მომწელებელი პარკი ერთი ხვრელით. ამ ჩანთას გასტროვასკულარულ ღრუს უწოდებენ. მისი ფუნქციაა მონელება და სხეულის შიგნით საკვები ნივთიერებების გადანაწილება (აქედან



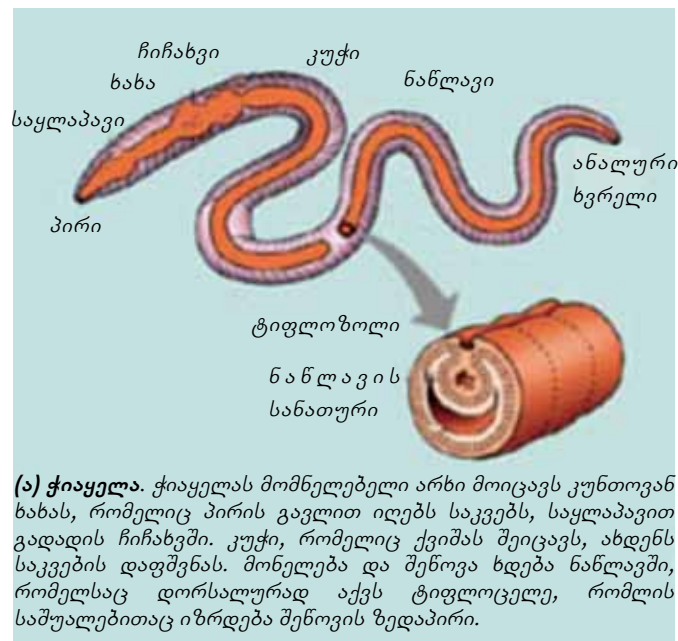
▲ **სურათი 41.12** საჭმლის გადამუშავების ოთხი სტადია.

მოდის ტერმინის ვასკულარული ნაწილი). ნაწლავდრუიანები, კერძოდ, ჰიდრა, კარგი მაგალითია იმისა, თუ როგორ მუშაობს გასტროვასკულარული ღრუ. ჰიდრა ხორცისმჭამელია, რომელიც ურჭობს სპეციალურ ორგანოებს, ნემატოციტებს, მსხვერპლს და შემდეგ იყენებს საცეცებს საკვების გასტროვასკულარულ ღრუში გადასატანად (სურ. 41.13).

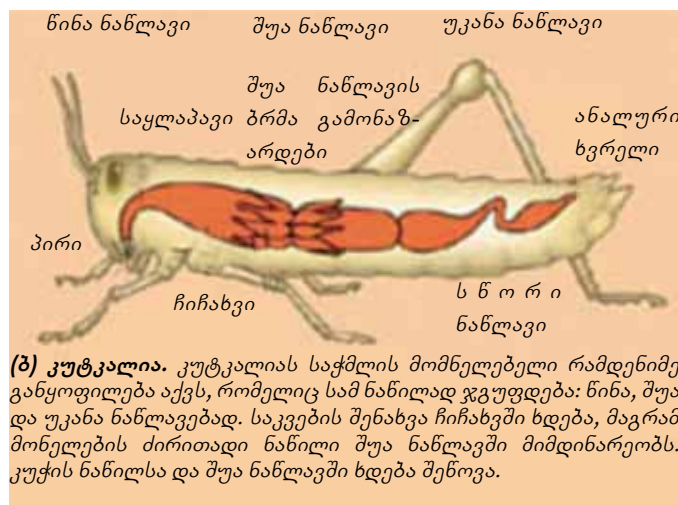
გასტროდერმისის (ღრუს ამომფენი ქსოვილის შრე) სპეციალური ჯირკვლოვანი უჯრედები გამოყოფს მომწებებელ ფერმენტებს, რომლებიც მსხვერპლის რბილ ქსოვილს მცირე ნაჭრებად შლის. სხვა გასტროდერმალური უჯრედები, რომლებსაც კვების კუნთოვან უჯრედებს უწოდებენ, ამ საკვებ ნაწილაკებს შთანთქავს. ამრიგად, ღრუბლების მსგავსად, მაკრომოლეკულების ჰიდროლიზის ძირითადი ნაწილი უჯრედის შიგნით მიმდინარეობს. მას შემდეგ, რაც ჰიდრა მოინელებს საკვებს, გასტროვასკულარულ ღრუში დარჩენილი მოუნე-



▲ **სურათი 41.13** მონელება ჰიდრაში. ჰიდრას გარეთა ეპიდერმისს აქვს დამცველობითი და სენსორული ფუნქციები, მაშინ, როდესაც შიდა გასტროდერმისი მონელებისთვის არის განსაზღვრული. მონელება გასტროვასკულარულ ღრუში იწყება და სრულდება ინტრაცელულარულად მას შემდეგ, როდესაც გასტროდერმალური უჯრედები პატარა ნაწილაკებს შთანთქავენ.



(ა) **ჭიკყელა.** ჭიკყელას მომწებებელი არხი მოიცავს კუნთოვან ხახვას, რომელიც პირის გავლით იღებს საკვებს, საყლაპავით გადადის ჩიჩახვში. კუჭი, რომელიც ქვიშას შეიცავს, ახდენს საკვების დაფშვნას. მონელება და შენოვა ხდება ნაწლავში, რომელსაც დორსალურად აქვს ტიფლოცელე, რომლის საშუალებითაც იზრდება შენოვის ზედაპირი.



(ბ) **კუტკალია.** კუტკალიას საჭმლის მომწებებელი რამდენიმე განყოფილება აქვს, რომელიც სამ ნაწილად ჯგუფდება: წინა, შუა და უკანა ნაწლავებად. საკვების შენახვა ჩიჩახვში ხდება, მაგრამ მონელების ძირითადი ნაწილი შუა ნაწლავში მიმდინარეობს. კუჭის ნაწილსა და შუა ნაწლავში ხდება შენოვა.



(გ) **ფრინველი.** ფრინველის უმეტესობას აქვს სამი კამერა, ჩიჩახვი, კუჭი და მეორე კუჭი, სადაც ხდება საკვების დაჭეუცმაცება ნაწლავში გადასვლამდე. ფრინველების ჩიჩახვი და მეორე კუჭი მოქმედებს ისევე, როგორც ჭიკყელას შესაბამისი ორგანოები. ფრინველთა უმეტესობაში ქიმიური მონელება და შენოვა ნაწლავებში მიმდინარეობს.

▲ **სურათი 41.14** ალიმენტარული არხების მრავალფეროვნება.

ლებელი მასალა, მაგალითად, პატარა კიბოსნაირების ეგზო-  
ჩონჩხი, ღრუს ხვრელით გარეთ გამოიყოფა. ამრიგად, ხვრელს  
აქვს პირისა და ანუსის ორმაგი ფუნქცია. ბევრ ბრტყელ ჭია-  
საც აგრეთვე აქვს ერთხვრელიანი გასტროვასკულარული  
ღრუ (**იხ. სურ. 33.10**).

ნაწლავდრუიანებისა და ბრტყელი ჭიებისგან განსხვავე-  
ბით, ცხოველების უმეტესობას, მათ შორის რგოლოვან ჭიებს,  
მოლუსკებს, ფეხსახსრიანებსა და ქორდიანებს გააჩნია მომ-  
ნელებელი არხი, რომელიც ორ ხვრელს, პირსა და ანუსს შო-  
რის არის გადაჭიმული. ასეთ არხს **სრული მომნელებელი  
ტრაქტი** ან **ალიმენტარული არხი** ჰქვია. რადგანაც საკვები  
არხში ერთი მიმართულებით გადაადგილდება, მასში ყალიბ-  
დება სპეციალიზებული უბნები, სადაც მონელება და აბსორბ-  
ცია თანმიმდევრულად ხორციელდება (**სურ. 41.14**).

სრული მომნელებელი ტრაქტის სხვა უპირატესობაა დამ-  
ატებითი საკვების მიღების უნარი, მაშინ, როდესაც მანამდე  
მიღებული საკვები ჯერ კიდევ ბოლომდე მონელებული არ  
არის. აღნიშნული თანმიმდევრობა რთული ან არაფექტური  
იქნება გასტროვასკულარული ღრუს მქონე ცხოველებისთვის.

**კონცეფცია 41.3**

- რა მთავარი განმასხვავებელი ნიშანია გასტრო-  
ვასკულარულ ღრუსა და ალიმენტარულ არხს შორის?
- ბოლო ხანებში მიღებული საკვები ნივთიერებები რა-  
ტომ არ არის ნამდვილად სხეულის „შიგნით“ საკვების  
დამუშავების აბსორბციის ეტაპამდე?

**კონცეფცია 41.4**

## ბუბოქოფაბათა საჭმლის მომნელებელ სისტემაში ყველა ოტგანოს მისთვის დამახასიათებელი ოუნდცია აკისბია

საჭმლის გადამუშავების ძირითადი პრინციპები ცხოვე-  
ლთა დიდ ნაწილში მსგავსია, ასე რომ, მაგალითად შეგვი-  
ძლია ძუძუმწოვრების მომნელებელი სისტემა გამოვიყენოთ.  
ძუძუმწოვრების მომნელებელი სისტემა შედგება ალიმენტარ-  
ული არხისა და სხვადასხვა მომნელებელი ჯირკვლისგან,  
რომლებიც სპეციალური მილებით მომნელებელ წვენებს

არხში გამოყოფს (**სურ. 41.15**). **პერისტალტიკა** არხის  
გასწვრივ შეკუმშვის რიტმული ტალღებია, რომლებიც გა-

ნაპირობებს საკვების გადაადგილებას მომნელებელ მილში.  
შეკუმშვა ხორციელდება გლუვი კუნთების საშუალებით. სპე-  
ციალიზებული სეგმენტების ზოგ შეერთებაში კუნთოვანი შრე  
სახეშეცვლილია ბექდისმაგვარ სტრუქტურად, რომელსაც  
**სფინქტერი** ეწოდება. სფინქტერები ხურავენ მილს და არეგუ-  
ლირებენ საკვები მასალის გადასვლას არხის განყოფილებებს  
შორის. ძუძუმწოვართა მომნელებელი სისტემის ეგზოკრი-  
ნული ჯირკვლებია: სამი წყვილი **სანერწყვე ჯირკვალი, პან-  
კრეასი, ღვიძლი** და **ნაღვლის ბუშტი**.

მაგალითისთვის ავიღოთ ადამიანის მომნელებელი  
სისტემა და განვიხილოთ საკვების გადამუშავება მონელების  
არხის სხვადასხვა სპეციალიზირებულ უბნებში (**იხ. სურ.  
41.15**).

## პირის ღრუ, ხახა და საყლაპავი

საკვების ფიზიკური და ქიმიური დამუშავება იწყება პირ-  
ში. ღეჭვის დროს სხვადასხვა ფორმის კბილები ჭრის, ხლეჩს,  
აქუცმაცებს საჭმელს, რაც აადვილებს ყლაპვას და ზრდის

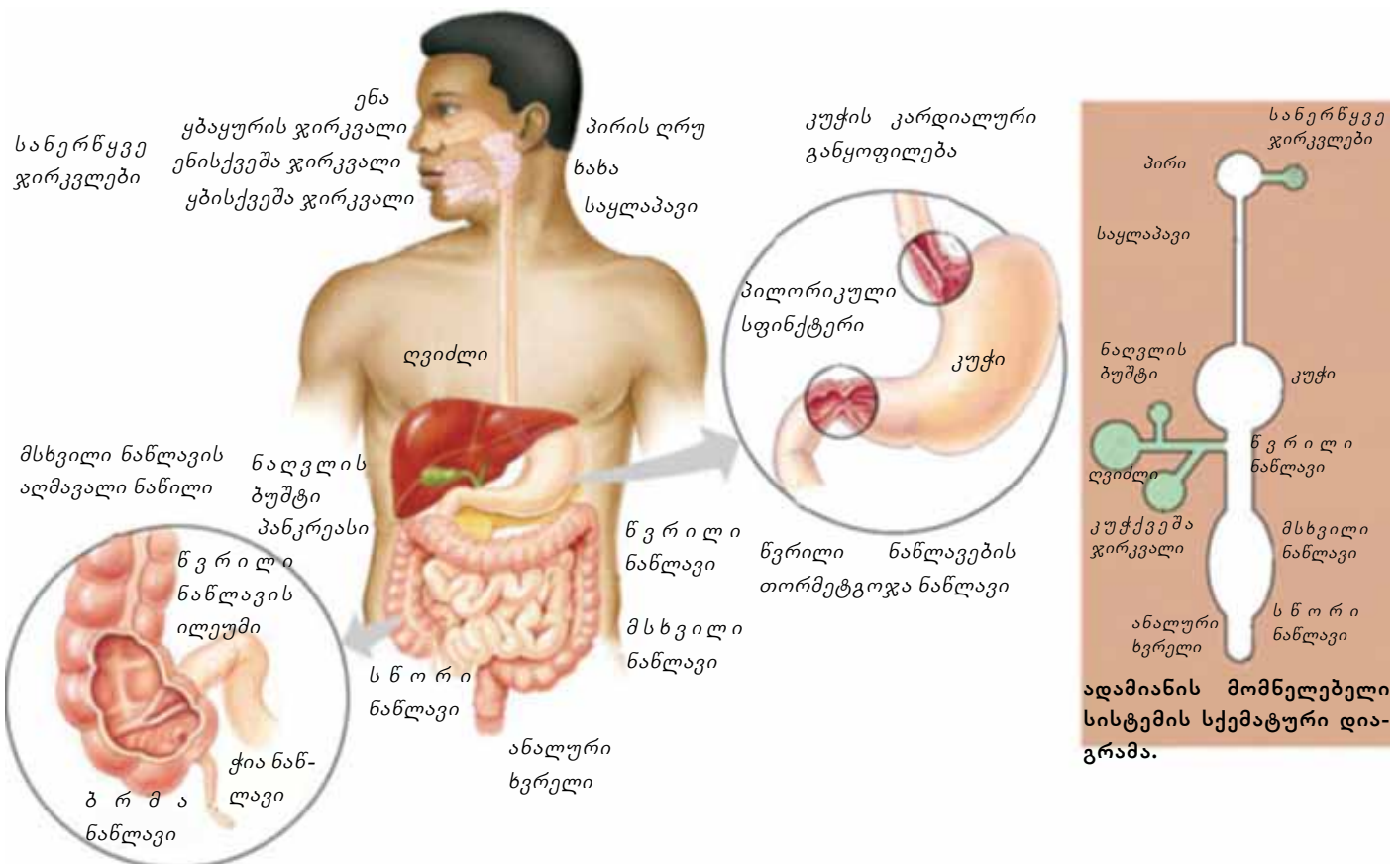
მისი ზედაპირის ფართობს. **პირის ღრუში** მოხვედრისას  
საკვები იწვევს ნერვულ რეფლექსს, რომელიც განაპირობებს  
სანერწყვე ჯირკვლების მიერ ნერწყვის გამოყოფას პირის  
ღრუში. ნერწყვის გამოყოფა შეიძლება საკვების პირში მოხ-  
ვედრამდე დაიწყოს. ამის მიზეზია საკვების მიღების დროის  
წინასწარ განსაზღვრა დასწავლილი ასოციაციებით. აღნიშ-  
ნული ასოციაციური კავშირები შეიძლება ჩამოყალიბდეს  
დღის დროსთან, საჭმლის სუნთან ან სხვა სტიმულთან. ადამი-  
ანი ყოველდღე ერთ ლიტრზე მეტ ნერწყვს გამოყოფს.

ნერწყვი შეიცავს გლიკოპროტეინს (ცილა-ნახშირწყლო-  
ვან კომპლექსი), რომელსაც ლორწო ეწოდება, ის იცავს პირს  
გამოშრობისგან და ხელს უწყობს ყლაპვას. ნერწყვი ასევე  
შეიცავს ბუფერებს, რომლებიც ანეიტრალებს პირის ღრუს  
სიმჟავეს და, ამრიგად, იცავს კბილებს გაფუჭებისგან. ნერ-  
წყვში არსებული ანტიბაქტერიული აგენტები კლავს ბევრ  
ბაქტერიას, რომელიც პირში საკვებთან ერთად ხვდება.

ნახშირწყლების ქიმიური მონელება პირის ღრუში ინ-  
ყება. ნერწყვი შეიცავს ნერწყვის **ამილაზას**, სახამებლისა  
(გლუკოზის მცენარეული პოლიმერი) და გლიკოგენის (გლუ-  
კოზის ცხოველური პოლიმერი) დამშლელ ფერმენტს. ამ ფერ-  
მენტის მოქმედების მთავარი პროდუქტი არის უფრო მცირე  
პოლისაქარიდი და დისაქარიდი მალტოზა.

ენა შეიგრძნობს საკვების გემოს, ახდენს მის მანიპული-  
რებას ღეჭვის დროს და ეხმარება საკვების ბურთის ფორ-  
მის მასად ჩამოყალიბებაში, რომელსაც ბოლუსს უწოდებენ.  
ყლაპვისას ენა აწვება ბოლუსს პირის ღრუს უკანა მხრისკენ  
და საყლაპავისკენ.

**ფარინგსი** (ხახა) უკავშირდება საყლაპავსა და ტრაქეას.  
ის უბანია, რომელსაც ასევე ყელს უწოდებენ. ყლაპვისას  
ტრაქეას ზედა ნაწილი იწვევს ზევით და მისი ხვრელი იფარე-  
ბა ხრტილოვანი **ეპიგლოტის**ით. ეს მოძრაობა შეგიძლიათ  
დაინახოთ ყლაპვისას „ადამის ვაშლის“ გადაადგილებით.



▲ **სურათი 41.15 ადამიანის მომწელებელი სისტემა.** მას შემდეგ რაც საკვები დაილეჭება და გადაიყლაპება, დაახლოებით 5-10 წუთის განმავლობაში გაივლის საყლაპავს და ჩადის კუჭში, სადაც ის დაყოვნდება 2-6 საათის განმავლობაში და ნაწილობრივ მოიწელება. საკვები ნივთიერების საბოლოო მოწელება და აბსორბცია ხდება წვრილ ნაწლავში 5-6 საათის განმავლობაში. 12-14 საათში ნებისმიერი მოწელებელი მასალა გაივლის მსხვილ ნაწლავს და ნარჩენები ანუსის საშუალებით გამოდის გარეთ.

ეს კარგად კონტროლირებადი მექანიზმი, ჩვეულებრივ, უზრუნველყოფს ბოლუსის საყლაპავში გადასვლას (**სურ. 41.16, ნაბიჯი 1-4**). თუ ყლაპვის რეფლექსმა დროზე არ დაკეტა ტრაქეის შესასვლელი, საკვები ან სითხე შესაძლოა ქვემოთ არასწორ მილში მოხვდეს. ჰაერის დინების შეწყვეტის შედეგად ვითარდება ძლიერი ხველა, რომელიც, ჩვეულებრივ, განდევნის მასას. თუ განდევნა სწრაფად არ მოხდა, ფილტვებში ჰაერის დეფიციტი შეიძლება სასიკვდილო იყოს.

საყლაპავი ანუ **ეზოფაგუსი** საკვებს ხახიდან კუჭისკენ პერისტალტიკის გზით ატარებს (**იხ. სურ. 41.16, ნაბიჯი 6**). საყლაპავის ზედა ნაწილის კუნთები განივზოლიანია და ემორჩილება ჩვენს ნება-სურვილს. ამრიგად, გადაყლაპვის აქტი ნება-სურვილის მიხედვით იწყება, მაგრამ შემდეგ საყლაპავის დარჩენილ ნაწილში გლუვი კუნთების შეკუმშვის უნებლიე ტალღებით გრძელდება.

## კუჭი

**კუჭი** ამარაგებს საკვებს და ახორციელებს მოწელების ადრეულ სტადიას. ეს დიდი ორგანო მოთავსებულია მუცლის ღრუს ზედა ნაწილში, უშუალოდ დიაფრაგმის ქვეშ. მას ძალიან ელასტიური კედელი აქვს და შეუძლია გაიჭიმოს ისე,

რომ დაახლოებით 2ლ საკვები და სითხე დაეტიოს. ამის გამო, კუჭი ახერხებს, შეინახოს საკვები და არ ვსაჭიროებთ მუდმივ ჭამას. საკვების დამარაგებასთან ერთად, კუჭი მნიშვნელოვან მომწელებელ ფუნქციებს ასრულებს: ის გამოყოფს მომწელებელ წვენს, რომელსაც **გასტრალურ წვენს** უწოდებენ. აღნიშნულ წვენს კუჭი კედლის გლუვი კუნთების შეკუმშვით ურევს საკვებს.

კუჭის წვენი გამოიყოფა კუჭის ეპითელიუმის მიერ, რომელიც კედლის მრავალრიცხოვან ჩაღრმავებაშია მოთავსებული. აქ მარილმჟავას მაღალი კონცენტრაციაა, გასტრალურ წვენს (pH 2) აქვს საკმარისად მჟავა რკინის ლურსმნების დასაშლელადაც კი. მჟავას ერთი ფუნქციაა უჯრედგარე მატრიქსის დაშლა, რაც ცხოველურ და მცენარეულ უჯრედებს ერთმანეთთან აკავშირებს. მჟავა ასევე კლავს ბაქტერიების უმეტეს ნაწილს, რომელსაც ცხოველი საკვებთან ერთად ყლაპავს. ასევე გასტრალურ წვენში არის პეპსინი, ფერმენტი, რომელიც იწყებს ცილების ჰიდროლიზს. პეპსინი შლის ცილოვან ბმებს განსაზღვრული ამინომჟავების მეზობლად და შლის ცილას უფრო მცირე ნაერთებად, რომლებიც შემდგომში მთლიანად მოიწელება წვრილ ნაწლავში ცალკეულ ამინომჟავებამდე.

პეპსინი მიეკუთვნება ფერმენტების იმ მცირე ჯგუფს, რომელიც მჟავა არეში მოქმედებს. დაბალი pH საკვებში



**კუჭის შიდა ზედაპირი.**  
კუჭის შიდა ზედაპირი დანაოჭებულია და აქვს მილოვანი კუჭის ჯირკვლები.

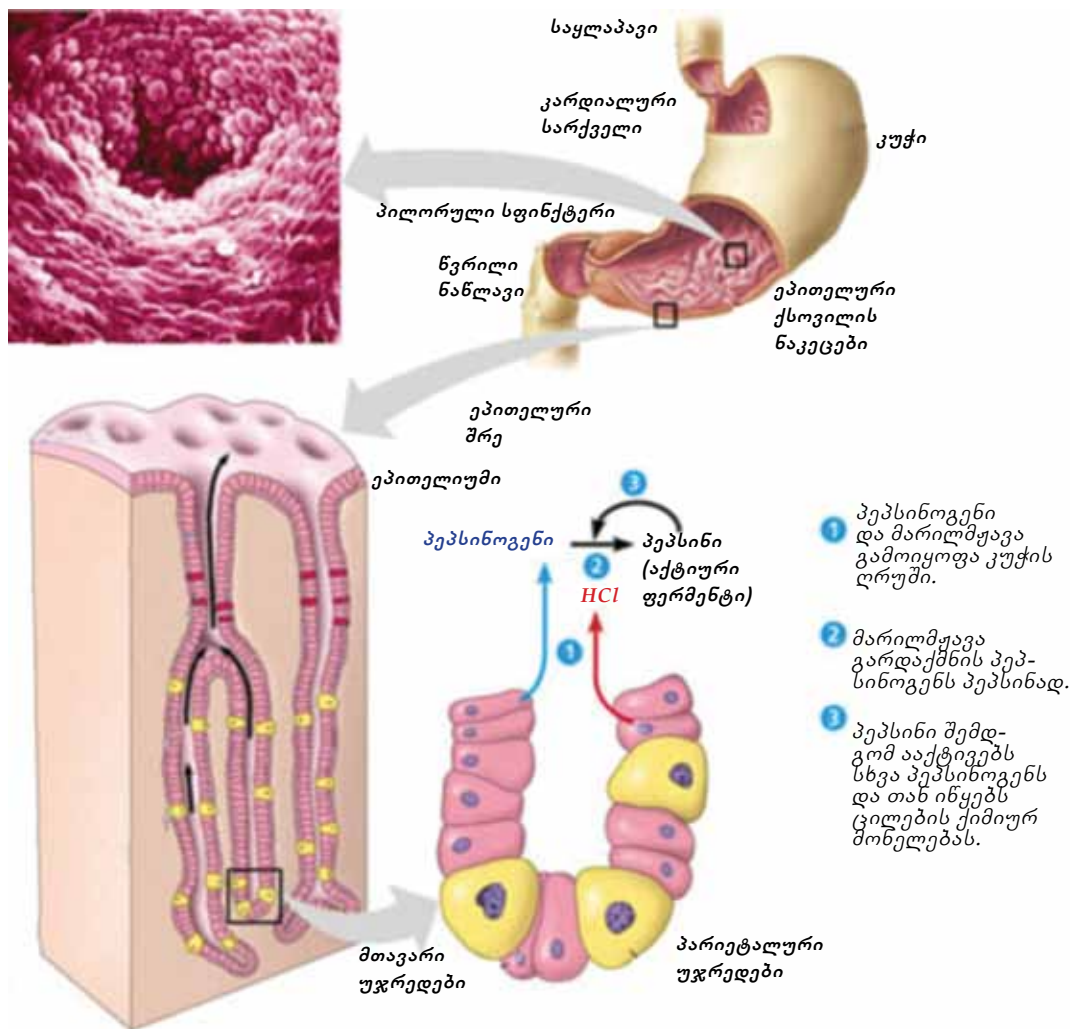
5  $\mu$ m

**კუჭის ჯირკვლები.**  
კუჭის ჯირკვლებს სამი ტიპის უჯრედები აქვთ, რომლებიც კუჭის წველის სხვადასხვა კომპონენტებს გამოყოფენ. ღორწოს უჯრედები, მთავარი უჯრედები და პარიეტალური უჯრედები.

**ღორწოს უჯრედები** ღორწოს გამოყოფენ, რომელიც იცავს კუჭის უჯრედებს.

**პარიეტალური უჯრედები** კი მარილმჟავას გამოყოფენ.

**მთავარი უჯრედები** პეპსინოგენს გამოიმუშავენ, რომელიც მომწელებელი ფერმენტის, პეპსინის არა-აქტიური ფორმაა.



▲ **სურათი 41.17 კუჭი და მისი სეკრეტები.** მიკროგრაფი (ფერადი SEM) აჩვენებს კუჭის ჩალრმავებას მის შიდა ზედაპირზე, რომლიდანაც მომწელებელი წვენების გამოყოფა ხდება.

## წვრილი ნაწლავი

ადამიანებში წვრილი ნაწლავის სიგრძე დაახლოებით 6 მეტრს აღწევს და ის მომწელებელი არხის ყველაზე გრძელი უბანია (მისი სახელი მსხვილ ნაწლავთან შედარებით მცირე დიამეტრს შეესაბამება). ძირითადი ფერმენტული დაშლა, მაკრომოლეკულების და საკვები ნივთიერებების შეწოვა სისხლში სწორედ წვრილ ნაწლავში ხორციელდება.

## წვრილი ნაწლავის ფერმენტული აქტივობა

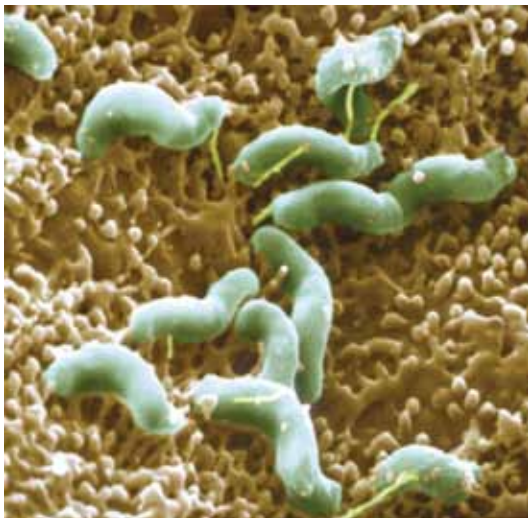
წვრილი ნაწლავის პირველ 25მ-ს **თორმეტგოჯა ნაწლავი** ეწოდება. აქ ხდება კუჭიდან გადმოსული მჟავე ქიმუსის შერევა მომწელებელ წვენებთან, რომლებიც გამოიყოფა წვრილი ნაწლავის კედლის ჯირკვლოვანი უჯრედებიდან – პანკრეასიდან, ღვიძლიდან და ნაღვლის ბუშტიდან (**სურ. 41.19**).

პანკრეასი წარმოქმნის რამდენიმე მომწელებელ ფერმენტს და ბიკარბონატების შემცველ ფუძე წვენს. ბიკარბონატების სითხე ბუფერის ფუნქციას ასრულებს და ანეიტრა-

ლებს კუჭიდან გადმოსული ქიმუსის მჟავიანობას. პანკრეასის ფერმენტებს მიეკუთვნება ცილის მომწელებელი ფერმენტები (პროტეაზები), რომლებიც თორმეტგოჯა ნაწლავში არააქტიური ფორმით გამოიყოფა. პეპსინის ჯაჭვური აქტივაციის მსგავსად, თორმეტგოჯა ნაწლავში მოხვედრისას ხდება პანკრეასის პროტეაზების აქტივაცია (**სურ. 41.20**).

ღვიძლი სხეულში მრავალფეროვან ფუნქციებს ასრულებს, მათ შორის არის ნაღვლის წარმოქმნა. ნაღველი არის ნივთიერებათა ნარევი, რომელიც ნაღვლის ბუშტში გროვდება და გამოიყოფა ბუშტიდან საჭიროების შემთხვევაში. ნაღველი შეიცავს ნაღვლის მარილებს, რომლებიც მოქმედებს როგორც დეტერგენტები და ეხმარება ცხიმების მონელებას და აბსორბციას (**სურ. 41.24**). ნაღველი ასევე შეიცავს პიგმენტებს, რომლებიც ღვიძლში სისხლის წითელი უჯრედების დაშლის შედეგად წარმოქმნილი პროდუქტია. ეს პიგმენტები სხეულიდან ექსკრემენტებთან ერთად გამოიყოფა.

თორმეტგოჯა ნაწლავის ეპითელიუმი რამდენიმე მომწელებელი ფერმენტის წყაროა. ამ ფერმენტთაგან ზოგი



ბაქტერია

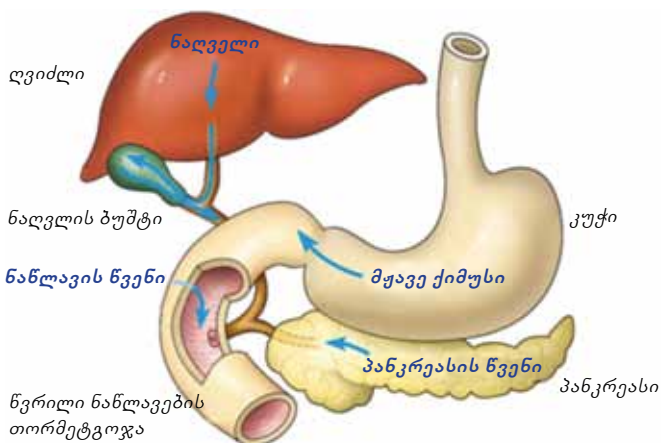
კუჭის ლორწოვანი შრე

1 μm

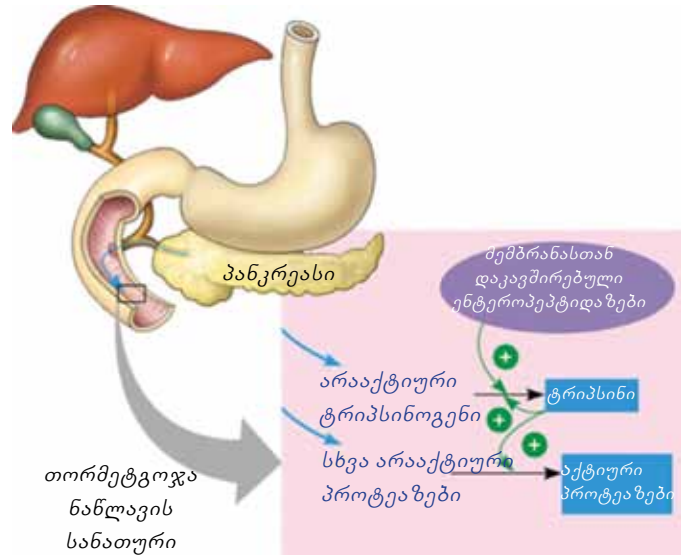
▲ **სურათი 41.18** წყლულის გამომწვევი ბაქტერია. ამ ფერად SEM-ში ნაჩვენებია ბაქტერია *Helicobacter pylori* იწვევს წყლულებს დამცავი ლორწოს დაშლის გზით და კუჭის შრის ანთებით. ამ დროს მუცე გასტრალური წვენი აზიანებს კუჭის კედელს. მწვავე წყლულების დროს, ეროზიამ შესაძლოა კუჭის კედელში ხვრელიც კი წარმოქმნას და სიცოცხლისთვის საშიში შინაგანი სისხლდენა და ინფექცია გამოიწვიოს.

თორმეტგოჯა ნაწლავის სილრუეში გამოიყოფა, სხვები კი ეპითელიუმის კედელზეა მიმაგრებული.

ფერმენტული მონელება ხორციელდება, როცა პერისტალტიკა ქიმუსს და მომწვანებელ წვენებს წვრილ ნაწლავში გადაადგილებს (**სურ. 41.21**). მონელების უმეტესობა ამ მოძრაობის ადრეულ სტადიაზე სრულდება, მაშინ, როცა ქიმუსი ჯერ კიდევ თორმეტგოჯა ნაწლავშია. წვრილი ნაწლავის დარჩენილი უბნები, ძირითადად, საკვები ნივთიერებებისა და წყლის აბსორბციის ფუნქციას ასრულებს. **სურათი 41.22** გვიჩვენებს, როგორ ეხმარება ჰორმონები მომწვანებელ არხში ფერმენტების გამოყოფის კოორდინირებას.



▲ **სურათი 41.19** თორმეტგოჯა ნაწლავი. დამატებითი ჯირკვლებიდან გამოყოფილი ჰიდროლიზური ფერმენტები ერევა მუცე ქიმუსს და გრძელდება მონელების პროცესი. ყურადღება მიაქციეთ, რომ ნაღველი ლვიძლში წარმოიქმნება, მაგრამ ნაღვლის ბუშტში გროვდება, რომელიც საჭიროებისამებრ ნაღველს თორმეტგოჯა ნაწლავში გამოყოფს.



▲ **სურათი 41.20** პროტეაზული ფერმენტების აქტივაცია. პანკრეასი თორმეტგოჯა ნაწლავში გამოყოფს არააქტიურ პროტეაზებს. ნაწლავის ეპითელიუმთან დაკავშირებული ფერმენტი, რომელსაც ენტეროპეპტიდაზა ეწოდება, გარდაქმნის ტრიპსინოგენს ტრიპსინად. ტრიპსინი კი სხვა პროტეაზებს ააქტივებს. (+ მიუთითებს აქტივაციაზე).

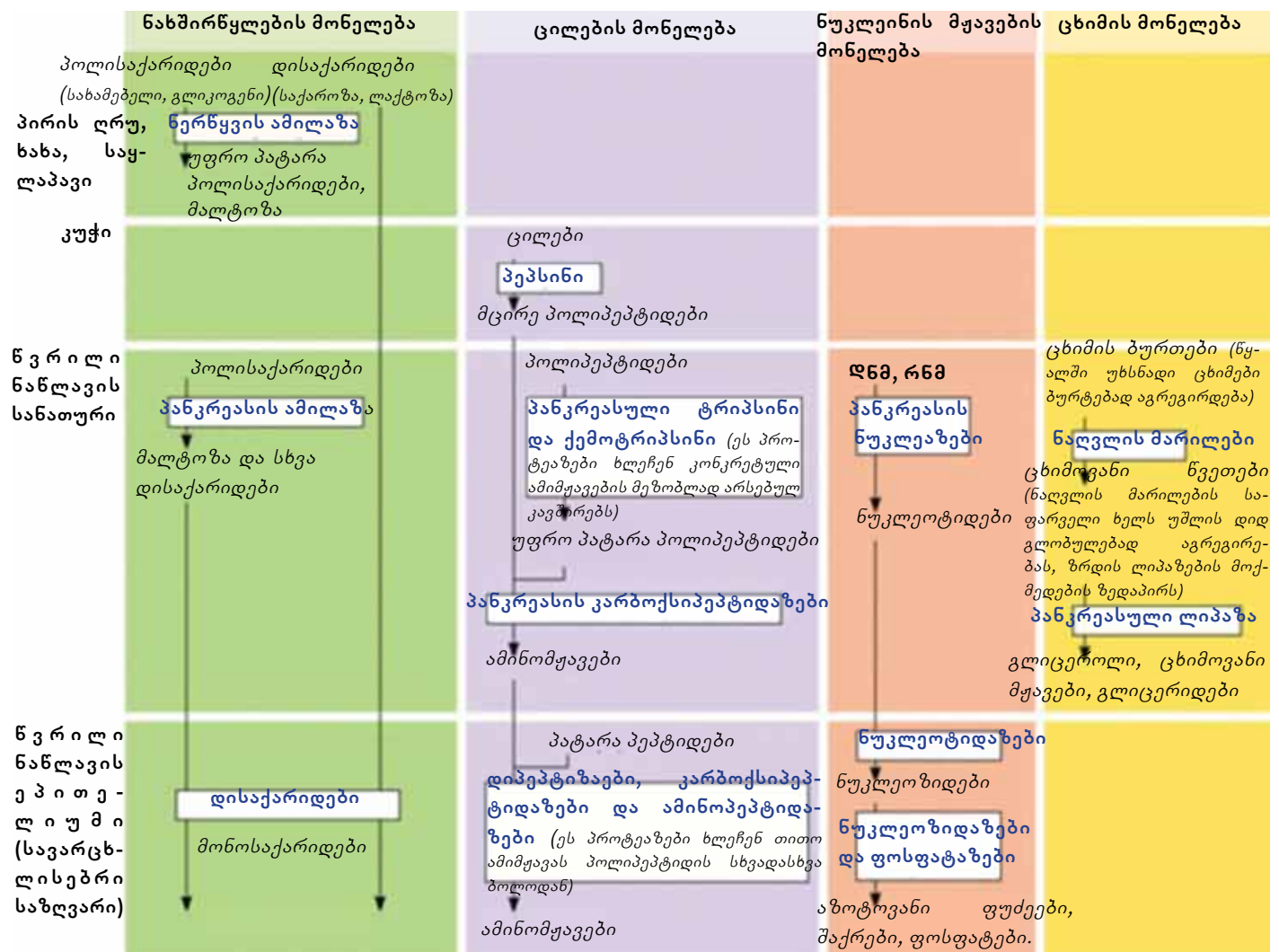
## საკვები ნივთიერებების აბსორბცია

სხეულში მოსახვედრად საკვებმა ნივთიერებებმა უნდა გაიაროს მომწვანებელი ტრაქტის კედელი. ნივთიერებების ნაწილის შენოვა კუჭსა და მსხვილ ნაწლავში ხდება, მაგრამ

აბსორბციის ძირითადი ნაწილი წვრილ ნაწლავში ხორციელდება. აღნიშნულ ნაწლავში თითისმაგვარი წარმონაქმნებია, რომლებსაც **ხაოებს** უწოდებენ. ხაოების ეპითელური უჯრედები, თავის მხრივ, უამრავ მიკროხაოს წარმოქმნიან, რომელიც ნაწლავის ღრუსკენ არის მიმართული (**სურ. 41.23**) (მიკროხაოებიდან მოდის ნაწლავური ეპითელის სახელი – სავარცხლისებრი საზღვარი). მიკროხაოებისგან შექმნილი დიდი ზედაპირი შეწოვისთვის მნიშვნელოვანი ადაპტაციაა.

თითოეული ხაოს შიგნით გულში მიკროსკოპული სისხლძარღვები (კაპილარები) და მცირე ზომის ლიმფური ძარღვებია მოთავსებული, რასაც ლაქტილს უწოდებენ (სისხლის მიმოქცევის სისტემასთან ერთად ხერხემლიანებს აქვთ ძარღვები, რომელთა საშუალებით ლიმფა მოძრაობს, რაც განხილულია 43 თავში). საკვები ნივთიერებები ნაწლავური ეპითელიუმის მიერ შეიწოვება და შემდეგ ლაქტილის ან კაპილარების ერთშიან ეპითელიუმს გაივლის. ეპითელური უჯრედების მხოლოდ ორი შრე გამოყოფს ნაწლავში არსებულ საკვებს სისხლის მიმოქცევისგან.

ზოგ შემთხვევაში, საკვები ნივთიერებების შეწოვა ეპითელურ შრეში პასიური პროცესია. მაგალითად, მარტივი შაქარი ფრუქტოზა ნაწლავის ღრუდან სისხლისკენ ეპითელიუმის გავლით დიფუზიის გზით, ანუ კონცენტრაციული გრადიენტის მიმართულებით გადაადგილდება. სხვა საკვები ნივთიერებები, მათ შორის ამინომჟავები, გლუკოზა და ზოგი სხვა მარტივი შაქარი კონცენტრაციული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ გადაიქაჩება ეპითელური მემბრანებით. აქ-



▲ სურათი 41.21 ადამიანის მომენტურ სისტემაში ფერმენტული მონელების სქემა.

ტიური ტრანსპორტი საშუალებას აძლევს ნაწლავს საკვები ნივთიერებების უფრო დიდი რაოდენობა შეიწოვოს, ვიდრე პასიური ტრანსპორტით იქნებოდა შესაძლებელი.

ამინომჟავები და შაქრები გადის ეპითელიუმში, შედის კაპილარებში და შორდება ნაწლავებს სისხლის დინებით. გლიცერინი და ცხიმოვანი მჟავები ეპითელიურ უჯრედებში აბსორბციის შემდეგ ქიმიურ ბმებს აყალიბებს და ცხიმებს წარმოქმნის. ცხიმები მერე ერევა ქოლესტერინს და იფარება ცილებით, ქმნის მცირე ზომის ბურთებს, ქილომიკრონებს. ისინი ეპითელიური უჯრედებიდან ტრანსპორტირდება ლაქტილში (სურ. 41.24). ლაქტილები უერთდება ლიმფური სისტემის უფრო დიდ ძარღვებს. ქილომიკრონის შემცველი ლიმფა საბოლოოდ იფილტრება ლიმფური სისტემიდან და ჩაედინება დიდ ვენებში, რომლებიც გულს უერთდება.

ლაქტილებისგან განსხვავებით, კაპილარები და ვენები, რომლებშიც ხაოებიდან საკვები ნივთიერებები გადადის, უერთდება ღვიძლის კარის ვენას, სისხლძარღვს, რომელიც უშუალოდ ღვიძლში შედის. ეს უზრუნველყოფს იმას, რომ ღვიძლი, რომელსაც სხვადასხვა ორგანული მოლეკულის

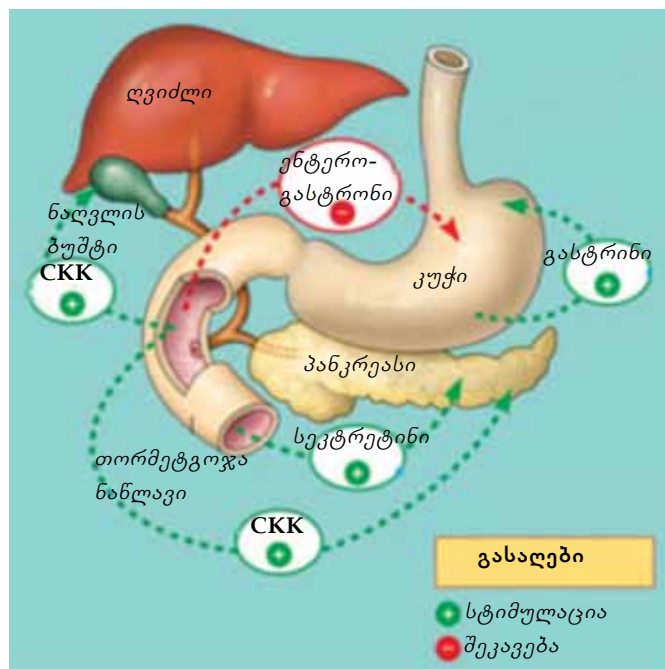
ურთიერთგარდაქმნის უნარი აქვს, პირველი იღებს ამინომჟავებსა და შაქრებს შენთვის შემდეგ. სისხლს, რომელიც ღვიძლს ტოვებს, შესაძლოა საკვები ნივთიერებების აბსოლუტურად განსხვავებული ბალანსი ჰქონდეს, ვიდრე იმ სისხლს, რომელიც მასში კარის ვენით შევიდა.

მაგალითად, ღვიძლი სისხლში გლუკოზის დონის რეგულირებას ეხმარება და სისხლი, რომელიც ტოვებს ღვიძლს, ჩვეულებრივ, შეიცავს 0.1% გლუკოზას, იმის მიუხედავად, საკვებში როგორი შემადგენლობით იყო ნახშირწყლები (იხ. სურ. 41.3). ღვიძლიდან სისხლი მიედინება გულში, რომლიდანაც საკვები ნივთიერებებით მდიდარი სისხლი მთელ ორგანიზმში გადანაწილდება.

## მსხვილი ნაწლავი

**მსხვილი ნაწლავი (სურ. 41.25)** წვრილ ნაწლავთან T-ფორმის შეერთებით არის დაკავშირებული, სადაც სფინქტერი (კუნთოვანი რგოლი) აკონტროლებს საკვები მასალის მოძრაობას. T-ს ერთ მკლავს ბრმანაწლავს უწოდებენ (იხ.

თორმეტგოჯა ნაწლავში ამინომჟავები და ცხიმოვანი მჟავები რთავენ ქოლესტოკინინის (CKK) გამოთავისუფლებას, რომელიც ასტიმულირებს მომწელებელი ფერმენტების გამოყოფას პანკრეასიდან და ნაღვლის გამოყოფას ნაღვლის ბუშტიდან.



თორმეტგოჯა ნაწლავის მიერ გამოთავებული ენტეროგასტრონი ამცირებს პერისტალტიკას და კუჭის სეკრეციას, ასე ანელებს მონელებას, როდესაც ცხიმით მდიდარი ქიმიური შედის თორმეტგოჯა ნაწლავში.

კუჭის მიერ გამოყოფილი გასტრინი სისხლით უკან კუჭისკენ მიიტანება, სადაც ის ასტიმულირებს კუჭის წვენის გამოყოფას.

თორმეტგოჯა ნაწლავის მიერ გამოყოფილი სეკრეტინი ასტიმულირებს პანკრეასის მიერ ბიკარბონატების გამოყოფას, რომელიც კუჭიდან გადმოსული მჟავე ქიმიური ნეიტრალიზირებას ახდენს.

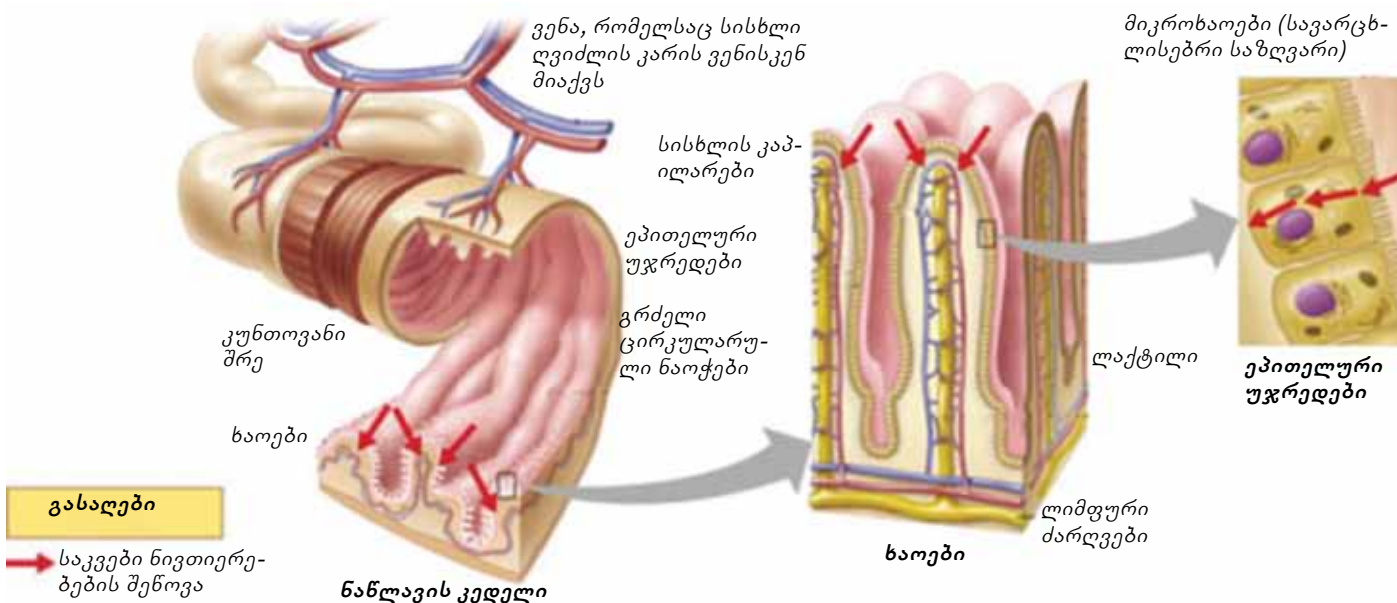
▲ **სურათი 41.22 მონელების ჰორმონული კონტროლი.** ბევრი ცხოველი საკვებს დიდი ინტერვალით იღებს და მათ მომწელებელ სისტემას არ სჭირდება განგრძობითი მუშაობა. კუჭისა და თორმეტგოჯა ნაწლავის მიერ გამოყოფილი ჰორმონები ხელს უწყობს იმას, რომ მომწელებელი ფერმენტები მხოლოდ მაშინ იყოს, როდესაც მათი საჭიროებაა.

**სურ. 41.15).** ბევრ სხვა ძუძუმწოვართან შედარებით, ადამიანს პატარა ბრმანაწლავი აქვს. ადამიანის ბრმანაწლავს აქვს თითისმაგვარი გაგრძელება, რომელსაც ჭია ნაწლავი ანუ აპენდიქსი ეწოდება. ადამიანის მსხვილი ნაწლავის სიგრძეა დაახლოებით 1.5მ.

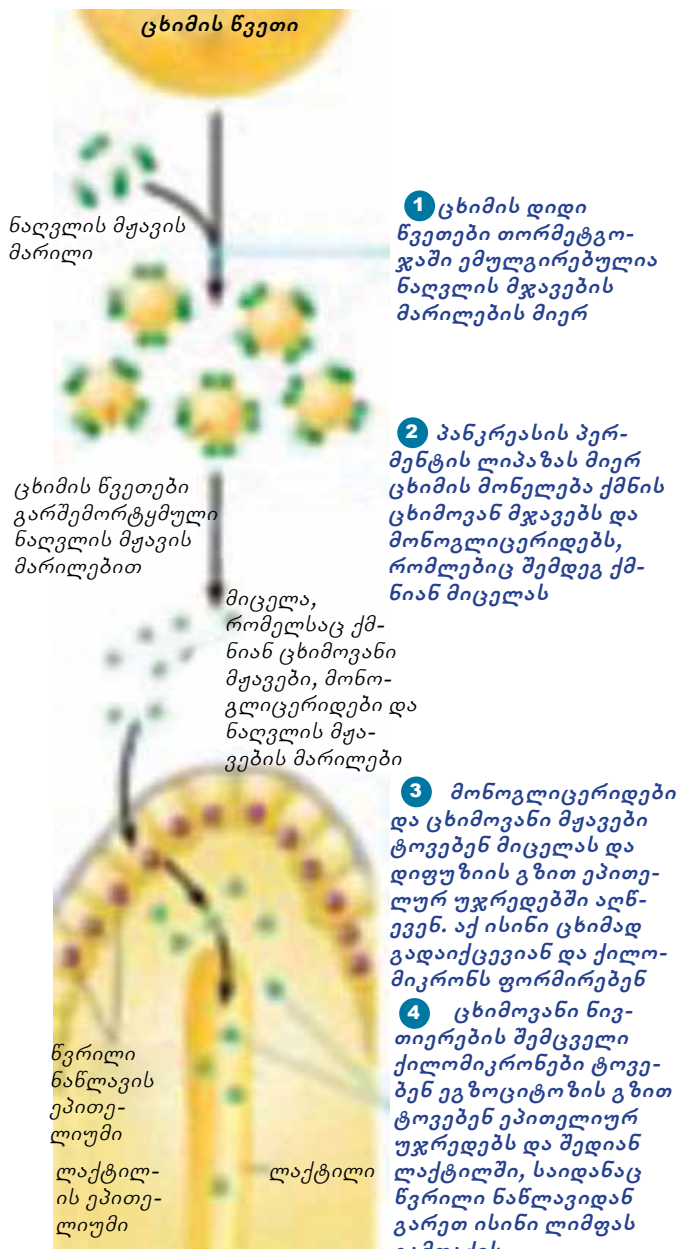
მსხვილი ნაწლავის მთავარი ფუნქციაა წყლის უკუშეწოვა, რომელიც ნაწლავში გამოიყო მომწელებელი წვენების შემადგემლობაში. ყოველ დღე დაახლოებით 7ლ სითხე გამოი-

ყოფა მომწელებელ არხში, რაც გაცილებით მეტია იმაზე, რასაც ადამიანები ჩვეულებრივ სვამენ ხოლმე. ამ წყლის უმეტესი ნაწილი რეაბსორბირდება, როდესაც საკვები ნივთიერებების შეწოვა ხდება წვრილ ნაწლავში. მსხვილი ნაწლავი კი შეიწოვს ნარჩენი წყლის დიდ ნაწილს, რომელიც წვრილ ნაწლავში არ აბსორბირდა. წვრილი და მსხვილი ნაწლავი ერთად შეიწოვს მომწელებელ არხში შესული წყლის 90%-ს.

მონელებულის ნარჩენი, ფეკალური მასა უფრო



▲ **სურათი 41.23 წვრილი ნაწლავის სტრუქტურა.**



▶ **სურათი 41.24 ცხიმების მონელება და შეწოვა.** ცხიმების ჰიდროლიზი, მონელების გამოწვევაა, რამდენადაც ცხიმოვანი მოლეკულები წყალში უხსნადია. ნაღვლის მარილები, რომელიც ნაღვლის ბუშტიდან თორმეტგოჯა ნაწლავში ჩადის გარს ეხვევა მცირე ზომის ცხიმოვან წვეთებს და იცავს მათ გაერთიანებისგან, პროცესს ემულსიფიკაცია ეწოდება. იქედან გამომდინარე, რომ წვეთები პატარაა, ცხიმის დიდი ზედაპირზე ლიპაზა მოქმედებს. მას შემდეგ, რაც ცხიმის მოლეკულის ჰიდროლიზი ხდება, ისინი წარმოქმნიან მიცელებს, რომელიც ცხიმოვან ნაერთებს საშუალებას აძლევს, წვრილი ნაწლავის ეპითელიუმში დიფუნდირდეს. ეპითელიური უჯრედებიდან ისინი შეიძლება ცირკულატორულ სისტემაში აბსორბირდეს.

მკვრივდება, როდესაც ის მსხვილ ნაწლავში პერისტალტიკის გზით გადაადგილდება. მოძრაობა ნელია და დაახლოებით 12-24სთ სჭირდება, რომ მასალა ნაწლავის მთელ სიგრძეზე გადაადგილდეს. თუ ნაწლავის შიგა ზედაპირი გაღიზიანდა, მაგალითად, ვირუსული ან ბაქტერიული ინფექციით, უფრო



▲ **სურათი 41.25 ადამიანის კოლინჯის ციფრული სურათი.** ეს სურათი გადაღებულია მსხვილი ნაწლავის ორგანოზომილებიანი ჭრილების სურათების გაერთიანებით.

ნაკლები წყლის რეაბსორბცია ხდება, ვიდრე ჩვეულებრივ, რაც დიარეას იწვევს. საწინააღმდეგო პრობლემა, შეკრულობა, ვითარდება, როცა ფეკალური მასა მსხვილი ნაწლავის გასწვრივ ძალიან ნელა მოძრაობს. ჭარბი წყალი რეაბსორბირდება და ფეკალური მასა კომპაქტური ხდება.

მსხვილ ნაწლავში უსაფრთხო ბაქტერიების მდიდარი ფლორა ბინადრობს. ადამიანის მსხვილი ნაწლავის ძირითადი ბინადარია *Escherichia coli*, მოლეკულური ბიოლოგების ყველაზე საყვარელი საკვლევი ობიექტი (იხ. თავი 18). *Escherichia coli*-ს არსებობა ტბებსა და ნაკადულებში ექსკრემენტების შერევის ნიშანია. ნაწლავური ბაქტერიები ბინადრობენ არაშენოვით ორგანულ ნივთიერებებზე. ბევრი ნაწლავური ბაქტერია მეტაბოლიზმის შედეგად აირებს გამოიმუშავებს, მათ შორის მეთანს და გოგირდწყალბადს. ზოგი ბაქტერია წარმოქმნის ვიტამინებს, მათ შორის არის ბიოტინი, ფოლიუმის მჟავა, ვიტამინი და რამდენიმე ჯგუფის ვიტამინი. ეს ვიტამინები სისხლში შეწოვის შემდეგ ავსებს ჩვენს რაციონში შემავალ ვიტამინებს.

ფეკალური ნარჩენი შეიცავს ბაქტერიების მთელ მასას, ისევე როგორც ცელულოზას და მოუნელებელ ნაერთებს.

თუმცა, ცელულოზის მოლეკულებს ადამიანისთვის არანაირი კალორიული ღირებულება არ აქვს, მათი არსებობა მომწიფებელ არხში ეხმარება საკვების გადაადგილებას ტრაქტში.

მსხვილი ნაწლავი ბოლოში გადადის **სწორ ნაწლავში**, სადაც ფეკალური მასა ინახება ორგანიზმიდან გამოყოფამდე. სწორ ნაწლავსა და ანუსს შორის ორი სფინქტერია: უნებლიე და ნებითი. დღეში ერთხელ ან მეტჯერ, მსხვილი ნაწლავის ძლიერი შეკუმშვა წარმოქმნის დეფეკაციის აუცილებლობას.

აქ აღვწერეთ საჭმლის მონელება, როდესაც საკვები გადაადგილდება მომწიფებელი არხის ერთი ხერედიდან (პირიდან) მეორისკენ (ანუსისკენ). ამ თავის ბოლო ნაწილში ვნახავთ, როგორ ჩამოყალიბდა ცხოველების ესა თუ ის მომწიფებელი ადაპტაცია.

## კონცეფცია ცისცი 41.4

1. კოსმოსის უწონო გარემოში როგორ ახერხებს კოსმონავტის მიერ გადაყლაპული საკვები კუჭში ჩასვლას?
2. აღწერეთ გასტრალური წვენის მარილმჟავას ორი მნიშვნელოვანი ფუნქცია მონელებაში.
3. რომელი ნივთიერებები ერევა თორმეტგოჯა ნაწლავში საკვების მონელებისას?
4. როგორ არის შეგუებული წვრილი ნაწლავის ეპითელიუმი შეწოვის პროცესთან?
5. ახსენით, ანტიბიოტიკებით ინფექციის ქრონიკული მკურნალობა რატომ იწვევს ვიტამინ -ს დეფიციტს.
6. სურათი 41.22 გადახედვის შემდეგ ახსენით, როგორ არეგულირებს პანკრეასი მისი მომწიფებელი წვენის გამოყოფას, რათა მოახდინოს ნაწილობრივ მონელებულ საკვებთან მისი შერევა თორმეტგოჯა ნაწლავში.

## კონცეფცია 41.5

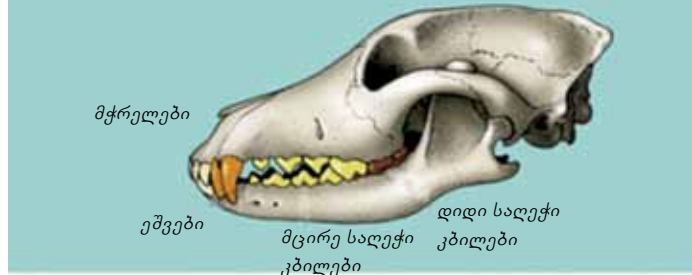
### სქესმლიანთა მომწიფებელი სისტემის ევოლუცია ხშირ შემთხვევაში საკვების თვისებებთან შეგუებას წაბმადგნს

ძუძუმწოვრებისა და სხვა ხერხემლიანების მომწიფებელი სისტემის აგებულება და ფუნქციონირება საერთო წინაპრის გეგმის სახესხვაობებია. არსებობს ბევრი საინტერესო ადაპტაცია, რაც ხშირად ცხოველის საკვებ რაციონთანაა დაკავშირებული. მათგან მხოლოდ რამდენიმეს განვიხილავთ..

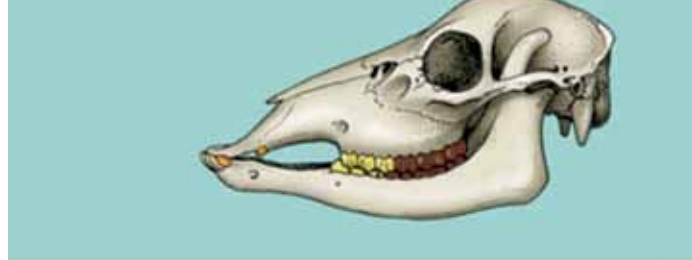
### ბამდინიშ ადაპტაცია

კბილების მრავალფეროვნება საკვებ რაციონთან ადაპტაციის ერთ-ერთი მაგალითია. კერძოდ, ძუძუმწოვრებში

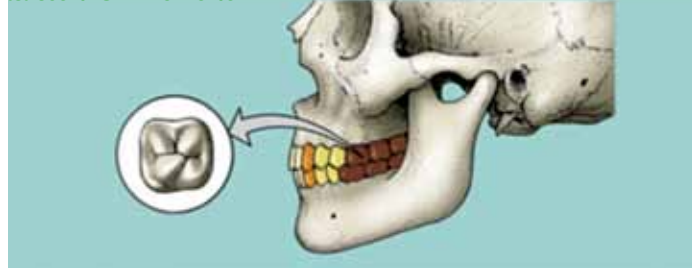
(ა) მტაცებლები



(ბ) ბალახისმჭამელები



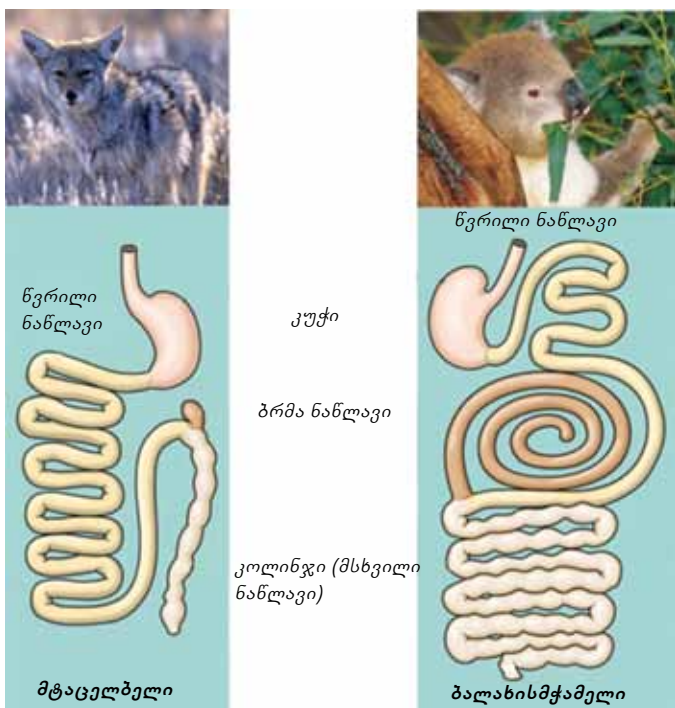
(გ) ყველაფრისმჭამელები



▲ **სურათი 41.26 კბილების წყობა და კვების რაციონი.** (ა) მტაცებლებს, როგორც არის ძალისებრთა და კატისებრთა ოჯახის წარმომადგენლები, ჩვეულებრივ აქვთ მჭრელი კბილები და ეშვები, რითაც მსხვერპლს იჭერენ და ხორცს ნაჭრებად გლეჯენ. მცირე და დიდი საღეჭი კბილები ჭყლეტენ და აქუცმაცებენ საკვებს. (ბ) ბალახისმჭამელ ძუძუმწოვრებს, როგორც არის ცხენი და ირემი, ჩვეულებრივ ბორცვიანი ფართო კბილები აქვთ, რომლითაც მცენარეულ მასალას ამუშავებენ. მჭრელები და ეშვები მოდიფიცირებულია ისე, რომ მცენარეების მოსაკბენად უფრო ეფექტური იყოს. ზოგ ჰერბივორ ძუძუმწოვარს ეშვი საერთოდ არ აქვს. (გ) ადამიანებს, რომლებიც ყველაფრისმჭამელებს სგანეკუთვნებიან და მცენარეული და ცხოველური საკვებით იკვებებიან, შედარებით ნაკლებადსპეციალიზირებული კბილების წყობა აქვთ. მუდმივი (ზრდასრულის) კბილების რაოდენობა 32. ზედა და ქვედა ყბის შუიდან არის ორი მჭრელი კბილი საკბეჩად, ორი ეშვი დასაფლეთად, ორი მცირე და სამი დიდი საღეჭი კბილი ლეჭვისთვის.

სხვადასხვა სახის საკვების დამუშავებასთან კბილების ადაპტაცია იმის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მიზეზია, რომ ძუძუმწოვრების კლასი ევოლუციური კუთხით ძალიან წარმატებულია. შეადარეთ კარნივორების, ჰერბივორებისა და ომნივორების კბილები **სურათში 41.26**. არაძუძუმწოვარ ხერხემლიანებს, ჩვეულებრივ, აქვთ ნაკლებად სპეციალიზებული კბილები, მაგრამ არსებობს საინტერესო გამონაკლისები.

მაგალითად, შხამიან გველებს, როგორცაა ჩხრიალა გველი, აქვს შხამიანი კბილი (მოდიფიცირებული კბილები), რომელიც მსხვერპლში შხამს უშვებს. ზოგი კბილი შპრიცის



▲ **სურათი 41.27 მტაცების (კოიოტი) და ბალახისმჭამელების (კოალა) მომწელებელი ტრაქტის შედარება.** მიუხედავად იმისა, რომ ეს ორი ძუძუმწოვარი დაახლოებით ერთი ზომისაა, კოალას ნაწლავი გაცილებით უფრო გრძელია, ადაპტაცია, რომელიც აძლიერებს ფიბროზული ევკალიპტის ფოთლების დამუშავებას, რომლითაც ის თითქმის მთლიანად საკვებსა და წყალს იღებს. ძლიერი ლეჭვა კეპავს ფოთლებს პატარა ნაჭრებად და ზრდის საკვების შეხებას მომწელებელ წვეწვანთან. კოალას ბრმანაწლავი 2მ მისი შესაბამისი ზომის ცხოველებში ყველაზე გრძელია და მოქმედებს, როგორც ფრაგმენტაციის კამერა, სადაც სიმბიოზური ბაქტერიები გარდაქმნიან დაკეპილ ფოთლებს უკეთეს საკვებად.

მსგავსად ცარიელია, სხვებში კი შხამი კბილის ზედაპირზე არსებულ ნაჭდევებშია ჩასხმული. ყველა გველს აქვს სხვა მნიშვნელოვანი ანატომიური ადაპტაცია, რაც კვებასთან არის დაკავშირებული: ისინი მსხვერპლს დალეჭვის გარეშე მთლიანად ყლაპავენ. მათი ქვედა ყბა ელასტიური იოგით დაკავშირებულია ქალასთან, რაც საშუალებას იძლევა, რაც შეიძლება ფართოდ გაიღოს პირი და გადაიყლაპოს დიდი ზომის მსხვერპლი (კიდევ ერთხელ გახდით გასაოცარი ეპიზოდის მოწმე, რომელიც **სურათი 41.2**-ზეა ჩანერილი).

## კუჭისა და ნაწლავების ადაპტაციები

კარნივორებს, რომლებსაც საჭმლის მიღების შორის შეიძლება გრძელი ინტერვალები ჰქონდეთ, ჩვეულებრივ, დიდი და ჭიმვადი კუჭი აქვთ. მაგალითად, 200კგ აფრიკულ ლომს

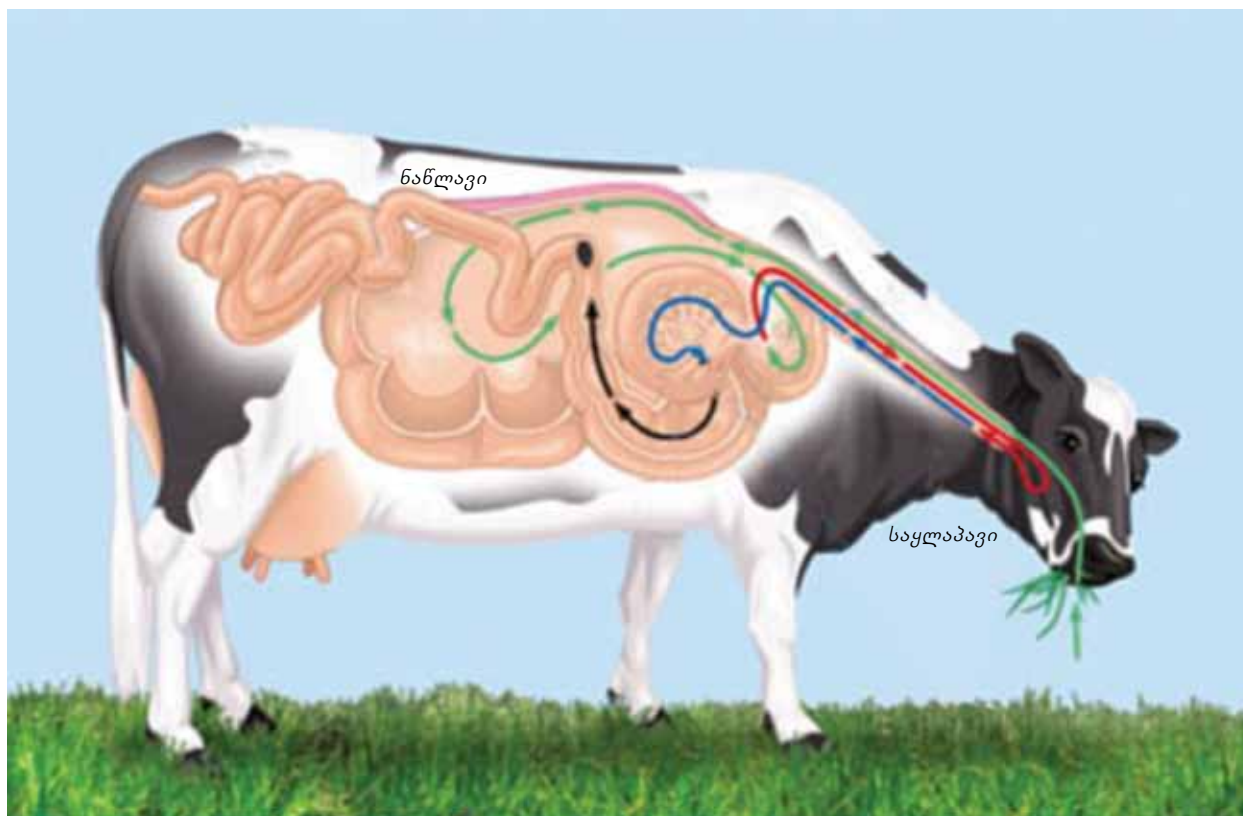
შუძლია ერთ ჭამაზე მიირთვას 40კგ ხორცი.

მომწელებელი სისტემის სიგრძე ასევე კვების რაციონს შეესაბამება. ჩვეულებრივ, ჰერბივორებსა და ომნივორებს თავიანთ სხეულთან შედარებით უფრო გრძელი მომწელებელი არხი აქვთ, ვიდრე კარნივორებს (**სურ. 41.27**). მცენარეული საკვები უფრო რთული მოსანელებელია, რამდენადაც ის უჯრედის კედელს შეიცავს. გრძელი ტრაქტის გამო, მომწელების დროც უფრო დიდია და საკვები ნივთიერებების შეწოვის ფართობიც.

## სიმბიოზური ადაპტაციები

ჰერბივორებს აქვთ სერიოზული კვებითი გამოწვევა: მათ რაციონში ქიმიური ენერგიის უმეტესი წილი მოდის მცენარის უჯრედის კედლის ცელულოზაზე, მაგრამ ცხოველი არ წარმოქმნის ცელულოზის დამშლელ ფერმენტებს. ბევრი ხერხემლიანი ამ პრობლემას სიმბიოზური ბაქტერიებისა და უმარტივესების საშუალებით ჭრის. ისინი ხერხემლიანი ორგანიზმების მომწელებელი არხის ფერმენტულ კომპარტმენტებში სახლდება. ამ მიკროორგანიზმებს აქვს ცელულოზის მარტივ შაქრებად და სხვა ნაერთებად დამშლელი ფერმენტები. დაშლის პროდუქტებს ცხოველი ადვილად შეიწოვს. ბევრ შემთხვევაში, მიკროორგანიზმებს შეუძლია გამოიყენოს ცელულოზიდან მიღებული შაქრები მინერალებთან ერთად ცხოველისთვის აუცილებელი საკვები ნივთიერებების წარმოსაქმნელად, მაგალითად, ვიტამინების და ამინომჟავების.

სიმბიოზური მიკრობების მდებარეობა მომწელებელ არხში სხვადასხვა ჰერბივორებში განსხვავდება. ბევრი ჰერბივორი ძუძუმწოვარი, მათ შორის ცხენი, სიმბიოზურ ორგანიზმებს მსხვილი და წვრილი ნაწლავის შეერთების ადგილას გრძელ ბრმანაწლავში ასახლებს. კურდღლებისა და ზოგი მღრღნელის ბაქტერიები მსხვილ ნაწლავსა და ბრმანაწლავში ბინადრობს. აესტრალიურ კოალასაც გრძელი ბრმანაწლავი აქვს, სადაც სიმბიოზური ბაქტერიების მიერ გამოთქმული ფერმენტები საბოლოოდ იწელებს ევკალიპტის ფოთლებს (**სურ. 41.27**). ყველაზე მნიშვნელოვანი ადაპტაცია ჰერბივორების რაციონისთვის გვხვდება ცხოველებში, რომელთაც მცოხნელებს უწოდებენ. მათ მიეკუთვნება ირემი, რქოსანი საქონელი, ცხვარი (**სურ. 41.28**). შემდეგ თავში ვნახავთ, რომ საკვების მიღება, მისი მონელება და საკვები ნივთიერებების შეწოვა ორგანიზმის კოორდინირებული აქტივობის ნაწილია, რომელიც აგრეთვე გულისხმობს საკვების გადანაწილებას სხეულში და აირთა მიმოცვლას გარემოსთან.



**1 ფაქტი.** სურათზე გამოხატული ძროხა ღეჭავს და ყლაპავს ბალახის კონას. ბალახის ბურთულა თავდაპირველად ფაშვში ხვდება (მწვანე ისრები).

**2 ბადურა.** ზოგი ბურთულა ბადურაში ხვდება. ფაშვშიც და ბადურაშიც სიმბიოტური პროკარიოტები და უმარტივესები (ძირითადად წამწამიანები) ამუშავებენ ცელულოზით მდიდარ საკვებს. მიკროორგანიზმების ცხოველქმედების გვერდითი პროდუქტია ცხიმოვანი მჟავები. ძროხა პერიოდულად ამოანთხევს და ხელმეორედ ღეჭავს (ცოხნის) ბალახს (წითელი ისრები), რის შედეგად ბალახის ბოჭკოები უფრო იშლება და მიკრობებს უადვილდება მისი შემდგომი დამუშავება.

**3 წიგნარა.** ძროხა ყლაპავს ხელმეორედ დაღეჭილ მასას (ლურჯი ისრები), რომელიც ამჯერად წიგნარაში ხვდება, სადაც წყლისგან თავისუფლდება.

**4 მაჭიკი.** მიკროორგანიზმებით მდიდარი ბალახის მასა, საბოლოოდ მაჭიკში გადადის, სადაც გრძელდება მისი მონელება ძროხის საკუთარი ფერმენტების საშუალებით.

▲ **სურათი 41.28 მცოხნელის საჭმლის მონელება.** მცოხნელის კუჭი ოთხი კამერისგან შედგება. კამერებში არსებული მიკრობების ცხოველმოქმედების შედეგად, მცოხნელის რაციონი გაცილებით უფრო მდიდარეია საკვები ნივთიერებებით, ვიდრე ბალახი, რომელსაც ის ჭამს. სინამდვილეში ბალახით, ან თივით მკვებავი მცოხნელი საკვები ნივთიერებების უმეტეს ნაწილს სიმბიოტური მიკრობების მიერ საკვების დამუშავების შედეგად იღებს. მიკრობები ფაშვში საკმაოდ სწრაფად მრავლდებიან, რაც მათი რაოდენობის შენარჩუნებას ხელს უწყობს.

## მიბითადი კანცელაციის მაღალი მინიჭება

ცხოველების კვების რაციონმა უნდა უზრუნველყოს ქიმიური ენერგია, ელემენტარული ორგანული მასალა და აუცილებელი საკვები ნივთიერებები. პერბივორები, ძირითადად, მცენარეებს ჭამენ, კარნივორები – ცხოველებს, ხოლო ომნივორები – ცხოველებსა და მცენარეებს. ბევრი წყლის ცხოველი წყალში სუსპენზიის სახით არსებული მცირე ნაწილაკებით იკვებება. სუბსტრატით მკვებავები გადიან საკვებში და გზადაგზა ჭამენ. სითხით მკვებავები წოვენ საკვები ნივთიერებებით მდიდარ სითხეებს ცოცხალი მასპინძლის ორგანიზმიდან. ბევრი ცხოველი მასიური საკვებით იკვებება და საჭმლის დიდ ნაჭრებს მიირთმევს.

## კანცელაცია 41.1

### ჰომეოსტაზის მექანიზმები აკონტროლებს ნივთიერებათა ცვლის ენერგიის ბალანსს

- ▶ **გლუკოზის რეგულაცია ჰომეოსტაზის მაგალითია.** ცხოველი ჭარბ კალორიებს გლიკოგენის და ცხიმის სახით ინახავს. გლიკოგენი მარაგდება ღვიძლში და კუნთებში. ენერგიის მარაგი საჭმლის დეფიციტის დროს გამოიყენება. სისხლში გლუკოზის დონე შენარჩუნებულია შედარებით ვიწრო ფარგლებში უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმით.
- ▶ **კალორიული დისბალანსი** არასაკმარისად გამოკვებილი ცხოველი კვებისას ნაკლებ კალორიებს იღებს, ვიდრე საჭიროა. ზედმეტად გამოკვებილი კი, უფრო მეტ კალორიებს იღებს, ვიდრე საჭიროა. სიმსუქნე მთელ მსოფლიოში ჯანმრთელობის სერიოზული პრობლემაა, განსაკუთრებით კი აშშ-ში, სადაც ფიზიკური ვარჯიშის ნაკლებობა და ცხიმოვანი საკვები არაჯანსაღ კომბინაციას ქმნიან. სიმსუქნეზე ძლიერ გავლენას გენებიც ახდენს. ჯანსაღი წონის შენარჩუნების პრობლემა გარკვეულად დაკავშირებულია ევოლუციურ წარსულთან, როდესაც ცხიმის დაგროვება გადარჩენისთვის აუცილებელი იყო.

## კანცელაცია 41.2

### ცხიდან დიეტამ ორგანიზმი უნდა უზრუნველყოს აუცილებელი საკვებით და ნახშირბადის შემცველი ორგანული მონომერებით

ნახშირბადის მონომერები ბიოსინთეზისთვის არის საჭირო. აუცილებელი საკვები ნივთიერებები ცხოველმა უნდა

მიიღოს სინთეზირებული ფორმით. ცუდად გამოკვებილი ცხოველის საჭმელს აკლია ერთი ან რამდენიმე აუცილებელი საკვები ნივთიერება. დღესდღეობით ადამიანებში ცუდად გამოკვებილი მდგომარეობა უფრო ხშირია, ვიდრე არასაკმარისად გამოკვებილი.

- ▶ **აუცილებელი ამინომჟავები.** ცხოველს სჭირდება 20 ტიპის ამინომჟავა. ამათგან 12 ამინომჟავას თვითონ შეუძლია სინთეზირება სხვა მოლეკულებიდან. აუცილებელია ის ამინომჟავები, რომელთა სინთეზირებაც ცხოველებს არ შეუძლია. ცხოველი, რომლის საკვები არ შეიცავს ერთ ან მეტ აუცილებელ ამინომჟავას, ცუდად კვებადია და ცილოვანი შიმშილი უვითარდება.
- ▶ **აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავები.** აუცილებელია ცხიმოვანი მჟავები, რომელთა სინთეზირება ცხოველებს არ შეუძლია. ესენია უჯერი მჟავები. აუცილებელი ცხიმოვანი მჟავების დეფიციტი იშვიათია.
- ▶ **ვიტამინები.** ვიტამინები ორგანული მოლეკულებია, რომლებიც მცირე რაოდენობით არის საჭირო. განარჩევენ ორი ტიპის ვიტამინებს: წყალში ან ცხიმში ხსნადს.
- ▶ **მინერალები.** მინერალები არაორგანული საკვები ნივთიერებებია. მათზე ცხოველის დღიური მოთხოვნა, ჩვეულებრივ, მცირეა.

## კანცელაცია 41.3

### საკვების გადამუშავების მთავარი სტადიები: მიღება, მონღოება, შეწოვა და გამოყოფა

- ▶ ცხოველებში საკვების გადამუშავება მოიცავს საკვების მიღებას (ჭამის აქტს), მონღელებას (საკვებში არსებული მაკრომოლეკულების ფერმენტულ დაშლას მონომერებამდე), შეწოვას (სხეულის მიერ საკვები ნივთიერებების შეთვისებას) და გამოყოფას (ფეკალური მასის სახით მოუწელებელი მასალის გარეთ გამოყოფა).
- ▶ **მომწელებელი განყოფილებები.** უჯრედშიდა მონღელების დროს საკვები ნაწილაკები გადაიყლაპება ენდოციტოზის გზით და მომწელებელი ვაკუოლების შიგნით მონღელება. ცხოველთა უმეტესობა უჯრედგარე მონღელებას იყენებს, რაც გულისხმობს ფერმენტულ ჰიდროლიზს საჭმლის მომწელებელი არხის ან ღრუს უჯრედგარე სივრცეში.

## კონცეფცია 41.4

### ბუბუქმწოვართა საჭმლის მომწოდებელ სისტემაში ყველა ორგანოს მისთვის დამასასიათებელი ფუნქცია აკისრია

- ▶ ძუძუმწოვრების მომწოდებელი სისტემა შედგება მომწოდებელი არხისა და ეგზოკრინული ჯირკვლებისგან, რომლებიც არხში მომწოდებელ წვენებს გამოყოფს.
- ▶ **პირის ღრუ, ხახა და საყლაპავი.** საკვების მონელება იწყება პირის ღრუში, სადაც კბილები საკვებს უფრო მცირე ნაწილებად ლეჭავს, რომლებზეც ნერწყვის ამილაზა მოქმედებს. ამილაზა გლუკოზის პოლიმერების დაშლას იწყებს. საყლაპავი პერისტალტიკის გზით საკვებს კუჭისკენ ატარებს.
- ▶ **კუჭი.** კუჭი ინახავს საკვებს და გამოყოფს კუჭის წვენს, რომელიც გარდაქმნის საკვებს მჟავე ქიმუსად. კუჭის წვენი შეიცავს მარილმჟავას და პეპსინს.
- ▶ **წვრილი ნაწლავი.** წვრილი ნაწლავი მონელებისა და შეწოვის მთავარი ორგანოა. კუჭიდან გადმოსული მჟავე ქიმუსი თორმეტგოჯა ნაწლავში ერევა ნაწლავის წვენს, ნალველს და პანკრეასის წვენს. სხვადასხვა ფერმენტი საკვებ მასალას მონომერებამდე შლის, რომლებიც შეიწოვება სისხლში წვრილი ნაწლავის კედლის გავლით. მომწოდებელი წვენების გამოყოფა ჰორმონებით რეგულირდება
- ▶ **მსხვილი ნაწლავი.** მსხვილი ნაწლავი ეხმარება წვრილ ნაწლავს წყლის რეაბსორბციაში. იქ ბინადრობს ბაქტერიები, რომლებიც ვიტამინებს ასენთიზირებს. ფეკალური მასა გაივლის სწორ ნაწლავს და გარეთ ანალური ხვრელით გამოდის.

## კონცეფცია 41.5

### სქტსემლიანთა მომწოდებელი სისტემის ფუნქცია ხშირ შემთხვევაში საკვების თვისებებთან შეგუებას წაბმადგენს

- ▶ **კბილების ადაპტაციები.** ძუძუმწოვართა კბილების მრავალფეროვნება ჩვეულებრივ დაკავშირებულია მის კვების რაციონთან. კერძოდ, ძუძუმწოვრებს ისეთი კბილები აქვთ, რომლებიც მათი საკვების საუკეთესოდ დამუშავებას უზრუნველყოფს.
- ▶ **კუჭისა და ნაწლავის ადაპტაციები.** ჰერბივორებს აქვთ უფრო გრძელი მომწოდებელი არხი, ვიდრე კარნივორებს, რადგან მცენარეული საკვების მონელება უფრო რთულია.
- ▶ **სიმბიოზური ადაპტაციები.** ბევრ ჰერბივორს აქვს მომწოდებელი განყოფილებები, რომლებშიც მობინადრე ბაქტერიები ახორციელებს ცელულოზის მონელებას.

## შეამტმეთ საკუთარი ცოდნა

### თვითშეტასმა

1. ქვემოთ ჩამოთვლილი ცხოველებიდან, რომელი არ არის სწორედ დაწყვილებული მის კვების მექანიზმთან?
  - ა. ლომი – სუბსტრატის მჭამელი;
  - ბ. ვეშაპი – სუსპენზიის მჭამელი;
  - გ. მცენარის ბუგრი – სითხის მჭამელი;
  - დ. მიწის ჭია – დეპოზიტის მჭამელი;
  - ე. გველი – დიდი მოცულობის საკვების მჭამელი;
2. თუ თქვენ ლანჩის შემდეგ რამდენიმე საათში ირბენთ, რომელ დაგროვილ სანვავს დახარჯავთ?
  - ა. კუნთის ცილას;
  - ბ. კუნთისა და ღვიძლის გლიკოგენს;
  - გ. ღვიძლში შენახულ ცხიმს;
  - დ. ცხიმოვან ქსოვილში შენახულ ცხიმს;
  - ე. სისხლის ცილებს;
3. ის ინდივიდები, რომელთა საკვებიც ძირითადად მარცვლეულია შესაძლოა გახდნენ;
  - ა. მსუქნები;
  - ბ. ანორექსიულები;
  - გ. ზედმეტად გამოკვებილები;
  - დ. კარგად გამოუკვებავები;
  - ე. ცუდად გამოკვებილები;
4. ძუძუმწოვრების ტრაქეა და საყლაპავი ერთად იხსნება:
  - ა. მსხვილ ნაწლავში; ბ. კუჭში;
  - გ. ხახაში; დ. სწორ ნაწლავში;
  - ე. სასაში;
5. ჩამოთვლილ ფერმენტთაგან, რომელს აქვს ყველაზე დაბალი ოპტიმალური pH?
  - ა. ნერწყვის ამილაზას;
  - ბ. ტრიპსინს;
  - გ. პეპსინს;
  - დ. პანკრეასულ ამილაზას;
  - ე. პანკრეასულ ლიპაზას;
6. ჩამოთვლილი ორგანოებიდან, რომელი არის არასწორედ დაწყვილებული თავის ფუნქციასთან?
  - ა. კუჭი – ცილების მონელება;
  - ბ. პირის ღრუ – სახამებლის მონელება;
  - გ. მსხვილი ნაწლავი – ნალვლის წარმოქმნა;
  - დ. წვრილი ნაწლავი – საკვების შთანთქმა;
  - ე. პანკრეასი – ფერმენტების წარმოქმნა;
7. რომელი ჩამოთვლილი ფუნქცია აკისრია ნაწლავურ ეპითელიუმთან დაკავშირებულ ენტეროკეპტიდაზას?
  - ა. ამცირებს ნალვლის წარმოქმნას;
  - ბ. აკავებს თორმეტგოჯას სეკრეციას;

- გ. ააქტივებს პანკრეასის ფერმენტებს;
- დ. აკავებს კუჭის პერისტალტიკას;
- ე. ზრდის ქიმუსის pH;

8. ინფიცირებული ნაღვლის ბუშტის ქირურგიული მოცილების შემდეგ ადამიანმა განსაკუთრებით ფრთხილად უნდა შეზღუდოს შემდეგი სახის საკვების მიღება:
  - ა. სახამებელი;                      ბ. ცილები;
  - გ. შაქარი;                              დ. ცხიმო;
  - ე. წყალი;
9. ჩვენი პირის ღრუ, თავისი კბილების წყობით, მიწის ჭიის რომელი ორგანოს ანალოგია:
  - ა. ნაწლავის;                              ბ. ხახის;
  - გ. მეორე კუჭის;                      დ. კუჭის;
  - ე. ანუსის;
10. რომელი ჩამოთვლილი ორგანოს განსაკუთრებულ უბნებში ბინადრობენ მცოხნელების სიმბიოზური მიკრობები, რომლებიც კვებაში ეხმარებიან?
  - ა. მსხვილი ნაწლავის;
  - ბ. ღვიძლის;
  - გ. წვრილი ნაწლავის;
  - დ. ხახის;
  - ე. კუჭის;

### უმაღლესი კავშირი

ადამიანის საცლაპავსა და ტრაქეას აქვს საერთო შესასვლელი, რომელიც პირისა და ცხვირის ღრუებს უკავშირდება, ის ზოგჯერ დახრჩობის მიზეზია. 34-ე თავში ხერხემლიანთა ევოლუციის გადახედვის შემდეგ, ახსენით ამ არასრულყოფილი ანატომიის ევოლუციური საფუძველი.

### მეცნიერული კვლევა

შექმენით კონტროლირებული ექსპერიმენტი, რომ გამოიკვლიოთ ჰიპოთეზა, რომლის მიხედვითაც, ადამიანის ნერწყვის ამილაზა სახამებელს უფრო ჩქარა შლის 37 გრადუსზე (ადამიანის სხეულის ტემპერატურაზე), ვიდრე 20 გრადუსზე (დაახლოებით ოთახის ტემპერატურაზე), ან 43 გრადუსზე (110°F). თქვენი მასალა არის მხოლოდ და მხოლოდ ნერწყვი, დისტილირებული წყალი, სახამებელი, იოდი, რომელიც სახამებელს მუქ იისფრად ღებავს, მენზურები და მუდმივ ტემპერატურაზე შენარჩუნების უნარის მქონე ლაბორატორიული აგზები. როგორ ახსნიდით შედეგებს, თუ a. ფერმენტების მოქმედების სიჩქარე ყველაზე მაღალი 37 გრადუსზე იქნებოდა, ან b. თუ ფერმენტების აქტივობა ყველაზე მაღალი 43 გრადუსზე იქნებოდა?

### მეცნიერება, ფიქნოლოგია და საზოგადოება

მედია საშუალებები ბევრს მსჯელობენ ამა თუ იმ საკვების სარგებლიანობასა თუ უსარგებლობაზე. მხოლოდ რამდენიმე მაგალითი არის ვიტამინების დოზირების კონცეფცია, ამა თუ იმ მოლეკულის შემცველობის მქონე საკვების მიმოხილვა. დიდი განხილვა მიდის ნახშირწყლებით ღარიბი დიეტის შესახებ და რეკლამები უკეთდება ახალ პროდუქტებს, როგორცაა ქოლესტერინის დამწვევი მარგარინი, მედიით მოწოდებული ინფორმაციის მაგალითზე თქვენ შეცვალეთ კვების სტილი? რატომ კი ან არა? როგორ შეიძლება შეაფასოს ადამიანმა აღნიშნული ტიპის ინფორმაცია საკვებთან მიმართებაში მართებულია თუ არა?

# 42

## სისხლის მიმოძღვის სისცემა და აირთა ცვლა



▲ სურათი 42.1 ორგანოს ლაყურები, რომელიც სისხლსა და გარემოს შორის აირთა მიმოცვლას უზრუნველყოფს.

### ბიოთაღი კონცეფციები

- 42.1.** სისხლის მიმოქცევის სისტემა ფილოგენეზს ასახავს
- 42.2.** ძუძუმწოვრების სისხლის მიმოქცევის ორი წრე დამოკიდებულია გულის ანატომიასა და მოქმედების ციკლზე
- 42.3.** სისხლის მიმოქცევას ფიზიკური კანონები მართავენ
- 42.4.** სისხლი არის შემაერთებელი ქსოვილი პლაზმაში განლაგებული უჯრედებით
- 42.5.** აირთა ცვლა განსაკუთრებულ სუნთქვით ზედაპირებზე ხორციელდება
- 42.6.** სუნთქვის დროს ადგილი აქვს ფილტვების ვენტილაციას
- 42.7.** სისხლის სუნთქვის პიგმენტებს აირთა დაკავშირებისა და ტრანსპორტის ფუნქცია აკისრიათ

### შესავალი

### უტოიქტომბა გატემოსთან

გარემოსთან ენერგიისა და ნივთიერებათა ცვლა ყველა ორგანიზმს სჭირდება. აღნიშნული ცვლა საბოლოოდ უჯრედულ დონეზე ვლინდება. უჯრედები თხევად გარემოში ცოცხლობენ. მათთვის საჭირო რესურსები, როგორიცაა საკვები ნივთიერებები და ჟანგბადი, პლაზმური მემბრანის გავლით ციტოპლაზმაში ხვდება. იგივე გზით მეტაბოლიზმის ნარჩენები (მაგალითად, ნახშირორჟანგი) გარეთ გამოდის.

ერთუჯრედიან ორგანიზმებში ასეთი გაცვლა უშუალოდ გარეგან გარემოსთან მიმდინარეობს. მრავალუჯრედიანი ორგანიზმების უჯრედთა უმეტესობასთვის გარეგან გარემოსთან უშუალო მიმოცვლა შეუძლებელია. ამის გამო, ევოლუციურად ჩამოყალიბდა გადატანისა და მიმოცვლაზე სპეციალიზებული ფიზიოლოგიური სისტემები.

ორგანული ლაყურები (სურ. 42.1) გარეგანი გარემოსთვის დიდზედაპირიან არეს წარმოადგენს. უმცირესი სისხლძარღვების (კაპილარების) ქსელები ლაყურების გარე ზედაპირთან ახლოს

მდებარეობს. გარემომცველ წყალში გახსნილი ჟანგბადი დიფუზიით გადის ლაყურების მფარავ თხელ ეპითელიუმში და გადადის სისხლში. იმავდროულად, ნახშირორჟანგი გარეთ, წყალში დიფუნდირდება.

ორგანულსა და სხვა ცხოველების უმეტესობას გარემოსთან ნივთიერებათა მიმოცვლის სპეციალური სისტემები გააჩნიათ. თითქმის ყველას აქვს შინაგანი სატრანსპორტო სისტემები, რომელსაც სითხეები (სისხლი ან უჯრედშორისი სითხე) სხეულში გადააქვს (იხ. სურ. 40.4).

ამ თავში შევისწავლით ცხოველთა შინაგანი ტრანსპორტის მექანიზმებს. ასევე გამოვიკვლიეთ ცხოველსა და მის გარემოს შორის ქიმიური გადატანის მთავარ მაგალითს: აირთა ცვლას (ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის), რომელიც წარმოადგენს უჯრედული სუნთქვისა და ბიოენერგეტიკის ცენტრალურ პროცესს.

### კონცეფცია 42.1

### სისხლის მიმოძღვის სისცემა ფილოგენეზს ასახავს

დიფუზია დიდ მანძილზე არაეფექტური სატრანსპორტო საშუალებაა. მაგალითად, მანძილზე, რომელსაც ფარავს გლუკოზა მომწელებელი ტრაქტიდან ან ჟანგბადი ფილტვებიდან ტვინში მოსახვედრად ძუძუმწოვრებში. დიფუზია რამდენიმე მმ-ზე უფრო დიდ მანძილზე არაეფექტურია, რამდენადაც დრო, რომელიც ნივთიერებას ერთი ადგილიდან მეორეზე დიფუზიისთვის სჭირდება, დისტანციის კვადრატის პროპორციულია. მაგალითად, თუ გლუკოზის მოცემულ რაოდენობას 1წმ სჭირდება 100 მკმ მანძილის გავლისთვის, 100 წმ დასჭირდება 1მმ-სთვის და თითქმის 3სთ 1 სმ-სთვის. სისხლის მიმოქცევის სისტემა ამ პრობლემას წყვეტს, უზრუნველყოფს, რომ არც ერთ ნივთიერებას უჯრედში შესვლისთვის ან იქიდან გამოსასვლელად არ უწევს დიდ მანძილზე დიფუზია. სითხის სწრაფად გადატანით სხეულში სისხლის მიმოქცევის სისტემა ფუნქციურად აკავშირებს სხეულის თხევად გარემოს იმ ორგანოებთან, რომლებშიც ხდება აირთა ცვლა, საკვები ნივთიერებების აბსორბცია ან ნივთიერებების გამოყოფა. ძუძუმწოვრების ფილტვებში ჩასუნთქული ჰაერის ჟანგბადი თხელი ეპითელიუმის გავლით სისხლში გადადის. ნახშირორჟანგი კი საპირისპირო მიმართულებით დიფუნდირდება. გულის (როგორც ტუმბოს) მოქმედებით სხეულის ყველა ნაწილში

სწრაფად გადაადგილება ჟანგბადით მდიდარი სისხლი. როდესაც სისხლი გადის კაპილარებში, ნივთიერებები სისხლსა და უჯრედგარე ქსოვილურ სითხეს შორის გადაიტანება.

ცხოველთა უმეტეს ჯგუფში აირთა მიმოცვლა და შინაგანი ტრანსპორტი ფუნქციურადაა დაკავშირებული. ამ თავში განვიხილავთ სისხლის მიმოქცევისა და სუნთქვის სისტემებს. ასევე აღვნიშნავთ ამ ორი ორგანოთა სისტემის როლს ჰომეოსტაზში (**იხ. თავი 40**). თავდაპირველად განვიხილოთ მიმოქცევის სისტემა უხერხემლოებში.

## მიმოქცევა უხერხემლოებში

უხერხემლოთა სხეულის განსხვავებული ზომები და ფორმები შესაბამისობაშია მიმოქცევის სისტემის მრავალფეროვნებასთან. სხვადასხვა გარემოში არსებული განსხვავებული ბუნებრივი გადარჩევის წნევამ, უხერხემლოებში მიმოქცევის სისტემის სხვადასხვა ევოლუციური ცვლილება გამოიწვია.

### ნაწლავური ღრუ

ჰიდრასა და ნაწლავლრუიანებს სხეულის სიმარტივის გამო არ სჭირდებათ ნამდვილი მიმოქცევის სისტემა. ამ ცხოველებში სხეულის კედელი, რომელიც მხოლოდ ორი უჯრედული შრისგან შედგება, ნაწლავის ღრუს შემოფარგლავს. ნაწლავის ღრუ მონელებისა და სხეულში ნივთიერებათა გავრცელების ფუნქციას ასრულებს (**იხ. სურ. 41.13**).

ღრუს შიგნით მყოფი სითხე გარეთ არსებულ წყალს ერთი ხერხელით უკავშირდება. ასე რომ, ქსოვილის როგორც შიდა, ასევე გარეთა შრე სითხეშია მოთავსებული. ჰიდრას ნაწლავის ღრუ ცხოველის საცეცხეშიც შედის. ზოგ ნაწლავლრუიანში, მაგალითად მედუზაში, რთული ფორმის ნაწლავის ღრუს ეხვდებით (**სურ. 42.2**). რამდენადაც მონელება ღრუში იწყება, საკვებ ნივთიერებებთან უშუალო შეხება მხოლოდ შიდა შრის უჯრედებს აქვთ. აღნიშნულ საკვებ ნივთიერებებს გარეთა შრის მისალწევად მცირე დისტანციაზე უწევთ დიფუნდირება.

პლანარიებს და სხვა ბრტყელი ჭიების უმეტესობას ნაწლავის

ღრუ გააჩნიათ, რომელიც გარემოსთან ნივთიერებათა მიმოცვლას ერთი ხერხელით უზრუნველყოფს (**იხ. სურ. 33.10**). სხეულის ბრტყელი ფორმა და ორგანიზმის შიგნით ნაწლავის განშტოებები უზრუნველყოფს იმას, რომ ყველა უჯრედი თხევად გარემოშია მოთავსებული და სადიფუზიო დისტანციაც მოკლეა.

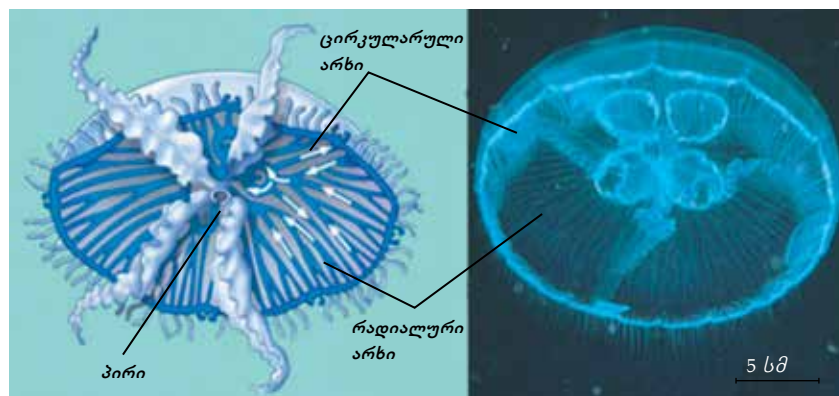
## მიმოქცევის ღია და დახურული სისტემები

ცხოველებში, რომელთაც უჯრედების მრავალშრიანობა ახასიათებთ, შინაგანი ტრანსპორტისთვის ნაწლავის ღრუ საკმარისი არ არის. მათთან საკვები ნივთიერებებისა და აირთა მიმოცვლისთვის დიფუზიის მანძილი ძალიან დიდია. ასეთ ცხოველებში, ევოლუციის შედეგად, მიმოქცევის ორი ტიპის სისტემა განვითარდა: ღია და დახურული. ორივეს სამი ძირითადი კომპონენტი აქვს: მიმოქცევადი სითხე (**სისხლი**), მილების ჯგუფი (**სისხლძარღვები**), რომლებშიც სისხლი მოძრაობს და კუნთოვანი ტუმბო (**გული**). გულს სისხლის მიმოქცევა მოჰყავს მოქმედებაში, რისთვისაც იყენებს მეტაბოლიზმის ენერგიას. გული ქმნის სისხლის ჰიდროსტატიკურ წნევას. წნევის გრადიენტის საშუალებით სისხლი სისტემაში მოძრაობს და უკან გულში ბრუნდება. მიმოქცევის სისტემაში **სისხლის წნევა** მამოძრავებელი ძალაა.

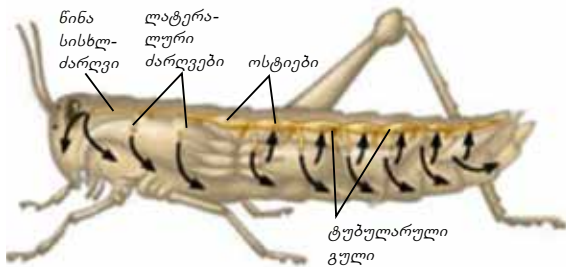
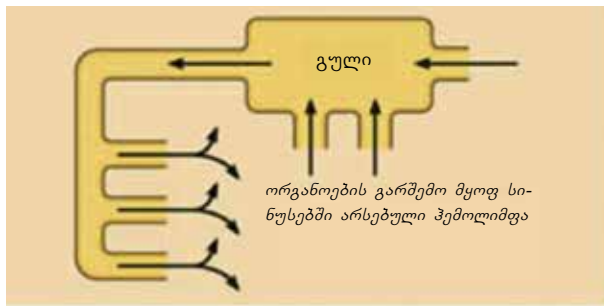
მწერებსა და სხვა ფეხსახსრიანებში, ასევე მოლუსკების უმეტესობაში სისხლი ორგანოებს უშუალოდ ერტყმის გარსს და ასე იქმნება სისხლის **მიმოქცევის ღია წრე** (**სურ. 42.3 ა**). სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის არავითარი განსხვავება არ არსებობს და ეს ერთიანი სითხე **ჰემოლიმფად** იწოდება. ერთი ან მეტი გული ტუმბავს ჰემოლიმფას ურთიერთდაკავშირებულ სისტემაში – **სინუსებში** – ორგანოების ირგვლივ არსებულ სივრცეებში. ჰემოლიმფასა და სხეულის უჯრედებს შორის ნივთიერებათა მიმოცვლა სწორედ აქ ხდება. მწერებსა და სხვა ფეხსახსრიანებში გული დორსალურად მოთავსებული გაგრძელებული მილია. გულის შეკუმშვისას, ჰემოლიმფა ძარღვების გავლით სინუსებში გადაიტუმბება. როდესაც გული დუნდება, ჰემოლიმფა სპეციალური ფორების საშუალებით, რომელთაც ოსტები ეწოდება, სისხლძარღვებისკენ მიიზიდება. სხეულის მოძრაობა, რომელიც სინუსების შევიწროებას იწვევს ჰემოლიმფის მოძრაობას უწყობს ხელს.

**მიმოქცევის დახურულ სისტემაში** სისხლი ძარღვებშია მოთავსებული და ქსოვილური სითხისგან განსხვავდება (**სურ. 42.3 ბ**). ერთი ან მეტი გული სისხლს ტუმბავს დიდ ძარღვებში, რომლებიც უფრო პატარა ძარღვებად იტოტება და ორგანოებში გადის. აქ ნივთიერებები დიფუზიის გზით მიმოიცვლება სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის, რომლებშიც უჯრედებია მოთავსებული. ჭიაყელებს, რვაფეხებსა და ყველა ხერხემლიანს სისხლის დახურული მიმოქცევის სისტემა აქვთ.

ის ფაქტი, რომ ღია და დახურული სისხლის მიმოქცევის სისტემა ფართოდ არის გავრცელებული ცხოველთა სამყაროში, იმაზე მიუთითებს, რომ ორივე მათგანს გარკვეული უპირატესობები აქვს. მაგალითად, ღია მიმოქცევის დროს უფრო დაბალი ჰიდროსტატიკური წნევა ენერგიის ნაკლებ ხარჯვასთან არის დაკავშირებული. უფრო მეტიც, რამდენადაც ამ შემთხვევაში ძარღვების ფართო სისტემა



▲ **სურათი 42.2** ნაწლავლრუიანების (აურელიას) შინაგანი ტრანსპორტი. ამ სურათზე ცხოველი ქვედა მხრიდან (ორალური ზედაპირიდან) ჩანს. პირი დაკავშირებულია ნაწლავის ღრუსთან, რომელიც ტოტებს ნარმოქმნის. არხის ამოფენი ნამწამოვანი უჯრედები სითხის ცირკულირებას ისრებით მინიშნებული მიმართულებით იწვევს.



(ა) მიმოქცევის ღია სისტემა. სისხლის მიმოქცევის ღია სისტემაში, მაგალითად როგორც ქრიჭინაში გვხვდება, ქსოვილური სითხე და სისხლი ერთი და იგივეა. ამ სითხეს პემოლიმფას უწოდებენ. გული ძარღვების გავლით სისხლს სინუსებში ტუმბავს, სადაც პემოლიმფასა და უჯრედებს შორის ნივთიერებათა ცვლა მიმდინარეობს. პემოლიმფა ოსტიების საშუალებით გულს უბრუნდება, რომელსაც სარქველები გააჩნია. აღნიშნული სარქველები გულის შეკუმშვისას იხურება.

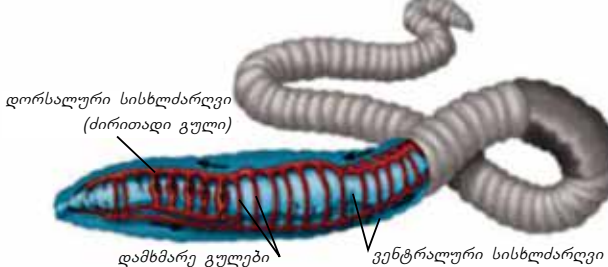
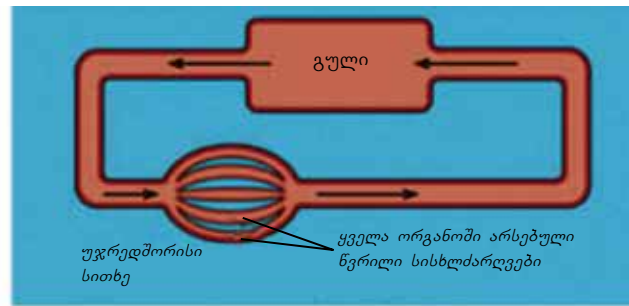
#### ▲ სურათი 42.3 მიმოქცევის ღია და დახურული სისტემები.

არ არსებობს, ღია სისტემების ჩამოყალიბებასა და შენახვისთვის ნაკლები ენერგია არის საჭირო. ზოგ უხერხემლოში ღია მიმოქცევის წრე სხვა ფუნქციებსაც ემსახურება, მაგალითად, მოლუსკებში და წყლის ფეხსახსრიანებში ღია მიმოქცევის სისტემა მუშაობს როგორც სხეულის საყრდენი ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი.

რა უპირატესობებია დაკავშირებული მიმოქცევის დახურულ სისტემასთან? დახურული სისტემები, მათში არსებული მაღალი წნევით, უფრო ეფექტურია ტრანსპორტირების თვალსაზრისით. ეს მნიშვნელოვანია დიდ მრავალუჯრედიან ორგანიზმებში მეტაბოლური მოთხოვნილებების დასაკმაყოფილებლად. მაგალითად, მოლუსკებში მხოლოდ დიდი ზომის რვაფეხებს და კალმარს აქვთ დახურული სისტემა. თუმცა, ყველა ფეხსახსრიანს ღია სისტემა აქვს, დიდი ზომის კიბოსნაირებს, როგორებიცაა ლობსტერები და კიბორჩხალები, უფრო უკეთ განვითარებული არტერიები, ვენები და დამატებითი ტუმბო ორგანოები გააჩნიათ, რაც სისხლის წნევის შენარჩუნებას ეხმარება. სისხლის დახურული მიმოქცევის სისტემა ყველაზე მაღალგანვითარებულია ხერხემლიანებში.

## ხერხემლიანთა სისხლის მიმოქცევის სისტემის მიმოხილვა

ადამიანსა და სხვა ხერხემლიანებს სისხლის მიმოქცევის დახურული სისტემა აქვთ, რომელსაც ხშირად **გულსისხლძარღვთა** სისტემას უწოდებენ. ჩვეულებრივ, ხერხემლიანთა გულს ერთი ან



(ბ) სისხლის მიმოქცევის დახურული წრე. სისხლის მიმოქცევის დახურულ წრეში სისხლის მოძრაობა მთლიანად ძარღვებში მიმდინარეობს და გამოყოფილია ქსოვილური სითხისგან. ნივთიერებათა ცვლა ხდება სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს და ქსოვილურ სითხესა და უჯრედებს შორის. ჭიაყელაში სამი მთავარი სისხლძარღვი უფრო პატარა ძარღვებად იტოტება, რომლებიც სხვადასხვა ორგანოს სისხლით ამარაგებს. დორსალური სისხლძარღვი ფუნქციონირებს როგორც მთავარი გული და პერისტალტიკით სისხლს წინა მიმართულებით ტუმბავს. ჭიაყელას წინა ბოლოსთან ახლოს, სისხლძარღვთა ხუთი წყვილი გარს ეკვრის მომწვანებელ არხს და მოქმედებს როგორც დამხმარე გული, რომელიც სისხლს ვენტრალური მიმართულებით აგზავნის.

ორი წინაგული და ერთი ან ორი პარკუჭი აქვს. პარკუჭები არის საცნები, საიდანაც სისხლი გულიდან გარეთ გამოიტუმბება.

**არტერიები, ვენები და კაპილარები** სამი ძირითადი ტიპის სისხლძარღვია, რომლის ჯამური სიგრძე ადამიანის სხეულში დაახლოებით 100,000 კმ-ია. არტერიებს სისხლი გულიდან გარეთ გამოაქვთ. ორგანოების შიგნით არტერიები კაპილარებად და მცირე ზომის არტერიოლებად იტოტება. არტერიოლები მცირე ძარღვებია, რომლებსაც სისხლი კაპილარებისკენ მიაქვთ.

კაპილარები ძალიან თხელი კედლის მქონე მიკროსკოპული ძარღვებია. ამ ძარღვების ქსელი, რომელსაც **კაპილარულ კონას** უწოდებენ, ყველა ქსოვილში შედის. კაპილარების თხელი კედლის გავლით ნივთიერებები, მათ შორის გახსნილი აირები, დიფუზიის გზით სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის მიმოიცვლება.

კაპილარები ბოლოში **ვენულებად** ერთიანდებიან, რომლებიც, თავის მხრივ, ვენებში გადადის. ზოგადად რომ ვთქვათ, ვენები სისხლს გულში აბრუნებენ. ყურადღება მიაქციეთ, რომ არტერიები და ვენები განსხვავდებიან მათში სისხლის მიმოქცევის მიმართულებით, და არა მათში მყოფი სისხლის მახასიათებლებით. ყველა არტერიას სისხლი გულიდან კაპილარებისკენ მიაქვს, ხოლო ვენებს კი კაპილარებიდან გულისკენ. მნიშვნელოვანი გამონაკლისი ღვიძლის კარის ვენაა, რომელსაც სისხლი მომწვანებელი სისტემის კაპილარების კონიდან ღვიძლის კაპილარულ კონაში მიაქვს. ღვიძლიდან გამოშვებული სისხლი ღვიძლის ვენაში შედის, რომელსაც სისხლი გულისკენ მიაქვს.

სხვადასხვა ხერხემალიანის ტაქსონომიური ერთეულების გულ-სისხლძარღვთა სისტემა ამ ზოგადი სქემის ვარიაციაა, რომელიც ბუნებრივი გადარჩევის შედეგად ჩამოყალიბდა. მეტაბოლიზმის სიჩქარე (იხ. თავი 40) გულსისხლძარღვთა სისტემის განვითარებაში მნიშვნელოვანი ფაქტორია. მაღალი მეტაბოლური სიჩქარის მქონე ცხოველებს, როგორც წესი, სისხლის მიმოქცევის უფრო რთული სისტემა და უფრო ძლიერი გული აქვთ, ვიდრე დაბალი მეტაბოლური სიჩქარის ცხოველებს.

ამის მსგავსად, ცხოველში სისხლძარღვების სირთულე და რაოდენობა ამა თუ იმ ორგანოში ორგანოს მეტაბოლური მოთხოვნილების შესაბამისია. სავარაუდოდ, ყველაზე მნიშვნელოვანი განსხვავებები გულსისხლძარღვთა ადაპტაციაში დაკავშირებულია ხმელეთის ცხოველების ფილტვებით და წყლის ცხოველების ლაყურებით სუნთქვასთან.

## თევზები

თევზების გულს ორი საკანი, ერთი წინაგული და ერთი პარკუჭი აქვს (სურ. 42.4). პარკუჭიდან გადმოტუმბული სისხლი ჯერ ლაყურებისკენ მიდის (ლაყურების მიმოქცევა), სადაც ის კაპილარების კედლის გავლით იღებს ჟანგბადს და გამოყოფს ნახშირორჟანგს. ლაყურების კაპილარები ერთიანდება ძარღვებში, რომლებსაც ჟანგბადით მდიდარი სისხლი სხეულის სხვა ნაწილების კაპილარულ კონეზში მიაქვს (სისტემური მიმოქცევა). ამის შემდეგ სისხლი ვენების საშუალებით წინაგულში ბრუნდება. ყურადღება მიაქციეთ, რომ თევზებში სისხლმა ყოველი ციკლის დროს ორი კაპილარული კონა უნდა გაიაროს. როდესაც სისხლი კაპილარულ კონეზში მიედინება სისხლის წნევა – სისხლის მაპოძრავებელი ძალა – მნიშვნელოვნად ეცემა (მიზეზს მალე ავსენით). ამის გამო, ჟანგბადით მდიდარი სისხლი ლაყურებიდან სისტემურ მიმოქცევაში საკმაოდ ნელა გადადის (თუმცა პროცესს ცურვისას სხეულის მოძრაობები ეხმარება). ეს გავლენას ახდენს ქსოვილებისთვის ჟანგბადის მიწოდებაზე და, აქედან გამომდინარე, თევზების მაქსიმალურ აერობულ მეტაბოლურ სიჩქარეზე.

## ამფიბიები

ბაყაყსა და სხვა ამფიბიებს სამსაკნიანი გული აქვთ ორი წინაგულითა და ერთი პარკუჭით (იხ. სურ. 42.4). პარკუჭი ტუმბავს სისხლს არტერიაში, რომელიც გამოსულ სისხლს პულმოკუტანურ და სისტემურ წრეებში ანაწილებს. პულმოკუტანური წრე მიდის აირთა მიმოცვლის ორგანოების (ფილტვები და კანი) კაპილარებისკენ, სადაც სისხლი, გულის მარცხენა წინაგულში დაბრუნებამდე მდიდრდება ჟანგბადით და გამოყოფს ნახშირორჟანგს. ჟანგბადით მდიდარი დაბრუნებული სისხლის უმეტესი წილი სისტემურ მიმოქცევაში გადაიტუმბება, რომელიც ყველა ორგანოს ამარაგებს და მერე ჟანგბადით ღარიბ სისხლს ვენების საშუალებით მარჯვენა წინაგულს უბრუნებს. ბაყაყის პარკუჭში ადგილი აქვს ფილტვებიდან და კანიდან მოტანილი ჟანგბადით მდიდარი სისხლისა და სხეულის დარჩენილი ნაწილიდან მოტანილი ჟანგბადით ღარიბი სისხლის ნაწილობრივ შერევას. პარკუჭის შიგნით მყოფი ძვიდე მარცხენა პარკუჭის ჟანგბადით მდიდარ სისხლს სისტემურ მიმოქ-

ცევაში მიმართავს და ჟანგბადით ღარიბი სისხლის უმეტესობას კი მარჯვენა პარკუჭიდან პულმოკუტანურ მიმოქცევაში უშვებს.

სისხლის ამ მიმოქცევას ორმაგ მიმოქცევას უწოდებენ. ის უზრუნველყოფს სისხლის ძლიერ ნაკადს ტვინისკენ, კუნთებისკენ და სხვა ორგანოებისკენ, რადგანაც სისხლი მეორედ გადაიტუმბება მას შემდეგ, რაც ფილტვებისა და კანის კაპილარულ კონაში წნევას კარგავს. ეს მნიშვნელოვნად განსხვავდება თევზების სისხლის მიმოქცევისგან, სადაც სისხლი სუნთქვის ორგანოდან (ლაყურებიდან) შემცირებული წნევით სხვა ორგანოებისკენ უშუალოდ მიემართება.

## ქვეწარმავლები

ქვეწარმავლებს სისხლის მიმოქცევის ორი წრე აქვთ: პულმონალური წრე (ფილტვები) და სისტემური წრე (იხ. სურ. 42.4). კუეებს, გველებსა და ხვლიკებს სამსაკნიანი გული აქვთ, პარკუჭი ნაწილობრივ ძვიდით არის გაყოფილი, რომელიც ამფიბიებთან შედარებით ჟანგბადით მდიდარი და ღარიბი სისხლის კიდეც უფრო მცირედ შერევას იწვევს. ნიანგისნაირებში ძვიდე პარკუჭს მთლიანად ყოფს მარჯვენა და მარცხენა ნაწილებად. ყველა რეპტილიას ორი არტერია აქვს, რომელიც გულიდან სისტემურ მიმოქცევაში გადადის და გააჩნია არტერიის სარქველები, რომლებიც საშუალებას აძლევს პულმონალური მიმოქცევიდან მოსული სისხლი სისტემური მიმოქცევისკენ მიმართოს.

## ძუძუმწოვრები და ფრინველები

ყველა ძუძუმწოვარსა და ფრინველს მთლიანად მარჯვენა და მარცხენა ნაწილებად გაყოფილი პარკუჭი აქვს (იხ. სურ. 42.4). გულის მარცხენა ნაწილი იღებს და ტუმბავს მხოლოდ ჟანგბადით მდიდარ სისხლს, მარჯვენა ნაწილი კი იღებს და ტუმბავს ჟანგბადით ღარიბს. ჟანგბადის მიწოდება გაძლიერებულია, რადგან არ ხდება ჟანგბადით მდიდარი და ღარიბი სისხლის შერევა. ამასთანავე, გააჩნიათ სისხლის მიმოქცევის ორი წრე, რის შედეგად სისხლი ფილტვების კაპილარების მოვლის შემდეგ სისტემურ მიმოქცევაში აღიდგენს მაღალ წნევას.

ძუძუმწოვრებისა და ფრინველებისთვის დამახასიათებელი სიცოცხლის ენდოთერმული ფორმის ჩამოყალიბებისათვის ძლიერი ოთხსაკნიანი გული მნიშვნელოვანი ადაპტაცია არის. ენდოთერმები დაახლოებით ათჯერ უფრო მეტ ენერგიას იყენებენ, ვიდრე შესაბამისი ზომის ექტოთერმული ცხოველები. ამის გამო, მათ სისხლის მიმოქცევის სისტემას ქსოვილებთან ათჯერ უფრო მეტი საწვავისა და ჟანგბადის გადატანა (და ათჯერ უფრო მეტი ნახშირორჟანგის გამოტანა) ესაჭიროება. ნივთიერებათა ასეთი დიდი მოძრაობა მიიღწევა გაყოფილი სისტემური და პულმონარული წრეებისა და ძლიერი დიდი გულის ხარჯზე, რომელიც სისხლის საჭირო რაოდენობას ტუმბავს. როგორც 25-ე თავში განვიხილეთ, ძუძუმწოვრები და ფრინველები (რომლებიც რეპტილიების სხვადასხვა წინაპრისგან წარმოიშვნენ) და მათი ოთხსაკნიანი გული დამოუკიდებლად განვითარდა – ეს კონვერგენციული ევოლუციის მაგალითია.



თევზები

თევზებს აქვთ ორსაკნიანი გული და სისხლის მიმოქცევის ერთი წრე.

ამფიბიები

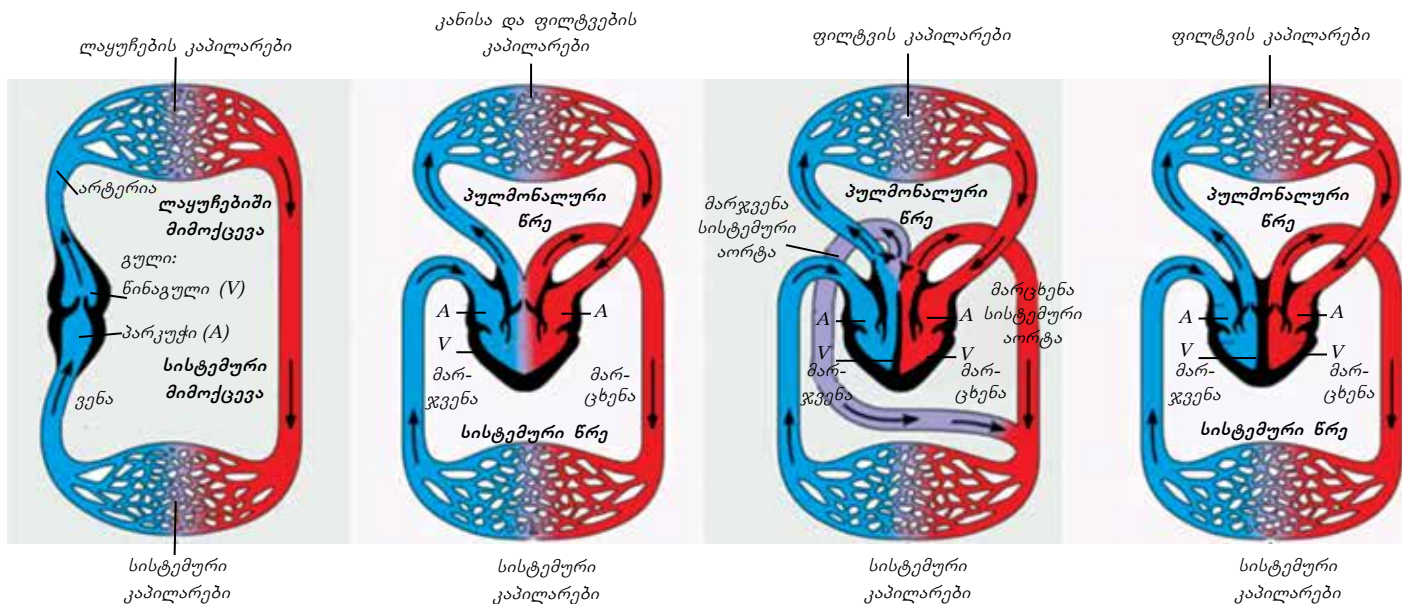
ამფიბიებს სამსაკნიანი გული და სისხლის მიმოქცევის ორი წრე (პულმონალური და სისტემური) აქვთ. ერთ პარკულში ადგილი აქვს ჟანგბადით მდიდარი და ჟანგბადით ღარიბი სისხლის ნაწილობრივ შერევას.

რეპტილიები  
(ფრინველების გარდა)

ხვლიკებს, გველებს და კუს სამსაკნიანი გული და სისხლის მიმოქცევის ორი წრე აქვთ. ასე თუ ისე, ძვიდუ პარკულს ნაწილობრივ ყოფს და ჟანგბადით მდიდარი და ჟანგბადით ღარიბი სისხლის შერევას ამცირებს.

ძუძუმწოვრები და ფრინველები

ძუძუმწოვრებსა და ფრინველებს ოთხსაკნიანი გული აქვთ, საკნები ჟანგბადით მდიდარ და ღარიბ სისხლს ერთმანეთისგან მთლიანად გამოყოფს. (ფრინველებში გულთან ახლოს მყოფი მთავარი სისხლძარღვები ოდნავ განსხვავებულია, მაგრამ სისხლის მიმოქცევის ორი წრის სისტემა ფრინველებშიც ისეთივეა, როგორც აქ არის წარმოდგენილი).



სისტემური წრე, ფილტვების გარდა, სხეულის ყველა ორგანოს მოიცავს. მხედველობაში მიიღეთ, რომ სურათები ისეა წარმოდგენილი თითქოს ცხოველი თქვენთან სახით იდგეს, ანუ მარჯვენა მხარეს გულის მარცხენა ნაწილია და პირიქით.

## კონცეფცია ცესცი 42.1

1. რა ფუნდამენტური ფიზიკური აუცილებლობებია დიდი ზომის ორგანიზმების სისხლის მიმოქცევის სიტემაში?
2. რა არის სისხლის დახურული მიმოქცევის სიტემის უპირატესობა და ნაკლი?
3. რა ორი ფიზიოლოგიური უპირატესობა აქვს გამოცალკევებულ სუნთქვით (პულმოკუტანურ ან პულმონარულ) და სისტემურ წრეებს სისხლის მიმოქცევის ერთ წრესთან შედარებით, რომელიც თევზებში გვხვდება, და რომელშიც ლაყურისა და სისტემური ცირკულაცია ერთიანია.

შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი A.

## კონცეფცია 42.2

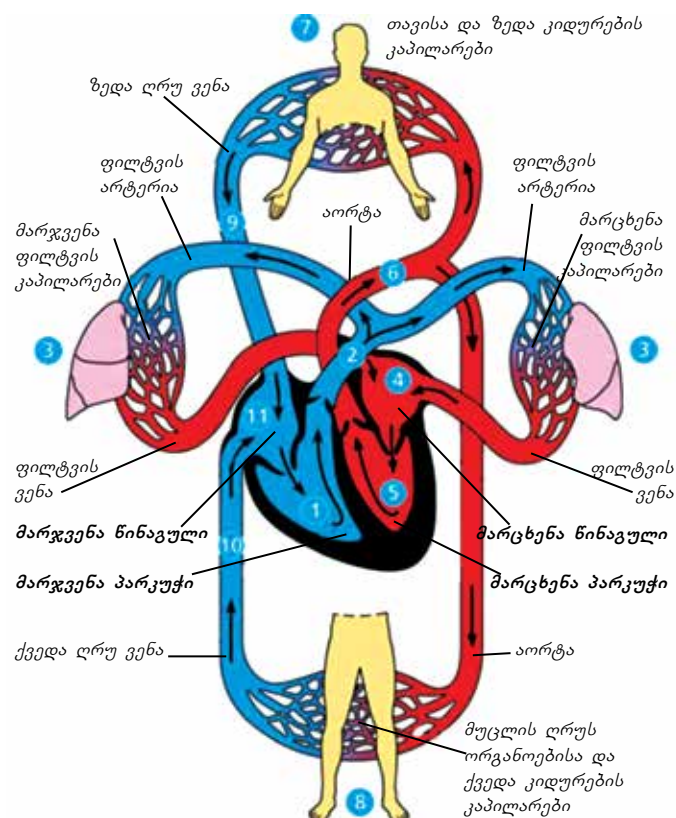
### ბუბრეწოვარების სისხლის მიმოქცევის ორი წრე დამოკიდებულია ანაცოვმიასა და გულის მოძმოდების ციკლზე

რამდენადაც გულის დაავადება ასეთი მნიშვნელოვანი და ფართოდ გავრცელებულია ადამიანთა პოპულაციებში, მეცნიერებს ადამიანის სისხლის მიმოქცევის სისტემა ყველა სხვა სისტემებთან შედარებით უფრო დაწვრილებით აქვთ შესწავლილი. მისი სტრუქტურა და ფუნქცია შეიძლება გამოყენებული იყოს ძუძუმწოვართა სისხლის მიმოქცევის სისტემის ზოგად მოდელად.

### ბუბრეწოვართა სისხლის მიმოქცევა: გზა

როდესაც წაიკითხავთ ძუძუმწოვართა გულსისხლძარღვთა სისტემის დეტალურ მიმოხილვას, იხილეთ სურათი 42.5, რომელსაც ტექსტში შემოხაზული ნომრებისთვის შესაბამისი ნაწილები აქვს მონიშნული ნომრებით. ჩვენს მოგზაურობას ვიწყებთ პულმონარული (ფილტვის) წრით, (1) მარჯვენა პარკუჭი გადატუმბავს სისხლს ფილტვებისკენ (2) პულმონარული არტერიის საშუალებით. როდესაც სისხლი გაივლის მარჯვენა და მარცხენა ფილტვის (3) კაპილარულ კონებს, ის იტვირთება ჟანგბადით და იცილებს ნახშირორჟანგს. ჟანგბადით მდიდარი სისხლი ბრუნდება ფილტვებიდან პულმონარული ვენის გავლით მარცხენა წინაგულში. შემდგომში, როდესაც პარკუჭი იხსნება და წინაგული იკუმშება, ჟანგბადით მდიდარი სისხლი მარცხენა წინაგულიდან (5) მარცხენა პარკუჭში მიედინება. მარცხენა პარკუჭი ტუმბავს ჟანგბადით მდიდარ

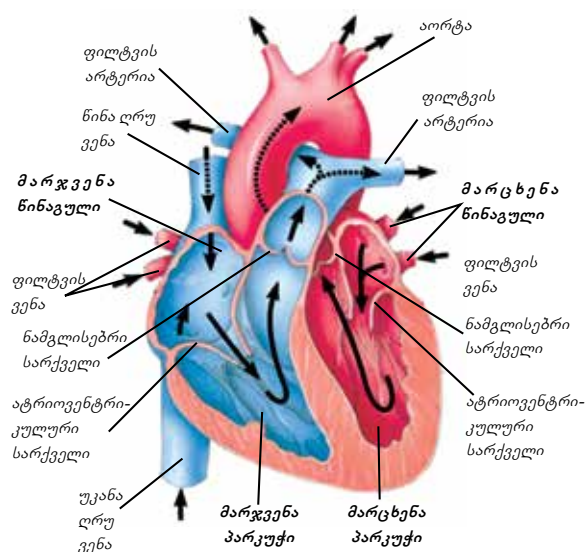
სისხლს სხეულის ქსოვილებისკენ სისტემური წრით. სისხლი მარცხენა პარკუჭს აორთით (6) ტოვებს. აორტას სისხლი არტერიებისკენ გადააქვს. არტერიების საშუალებით სისხლი სხეულის შიგნით ნაწილდება. აორტის პირველი ტოტები კორონალური არტერიებია (სურათზე არ არის ნაჩვენები), რომელთა საშუალებითაც გულის კუნთი სისხლით მარაგდება, მერე გამოდის ტოტები, რომლებსაც სისხლი (8) თავისა და მკლავებისკენ (ზედა კიდურებისკენ) მიაქვს. ძუძუმწოვრის აორტა უკანა მიმართულებით გრძელდება და ფეხებისა და მუცლის ღრუს ორგანოების არტერიოლებსა და კაპილარულ კონებს სისხლით ამარაგებს. კაპილარებში ჟანგბადი და ნახშირორჟანგი კონცენტრაციული გრადიენტის მიმართულებით მოძრაობს. კერძოდ, ჟანგბადი გადადის სისხლიდან ქსოვილებში, ხოლო უჯრედის სუნთქვისას წარმოქმნილი ნახშირორჟანგი კი – სისხლში. კაპილარები ერთდება და ვენულებს ქმნის, რომელთაც სისხლი ვენებისკენ მიაქვს. თავისა და წინა კიდურების არედან ჟანგბადით ღარიბი სისხლი ერთიანდება დიდ ვენაში, (9) რომელსაც წინა (ან ზედა) ღრუ ვენას უწოდებენ. მეორე დიდი ვენა, რომელსაც უკანა (ან ქვედა) ღრუ ვენა ჰქვია, სისხლს სხეულის ქვედა ნაწილიდან და ქვედა კიდურებიდან იღებს. ორ ღრუ ვენას სისხლი მარჯვენა წინაგულში (11) მიაქვს, საიდანაც ჟანგბადით ღარიბი სისხლი მარჯვენა პარკუჭში გადადის.



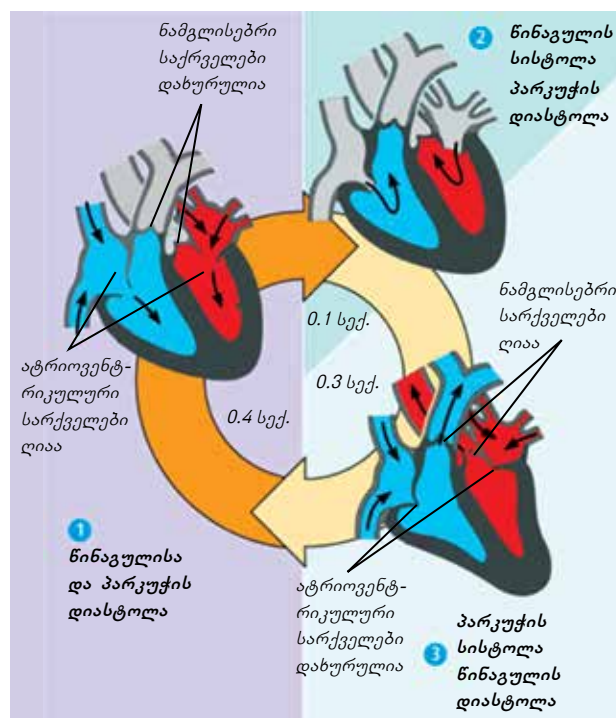
▲ სურათი 42.5 ძუძუმწოვართა კარდიოვასკულარული სისტემის მიმოხილვა. გაითვალისწინეთ, რომ სისხლის მიმოქცევის ორი წრე მუშაობს ერთდროულად და არა სერიულად, როგორც ამ სურათზეა დანომრილი. ორი პარკუჭი თითქმის უნისონში ტუმბავს სისხლს, სისხლის ნაწილი პულმონარულ წრეში მიდის, ხოლო დარჩენილი ნაწილი კი სისტემურში.

## ბუბონიკატა გული: დაჭრითი მიმოხილვა

ბუბონიკატა გულის დაწვრილებითი მიმოხილვა (ადამიანის გულის მაგალითზე) საშუალებას გვაძლევს, გავიგოთ, თუ როგორ მუშაობს სისხლის მიმოქცევის ორი წრე (სურ. 42.6). მკერდის ძვლის ქვეშ მოთავსებული გული დაახლოებით შეკრული მუჭის ზომისაა და ძირითადად გულის კუნთისგან შედგება (იხ. სურ. 40.5). ორ წინაგულს შედარებით თხელი კედელი აქვს და გულში დაბრუნებული სისხლისთვის შემგროვებელ საკანს წარმოადგენს. პარკუჭების მოდუნებისას ამ სისხლის უმეტესობა მათში ჩაედინება. პარკუჭის სისხლით ავსება სრულდება წინაგულების შეკუმშვისას. პარკუჭებს უფრო სქელი კედლები აქვთ და უფრო ძლიერად იკუმშებიან ვიდრე წინაგულები – განსაკუთრებით კი მარცხენა პარკუჭი, რომელიც სისტემური წრის საშუალებით სისხლს ყველა ორგანოსკენ ტუმბავს. გული რიტმული ციკლით იკუმშება და დუნდება. როდესაც ის იკუმშება, სისხლს ტუმბავს, ხოლო როდესაც დუნდება, მისი საკნები სისხლით ივსება. გულის ციკლი მოიცავს გადატუმბვისა და ავსების ერთ სრულ თანმიმდევრობას. შეკუმშვის ფაზას სისტოლას უწოდებენ, ხოლო მოდუნებისას კი – დიასტოლას (სურ. 42.7). სისხლის მოცულობას, რომელიც ერთ წუთში მარცხენა პარკუჭის საშუალებით ამოიტუმბება, გულის გამოსავალს უწოდებენ. გულის გამოსავალი ორ ფაქტორზეა დამოკიდებული: გულის შეკუმშვის სიხშირეზე (შეკუმშვების რაოდენობაზე ერთ წუთში) და ამოტუმბვის მოცულობაზე, ანუ სისხლის რაოდენობაზე, რომელიც ყოველ შეკუმშვაზე მარცხენა პარკუჭიდან ამოიტუმბება. საშუალოდ ამოტუმბვის მოცულობა ადამიანებში 75 მილილიტრია. ასეთი ამოტუმბვის მოცულობის მქონე ადამიანს, რომლის გულის ცემის სიხშირეა წუთში 70, გულის გამოსავალი 5.25 ლ/წთ აქვს, რაც მთელი სხეულის სისხლის მოცულობას უდრის. გულის გამოსა-



▲ **სურათი 42.6** ბუბონიკატა გული: დაწვრილებითი მიმოხილვა. მიაქციეთ ყურადღება სარქველებს, (რომლებიც გულში სისხლის უკან დინებას უშლან ხელს) და საკნების კედლის შეფარდებით სისქეს.



▲ **სურათი 42.7** გულის ციკლი. ზრდასრული ადამიანისთვის დასვენებულ მდგომარეობაში პულსი გულის 75 ცემაა ერთ წუთში. გულის ერთი სრული ციკლი მოიცავს 0.8 წმ-ს. 1. მოდუნების ფაზაში (წინა გული და პარკუჭი დიასტოლის მდგომარეობაშია), დიდი ვენებიდან მოსული სისხლი შედის წინაგულსა და პარკუჭში. 2. წინაგულის ხანმოკლე შეკუმშვა აიძულებს მთელ დარჩენილ სისხლს პარკუჭში გადავიდეს. 3. ციკლის დარჩენილ ნაწილში პარკუჭის სისტოლა სისხლს არტერიებში გადაისვრის. გაითვალისწინეთ, რომ დროის შვიდი მერვედი, გულის ციკლის 0.1 წმ წინაგულები მოდუნებულია და ვენებიდან მოტანილი სისხლით ივსება.

ვალი მძიმე ფიზიკური ვარჯიშისას შეიძლება ხუთჯერ გაიზარდოს. გულის ოთხი სარქველი, რომლებიც შემაერთებელი ქსოვილისგან შედგება, სისხლის უკან დინებას უშლის ხელს და სწორი მიმართულებით დინებას უზრუნველყოფს (სურ. 42.6). ყოველ წინაგულსა და პარკუჭს შორის ატრიოვენტრიკულური (ავ) სარქველია. ავ სარქველები პარკუჭის კედელთან დაკავშირებულია ძლიერი ძაფებით, რაც მათ უკანა მიმართულებით გაღებას უშლის ხელს. პარკუჭების ძლიერი შეკუმშვით განვითარებული წნევა კეტავს ავ სარქველებს, რაც უკან, წინაგულში სისხლის დაბრუნებას უშლის ხელს. ნამგლისებრი სარქველები მოთავსებულია გულის ორ გასასვლელთან: სადაც აორტა ტოვებს მარცხენა პარკუჭს და ფილტვის არტერია – მარჯვენა პარკუჭს. ეს სარქველები პარკუჭების შეკუმშვისას განვითარებული წნევით იხსნება. პარკუჭების მოდუნებისას სისხლი უკან, გულისკენ იწყებს დინებას და ნამგლისებრი სარქველები იხურება, რაც პარკუჭში სისხლის დაბრუნებას უშლის ხელს. არტერიების ელასტიური კედლები მათში გულიდან სისხლის გადასვლისას იჭიმება. პულსი – არტერიების რიტმული რხევით წარმოიშობა, რომელსაც პარკუჭის ძლიერი შეკუმშვისას არტერიებში სისხლის

გადასროლა იწვევს. პულისის გაზომვით შესაძლოა გულის რიტმის განსაზღვრა. სტეტოსკოპით მოსმენილი გულის ბგერები სარქველების დახურვით წარმოიშობა. (აღამიანს ამ ხმის გაგონება სტეტოსკოპის გარეშეც შეუძლია, თუკი ის მეგობრის მკერდს მაგრად მიეხუტება). ხმა ასე ისმის „დაგ-დუგ, დაგ-დუგ, დაგ-დუგ“. პირველი „დაგ“ სისხლის ავ სარქველებთან შეჯახებით წარმოიშობა, მეორე „დუგ“ კი – სისხლის შეჯახებით ნაპლისებრ სარქველთან. ერთი ან რამდენიმე სარქველის დეფექტი გულის შუილს იწვევს, რაც შეიძლება ყურადღებით მოსმენით გავიგონოთ, როდესაც სისხლი სარქველის გავლით უკან ბრუნდება. ზოგი ადამიანი გულის შუილებით იბადება, სხვებში კი სარქველები შეიძლება ინფექციით (მაგალითად, რევმატული ცხელებით) დაზიანდეს. თუმცა, გულის შუილების უმეტესობა სისხლის დინებას იმდენად ძლიერად არ ამცირებს, რომ ქირურგიული ჩარევის აუცილებლობა იყოს.

## გულის ბიომექანიკური შეფასების შენაჩვენება

სხეულის ორგანოებთან ჟანგბადის დროული მიწოდება კრიტიკულია. მაგალითად, ტვინის უჯრედები ჟანგბადის წყაროს გადაკეტივსას რამდენიმე წუთში კვდებიან. ასე რომ, გულის ფუნქციის შენარჩუნება გადარჩენისთვის მნიშვნელოვანია. გულის მოქმედების მარეგულირებელი რამდენიმე მექანიზმი არსებობს.

გულის ზოგი კუნთოვანი უჯრედი თვითაგზნების უნარით ხასიათდება, რაც ნიშნავს, რომ მაშინაც კი, როდესაც ისინი გულიდან მოცილდება და ქსოვილის კულტურაში გადაიტანება ნერვული სისტემიდან მოსული სიგნალების გარეშე, ინარჩუნებს შეკუმშვის უნარს. ყველა ამ უჯრედს შეკუმშვის საკუთარი რიტმი აქვს. როგორ ხდება ინტაქტურ გულში მათი შეკუმშვების რეგულაცია? გულის უბანი, რომელსაც სინოატრიალურ კვანძს (სა) ან პეისმეიკერს უწოდებენ, კუნთოვანი უჯრედების შეკუმშვის სიხშირეს განსაზღვრავს. სა კვანძი შედგება განსაკუთრებული კუნთოვანი უჯრედებისგან. იგი მარჯვენა პარკუჭის კედელშია მოთავსებული, იმ ადგილთან ახლოს, სადაც ზედა ღრუ ვენა გულში შედის. რადგან ადამიანის (და სხვა ხერხემლიანების) გულის პეისმეიკერი განსაკუთრებული კუნთოვანი ქსოვილისგან შედგება და საკუთრივ გულშია მოთავსებული, ხერხემლიანთა გულს მიოგენურ გულს უწოდებენ. ამისგან განსხვავებით, ფეხსახსრიანების გულში პეისმეიკერული რიტმი შემოდის მოტორული ნერვებით. აღნიშნულ გულს ნეიროგენურ გულს უწოდებენ.

სა კვანძის მიერ წარმოქმნილი ნერვული იმპულსები ძალიან ჰგავს ნერვული უჯრედების მიერ წარმოქმნილ იმპულსებს. რამდენადაც გულის კუნთოვანი უჯრედები ელექტრულად ურთიერთდაკავშირებულია (მეზობელ უჯრედებს შორის არსებული განსაკუთრებული დისკებით) სა კვანძიდან იმპულსები წინაგულის კედელში სწრაფად ვრცელდება და ორივე წინაგულის უნისონში შეკუმშვას განაპირობებს (**სურ. 42.8**). იმპულსები ასევე გადაეცემა გადამრთველ წერტილში განსაკუთრებულ კუნთოვან ქსოვილს, ატრიოვენტრიკულურ (ავ) კვანძს, რომელიც მარჯვენა წინაგულსა და პარკუჭს შორის კედელშია მოთავსებული. აქ იმპულსები პარკუჭის კედელში გადასვლამდე დაახლოებით 0.1 წმ ყოვნდება. დაყოვნება უზრუნველყოფს იმას, რომ წინაგულები პარკუჭების შეკუმშვამდე სრულიად დაიცალოს. სპეციალური კუნთოვანი ბოჭკოები, რომელთა კუნთოვან განტოტვას პურკინიეს ბოჭკოებს უწოდებენ,

სიგნალს პარკუჭის კედლებში გულის წვერისკენ ატარებენ.

იმპულსები, რომლებიც გულის კუნთში მოგზაურობს, ელექტრულ დენს წარმოქმნის. ეს დენი სხეულის სითხეებით კანისკენ გადაიტანება და ელექტროკარდიოგრამის (ეკგ) სახით აღირიცხება.

სა კვანძი მთელი გულის რიტმს განსაზღვრავს, მაგრამ იგი რამდენიმე ფიზიოლოგიური ფაქტორის ზეგავლენის ქვეშ იმყოფება. ნერვების ორი ჯგუფი გავლენას ახდენს გულისცემის სიხშირეზე, ერთი აჩქარებს პეისმეიკერს, მეორე კი – ანელებს. გულის სიხშირე რეგულირდება ამ ნერვების ურთიერთაწინააღმდეგო მოქმედებით. პეისმეიკერზე გავლენას ჰორმონებიც ახდენენ, რომლებიც სისხლში ჯირკვლებიდან გამოიყოფა. მაგალითად, თირკმელზედა ჯირკვლის ჰორმონი ეპინეფრინი ზრდის გულისცემის სიხშირეს (იხ. თავი 45). სხეულის ტემპერატურა მეორე ფაქტორია, რომელსაც პეისმეიკერზე გავლენა აქვს. 1 გრადუსით ტემპერატურის მომატება გულისცემის სიხშირეს წუთში დაახლოებით 10 ერთეულით ზრდის. ეს არის მიზეზი, რის გამოც თქვენი პულისი სიცხისას მატულობს. გულისცემის სიხშირე ფიზიკური ვარჯიშის დროსაც იზრდება. ეს ადაპტაცია მომუშავე კუნთებთან დამატებითი ჟანგბადის მიწოდებას უზრუნველყოფს.

## კონცეფცია ცესტი 42.2

1. ზოგი ბავშვი მარჯვენა და მარცხენა პარკუჭებს შორის ხერხელით იბადება. ასხენით, თუ არა ქირურგიული კორექცია, როგორ გავლენას მოახდენდა ეს ხერხელი სისტემურ წრეში შემავალი სისხლის ჟანგბადოვან შემადგენლობაზე.
2. რატომ არის მნიშვნელოვანი, რომ აპ სარქველი ელექტრულ იმპულსებს, რომელიც სა კვანძიდან და წინაგულების კედლიდან პარკუჭებისკენ მიდის ანელებს ან აყოვნებს?

## კონცეფცია 42.3

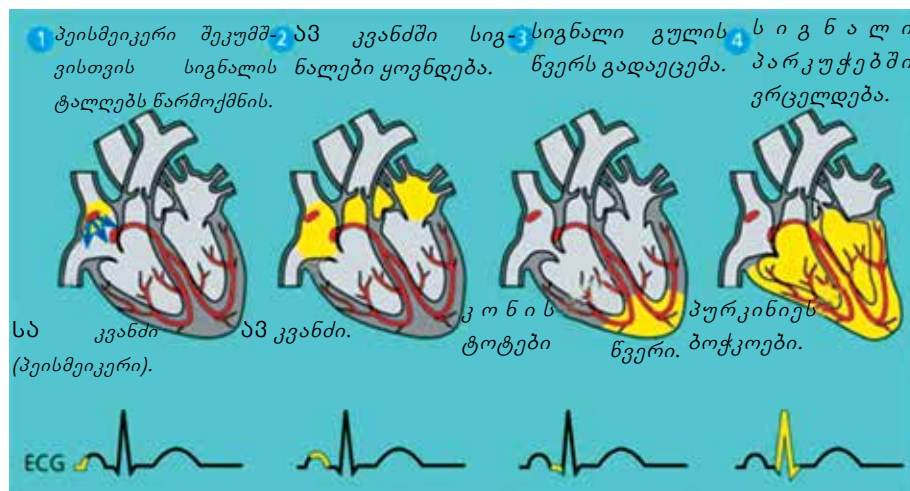
### სისხლის მიმოძღვრის ფიზიკური კანონები მართავს

საკვები ნივთიერებებისა და მეტაბოლიზმის პროდუქტების გადატანა სისხლის საშუალებით ხორციელდება. ეს ფუნქციები სისხლის მიმოქცევის სისტემით მიიღწევა. ძარღვების დატოტვიანებული ქსელი ქალაქის წყალმომარაგებისა და კანალიზაციის სისტემას ჰგავს, რომელიც მოსახლეობას სუფთა წყლით ამარაგებს და ქუჩებს აცილებს. ის ფიზიკური კანონები, რომლებიც ქალაქის წყალმომარაგებისა და კანალიზაციის სისტემებს მართავს, ცხოველთა სისხლის მიმოქცევის სისტემაშიც მუშაობს.

## სისხლძარღვების სტრუქტურა და ფუნქციები

მიმოქცევის სისტემის ინფრასტრუქტურა სისხლძარღვების ქსელისგან შედგება. ყველა სისხლძარღვი მსგავსი ქსოვილისგან შედგება. არტერიების და ვენების კედლებს ერთმანეთის მსგავსი სამი შრე აქვთ (სურ. 42.9). გარეთ ელასტიური ძაფებისგან შემდგარი შემაერთებული ქსოვილი სისხლძარღვების ელასტიურობას უზრუნველყოფს. შუა შრე გლუვ კუნთოვან ბოჭკოებს მოიცავს. ყველა სისხლძარღვის, მათ შორის კაპილარების შიდა ამოშვანი შრე ენდოთელიუმი, ბრტყელი უჯრედების ერთი შრე, რომელიც გლუვ ზედაპირს ქმნის და სისხლის დინების წინააღმდეგ ამცირებს.

სისხლძარღვებს შორის სტრუქტურული განსხვავებები მათ განსხვავებულ ფუნქციებს შეესაბამება. კაპილარებს ორი გარეთა შრე არა აქვთ და მათი თხელი კედელი მარტო ბაზალური მემბრანისა და ენდოთელიუმისგან შედგება. ეს აადვილებს ნივთიერებათა მიმოცვლას სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის. არტერიების შუა და გარეთა შრე უფრო სქელია, ვიდრე ვენებისა. სისხლი მიმოქცევის სისტემის ძარღვებში არათანაბარი სიჩქარითა და წნევით მიედინება. არტერიების სქელი კედლები უზრუნველყოფს ძალას, რომელიც გულიდან სწრაფად გადმოსროლილი სისხლის წნევას უძლებს და მათი ელასტიურობა უზრუნველყოფს წნევის შენარჩუნებას მაშინაც კი, როდესაც გული მოდუნებულია. უფრო თხელკედლიანი ვენები სისხლს დაბალი სიჩქარითა და წნევით უკან, გულისკენ აბრუნებენ. სისხლი ვენებში ძირითადად კუნთების მოქმედებით მიედინება. როდესაც მოძრაობთ, თქვენი ჩონჩხის კუნთები ვენებს აწევა და სისხლს ამოძრავებს. დიდ ვენებში სისხლის ერთი მიმართულებით მოძრაობას სარქველებიც უზრუნველყოფენ (სურ. 42.10).



▲ **სურათი 42.8 გულის რიტმის კონტროლი.** გრაფიკის ძირზე არსებული ოქროს ნაწილი მიუთითებს ელექტროკარდიოგრამის (ეკგ) კომპონენტზე, რომელიც გულში ელექტრული მოვლენების თანმიმდევრობას შეესაბამება. ნაბიჯი 4-ის შავი ეკგ-ს მარჯვენა ნაწილში ოქროსფერი „სპაიკი“ პარკუჭის შეკუმშვის ელექტრულ აქტივობას გამოხატავს. ამ ფაზაში, პარკუჭები ხელახლა ირთვება ელექტრულად და შემდეგი შეკუმშვის სიგნალებს აღძრავს.

## სისხლის დინების სიჩქარე

სისხლი აორტაში ათასჯერ უფრო სწრაფად (დაახლოებით 30სმ/წმ) მოძრაობს, ვიდრე კაპილარებში (დაახლოებით 0.026 სმ/წმ). სიჩქარის აღნიშნული ცვლილება მიღებულ სითხის მოძრაობის კანონს ექვემდებარება. თუ მილის დიამეტრი მის სიგრძეზე იცვლება, სითხე ვიწრო უბანში უფრო სწრაფად მოძრაობს, ვიდრე ფართო უბნებში. იქიდან გამომდინარე, რომ წამში გასული სითხის მოცულობა მთელ მილში მუდმივი უნდა იყოს, სითხე მილის ვიწრო ადგილებში უფრო სწრაფად უნდა გავიდეს. ამ კანონიდან გამომდინარე, შეიძლება იფიქროთ, რომ რამდენადაც კაპილარების დიამეტრი ძალიან მცირეა, სისხლმა კაპილარებში უფრო სწრაფად უნდა იმოძრაოს, ვიდრე არტერიებში. მაგრამ კაპილარების ჯამური განივკვეთი განსაზღვრავს მათში დინების სიჩქარეს.

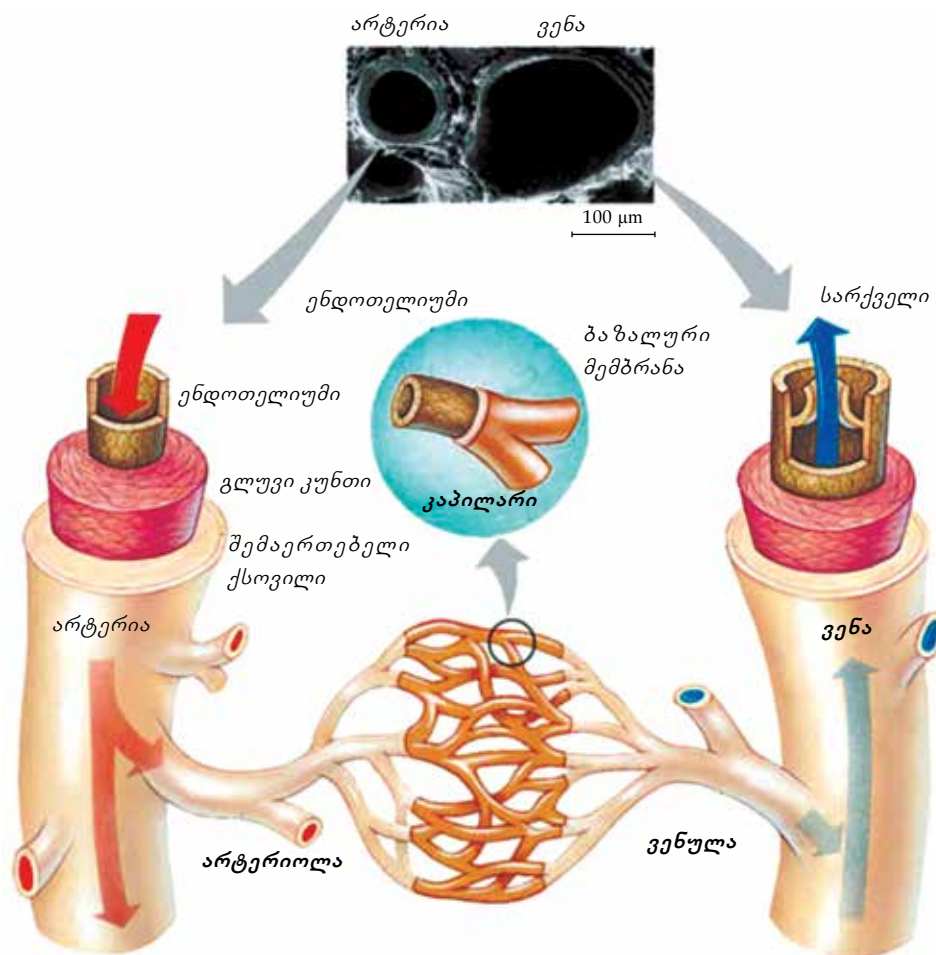
ყველა არტერია სისხლს აგზავნის უამრავი რაოდენობის კაპილარში. ამრიგად, კაპილარული კონის ჯამური განივკვეთი გაცილებით უფრო მეტია, ვიდრე მიმოქცევის სისტემის ნებისმიერ სხვა ადგილას. ამ მიზეზით, სისხლის სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება, როდესაც ის არტერიებიდან არტერიოლებში შედის და კაპილარულ კონაში კიდევ უფრო ნელდება. კაპილარები ერთადერთი ძარღვებია, რომელთა კედელიც საკმარისად თხელია სისხლსა და უჯრედშორის სითხეს შორის ნივთიერებათა მიმოცვლისთვის. სისხლის მოძრაობის დაბალი სიჩქარე კიდევ უფრო ზრდის ამ მიმოცვლას. კაპილარების დატოვების შემდეგ სისხლი ვენულებსა და ვენებში შედის, სადაც ის ჯამური განივკვეთის შემცირების გამო ხელახლა ჩქარდება (სურ. 42.11).

## სისხლის წნევა

სითხეები მათი შეხების ზედაპირებზე გარკვეული ძალით მოქმედებენ, რომელსაც ჰიდროსტატიკურ წნევას უწოდებენ. აღნიშნული წნევა მიღებულ სითხის მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს.

სითხეები მაღალი წნევის არედან დაბლისკენ მიემართებიან. ჰიდროსტატიკურ წნევას, რომლითაც სისხლი ძარღვების კედლებზე მოქმედებს და რომელიც მას ამოძრავებს, სისხლის წნევა ეწოდება. სისხლის წნევა გაცილებით უფრო დიდია არტერიებში, ვიდრე ვენებში. ის ყველაზე მაღალია არტერიებში, როცა გული იკუმშება პარკუჭოვანი სისტოლის დროს (სისტოლური წნევა; იხ. სურ. 42.11).

როდესაც მაჯაზე ხელის დადებით პულსს ისინჯავთ, ყოველ გულისცემაზე არტერიის კედლის შერხევას გრძნობთ. აღნიშნული წნევის მოკლე ბიძგები ნაწილობრივ იმის შედეგია, რომ არტერიოლების წვრილი ხვრელები წინააღმდეგობას უწევენ არტერიიდან გადმოსულ სისხლს. როცა სისხლი გულიდან გამოდის, ის არტერიებში უფრო სწრაფად შედის, ვიდრე იქიდან არტერიოლებში გადადის. არტერიები წნევის გამო იჭიმება. არტერიების ელასტიური კედლები დიასტოლისას მოშვებულ მდგომარეობას ნა-



▲ **სურათი 42.9** სისხლძარღვების სტრუქტურა. ამ მიკროგრაფზე წარმოდგენილია არტერია და უფრო თხელკედლიანი ვენა.

წილობრივ უბრუნდება. გული კვლავ იკუმშება, ვიდრე საკმარისი სისხლი მთლიანად არტერიოლებში გადავა და არტერიებში წნევა მთლიანად დაცემა. არტერიოლების ეს წინააღმდეგობა ცნობილია პერიფერიული წინააღმდეგობის სახელით. ელასტიურობის შედეგად, არტერიების პერიფერიული წინააღმდეგობის წინააღმდეგ მოქმედება მნიშვნელოვან წნევას დიასტოლის დროსაც ავითარებს (დიასტოლური წნევა) და, ამრიგად, სისხლიც არტერიოლებსა და კაპილარებში მუდმივად მიედინება (**სურ. 42.11**). როგორც **სურათი 42.12** გვიჩვენებს, ჯანმრთელი ადამიანის არტერიული წნევა მოსვენების მდგომარეობაში სისტოლის დროს 120 მმ. ვერცხლისწყლის სვეტია (მმ.ვწყ.ს) და დიასტოლის დროს 80 მმ.ვწყ.ს.

სისხლის წნევა ნაწილობრივ გულის გამოსავლით და ნაწილობრივ კი პერიფერიული წინააღმდეგობით განისაზღვრება. არტერიოლების კედლის შეკუმშვა ამცირებს მცირე ძარღვების დიამეტრს და ზრდის პერიფერიულ წინააღმდეგობას, ამით კი არტერიებში წნევა იზრდება. როდესაც გლუვი კუნთები დუნდება, არტერიოლები ფართოვდება, რაც მათ დიამეტრს ზრდის. შედეგად, არტერიოლებში სისხლის დინება იზრდება და არტერიების წნევა ეცემა. ნერვული იმპულსები, ჰორმონები და სხვა სიგნალები არტერიოლების კედლების კუნთებს აკონტროლებენ. ფიზიკურ ან ემოციურ სტრესს შეუძლია სისხლის წნევის აწევა იმ ნერვული და ჰუმორული

ლი პასუხების ჩართვით, რომლებიც სისხლძარღვების შეკუმშვას იწვევს. გულის გამოსავალი პერიფერიული წინააღმდეგობის შესაბამისად წესრიგდება. მარეგულირებელი მექანიზმების ეს კოორდინაცია ორგანიზმის მოთხოვნილებებისადმი შესაბამის სისხლის დინებას ინარჩუნებს. მძიმე ვარჯიშის დროს მომუშავე კუნთების არტერიოლები ფართოვდება. ეს პასუხი უფრო მეტი ჟანგბადით მდიდარი სისხლის მიწოდებას და პერიფერიული წინააღმდეგობის შემცირებას იწვევს. თავისთავად, ეს მთელ სხეულში სისხლის წნევის (და, ამის გამო, სისხლის დინების) დაცემას გამოიწვევდა, მაგრამ გულის გამოსავალი იზრდება და წნევა ნარჩუნდება, რაც სისხლის დინების გაზრდას უწყობს ხელს. ხმელეთის დიდი ზომის ცხოველებში სისხლის წნევაზე გავლენას გრავიტაციაც ახდენს. გარდა იმისა, რომ ძალა პერიფერიული წინააღმდეგობის დასაძლევად არის საჭირო, დამატებითი წნევა მნიშვნელოვანია სისხლის გულის ზემოთ მიდამოებში გადასასროლად. ფეხზე მდგომ ადამიანში სისხლი ტვინთან მისაღწევად დაახლოებით 0.35 მ უნდა ავიდეს. ამას კი დამატებითი 27 მმ.ვწყ.ს წნევა სჭირდება, რაც გულს შეკუმშვის ციკლში კიდევ უფრო მეტი ენერგიის ხარჯვას ითხოვს.

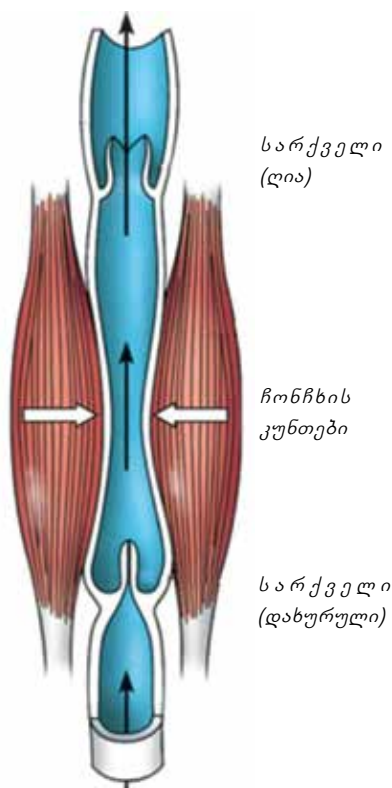
ტუმბვის საჭიროება კიდევ უფრო დიდია გრძელკისერა ცხოველებში. მაგალითად, მდგომ ჟირაფის სისხლის გულის ზევით 2.5 მ-ზე გადასროლა სჭირდება.

ამას კი მარცხენა პარაკუჭში 190 მმ.ვწყ.ს დამატებითი სისხლის წნევა ესაჭიროება და ჟირაფის ნორმალური სისტოლური წნევა გულთან დაახლოებით 250 მმ.ვწყ.ს (ასეთი მაღალი სისტოლური წნევა ძალიან საშიშია ადამიანისთვის). უკუკავშირის მექანიზმები, რომლებიც გულის გამოსავალს ამცირებს, და სარქველები ხელს უშლიან მაღალ წნევას, დააზიანოს ჟირაფის ტვინი, როდესაც ის წყლის დასაღვებად თავს ხრის. ამ პოზაში სისხლი გულიდან ქვევით დაახლოებით 2 მ-ზე ჩადის და ტვინისკენ მიმავალ არტერიებში წნევას 150 მმ.ვწყ.ს-ით ზრდის. ფიზიოლოგები მსჯელობენ, თუ რა ადაპტაციები შეიძლება ყოფილიყო სისხლის წნევასთან და კარდიოვასკულარულ სისტემასთან დაკავშირებით დინოზავრებში, რომელთა ზოგიერთ წარმომადგენელს კისერი დაახლოებით 10 მ ჰქონდა, რაც თავაწეულ მდგომარეობაში სისხლის ტვინში გადასაგზავნად 760 მმ.ვწყ.ს სისტოლურ წნევას მოითხოვდა.

მაგრამ არსებობს დამამტკიცებელი საბუთები, რომ დინოზავრებს, სავარაუდოდ, ასეთი მაღალი წნევის განმავითარებელი ძლიერი გული არ უნდა ჰქონოდათ.

ამ ანალიზისა და კისრის ძელოვანი სტრუქტურის შესწავლის საფუძველზე ზოგმა ბიოლოგმა დაასკვნა, რომ გრძელკისერა დინოზავრები მიწის ახლოს იკვებებოდნენ და თავებს არ სწევდნენ

ვენაში სისხლის მიმო-  
ქცევის დინების მიმარ-  
თულება (გულისკენ)



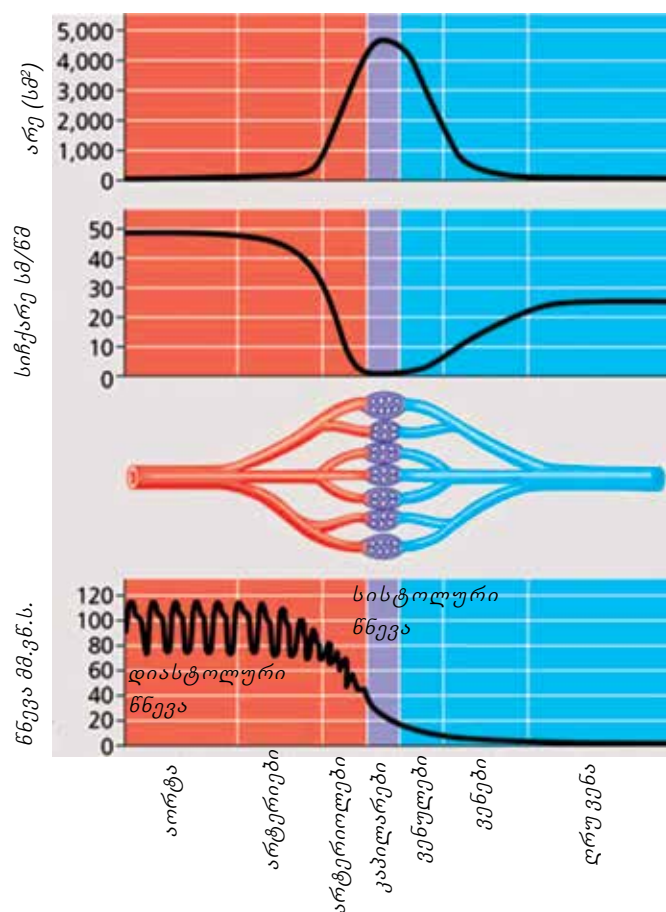
▲ **სურათი 42.10. სისხლის დინება ვენებში.** შეკუმშული ჩონჩხის კუნთები აწვება ვენებს. სარქველები სისხლის ერთი მიმართულებით – გულისკენ – მოძრაობას უზრუნველყოფენ. თუ ჩვენ დიდი ხნის განმავლობაში ვდგავართ ან ვზივართ, კუნთის მოქმედების დეფიციტი ჩვენი ფეხების შეშუპებას იწვევს, რაც განპირობებულია იქ გაჩერებული სისხლით, რომელიც გულს ვერ უბრუნდება.

ზევით მყოფი ფოთლების მოსაპოვებლად.

როდესაც სისხლი ვენებს უახლოვდება, მის წნევაზე გულის მოქმედებას დიდი გავლენა აქვს. ამის მიზეზი არის ის, რომ მილიონობით წვრილ სისხლძარღვში გასვლისას სისხლი იმხელა წინაღობებს ხვდება, რომ გულის მიერ წარმოქმნილი წნევა ძალიან ეცემა და ვეღარ ერევა სისხლს. როგორ უბრუნდება სისხლი გულს, განსაკუთრებით მაშინ, როცა ის ქვედა კიდურებიდან გრავიტაციის წინააღმდეგ მიდის? ვენულების და ვენების გლუვი კუნთების რიტმული შეკუმშვა აღნიშნულ პროცესში გარკვეულწილად იღებს მონაწილეობას. უფრო მნიშვნელოვანი კი არის ის, რომ მოძრაობისას ჩონჩხის კუნთები აწვება ვენებს და მათში სისხლს ამოძრავებს (**იხ. სურ. 42.10**). ასევე ჩასუნთქვისას იზრდება გულმკერდის ღრუ და წარმოიქმნება წნევა, რომელიც აფართოებს ღრუ ვენას და სხვა დიდ ვენებს და ხელს უწყობს მათი სისხლით გავსებას.

## კაპილარების ფუნქციები

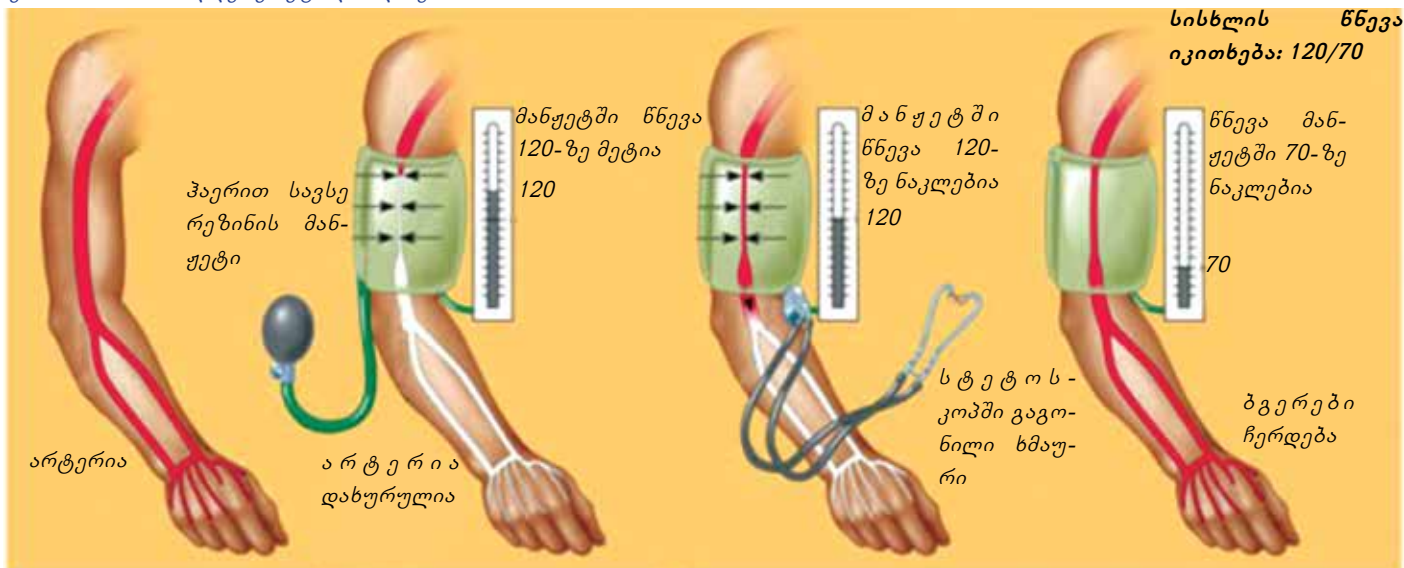
ნებისმიერ მომენტში სხეულის კაპილარების დაახლოებით 5-10%-ში მიედინება სისხლი. ყველა ქსოვილს უამრავი კაპილარი აქვს. ასე რომ, სხეულის ყველა ნაწილი სისხლით გამუდმებით მარაგდება. ტვინის, გულის, თირკმლების და ღვიძლის კაპილარები ყოველთვის მაქსიმალურად დატვირთულია სისხლით, ხოლო სხვა ორგანოებში სისხლით მომარაგება დროთა განმავლობაში იცვ-



▲ **სურათი 42.11. სისხლის სიჩქარის, განივკვეთის ფართობისა და სისხლის წნევის ურთიერთდამოკიდებულება.** სისხლის დინების სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება არტერიოლებში და უმცირესია კაპილარებში, რაც ჯამური განივკვეთის ფართობის გაზრდის ბრალია. სისხლის წნევა, რომელიც სისხლის არტერიებიდან კაპილარებისკენ მოძრაობის მთავარი მამოძრავებელი ძალაა, ყველაზე მაღალი არტერიებშია.

ლება და სისხლი ერთი სამიზნედან მეორისკენ გადაინაცვლებს. მაგალითად, საკვების მიღების შემდეგ სისხლის მიწოდება მომწელებელი სისტემისკენ ძლიერდება, ფიზიკური ვარჯიშისას კი სისხლი საჭმლის მომწელებელი სისტემიდან ჩონჩხის კუნთებისკენ და კანისკენ ინაცვლებს. ეს არის ერთ-ერთი მიზეზი, რის გამოც საკვების მიღებისთანავე მძიმე ვარჯიში მოუწევლობას იწვევს. კაპილარებში სისხლის გადანაწილებას ორი მექანიზმი არეგულირებს. ორივე დამოკიდებულია ნერვული იმპულსებითა და ჰორმონებით გლუვი კუნთების კონტროლზე. ერთი მექანიზმი წარმოადგენს არტერიოლების კედლის გლუვი კუნთის შეკუმშვას, რომელიც ავიწროებს ძარღვებს, ამცირებს დიამეტრს და აქვეითებს სისხლის დინებას კაპილარული კონისკენ. როდესაც კუნთოვანი შრე დუნდება, არტერიოლა ფართოვდება და საშუალებას აძლევს სისხლს კაპილარში გადავიდეს. მეორე შემთხვევაში, გლუვი კუნთების ბეჭდები, რომლებიც კაპილარული კონის შესასვლელთან მდებარეობენ, სისხლის დინებას არტერიოლებსა და ვენულებს შორის აკონტროლებენ (**სურ. 42.13**). მათ პრეკაპილარულ სფინქტერებს უწოდებენ.

**1** 20 წლის ადამიანის ტიპური სისხლის წნევა 120/70. ამ ციფრების ერთეულია მმ. ვერცხლისწყალის სვეტზე (ვწ.ს). სისხლის წნევა 120 არის ძალა, რომელსაც ვწ.ს. 120 მმ სიმაღლეზე შეუძლია დაიჭიროს.



**2** სფიგმომანომეტრი არის გასაბერი მანუეტი, რომელიც წნევის შკალასთან არის დაკავშირებული და მას არტერიული წნევის გაზომვა შეუძლია. მანუეტი მკლავის ზედა ნაწილზე ეხვევა და იბერება მანამ, სანამ არტერია არ გადაიკეტება ისე, რომ სისხლი საერთოდ არ გავიდეს მანუეტის გასწვრივ. როდესაც ეს ხდება, მანუეტით განვითარებული წნევა აჭარბებს არტერიულ წნევას.

**3** სტეტოსკოპი მანუეტის ქვემოთ სისხლის დინების ხმის გასაგონად გამოიყენება. თუ არტერია გადაკეტილია, მანუეტის ქვემოთ პულსი არ იგრძნობა. ნელ-ნელა მანუეტიდან ჰაერის გამოდევნა მიმდინარეობს, სანამ სისხლის გადინება არ იწყება წინამხარში და მანუეტის ქვემოთ მოთავსებული სტეტოსკოპით ხმაურს არ გავიგონებთ. ამას მაშინ აქვს ადგილი, როდესაც სისხლის წნევა მანუეტის წნევას აჭარბებს. ამ წერტილში აღრიცხული წნევა სისტოლური წნევაა.

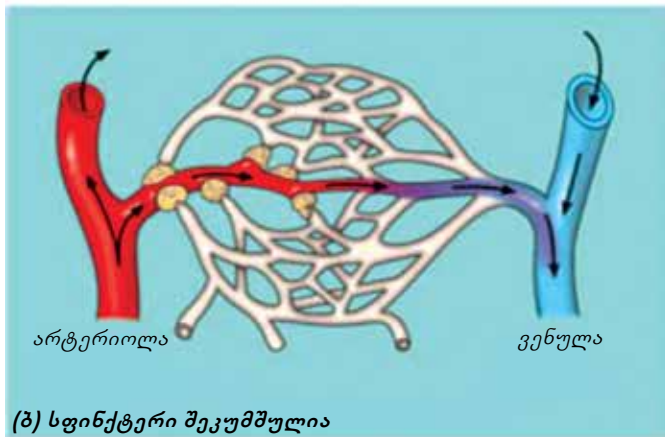
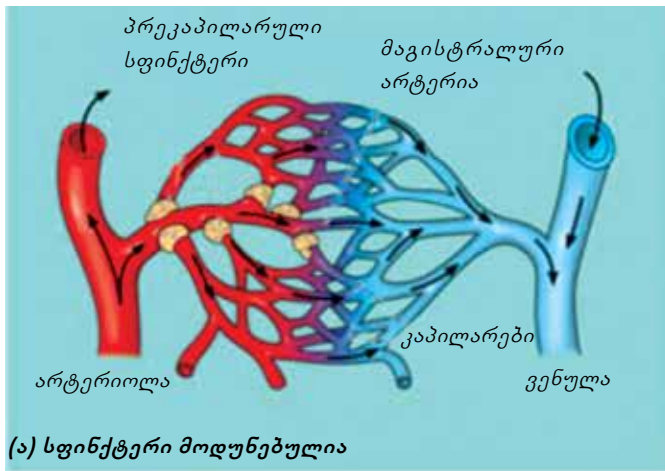
▲ **სურათი 42.12. სისხლის წნევის გაზომვა.** სისხლის წნევა აღირიცხება ორი ციფრით, პირველი ციფრი სისტოლური წნევაა, მეორე კი დიასტოლური.

როგორც წაიკითხეთ, ნივთიერებათა მიმოცვლა სისხლსა და უჯრედშორის ქსოვილს შორის კაპილარების თხელი ენდოთელური კედლის საშუალებით ხორციელდება. ზოგი ნივთიერება აღნიშნულ ენდოთელურ შრეს ვეზიკულების შემადგენლობაში გაივლის, რომელიც უჯრედის ერთ მხარეს ენდოციტოზის გზით წარმოიქმნება და მეორე მხარეს ეგზოციტოზით გარეთ გამოიყოფა. სხვა ნივთიერებები კი მარტივად დიფუნდირებენ სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის. პატარა მოლეკულები, როგორიცაა ჟანგბადი და ნახშირორჟანგი, ენდოთელურ შრეში კონცენტრაციული გრადიენტის მიმართულებით მოძრაობენ. დიფუზია შეიძლება მეზობელ უჯრედებს შორისაც განხორციელდეს. თუმცა ასეთ შემთხვევაში ნივთიერებების დიდი რაოდენობა სითხის წნევის ზემოქმედებით ტრანსპორტირდება. კაპილარის შიგნით არსებული სისხლის წნევა სითხეს (რომელიც შედგება მცირე ზომის გახსნილი ნივთიერებებისგან, როგორიცაა შაქრები, მარილები, ჟანგბადი და შარდოვანა) კაპილარული ქსელიდან გარეთ აწევს. გარეთ მიმართული მოძრაობა იწვევს სითხის ძარღვიდან გასვლას, არტერიოლასთან ახლოს მყოფ კაპილარულ უბანში. სისხლის უჯრედები და ცილები ძალიან დიდია საიმისოდ, რომ ენდოთელიუმში გააღწიონ და ამიტომ კაპილარებში რჩებიან. სისხლის ცილები, რომლებიც კაპილარებში

რჩება (განსაკუთრებით ალბუმინი) არტერიული ბოლოდან ვენულასკენ თითქმის მუდმივ ოსმოსურ წნევას ქმნიან. ამისგან განსხვავებით, სისხლის წნევა მკვეთრად ეცემა. ოსმოსურ და სისხლის წნევას შორის ეს განსხვავება კაპილარის შიგნით არტერიოლუბთან ახლოს სითხეს გარეთ ამოძრავებს, ვენულუბთან ახლოს კი – შიგნით (**სურ. 42.14**). სითხის დაახლოებით 85%, რომელიც კაპილარის არტერიულ ბოლოსთან გარეთ გამოდის, ვენურ ბოლოსთან ქსოვილური სითხიდან უკან ბრუნდება და დარჩენილ 15% სისხლს საბოლოოდ ლიმფური სადინრებით უბრუნდება.

## სითხის დაბრუნება ლიმფური ბაზრების საშუალებით

კაპილარების კედლებში იმდენი სისხლი გადის, რომ სითხის ჯამური დანაკარგი დღეში დაახლოებით 4 ლ-ა. მიუხედავად იმისა, რომ კაპილარების კედლები დიდი ზომის მოლეკულების მიმართ გამტარი არ არის, ადგილი აქვს სისხლის ცილების გაჟონვასაც. დაკარგული სითხე და ცილები სისხლს ლიმფური სისტემის საშუალებით უბრუნდება. სითხე ამ სისტემაში მცირე ზომის ლიმფურ



▲ **სურათი 42.13** სისხლის დინება კაპილარულ ქსელში. პრეკაპილარული სფინქტერები არეგულირებენ სისხლის დინებას კაპილარულ ქსელში. სისხლის ნაწილი არტერიოლებიდან უშუალოდ ვენულებში გადადის ე.წ. მაგისტრალური სისხლძარღვების საშუალებით, რომლებიც მუდმივად ღიაა.

კაპილარებში დიფუზიის გზით შედის. ლიმფურ სისტემაში სითხეს უკვე ლიმფას უწოდებენ. მისი შემადგენლობა თითქმის ისეთივეა, როგორც ქსოვილური სითხისა. ლიმფური სისტემა სისხლის მიმოქცევის სისტემას მარჯვენა წინაგულთან ღრუ ვენის დაკავშირების ადგილას უერთდება (სურ. 43.5). ლიმფური ძარღვები, ვენების

მსგავსად, სარქველებს შეიცავენ, რაც ხელს უშლის სითხის გადასვლას უკან ლიმფურ კაპილარებში. ვენების მსგავსად, ლიმფის მოძრაობა ლიმფურ ძარღვებში გულის მიმართულებით ჩონჩხის კუნთებზეა დამოკიდებული. ლიმფურ ძარღვებთან ერთად ლიმფური კვანძებიც არსებობს.

ლიმფას გაფილტვრითა და ვირუსებისა და ბაქტერიების განადგურებით ლიმფურ კვანძებს ორგანიზმის დამცველობით რეაქციებში მნიშვნელოვანი ფუნქცია აკისრიათ. ყველა ლიმფურ კვანძში ფიჭისმაგვარი შემაერთებული ქსოვილია, რომლის სივრცეებშიც სისხლის თეთრი უჯრედებია განლაგებული. აღნიშნული უჯრედები დამცველობით ფუნქციას ასრულებენ. როდესაც სხეული ინფექციას ებრძვის, ეს უჯრედები ძალიან სწრაფად მრავლდებიან და ლიმფური კვანძები სივდება და რბილდება (ეს არის მიზეზი, რის გამოც თქვენი ექიმი ავადმყოფობისას თქვენს კისერზე არსებულ ლიმფურ კვანძებს ამოწმებს).

ლიმფური სისტემა ორგანიზმს ინფექციებისგან იცავს. აგრეთვე იგი სისხლის მოცულობის და მასში ცილების კონცენტრაციის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. გაიხსენეთ თავი 41, ლიმფურ სისტემას საჭმლის მომნელებელი არხიდან სისხლის მიმოქცევის სისტემაში ცხიმები გადააქვს.

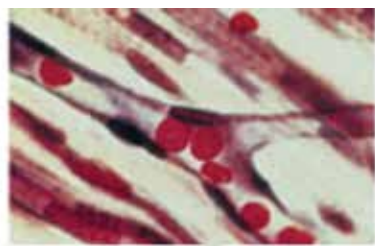
## კონცეფცია ცესცი 42.3

1. რა არის კაპილარებში სისხლის დაბალი სიჩქარის მთავარი მიზეზი?
2. როგორ ახერხებს გაზრდილი სისხლის წნევა და გაზრდილი გულის გამოსავალი, რომელიც სისხლს ჩონჩხის კუნთებისკენ მიმართავს, სხეული საფრთხისგან დასამალად, ან მასთან შესაჭიდებლად მოამზადოს?
3. ახსენით საკვებში ცილების ნაკლებობის დროს როგორ გამოიწვევა ედემა – სითხის დაგროვება სხეულის ქსოვილებში – პლაზმის ცილების შემცირებით.

## კონცეფცია 42.4

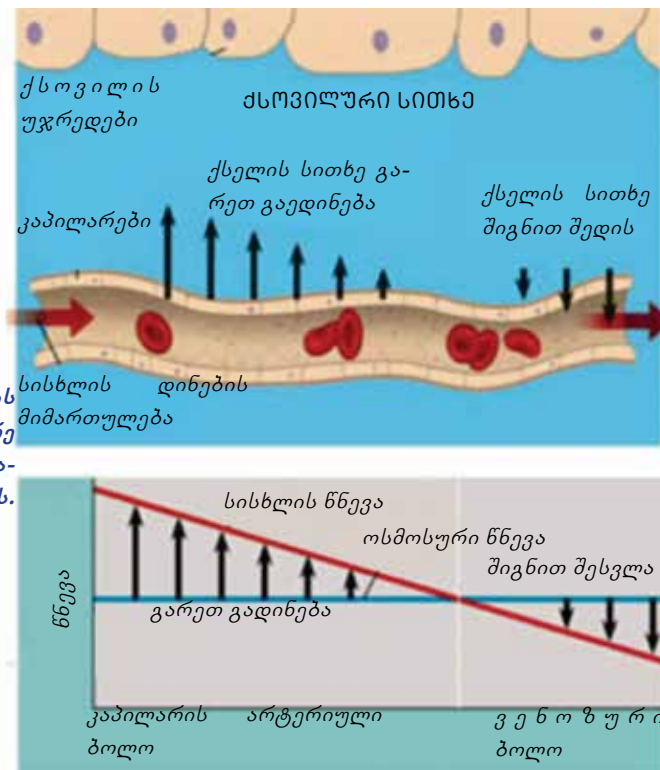
### სისხლი ატის შემაერთებელი ქსოვილი პლაზმაში გახსნილი უჯრედებით

ახლა ყურადღებას სისხლის მიმოქცევის სისტემის მიღებისა და არხებისგან იმ სითხეზე გადავიტანთ, რომელიც მათში ცირკულირებს. როგორც ადრე აღინიშნა, მიმოქცევის ღია სისტემის მქონე უხერხემლოებში სისხლი (ჰემოლიმფა) არ განსხვავდება ქსოვილური სითხისგან. მიმოქცევის დახურული წრის მქონე ორგანიზმებში სისხლი განსაკუთრებული შემაერთებული ქსოვილია.



კაპილარები სისხლის  
წითელი  
უჯრედები 15 μm

არტერიულ ბოლოში კაპილარების სისხლის წნევა უფრო მეტია, ვიდრე ოსმოსური წნევა და სითხე კაპილარიდან ქსოვილურ სითხეში გადადის.



ვენურ ბოლოში კაპილარების სისხლის წნევა უფრო ნაკლებია, ვიდრე ოსმოსური წნევა და სითხე ქსოვილური სითხიდან სისხლში გადადის.

▲ **სურათი 42.14** სითხის მიმოცვლა კაპილარებსა და ქსოვილურ სითხეს შორის. მიკროგრაფი, მარცხნივ ზევით აჩვენებს სისხლის წითელ უჯრედებს, რომლებიც კაპილარში მიემართებიან.

## სისხლის შემადგენლობა და ოქსიგენი

სისხლი რამდენიმე ტიპის უჯრედებისგან შედგება, რომლებიც თხევად მატრიქსში – **პლაზმაში** მოთავსებული. სისხლის შეგროვების შემდეგ, მისი უჯრედების პლაზმიდან გამოყოფა ცენტრიფუგირებით შეიძლება (ანტიკოაგულანტის დამატება აუცილებელია სისხლის შედედების თავიდან ასაცილებლად). უჯრედული ელემენტები (უჯრედები და უჯრედის ფრაგმენტები), რომლებიც სისხლის მოცულობის დაახლოებით 45%-ს შეადგენს, ცენტრიფუგის კოლბის ძირზე ილექება და მკვრივ წითელ ფენას ქმნის. ამ ფენის ზევით გამჭვირვალე პლაზმაა.

### პლაზმა

პლაზმის 90% წყალია. მასში იონების სახით გახსნილია არაორგანული მარილები, რომელთაც ზოგჯერ სისხლის ელექტროლიტებს უწოდებენ (**სურ. 42.15**). ამ იონების ჯამური კონცენტრაცია მნიშვნელოვანია სისხლის ოსმოსური ბალანსის შენარჩუნებისთვის. ზოგიერთი იონი ბუფერის ფუნქციასაც ასრულებს. ადამიანის სისხლის pH 7.4-ია. კუნთებისა და ნერვების ნორმალური ფუნქციონირება ქსოვილურ სითხეში მთავარი იონების ნორმალურ კონცენტრაციაზე დამოკიდებული, რომელიც პლაზმაში მათი კონცენტრაციის ტოლია. თირკმელები პლაზმაში ელექტროლიტების ზუსტ კონცენტრაციას ინარჩუნებს. ეს ჰომეოსტაზის მაგალითია, რომელიც 44-ე თავშია განხილული.

პლაზმაში გახსნილი ნივთიერებების სხვა მნიშვნელოვანი კლასი ცილებია, რომელთაც ბევრი ფუნქცია აკისრიათ. ისინი ას-

რულებენ ბუფერების ფუნქციას, ინარჩუნებენ სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის ოსმოსურ ბალანსს და სისხლის წებოვნების (სისქის) ჩამოყალიბებაში მონაწილეობენ. პლაზმის ცილების სხვადასხვა ტიპს განსაზღვრული ფუნქციები აკისრიათ. ზოგი ლიპიდების თანმხლებია, რომლებიც წყალში უხსნადებია და მხოლოდ მაშინ შეუძლიათ სისხლში გადაადგილება, თუ ცილასთან არიან დაკავშირებული. ცილების სხვა კლასი, იმუნოგლობულინები – ანტისხეულებია და ორგანიზმში შეჭრილ ვირუსებთან და სხვა უცხო აგენტებთან ბრძოლაში იღებენ მონაწილეობას (იხ. თავი 43). პლაზმის ცილა ფიბრინოგენი შედედებას უზრუნველყოფს, რაც სისხლძარღვის დაზიანებისას სისხლის ჟონვას აჩერებს. სისხლის პლაზმა, რომლისგანაც შედედების ფაქტორები მოცილებულია, შრატად იწოდება. პლაზმა ასევე შეიცავს ნაერთთა მრავალფეროვნებას, რომელთა გადატანა ხდება სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეში. მათ შორის არის საკვები ნივთიერებები, მეტაბოლიზმის ნარჩენები, სასუნთქი აირები და ჰორმონები. სისხლის პლაზმა და ქსოვილური სითხე შემადგენლობით მსგავსია, გარდა იმისა, რომ პლაზმაში ცილების მაღალი კონცენტრაციაა (კაპილარების კედლები ცილების მიმართ ცუდი გამტარია).

### უჯრედული ელემენტები

პლაზმაში ორი კლასის უჯრედებია მოთავსებული (**სურ. 42.15**): **სისხლის წითელი უჯრედები**, რომლებსაც ჟანგბადი გადააქვთ და **სისხლის თეთრი უჯრედები**, რომლებიც ორგანიზმის დაცვაში იღებენ მონაწილეობას.

| პლაზმა 55%                                                              |                                          |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| შემადგენელი კომპონენტი                                                  | მთავარი ფუნქციები                        |
| წყალი                                                                   | გამხსნელი სხვა ნივთიერებების გადასატანად |
| იონები (სისხლის ელექტროლიტები)                                          |                                          |
| ნატრიუმი                                                                | ოსმოსური ბალანსი, pH                     |
| კალიუმი                                                                 | ბუფერი და მემბრანის                      |
| კალციუმი                                                                | გამტარებლობის რეგულაცია                  |
| მაგნიუმი                                                                |                                          |
| ქლორი                                                                   |                                          |
| ბიკარბონატები                                                           |                                          |
| პლაზმის ცილები                                                          |                                          |
| ალბუმინი                                                                | ოსმოსური ბალანსი, pH ბუფერი              |
| ფიბრინოგენი                                                             | შედეგა                                   |
| იმუნოგლობულინები (ანტისხეულები)                                         | დაცვა                                    |
| სისხლის მიერ გადატანილი ნივთიერებები                                    |                                          |
| საკვები ნივთიერებები (როგორიცაა გლუკოზა, ცხიმოვანი მჟავები, ვიტამინები) |                                          |
| მეტაბოლიზმის ნარჩენი პროდუქტები                                         |                                          |
| სუნთქვის აირები (ჟანგბადი, ნახშირორჟანგი)                               |                                          |
| ჰორმონები                                                               |                                          |



| უჯრედული ელემენტები 45%                |                            |                                                                        |
|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| უჯრედის ტიპი                           | რაოდენობა სისხლის 1 მკლ-ში | ფუნქციები                                                              |
| ერიტროციტები (სისხლის წითელი უჯრედები) | 5-6 მილიონი                | ჟანგბადის ტრანსპორტი და ნახშირორჟანგის ტრანსპორტში მონაწილეობის მიღება |
| ლეიკოციტები (სისხლის თეთრი უჯრედები)   | 5,000-10,000               | დაცვა და იმუნიტეტი                                                     |
| ბაზოფილები                             |                            |                                                                        |
| ლიმფოციტები                            |                            |                                                                        |
| ეოზინოფილები                           |                            |                                                                        |
| ნეიტროფილები                           |                            |                                                                        |
| მონოციტები                             |                            |                                                                        |
| თრომბოციტები                           | 250,000-400,000            | სისხლის შედეგა                                                         |

#### ▲ სურათი 42.15. ძუძუმწოვრების სისხლის შემადგენლობა.

მესამე უჯრედული ელემენტი თრომბოციტებია, რომლებიც უჯრედის ფრაგმენტებს წარმოადგენენ და შედეგებაში იღებენ მონაწილეობას.

ერიტროციტები. სისხლის წითელი უჯრედები, ანუ ერიტროციტები სისხლში ყველაზე დიდი რაოდენობით გვხვდება. ადამიანის სისხლის თითოეული მიკროლიტრი (მკლ, ან მმ3) 5-6 მილიონ ერიტროციტს შეიცავს და მთლიან სისხლში (5 ლ) დაახლოებით 25 ტრილიონი ერიტროციტია.

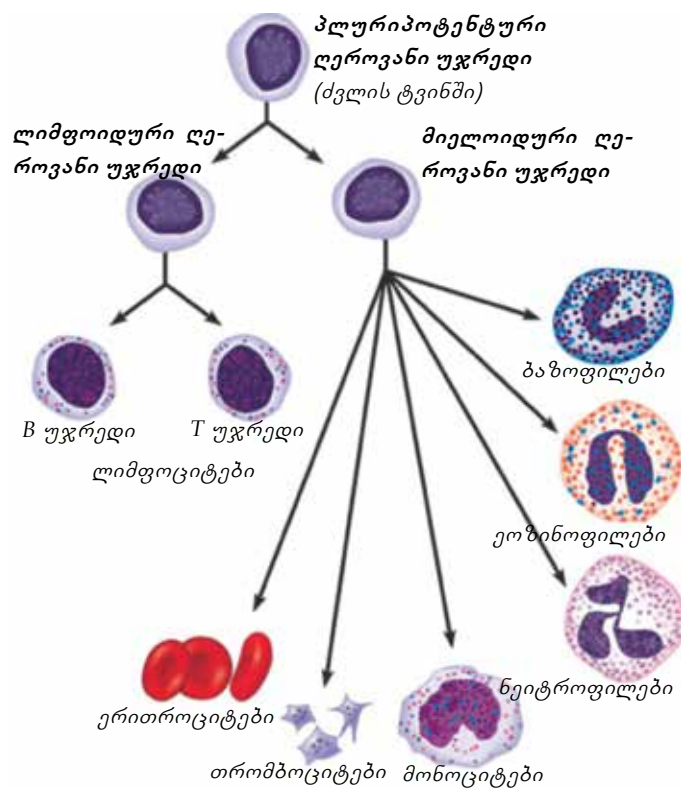
ერიტროციტები სტრუქტურისა და ფუნქციის კავშირის საუკეთესო მაგალითია. მათი ფუნქცია პლაზმურ მემბრანაში ჟანგბადის სწრაფი ტრანსპორტით განისაზღვრება. ადამიანის ერიტროციტები პატარა დისკებია (7-8.5 მკმ დიამეტრის), რომლებიც ცენტრში უფრო თხელია, ვიდრე კიდეებში. მათი მცირე ზომა და ჩაზნექილი ზედაპირი მთელი ერიტროციტების პოპულაციის დიდი ზედაპირის ფართობს უზრუნველყოფს და რაც უფრო მეტია მოცემულ მოცულობაში ერიტროციტების ზედაპირის ფართობი, მით სწრაფად ხდება ჟანგბადის დიფუზია. ძუძუმწოვართა ერიტროციტებს ბირთვი არ აქვთ. ამის გამო უჯრედში დიდი სივრცეა რკინის შემცველი ცილის – ჰემოგლობინისთვის, რომელიც ჟანგბადის ტრანსპორტის ფუნქციას ასრულებს (იხ. სურ. 5.20). ერიტროციტებს არ აქვთ მიტოქონდრიები და ატფ-ს ანაერობული მეტაბოლიზმით წარმოქმნიან. ჟანგბადის ტრანსპორტი ნაკლებად ეფექტური იქნებოდა მათი საკუთარი მეტაბოლიზმი რომ აერობული ყოფილიყო, და თვითონვე რომ დაეხარჯათ ის ჟანგბადი, რომელიც გადააქვთ.

მიუხედავად პატარა ზომისა, ერიტროციტი ჰემოგლობინის 250 მილიონ მოლეკულას შეიცავს. იქიდან გამომდინარე, რომ ჰემოგლობინის თითოეული მოლეკულა ჟანგბადის ოთხ მოლეკულას

იკავშირებს, ერთ ერიტროციტს მილიარდამდე ჟანგბადის მოლეკულის გადატანა შეუძლია. მკვლევარებმა ნახეს, რომ ჰემოგლობინის აზოტის ოქსიდის (NO) დაკავშირების უნარიც აქვს. როდესაც ერიტროციტები ფილტვების, ლაყურების ან სუნთქვის სხვა ორგანოს კაპილარებში გადის, ჟანგბადი ერიტროციტებში დიფუნდირდება, სადაც ჰემოგლობინი ჟანგბადსა და აზოტის ოქსიდს იკავშირებს. სისტემური წრის კაპილარებში ჟანგბადი ჰემოგლობინს სცილდება და უჯრედებში გადის. აზოტის ოქსიდი კაპილარების კედლის მოდუნებას იწვევს, რაც, სავარაუდოდ, ჟანგბადის დიფუზიას უნდა უწყობდეს ხელს.

ლეიკოციტები. სისხლის თეთრი უჯრედების, ანუ ლეიკოციტების ხუთ მთავარ ტიპს განასხვავებენ: ნეიტროფილებს, ბაზოფილებს, ეოზინოფილებს, მონოციტებს და ლიმფოციტებს (იხ. სურ. 42.15). მათი ფუნქცია ინფექციებთან ბრძოლაა. მაგალითად, მონოციტები და ნეიტროფილები ფაგოციტებია. ისინი ბაქტერიებსა და სხეულის მკვდარ უჯრედებს შთანთქავენ და ინელებენ. როგორც 43-ე თავში ვნახავთ, ლიმფოციტები სპეციალიზებულ B და T უჯრედებად ვითარდებიან, რომლებიც უცხო სხეულების მიმართ იმუნურ პასუხს ქმნიან. სისხლის თეთრი უჯრედები უმეტეს დროს მიმოქცევის სისტემის გარეთ ატარებენ. ისინი პატრულირებენ ქსოვილურ სითხესა და ლიმფურ სისტემაში, სადაც პათოგენებთან მთავარი ბრძოლები იმართება. ჩვეულებრივ, სისხლის ერთი მიკროლიტრი 5,000-10,000 ლეიკოციტს შეიცავს, მაგრამ მათი რაოდენობა დროებით იზრდება, როცა სხეული ინფექციას ებრძვის.

თრომბოციტები. თრომბოციტები სისხლის მესამე უჯრედული ელემენტებია. ისინი უჯრედული ფრაგმენტებია 2-3 მკმ დიამეტრით. მათ ბირთვი არა აქვთ და ძელის ტვინის დიდი უჯრედების ციტოპ-



▲ **სურათი 42.16. სისხლის უჯრედების დიფერენცირება.** ზოგი პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედი ლიმფოიდურ ლეროვან უჯრედად დიფერენცირდება, რომელიც შემდგომში და თ უჯრედებად ყალიბდება, ლიმფოციტების ორი ტიპია, რომლებიც დაცვით იმუნური პასუხის წარმოქმნაში იღებენ მონაწილეობას (იხილეთ 43-ე თავი). სისხლის ყველა სხვა უჯრედი მიელოიდური ლეროვანი უჯრედიდან ვითარდება.

ლაზმური ფრაგმენტებიდან ვითარდებიან. შემდეგ თრომბოციტები გადადიან სისხლში და შედეგების პროცესში იღებენ მონაწილეობას.

## ლეროვანი უჯრედები და უჯრედული ელემენტების შეცვლა

სისხლის უჯრედული ელემენტები (ერითროციტები, ლეიკოციტები და თრომბოციტები) ადამიანის სიცოცხლის განმავლობაში მუდმივად იცვლებიან. მაგალითად, ერითროციტები, ჩვეულებრივ, მხოლოდ სამი ან ოთხი თვე ცირკულირებენ და შემდეგ ფაგოციტური უჯრედების მეშვეობით ღვიძლსა და ელენთაში იშლებიან. ფერმენტები ინელებენ ძველი უჯრედების მაცრომლევულებს. ბიოსინთეზის გზით, მონომერების გამოყენებით, ახალი მაცრომლევულების აწყობას აქვს ადგილი. მაგალითად, ამინომჟავები სისხლის ძველი უჯრედებიდან მიიღება, ახალი ნივთიერებები და ენერგია კი – საკვებიდან. ძველი ერითროციტების ჰემოგლობინის რკინის ატომები ახალი ჰემოგლობინის მოლეკულებში ერთვება.

ერითროციტები, ლეიკოციტები და თრომბოციტები საერთო წყაროდან ვითარდებიან, რასაც პლურიპოტენტურ ლეროვან უჯრედებს უწოდებენ, რომლებიც ძვლის წითელ ტვინშია მოთავსებული, კერძოდ, ნეკნებში, ხერხემალში, მკერდის ძვალსა და მენჯ-

ში (სურ. 42.16). „პლურიპოტენტური“ ნიშნავს, რომ ამ უჯრედებს სისხლის ნებისმიერი სხვა ტიპის უჯრედებად დიფერენცირება შეუძლია. პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედები ემბრიონში ვითარდება და პოპულაციის განახლება ხდება სისხლის უჯრედული ელემენტებით განახლებისას (ლეროვან უჯრედებზე მეტი ინფორმაციისთვის იხ. 21-ე თავი).

ერითროციტების წარმოქმნას უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმი უზრუნველყოფს, რომელიც სისხლით ქსოვილებთან მიტანილი ჟანგბადის რაოდენობის მიმართ მგრძნობიარეა. თუ ქსოვილი საკმარისი რაოდენობის ჟანგბადს არ იღებს, თირკმელი ასინთეზებს და გამოყოფს ჰორმონს, რომელსაც ერითროპოეტინი (ეპო) ჰქვია და რომელიც ერითროციტების წარმოქმნას ასტიმულირებს. თუ სისხლს უფრო მეტი ჟანგბადი მიაქვს, ვიდრე ქსოვილები იყენებენ, ეპო-ს დონე ეცემა და ერითროციტების წარმოქმნა ნელდება.

ექიმები ანემიით დაავადებული ადამიანების სამკურნალოდ იყენებენ სინთეტურ ეპო-ს. ანემია არის მდგომარეობა, რომელიც ხასიათდება ჰემოგლობინის ნორმაზე დაბალი დონით. ზოგი ათლეტი ეპო-ს ერითროციტების დონის მოსამატებლად იყენებს. ეს სისხლის დოპინგის სახელით არის ცნობილი და აკრძალულია ოლიმპიური კომიტეტის და სხვა საპორტული ფედერაციების მიერ. 2002 წელს სოლტ ლეიკ სიტის ზამთრის ოლიმპიადაში მონაწილე ზოგი ათლეტი დადებითი რეაქციის მქონე აღმოჩნდა ეპო-ს მიმართ და მათ მედლები ჩამოერთვათ.

ბოლო ხანებში მკვლევრებმა წარმატებას მიაღწიეს პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედების გამოყოფასა და ლაბორატორიულ კულტურებში მათი გაზრდის საქმეში. ცალკე გამოყოფილი პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედი შეიძლება მალე მთელი რიგი დაავადებების, მათ შორის ლეიკემიის სამკურნალოდ იქნეს გამოყენებული. ლეიკემიით დაავადებულ ადამიანებს აქვთ იმ ლეროვანი უჯრედების სიმსივნური გადაგვარება, რომლებიც ლეიკოციტებს წარმოქმნიან. სიმსივნური უჯრედები გამოეყოფიან იმ ლეროვან უჯრედებს, რომლებიც ჩვეულებრივ ერითროციტებს წარმოქმნიან და უსაზღვრო რაოდენობის ლეიკოციტებს წარმოშობენ, რომლებიც, ძირითადად, ანომალურია. ლეიკემიის მკურნალობის ერთ-ერთი ექსპერიმენტული მეთოდი პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედების მოცილება ძვლის ტვინის დაზიანების გზით და არასიმსივნური ლეროვანი უჯრედებით ჩანაცვლება. 30 ასეთი უჯრედი ძვლის ტვინის სრულ ხელახლა დასახლებას ახერხებს.

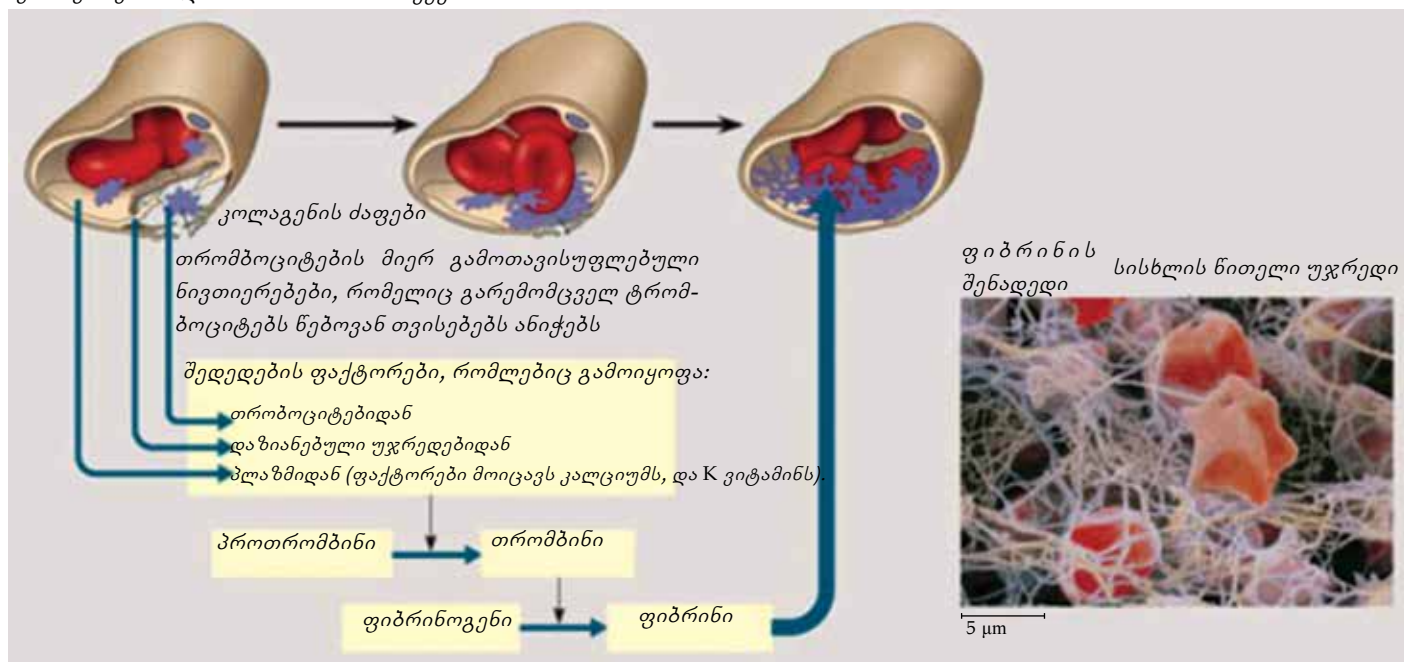
## სისხლის შედეგა

ყველა ადამიანი იჭრის ან იფხაჭნის რამეს დროდადრო, მაგრამ სისხლისგან არ ვიცლებით, რადგან სისხლს შედეგების უნარი გააჩნია. სისხლში შემადგენელი ყოველთვის არააქტიური ფორმის სახითაა. მას **ფიბრინოგენს** უწოდებენ. თრომბი მხოლოდ მაშინ წარმოიქმნება, როდესაც პლაზმის ეს ცილა **ფიბრინად** გარდაიქმნება, ძაფებს წარმოქმნის და თრომბის ჩარჩოს აყალიბებს. შედეგება თრომბოციტებიდან შედეგების ფაქტორების გამოყოფისას იწყება და რეაქციების რთულ ჯაჭვს მოიცავს, რომელსაც საბოლოოდ ფიბრინოგენიდან ფიბრინის წარმოქმნამდე მივყავართ (სურ. 42.17). შედეგების უამრავი ფაქტორია აღმოჩენილი, მაგრამ მექანიზმი ბოლომდე ჯერ მაინც გარკვეული არ არის. გენეტიკური მუტაცია, რომელიც შედეგების რომელიმე ნაბიჯს მაინც აზიანებს, **ჰემოფილიას** იწვევს, დაავადებას, რომლის დროსაც პატარა ნაკაწრიც კი ძლიერ სისხლდენას იწვევს.

1 შედეგების პროცესი იწყება, როდესაც სისხლძარღვის ენდოთელიუმი ზიანდება და სისხლი ძარღვის კედლის შემაერთებელ ქსოვილთან მოდის შეხებაში, თრომბოციტები შემაერთებული ქსოვილის კოლაგენს უკავშირდ-

2 თრომბოციტები ქმნიან ებიან და გამოყოფენ ნივთიერე-საცობს, რომელიც სისხ-ბებს, რომლებიც მათ გარშემო უბ-ლდენის სწრაფ შეჩერებას ნებს ნებოვანს ხდის. ინვეს.

3 სისხლძარღვის ძლიერი დაზიანებისას საცობი ფიბრინის კოლტით მაგრდება. ფიბრინის წარმოქმნა მრავალსაფეხურებრი-ვი პროცესია. აგრეგირებული თრომბოციტებდან, ან დაზიანებ-ული უჯრედებიდან გამოყოფილი შედეგების ფაქტორები ერევა პლაზმაში არსებულ შედეგების ფაქტორებს და იქმნება აქტივაცი-ის კასკადი, რომელიც პლაზმის ცილა პროთრომბინს თრომბინად გარდაქმნის, თრომბინი თვითონ ფერმენტია, რომელიც შედეგების ბოლო საფეხურის კატალიზირებას ახდენს. ბოლო საფეხურზე ხდება ფიბრინოგენის ფიბრინად გარდაქმნა, ფიბრინის ძაფები იხლართება და ქმნის ქსელს (იხილეთ ფერადი SEM).



#### ▲ სურათი 42.17. სისხლის შედეგება.

შედეგების საწინააღმდეგო ფაქტორები ჩვეულებრივ ხელს უშლიან დაუზიანებელ სისხლძარღვში შედეგების პროცესის დაწყებას. მაგრამ ზოგჯერ ფიბრინები დაუზიანებელ სისხლძარღვშიც კოაგულირებენ და აბლოკირებენ სისხლის დინებას. ამას **თრომბს** უწოდებენ. ასეთი პოტენციურად საშიში თრომბი შეიძლება განვი-თარდეს გულ-სისხლძარღვთა დაავადებების მქონე ადამიანებში.

### გულსისხლძარღვთა დაავადებები

აშშ-ში სიკვდილიანობის ნახევარზე მეტი გულსისხლძარღვთა დაავადებებზე მოდის. **გულსისხლძარღვთა დაავადებების** ტენდენცია გარკვეულწილად მემკვიდრეობითია, მაგრამ ცხოვრების სტილი ასევე დიდ როლს თამაშობს. არაგენეტიკური ფაქტორები, რომლებიც გულსისხლძარღვთა პრობლემების რისკს ზრდის, არის მოწევა, ვარჯიშის სიმცირე, საკვებ რაციონში ცხოველური ცხიმის სიჭარბე და სისხლში ქოლესტერინის მაღალი დონე.

ქოლესტერინი სისხლის პლაზმაში ქოლესტერინის მოლეკუ-ლების და ცილასთან დაკავშირებული სხვა ცხიმოვანი მოლეკულე-ბის შემცველი ნაწილაკების სახით არსებობს.

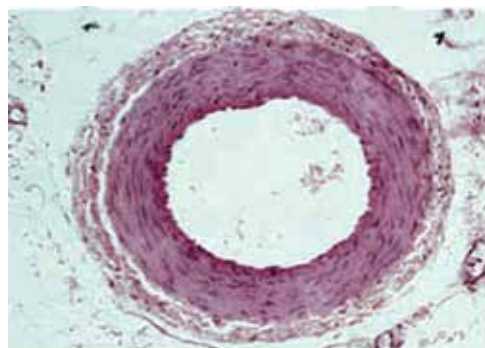
ნაწილაკების ერთი ტიპი **დაბალი სიმკვრივის ლიპოპროტე-**

**ინია** (დსლ), რომელსაც ხშირად „ცუდ ქოლესტერინსაც“ უწოდებენ. ისინი არტერიების შიდა კედელზე არტერიულ ფოლაქებს ქმნიან. მეორე ტიპია **მაღალი სიმკვრივის ლიპოპროტეინები** (მსლ), ანუ „კარგი ქოლესტერინები“. ისინი ქოლესტერინის დაგროვებას ამცი-რებენ. ვარჯიში ზრდის მსლ-ის კონცენტრაციას, მაშინ როდესაც მოწევა დსლ/მსლ შეფარდებაზე საწინააღმდეგო ეფექტი აქვს.

ჯანმრთელ არტერიებს გლუვი შიდა ზედაპირი აქვთ, რაც სის-ხლის დინებას უწყობს ხელს. ქოლესტერინის დაგროვება ასელებს და აუხეშებს კედელს. ჩნდება ფოლაქები, რომელზეც დამატებითი შემაერთებული ქსოვილი და უფრო მეტი ქოლესტერინი ილექება. ასეთი ფოლაქები არტერიის სანათურს ავიწროებს და იწვევს ქრო-ნიკულ გულსისხლძარღვთა დაავადებას, რომელსაც **ათეროსკლე-როზი** ეწოდება (სურ. 42.18).

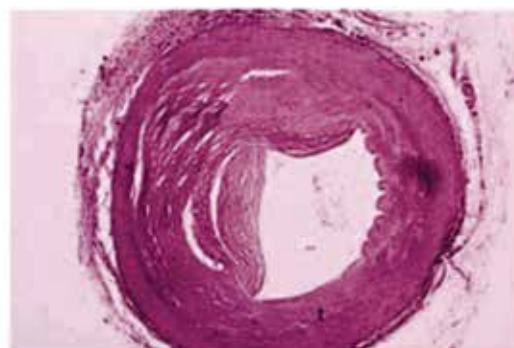
ათეროსკლეროზული არტერიების უხეში შიდა ზედაპირი თრომბოციტების ადჰეზიას უწყობს ხელს, რაც რთავს შედეგების პროცესს და გავლენას ახდენს მიმოქცევაზე.

**ჰიპერტენზია** (სისხლის მაღალი წნევა) ხელს უწყობს ათეროს-კლეროზს და ზრდის გულის შეტევისა და სისხლჩაქცევის რისკს. ათეროსკლეროზი ზრდის სისხლის წნევას, რადგან ავიწროებს სის-ხლძარღვებს და ამცირებს მათ ელასტიურობას.



(ა) ნორმალური არტერია

50 μm



(ბ) ნაწილობრივ დახშული არტერია

250 μm

▲ **სურათი 42.18. ათეროსკლეროზი.** ეს სინათლის მიკროგრაფი აჩვენებს (ა) ნორმალური (ჯანმრთელი) და (ბ) ათეროსკლეროზული ფოლაქის მქონე არტერიას. ფოლაქი ძირითადად ბოჭკოვანი შემავრებული ქსოვილისგან შედგება.

ერთი ჰიპოთეზის მიხედვით, ქრონიკული მაღალი წნევა აზიანებს ენდოთელიუმს და ხელს უწყობს ფოლაქების წარმოქმნას. საბედნიეროდ, ჰიპერტენზიის დიაგნოსტიკა ადვილია. აგრეთვე შესაძლებელია მისი კონტროლირება დიეტით, ვარჯიშითა და წამლებით ან მათი კომბინაციით. 90-ზე მეტი დიასტოლური წნევა შეიძლება იყოს შეშფოთების მიზეზი. მუდმივი ჰიპერტენზიით ცხოვრება, როგორიცაა 200/120 – კატასტროფა.

ათეროსკლეროზის პროგრესირებისას არტერიები უფრო და უფრო ვიწროვდება და გულის შეტევისა და სისხლჩაქცევის რისკი იზრდება. არსებობს გამაფრთხილებელი ნიშნები. მაგალითად, კორონარული არტერიების ნაწილობრივი ბლოკირებისას ადამიანს შეიძლება ჰქონდეს მწვავე ტკივილი გულმკერდის არეში. ამ მდგომარეობას ანგინა პექტორისს უწოდებენ. ტკივილი შესაძლოა იმით იყოს განპირობებული, რომ გულს ჟანგბადის მიწოდება აკლდება. ასეა თუ ისე, ბევრი ათეროსკლეროზიანი პაციენტი თავის მდგომარეობას მანამდე ვერ აცნობიერებს, სანამ კატასტროფა არ მოხდება.

ავადმყოფობის საბოლოო ეტაპი გულის შეტევა ან სისხლჩაქცევაა. გულის შეტევა არის გულის კუნთის ქსოვილის კვდომა, რომელიც ერთი ან მეტი კორონარული არტერიის ხანგრძლივი ბლოკირების შედეგია. კორონარული არტერიებით გულის კუნთი ჟანგბადით მდიდარ სისხლს იღებს. რამდენადაც მათი დიამეტრი პატარაა, ისინი ძალიან მგრძნობიარეა ბლოკირების მიმართ. ასეთმა ბლოკადამ შეიძლება გულის კუნთი სწრაფად დაზიანდეს, რამდენადაც მუდმივად მცემი გულის კუნთი ჟანგბადის გარეშე დიდი ხნით ვერ ძლებს. ინსულტი (ანუ ტვინში სისხლჩაქცევა) ნერვული ქსოვილის კვდომაა, რომელიც ტვინის არტერიების ბლოკადითაა განპირობებული.

გულის შეტევები და სისხლჩაქცევები ხშირად თრომბის მიერ არტერიის ბლოკირების შედეგია. თრომბის წარმოქმნის მთავარი მიზეზია დსლ-ის დაგროვებით განპირობებული ანთებითი რეაქცია. ასეთი ანთება, რომელიც სხეულის ქროილობაში ბაქტერიის მოხვედრისას აღძრული დამცველობითი რეაქციის მსგავსია (**იხ. სურ. 43.6**), იწვევს ფოლაქების გახლეჩას და იმ ფრაგმენტების

გამოთავისუფლებას, რომლებიც თრომბს წარმოქმნიან. თრომბი შეიძლება კორონარულ ან ტვინის არტერიაში გაჩნდეს. ის შეიძლება რომელიმე სხვა არტერიაში წარმოიქმნას და მერე სისხლის მიმოქცევის სისტემით აღნიშნულ ორგანოებში გადავიდეს. გადატანილი კოლტი, რომელსაც ემბოლიას უწოდებენ, გადაადგილება მანამ, სანამ იმდენად ვიწრო არტერიაში არ მოხვდება, რომ გაიჭედოს. ბუნებრივია, ემბოლიის გაჭედვის ალბათობა მაღალია ფოლაქების მქონე შევიწროებულ არტერიებში.

ემბოლია იწვევს სისხლის დინების ბლოკირებას და იმის იქით მყოფი გულის ან ტვინის ქსოვილი ჟანგბადის ნაკლებობის გამო იღუპება. თუ გულის დაზიანება მასში ელექტრული იმპულსის გავრცელებას წყვეტს, შეიძლება გულის მუშაობის სიხშირე მნიშვნელოვნად შეიცვალოს ან გულმა საერთოდაც შეწყვიტოს მუშაობა. ასეთ შემთხვევაში მსხვერპლი შეიძლება გადარჩეს ადეკვატური სასწრაფო ჩარევით, როგორიცაა კარდიოპულმონარული რეანიმაცია ან რამე სხვა პროცედურა. სისხლჩაქცევის ეფექტი და ადამიანის გადარჩენის ალბათობა დამოკიდებულია ტვინის დაზიანებული ქსოვილის ფართობსა და მდებარეობაზე.

## კონცეფცია ცისცი 42.4

1. დაახლოებით სისხლის რამდენ ნითელ უჯრედს წარმოქმნის ადამიანის ძვლის ნითელი ტვინი ყოველდღე, თუ მხდველობაში მივიღებთ, რომ სისხლის ნითელი უჯრედების საერთო რაოდენობა 25 ტრილიონია (2.5 × 10<sup>13</sup>) და უჯრედების საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა კი 4 თვე.
2. ახსენით, რატომ ითხოვენ ექიმები სისხლის თეთრი უჯრედების დათვლას ანთებითი პროცესების დროს.
3. როგორ ახერხებს გადანერგილი ძვლის ტვინის უჯრედები, ჩანაცვლოს უჯრედების დიდი მრავალფეროვნება, რომელიც ძვლის ტვინში წარმოიქმნება.

## აიბთა ცვლა განსაკუთრებულ სუნთქვით ზღაპირებზე ხორციელდება

ამ თავში **აირთა ცვლაზე** გვექნება საუბარი. მიუხედავად იმისა, რომ ამ პროცესს ხშირად სუნთქვას უწოდებენ, ის არ უნდა ავეუროთ ენერგიის გარდაქმნის პროცესში, რომელსაც ადგილი აქვს უჯრედის სუნთქვისას. აირთა ცვლა გარემოდან ჟანგბადის შეთვისებას და ნახშირორჟანგის გამოყოფას გულისხმობს (**სურ. 42.19**). ეს მიმოცვლა საჭიროა უჯრედული სუნთქვის პროცესში ატფ-ის წარმოქმნისთვის. მასში მონაწილეობას სუნთქვის და სისხლის მიმოქცევის სისტემები იღებენ.

ჟანგბადის წყაროს **სუნთქვის გარემო** ეწოდება. ასეთია ჰაერი ხმელეთის ცხოველებისთვის და წყალი წყალში მოზინადრეებისთვის. ატმოსფერო დედამიწისთვის ჟანგბადის მთავარი რეზერვუარია და მასში მოცულობის დაახლოებით 21% ჟანგბადია. ოკეანეები, ტბები და წყლის სხვა გარემო ჟანგბადს გახსნილი სახით შეიცავს. გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობა მნიშვნელოვნად იცვლება, მაგრამ ყოველთვის გაცილებით უფრო ნაკლებია, ვიდრე ჰაერის შესაბამის მოცულობაში.

ცხოველის სხეულის ნაწილი, სადაც გარემოსთან აირთა ცვლა მიმდინარეობს, **სუნთქვის ზედაპირად** იწოდება. ცხოველები ჟანგბადსა და ნახშირორჟანგს აქტიური ტრანსპორტის გზით არ გადაიტანენ. ასე რომ, ამ აირთა გადაადგილება სუნთქვის ზედაპირსა და გარემოს შორის მთლიანად დიფუზიის გზით ხორციელდება. დიფუზიის სიჩქარე იმ ზედაპირის ფართობის პროპორციულია, რომელშიც აირთა მიმოცვლა მიმდინარეობს და უკუპროპორციულია იმ მანძილის კვადრატის, რომელშიც დიფუზია ხორციელდება. შედეგად, სუნთქვის ზედაპირი ძირითადად თხელი და დიდი ფართობის მქონეა. ეს სტრუქტურული ადაპტაცია აირთა მიმოცვლის მაქსიმალიზაციას იწვევს. ამის გარდა, პლაზმური მემბრანის შესაბამისად ყველა ცოცხალი უჯრედი აუცილებლად სითხეში უნდა იყოს. აქედან გამომდინარე, როგორც წყლის, ისე ხმელეთის ცხოველების სუნთქვის ზედაპირები ნესტიანია და ჟანგბადი და ნახშირორჟანგი ამ ზედაპირებს წყალში გახსნის შემდეგ გადაკვეთს.

სუნთქვის ზედაპირმა მთელი ორგანიზმი ჟანგბადით უნდა უზრუნველყოს და ნახშირორჟანგი განდევნოს. ამისთვის დიდი და საკმარისი ზედაპირის გასავითარებლად მრავალფეროვანი გზა მოინახა. სუნთქვის ზედაპირი ძირითადად ორგანიზმის ზომაზე და საცხოვრებელ გარემოზე დამოკიდებული, ანუ იმაზე, იგი წყალში თუ ხმელეთზე ბინადრობს. მასზე ასევე მეტაბოლური მოთხოვნილებებიც ახდენს გავლენას. ასე რომ, ენდოთერმებს ჩვეულებრივ უფრო დიდი ზედაპირი აქვთ, ვიდრე იგივე ზომის ექტოთერმებს.

ერთუჯრედიანი ორგანიზმების და უმარტივესების უმეტესობაში აირთა ცვლა სხეულის მთელი ზედაპირით ხდება. ამის მსგავსად, შედარებით მარტივ ცხოველებში, როგორიცაა ღრუბელები, ნაწლავდრუიანები და ბრტყელი ჭიები, ყველა უჯრედის პლაზმური მემბრანა გარემოდან გარემოსთან ახლოს არის, რათა აირთა შიგნით და გარეთ დიფუზია იყოს უზრუნველყოფილი. ბევრ ცხოველში სხეულის დიდ ნაწილს არა აქვს უშუალო შეხება სასუნთქ გარე-

მოსთან. ამ ცხოველებში სუნთქვითი ზედაპირი თხელი, ნესტიანი ეპითელიუმი. იგი გამოყოფს სუნთქვით გარემოს სისხლისგან ან კაპილარებისგან. სისხლს აირები მთელ სხეულში გადააქვს (**სურ. 42.19**).

ზოგი ცხოველი მთელ კანს იყენებს სუნთქვის ორგანოდ. მაგალითად, ჭიაყელას აქვს ნესტიანი კანი და აირთა მიმოცვლა მისი მთელი სხეულის ზედაპირით ხორციელდება. ჭიაყელას კანქვეშ კაპილარების ქსელია. რამდენადაც სუნთქვის ზედაპირი ნესტიანი უნდა იყოს, ჭიაყელები და სხვა კანით მსუნთქავები, მათ შორის ამფიბიებიც, წყალში ან ნესტიან გარემოში უნდა ბინადრობდნენ.

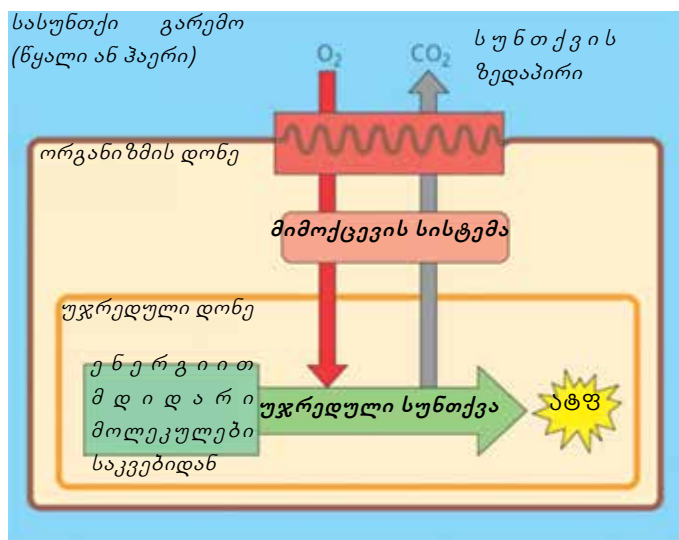
ცხოველები, რომელთა ერთადერთი სუნთქვის ორგანო კანია, ჩვეულებრივ პატარა ზომისაა და გრძელი და თხელი ან ბრტყელი სხეული აქვთ. მათი ზედაპირის ფართობის შეფარდება სხეულის მოცულობასთან დიდია. ცხოველთა უმეტესობას არ აქვს საკმარისი ფართობის სხეულის ზედაპირი, რათა აირთა მიმოცვლა დაკმაყოფილდეს. ამ სირთულის გადაწყვეტა სუნთქვის ორგანოს განვითარებაში მდგომარეობს, რომელიც დატოტვილია და დიდი ფართობი გააჩნია აირთა მიმოცვლისთვის. ლაყურები, ტრაქეა და ფილტვები სამი ყველაზე გავრცელებული სასუნთქი ორგანოა.

## წყლის ცხოველების ლაყურები

**ლაყურები** სხეულის წარმონაქმნებია, რომლებიც წყალთან უშუალო შეხებაშია. ზოგ უხერხემლოში, როგორიცაა ვარსკვლავები, ლაყურებს მარტივი ფორმა აქვს და მთელ სხეულზე არის გავრცელებული (**სურ. 42.20 ა**). ბევრ სეგმენტურ ჭიას ან ყოველი სეგმენტის გასწვრივ აქვს ლაყურები (**სურ. 42.20 ბ**), ან თავისა და კუდის არეში. ნიჟარიანების (**სურ. 42.20 გ**) და კიბოსნაირების (**სურ. 42.20 დ**) ლაყურები სხეულის გარკვეულ უბანშია მოთავსებული. ლაყურების მთლიანი ზედაპირის ფართობი ზოგჯერ მთელ დარჩენილ სხეულის ფართზე უფრო მეტია.

წყალს, როგორც სუნთქვის გარემოს უპირატესობაც და ნაკლებიც აქვს. ადვილია აირთა ცვლაში მონაწილე უჯრედების მემბრანების ნოტიოდ შენარჩუნება, რამდენადაც ლაყურები წყლით არის შემოფარგლული. მაგრამ ჟანგბადის კონცენტრაცია წყალში დაბალია. რაც უფრო თბილი და მარილიანია წყალი, მით ნაკლები ჟანგბადია მასში გახსნილი (ზოგი მტკნარი და ზღვის წყალი ერთ ლიტრში, მხოლოდ 4-8 მლ. ჟანგბადს შეიცავს). ცხოველის მიერ ჟანგბადის შესათვისებლად ლაყურები ძალიან ეფექტური უნდა იყოს. ერთი დამხმარე პროცესი არის ვენტილაცია, ანუ სასუნთქი გარემოს დინება სასუნთქი ზედაპირისკენ. ვენტილაციის გარეშე, წყალთან აირების მიმოცვლის მერე წარმოიქმნებოდა უბანი, რომელშიც ჟანგბადის დაბალი და ნახშირორჟანგის მაღალი კონცენტრაცია იქნებოდა. კიბოებსა და ლობსტერებს პედალის მსგავსი საცეცები აქვთ, რომელიც წყალს ლაყურებისკენ აგზავნის. თევზების ლაყურების ვენტილაცია იმ წყლის დინებით ხდება, რომელიც თევზის პირში შედის, გაივლის ხახას, ლაყურებს და სხეულიდან გარეთ გამოდის (**სურ. 42.21**). რამდენადაც წყალი მკვრივია და ჟანგბადის მცირე მოცულობას შეიცავს, თევზების უმეტესობას ლაყურების ვენტილაციისთვის საკმაო ენერგიის ხარჯვა უწევს.

კაპილარების წყობა თევზის ლაყურში აძლიერებს აირთა ცვლას და ამცირებს ვენტილაციის ენერგეტიკულ დანახარჯს. სისხლი ლაყურში წყლის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით მიდის. ეს სისხლში ჟანგბადის გადასვლის ეფექტურობას



▲ სურათი 42.19. აირთა ცვლის როლი ბიოენერგეტიკაში.

აძლიერებს. აღნიშნულ მექანიზმს ურთიერთსაწინააღმდეგო დინებით მიმოცვლა ჰქვია. როდესაც სისხლი ლაყურის კაპილარში მოძრაობს, ის სულ უფრო და უფრო ივსება ჟანგბადით, რადგან ის მაშინვე ხვდება წყალს, რომელშიც ჟანგბადის კონცენტრაცია მაღალია. ეს ნიშნავს, რომ კაპილარის მთელ სიგრძეზე დიფუზიის გრადიენტი ისეთია, რომ ხელს უწყობს ჟანგბადის გადასვლას წყლიდან სისხლში. ასეთი მიმოცვლა იმდენად ეფექტურია, რომ ლაყურს შეუძლია წყალში გახსნილი ჟანგბადის 80%-ის შეთვისება. ეს მექანიზმი ტემპერატურის რეგულაციისთვისაც მნიშვნელოვანია. რაც აღნიშნული იყო მე-40 თავში და ასევე მიმოხილული იქნება ძუძუმწოვართა თირკმლის მოქმედებაშიც, რომელიც 44-ე თავშია წარმოდგენილი.

ლაყურები ხმელეთზე მობინადრე ორგანიზმებისთვის ჩვეულებრივ არამოსახერხებელია. მემბრანის ნოტიო ზედაპირი უშუალოდ რომ ეხებოდეს ჰაერს, აორთქლებით ძალიან ბევრ წყალს დაკარგავდა და ლაყურიც დაიშლებოდა, რადგან მისი ძაფები წყალთან შეხებაში ვერ მოვიდოდა და შეწებდებოდა. ხმელეთის ორგანიზმების უმეტესობაში აირთა მიმოცვლის ზედაპირი მოთავსებულია ორგანიზმის შიგნით და ატმოსფეროში ვიწრო მილებით იხსნება.

## მწერების ტრაქეალური სისტემა

ჰაერს, როგორც სუნთქვის გარემოს, წყალთან შედარებით მნიშვნელოვანი უპირატესობები აქვს. მათ შორის არის ჟანგბადის გაცილებით მაღალი კონცენტრაცია (დაახლოებით 210 მლ ჟანგბადი ჰაერის ერთ ლიტრზე). ვინაიდან ჰაერში ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის დიფუზია უფრო სწრაფად ხდება, ვიდრე წყალში, სასუნთქი ზედაპირების ისეთი ძლიერი ვენტილაცია საჭირო არ არის. როდესაც სუნთქვის ზედაპირი ჰაერიდან ჟანგბადს შეითვისებს და ნახშირორჟანგს გამოყოფს, დიფუზია სწრაფად მოითვს მეტ ჟანგბადს და მიმოცვლის არედან წაიღებს ნახშირორჟანგს. ხმელეთის ცხოველების ვენტილაციისთვის ნაკლები ენერგიაა საჭირო, რამდენადაც ჰაერი გაცილებით უფრო მსუბუქია და გაცილებით უფრო ადვილია მისი ამოტუმბვა. ამასთანავე, იგივე რაოდენობის ჟანგ-

ბადის მისაღებად წყალთან შედარებით გაცილებით ცოტა ჰაერის მოცულობის ჩასუნთქვაა საჭირო. მაგრამ ამ უპირატესობასთან ერთად პრობლემაც იჩენს თავს: სუნთქვის ზედაპირი, რომელიც დიდი და ნესტიანი უნდა იყოს, მუდმივად კარგავს წყალს აორთქლების გზით. პრობლემა მნიშვნელოვნად მცირდება იმით, რომ სუნთქვის ზედაპირი სხეულის შიგნით არის მოთავსებული.

მაშინ, როდესაც ფილტვები ხმელეთის ცხოველების სუნთქვის ყველაზე ცნობილი სტრუქტურაა, ყველაზე ზოგადი მაინც მწერების ტრაქეალური სისტემაა.

მწერების ტრაქეალური სისტემა წარმოადგენს ჰაერის მილებს, რომლებიც სხეულის შიგნით იტოვება. ეს სხეულის შიგნით მოთავსებული აირთა მიმოცვლის ზედაპირის ერთ-ერთი ფორმაა. ყველაზე გრძელი მილები, რომელთაც ტრაქეას უწოდებენ, გარეთ იხსნება. უფრო პატარა ტოტები კი თითქმის ყველა უჯრედის ზედაპირამდე მიდის, სადაც აირთა მიმოცვლა ტრაქეალური სისტემის ბოლოში არსებული ნოტიო ეპითელიუმის გავლით ხდება (სურ. 42.22 ა). რადგან სხეულის თითქმის ყველა უჯრედი სუნთქვის სისტემასთან ახლო დისტანციაზე იმყოფება, მწერების სისხლის მიმოქცევის ღია სისტემა ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის ტრანსპორტში მონაწილეობას არ იღებს.

პატარა მწერებისთვის, ტრაქეას გავლით დიფუზიას საკმარისი რაოდენობის ჟანგბადი მოაქვს და ნახშირორჟანგი გააქვს, რათა უჯრედული სუნთქვა უზრუნველყოფილი იყოს. უფრო დიდი ზომის მწერები, რომელთაც უფრო მაღალი ენერგეტიკული მოთხოვნილება გააჩნიათ, ტრაქეალურ სისტემას სხეულის მოძრაობით ანიავებენ. ამ დროს აირის მილების რიტმულ შევიწროებას და გაფართოებას აქვს ადგილი. ფრენის დროს მწერებს ძალიან მაღალი მეტაბოლური სიჩქარე აქვთ. ისინი ამ დროს 100-200-ჯერ მეტ ჟანგბადს იყენებენ, ვიდრე მოსვენების მდგომარეობაში. ბევრ მფრენ მწერში საფრენი კუნთების მონაცვლეობითი შეკუმშვა და მოდუნება ავიწროებს და აფართოებს სხეულს, რაც ტრაქეალური სისტემიდან ჰაერის სწრაფ ამოტუმბვას უზრუნველყოფს. საფრენ კუნთებში ბევრი მიტოქონდრიაა, რაც მაღალ მეტაბოლურ სიჩქარეს უწყობს ხელს. ტრაქეის მილები ატფ-ის წარმოქმნელ თითოეულ ორგანულს ჟანგბადით ამარაგებს (სურ. 42.22 ბ). ასე რომ, ტრაქეალური სისტემის ადაპტაციები უშუალოდაა დაკავშირებული ბიოენერგეტიკასთან.

## ფილტვები

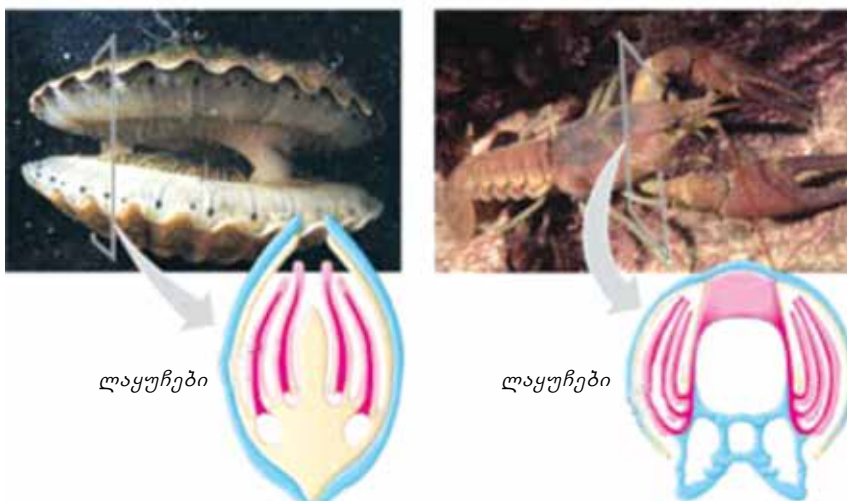
განსხვავებით ტრაქეალური სისტემისგან, რომელიც მთელ სხეულში იტოვება, ფილტვების მდგომარეობა ერთი უბნით შემოფარგლდება. რამდენადაც ფილტვების სასუნთქი ზედაპირი ყველა უჯრედთან უშუალო კონტაქტში არ იმყოფება, სისხლს გადააქვს აირები ფილტვებსა და სხეულის სხვა ნაწილებს შორის. ფილტვებს, ეპითელიუმის ქვეშ, რომელიც სუნთქვის ზედაპირს ქმნის, კაპილარების უხვი ქსელი აქვს. ფილტვები განვითარდა ობობებში, ხმელეთის ლოკოკინებისა და ხერხემლიანებში.

ხერხემლიანებს შორის ამფიბიებს შედარებით მცირე ზომის ფილტვები აქვთ, რომელიც არც თუ ისე დიდ ზედაპირს მოიცავს. ბევრს კი ფილტვები საერთოდ არ აქვთ და აირთა დიფუზია მთლიანად სხეულის ზედაპირით ხდება. მათგან განსხვავებით, რეპტილიების უმეტესობა, ყველა ფრინველი და ძუძუმწოვარი აირთა ცვლას მხოლოდ ფილტვებით ახორციელებს.



(ა) ზღვის ვარსკვლავი. ზღვის ვარსკვლავის ლაყურები კანის მარტივი მილაკოვანი გამოწვევით არის წარმოდგენილი. ყოველი ლაყურის ცარიელი ცენტრი, ცელომის (სხეულის ღრუს) გაფართოებაა. ლაყურის ზედაპირის გასწვრივ აირების მიმოცვლა დიფუზიით ხორციელდება. სითხე ცელომში ლაყურების გავლით მოძრავს და აირების გადატანას ხელს უწყობს. აირების მიმოცვლაში მილაკოვანი ფეხის ზედაპირიც მონაწილეობს.

(ბ) ზღვის ჭია. ბევრ პოლიქეტს (ანელიდების წარმომადგენელი ზღვის ჭია) სხეულის ორივე მხარეს საცეცების ორი წყვილი აქვს, რომელთაც პარაპოდებს უწოდებენ. პარაპოდები ლაყურის ფუნქციას ასრულებს და ასევე მონაწილეობს იღებ ცურვასა და ცოცვაში.



(გ) ზღვის სავარცხელა. სავარცხელას ლაყურები გრძელია. ბრტყელი ფირფიტები სხეულის ძირითადი მასიდან მკვერივი ნიჟარისკენ მიემართება. ლაყურის წამწამები წყალს მის ირგვლივ აცირკულირებს.

(დ) კიბო. კიბოსა და სხვა კიბოსნაირებს, გარეგანი ჩონჩხით დაფარული გრძელი ლაყურები აქვთ. სხეულის განსაკუთრებული საცეცები წყალს ლაყურების ზედაპირისკენ მიმართავს.

#### ▲ სურათი 42.20 აირთა ცვლაში მონაწილე ლაყურების სტრუქტურისა და სხეულის გარეგანი ზედაპირის მრავალფეროვნება.

კუები გამოწვევის წარმომადგენენ. მათში ფილტვებს აირთა მიმოცვლაში პირსა და ანუსთან არსებული ნოტიო ეპითელიუმით ეხმარება. ფილტვები და ჰაერით სუნთქვა ზოგ წყლის ხერხემლიანშიც არის განვითარებული (ფილტვიანი თევზები). ეს წარმომადგენს უანგბადით ღარიბ წყალთან ან ისეთ მდგომარეობასთან ადაპტაციას, როდესაც დროის გარკვეული მონაკვეთის გატარება ჰაერთან უშუალო შეხებაში უწევთ (მაგალითად, გუბურის დონის დაწვევას).

ზოგადად, ფილტვების ზომა და სირთულე მეტაბოლიზმის

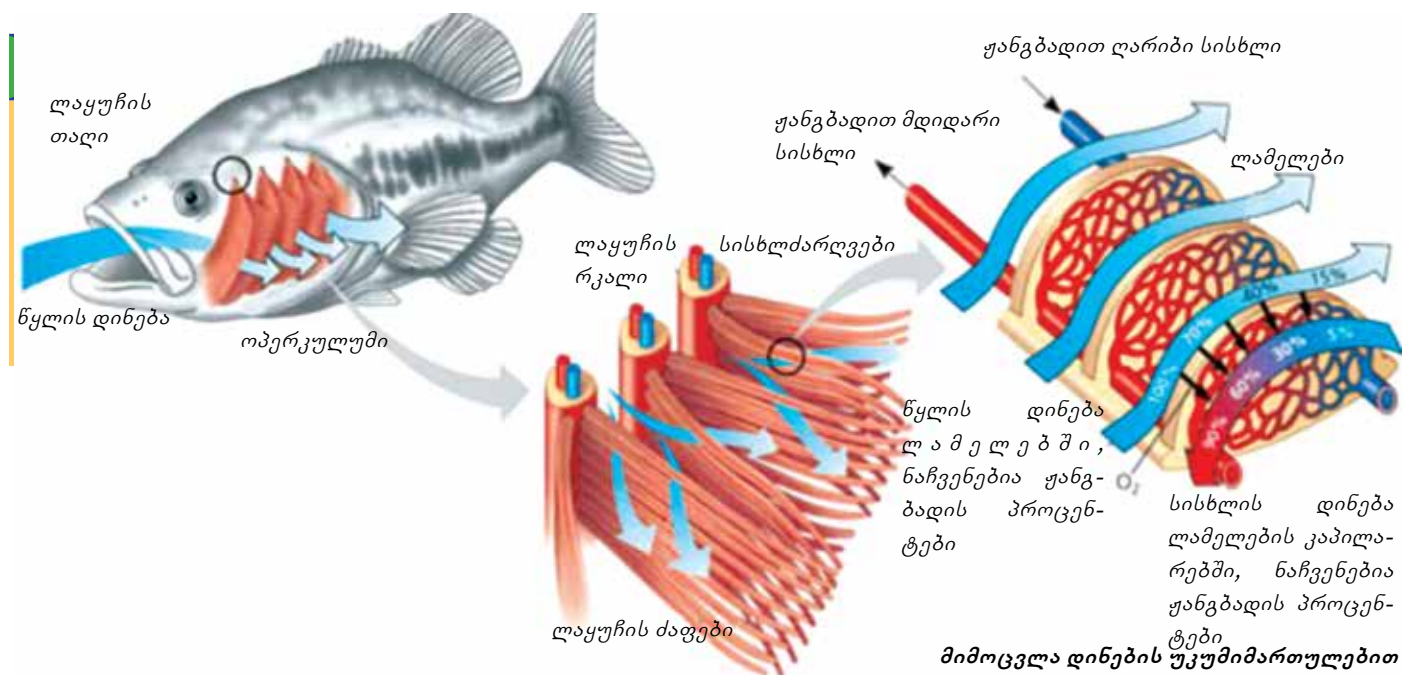
სიჩქარესთანაა დაკავშირებული. მაგალითად, ენდოთერმების ფილტვებს აირთა მიმოცვლის გაცილებით უფრო დიდი ფართობი აქვთ, ვიდრე იგივე ზომის ექტოთერმებს.

#### ძუძუმწოვართა სუნთქვის სისტემები: დანვრისგან მიმოხილვა

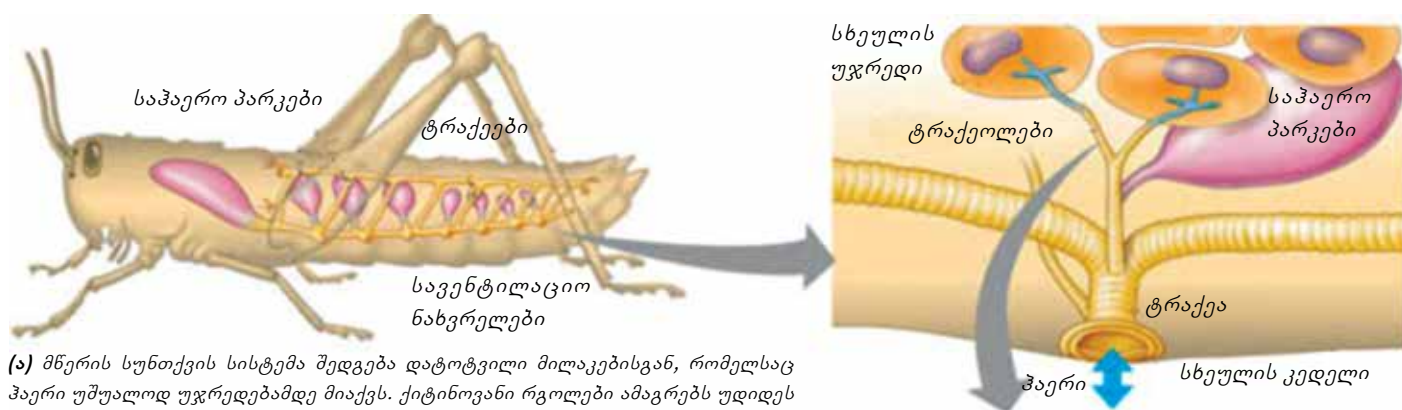
ფილტვები გულმკერდის ღრუში მოთავსებული ღრუბლის მაგვარი სტრუქტურაა. იგი დაფარულია ეპითელიუმით, რომელიც სუნთქვის ზედაპირს წარმოადგენს. ჰაერი ფილტვებთან დატოვებული მილეთა სისტემით გადადის (სურ. 42.23). ჰაერი შედის ნესტოებში იფილტვება, თბება, ნესტიანდება და გადის ცხვირის ღრუს სივრცეს. ცხვირის ღრუდან ხახაში გადადის. ეს არის ადგილი, სადაც ჰაერისა და საკვების გზის გადაკვეთა ხდება. როდესაც საკვები იყლაპება, ხორხი (სუნთქვის არხის ზედა ნაწილი) ზევით იწევს და იხურება. ეს საკვებს საშუალებას აძლევს საყლაპავის გავლით კუჭში გადავიდეს (იხ. სურ. 41.16). დარჩენილი ღრის განმავლობაში ხორხი ღიაა და სუნთქვა შესაძლებელია.

ხორხი ხრტილოვანი წარმონაქმნია და ძუძუმწოვართა უმეტესობაში ის ხმის ყუთის ფუნქციას ასრულებს. გამოდევნილი ჰაერი გაივლის მბგერავი იოგების წყვილს, რომელიც ხორხში მოთავსებული. ბგერა წარმოიქმნება მაშინ, როცა ხმის ყუთის უნებლიე კუნთები იჭიმება და იწვევს მბგერავი იოგების გაწელებას ისე, რომ ეს უკანასკნელი ვიბრაციას იწყებს. მაღალი ხმა ძლიერ დაჭიმული იოგის სწრაფი რხევის შედეგია, დაბალი ხმა კი ნაკლებად დაჭიმული იოგის რხევის შედეგია. ხორხიდან ჰაერი ტრაქეაში გადადის. C ფორმის ხრტილოვანი რკალები ტრაქეას ფორმას უნარჩუნებენ. ტრაქეა ორ ბრონქად იტოტება, რომელთაგან თითოეული თითო ფილტვთან მიდის. ფილტვის შიგნით ბრონქები იტოტება სულ უფრო და უფრო წვრილ მილებად, რომელთაც ბრონქიოლები ეწოდება. ჰაერის მილების მთლიან სისტემას გადაბრუნებული ხის ფორმა აქვს, რომლის მთავარი ღერო ტრაქეაა. ეპითელიუმში, რომელიც სასუნთქო ხის უმეტეს ნაწილშია ამოფენილი, დაფარულია ლორწოს თხელი შრითა და წამწამებით. ლორწო იჭერს მტვრებს და სხვადასხვა ნაწილაკებს. დაკავებული ნაწილაკები წამწამების მოძრაობით ზევით გადაიტანება, სადაც საყლაპავით შეიძლება გადაიყლაპოს. ეს პროცესი სუნთქვის სისტემის გასუფთავებას უწყობს ხელს.

უმცირესი ზომის ბრონქიოლები ბოლოში ალვეოლებით ბოლოვდება (იხ. სურ. 42.23). აირთა მიმოცვლა თხელი ეპითელიუმის გავლით ხდება, რომელიც მილიონობით ალვეოლია. უანგბადი ნესტიან შრეში იხსნება და ეპითელიუმის გავლით თითოეული ალვეოლის ირგვლივ მყოფი კაპილარების ქსელისკენ სწრაფად დიფუნდირდება. ნახშირორჟანგი კი საწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრაობს – კაპილარებიდან ეპითელიუმის გავლით ჰაერისკენ.



▲ **სურათი 42.21** თევზის ლაყურების სტრუქტურა და ფუნქციები. თევზი მუდმივად ტუმბავს ჰაერს პირიდან ლაყურებისკენ, იყენებს რა ყბებისა და ოპერკულუმის (ლაყურის სახურავის) კოორდინირებულ მოძრაობას. მცურავ თევზს შეუძლია მარტივად გაალოს პირი და გაუშვას წყლის ნაკადი ლაყურებისკენ. ყოველ ლაყურს აქვს ლაყურის ძაფების ორი რიგი. იგი ბრტყელი ფირფიტებისგან – ლამელებისგან შედგება. სისხლი, რომელიც კაპილარებით ლამელებში გადის წყლისგან ჟანგბადს ითვისებს. ყურადღება მისაქცევია, რომ წყლისა და სისხლის ურთიერთსაწინააღმდეგო დინება ჟანგბადის დაბალ კონცენტრაციულ გრადიენტს ინარჩუნებს, რაც უზრუნველყოფს კაპილარის მთელ სიგრძეზე ჟანგბადის დიფუზიას წყლიდან სისხლში.

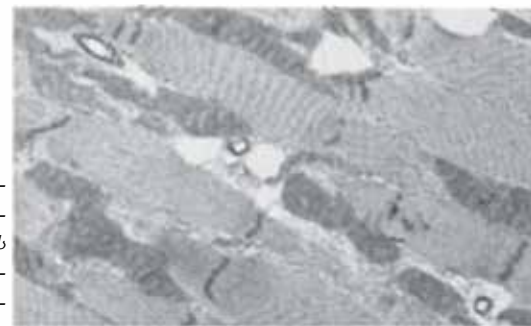


(ა) მწერის სუნთქვის სისტემა შედგება დატოტვილი მილაკებისგან, რომელსაც ჰაერი უშუალოდ უჯრედებამდე მიაქვს. ქიტინოვანი რგოლები ამაგრებს უდიდეს მილაკებს, რომლებსაც ტრაქეები ეწოდებათ. ტრაქეების გაფართოებული პარკები ეხება იმ ორგანოებს, რომელთაც ჟანგბადი დიდი რაოდენობით სჭირდებათ. ჰაერი ტრაქეაში სხეულის ზედაპირზე არსებული სავენტილაციო გამონაზარდებით შედის და უფრო მცირე ზომის მილებში — ტრაქეოლებში გადადის. ტრაქეოლები დახშულია და მოლურჯო-მონაცრისფრო სითხეს შეიცავს. როდესაც ცხოველი აქტიურია და მეტ ჟანგბადს იყენებს სითხის უმეტესობა სხეულში გადადის. ეს ზრდის უჯრედებთან ჰაერის შეხების ზედაპირს.

(ბ) მოცემული მიკროგრაფი აჩვენებს მწერის საფრენი კუნთის მცირე ნაჭრის ტრაქეოლების განივკვეთს. კუნთოვანი ბოჭკოს უამრავი მიტოქონდრიიდან თითო, ტრაქეოლიდან დაახლოებით ხუთ მკმ-ში მდებარეობს.

▲ **სურათი 42.22.** ტრაქეალური სისტემა.

ტრაქეოლები მიტოქონდრია მოფხიბრილები



2,5 μm

Diagram illustrating the human respiratory system with labels in Georgian:

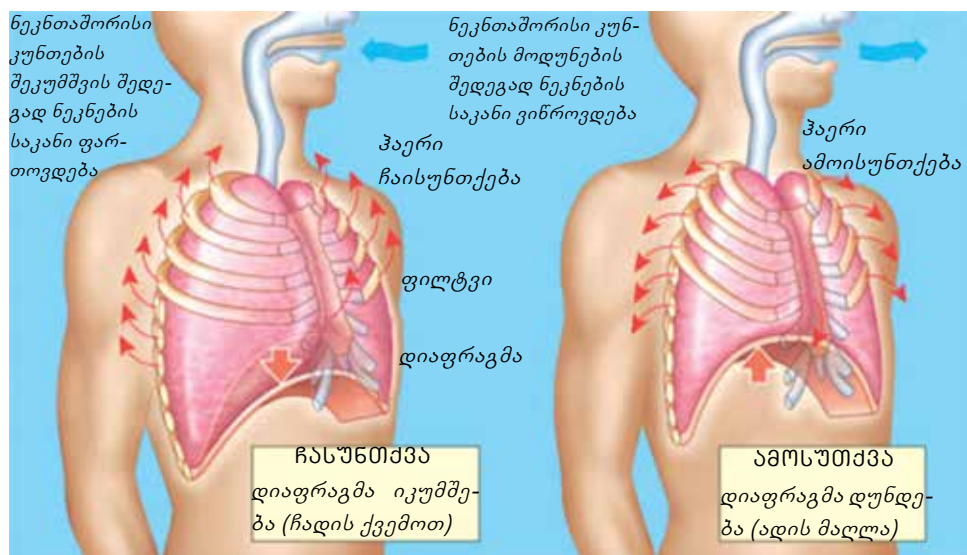
- ცხვირის ღრუ (Nasal cavity)
- მარჯვენა ფილტვი (Right lung)
- ბაზა (Base)
- ხორხი (Trachea)
- საყლაპავი ტრაქეა (Esophagus and trachea)
- მარჯვენა ფილტვი (Right lung)
- ბრონქები (Bronchi)
- ბრონქიოლები (Bronchioles)
- დიაფრაგმა (Diaphragm)
- გული (Heart)



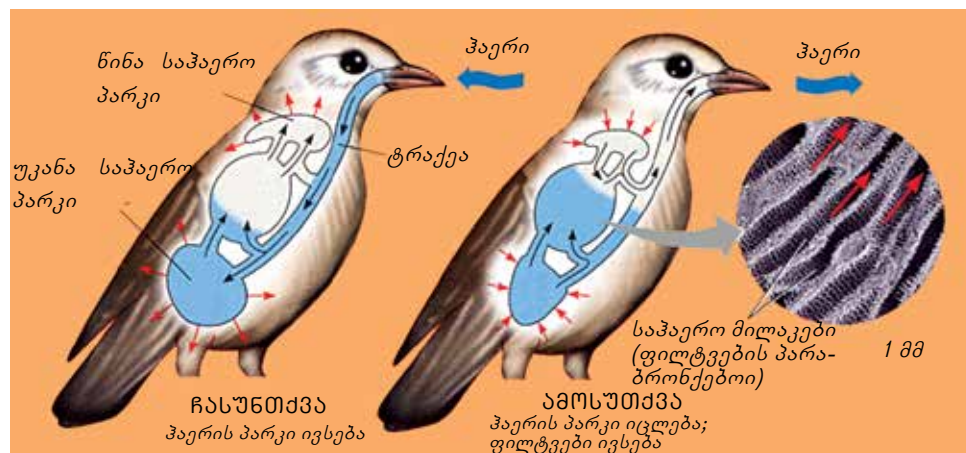
თევზების მსგავსად, ხმელეთის ხერხემლიანები აირთა მიმოცვლის ზედაპირზე ყანგბადის მაღალი და ნახშირორჟანგის დაბალი კონცენტრაციის შესანარჩუნებლად ვენტილაციას იყენებენ. აღნიშნულ პროცესს **სუნთქვა** ეწოდება. იგი წარმოადგენს ჩასუნთქვისა და ამოსუნთქვის რიტმულ თანმიმდევრობას.

ამფიბია, მაგალითად, ბაყაყი ფილტვების ვენტილაციას და-  
დებითი წნევით ახორციელებს. სუნთქვითი ციკლის დროს, პირის  
ღრუს ფსკერს კუნთები ქვემოთ წევენ და ნესტოებიდან ჰაერის

აფიზიებისგან განსხვავებით, ძუძუმწოვრების ფილტვების ვენტილაცია უარყოფითი წნევით ხორციელდება, რომელიც შემწოვი ტუმბოსავით მოქმედებს და ჰაერს ფილტვებში შეისრუტავს (სურ. 42.24). კუნთების მოქმედება ცვლის ნეკნების საკნისა და გულმკერდის ღრუს მოცულობას და ფილტვების მოცულობა აღნიშნულ ცვლილებას მიყვება. ფილტვის ორკედლიანი ტომრის შიდა შრე ფილტვის გარეთა ნაწილთანაა ადჰეზირებული, ხოლო გარეთა შრე – გულმკერდის კედელთან. ამ ორ შრეს ერთმანეთისგან სითხით აკსებული თხელი სივრცე გამოყოფს. ზედაპირის დაჭიმულობის გამო ეს ორი შრე არის შუშის ორი ნაჭრის მსგავსი.



▲ **სურათი 42.24 უარყოფითი წნევით სუნთქვა.** ძუძუმწოვრები სუნთქავენ ფილტვებში არსებულ აირთა წნევის შეცვლით, ატმოსფეროში არსებულ წნევასთან მიმართებაში.



▲ **სურათი 42.25. ფრინველთა სუნთქვის სისტემა.** საჰაერო პარკების შეკუმშვა და მოდუნება ფილტვების ვენტილაციას იწვევს, გადატუმბავს რა ჰაერს ერთი მიმართულებით პატარა პარალელურ მილებში, რომელთაც პარაბრონქებს უწოდებენ (SEM ჩანართი). აირთა ცვლა პარაბრონქების კედლის გავლით მიმდინარეობს. ჩასუნთქვისას საჰაერო პარკების ორივე ჯგუფი ფართოვდება. უკანა პარკები გარედან შემოსული ახალი ჰაერით ივსება (ლურჯი), ხოლო წინა პარკები კი ფილტვებიდან წამოსული ძველი ჰაერით (რუხი). ამოსუნთქვისას, საჰაერო პარკების ორივე ჯგუფი ჰაერს გამოტუმბავს. უკანა პარკებიდან ჰაერი ფილტვებისკენ მიდის, ხოლო წინა პარკებიდან კი ტრაქეის გავლით გარეთ გამოდის. ჩასუნთქვა-ამოსუნთქვის ორი ციკლია საჭირო, რათა ჰაერმა მთელი სისტემა გაიაროს და გარეთ გამოვიდეს.

სი, რომლებიც ერთმანეთთან წყლის შრით არიან მიწებებულნი: შრეები შეიძლება ერთმანეთის მიმართ გასრიალდეს, მაგრამ მათი დაცალკეება ვერ ხერხდება. ზედაპირის დაჭიმულობა ფილტვებს ნეკნების საკნის მოძრაობასთან ერთად ამოძრავებს.

ფილტვის მოცულობა იზრდება ნეკნთაშორისი კუნთების და **დიაფრაგმის** შეკუმშვით. დიაფრაგმა ჩონჩხის კუნთოვანი ორგანოა, რომელიც გულმკერდის ღრუს ფსკერს ქმნის.

ნეკნების კუნთების შეკუმშვა აფართოებს ნეკნთა კამერას, ქაჩავს რა ნეკნებს ზევით, ხოლო მკერდის ძვალს – გარეთ. იმავდრო-

ულად, როდესაც დიაფრაგმა იკუმშება და ქვემოთ იწევს, გულმკერდის ღრუ ფართოვდება. ყველა ეს ცვლილება ფილტვების მოცულობას ზრდის და შედეგად ალვეოლებში არსებული ჰაერის მოცულობა ატმოსფერულ მოცულობაზე დაბალი ხდება. რამდენადაც აირი მაღალი წნევის არედან დაბალი წნევის არისკენ მიემართება, ჰაერი ნესტოებიდან სასუნთქი მილების გავლით ფილტვებისკენ გადადის. ამოსუნთქვისას ნეკნთაშორისი კუნთები და დიაფრაგმა დუნდება, ფილტვების მოცულობა მცირდება და აირის წნევა იზრდება, რაც ჰაერს სასუნთქი მილებისა და ნესტოების გავლით გარეთ ამოტუმბავს (**იხ. სურ. 42.24**).

როდესაც ძუძუმწოვარი მოსვენებულ მდგომარეობაშია, ნეკნთაშორისი კუნთები და დიაფრაგმა ცვლის ფილტვების მოცულობას. ძლიერი ვარჯიშისას სხვა კუნთებიც ერთვება, როგორცაა კისრის, ზურგის და მკერდის კუნთები და ეს ნეკნების საკნის კიდევ უფრო გაფართოებით ზრდის ვენტილაციის მოცულობას. ზოგ სახეობაში სირბილის დროს აღძრული რიტმული მოძრაობები იწვევს კუჭისა და ღვიძლის წინ და უკან მოძრაობას და ეს შიდა ტუმბო კიდევ უფრო ზრდის ვენტილაციის მოცულობას.

აირის მოცულობა, რომელსაც ძუძუმწოვარი ყოველ ჯერზე ჩაისუნთქავს და ამოსუნთქავს, **პერიოდულ მოცულობად** იწოდება. ადამიანებში მოსვენების მდგომარეობაში ის დაახლოებით 500 მლ-ია. ძლიერი სუნთქვისას მაქსიმალური პერიოდული მოცულობა ფილტვის **სასიცოცხლო ტევადობის** სახელით არის ცნობილი. კოლეჯის ასაკის გოგონებსა და ვაჟებში შესაბამისად 3.4 და 4.8 ლ-ია. ფილტვებში ჩვეულებრივ უფრო მეტი ჰაერია, ვიდრე სასიცოცხლო ტევადობა, ვინაიდან შეუძლებელია ალვეოლების მთლიანად დაცლა, რაც არ უნდა ძლიერად ამოისუნთქოს

ადამიანმა, **ნარჩენი მოცულობა** ალვეოლებში ყოველთვის რჩება. ფილტი ასაკთან ან დაავადებებთან (ისეთი, როგორიცაა ემფიზემა) დაკავშირებით მოქნილობას კარგავს და ნარჩენი მოცულობა სასიცოცხლო ტევადობის ხარჯზე იზრდება.

იქიდან გამომდინარე, რომ ფილტვები სუნთქვით ციკლის ყოველ ჯერზე მთლიანად არ ცარიელდება და ივსება, ახლადჩასუნთქული ჰაერი ნაკლებფანგბადიან ნარჩენ ჰაერს ერევა და შესაბამისად ალვეოლებში ფანგბადის კონცენტრაცია უფრო ნაკლები

ალმოწნდება, ვიდრე ატმოსფეროში. თუმცა ეს აირთა მიმოცვლის ეფექტურობას ზღუდავს, ნარჩენ ჰაერში ნახშირორჟანგის რაოდენობა სისხლის pH რეგულაციისა და ძუძუმწოვრებში სუნთქვის სიხშირის განსაზღვრისთვის კრიტიკულია.

## ბოგატ სუნთქვან ფაინჯელები

ფრინველებში ვენტილაცია გაცილებით უფრო რთულია, ვიდრე ძუძუმწოვრებში. ფილტვების გარდა ფრინველებს აქვთ რვა თუ ცხრა საჰაერო პარკი, რომლებიც კისერში, მუცლის ღრუსა და ფრთებშია მოთავსებული. საჰაერო პარკები უშუალოდ აირთა ცვლაში არ იღებენ მონაწილეობას, მაგრამ მოქმედებენ როგორც დგუშები, რომელნიც ინარჩუნებენ ჰაერის დინებას ფილტვებისკენ (სურ. 42.25). ფრინველის სუნთქვისას მთლიანი სისტემის ვენტილაცია ხდება. მიუხედავად ფრინველის ჩასუნთქვის თუ ამოსუნთქვისა, ფილტვებს ჰაერი მხოლოდ ერთი მიმართულებით მიეწოდება.

ალვეოლების ნაცვლად, რომლებიც ბრმა დაბოლოებები, ფრინველებში აირთა მიმოცვლის უბნები პატარა მილებია, რომლებსაც **პარაბრონქებს** უწოდებენ და რომლებშიც ჰაერი ერთი მიმართულებით მოძრაობს.

აღწერილი სისტემა ფილტვების ჰაერს მუდმივად ანახლებს ყოველი ამოსუნთქვის დროს. ასე რომ, ჟანგბადის მაქსიმალური კონცენტრაცია ფრინველების ფილტვებში უფრო მაღალია, ვიდრე ძუძუმწოვრებში. ნაწილობრივ ამ უპირატესობის წყალობით, ფრინველები მაღალ სიმაღლეებზე უფრო უკეთ გრძნობენ თავს. მაგალითად, ადამიანებს დედამიწის უმაღლესი მწვერვალების დაპყრობისას, როგორც პიმალაების ევერესტია (8,848 მ), სერიოზული პრობლემები აქვთ ჟანგბადის მიღებასთან დაკავშირებით, მაგრამ ფრინველთა ზოგი სახეობა (ზოგი ბატი) მიგრაციის დროს ადვილად ფრენს იმავე მთის ზეგანზე.

## სუნთქვის კონტროლი ადამიანებში

ადამიანებს თავის ნება-სურვილით შეუძლიათ სუნთქვის შეკავება, ან ღრმად და სწრაფად სუნთქვა, მაგრამ უმეტეს დროს სუნთქვის რეგულაცია ავტომატური მექანიზმებით მიმდინარეობს. ეს უზრუნველყოფს იმას, რომ სუნთქვის სისტემის მოქმედება კოორდინირებულია სისხლის მიმოქცევის სისტემასთან და მეტაბოლიზმის პროცესთან.

**სუნთქვის მაკონტროლებელი ცენტრები** ტვინის ორ უბანში – მოგრძო ტვინსა და ხიდშია მოთავსებული. სუნთქვის მეორადი კონტროლი აორტისა და საძილე არტერიების სენსორებით ხორციელდება, რომლებიც სისხლის pH-ის, ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის კონცენტრაციის მიმართ მგრძნობიარე არიან. ღრმა სუნთქვის დროს უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმი ფილტვებს ზედმეტად გაჭიმვისგან იცავს. ფილტვის ქსოვილში არსებული დაჭიმვის სენსორები აგზავნიან ნერვულ იმპულსებს, რომლებიც მოგრძო ტვინის მაკონტროლებელ ცენტრს აკავებენ.

მოგრძო ტვინში არსებული მაკონტროლებელი ცენტრი სუნთქვას ტვინის ქსოვილური სითხის (ცერებროსპინალური სითხის)

pH-ის ცვლილების საპასუხოდ არეგულირებს. ცერებროსპინალური სითხის pH ძირითადად სისხლში ნახშირორჟანგის კონცენტრაციით განისაზღვრება. ნახშირორჟანგი სისხლიდან ცერებროსპინალურ სითხეში დიფუნდირდება, სადაც ის წყალთან ურთიერთქმედებით ნახშირმჟავას ქმნის და ეს კი pH-ს ამცირებს. როდესაც მოგრძო ტვინის ცენტრი ცერებროსპინალური სითხის pH-ის მცირედ დაცემას (ნახშირორჟანგის გაზრდას) აღრიცხავს, ის ზრდის სუნთქვის სიღრმესა და სიხშირეს. ჭარბი ნახშირორჟანგი ამოსუნთქულ ჰაერთან ერთად გარეთ გამოიდევენება.

სისხლში ჟანგბადის კონცენტრაციას სუნთქვის რეგულაციაზე, ჩვეულებრივ, დიდი გავლენა არ აქვს. მაგრამ მაინც, როდესაც ჟანგბადის დონე მნიშვნელოვნად ეცემა (მაღალ ადგილებში), აორტასა და საძილე არტერიებში არსებული ჟანგბადის სენსორები განგაშის სიგნალს სუნთქვის ცენტრებთან აგზავნიან. ისინი აღნიშნულ ცვლილებას სუნთქვის სიხშირის გაზრდით პასუხობენ. ნახშირორჟანგის კონცენტრაციის გაზრდა კარგი ნიშანია ჟანგბადის კონცენტრაციის შემცირებისთვის, რადგან ნახშირორჟანგი იმავე პროცესში წარმოიქმნება, რომელშიც ჟანგბადი მოიხმარება – უჯრედულ სუნთქვაში. ზედმეტად ღრმა და სწრაფი სუნთქვა იმდენად ასუფთავებს სისხლს ნახშირორჟანგისგან, რომ სუნთქვის ცენტრი დროებით წყვეტს ნეკნათაშორის კუნთებსა და დიაფრაგმისკენ სიგნალის გაგზავნას. სუნთქვა ჩერდება, სანამ ნახშირორჟანგის დონე სუნთქვის ცენტრის ჩასართავად საკმარისად გაიზრდება (ან ჟანგბადის დონე დაეცემა).

სუნთქვის ცენტრი სხვადასხვა ქიმიურ და ნერვულ სიგნალს პასუხობს და შესაბამისად სუნთქვის სიღრმესა და სიხშირეს არეგულირებს. ამგვარად, სუნთქვის კონტროლი ეფექტური მხოლოდ მაშინ არის, თუ ის სისხლის მიმოქცევის სისტემასთან კოორდინირებულია. აღნიშნული კოორდინაცია უზრუნველყოფს კარგ შესაბამისობას ფილტვის ვენტილაციასა და ალვეოლურ კაპილარებში გამდინარე სისხლის რაოდენობას შორის. მაგალითად, ვარჯიშის დროს გულის გაზრდილი გამოსავალი სუნთქვის მაღალ სიხშირეს შეესაბამება, რომელიც ფილტვებში სისხლის დინების დროს ჟანგბადის შეთვისებასა და ნახშირორჟანგის გამოყოფას აძლიერებს.

## კანცეფცია ცსცი 42.6

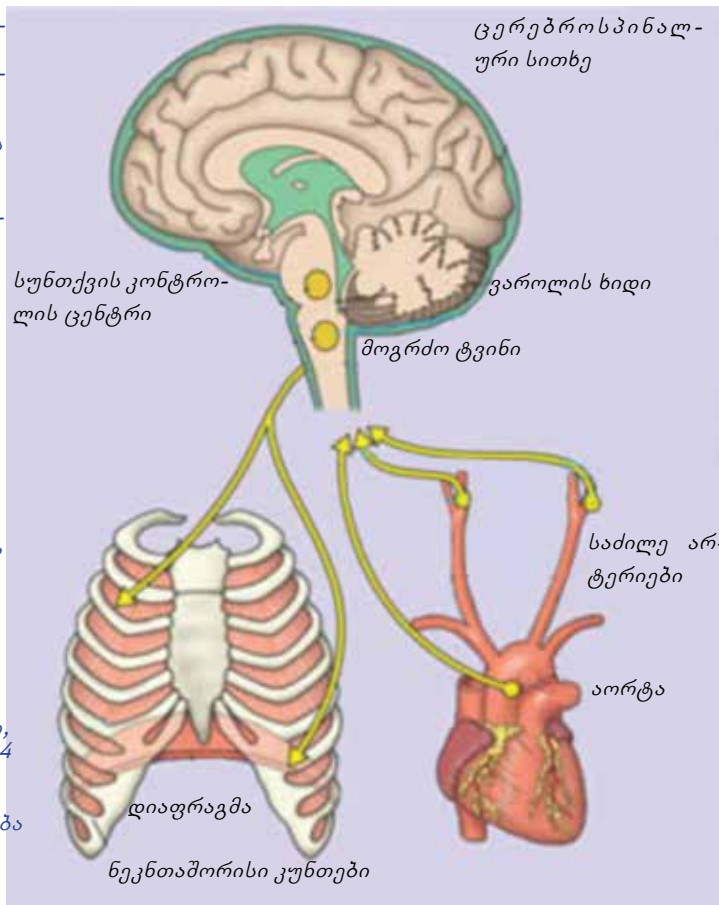
1. როგორ გავლენას ახდენს ნახშირორჟანგის გაზრდილი კონცენტრაცია ცერებროსპინალური სითხის pH-ზე?
2. სისხლის pH-ის მცირედ შეცვლა გულის პეისმეიკერს აჩქარებს. რა არის კონტროლის აღნიშნული მექანიზმის ფუნქცია?
3. რით განსხვავდება სუნთქვა ძუძუმწოვრებსა და ფრინველებში?

**შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი A.**

**1** მოგრძო ტვინში არსებული სუნთქვის ცენტრი სუნთქვის რიტმს განსაზღვრავს, ხოლო ხიდში არსებული ცენტრი კი რეგულირების ფუნქციას ასრულებს, აადვილებს რა ჩასუნთქვა ამოსუნთქვის პროცესების მონაცვლეობას.

**2** ნერვული იმპულსები კუნთების შეკუმშვას განაპირობებს. მოგრძო ტვინში არსებული ცენტრის ნერვული უჯრედები დიაფრაგმასა და ნეკნთაშორის კუნთებთან იმპულსებს გაზვნიან, იწვევს მათ შეკუმშვას და ჩასუნთქვას.

**3** მოსვენებულ მდგომარეობაში მყოფი ადამიანის შემთხვევაში, იმპულსები წუთში 10-14 ჩასუნთქვას უზრუნველყოფენ. ჩასუნთქვებს შორის კუნთები დუნდება და ამოსუნთქვა ხორციელდება.



**4** მოგრძო ტვინში მდებარე მაკონტროლებელი ცენტრი სისხლში ნახშირორჟანგის დონესაც არეგულირებს. მოგრძო ტვინის სენსორები ტვინის ზედაპირის შემომსაზღვრელი სისხლისა და ცერებროსპინალური სითხის პაფიქსირებს, რაც ნახშირორჟანგის კონცენტრაციას ასახავს.

**5** ნერვული იმპულსები ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის კონცენტრაციების ცვლას გადართავს. აორტისა და საძილე არტერიების კედლებში არსებული სენსორები აფიქსირებენ სისხლის პცვლილებას და იმპულსებს მოგრძო ტვინის უგზავნიან. საპასუხოდ, მოგრძო ტვინის სუნთქვის ცენტრი სუნთქვის სიღრმესა და სიხშირეს ცვლის. კერძოდ ნახშირორჟანგის სიჭარბის შემთხვევაში ორივე იზრდება, ხოლო მისი ნაკლებობისას კი პირიქით მცირდება.

**6** აორტისა და საძილე არტერიების სენსორები სისხლში ჟანგბადის დონის ცვლილებასაც აფიქსირებენ და მოგრძო ტვინის სიგნალებს უგზავნიან, რათა მან ჟანგბადის ნაკლებობისას სუნთქვის სიხშირე გაზარდოს.

▲ სურათი 42.26. სუნთქვის ავტონომიური კონტროლი

## ▶ კონცეფცია 42.7

### სუნთქვის პიგმენტებს აიტთა დაკავშირებისა და ცტანსპოტცის ფუნქცია აკისრიათ

ორგანიზმის მაღალი მეტაბოლური მოთხოვნილებების გამო სისხლს ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის დიდი რაოდენობით გადატანა უწევს. როგორც ჩანს, ცხოველთა სხვადასხვა ჯგუფში მაღალ მეტაბოლურ მოთხოვნასთან დაკავშირებით მსგავსი სატრანსპორტო მექანიზმების განვითარება დამოუკიდებლად მოხდა. პირველ რიგში განვიხილავთ ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის გრადიენტის როლს ძუძუმწოვართა სუნთქვის სისტემის მაგალითზე. შემდეგ გამოვიკვლევთ სისხლის მოლეკულებს, რომელთაც სუნთქვის პიგმენტები ეწოდებათ და რომლებიც აირთა მიმოცვლას უწყობენ ხელს.

### პარციალური წნევის გტადიენტის ტოლი

აირები ფილტვებსა და სხვა ორგანოებში წნევის გრადიენტის მიმართულებით დიფუნდირდება. აირის დიფუზია ჰაერიდან თუ წყალსნარიდან დამოკიდებულია პარციალური წნევის სხვა-

ობაზე. ზღვის დონეზე ატმოსფეროს სრული წნევა 760 მმ.ვწ.ს-ა. ეს არის ქვემოთ მიმართული წნევა, რომელიც ვერცხლის წყლის სვეტის 760 მმ შეესაბამება. რამდენადაც ატმოსფეროში ჟანგბადი 21%-ა, ჟანგბადის პარციალური წნევა (PO<sub>2</sub>) არის 0.21×760 ანუ დაახლოებით 160 მმ.ვწ.ს. ეს არის ატმოსფერული წნევის ის ნაწილი, რომელიც ჟანგბადით იქმნება, აქედან მოდის ტერმინი პარციალური წნევა (პარტ – ნაწილი). ნახშირორჟანგის პარციალური წნევა (PCO<sub>2</sub>) ზღვის დონეზე 0.23 მმ.ვწ.ს-ა. როდესაც წყალი ჰაერს ეხება, აირის ის რაოდენობა, რომელიც მასში იხსნება, მისი პარციალური წნევისა და ხსნადობის პროპორციულია. წონასწორობა მყარდება მაშინ, როცა აირის მოლეკულები წყალში ერთი სიჩქარით შედიან და გამოდიან. ამ დროს ამბობენ, რომ აირს წყალში იგივე პარციალური წნევა აქვს, რაც ჰაერში. ასე რომ, ჰაერთან შეხებაში მყოფ ჭიქა წყალს ზღვის დონეზე PO<sub>2</sub> 160 მმ.ვწ.ს და PCO<sub>2</sub> 0.23 მმ.ვწ.ს არის.

აირი მაღალი პარციალური წნევიდან ყოველთვის დაბლისკენ დიფუნდირებს. როდესაც სისხლი არტერიებით ფილტვებში მიდის, მას უფრო დაბალი PO<sub>2</sub> და მაღალი PCO<sub>2</sub> აქვს, ვიდრე ალვეოლებს (სურ. 42.27). მიაქციეთ ყურადღება, რომ ალვეოლების ჰაერში PO<sub>2</sub> უფრო დაბალია და PCO<sub>2</sub> უფრო მაღალი, ვიდრე ზღვის დონეზე არსებულ ჰაერში. ამის მიზეზი არის ის, რომ სუნთქვისას ალვეოლები ახალი ჰაერით მთლიანად ჩანაცვლებული არ არის. როდესაც სისხლი ალვეოლების კაპილარებში შედის, ნახშირორჟანგი

სისხლიდან ალვეოლებში მყოფ ჰაერში გადადის. იმავდროულად, ალვეოლების ეპითელიუმის სითხეში გახსნილი ჟანგბადი სისხლში გადადის. როდესაც სისხლი ფილტვის ვენით ფილტვს ტოვებს, მისი  $PO_2$  გაზრდილია და  $PCO_2$  კი შემცირებული. ეს სისხლი სისტემურ წრეში გადაიტუმბება. ქსოვილის კაპილარებში ჟანგბადის პარციალური წნევა ჟანგბადს სისხლიდან გამოიტანს, ხოლო ნახშირორჟანგს კი სისხლში გადაიტანს. ამის მიზეზი არის ის, რომ უჯრედული სუნთქვისას კაპილარების ახლოს მყოფი უჯრედების მიტოქონდრიები ქსოვილური სითხიდან ჟანგბადს ითვისებენ და ნახშირორჟანგს გამოყოფენ. მას შემდეგ, რაც სისხლი ჟანგბადისგან თავისუფლდება და ნახშირორჟანგით იტვირთება, ის გულს უბრუნდება და ფილტვებში გადაიტუმბება, სადაც ალვეოლების აირებთან აწარმოებს გაცვლას.

## სუნთქვის პიგმენტები

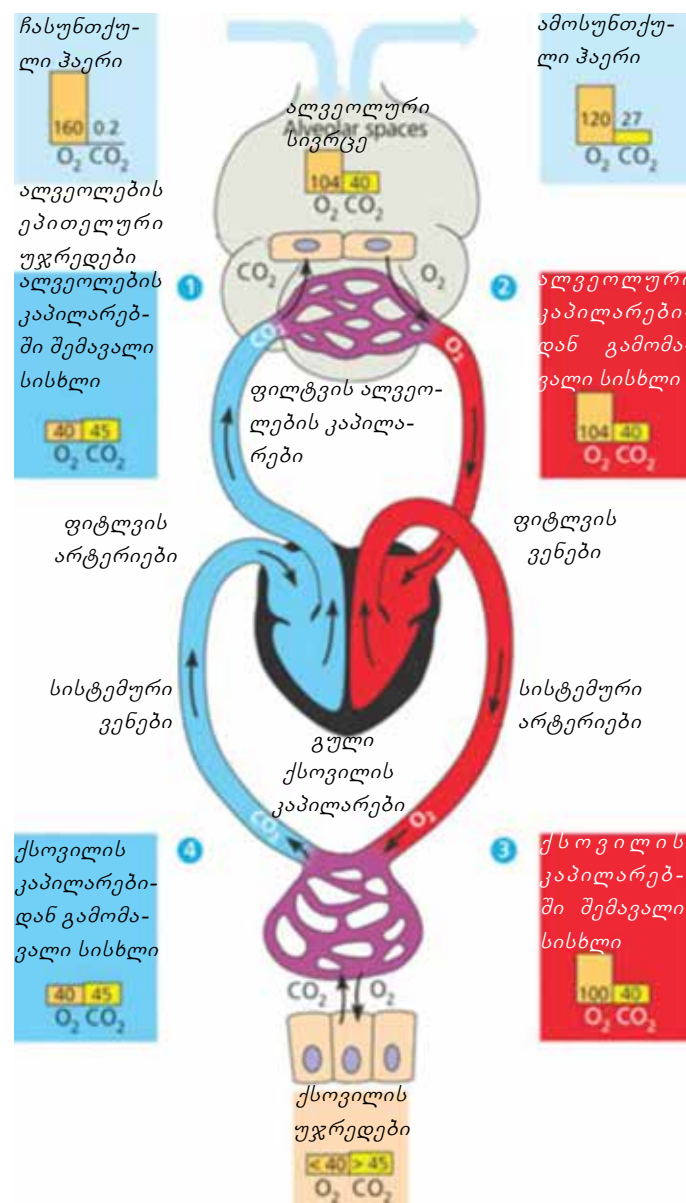
ჟანგბადის წყალში (და აქედან გამომდინარე, სისხლში) ცუდი ხსნადობა პრობლემაა იმ ცხოველებისთვის, რომლებიც ჟანგბადის გადასატანად სისხლის მიმოქცევის სისტემას იყენებენ. წარმოვიდგინოთ, რომ მთელი ჩვენი ჟანგბადი სისხლში გახსნილი სახით გადაიტანებოდეს. მძიმე ფიზიკური ვარჯიშის დროს ადამიანმა შეიძლება 2ლ ჟანგბადი მოიხმაროს და მთელი ეს რაოდენობა ფილტვებიდან აქტიური ქსოვილისკენ უნდა გადავიდეს. ნორმალურ ტემპერატურასა და აირის წნევაზე მხოლოდ 4.5 მლ ჟანგბადი შეიძლება გაიხსნას სისხლის ერთ ლიტრში. ჟანგბადის 80% რომ გადაიტანებოდეს ქსოვილებამდე (არარეალურად მაღალი პროცენტობა), გულს წთ-ში 500 ლ სისხლის გადატუმბვა დასჭირდებოდა.

ცხოველთა უმეტესობა ჟანგბადის ტრანსპორტირებას განსაზღვრული ცილებით ახორციელებს, რომელთაც **სუნთქვის პიგმენტებს** უწოდებენ. სუნთქვის პიგმენტები სისხლში ხშირად სპეციალურ უჯრედების შემადგენლობაშია. პიგმენტი მნიშვნელოვნად ზრდის იმ ჟანგბადის რაოდენობას, რომელიც სისხლმა შეიძლება გადაიტანოს (ჟანგბადის დაახლოებით 200 მლ ძუძუმწოვართა ერთ ლიტრ სისხლზე). ჩვენი მაგალითის შემთხვევაში, მოვარჯიშე ადამიანში, რომლის ორგანიზმშიც ჟანგბადის გადატანის სიდიდე 80%-ია, წთ-ში 12.5 ლ სისხლის ტრანსპორტი უნდა ხდებოდეს.

## ჟანგბადის ტრანსპორტი

ცხოველთა სხვადასხვა ტაქსონომიურ ერთეულებში სუნთქვის განსხვავებული პიგმენტები განვითარდა. ერთი მაგალითია **ჰემოციანინი**, რომელიც ფეხსახსრიანებსა და ბევრ მოლუსკშია ნაპოვნი და რომელშიც ჟანგბადის დამაკავშირებელი კომპონენტი სპილენძია, რაც სისხლს მოლურჯო ფერს აძლევს. თითქმის ყველა ხერხემლიანის და უხერხემლოთა მრავალი წარმომადგენლის სუნთქვის პიგმენტი ცილა ჰემოგლობინია, რომელიც ხერხემლიანების შემთხვევაში ერითროციტებშია მოთავსებული.

ჰემოგლობინი ოთხი სუბერთეულისგან შედგება. ყველას აქვს კოფაქტორი, რომელსაც ჰემის ჯგუფი ჰქვია. ჰემის ცენტრში რკინის ატომია მოთავსებული. რკინა ჟანგბადს უკავშირდება და, ამრიგად, ჰემოგლობინის თითო მოლეკულას ჟანგბადის ოთხი მოლეკულის დაკავშირება შეუძლია (სურ. 5.20). სუნთქვის ყველა პიგმენტის მსგავსად, ჰემოგლობინმა ჟანგბადი შექცევითად უნდა დაიკავშიროს, კერძოდ, დაიტვირთოს ჟანგბადით ფილტვებსა და



▲ **სურათი 42.27 სასუნთქი აირების მიმოცვლა.** ფერადი ბლოკები სხვადასხვა უბნის ჟანგბადის ( $PO_2$ ) და ნახშირორჟანგის ( $PCO_2$ ) პარციალურ წნევას გამოხატავს (მმ.ვ.ს).

ლაყუჩებში და გათავისუფლდეს სხეულის სხვა ნაწილებში (იხ. სურ. 42.28). ეს პროცესი დამოკიდებულია ჰემოგლობინის სუბერთეულების ურთიერთქმედებაზე (იხ. თავი 8).

ჟანგბადის დაკავშირება ერთ სუბერთეულთან სხვების ფორმის მცირედ შეცვლას იწვევს ისე, რომ მათი აფინიტეტი ჟანგბადის მიმართ იზრდება. როდესაც ერთ სუბერთეულს ჟანგბადი სცილდება, დანარჩენი სამივე სწრაფად თავისუფლდება ჟანგბადის მოლეკულებისგან, რამდენადაც მათი ფორმის შეცვლა აღნიშნული მოლეკულის მიმართ აფინიტეტს ამცირებს.

ჟანგბადის კოოპერაციული დაკავშირება და გამოთავისუფლება კარგად ჩანს ჰემოგლობინის დისოციაციის მრუდზე (სურ. 42.29). ჟანგბადის პარციალური წნევის ზღვრის ზევით, სადაც დი-

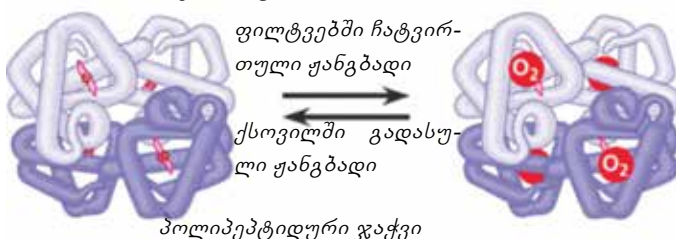
სოციაციის მრუდი ციკაბოა,  $PO_2$ -ის მცირედ შეცვლაც კი იწვევს ჰემოგლობინის მიერ ჟანგბადის მნიშვნელოვანი რაოდენობის დაკავშირებას ან მოცილებას. ყურადღება მიაქცევით, რომ მრუდის ციკაბო ნაწილი სხეულის ქსოვილებში ნაწილ ჟანგბადის პარციალურ წნევას შეესაბამება. ვარჯიშის დროს, როდესაც განსაზღვრულ უბანში მყოფი უჯრედები უფრო ძლიერად მუშაობას იწყებენ, უჯრედების მიერ ჟანგბადის გაზრდილი მოხმარების გამო მისი რაოდენობა მეზობელ უბნებში ეცემა. სუბერთეულების ურთიერთქმედების გამო,  $PO_2$ -ის მცირე დაცემა საკმარისია იმისთვის რომ ძალიან გაიზარდოს ჟანგბადის ის რაოდენობა, რომელიც სისხლიდან გადმოიტვირთება.

სხვა ცილების მსგავსად, ჰემოგლობინის კონფორმაციული მდგომარეობა ბევრ ფაქტორზეა დამოკიდებული, მაგალითად, pH-ის დაცემა ამცირებს ჰემოგლობინის აფინიტეტს ჟანგბადის მიმართ. აღნიშნულ ეფექტს ბორის გადანაცვლებას უწოდებენ (იხ. სურ. 42.29 ბ). რამდენადაც ნახშირორჟანგი წყალთან ურთიერთქმედებს და ნახშირმჟავა ( $H_2CO_3$ ) წარმოიქმნება, აქტიური ქსოვილი ამცირებს pH-ს მის გარემომცველ უბანში. ეს, თავის მხრივ, ჰემოგლობინის მიერ უფრო მეტი ჟანგბადის გამოთავისუფლებას იწვევს, რომელიც შემდეგ უჯრედულ სუნთქვაში გამოიყენება.

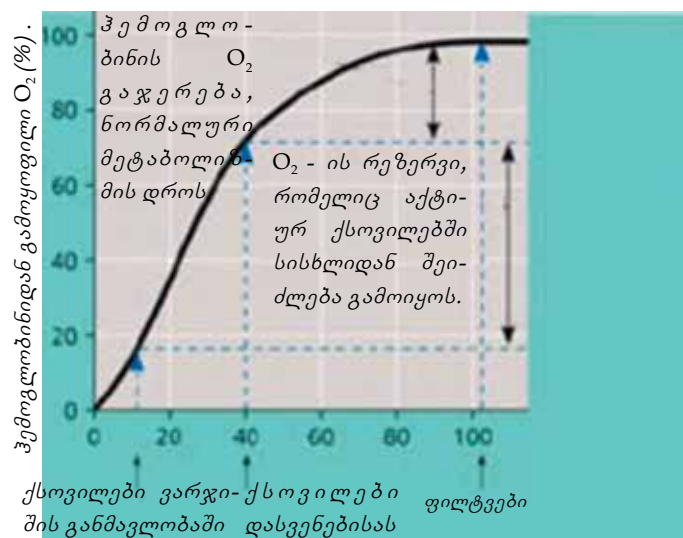
## ნახშირორჟანგის ტრანსპორტი

ჟანგბადის ტრანსპორტის ფუნქციის გარდა, ჰემოგლობინი ნახშირორჟანგის გადატანაშიც იღებს მონაწილეობას და ბუფერულ სისტემებს უწყობს ხელს. იგი ეწინააღმდეგება pH-ის დამაზიანებელ ცვლილებას. სისხლის პლაზმით უჯრედების მიერ გამოყოფილი ნახშირორჟანგის მხოლოდ 7% გადაიტანება. 23% ჰემოგლობინს უკავშირდება და 70% კი ბიკარბონატების იონების ( $HCO_3^-$ ) სახით გადაიტანება. უჯრედებიდან გამოყოფილი ნახშირორჟანგი დიფუნდირებს პლაზმაში და შემდეგ – ერითროციტებში (სურ. 42.30). ნახშირორჟანგი ჯერ წყალთან ურთიერთქმედებს და წარმოქმნის  $H_2CO_3$ , რომელიც შემდეგ  $H^+$  და  $HCO_3^-$  იონებად დისოცირდება.  $H^+$  უმეტესობა ჰემოგლობინს და სხვა ცილებს უკავშირდება, რასაც მინიმუმამდე დაჰყავს სისხლის pH-ის ცვლილება.  $HCO_3^-$  პლაზმაში იხსნება. როდესაც სისხლი ფილტვებში გადის, პროცესი სწრაფად ბრუნდება, რამდენადაც ნახშირორჟანგის გამოყოფა სისხლიდან ქიმიურ წონასწორობას ისე ცვლის, რომ  $HCO_3^-$  ნახშირორჟანგში გარდაიქმნება.

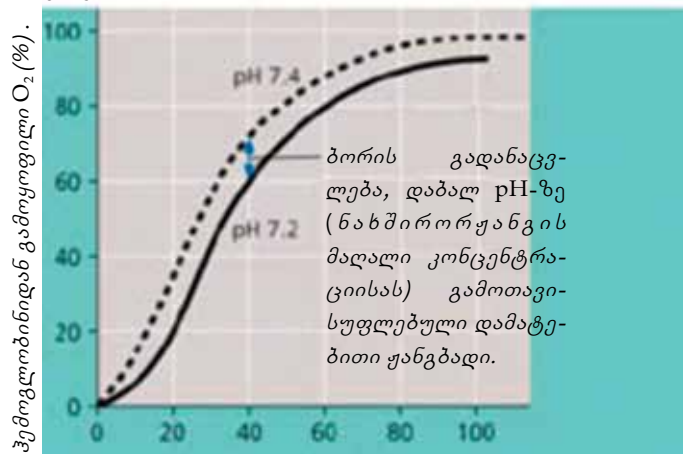
ჰემის ჯგუფი რკინის ატომი



▲ **სურათი 42.28** ჟანგბადის დაკავშირება და მოცილება ჰემოგლობინთან.



$PO_2$  (ვერცხლისწყლის მმ)  
(ა)  $PO_2$  და ჰემოგლობინის დისოციაცია  $370^\circ C$  და  $7.4$  pH. მრუდი უჩვენებს ჟანგბადის შეფარდებით რაოდენობას, რომელიც ჰემოგლობინს სხვადასხვა  $PO_2$ -ზე უკავშირდება. ფილტვებისთვის დამახასიათებელი  $104$  მმ.ვ.ნ  $PO_2$  დროს ჰემოგლობინის დაახლოებით 98% ჟანგბადით არის გაჯერებული.  $40$  მმ.ვ.ნ  $PO_2$ -ზე კი, რომელიც ქსოვილებისთვის ტიპურია ჰემოგლობინის 70% ჟანგბადით არის გაჯერებული. ჰემოგლობინს ჟანგბადის გამოთავისუფლება მეტაბოლურად აქტიურ ქსოვილში შეუძლია, მაგალითად, როგორც არის კუნთოვანი ქსოვილი ვარჯიშის დროს.

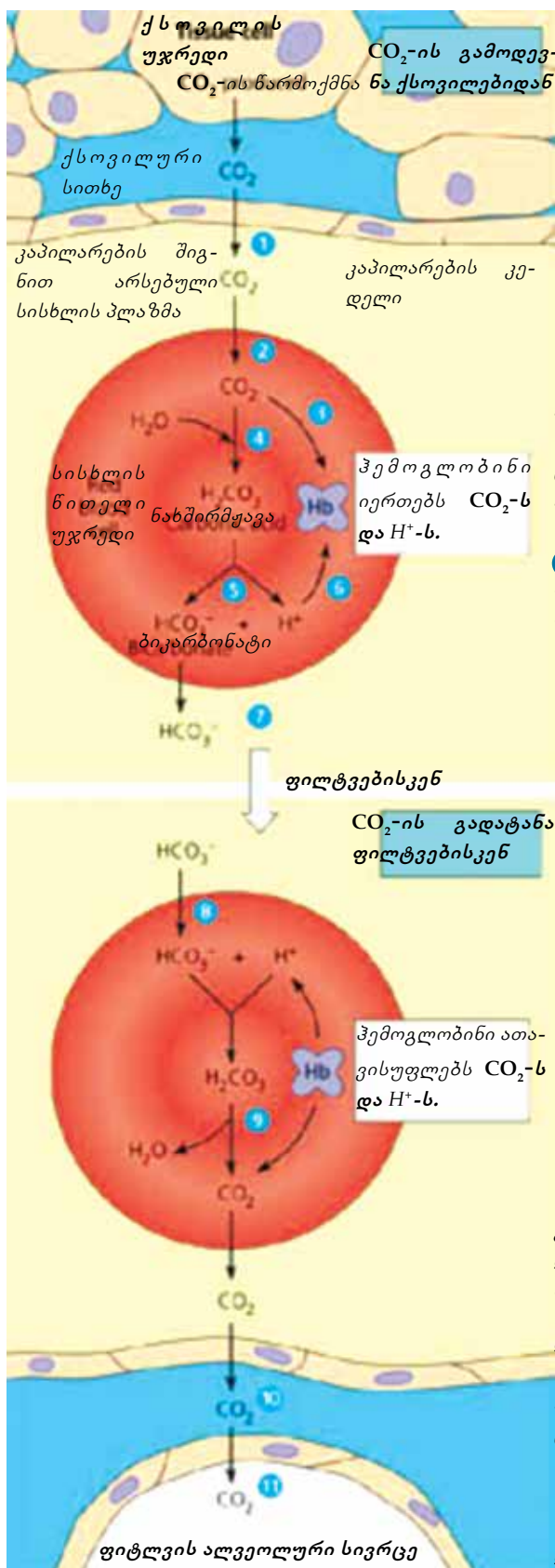


(ბ) pH და ჰემოგლობინის დისოციაცია. წყალბადის იონები გავლენას ახდენს ჰემოგლობინის კონფორმაციაზე. pH დაცემა ჟანგბადის დისოციაციის მრუდის მარჯვნივ გადაწევას იწვევს. მოცემულ  $PO_2$ -ზე (ვთქვათ  $40$  მმ.ვ.ნ) ჰემოგლობინი  $7.2$  pH უფრო მეტ ჟანგბადს იცილებს ვიდრე  $7.4$  pH-ზე, რომელიც სისხლის ნორმალური pH.

▲ **სურათი 42.29** ჰემოგლობინის დისოციაციის მრუდი

## გამოტრიალული ათლეტი ცხოველები

ზოგი ცხოველისთვის, როგორიცაა დიდ მანძილზე მორბენალი ძუძუმწოვრები და მიგრირებადი ფრინველები, ჟანგბადზე მოთხოვნილება სუნთქვის სისტემის ძლიერ გადატვირთვას გა-



1 სხეულის ქსოვილებით წარმოქმნილი ნახშირორჟანგი ქსოვილურ სითხესა და პლაზმაში დიფუნდირებს.

2 ნახშირორჟანგის 90%-ზე მეტი სისხლის წითელ უჯრედებში გადადის და პლაზმაში გახსნილი სახით მხოლოდ 7% რჩება.

3 ნახშირორჟანგის ნაწილი ჰემოგლობინის უკავშირდება და ისე გადაიტანება.

4 ნახშირორჟანგის უმეტესობა სისხლის წითელ უჯრედებში წყალთან ურთიერთქმედებს და ნახშირმჟავას წარმოქმნის. რეაქციის კატალიზატორი კარბონანჰიდრაზაა, რომელიც სისხლის წითელ უჯრედებშია.

5 ნახშირმჟავა დისოცირდება ბიკარბონატის იონად და წყალბადის იონად.

6 ჰემოგლობინი წყალბადის იონების უმეტესობას იკავშირებს. ხელს უშლის სისხლის გამჟავიანებას და ამდენად ბორის წანაცვლებას.

7 ბიკარბონატის იონის უმეტესობა პლაზმაში გადადის, სადაც ის სისხლის დინებით ფილტვებში გადაიტანება.

8 ფილტვებში ბიკარბონატის იონი უკან სისხლის წითელ უჯრედებში დიფუნდირდება, ჰემოგლობინიდან გამოთავისუფლებულ წყალბადის იონს უკავშირდება და ნახშირმჟავა წარმოიქმნება.

9 ნახშირმჟავა კვლავ ნახშირორჟანგად და წყლად გარდაიქმნება.

10  $\text{H}_2\text{CO}_3$ -დან მიღებული  $\text{CO}_2$  გამოიყოფა ჰემოგლობინიდან და ქსოვილურ სითხეში დიფუნდირებს.

11  $\text{CO}_2$  დიფუნდირებს ალვეოლურ სივრცეში, საიდანაც ამოსუნთქვისას გამოიდევენება. პლაზმაში  $\text{CO}_2$ -ის კონცენტრაციის შემცირება იწვევს სისხლის წითელ უჯრედებში  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ის  $\text{CO}_2$ -ად და წყლად დაშლას (იხილეთ საფეხური 9). ქსოვილებში მიმდინარე რეაქციის უკურეაქცია.

მოიწვევდა. სხვა ცხოველები, როგორც არიან მყვინთავეები, წყლის ქვეშ დიდი ხანი სუნთქვის გარეშე ძლებენ. რა ევოლუციური ადაპტაციები აძლევს ამ ცხოველებს საშუალებას, ასეთი მიღწევები ჰქონდეთ?

## ყველაზე დიდ მანძილზე მორბენალი ცხოველები

გამორჩეული ათლეტი მორბენალი ცხოველის მაგალითად ანტილოპის მსგავსი ძუძუმწოვარი შეიძლება მოვიყვანოთ, რომელიც 4 მილიონ წელზე მეტია გავრცელებულია ჩრდილოეთ ამერიკის საძოვრებზე. ამ ანტილოპას 100 კმ/სთ სიჩქარით სირბილი შეუძლია, თუმცა მისი უმაღლესი სიჩქარე გეპარდის სიჩქარეს ვერ უტოლდება. მათ აღნიშნული სიჩქარის შენარჩუნება დიდ მანძილებზე შეუძლიათ. ისინი საშუალოდ 65 კმ/სთ სიჩქარით 10 წთ-ში 11 კმ-ს გადიან.

სტენ ლინდშტედტი და მისი კოლეგები ბერნის და ვიომინგის უნივერსიტეტებიდან დაინტერესდნენ, თუ როგორ ახერხებს ანტილოპა მაღალი სიჩქარის შენარჩუნებას დროის დიდ მონაკვეთში. მათ აინტერესებდათ, ეს ნორმალური ფიზიოლოგიური მექანიზმების გაძლიერებით მიიღწეოდა, რომელიც კუნთებს ჟანგბადის გაზრდილი რაოდენობით უზრუნველყოფდა, თუ უფრო მაღალი ენერგეტიკული ეფექტურობით. დახარჯული ჟანგბადის მაქსიმალური რაოდენობის შესაფასებლად მკვლევრებმა ანტილოპა სარბენ ბილიკზე არბენინეს (სურ. 42.31) და აღმოაჩინეს, რომ ის სამჯერ მეტ ჟანგბადს იყენებდა, ვიდრე შესაბამისი ზომის სხვა ცხოველები. ჩვეულებრივ, როცა ცხოველები ზომაში იმატებენ, ერთ გრამზე მათ მიერ ჟანგბადის მოხმარება იკლებს. მაგალითად, ზიგა ქსოვილის ერთ გრამზე ერთ დღეში იმდენივე ჟანგბადს მოიხმარს, რამდენსაც სპილო ერთ გრამ ქსოვილზე მთელი თვის განმავლობაში. მაგრამ ლინდშტედტმა და მისმა კოლეგებმა აღმოაჩინეს, რომ ფიწალ-რქოსანი ერთი გრამი ქსოვილის მიერ მოხმარებული ჟანგბადის რაოდენობა იმდენივე იყო, რამდენიც 10 გ თავისთვის!

იმისთვის, რომ უფრო შესაფერისი კვლევა გამოსულიყო, მკვლევართა ჯგუფმა გადაწყვიტა, სხვადასხვა ფიზიოლოგიური მახასიათებელი შეედარე-

▲ სურათი 42.30. ნახშირორჟანგის ტრანსპორტი სისხლში.

ბინა იგივე ზომის სხვა ცხოველებთან, როგორც არის შინაური თხა, რომელიც სირბილზე უფრო მეტად კლდეზე ცოცვას არის შეგუებული. აღმოაჩინეს, რომ ჟანგბადის მაქსიმალური მოხმარების სისწრაფე ხუთჯერ უფრო მეტი იყო, ვიდრე თხებში. რატომ? იმიტომ, რომ ფიწალ-რქოსნებს, თხებთან შედარებით, ჟანგბადის დიფუზიის უფრო დიდი ზედაპირი აქვთ, გულის თითქმის ხუთჯერ დიდი გამოსავალი, კუნთების უფრო დიდი მასა და მიტოქონდრიების მაღალი რიცხვი და სიმჭიდროვე. გარდა ამისა, ფიწალ-რქოსნები ინარჩუნებენ კუნთის მაღალ ტემპერატურას. მკვლევრებმა დაასკვნეს, რომ ფიწალ-რქოსნების ჟანგბადის მოხმარების უკიდურესად მაღალი სისწრაფე, რომელიც მათ საშუალებას აძლევს, დიდ მანძილზე მაღალი სიჩქარით ირბინონ, სხვა ძუძუმწოვრებში არსებული ნორმალური ფიზიოლოგიური პროცესების გაძლიერების შედეგია. ამ გაძლიერებაში შეიძლება ბუნებრივი გადარჩევის მოქმედება დავინახოთ, რაც ალბათ იმიტომ იყო გამოწვეული, რომ მილიონობით წლის განმავლობაში ღია მინდვრებზე ამ ცხოველებს ბევრი თავდასხმელი ჰყავდა.

### მეცინთავი ძუძუმწოვრები

ცხოველთა უმეტესობას აირთა მიმოცვლა მუდმივად შეუძლია, მაგრამ ზოგჯერ ნორმალური სასუნთქი გარემო ხელმისაწვდომი არ არის – მაგალითად, როდესაც ჰაერით მსუნთქავები წყლის ქვეშ ცურავენ. მაშინ, როცა კარგად მოცურავე ადამიანები, თვით კარგად გაწვრთნილი მეცინთავებიც კი მხოლოდ 2-3 წთ ახერხებენ სუნთქვის შეკავებას და 20 მ სიღრმეზე ცურავენ, ანტარქტიკის სელაპი 200-500 მ-ზე ყვინთავს და იქ დაახლოებით 20 წთ-ის განმავლობაში რჩება (ზოგჯერ ერთ საათზე მეტსაც კი). მათგან განსხვავებით, ადამიანებს მსგავსი დროით ყვინთვისთვის ჰაერი ბალონების სახით სჭირდებათ. სელაპების ზოგი სახეობა, ზღვის კუები და ვეშაპები კიდევ უფრო შთამბეჭდავ ჩაყვინთვას ახორციელებენ. სპილო-სელაპებს შეუძლიათ 1,500 მ სიღრმეზე ჩაყვინთვა და იქ 2 სთ-ზე მეტხანს გაჩერება.

მეცინთავი ძუძუმწოვრების ერთი ადაპტაცია ჟანგბადის დიდი რაოდენობით დამარაგების უნარი. ადამიანთან შედარებით, სელაპებს შეუძლიათ კგ-ზე (ძირითადად სისხლსა და კუნთებში) ორჯერ მეტი ჟანგბადის დამარაგება. ჩვენი მთლიანი ჟანგბადის დაახლოებით 36% ფილტვებშია და 51% სისხლში. ამისგან განსხვავებით, სელაპი თავის შედარებით პატარა ფილტვში 5% ჟანგბადს იმარაგებს (რომლის გამოდევნაც ჩაყვინთვამდე შეუძლია, რაც ტივტივს ამცირებს) და 70% კი სისხლში უმარაგდება. სელაპს სხეულის კგ-თან მიმართებაში ორჯერ უფრო მეტი სისხლი აქვს, ვიდრე ადამიანს. მეორე ადაპტაცია სელაპის უდიდესი ელენთაა, რომელსაც დაახლოებით 24 ლ სისხლის დამარაგება შეუძლია. ელენთა, სავარაუდოდ, ჩაყვინთვის მერე უნდა იკუმშებოდეს და სისხლს ჟანგბადით მდიდარი ერითროციტებით ეხმარებოდეს. მეცინთავ ძუძუმწოვრებს კუნთებში ჟანგბადის შემნახველი პიგმენტის, მიოგლობინის, დიდი რაოდენობა აქვთ. სელაპს შეუძლია ჟანგბადის 25% კუნთებში შეინახოს, რაც გაცილებით უფრო მეტია, ვიდრე ადამიანებს (13%).

მეცინთავი ძუძუმწოვრები წყლისქვეშა მოგზაურობას იწყებენ არა მარტო ჟანგბადის დიდი მარაგით, არამედ მათ აქვთ მთელი რიგი ადაპტაციები, რომლებიც ჟანგბადის შენახვისთვის არის საჭირო. ისინი კუნთების მცირე დატვირთვით ცურავენ და ხშირად ტივტივის უნარიანობის შეცვლას ზევით და ქვევით მოძრაობის-



▲ სურათი 42.31 მორბენალი ანტილოპის (*Antilocapra americana*) მიერ ჟანგბადის მოხმარების გაზომვა. სტენ ლინდმტედტი აგროვებს სასირბილო გზაზე მორბენალი ანტილოპის სუნთქვის მონაცემებს.

ვის იყენებენ. მათი გულისცემის და ჟანგბადის გამოყენების სიხშირე მცირდება ყვინთვის დროს და მარეგულირებელი მექანიზმები გავლენას ახდენს პერიფერიულ წინააღმდეგობაზე. სისხლის უმეტეს ნაწილს თავისკენ, ზურგის ტვინისკენ, თვალებისკენ, ფარისებრი ჯირკვლისკენ და პლაცენტისკენ (მაკე სელაპებში) აგზავნიან. კუნთებისთვის სისხლის მიწოდება იზღუდება და მთლიანადაც ითიშება ხანგრძლივი ყვინთვის დროს. 20 წთ-ზე მეტი ხნით ყვინთვისას სელაპები მიოგლობინთან დაკავშირებულ ჟანგბადს იყენებენ და შემდეგ ატფ-ის სინთეზიც სუნთქვის პროცესის ნაცვლად, ფერმენტაციით მიმდინარეობს (იხ. თავი 9).

სელაპის და სხვა ჰაერით მსუნთქავი მეცინთავების უჩვეულო უნარი ხანგრძლივი ყვინთვების დროს სხეული ენერგიით უზრუნველყონ ჩვენი შესწავლის ორი დაკავშირებული თემის მაჩვენებელია – ხანმოკლე დროში ფიზიოლოგიური შეგუება და ხანგრძლივი დროში ბუნებრივი გადარჩევის მოქმედება.

## კონცეფცია ცესცი 42.6

1. რა განსაზღვრავს ქსოვილებსა და ალვეოლებში იმას, ჟანგბადი კაპილარებში დიფუნდირებს, თუ იქედან გარეთ გამოვა? ახსენით.
2. რა როლი აქვს ბორის ნანაცვლებას ჟანგბადის აქტიურ ქსოვილებთან გადატანაში?
3. ქსოვილის კაპილარების სისხლის წითელ უჯრედებში ნახშირორჟანგი წყალს უკავშირდება და ნახშირმჟავას წარმოქმნის. რა ინვესს ამ რეაქციის შებრუნებას ალვეოლურ სივრცესთან ახლოს მყოფი კაპილარების სისხლის წითელ უჯრედებში?
4. აღწერეთ სამი ადაპტაცია, რაც სელაპს საშუალებას აძლევს წყლის ქვეშ გაცილებით უფრო დიდხანს გაჩერდეს ვიდრე ადამიანი.

## 42-ე თავის მიმოხილვა

### ბიბლიური პრინციპების მაქსიმალური შინაარსი

#### პრინციპი 42.1

#### სისხლის მიმოძვრის სისწრაფე ფიზიოლოგიურ და სისხლს

- ▶ სატრანსპორტო სისტემები მიმოცვლის ორგანიზმს სხეულის უჯრედებთან აკავშირებს. ყველაზე რთულ ცხოველებს შინაგანი სატრანსპორტო სისტემები გააჩნიათ. ისინი სითხეს აცირკულირებენ და სასიცოცხლო ნივთიერებებს უზრუნველყოფენ სასიცოცხლო თხევად გარემოსა და ისეთ ორგანოებს შორის, როგორიცაა ფილტვი.
- ▶ **უხერხემლოთა მიმოქცევის სისტემა** უმეტეს უხერხემლოთა შიდა ტრანსპორტისთვის ნაწლავის ღრუ ან მიმოქცევის სისტემა აქვს.
- ▶ **ხერხემლიანთა მიმოქცევის სისტემის მიმოხილვა** გულ-სისხლძარღვთა სისტემის ადაპტაციები ხერხემლიანთა ფილოგენეზს ასახავს. სისხლი სისხლის დახურულ მიმოქცევის სისტემაში მიედინება, რომელიც სისხლძარღვებისა და ორი-ოთხი საკნის გზით გულსგან შედგება. არტერიებს სისხლი კაპილარებისკენ მიაქვს, რომლებიც სისხლსა და ქსოვილურ სითხეს შორის ნივთიერებათა მიმოცვლის უზანაია. ხოლო ვენები კაპილარებიდან სისხლს გულში აბრუნებს.

#### პრინციპი 42.2

#### ბუბონური წყლის სისხლის მიმოძვრის ორი წრე დამოკიდებულია გულის ანატომიასა და გულის მოძვრების ციკლზე

- ▶ **ძუძუმწოვართა სისხლის მიმოქცევა.** გზა გულის სარქველები სისხლის ერთი მიმართულებით მოძრაობას განაპირობებს გულში. მარჯვენა პარკუჭი სისხლს ფილტვებში გადატანს, სადაც ის ჟანგბადით იტვირთება და ნახშირორჟანგისგან თავისუფლდება. ჟანგბადით მდიდარი სისხლი ფილტვებიდან მარცხენა წინაგულში შედის და სხეულის ქსოვილებთან მარცხენა პარკუჭიდან გადაიტანება. სისხლი გულში მარჯვენა წინაგულით ბრუნდება.
- ▶ **ძუძუმწოვრების გული: დანერგვითი მიმოხილვა.** გულის მოქმედების სისხრივ (პულსი) არის ერთ წუთში გულის შე-

კუმშვების რიცხვი. გულის ციკლი გულის შეკუმშვისა და მოდუნების ერთი სრული თანმიმდევრობაა. გულის გამოსავალი არის სისხლის მოცულობა, რომელიც ერთ წუთში სისტემურ წრეში გადაიტანება.

- ▶ **გულის რიტმული ცემის შენარჩუნება.** გულის პეისმეიკერ სინოატრიულურ (სა) კვანძში წარმოშობილი იმპულსები გადაეცემა ატრიოვენტრიკულურ (ავ) კვანძს. მცირე დაყოვნების შემდეგ ისინი პურკინიეს ბოჭკოებს გადაეცემა. პეისმეიკური აქტივობა ნერვული იმპულსების, პორმონების, სხეულის ტემპერატურის გავლენის ქვეშ იმყოფება.

#### პრინციპი 42.3

#### სისხლის მიმოძვრის ფიზიოლოგიური კანონები მათავე

- ▶ **სისხლძარღვების სტრუქტურა და ფუნქციები** არტერიების, ვენებისა და კაპილარების სტრუქტურული განსხვავებები მათ განსხვავებულ ფუნქციებს შეესაბამება.
- ▶ **სისხლის დინების სიჩქარე** ფიზიოლოგიური კანონები, რომლებიც მიღებულია სითხის მოძრაობის მართავენ, გავლენას ახდენს სისხლის წნეკასა და დინებაზე. სისხლის დინების სიჩქარე იცვლება მიმოქცევის სისტემაში. სიჩქარე ყველაზე დაბალი კაპილარების კონაშია, რაც მაღალი წინაღობისა და არტერიოლებისა და კაპილარების დიდი ჯამური განივკვეთის ფართობის შედეგია.
- ▶ **სისხლის წნევა** სისხლის წნევა ჰიდროსტატიკური ძალაა, რომლითაც სისხლი ძარღვების კედლებზე მოქმედებს და განისაზღვრება გულის გამოსავლითა და პერიფერიული წინაღობით. წინაღობა არტერიოლების ცვალებად დიამეტრზე არის დამოკიდებული..
- ▶ **კაპილარების ფუნქცია** ლიმფური სისტემა სისხლს სითხეს უბრუნებს და ორგანიზმის დაცვაში იღებს მონაწილეობას. სითხე სისხლის მიმოქცევის სისტემას უშუალოდ კაპილარების ვენური დაბოლოების მხარეს უბრუნდება, არაპირდაპირი გზით კი ლიმფური სისტემის საშუალებით
- ▶ **ლიმფური სისტემის მიერ სითხის დაბრუნება** ლიმფური სისტემა სისხლს სითხეს უბრუნებს და ორგანიზმის დაცვაში იღებს მონაწილეობას. სითხე სისხლის მიმოქცევის სისტემას უშუალოდ კაპილარების ვენური დაბოლოების მხარეს უბრუნდება, არაპირდაპირი გზით კი ლიმფური სისტემის საშუალებით.

## პანცეფცია 42.4

### სისხლი ატის შემავრთბელი ქსოვილი პლაზმაში განლაგებული უჯრედებით

- ▶ **სისხლის შემადგენლობა და ფუნქციები.** მთელი სისხლი უჯრედული ელემენტებისგან (უჯრედებისა და უჯრედის ფრაგმენტებისგან, რომელთაც თრომბოციტებს უწოდებენ) და თხევადი მატრიქსისგან (რომელსაც პლაზმა ეწოდება) შედგება. პლაზმის ცილები გავლენას ახდენენ სისხლის pH, ოსმოსურ წნევასა და სიბლანტეზე, მონაწილეობას იღებენ ცხიმების გადატანაში, იმუნიტეტის (ანტისხეულები) ჩამოყალიბებასა და შედეგებაში (ფიბრინოგენი). სისხლის წითელი უჯრედები ანუ ერითროციტები უანგბადის ტრანსპორტის ფუნქციას ასრულებენ. სისხლის თეთრი უჯრედების ანუ ლეიკოციტების ზუთი ტიპია. ისინი ბაქტერიებისა და სხვა უცხო სხეულების ფაგოციტოზის გზით ან ანტისხეულების წარმოქმნით დამცველობით პროცესში იღებენ მონაწილეობას. თრომბოციტები სისხლის შედეგებაში არიან ჩართულები, აწარმოებენ რეაქციების კასკადს, რომელიც პლაზმის ფიბრინოგენს ფიბრინად გარდაქმნის.
- ▶ **გულსისხლძარღვთა სისტემის დაავადებები.** გულსისხლძარღვთა სისტემის დაავადებები მაღალგანვითარებულ ქვეყნებში (მათ შორის აშშ-ში) სიკვდილიანობის მთავარი მიზეზია.

## პანცეფცია 42.5

### აირთა ცვლა განსაკუთრებულ სუნთქვით ზღაპირბეჭე ხოტცილდება

- ▶ **აირთა მიმოცვლა უჯრედულ სუნთქვას უანგბადით უზრუნველყოფს და ნახშირორჟანგს გარემოში გამოყოფს.** ცხოველებს სასუნთქი აირების ( $O_2$  და  $CO_2$ ) დიფუზიისთვის უჯრედებსა და სასუნთქ გარემოს შორის, რომელიც ჰაერი ან წყალია, დიდი და ნესტიანი სუნთქვითი ზედაპირები ესაჭიროებათ.
- ▶ **წყლის ცხოველების ლაყუჩები.** ლაყუჩები წყლის ცხოველების უმეტესობის მთავარი ადაპტაციაა. ისინი აირთა ცვლისთვის განკუთვნილი სხეულის ზედაპირის განსაკუთრებული წარმონაქმნებია. ზოგ ლაყუჩში (მათ შორის თევზების ლაყუჩებშიც) აირთა მიმოცვლის ეფექტურობა გაზრდილია სისხლისა და წყლის ურთიერთსაწინააღმდეგო მოძრაობით წარმოქმნილი ვენტილაციის ხარჯზე.
- ▶ **მწერების ტრაქეალური სისტემა.** მწერების ტრაქეა მცირე ზომის დატოტილი მილებია, რომლებიც მთელ სხეულშია გადაწეული და უანგბადი უშუალოდ უჯრედებამდე მიაქვს.
- ▶ **ფილტვები.** ობობები, ხმელეთის ლოკოკინები და ხმელეთის ხერხემლიანების უმეტესობა შინაგან ფილტვებს შეიცავს. ძუძუმწოვრებში ნესტოებით შესული ჰაერი გაივლის ხახას, ტრაქეას, ბრონქებს და მათ ბრმა დაბოლოებებში ალვეოლებში ჩადის, სადაც ადგილი აქვს აირთა ცვლას.

## პანცეფცია 42.6

### სუნთქვის დრთს ადგილი აქვს ფილტვების ვენტილაციას

- ▶ **როგორ სუნთქავს ამფიბია. ამფიბია ფილტვების ვენტილაციას დადებითი წნევით ახდენს, რომელიც ჰაერს დაწოლით ტრაქეასკენ აგზავნის.**
- ▶ **როგორ სუნთქავს ძუძუმწოვარი.** ძუძუმწოვრები ფილტვების ვენტილაციას უარყოფითი წნევით ახდენენ, რომელიც ჰაერს ფილტვებისკენ ქაჩავს. ფილტვების მოცულობა იზრდება, როდესაც ნეკნთაშორისი კუნთები და დიაფრაგმა იკუმშება.
- ▶ **როგორ სუნთქვენ ფრინველები.** ფილტვების გარდა, ფრინველებს რვა ან ცხრა საჰაერო პარკი აქვთ, რომლებიც ფილტვებში ჰაერის მუდმივ მიდინებას უზრუნველყოფენ. ჰაერი ფილტვებში მხოლოდ ერთი მიმართულებით გადის. ყოველი ამოსუნთქვა სრულიად ანახლებს ფილტვების ჰაერს.
- ▶ **სუნთქვის კონტროლი ადამიანებში.** სუნთქვის სიღრმესა და სიხშირეს მოგრძო ტვინში არსებული ცენტრები აკონტროლებენ. მოგრძო ტვინის სენსორები აფიქსირებენ ცერებროსპინალური სითხის pH-ს (რაც სისხლში ნახშირორჟანგის კონცენტრაციას ასახავს). აღნიშნული ცენტრები მეტაბოლური მოთხოვნების შესაბამისად სუნთქვის სიღრმისა და სიხშირის დარეგულირებას ახდენენ. სუნთქვის მეორადი კონტროლი აორტასა და საძილე არტერიაში არსებული სენსორების მიერ სისხლის pH-ის და მასში არსებული უანგბადისა და ნახშირორჟანგის დონის მონიტორინგით ხდება.

## პანცეფცია 42.7

### სისხლის სუნთქვის პიგმენტებს აირთა დაჯავშირებისა და ცრანსპორტის ფუნქცია აკისრიათ

- ▶ **პარციალური წნევის გრადიენტის როლი.** აირები ფილტვებსა და სხვა ორგანოებში წნევის გრადიენტის საშუალებით დიფუნდირდება. უანგბადი და ნახშირორჟანგი თავიანთი მაღალი პარციალური წნევის არედან დაბლისკენ გადადიან.
- ▶ **სუნთქვის პიგმენტებს გადააქვთ აირები და ეხმარებიან სისხლის ბუფერებს.** სუნთქვის პიგმენტები მნიშვნელოვნად ზრდის უანგბადის იმ რაოდენობას, რომლის გადატანასაც სისხლი ახერხებს. ბევრ ფეხსახსრიანსა და მოლუსკს სპილენძის შემცველი ჰემოციანინი აქვს, ხერხემლიანებსა და უხერხემლოთა დიდ მრავალფეროვნებას კი ჰემოგლობინი.
- ▶ **გამორჩეული ათლეტი ცხოველები.** ფიწალ-რქოსანი ანტილოპას უანგბადის მოხმარების უკიდურესად მაღალი დონე განაპირობებს მის უნარს, დიდ დისტანციებზე მაღალი სიჩქარით ირბინოს. ღრმად მყვინთავი ჰაერით მსუნთქავები კი იგროვენ უანგბადს და ნელა გამოიყენებენ მას.

## შეამოწმეთ საკუთარი ცოდნა

- ჩამოთვლილ სუნთქვის სისტემათაგან რომელი არ არის მჭიდრო კავშირში სისხლის მიმოქცევის სისტემასთან?
  - ხერხემლიანთა ფილტვები;
  - თევზების ლაყუჩები;
  - მწერების ტრაქეალური სისტემა;
  - ჭიაყელას გარეგანი კანი;
  - მრავალჯაგრიანი ჭიების პარაპოდები;
- სისხლი რომელიც ფილტვის ვენით გულს უბრუნდება თავდაპირველად ჩაედინება:
  - ღრუ ვენაში;
  - მარცხენა წინაგულში;
  - მარჯვენა წინაგულში;
  - მარცხენა პარკუჭში;
  - მარჯვენა პარკუჭში;
- რისი უშუალო საზომაა პულსი?
  - სისხლის წნევის;
  - სისხლჩაქცევის მოცულობის;
  - გულის გამოსავლის;
  - გულის მოქმედების სიხშირის;
  - სუნთქვის სიხშირის.
- კავშირი სისხლის წნევას (სწ), გულის გამოსავალსა (გგ) და პერიფერიულ წინაღობას (პწ) შორის შეიძლება შემდეგი განტოლებით გამოისახოს  $s_{\text{წ}} = g_{\text{გ}} \cdot R_{\text{პწ}}$ . ყველა ქვემოთ ჩამოთვლილი ცვლილება გარდა ერთისა სისხლის წნევის გაზრდას გამოიწვევს. რომელია ეს ერთი?
  - ინსულტის მოცულობის გაზრდა;
  - გულის მოქმედების სიხშირის გაზრდა;
  - პარკუჭის დიასტოლის ხანგრძლივობის გაზრდა;
  - არტერიოლების კედლის გლუვი კუნთების შეკუმშვა;
  - არტერიოლების დიამეტრის შემცირება;
- ფიბრინოგენის ფიბრინად გარდაქმნა:
  - ვლინდება როდესაც ფიბრინოგენი დანგრეული თრომბოციტებიდან გამოიყოფა;
  - სისხლის წითელი უჯრედების შიგნით მიმდინარეობს;
  - დაკავშირებულია ჰიპერტენზიასთან და შეიძლება არტერიის კედელი დააზიანოს;
  - ჰემოფილიის მქონე ინდივიდებში შესაძლოა განსაკუთრებით ხშირად გამოვლინდეს;
  - არის შედეგების ბოლო ეტაპი, რომელიც შედეგების ბევრ ფაქტორს მოიცავს;
- ნეგატიური წნევით სუნთქვისას, რისი შედეგია ჩასუნთქვა?
  - პირიდან ფილტვებში ჰაერის ძალით გადატანის;
  - დიაფრაგმის შეკუმშვის;
  - ნეკნების კამერის კუნთების მოდუნების;
  - ალვეოლების გასაფართოებლად ფილტვების კუნთების გამოყენების;

ე. მუცლის კუნთების შეკუმშვის;

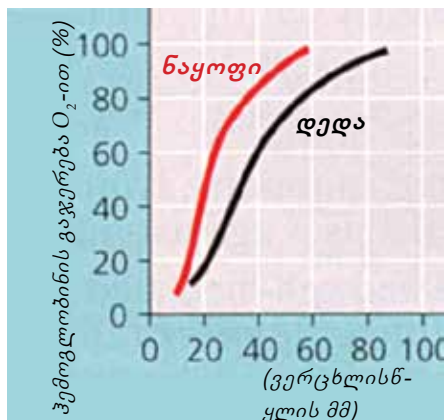
- როდესაც თქვენ სუნთქვას იკავებთ, ქვემოთ ჩამოთვლილი სისხლის რომელი აირი იცვლება თავდაპირველად და რთავს სუნთქვას?
  - ჟანგბადის ბ. ჟანგბადის დაქვეითება;
  - ნახშირორჟანგის გაზრდა;
  - ნახშირორჟანგის დაქვეითება;
  - ნახშირორჟანგის გაზრდა და ჟანგბადის დაქვეითება;
- ვარჯიშით გამოწვეული ადამიანის სისხლის pH დაქვეითება:
  - შეამცირებს სუნთქვის სიხშირეს;
  - გაზრდის გულის ცემის სიხშირეს;
  - შეამცირებს ჰემოგლობინიდან მოცილებული ჟანგბადის რაოდენობას;
  - შეამცირებს გულის გამოსავალს;
  - შეამცირებს ჰემოგლობინთან ნახშირორჟანგის დაკავშირებას;
- აქტიური კუნთოვანი უჯრედების გარშემომრტყმელ უჯრედშორის სითხესთან შედარებით ამ უჯრედებთან მისულ სისხლს არტერიებში აქვს:
  - ჟანგბადის მაღალი პარციალური წნევა;
  - ნახშირორჟანგის მაღალი პარციალური წნევა;
  - ბიკარბონატების მაღალი კონცენტრაცია;
  - დაბალი pH;
  - დაბალი ოსმოსური წნევა;
- ქვემოთ ჩამოთვლილი რეაქციებიდან, რომელი ჭარბობს ფილტვის კაპილარებში გამავალი სისხლის წითელ უჯრედებში? ( $Hb = \text{ჰემოგლობინი}$ ).
  - $Hb + 4 O_2 \rightarrow Hb(O_2)_4$ ;
  - $Hb(O_2)_4 \rightarrow Hb + 4 O_2$ ;
  - $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$ ;
  - $H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$ ;
  - $Hb + 4 CO_2 \rightarrow Hb(CO_2)_4$ ;

## ვჯღუფიყი კავშიტი

გოძილას ერთ-ერთი ოპონენტთაგანი ფილმში არის მოთრა, გიგანტური ჩრჩილის მაგვარი არსება უამრავი ფეხითა და ფრთებით. ამის მსგავსი ფანტასტიკური ქმნილებები შეიძლება გაკრიტიკებული იყოს ბიოქიმიურ და ფიზიოლოგიურ კანონზომიერებებზე დაყრდნობით. სუნთქვასა და აირთა ცვლაზე ყურადღების გამახვილებით, რომელიც თქვენ ამ თავში ისწავლეთ, რომელი ფიზიოლოგიური პრობლემები ექნებოდა მოთრას? ყველაზე დიდი მწერები, რომლებიც როდესმე ბინადრობდნენ პალეოზოური კალიები არიან, რომელთაც ნახევარმეტრიანი ფრთები ჰქონდათ. როგორ ფიქრობთ, რატომ არის გიგანტური მწერების არსებობა შეუძლებელი?

## მეცნიერული კვლევა

ადამიანის ჩანასახის ჰემოგლობინი ზრდასრულის ჰემოგლობინისგან განსხვავდება. შეადარეთ ქვემოთა გრაფიკზე მოცემული ორი ჰემოგლობინის დისოციაციის გრაფიკი. შემოგვთავაზეთ ჰიპოთეზა ჰემოგლობინის ორი ვერსიის განსხვავების ფუნქციური დანიშნულების შესახებ.

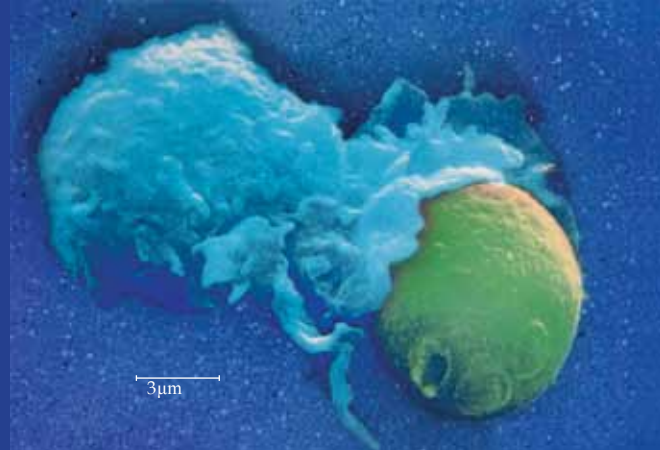


## მეცნიერება, ცოდნოლოგია და საზოგადოება

უამრავი კვლევით ნაჩვენები იქნა გულსისხძარღვთა და ფილტვების დაავადებების კავშირი მონევასთან. ჯანდაცვის ავტორიტეტების მიხედვით, მონევა ამერიკის შეერთებულ შტატებში ადრეული სიკვდილის მთავარი მიზეზია. მონევის საწინააღმდეგო და ჯანდაცვის ჯგუფებმა შემოგვთავაზეს მედიკამენტების რეკლამირების სრული აკრძალვა. რა არის სრული აკრძალვის მხარდამჭერი და საწინააღმდეგო არგუმენტები? თქვენ მხარს უჭერთ, თუ ეწინააღმდეგებით აღნიშნული აკრძალვას? დაიცავით თქვენი პოზიცია.

# 43

## იმუნური სისტემა



▲ სურათი 43.1 მაკროფაგი (ლურჯი) შთანთქმავს სოკოს უჯრედს (მწვანე).

### ბიბლიოგრაფიული კონცეფციები

- 43.1** თანდაყოლილი იმუნიტეტი უზრუნველყოფს ფართო სპექტრის ინფექციებისგან დაცვას
- 43.2** შეძენილ იმუნიტეტში, ინფექციების წინააღმდეგ სპეციფიკურ დაცვას ლიმფოციტები უზრუნველყოფენ
- 43.3** ჰუმორული და უჯრედული იმუნიტეტი უზრუნველყოფს სხვადასხვა ტიპის საფრთხისგან დაცვას
- 43.4** იმუნური სისტემის უნარი, განასხვავოს საკუთარი უცხოვსგან, ზღუდავს ქსოვილის ტრანსპლანტაციას
- 43.5** გადაჭარბებულმა, საკუთარი თავისკენ მიმართულმა ან შემცირებულმა იმუნურმა პასუხმა შესაძლოა დაავადება გამოიწვიოს

### შესავალი

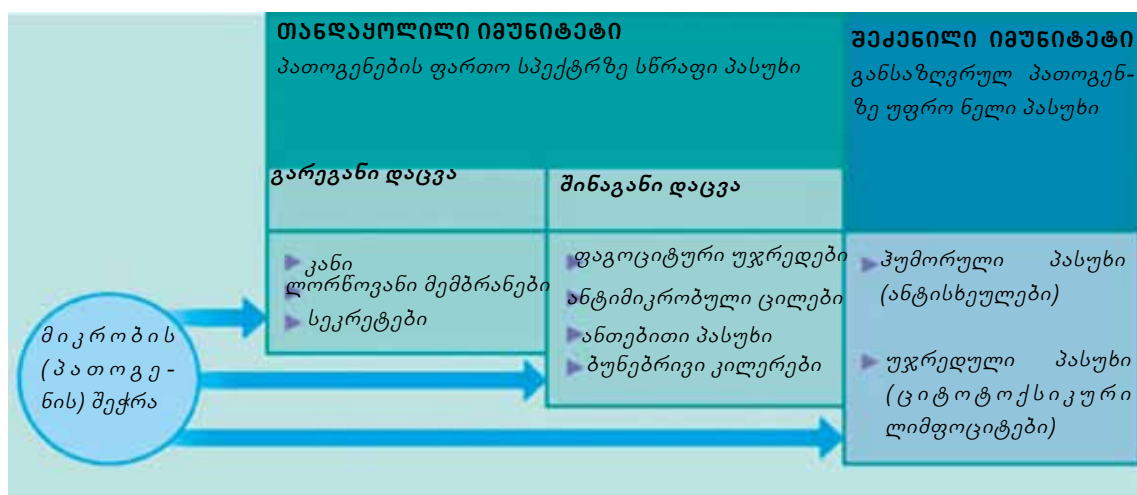
### ღაზფრვა, შეცნობა და პასუხი

ცხოველმა უნდა დაიცვას თავი უამრავი პოტენციურად საშიში ვირუსისგან, ბაქტერიისგან და სხვა პათოგენისგან, რომელიც ჰაერში, საკვებასა და წყალში არსებობს. მას ასევე უნევს ბრძოლა სხეულის ანომალურ უჯრედებთან, რომლებმაც შესაძლოა კიბო გამოიწვიოს. აღნიშნულ საფრთხეებთან საბრძოლველად დაცვის ორი მთავარი ტიპი განვითარდა.

**თანდაყოლილი იმუნიტეტი** არსებობს სანამ პათოგენთან შეხება მოხდება და დაბადებიდან მოქმედა. თანდაყო-

ლილი იმუნური რეაქციები ფართოდ არასპეციფიკურია. ისინი სწრაფად ცნობენ, რეაგირებენ და პასუხს სცემენ მიკრობთა ფართო სპექტრს. თანდაყოლილი იმუნიტეტი შედგება გარეთა ბარიერებისგან, რომლებიც კანისა და ლორწოვანი მემბრანებისგან იქმნება და შიდა უჯრედული და ქიმიური მექანიზმებისგან, რომლებიც იმ ინფექციურ აგენტებს ებრძვიან, რომლებიც გარეგანი ბარიერის გადალახვას ახერხებენ. შიდა დაცვის მთავარი მოქმედი ობიექტები მაკროფაგები და სხვა ფაგოციტური უჯრედებია. მაგალითად, **სურათი 43.1** აჩვენებს მაკროფაგს, რომელიც სოკოს უჯრედს შთანთქმავს.

დაცვის მეორე მთავარი ტიპი არის **შეძენილი იმუნიტეტი**, რომელსაც ასევე ადაპტურ იმუნიტეტსაც უწოდებენ. ის ვითარდება მხოლოდ ისეთი გამომწვევი აგენტების მოქმედების შემდეგ, როგორიცაა მიკრობები, სხეულის ანომალური უჯრედები, ტოქსინები, ან სხვა უცხო სხეულები. შეძენილი დაცვა მაღალსპეციფიკურია, რაც იმას გულისხმობს, რომ შესაძლებელია ერთი აგენტის მეორისგან გარჩევა, მათ შორის ისეთებისაც კი, რომლებიც ძალზედ მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. ეს შეცნობა მიიღწევა სისხლის თეთრი უჯრედებით, რომლებსაც **ლიმფოციტებს** უწოდებენ და რომლებიც იმუნური პასუხების ორ ძირითად ტიპს ახორციელებენ. ჰუმორულ პასუხში, უჯრედები, რომლებიც ლიმფოციტების ნაწარმებია, გამოყოფენ დამცავ ცილებს, რომლებსაც **ანტისხეულები** ეწოდება და რომლებიც მიკრობებს უკავშირდებიან და განადგურებისთვის მონიშნავენ. უჯრედული პასუხის დროს, ციტოტოქსიკური ლიმფოციტები პირდაპირ ანგრევენ ინფიცირებულ სხეულებს, სიმსივნურ უჯრედებს, ან უცხო ქსოვილს. **სურათი 43.2** აჯამებს თანდაყოლილ და შეძენილ იმუნიტეტს. ამ თავში გაეცნობით, დაცვის ამ ორი კომპონენტის უჯრედული და ქიმიური მექანიზმები თუ როგორ იცავენ ერთად ხერხემლიანებს სხვადასხვა საფრთხისგან. მოგვიანებით ამ თავში ასევე მოკლედ შევეხებით უხერხემლოთა



▲ **სურათი 43.2** ხერხემლიანთა ბაქტერიებისგან, ვირუსებისგან და სხვა პათოგენებისგან დაცვის მიმოხილვა. დაცვითი სისტემები ხერხემლიანებში შესაძლოა დაიყოს თანდაყოლილ და შეძენილ იმუნიტეტად. თუ პათოგენი გადის სხეულის გარეთა თანდაყოლილ დაცვით სისტემებს, მოქმედებაში მოდის შინაგანი დაცვითი სისტემები. დაცვა, რომელიც განსაზღვრული პათოგენების წინააღმდეგ შეძენილი მექანიზმებით მიიღწევა, შედარებით უფრო ნელი ვითარდება. თანდაყოლილი იმუნიტეტის ზოგი კომპონენტი შეძენილ იმუნიტეტშიც მოქმედებს.

იმუნურ სისტემასაც, რომელიც მხოლოდ თანდაყოლილი არასპეციფიკური მექანიზმებით ფუნქციონირებს.

## კონცეფცია 43.1

### თანდაყოლილი იმუნიტეტი უზრუნველყოფს ფართო სპექტრის ინტეგრაციისგან დაცვას

შეჭრილმა მიკრობმა უნდა გადალახოს გარეთა ბარიერები, რომელიც კანითა და ლორწოვანი გარსით არის შექმნილი. პათოგენი, რომელიც გაივლის აღნიშნულ ბარიერს, შეეჯახება თანდაყოლილ უჯრედულ და ქიმიურ მექანიზმებს, რომლებიც ხელს უშლის მის თავდასხმას სხეულზე.

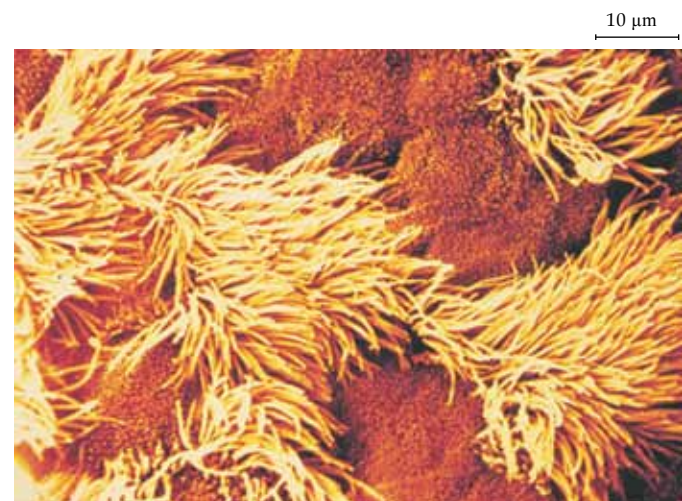
### გარეგანი დაცვა

ინტაქტური კანი, რომელშიც ჩვეულებრივ არ გადის ვირუსი და ბაქტერია, შესაძლოა, უმცირესი დაზიანების შედეგად კი განვლადი გახდეს. ამის მსგავსად, ლორწოვანი შრე, რომლითაც ამოფენილია სუნთქვის, მომწელებელი და შარდსასქესო გზები, ქმნის პოტენციური დამაზიანებელი მიკრობების შესვლის ბარიერს. აღნიშნული ლორწოვანი გარსების ზოგი უჯრედი თავად წარმოქმნის ლორწოს, ბლანტ სითხეს, რომელიც იჭერს მიკრობებს და სხვა ნაწილაკებს. მაგალითად, ტრაქეაში წამწამოვანი ეპითელური უჯრედები ზევით განდევნიან ლორწოსა და უცხო ნაწილაკებს და არ უშვებენ მათ ფილტვებისკენ (სურ. 43.3). სხეულში სხვადასხვა მიკრობების მიერ კოლონების წარმოქმნა შეზღუდულია ლორწოვანი სეკრეტების, ნერწყვის და ცრემლის გამრეცხი მოქმედებითაც, რომლებითაც მუდმივად ხდება ეპითელური ზედაპირების

ჩამორეცხვა.

ლორწოვანი გარსები მათი ფიზიკური როლის მიღმა უზრუნველყოფენ ისეთი გარემოს შექმნასაც, რომელიც მიკრობებისთვის არასასურველია. ადამიანებში, ცხიმოვანი ჯირკვლებისა და საოფლე ჯირკვლების სეკრეცია კანს უქმნის განსაზღვრულ pH-ს, რომელიც მერყეობს 3-სა და 5-ს შორის, რაც საკმარისად მჟავა იმისთვის, რომ ბევრ ბაქტერიას კოლონიზაციაში შეუშალოს ხელი (ის ბაქტერიები, რომლებიც კანზე ჩვეულებრივ სახლობენ, შეგუებული არიან მჟავა და შედარებით მშრალ გარემოს).

ამის მსგავსად, საკვებსა და წყალში, ასევე გადაყლაპულ ლორწოში არსებული ბაქტერიები სანამ ნაწლავებში შესვ-



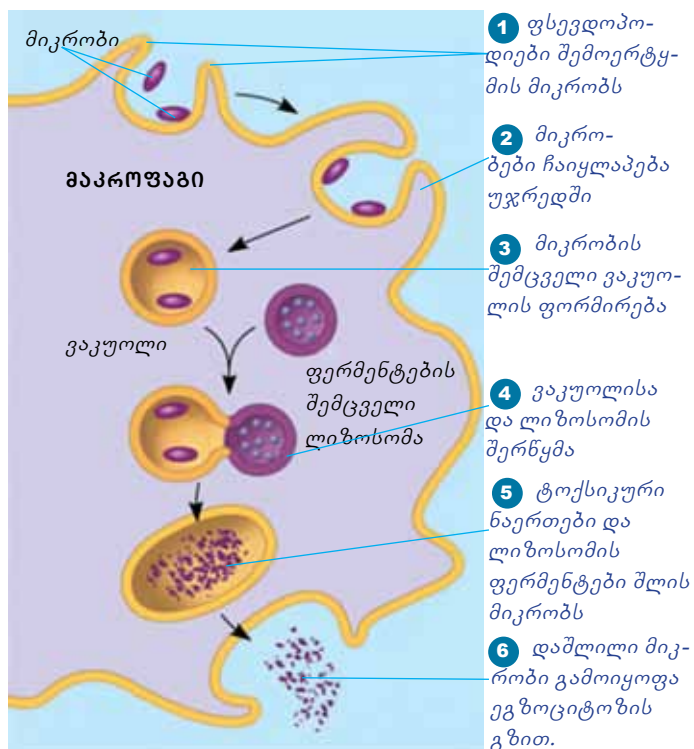
▲ **სურათი 43.3** გარეგანი თანდაყოლილი დაცვა ლორწოვანი გარსით. ტრაქეას სანათური შეიცავს ლორწოს წარმოქმნელ უჯრედებს (ნარინჯისფერი) და წამწამოვან უჯრედებს (ყვითელი). წამწამების სინქრონული მოძრაობა ლორწოსა და დატყვევებულ მიკრობებს ზევით, ხახისკენ განდევნის (ფერადი SEM).

ლას მოახერხებენ, უნდა შეებრძოლონ კუჭის მჟავა გარემოს, რომელიც პათოგენთა უმეტესობას ანადგურებს. მაგრამ ზოგიერთი პათოგენი, მაგალითად, ჰეპატიტის ვირუსი, გადარჩენას ახერხებს და მომწიფებელი სისტემის გზით აღწევს სხეულში.

კანისა და ღორწოვანი გარსის სეკრეტებიც შეიცავს ანტიმიკრობულ ცილებს. ერთ-ერთი ასეთი ცილაა **ლიზოციმი** – ფერმენტი, რომელიც ბევრი ბაქტერიის უჯრედის კედელს ინელებს. ის ნერწყვში, ცრემლსა და ღორწოვან სეკრეტებში გვხვდება. ლიზოციმი შლის მგრძნობიარე ბაქტერიებს, როდესაც ისინი ზედა სასუნთქ ტრაქტში, ან თვალის ირგვლივ არსებულ ნაპრალეებში აღწევენ.

## უჯრედული და ქიმიური შიდა დაცვა

მიკრობებს, რომლებიც სხეულის გარეთა დამცავ შრეებს გადიან, მაგალითად დაზიანებული კანის გავლით, თანდაყოლილი დაცვის შიდა მექანიზმებთან შებრძოლება უნევთ. ეს დაცვა მეტწილად დამოკიდებულია ფაგოციტოზზე, რაც გულისხმობს სისხლის განსაკუთრებული თეთრი უჯრედების, ფაგოციტების მიერ შეჭრილი მიკროორგანიზმების შთანთქმას. ეს უჯრედები წარმოქმნიან განსაზღვრულ ანტიმიკრობულ ცილებს და ხელს უწყობენ ანთების დაწყებას, რომელიც ზღუდავს ბაქტერიების გავრცელებას ორგანიზმში. **ფაგოციტოზის** უნარს მოკლებული თეთრი უჯრედები – ბუნიბრივი კილელები, ასევე



▲ **სურათი 43.4 ფაგოციტოზი.** ეს სქემა ასახავს მოვლენებს, რომელიც ერთი ტიპის ფაგოციტთან, მაკროფაგთან მიკრობის დაკავშირებას მოყვება. აღნიშნული დაკავშირება სპეციფიკური რეცეპტორებით ხორციელდება (არ არის ნაჩვენები). პროცესი სხვა ტიპის ფაგოციტურ უჯრედებშიც მსგავსად მიმდინარეობს.

მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ თანდაყოლილ დაცვაში. სანამ ორგანიზმი შეძენილი სპეციფიკური იმუნური პასუხის ჩართვას შეძლებს, მიკრობების გავრცელების შეზღუდვას სხვადასხვა არასპეციფიკური მექანიზმი ეხმარება.

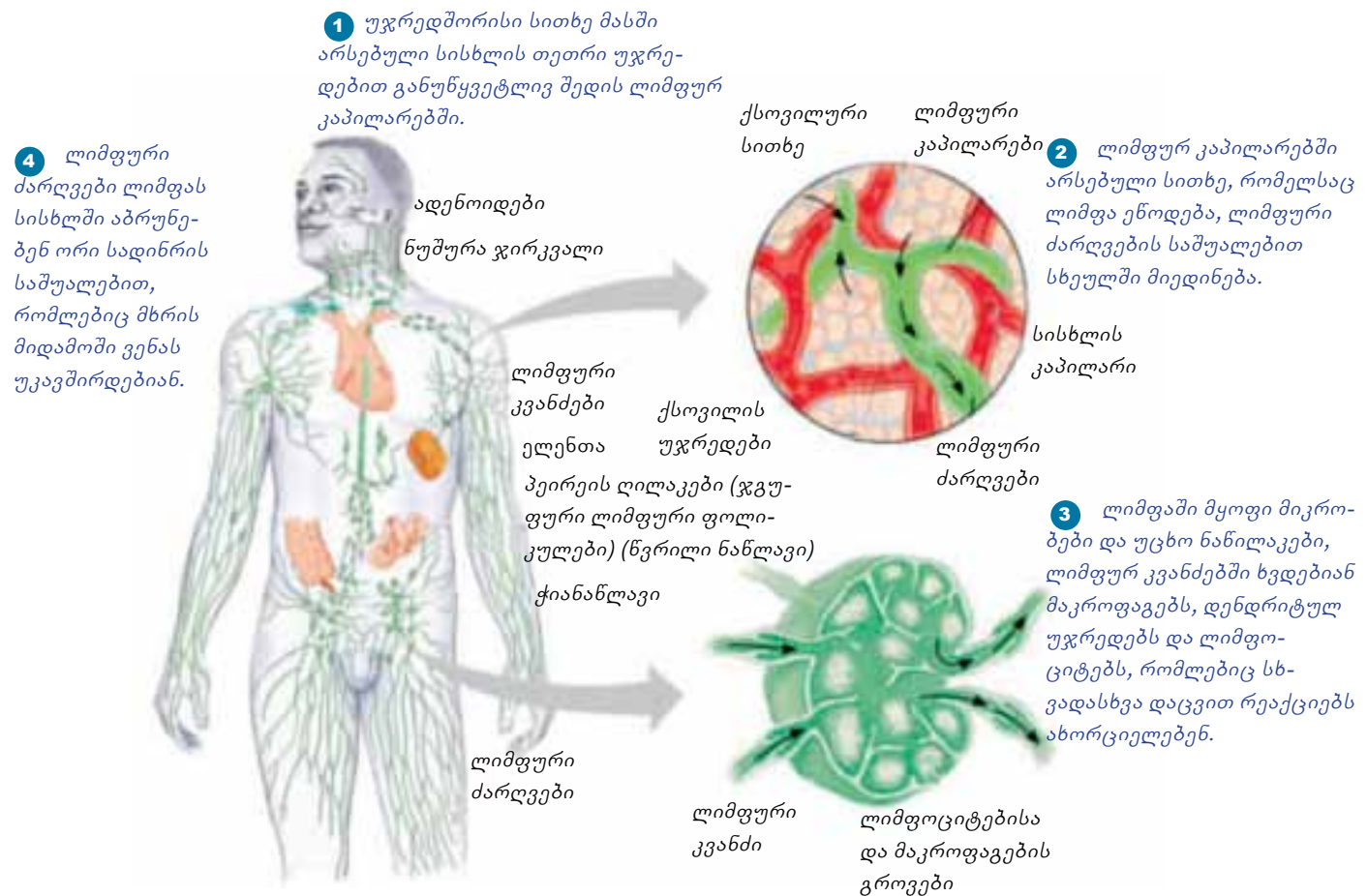
## ფაგოციტური უჯრედები

ფაგოციტური უჯრედები თავიანთ სამიზნეს უკავშირდებიან ზედაპირზე არსებული რეცეპტორებით. აღნიშნული რეცეპტორები იკავშირებენ მრავალ მიკროორგანიზმს, მაგრამ არა სხეულის ნორმალურ უჯრედებს. იმ სტრუქტურებს შორის, რომლებიც ამ რეცეპტორებს უკავშირდება, არის ბაქტერიების ზედაპირზე არსებული პოლისაქარიდები. ერთ ან მეტ მიკრობთან დაკავშირების შემდეგ ფაგოციტი მათ ყლაპავს და ქმნის ვაკუოლს, რომელიც შემდგომში ლიზოსომას ერწყმის (**სურ. 43.4**). მიკრობები ლიზოსომებში ორი გზით იშლება: პირველი, აზოტის ოქსიდით და ჟანგბადის სხვა ტოქსიკური ფორმებით, რომლებიც ლიზოსომებში გვხვდება და შთანთქმულ მიკრობებს წამლავენ; მეორე, ლიზოსომური და სხვა ფერმენტებით, რომლებიც მიკრობული კომპონენტების დაშლას იწვევენ.

ზოგ მიკროორგანიზმს აქვს შეგუებულობა, რაც მათ საშუალებას აძლევს, თავიდან აიცილონ ფაგოციტური უჯრედები დაშლა. მაგალითად, ზოგიერთი ბაქტერიის გარეგანი კაფსულა მალავს მათ პოლისაქარიდებს და ხელს უშლის ფაგოციტების მათთან დაკავშირებას. სხვა ბაქტერიები, როგორიცაა ტუბერკულოზის გამომწვევი *Mycobacterium tuberculosis* კარგად უკავშირდება და შთანთქმება ფაგოციტების მიერ, მაგრამ მდგრადია ლიზოსომებით დაშლის მიმართ. ასეთ მიკრობებს მასპინძელ უჯრედში ზრდა და გამრავლება შეუძლიათ და ამასთანავე, ეფექტურად არიან დამალულნი დაცვის შეძენილი მექანიზმებისგან. ისეთი მექანიზმების ევოლუცია, რომლებიც იმუნური სისტემით დაშლას უშლიან ხელს, ბევრი მიკრობის პათოგენური მოქმედების საფრთხეს ზრდის.

სისხლის თეთრი უჯრედების (ლეიკოციტების) ოთხი ტიპი ფაგოციტურია. ისინი განსხვავდებიან რაოდენობით, სიცოცხლის ხანგრძლივობით და ფაგოციტოზის უნარით. ყველაზე მრავალია **ნეიტროფილები**, რომლებიც მთელი თეთრი უჯრედების დაახლოებით 60-70%-ს შეადგენს. ნეიტროფილები მიიზიდებიან ინფექციური ქსოვილის მიერ და შთანთქავენ და ანადგურებენ იქ არსებულ მიკრობებს. ნეიტროფილები საკუთარ თავს შლიან ფაგოციტოზის დროს და მათი სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა მხოლოდ რამდენიმე დღეა.

კიდევ უფრო ეფექტური ფაგოციტური დაცვა **მაკროფაგებით** („დიდი მშთანქმელებით“) ხორციელდება. ეს დიდი ზომისა და გრძელი სიცოცხლის მქონე უჯრედები ვითარდებიან მონოციტებისგან, რომლებიც ცირკულაციაში მყოფი მთელი თეთრი უჯრედების დაახლოებით 5%-ს შეადგენენ. ახალი **მონოციტები** სისხლში მხოლოდ რამდენიმე საათს ცირკულირებენ და შემდეგ ქსოვილებში გადადიან, სადაც ისინი მაკროფაგებად გარდაიქმნებიან. ფაგოციტოზის მიმდინარეობისას ირთვება შიდა სასიგნალო გზები, რომლებიც მაკროფაგებს ააქტივებენ და ზრდიან მათ დამცავ უნარს. ზოგი მაკროფაგი მიგრირებს სხეულის შიგნით, ხოლო სხვები



▲ **სურათი 43.5 ადამიანის ლიმფური სისტემა.** ლიმფური სისტემა შედგება ლიმფური ძარღვებისგან, რომელშიც ლიმფა მოძრაობს და სხვადასხვა სტრუქტურისგან, რომლებშიც ლიმფა უცხო მოლეკულებსა და ნაწილაკებს იჭერს. ეს სტრუქტურებია ადენოიდები, ნუშისებრი ჯირკვლები, ლიმფური კვანძები, ელენთა და ჭიანწლავი. ლიმფის დინებაზე თვალის მიდევნება შესაძლებელია 1-4 საფეხურებზე.

ამა თუ იმ ორგანოსა თუ ქსოვილში მუდმივად ჩერდება. მაკროფაგებს, რომლებიც ლორწოში, ლიმფურ კვანძებსა და ლიმფური სისტემის სხვა ქსოვილებში მუდმივად ცოცხლობენ, განსაკუთრებით კარგი პოზიცია უკავიათ იმისთვის, რომ ინფიცირებად აგენტებს ებრძოლონ. ის მიკრობები, რომლებიც ქსოვილში შედიან, მოექცევიან ბადისებრი არქიტექტურის ლორწოში მაშინ, როდესაც უჯრედშორისი სითხეში მყოფი მიკრობები ლიმფაში გადაიტანებიან და იქ ლიმფურ კვანძებში მოთავსდებიან. ორივე ადგილას მიკრობები მალე ხვდებიან იქ არსებულ მაკროფაგებს.

**სურათი 43.5** აჩვენებს ლიმფური სისტემის კომპონენტებს და აჯამებს მის როლს სხეულის დაცვით სისტემაში.

ფაგოციტების ორი სხვა ტიპი მცირე რაოდენობითაა და ისინი უფრო შეზღუდულ როლს ასრულებენ, ვიდრე ნეიტროფილები და მაკროფაგები. **ეოზინოფილებს** ფაგოციტური აქტივობა ნაკლებად ახასიათებთ, მაგრამ კრიტიკული როლი აკისრიათ მრავალუჯრედიანი პარაზიტული თავდამსხმელებისგან თავდაცვაში. ნაცვლად იმისა, რომ პარაზიტი შთანთქონ, ეოზინოფილები მისი სხეულის მოპირდაპირედ თავსდებიან და დამშლელი ფერმენტებით ინყებენ მის

მონელებას. ფაგოციტების მეოთხე ტიპია **დენდრიტული უჯრედები**, რომლებსაც მაკროფაგების მსგავსად, მიკროორგანიზმების შთანთქმა და მონელება შეუძლიათ. როგორც ამ თავში მოგვიანებით შეხვდებით, მათი პირველადი როლი შეძენილი იმუნიტეტის განვითარების სტიმულაციაა.

### ანტიმიკრობული ცილები

უამრავი ცილა მონაწილეობს თანდაყოლილ იმუნიტეტში. ისინი ან უშუალოდ თავს ესხმიან მიკრობებს, ან ხელს უშლიან მათ გამრავლებას. თქვენ უკვე ისწავლეთ ლიზოციმის ანტიმიკრობული მოქმედება. მსგავს ცილებს ეკუთვნის დაახლოებით 30 პლაზმის ცილა, რომლებიც **კომპლემენტარულ სისტემას** ქმნიან. ინფექციის არარსებობისას, ეს ცილები არ არის აქტიური. ბევრი მიკრობის ზედაპირზე არსებულ ნივთიერებებს შეუძლიათ ისეთი კასკადური პროცესების ჩართვა, რომლებიც კომპლემენტარულ სისტემას ააქტივებს და შემოჭრილი უჯრედების ლიზის (დაშლას) იწვევს. გარკვეული კომპლემენტარული ცილები ასევე ხელს უწყობენ ანთების განვითარებას და მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ შეძენილ იმუნიტეტში.

ორი ტიპის **ინტერფერონი** (α და β) ვირუსული ინფექციებისგან თანდაყოლილ დაცვას უზრუნველყოფს. ეს ცილები სხეულის იმ უჯრედების მიერ გამოიყოფა, რომლებიც ვირუსით არის ინფიცირებული და მეზობელი, არაინფიცირებული უჯრედების სტიმულირებას ახდენენ, რათა მათ სხვა ისეთი ნივთიერებები გამოიმუშაონ, რომლებიც ვირუსის გამრავლებას უშლის ხელს. ამ გზით, ინტერფერონები ვირუსების სხეულში გავრცელებას ზღუდავენ და აკონტროლებენ ისეთ ვირუსულ ინფექციებს, როგორიცაა გაციება და გრიპი. ეს თანდაყოლილი დაცვის მექანიზმი არ არის ვირუსსპეციფიკური, ერთი ვირუსის საპასუხოდ გამომუშავებულ ინტერფერონებს შეუძლიათ მცირე ხნით სხვა ვირუსებსაც შეებრძოლონ. განსაზღვრული ლიმფოციტები გამოყოფენ მესამე ტიპის ინტერფერონს (γ), რაც მაკროფაგების გააქტივებას ეხმარება, აძლიერებს რა მათ ფაგოციტურ უნარს. დღეისთვის შესაძლებელია ინტერფერონების მასობრივად წარმოება რეკომბინანტული **დნმ**-ის ტექნოლოგიით (**დნმ**-ის ჯაჭვის განსხვავებული ფრაგმენტების ერთმანეთთან მიერთებით). ამჟამად მიმდინარეობს მათი სამკურნალო თვისებების შესწავლა ვირუსულ ინფექციებსა და კიბოსთან მიმართებაში.

სხვა ჯგუფის ანტიმიკრობულ ცილებს, რომელთაც კარგად მორგებული სახელი დეფენსინი (დეფენს – დაცვა ინგლ.) შეურჩიეს, გამოყოფენ აქტივირებული მაკროფაგები. ეს მცირე ზომის ცილები სხეულის უჯრედების დაუზიანებლად პათოგენების ფართო ჯგუფს სხვადასხვა მექანიზმებით ანადგურებენ.

## ანთებითი პასუხი

ქსოვილის დაზიანება ფიზიკური ზემოქმედებით ან პათოგენის შეჭრით იწვევს უამრავი ქიმიური სიგნალის ჩართვას, რომელიც, თავის მხრივ, ააქტივებს **ანთებით პასუხს**. ერთ-ერთი განსაკუთრებით აქტიური ნივთიერებაა ჰისტამინი. დაზიანებისას ქსოვილი გამოყოფს **ჰისტამინს** და იწვევს ახლომდებარე კაპილარების განვლადობის გაზრდას და გაფართოებას. გააქტივებული მაკროფაგები და სხვა უჯრედები უშვებენ დამატებით სიგნალებს, მაგალითად პროსტაგლანდინები, ეს უკანასკნელნი დაზიანებული უბნისკენ დამატებით სისხლის დინებას უწყობენ ხელს. გაზრდილი სისხლის მომარაგება იწვევს სინითლესა და გაციხლებას, რაც ანთებისთვის არის დამახასიათებელი. სისხლით გატენილი კაპილარებიდან სითხე გადადის მეზობელ ქსოვილებში, რაც ასევე ანთების დამახასიათებელ ნიშანს, შეშუპებას იწვევს. მიუხედავად იმისა, რომ სიცხე და შეშუპება უსიამოვნო შეგრძნებებია, სისხლის გაძლიერებული მიდინება და სისხლძარღვის გაზრდილი განვლადობა თანდაყოლილი იმუნიტეტისთვის ძალზე მნიშვნელოვანია. სისხლძარღვების ასეთი ცვლილებები ხელს უწყობს ანტიმიკრობული ცილების გადატანას დაზიანებულ უბანთან. რამდენიმე აქტივირებული კომპლემენტარული ცილა ხელს უწყობს ჰისტამინის გამომუშავებას, ან ფაგოციტების მიზიდვას ასეთ უბანთან. სისხლის შედედება იწყებს აღდგენით პროცესს და ხელს უშლის მიკრობების გავრცელებას ორგანიზმის სხვა უბნებში. გარდა ამისა, ლოკალური სისხლის მიმოქცევისა და სისხლძარღვების განვლადობის გაზრდა

საშუალებას აძლევს მეტ მონოციტ-მაკროფაგსა და ნეიტროფილს, სისხლიდან დაზიანებულ ქსოვილში გადავიდეს.

მცირე ზომის ცილები, რომლებსაც **ქემოკინებს** უწოდებენ, ფაგოციტებს ასტიმულირებენ, რომ მიკრობის გამანადგურებელი ნაერთები წარმოქმნან. აგრეთვე, ქემოკინები მიმართავენ ფაგოციტების მოძრაობას.

ქემოკინები მრავალი ტიპის უჯრედებისგან გამოიყოფიან, მათ შორის, დაზიანებულ და ინფიცირებულ უბანთან ახლოს მყოფი სისხლძარღვების ენდოთელური უჯრედებიდანაც. **სურათი 43.6** აჯამებს იმ მთავარ მოვლენებს, რომელთაც ადგილი აქვთ ქინძისთავით ჩხვლეტით გამოწვეულ ლოკალურ ანთებისას.

მცირე დაზიანება ადგილობრივ ანთებას იწვევს, მაგრამ ქსოვილის ძლიერ დაზიანებაზე ან ინფექციაზე, სხეული ფართოდ გავრცელებულ სისტემურ პასუხს იძლევა. დაზიანებული უჯრედები ხშირად დამხმარე ძალებს იძახებენ, გამოყოფენ ნივთიერებებს, რომლებიც ძვლის ტვინიდან დამატებითი ნეიტროფილების გამოთავისუფლებას იწვევენ.

ძლიერი ინფექციების დროს, მაგალითად მენინგიტის ან აპენდიციტის, სისხლის თეთრი უჯრედების რაოდენობა სისხლში შეიძლება ჯერადად გაიზარდოს ანთებითი პროცესების დაწყებიდან რამდენიმე საათში. ანთების სანინააღმდეგო სხვა სისტემური პასუხი არის ციება. ციება შესაძლოა გამოვლინდეს მაშინ, როდესაც პათოგენის მიერ გამომუშავებული განსაზღვრული ტოქსინები და მაკროფაგების მიერ გამოყოფილი ნივთიერებები სხეულის თერმოსტატს მაღალ ტემპერატურაზე ჩართავენ. ძალიან მაღალი სიცხე საშიშია, მაგრამ საშუალო სიცხემ შესაძლოა გააადვილოს ფაგოციტოზი, დააჩქაროს სხეულის რეაქციები და დაზიანებული ქსოვილის აღდგენა.

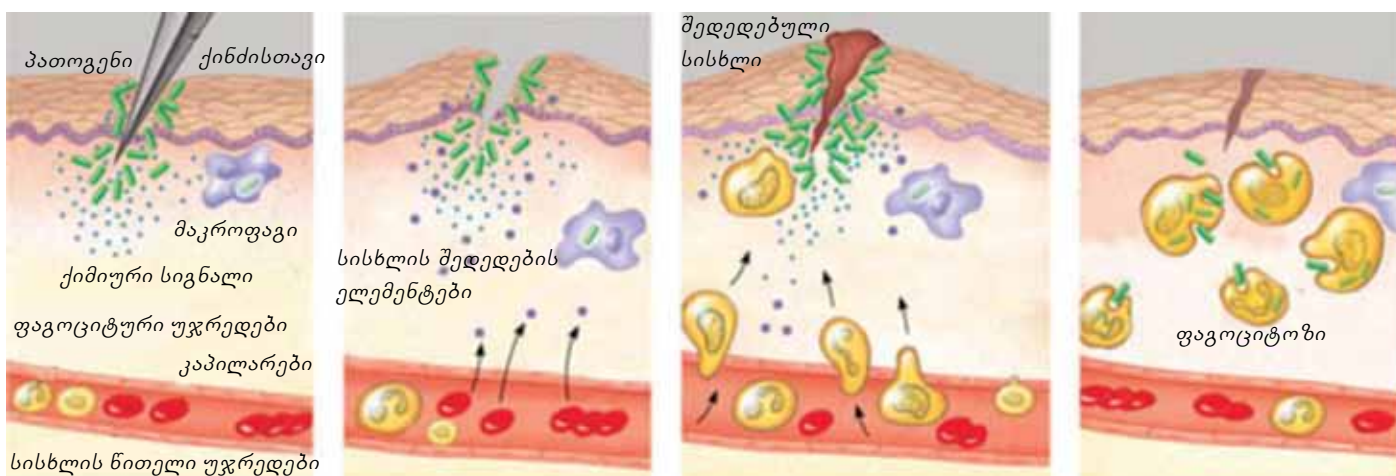
განსაზღვრულმა ბაქტერიულმა ინფექციებმა შეიძლება სისტემური ანთებითი პასუხის გადატირთვა გამოიწვიოს, რასაც სეპტიკური შოკის მდგომარეობამდე მივყავართ.

მას ძალიან მაღალი სიცხე და სისხლის დაბალი წნევა ახასიათებს.

სეპტიკური შოკი საავადმყოფოების მძიმე განყოფილებებში ხშირად სიკვდილის მიზეზი ხდება. ცხადია, რომ ადგილობრივი ანთება მნიშვნელოვანია განკურნებისათვის, ხოლო სისტემურმა ანთებამ კი შეიძლება სხეულის გამოფიტვა გამოიწვიოს.

## ბუნებრივი კილერი უჯრედები

ხერხემლიანთა თანდაყოლილი დამცველობითი სისტემების განხილვისას ბუნებრივი კილერების მიმოხილვით მოვრჩებით. **ბუნებრივი კილერი უჯრედები** პატრულირებას ახდენენ სხეულში და თავს ესხმიან ინფიცირებულ და სიმსივნურ უჯრედებს. ბუნებრივი კილერების ზედაპირული რეცეპტორები თავიანთი სამიზნის ზედაპირზე არსებულ დამახასიათებელ თვისებებს ცნობენ. მას შემდეგ, რაც ისინი დაუკავშირდებიან ვირუსით ინფიცირებულ ან სიმსივნურ უჯრედებს, ბუნებრივი კილერები გამოყოფენ ნივთიერებებს, რომლებიც სამიზნე უჯრედების განადგურებას იწვევენ აპოპტოზის, ანუ პროგრამირებული სიკვდილის გზით (**იხ. სურ.**



- 1 ქიმიური სიგნალები, რომელიც თავისუფლდება ცილები და შედედების ელ-მაკროფაგებისა და პოხიერი ემენტები გადადის სისხლი-უჯრედებიდან, მომიჯნავე დან დაზიანებულ უბანში. კაპილარების გაფართოებასა შედედება იწყება.
- 2 სითხე, ანტიმიკრობული
- 3 სხვადასხვა სახის უჯრედ-ბიდან გამოყოფილი ქემოკინები სისხლიდან უფრო მეტ ფაგოცი-ტურ უჯრედებს იზიდავენ და-ზიანებული უბნისკენ.
- 4 ნეიტროფილები და მაკ-როფაგები შთანთქავენ პათო-გენებსა და დაშლილ უჯრე-დებს. ქსოვილი იკურნება.

▲ სურათი 43.6 ლოკალური ანთებითი პასუხების მთავარი მოვლენები.

21.18). თუმცა, ბუნებრივი კილერებით უზრუნველყოფილი დაცვა 100%-იანი არ არის, მათ გარეშე ვირუსული ინ-ფექციებისა და სიმსივნეების სისხშირე უფრო გაიზრდებოდა.

## უხერხემლოთა იმუნოტი სისტემა

სანამ ხერხემლიანთა შეძენილი იმუნიტეტის განხილვაზე გადავალთ, უნდა აღვნიშნოთ, რომ უხერხემლოებსაც აქვთ მაღალეფექტური თანდაყოლილი იმუნიტეტი. მაგალითად, ზღვის ვარსკვლავს აქვს ამეობიძური უჯრედები, რომლებიც უცხო სხეულებს ფაგოციტოზის გზით შთანთქავენ. ასევე გამოყოფენ მოლეკულებს, რომლებიც ცხოველთა დამცველობით პასუხს აძლიერებენ. ხილის ბუზის *Drosophila melanogaster* ბოლოდროინდელმა კვლევებმა არაჩვეულებრივი პარა-ლელეები გამოავლინა მწერების დამცველობით სისტემასა და ხერხემლიანთა თანდაყოლილ იმუნიტეტს შორის. მწერების ეგზოჩონჩხი, ხერხემლიანთა კანისა და ლორწოვანი მემბრანის მსგავსად, წარმოადგენს გარეგან ბარიერს, რომელიც გარეშე ორგანიზმების შესვლას ხელს უშლის. თუკი მწერის ეგ-ზოჩონჩხი დაზიანდა, მწერის სხეულში შეჭრილ პათოგენებს შინაგანი თანდაყოლილი დაცვის სისტემებთან შეჯახება მოუ-წევთ.

მწერებისთვის დამახასიათებელი სისხლის ეკვივალენტი, ჰემოლიმფა, შეიცავს უჯრედებს, რომლებსაც ჰემოციტები ეწოდება. ზოგი ჰემოციტი ბაქტერიას და სხვა უცხო სხე-ულებს ინელებს ფაგოციტოზის გზით, ზოგი კი დიდი პარაზ-იტის ირგვლივ უჯრედულ კაფსულას ქმნის. პათოგენის არ-სებობა სიგნალს უშვებს სხვა ჰემოციტებისკენ, რათა მოხდეს

სხვადასხვა ანტიმიკრობული პეპტიდის გამოყოფა. ეს პეპ-ტიდები უკავშირდებიან პათოგენს და კლავენ მას. შინაგანი სასიგნალო გზები, რომლებიც ჰემოციტების მიერ ანტიმიკ-რობული პეპტიდების წარმოქმნას რთავენ, ხერხემლიანთა მაკროფაგების გამაქტივებელ სასიგნალო გზებს შეესაბამე-ბა. გარკვეულ ჰემოციტებს აქვთ ფერმენტი ფენოლოქსიდაზა. ამ ფერმენტის გააქტივების დროს ფენოლები გარდაიქმნება რეაქტიულ ნაერთებად, რომლებიც ერთმანეთს უკავშირდები-ან და დიდ აგრეგატებს წარმოქმნიან. აღნიშნული აგრეგატები პარაზიტისა და დაჭრილი ქსოვილის გარშემო გროვდებიან, რაც ხელს უშლის ინფექციის გავრცელებას. გააქტივება მიმ-დინარეობს ისეთივე საფეხურებიანი კასკადით, რომელიც ნანახია ხერხემლიანთა კომპლემენტარული ცილების გააქ-ტივებისას.

ბოლოდროინდელი კვლევები იმაზე მიუთითებს, რომ უხერხემლოებს ლიმფოციტების უჯრედული ანალოგები არ აქვთ. როგორც ცნობილია, ლიმფოციტები ხერხემლიანებში შეძენილ იმუნიტეტზე არიან პასუხისმგებელნი (იხ. სურ. 43.2). მაგრამ მიუხედავად იმისა, რომ უხერხემლოები თან-დაყოლილ არასპეციფიკურ მექანიზმებზეა დამოკიდებული, განსაზღვრულ ფორმებში ნანახია თავისებურებები, რომლე-ბიც შეძენილ იმუნიტეტსაც ახასიათებს. მაგალითად, შეძენი-ლი იმუნიტეტი ჩვეულებრივ მიმართული არ არის საკუთარი უჯრედების წინააღმდეგ. ის უნარი, რომ საკუთარი უცხოვან განასხვავონ, უძველეს უხერხემლოებშიც გვხვდება, მაგალი-თად, ღრუბელებში. თუ ერთი სახეობის ორი ღრუბელის უჯრე-დები შეერევა, თითოეული ღრუბელის უჯრედები გადანაწილ-დება და რეაგრეგირდება ისე, რომ სხვადასხვა ინდივიდის უჯრედები ცალ-ცალკე იქნება შეჯგუფებული.

შეძენილი იმუნიტეტის სხვა დამახასიათებელი ნიშანია იმუნოლოგიური მეხსიერება – უნარი უფრო სწრაფად უპასუხოს მეორეჯერ შემოჭრილ განსაზღვრულ აგენტს. ჭიაყელეები მსგავს თვისებას ავლენენ: ჭიაყელას ფაგოციტური უჯრედები უფრო სწრაფად ესხმიან თავს იგივე დონორი ქიის მეორე იმპლანტატს, ვიდრე პირველი მცდელობისას. უხერხემლოთა უმეტესობა მსგავს იმუნოლოგიურ მეხსიერებას ავლენს.

უხერხემლოთა იმუნიტეტის განხილვის მერე, შემდეგ თავში ვინყებთ ხერხემლიანების კარგად განვითარებული შეძენილი იმუნური მექანიზმების შესწავლას.

## ▶ კანცეფცია ცისცი 43.1

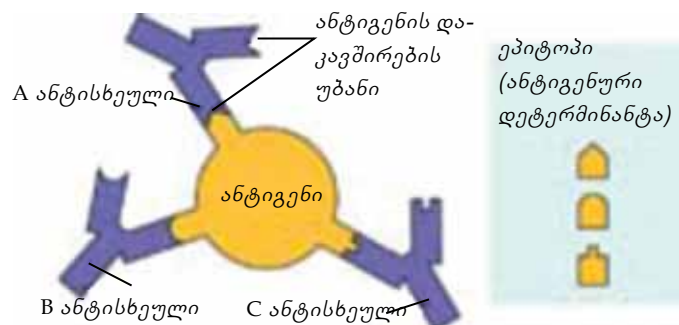
1. თანდაყოლილი იმუნიტეტი არასპეციფიკურია. მაშინ როგორ ცნობენ მაკროფაგები ისეთ ინფექციურ აგენტს, როგორც ბაქტერიას?
2. რა ინვევს ანთების ზოგად ნიშნებს – სინითლეს, შეშუპებას და ციებას – და ეს ცვლილებები როგორ ეხმარება სხეულს ინფექციისგან დაცვაში?

## ▶ კანცეფცია 43.2

### შეძენილ იმუნიტეტში ინფექციების წინააღმდეგ სპეციფიკურ დაცვას ლიმფოციტები უზრუნველყოფენ

პათოგენები ორგანიზმში შეჭრისას ხერხემლიანთა თანდაყოლილი იმუნიტეტის თავდასხმის ქვეშ ხვდებიან, იმავედროულად, კონტაქტში მოდიან ლიმფოციტებთან, რომლებიც შეძენილი იმუნიტეტის უმთავრესი უჯრედებია (**იხ. სურ. 43.2**). მიკრობებთან უშუალო კონტაქტი და აქტიური თანდაყოლილი იმუნიტეტიდან მოსული სიგნალები ბრძოლაში რთავენ ლიმფოციტებს. მაგალითად, როდესაც მაკროფაგები და დენდრიტული უჯრედები მიკრობს შთანთქავენ, ფაგოციტები ინყებენ **ციტოკინების** გამოყოფას. ეს ის ცილებია, რომლებიც ლიმფოციტებისა და სხვა იმუნური უჯრედების აქტივაციას ეხმარებიან. ეს მხოლოდ ერთი მაგალითია იმისა, თუ როგორ ურთიერთქმედებენ თანდაყოლილი და შეძენილი იმუნიტეტები.

ნებისმიერი უცხო მოლეკულა, რომელიც სპეციფიურად შეიცნობა ლიმფოციტების მიერ და ინვევს მათ პასუხს, **ანტიგენად** იწოდება. ანტიგენების უმეტესობა ცილოვანი ან პოლისაქარიდული ბუნების დიდი მოლეკულებია. ზოგი ანტიგენი, მაგალითად, ბაქტერიის მიერ გამოყოფილი ტოქსინები, უჯრედგარე სითხეში იხსნება. თუმცა, ბევრი მათგანი მო-



#### ▲ სურათი 43.7 ეპიტოპები (ანტიგენური დეტერმინანტები).

ანტიგენის მხოლოდ მცირე უბნები, რომლებსაც ეპიტოპები ეწოდებათ უკავშირდება ლიმფოციტების ანტიგენურ რეცეპტორებსა და გამოყოფილ ანტისხეულებს. ამ მაგალითში, სამი განსხვავებული ანტისხეულის მოლეკულა დიდი ანტიგენური მოლეკულის განსხვავებულ ეპიტოპებთან ურთიერთქმედებს.

თავსებულია ბაქტერიის ან ტრანსპლანტური უჯრედების ზედაპირზე. ლიმფოციტი ცნობს და უკავშირდება ანტიგენის მხოლოდ მცირე, ხელმისაწვდომ ნაწილს, რომელსაც ეპიტოპს ან ანტიგენის დეტერმინანტს უწოდებენ.

ცალკეულ ანტიგენს ჩვეულებრივ რამდენიმე ეპიტოპი აქვს, აქედან თითოეულს შეუძლია ამ ეპიტოპის შემცნობი ლიმფოციტების პასუხი გამოიწვიოს. ამა თუ იმ ანტიგენის საპასუხოდ განსაზღვრული ლიმფოციტების მიერ გამოყოფილი ანტისხეულები სპეციფიკურ ეპიტოპებს უკავშირდება (**სურ. 43.7**).

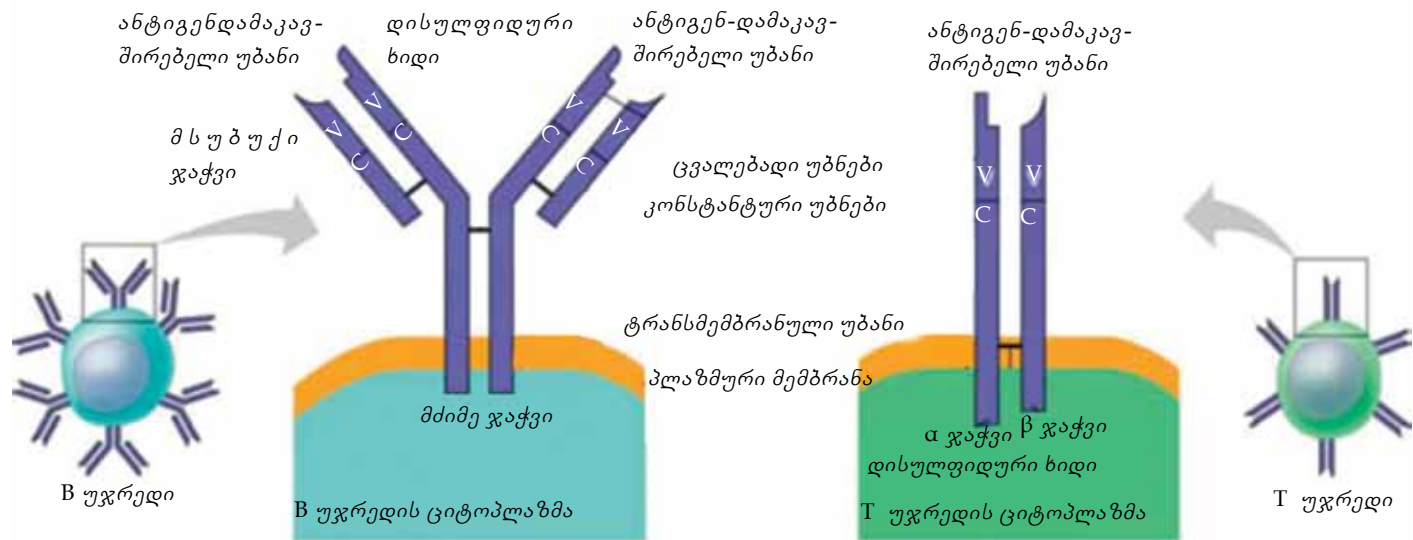
ამ ქვეთავში ჯერ აღვწერთ, როგორ შეიცნობენ ლიმფოციტები ანტიგენებს, ან უფრო ზუსტად, ანტიგენების ეპიტოპებს, შემდეგ კი გავყვებით იმას, როგორ წარმოიქმნება ხერხემლიანთა სხეულში ლიმფოციტების დიდი ჯგუფი, რომლებსაც შეუძლიათ შეიცნონ და განასხვავონ უამრავი ანტიგენი. მოგვიანებით ამ თავში გამოვიკვლევთ სხვადასხვა ტიპის ლიმფოციტების განსხვავებულ დამცველობით რეაქციებს.

### ლიმფოციტების მიერ ანტიგენის შეცნობა

ხერხემლიანთა სხეული ლიმფოციტების ორი ტიპით არის დასახლებული: **B** და **T** ლიმფოციტებით ან უჯრედებით.

ლიმფოციტების ორივე ტიპი ცირკულირებს სისხლსა და ლიმფაში და კონცენტრირებულია ლორწოში, ლიმფურ კვანძებსა და სხვა ლიმფოიდურ ქსოვილებში (**იხ. სურ. 43.5**).

**B** და **T** უჯრედები შეიცნობენ ანტიგენებს ანტიგენ-სპეციფიკური რეცეპტორებით, რომლებიც მათ პლაზმურ მემბრანაშია ჩაძირული. ცალკეულ და თ უჯრედს 100,000 ასეთი ანტიგენური რეცეპტორი აქვს და ცალკეული უჯრედის ყველა რეცეპტორი იდენტურია, რაც იმას ნიშნავს, რომ ისინი ერთნაირ ეპიტოპებს ცნობენ. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ყოველი ლიმფოციტი ავლენს ანტიგენის ამა თუ იმ ეპიტოპის მიმართ სპეციფიკურობას და ორგანიზმს იცავს ამ კონკრეტული ანტიგენისგან ან მასთან მჭიდროდ დაკავშირებული ანტიგენების მცირე ჯგუფისგან.



(ა) B უჯრედის რეცეპტორი შედგება ორი იდენტური მიმე და ორი იდენტური მსუბუქი ჯაჭვისგან, რომლებიც რამდენიმე დისულფიდური ბმით არის დაკავშირებული.

(ბ) T უჯრედების რეცეპტორი შედგება ორი α და ერთი β ჯაჭვისგან, რომლებიც დისულფიდური ბმებით არის დაკავშირებული.

▲ **სურათი 43.8 ლიმფოციტების ანტიგენური რეცეპტორები.** განსაზღვრულ B ან T უჯრედზე ანტიგენის ყველა რეცეპტორი ერთსა და იგივე ანტიგენს იკავშირებს. ცვალებადი უბანი (V) ძლიერ იცვლება უჯრედიდან უჯრედამდე, რაც ცალკეული ლიმფოციტის დაკავშირების განსხვავებულ სპეციფიკურობას განსაზღვრავს. მუდმივი (C) უბანი ან მცირედ, ან საერთოდ არ იცვლება.

## B უჯრედების ანტიგენური რეცეპტორები

B უჯრედების ყოველი ანტიგენური რეცეპტორი Y-ის ფორმის მოლეკულაა და შედგება ორი იდენტური მიმე და ორი იდენტური მსუბუქი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისგან, რომლებიც დისულფიდური ხიდებითაა დაკავშირებული. მოლეკულის კუდზე არსებული უბანი ტრანსმემბრანული უბანია, რომელიც რეცეპტორს პლაზმურ მემბრანასთან აკავშირებს. კუდის ბოლოში მოკლე უბანია, რომელიც ციტოპლაზმისკენ გრძელდება. Y-ის წვერზე მსუბუქი და მიმე ჯაჭვები ცვალებადია და მათ V უბნებს უწოდებენ (სურ. 43.8 ა). მოლეკულის დარჩენილი ნაწილი მუდმივი (C) უბნისგან შედგება და მისი ამინომჟავური შედგენილობა უჯრედიდან უჯრედამდე მხოლოდ მცირედ იცვლება.

როგორც სურათ 43.8-ზეა ნაჩვენები თითოეული უჯრედის რეცეპტორს აქვს ორი იდენტური ანტიგენდამაკავშირებელი საიტი. თითოეული დამაკავშირებელი საიტის უნიკალური აგებულება შექმნილია მიმე და მსუბუქი ჯაჭვების V ნაწილებისგან. ანტიგენდამაკავშირებელ უბანსა და შესაბამის ანტიგენს შორის ურთიერთქმედება გამყარებულია შესაბამისი მოლეკულების ქიმიურ ჯგუფებს შორის არსებული მრავალი არაკოვალენტური ბმით. უჯრედების რეცეპტორების მიერ ამ გზით დაკავშირებული ანტიგენები შეიძლება იყვნენ მოლეკულები, რომლებიც არიან ზედაპირზე, ან კიდევ გამოყოფილი ინფექციური აგენტებიდან.

გამოყოფილი ანტისხეულები ანუ იმუნოგლობულინები, სტრუქტურულად უჯრედების რეცეპტორების მსგავსია, მაგრამ მათ არ აქვთ ტრანსმემბრანული უბანი, რომელიც რე-

ცეპტორს პლაზმურ მემბრანასთან აკავშირებს. ამ სტრუქტურული მსგავსების გამო, უჯრედების რეცეპტორები ხშირად მემბრანულ ანტისხეულებად ან მემბრანულ იმუნოგლობულინებად იწოდება.

## T უჯრედების ანტიგენური რეცეპტორები და MHC-ის როლი

T უჯრედების ყოველი ანტიგენის რეცეპტორი შედგება ორი განსხვავებული პოლიპეპტიდური ჯაჭვისგან, α და β ჯაჭვებისგან, რომლებიც დისულფიდური ბმებით არის ერთმანეთთან დაკავშირებული (სურ. 43.8 ბ). მოლეკულის ფუძესთან ახლოს არის ტრანსმემბრანული უბანი, რომელიც მოლეკულას უჯრედის პლაზმურ მემბრანასთან აკავშირებს.

მოლეკულის გარეთა წვერზე α და β ჯაჭვების ცვალებადი (V) უბნები ერთი ანტიგენის დამაკავშირებელ საიტს ქმნის.

მოლეკულის დარჩენილი ნაწილი შედგება მუდმივი (C) უბნებისგან. T უჯრედების რეცეპტორები ისეთივე სპეციფიკურობით ცნობენ და უკავშირდებიან ანტიგენს, როგორც უჯრედების რეცეპტორები. მაგრამ მაშინ, როცა უჯრედების რეცეპტორები ინტაქტურ ანტიგენს ცნობენ, თ უჯრედების რეცეპტორები იმ ანტიგენების მცირე ფრაგმენტებს ცნობენ, რომლებიც ნორმალური უჯრედების განსაკუთრებულ ცილებთან არიან დაკავშირებულნი. ამ ცილებს MHC მოლეკულები ეწოდებათ.

MHC – major histocompatibility complex ქართულად ქსოვილშეთავსების მთავარ კომპლექსს ნიშნავს. ახალსინ-

ინფიცირებული უჯრედი

ანტიგენის  
ფრაგ-  
მენტი

**I კლასის MHC  
მოლეკულა**

T უჯრე-  
დის რე-  
ცეპტორი



**(ა) ციტოტოქსიკური T უჯრედი**

1 უჯრედის შიგნით, უცხო ცილის (ანტიგენის) ფრაგმენტი უკავშირდება MHC მოლეკულას და გადაიტანება უჯრედის ზედაპირზე.

2 MHC მოლეკულისა და ანტიგენის კომბინაციას შეიცნობს T უჯრედი, ადგილი აქვს ინფექციისადმი გაფრთხილებას.

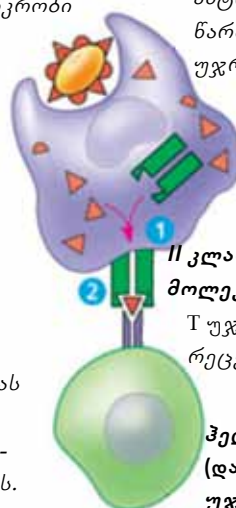
მიკრობი

ანტიგენის  
წარმდგენი  
უჯრედი

ანტიგენის  
ფრაგ-  
მენტი

**II კლასის MHC  
მოლეკულა**

T უჯრედის  
რეცეპტორი



**ჰელპერი  
(დამხმარე) T  
უჯრედი**

თეზირებული MHC მოლეკულები პლაზმური მემბრანისკენ ტრანსპორტირდება. აღნიშნული გადაადგილებისას ისინი ცილოვანი ანტიგენის (პეპტიდის) ფრაგმენტს უკავშირდებიან უჯრედში და უჯრედის ზედაპირისკენ გადააქვთ. ამ პროცესს ანტიგენის პრეზენტაციას, წარდგენას უწოდებენ. ახლომყოფ თ უჯრედს შეუძლია შეიცნოს ანტიგენური ფრაგმენტი, რომელიც უკვე უჯრედის ზედაპირზეა გამოტანილი (სურ. 43.9).

არსებობს ორი გზა, რომლითაც უცხო ანტიგენები უჯრედის შიგნით შეიძლება მოხვდეს. წყაროზე დამოკიდებულებით ეს პეპტიდური ანტიგენები სხვადასხვა კლასის MHC მოლეკულებით მუშავდება და T უჯრედების განსაზღვრული ქვეჯგუფით შეიცნობა:

► **I კლასის MHC** მოლეკულები, რომლებიც ორგანიზმის თითქმის ყველა ბირთვიან უჯრედშია ნაპოვნი, იკავშირებენ უჯრედის შიგნით სინთეზირებულ უცხო ანტიგენებიდან წარმოქმნილ პეპტიდებს.

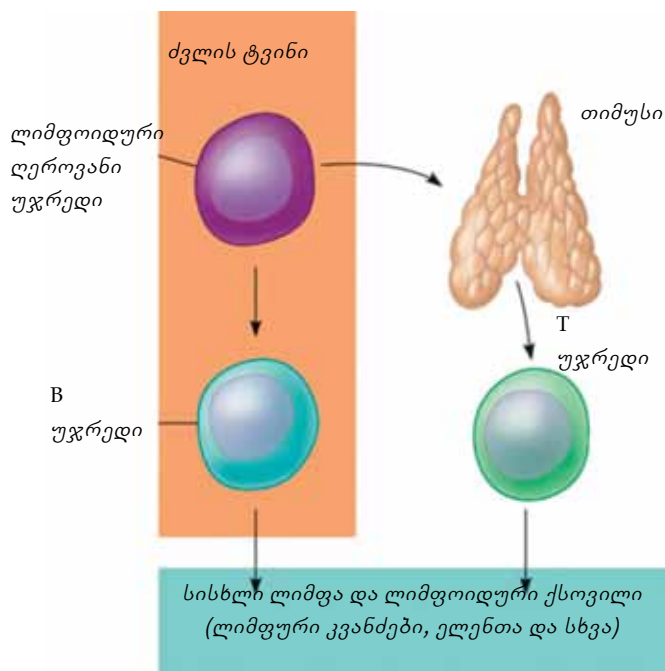
სხეულის ნებისმიერ უჯრედს, რომელიც ინფიცირებულია ან სიმსივნურია, შეუძლია I კლასის MHC მოლეკულების საშუალებით ასეთი ანტიგენის პეპტიდის წარმოჩენა. I კლასის MHC მოლეკულები, რომლებიც ანტიგენის პეპტიდებთანაა დაკავშირებული, T უჯრედების ქვეჯგუფის, ციტოტოქსიკური T უჯრედების მიერ შეიცნობა (სურ. 43.9 ა).

► **II კლასის MHC** მოლეკულებს უჯრედთა მხოლოდ რამდენიმე ტიპი ქმნის. ძირითადად, დენდრიტული უჯრედები, მაკროფაგები და უჯრედები. ამ უჯრედებში II კლასის MHC მოლეკულები უკავშირდება ფაგოციტოზისა და ენდოციტოზის შედეგად ინტერნალიზებული და ფრაგმენტირებული უცხო ცილების პეპტიდებს.

დენდრიტული უჯრედები, მაკროფაგები და უჯრედები ცნობილია, როგორც ანტიგენ წარმდგენი უჯრედები, რამდენადაც ისინი წამყვან როლს თამაშობენ სხვა ქვეჯგუფის თ უჯრედებისთვის (რომლებსაც თ ჰელპერებს უწოდებენ) ასეთი ინტერნალიზებული ანტიგენის წარმოჩენის პროცესში (იხ. სურ. 43.9 ბ).

ხერხემლიანთა ყველა სახეობაში I და II კლასის MHC გენები უამრავი განსხვავებული ალელითაა წარმოდგენილი. ადამიანთა პოპულაციაში MHC მოლეკულების დიდი რიცხვის გამო ადამიანების უმეტესობა ჰეტეროზიგოტურები ვართ MHC მოლეკულების გენების მიმართ და ვანარმოებთ MHC მოლეკულების ფართო სპექტრს. ერთად ამ მოლეკულებს დიდი რაოდენობით პეპტიდურ ანტიგენთან დაკავშირება შეუძლიათ.

▲ **სურათი 43.9 T უჯრედების ურთიერთქმედება MHC მოლეკულებთან.** I და II კლასის MHC მოლეკულები წარმოაჩენენ ანტიგენის ცილების ფრაგმენტებს ერთი მხრივ, ციტოტოქსიკური T უჯრედებისთვის და მეორე მხრივ, ჰელპერი T უჯრედებისთვის. ყველა შემთხვევაში, T უჯრედების რეცეპტორები MHC მოლეკულას — პეპტიდ ანტიგენურ კომპლექსს უკავშირდება. I კლასის MHC მოლეკულები ყველა ბირთვიან უჯრედში წარმოიქმნება, მაშინ, როცა II კლასის MHC მოლეკულები ძირითადად ისეთი ანტიგენმაპრეზენტირებადი უჯრედებიდან მიიღება, როგორიცაა: მაკროფაგები, დენდრიტული უჯრედები, და B უჯრედები.



▲ **სურათი 43.10 ლიმფოციტების განვითარების მიმოხილვა.** ლიმფოციტები ძვლის ტვინში ლეროვანი უჯრედებისგან იზრდებიან და ანტიგენთან კონტაქტის გარეშე დიფერენცირებას განიცდიან. B უჯრედები მთლიანად ძვლის ტვინში ვითარდებიან, ხოლო T უჯრედები კი განვითარებას თიმუსში ასრულებენ. მომწიფებული ლიმფოციტები (რომელთაგან თითოეული განსაზღვრული ეპიტოპისადმი სპეციფიკურობას ავლენს), სისხლსა და ლიმფაში ცირკულირებენ, სადაც ანტიგენებს ხვდებიან.

უფრო მეტიც, ყოველ ორ ადამიანს, გარდა იდენტური ტყუპებისა, ნაკლებად შესაძლებელია ჰქონდეს MHC მოლეკულების ერთნაირი ჯგუფი. ასე რომ, MHC მოლეკულები უზრუნველყოფენ ბიოქიმიურ „თითის ანაბეჭდებს“, რომლებიც ყველა ინდივიდისთვის უნიკალურია და რომლებიც სხეულის საკუთარ უჯრედებს მონიშნას უკეთებს. MHC მოლეკულები კანის გადანერგვის პროცესის შესწავლისას აღმოაჩინეს.

## ლიმფოციტის განვითარება

ახლა, როდესაც უკვე ნაკითხული გაქვთ, როგორ ცნობენ ლიმფოციტები ანტიგენს, გამოვიკვლიოთ, როგორ ვითარდებიან და ვრცელდებიან ეს უჯრედები ხერხემლიანთა სხეულში. სისხლის ყველა უჯრედის მსგავსად, ლიმფოციტებიც წარმოიქმნებიან ძვლის ტვინის პლურიპოტენტური ლეროვანი უჯრედებიდან (იხ. თავი 42).

ახლადფორმირებული ლიმფოციტები ერთმანეთის მსგავსია, მაგრამ მოგვიანებით, იმის მიხედვით, სად აგრძელებენ მომწიფებას, T ან B ლიმფოციტებად ვითარდებიან (სურ. 43.10). ლიმფოციტები, რომლებიც მიგრირებენ ძვლის ტვინიდან თიმუსში, ჯირკვალში, რომელიც გულმკერდის ღრუში გულის ზევით არის მოთავსებული, T უჯრედებად ვითარდებიან და აქედან მოდის მათი სახელიც. ლიმფოციტებს, რომლებიც ძვლის ტვინში რჩებიან და იქვე ასრულებენ მომწიფებას, ლიმფოციტებს უწოდებენ.

ლიმფოციტების სიცოცხლეში სამი მთავარი მოვლენა არსებობს. პირველი ორი (ლიმფოციტებისთვის ძვლის ტვინში და T ლიმფოციტებისთვის თიმუსში) ლიმფოციტების მომწიფებისას მიმდინარეობს, სანამ ისინი ანტიგენთან კონტაქტში მოვლენ. მესამე მოვლენა კი ვლინდება, როცა მომწიფებული ლიმფოციტი განსაზღვრულ ანტიგენს უკავშირდება, რომელიც მის აქტივაციას, პროლიფერაციასა და დიფერენციაციას იწვევს. აღნიშნულ პროცესს კლონური სელექცია ეწოდება. აქ აღწერეთ განვითარების ამ სამ მოვლენას მათი გამოვლენის რიგის მიხედვით.

## ლიმფოციტების მრავალფეროვნების წარმოქმნა გენების გადანაწილის გზით

ლიმფოციტების მრავალფეროვნება უზრუნველყოფს მათი ანტიგენური რეცეპტორების მიერ განსხვავებული ეპიტოპების შეცნობის უნარს. ცალკეულ B და T უჯრედს დაახლოებით 100,000 იდენტური რეცეპტორი აქვს. თუ მოვინდომებდით შედარებას ერთი უჯრედის მეორესთან (ან ერთი თ უჯრედის მეორესთან), ალბათობა იმისა, რომ ორივეს ერთნაირი რეცეპტორები ექნებოდა, ძალიან მცირეა. ყოველი ანტიგენური რეცეპტორის წვერის ცვალებადი უბნები, რომლებიც ანტიგენის დაკავშირების უბანს ქმნის, ლიმფოციტების მრავალფეროვნებას განსაზღვრავს (იხ. სურ. 43.8).

ამ უბნებში ამინომჟავების თანმიმდევრობა უჯრედიდან უჯრედამდე იცვლება და ანტიგენური რეცეპტორის სპეციფიკურობას განსაზღვრავს. ამ უბნების მრავალფეროვნება და შესაბამისად, შესაძლო ანტიგენსპეციფიკურობა უსაზღვროა.

შეფასებებმა აჩვენა, რომ ყოველ ადამიანს 1 მილიონზე

მეტი განსხვავებული და 10 მილიონზე მეტი განსხვავებული თ უჯრედი აქვს, თითოეული ხასიათდება განსაზღვრული ანტიგენდამაკავშირებელი სპეციფიკურობით. ასე რომ, ჩვენი ლიმფოციტების რეპერტუარს შეუძლია უპასუხოს ანტიგენების უსაზღვრო რაოდენობას.

ლიმფოციტების მრავალფეროვნება განპირობებულია უნიკალური გენებით, რომლებიც ანტიგენის რეცეპტორების ჯაჭვებს აკოდირებენ. ეს გენები შედგება უამრავი მაკოდირებელი გენის სეგმენტისგან, რომლებიც მუდმივად განიცდიან შემთხვევით გადანაწილებას და ქმნიან ისეთ ფუნქციურ გენებს, რომლებიც შესაძლოა ექსპრესირდნენ, როგორც რეცეპტორული ჯაჭვები. აქ ფოკუსს გადავკეთებთ გენებზე, რომლებიც უჯრედების რეცეპტორების მსუბუქ ჯაჭვს აკოდირებენ (მემბრანული იმუნოგლობულინი), მაგრამ უნდა დავიმახსოვროთ, რომ მძიმე ჯაჭვის გენები და T უჯრედების α და β ჯაჭვის გენები მსგავს გადანაწილებას განიცდიან. უჯრედების მძიმე და მსუბუქი ჯაჭვები და გამოყოფილი ანტისხეულები ერთი და იმავე გენებით კოდირდება. მათ იმუნოგლობულინურ (Ig) გენებს უწოდებენ.

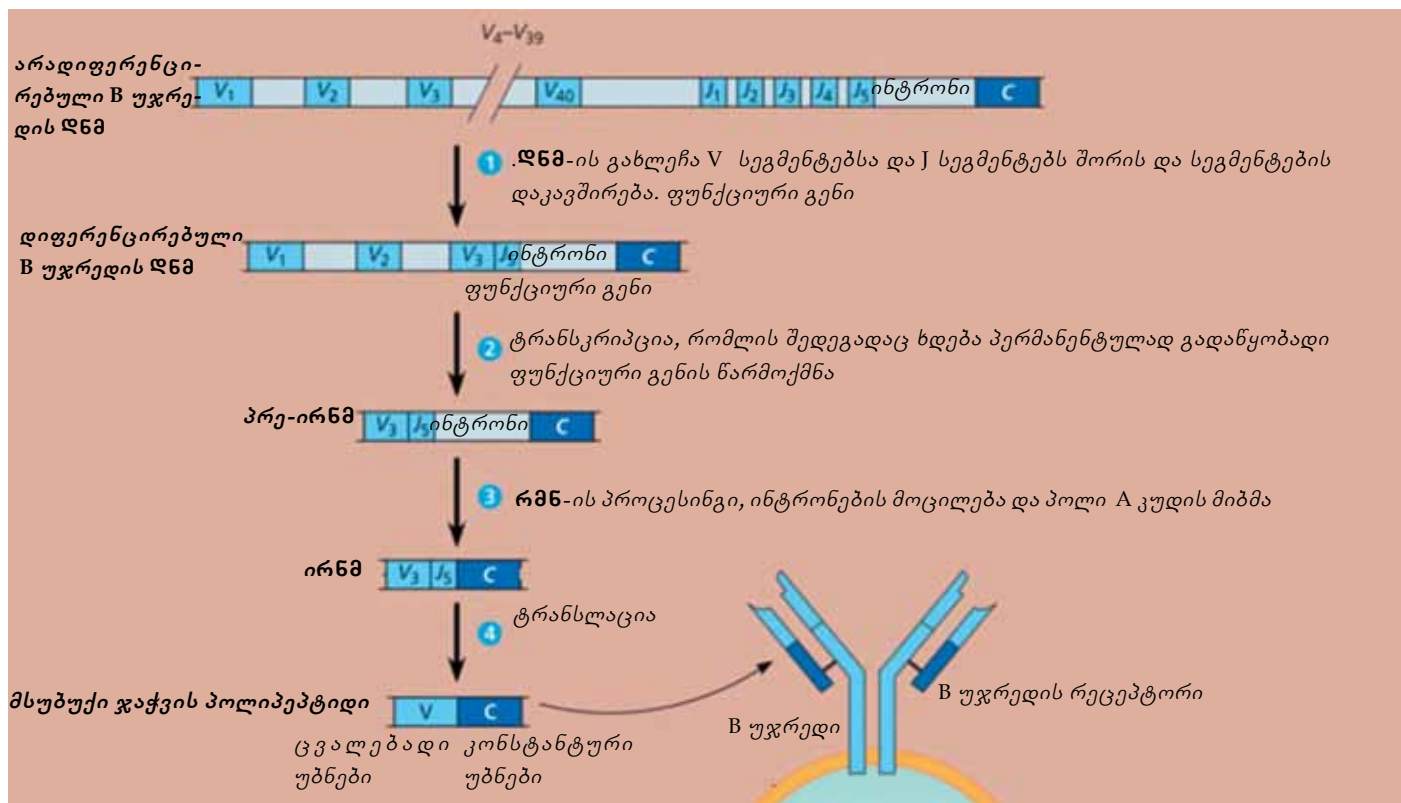
იმუნოგლობულინის მსუბუქი ჯაჭვის გენი შეიცავს ცვალებად 40 V სეგმენტებს, რომლებიც 5 J სეგმენტისგან გამოცალკევებულია გრძელი **დნმ**-ის უბნით (სურ. 43.11). J სეგმენტების შემდეგ იწყება ინტრონი, რომელსაც მოყვება C ეგზონი, რომელიც მსუბუქი ჯაჭვის მუდმივ უბანს აკოდირებს (ინტრონებისა და ეგზონების გამეორების მიზნით, **იხ. სურ. 17.10**). ამ მდგომარეობაში, მსუბუქი ჯაჭვის გენი არაფუნქციონირებადაა. უჯრედის განვითარების ადრეულ სტადიაზე ფერმენტთა ჯგუფი, რომლებსაც ერთად რეკომბინაზებს უწოდებენ, გენის ერთ V სეგმენტს აკავშირებს გენის ერთ J სეგმენტთან, ჭრის მათ შორის **დნმ**-ის გრძელ მონაკვეთს და ქმნის ერთ ეგზონს, რომელიც შეიცავს V და J სეგმენტებს. რეკომბინაზა შემთხვევითად მოქმედებს, რაც ნიშნავს, რომ მას შეუძლია დააკავშიროს გენის ნებისმიერი ერთი სეგმენტი 40 V-დან გენის ნებისმიერ ერთ სეგმენტთან 5 J-დან.

ასე რომ, მსუბუქი ჯაჭვის გენისთვის არსებობს გენის 200 შესაძლო პროდუქტი (40Vx5 J). ყოველ ცალკეულ უჯრედში ამ შესაძლო 200-დან მხოლოდ ერთი მსუბუქი ჯაჭვი წარმოიქმნება.

როდესაც V-J გადანაწილა მოხდება, შეიძლება გენის ტრანსკრიფცია წარიმართოს. შედეგად ადგილი აქვს პრემატრიული **რნმ**-ის წარმოქმნას, რომელიც შემდგომ მუშავდება და გარდაიქმნება **მ-რნმ**-ად, რომლისგანაც ტრანსლაციის შედეგად მსუბუქი ჯაჭვის ცვალებადი და კონსტანტური უბნების შეერთება ხდება. ამ გზით წარმოქმნილი მსუბუქი ჯაჭვები შეიძლება შემთხვევითად დაუკავშირდეს მძიმე ჯაჭვებს, რომლებიც მსგავსი მექანიზმით წარმოიქმნება და, ამრიგად, იქმნება უჯრედის ანტიგენის რეცეპტორი (**იხ. სურ. 43.11**).

## თვით რეაქციული ლიმფოციტების ტესტირება და მოცილება

გამომდინარე იქედან, რომ ანტიგენების რეცეპტორების გენების გადანაწილა შემთხვევით ხასიათს ატარებს, განვითარებადი ლიმფოციტი შეიძლება საბოლოო ჯამში



▲ **სურათი 43.11 იმუნოგლობულინის გენის გადაწყობა.** V და J გენების სეგმენტების შემთხვევითი დაკავშირება (ამ მაგალითში V3 და J5) წარმოქმნის ფუნქციურ გენს, რომელიც B უჯრედის რეცეპტორის პოლიპეპტიდის მსუბუქი ჯაჭვს აკოდირებს. უჯრედში, რომელიც ანტისხეულს გამოყოფს, მსგავსი მ-რნმ ფორმირდება, მაგრამ ალტერნატიული პროცესინგის შედეგად ხდება ისეთი მრნმ-ის წარმოქმნა, რომელსაც რეცეპტორის მემბრანასთან დამაკავშირებელი ტრანსმემბრანული თანმიმდევრობა არ აქვს. გენის გადაწყობა მთავარ როლს თამაშობს ლიმფოციტებისა და ანტისხეულების მრავალფეროვანი რეპერტუარის წარმოქმნაში.

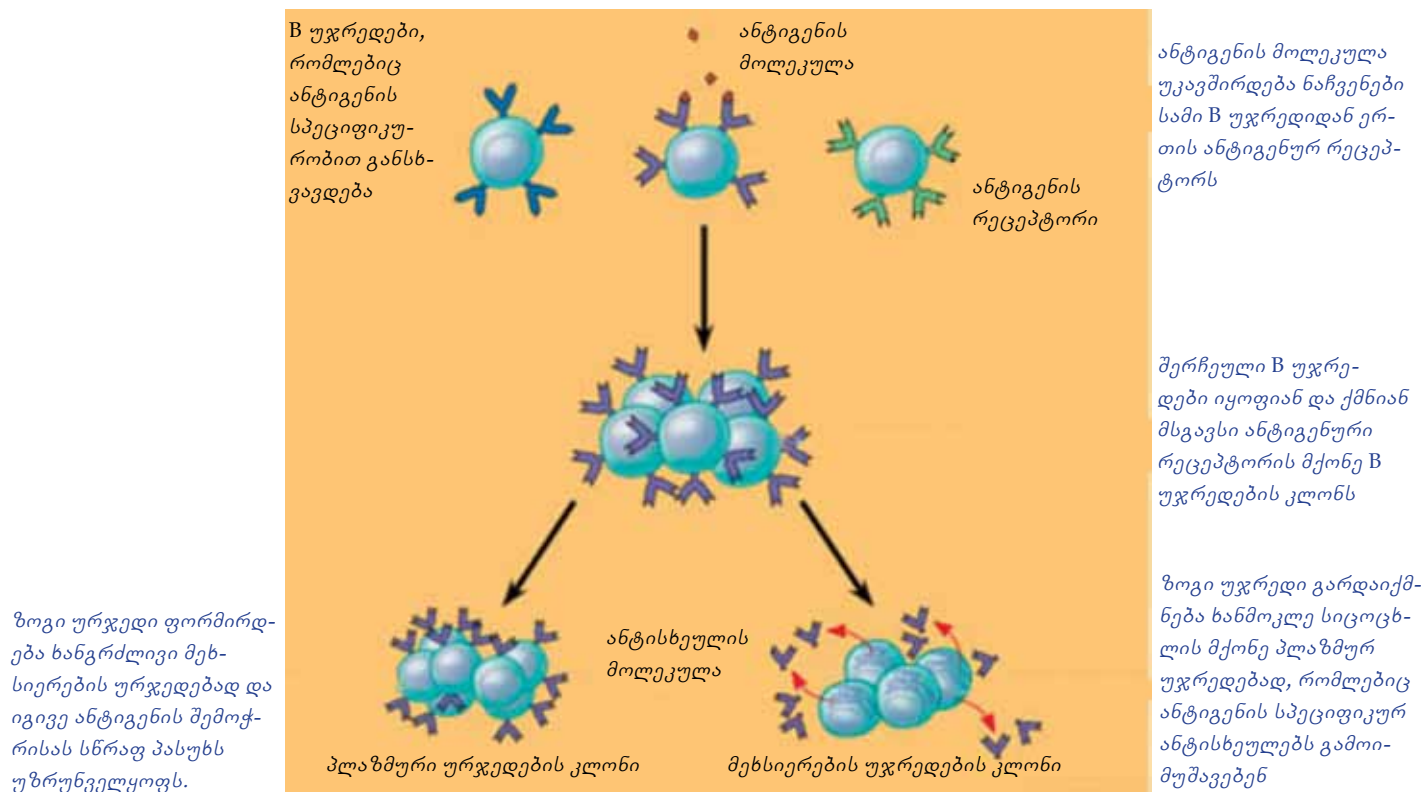
ჩამოყალიბდეს ისეთი ანტიგენის რეცეპტორით, რომელიც სხეულის საკუთარი მოლეკულების მიმართ არის სპეციფიკური. როდესაც და თ უჯრედები ძვლის ტვინსა და თიმუსში მწიფდება, მიმდინარეობს მათი ანტიგენის რეცეპტორის ტესტირება საკუთარი უჯრედების წინააღმდეგ მოქმედების კუთხით. მაგალითად, მომწიფებადი T უჯრედები მოწმდება I და II კლასის MHC მოლეკულების მიმართ, რომლებიც მაღალი დონით ექსპრესირდება თიმუსში. უმეტეს შემთხვევაში, ლიმფოციტებს, რომლებსაც სხეულში უკვე არსებული მოლეკულების მიმართ აქვთ რეცეპტორები აპოპტოზის გზით ილუპებიან ან უფუნქციოებად გარდაიქმნებიან და, ამგვარად, მხოლოდ ის ლიმფოციტები რჩება, რომლებიც საკუთარი მოლეკულების წინააღმდეგ მიმართული არ არის. ეს უნარი, განასხვავონ საკუთარი სხვისგან, განვითარებას განაგრძობს მაშინაც, როცა უჯრედები ლიმფოიდური ორგანოსკენ მიგრირებენ. ასე რომ, სხეულს ჩვეულებრივ არ აქვს მომწიფებული ლიმფოციტები, რომლებიც საკუთარ კომპონენტებზე რეაგირებენ. იმუნურ სისტემას უმნიშვნელოვანესი თვისება ახასიათებს: საკუთარის მიმართ ტოლერანტობა. აღნიშნულის დარღვევა ავტოიმუნურ დაავადებებს იწვევს, როგორიცაა მოგვიანებით განხილული გაფანტული სკლეროზი.

## ლიმფოციტების კლონური შერჩევა

სითხეში გახსნილი ანტიგენი ან მიკრობის ზედაპირზე და სიმსივნურ უჯრედზე მყოფი ანტიგენი სხეულში ხვდება B და T უჯრედების დიდ რეპერტუარს. მოცემული ანტიგენი უკავშირდება ლიმფოციტების მხოლოდ მცირე რიცხვს, რომელსაც ეპიტოპის სპეციფიკური რეცეპტორი აქვთ. B ან T უჯრედების შერჩევა ანტიგენით ააქტივებს ლიმფოციტს და ასტიმულირებს მათ მრავალჯერად გაყოფასა და დიფერენცირებას, რის შედეგადაც შვილეული უჯრედების ორი კლონი ყალიბდება. ერთი კლონი შედგება ხანმოკლე სიცოცხლის **ეფექტორული უჯრედებისგან**, რომელიც ანტიგენს ებრძვიან.

ეფექტორული უჯრედების ბუნება და ფუნქცია დამოკიდებულია იმაზე, შერჩეული ლიმფოციტი T ჰელპერია, ციტოტოქსიკური T უჯრედი თუ უჯრედი. მეორე კლონი შედგება ხანგრძლივი სიცოცხლისუნარიანობის მქონე **მეხსიერების უჯრედებისგან**, რომლებსაც იმავე გამომწვევი ანტიგენის მიმართ სპეციფიკური რეცეპტორი აქვთ.

ანტიგენით გამომწვეული ლიმფოციტების კლონირება **კლონური გადარჩევის** სახელით არის ცნობილი (სურ. 43.12). კლონური გადარჩევის კონცეფცია ფუნდამენტურია შეძენილი იმუნიტეტის გასაგებად და ამიტომ ღირს ხელახლა გავიმეოროთ. ყოველი ანტიგენი, სპეციფიკურ რეცეპტორთან



▲ **სურათი 43.12 B უჯრედების კლონური გადარჩევა.** B უჯრედი შეირჩევა და განიცდის პროლიფერაციას და დიფერენციაციას, რათა წარმოიქმნას ანტიგენის მიმართ სპეციფიკური მეხსიერების B უჯრედები და ანტისხეულის გამომყოფი პლაზმური უჯრედები. ყველა სხვა B უჯრედი, რომლის რეცეპტორებსაც განსხვავებული სპეციფიკურობა ახასიათებს (მინიშნებულია განსხვავებული ფერითა და ფორმით) არ პასუხობს მოცემულ ანტიგენს. T ლიმფოციტები განიცდიან მსგავს პროცესს, წარმოქმნიან რა მეხსიერებისა და ეფექტორულ T უჯრედებს.

დაკავშირების გზით, შერჩევითად ააქტივებს სხეულის მრავალფეროვანი ლიმფოციტური ჯგუფის უჯრედების უმცირეს ფრაქციას. ეს შედარებით მცირე რაოდენობის შერჩეული უჯრედები დასაბამს აძლევს ათასობით უჯრედს, რომლებიც მოცემული ანტიგენის განადგურებისკენ არის მიმართული და მის მიმართ მაღალი სპეციფიკურობით გამოირჩევა.

ლიმფოციტების შერჩევითი პროლიფერაცია და დიფერენცირება, რომელსაც პირველად ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც სხეული განსაზღვრული ტიპის ანტიგენს შეხვდება, წარმოადგენს **პირველად იმუნურ პასუხს**. პირველად პასუხში მაქსიმალური პასუხი არ ვლინდება, სანამ ანტიგენთან პირველადი შეხებიდან 10-17 დღე არ გაევა. ამ დროის განმავლობაში, შერჩეული უჯრედები წარმოქმნიან ანტისხეულების გამომყოფ უჯრედებს, რომლებსაც **პლაზმური უჯრედები** ეწოდება და შერჩეული T უჯრედები აქტივდებიან მათ ეფექტორულ ფორმამდე, რომლებსაც განსხვავებული ფუნქციები აკისრიათ (განხილულია შემდეგ თავში).

სანამ ეს ეფექტორული უჯრედები განვითარების პროცესშია, ინდივიდი, რომელზეც ანტიგენმა იმოქმედა, შეიძლება დაავადდეს. საბოლოო ჯამში, დაავადების სიმპტომები მცირდება და ქრება, რადგან ანტისხეულები და ეფექტორული T უჯრედები წმენდენ სხეულს ანტიგენისგან.

თუ ინდივიდი იგივე ანტიგენს კიდევ შეეჯახება, პასუხი დაჩქარდება (ჩვეულებრივ, 2-7 დღეში), გაძლიერდება და გახანგრძლივდება. ეს **მეორადი იმუნური პასუხია**. სისხლის შრატში ანტისხეულების კონცენტრაციის გაზომვები აჩვენებს ცხად განსხვავებას პირველად და მეორად იმუნურ პასუხებს შორის (**სურ. 43.13**). გარდა იმისა, რომ უფრო მეტი რაოდენობით ანტისხეული წარმოიქმნება მეორადი პასუხის დროს პირველადთან შედარებით, მათი ანტიგენის მიმართ მიმზიდველობაც უფრო მაღალია.

იმუნური სისტემის უნარს, წარმოქმნას მეორადი იმუნური პასუხი, იმუნურ მეხსიერებას უწოდებენ და ის დამოკიდებულია თ უჯრედების ხანგრძლივ-მცხოვრებ კოლონიასა და მეხსიერების B უჯრედებზე, რომლებიც ანტიგენის სხეულზე საწყისი მოქმედებისას წარმოიქმნება. ეს მეხსიერების უჯრედები სწრაფად გაყოფასა და დიფერენცირებას ახდენენ, როდესაც შემდგომში შესაბამის ანტიგენს ეკონტაქტებიან.

პათოგენთან შეხების შედეგად ხანგრძლივი დაცვის განვითარება შემჩნეული და შეფასებული იყო 2,400 წლის წინ ათენში, როდესაც ადამიანები, რომელთაც გადაიტანეს შავი ჭირი, უვლიდნენ ამავე დაავადებით დაავადებულებს, ვინაიდან „არავის შეხვედრია დაავადება მეორედ“.

## ქმნეოცია ტესტი 43.2

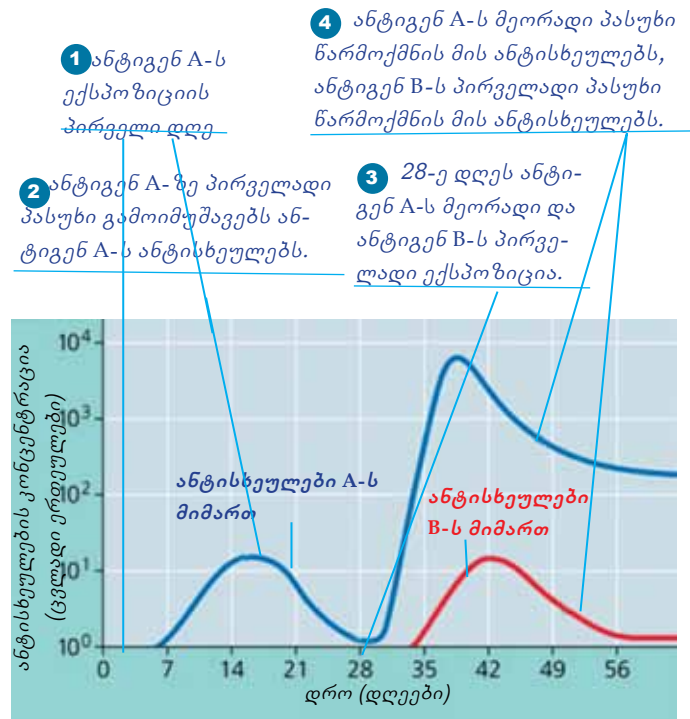
1. დახატეთ B რეცეპტორი და მონიშნეთ შემდეგი: მსუბუქი ჯაჭვი, მძიმე ჯაჭვი, დისულფიდური ხიდე-ბი, ცვალებადი (V) და კონ სტანტური (C) უბები, ანტიგენის დამაკავშირებელი საიტები, ტრანსმემ-ბრანული უბანი და ციტოპლაზმური კუდი. რით განსხვავდება გამოყოფილი ანტისხეულის სტრუქ-ტურები?
2. რა მთავარი განსხვავებაა B და T უჯრედების რე-ცეპტორებთან დაკავშირებულ ანტიგენის ტიპებს შორის?
3. განიხილეთ სურათი 43.12-ზე მოცემული B უჯრედის კლონური გადარჩევის პროცესი. როგორ გამოხატ-ავს ეს პროცესი იმუნიტეტის სპეციფიკურობასა და მესხიერებას?
4. იმუნოგლობულინის მსუბუქი ჯაჭვის გენი შედგება 40 V გენის სეგმენტისა და 5 J სეგმენტისგან, ხოლო მძიმე ჯაჭვის გენი შედგება 51 V გენური სეგმენტის, 6 J გენური სეგმენტისა და სხვა ჯგუფის — 27 D სეგ-მენტისგან. რამდენი განსხვავებული ანტიგენ დაკა-ვშირების სპეციფიკურობა შეიძლება წარმოიშვას მოცემული V-J და V-D-J გადანაცვლებისგან?

## ქმნეოცია 43.3

### ჰემორული და უჯრედული იმუნიტეტი უჯრედულად სხვადასხვა ტიპის საფრთხისგან დაცვას

მე-19 საუკუნის ბოლოს ჩატარებულ ექსპერიმენტ-ებიდან ცნობილი გახდა, რომ პლაზმასა და ლიმფაში მყოფი ნივთიერებები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ შეძენილ იმუნიტეტში. მკვლევრებმა ისეთი ცხოველიდან, რომელსაც მოცემული დაავადება გადატანილი ჰქონდა, ეს სითხეები გა-დაიტანეს ცხოველში, რომელსაც აღნიშნული დაავადება არ ჰქონდა. მოგვიანებით მოხდა შესაბამისი მიკრობით მეორე ცხოველის დასნებოვნება, მაგრამ ის უკვე აღარ დაავადდა. დღევანდელი ცოდნის საფუძველზე შეგვიძლია განვსაზღვ-როთ, რომ მკვლევრებმა ერთი ცხოველის ანტისხეულები მეორეში გადაიტანეს. მათ ასევე ნახეს, რომ ამა თუ იმ დაა-ვადების იმუნიტეტის გადატანა შესაძლებელი იყო, თუ მხ-ოლოდ განსაზღვრული უჯრედები, როგორც მოგვიანებით გაირკვა ციტოტოქსიკური თ უჯრედები, გადაიტანებოდა.

ამ და ბევრმა სხვა კვლევამ მიგვიყვანა დღევანდელ ცოდ-ნამდე, რომ შეძენილი იმუნიტეტი მოიცავს ორ მიმართულებას.



▲ სურათი 43.13 იმუნოლოგიური მესხიერების სპეციფიკუ-რობა. ანტიგენ A-ს მიმართ აღძრული პირველადი პასუხის შედეგად წარმოქმნილი ხანგრძლივსიცოცხლისუნარიანი მესხიერების უჯრე-დები საწყისი აძლევენ მეორედ პასუხს იმავე ანტიგენის მიმართ, მა-გრამ არ ახდენენ გავლენას სხვა ანტიგენის (მაგალითად B-ს) მიმართ აღძრულ პირველად პასუხზე.

ჰემორული იმუნურ პასუხს, რომელიც გულისხმობს უჯრედების აქტივაციასა და კლონურ სელექციას, რის შედე-გადაც ანტისხეულების სეკრეცია ხდება სისხლსა და ლიმფაში. უჯრედულ იმუნურ პასუხს, რომელიც გულისხმობს T უჯრე-დების აქტივაციასა და კლონურ გადარჩევას, რომლებიც უშუ-ალოდ ანადგურებენ განსაზღვრულ სამიზნე უჯრედებს.

სურათი 43.14 აჩვენებს შეძენილი იმუნიტეტის მთავარ მონაწილეებს. უჯრედთა ურთიერთქმედების ამ ჯაჭვის ცენ-ტრია ჰელპერი T უჯრედები, რომლებიც პასუხობენ უცხო უჯრედებზე არსებულ პეპტიდურ ანტიგენებს და იწვევენ ახ-ლოს მყოფი უჯრედებისა და ციტოტოქსიკური თ უჯრედების აქტივაციას. ახლა დეტალურად გამოვიკვლიოთ, როგორ იცავს განსაზღვრული ტიპის თავდასხმისგან შეძენილი იმუ-ნიტეტის თითოეული შემადგენელი კომპონენტი.

### ჰელპერი T უჯრედები: პასუხი თითქმის ყველა ანტიგენზე

როდესაც ჰელპერი T უჯრედები II კლასის MHC მოლეკულა ანტიგენის კომპლექსს შეიცნობს, ის იწვევს გაყოფასა და დიფერენცირდება აქტივირებულ T ჰელპერების კლონად და მესხიერების თ უჯრედებად. ზედაპირის ცილა CD4, რომელიც

უმეტეს T ჰელპერზე გვხვდება, უკავშირდება II კლასის MHC მოლეკულას. სანამ T ჰელპერების აქტივაცია მიმდინარეობს, ეს ურთიერთქმედება ხელს უწყობს ანტიგენიანი უჯრედისა და თ ჰელპერების ერთად ყოფნას.

აქტივირებული თ უჯრედები გამოყოფენ რამდენიმე განსხვავებულ ციტოკინს, რომლებიც ასტიმულირებენ სხვა ლიმფოციტებს და ასე ხელს უწყობენ უჯრედულ და ჰუმორულ პასუხებს. T ჰელპერი, თავის მხრივ, ციტოკინების რეგულაციის სუბიექტია. მაგალითად, როდესაც დენდრიტული უჯრედი ანტიგენს T ჰელპერს წარუდგენს, დენდრიტული უჯრედი სტიმულირდება იმისთვის, რომ ციტოკინების გამოყოფა დაიწყოს. ციტოკინები ანტიგენთან ერთად ასტიმულირებს T ჰელპერებს მათი საკუთარი ციტოკინების წარმოსაქმნელად.

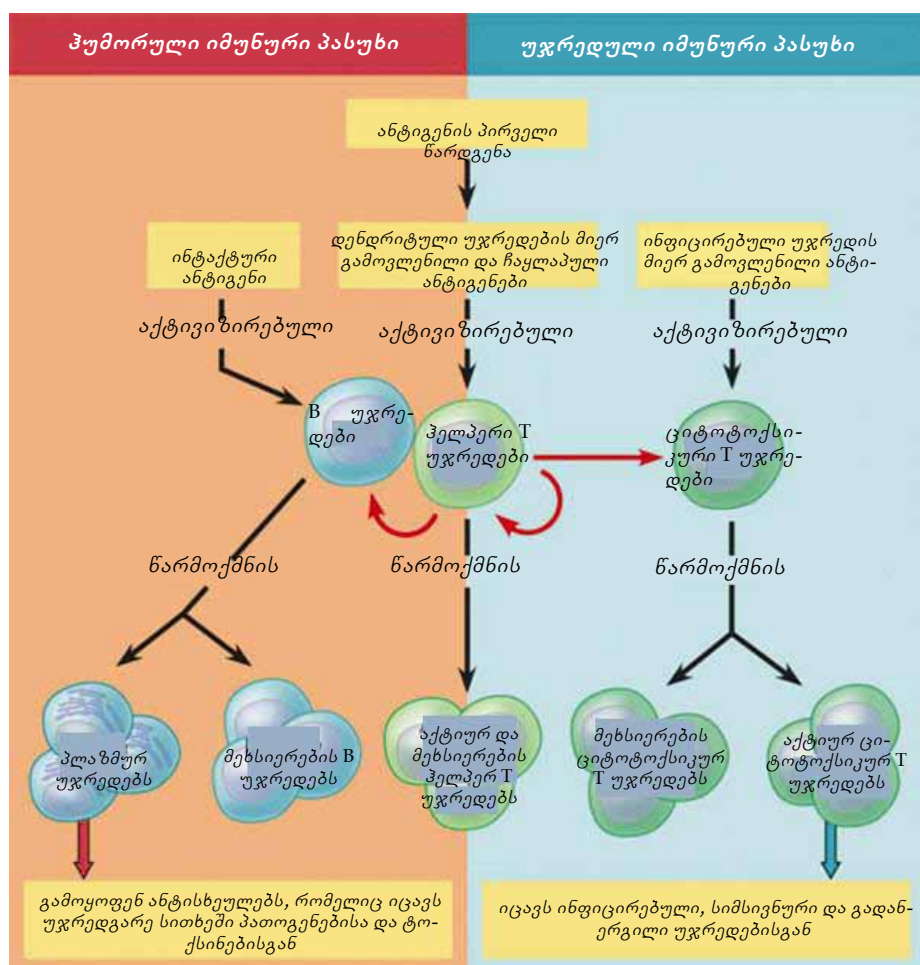
როგორც უკვე წაიკითხეთ, II კლასის MHC მოლეკულები, რომლებიც T ჰელპერების მიერ შეიცნობიან, ძირითადად დენდრიტულ უჯრედებზე, მაკროფაგებსა და B უჯრედებზეა ნაწილი. დენდრიტული უჯრედების მთავარი ფუნქციაა ანტიგენი გამოუცდელ T ჰელპერს წარუდგინონ, რომელიც ასე იწოდება,

რადგან მანამდე ანტიგენი მათთან შეხებაში არ ყოფილა. სხვა სიტყვებით, დენდრიტული უჯრედები მნიშვნელოვანია პირველადი იმუნური პასუხის ჩასართავად.

დენდრიტული უჯრედები მოთავსებულია ეპიდერმისსა და ბევრ სხვა ქსოვილში, სადაც ისინი ეფექტურად იჭერენ ანტიგენებს.

შემდგომ ისინი მიგრირებენ ინფექციის საიტიდან სხვადასხვა ლიმფოიდურ ქსოვილში, სადაც ისინი ანტიგენს II ტიპის ჩ მოლეკულებთან ერთად T ჰელპერებს წარუდგენენ (სურ. 43.15). მაკროფაგები წამყვან როლს თამაშობენ მეორადი იმუნური პასუხის დაწყებაში, რადგან წარუდგენენ ანტიგენს მეხსიერების T ჰელპერებს მაშინ, როცა უჯრედები ჰუმორული პასუხის მიმდინარეობისას წარუდგენენ ანტიგენს T ჰელპერებს.

## ციტოტოქსიკური T უჯრედები: პასუხი ინფიცირებულ უჯრედებსა და სიმსივნურ უჯრედებზე



▲ **სურათი 43.14 შეძენილი იმუნური პასუხის მიმოხილვა.** ჰელპერი T უჯრედების ანტიგენით სტიმულაცია მოითხოვს უშუალო კონტაქტს დენდრიტულ უჯრედსა და ჰელპერ T უჯრედებს შორის (აქ არ არის ნაჩვენები), ან მეხსიერების T უჯრედსა და მაკროფაგს შორის მეორადი პასუხის დროს. როდესაც ჰელპერი T უჯრედი აქტივდება, ის B უჯრედებთან უშუალო კონტაქტით და ციტოკინების გამოყოფით ასტიმულირებს ჰუმორულ პასუხს.

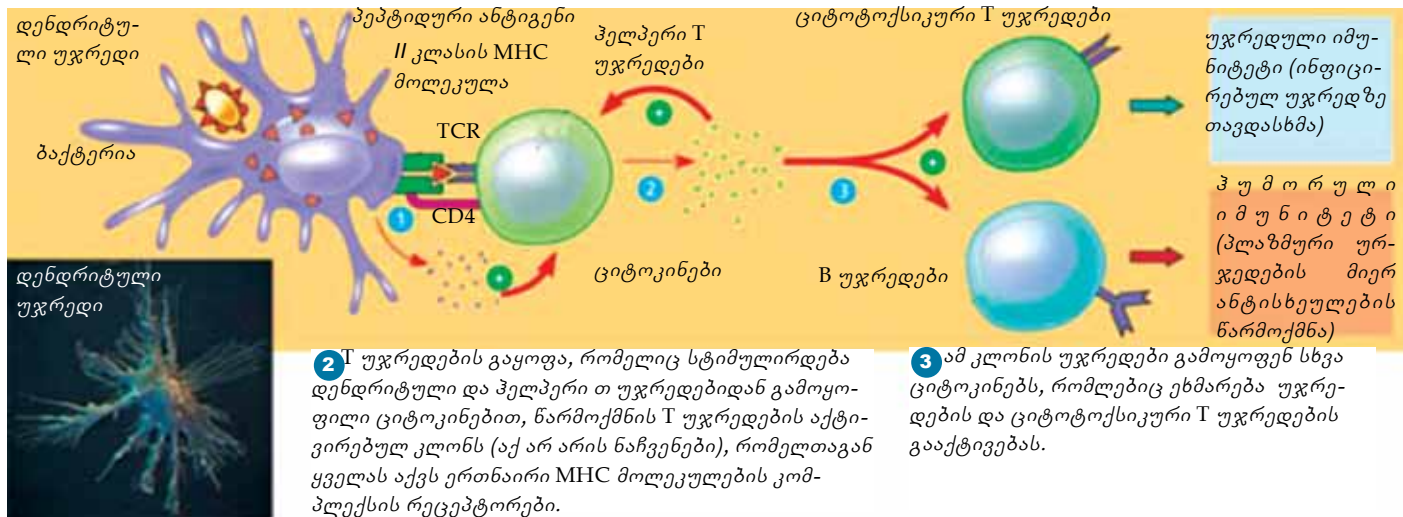
ციტოტოქსიკური T უჯრედები უჯრედული იმუნიტეტის განმახორციელებლები არიან და ანადგურებენ ვირუსებით ან სხვა უჯრედშიდა პათოგენებით ინფიცირებულ უჯრედებს. მსგავსად, ანადგურებენ სიმსივნურ და ტრანსპლანტურ უჯრედებს. ასეთ სამიზნე უჯრედებში არსებული არასაკუთარი ცილების ფრაგმენტები უკავშირდება I კლასის MHC მოლეკულებს და გამოვლინდება უჯრედის ზედაპირზე, სადაც ისინი ციტოტოქსიკური T უჯრედებით ამოიცნობიან.

ზედაპირის ცილა CD8, რომელიც უმეტეს ციტოტოქსიკურ T უჯრედზე გვხვდება, მნიშვნელოვნად აძლიერებს სამიზნე უჯრედსა და ციტოტოქსიკურ T უჯრედს შორის ურთიერთქმედებას.

CD8-ის დაკავშირება I კლასის MHC მოლეკულებთან ციტოტოქსიკური T უჯრედის აქტივაციის პერიოდში ორ უჯრედს ერთად ინარჩუნებს.

ამრიგად, I კლასის MHC მოლეკულების და CD8-ის როლი მსგავსია II კლასის MHC მოლეკულებისა და CD4-ის როლისა, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ აღნიშნულ პროცესში უჯრედების სხვა ტიპია ჩართული. როდესაც ციტოტოქსიკური T უჯრედი ინფიცირებული სხეულის უჯრედის ზედაპირზე არსებული ანტიგენ – I კლასის MHC მოლეკულების კომპლექსით შეირჩევა, ციტოტოქსიკური T უჯრედი აქტივირდება და დიფერენცირდება აქტიურ კილერ უჯრედად. ახ-

**1** მას შემდეგ, რაც დენდრიტული უჯრედი გადაყლაპავს და შლის ბაქტერიას, მას გადააქვს ბაქტერიის ფრაგმენტები II კლასის MHC მოლეკულებთან ერთად უჯრედის ზედაპირზე. განსაკუთრებული ჰელპერი T უჯრედი CD4 დახმარებით უკავშირდება ამ კომპლექსს მისი TCR მეშვეობით, ეს ურთიერთქმედება ხელს უწყობს დენდრიტული უჯრედების მიერ ციტოკინების გამოთავისუფლებას.



**▲ სურათი 43.15 ჰელპერი T უჯრედების ცენტრალური როლი ჰუმორულ და უჯრედულ იმუნურ პასუხებში.** დენდრიტული უჯრედების SEM აჩვენებს, მის გრძელ დატოტვად განშტოებებს, რაც ნერვული უჯრედების დენდრიტების მსგავსია. დენდრიტული უჯრედები ანტიგენზე პირველადი პასუხის დროს პირველადი ანტიგენ წარმდგენი უჯრედებია. TCR = T უჯრედის A ალნიშნავს სტიმულაციას.

ლოს მყოფი T ჰელპერიდან გამოყოფილი ციტოკინები ხელს უწყობს ამ აქტივაციას. გააქტივებული ციტოტოქსიკური T უჯრედი შემდგომში გამოყოფს ცილებს, რომლებიც ინფიცირებულ უჯრედთან მოქმედებს, რაც მათ დაშლას იწვევს (**სურ. 43.16**).

ინფიცირებული უჯრედის სიკვდილი არა მარტო ზღუდავს პათოგენის გამრავლებას, არამედ მათ წარუდგენს ცირკულაციაში მყოფ ანტისხეულებსაც, რომლებიც მათ მონიშნავენ.

ინფიცირებული უჯრედის დაშლისას ციტოტოქსიკური T უჯრედს შეუძლია იგივე პათოგენით ინფიცირებული სხვა უჯრედებიც მოკლას.

მსგავსი გზით, ციტოტოქსიკური T უჯრედები იცავენ ავთვისებიანი სიმსივნისგან. რადგანაც სიმსივნური უჯრედები განსაკუთრებულ მოლეკულებს (სიმსივნურ ანტიგენებს) ატარებენ, რომლებიც ნორმალურ უჯრედებზე არ არის ნაპოვნი, ისინი იმუნური სისტემის მიერ შეიცნობიან, როგორც უცხო წარმონაქმნები. სიმსივნურ უჯრედებზე I კლასის MHC მოლეკულები სიმსივნური ანტიგენის ფრაგმენტს T უჯრედებს წარუდგენენ. საინტერესოა, რომ განსაზღვრული სიმსივნეები და ვირუსები მნიშვნელოვნად ამცირებს I კლასის MHC მოლეკულების რაოდენობას უჯრედებზე, რაც ეხმარება მათ თავი დაიხვიონ ციტოტოქსიკური T უჯრედებისგან. სხეულს სარეზერვო დაცვაც აქვს: ბუნებრივი კილერი უჯრედები, რომლებიც სხეულის არასპეციფიკური თანდაყოლილი იმუნიტეტის ნაწილია. მათ შეუძლიათ ვირუსით ინფიცირებულ და სიმსივნურ უჯრედებში აპოპტოზის გამოწვევა.

## უჯრედები: პასუხი უჯრედგარე პათოგენებზე

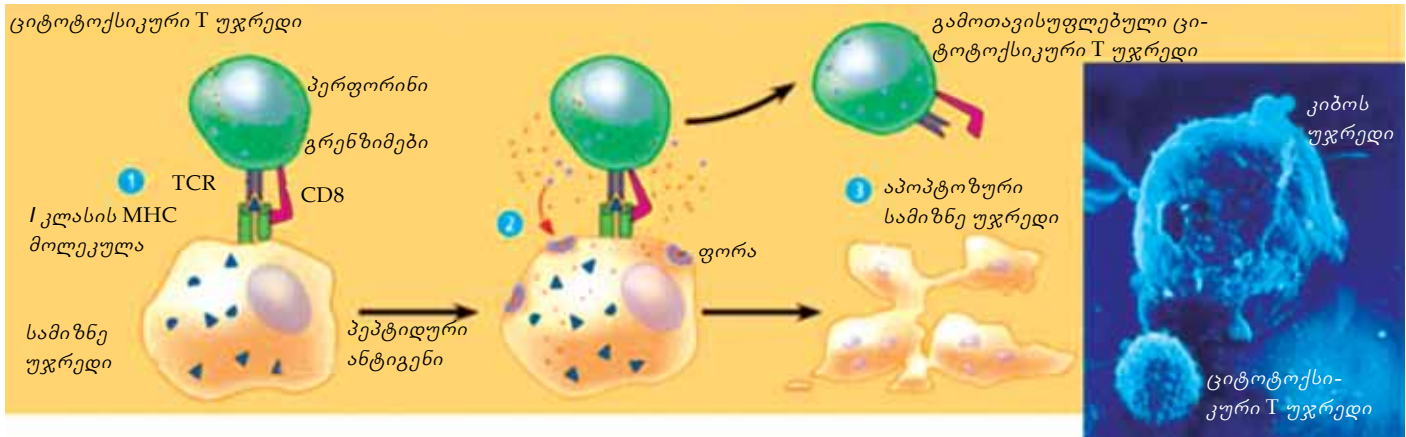
ანტიგენები, რომლებიც ჰუმორულ იმუნურ პასუხს ავლენენ, როგორც წესი, ბაქტერიის, შეუთავსებელი გადანერგილი ქსოვილის ან გადასხმული სისხლის ცილები და პოლისაქარიდებია.

ამის გარდა, ზოგ ადამიანებში უცხო ცილებმა (მაგალითად, მტვერის ან ფუტკრის შხამის) შეიძლება იმოქმედონ, როგორც ალერგიის ან ჰიპერსენსიტიური ჰუმორული პასუხის გამომწვევმა ანტიგენებმა. **სურათი 43.17** აჩვენებს მოვლენებს, რომლებიც აღმოცენდება ტიპური ცილოვანი ანტიგენის მოქმედებისას. B უჯრედების აქტივაციას თან ეხმარება T ჰელპერების მიერ გამოთავისუფლებული ციტოკინები. უჯრედები იყოფა და დიფერენცირდება ანტისხეულების გამომყოფი პლაზმური უჯრედებისა და მეხსიერების უჯრედების კლონებად. როდესაც ანტიგენი პირველად უკავშირდება უჯრედების ზედაპირზე არსებულ რეცეპტორებს, უჯრედი უცხო მოლეკულას შთანთქავს რეცეპტორ დამოკიდებული ენდოციტოზის გზით.

ეს პროცესი ჰგავს ანტიგენის წარდგენას მაკროფაგებითა და დენდრიტული უჯრედებით. უჯრედი შემდეგ წარუდგენს ანტიგენის ფრაგმენტს T ჰელპერს.

ეს აღწევს უშუალო უჯრედულ კონტაქტს, რაც მნიშვნელოვანია უჯრედების აქტივაციისთვის (იხ. მეორე საფეხური **სურათზე 43.17**). ყურადღება მიაქციეთ, რომ მაკროფაგებს ან დენდრიტულ უჯრედებს შეუძლიათ მრავალფეროვანი ანტიგენების ცილოვანი ფრაგმენტების წარდგენა მაშინ, როცა უჯრედი მხოლოდ იმ ანტიგენს უკეთებს

1 სპეციფიკური ციტოტოქსიკური T უჯრედი 2 აქტივირებული T უჯრედი გამო- 3 გრენზიმები სამიზნე უჯრედის აპოპტოზს  
ბი უკავშირდება სამიზნე უჯრედზე I კლასის მოლეკულას, რომელიც უჯრედის მემბრანაში აპოპტოზური სხეულების გამოყოფითა და  
MHC ანტიგენურ კომპლექსს თავისი TCR CD8- მელიც სამიზნე უჯრედის აპოპტოზში აპოპტოზური სხეულების გამოყოფითა და  
ის დახმარებით, ეს ურთიერთქმედება, ჰელპერი ფორებს წარმოქმნის და ასევე პროტე- უჯრედის საბოლოო სიკვდილით. გამოთავისუ-  
T უჯრედების ციტოკინებთან ერთად, ციტო-ოლიზურ ფერმენტებს (გრენზიმებს), ფლებულ ციტოტოქსიკურ T უჯრედებს სხვა  
ტოქსიკური უჯრედების აქტივაციას იწვევს. რომლებიც უჯრედში ენდოციტოზის სამიზნე უჯრედზე თავდასხმა შეუძლიათ.  
გზით შედის.

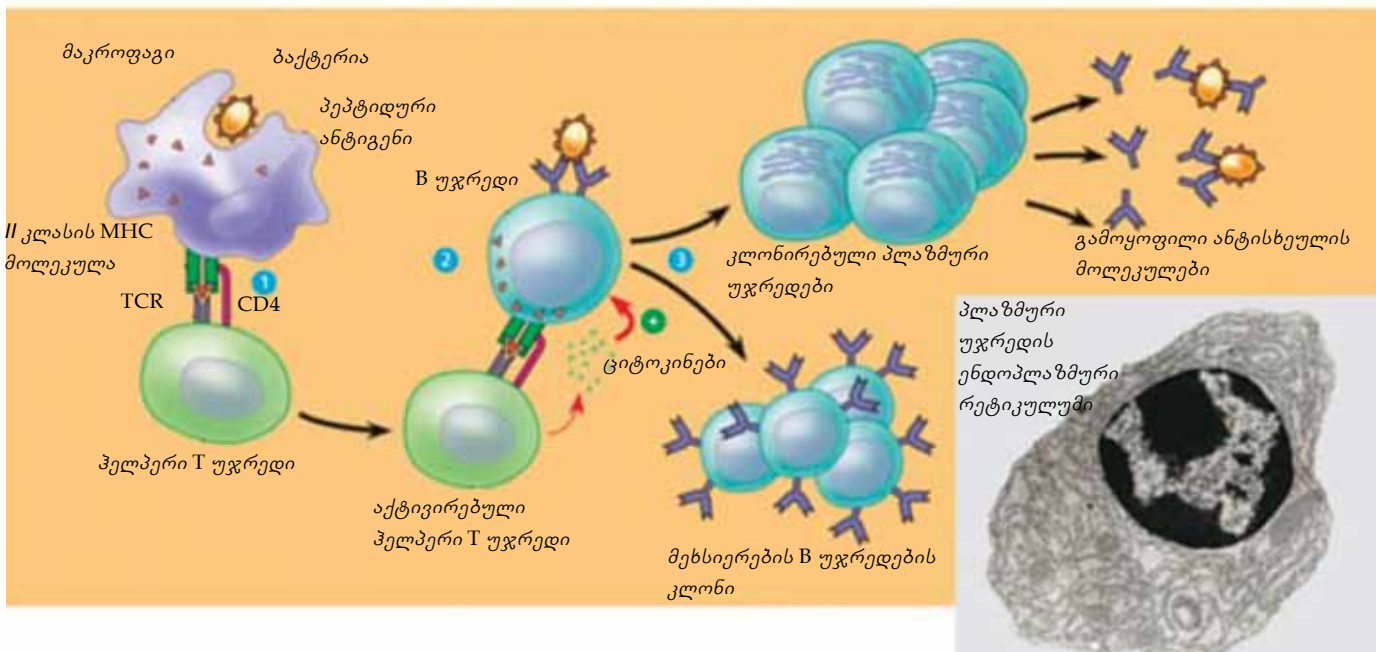


▲ **სურათი 43.16** ციტოტოქსიკური უჯრედების მომავლინებული მოქმედება. სამიზნე უჯრედთან ურთიერთქმედების შედეგად, როგორიცაა ინფიცირებული ან სიმსივნური უჯრედი, აქტივირებული ციტოტოქსიკური T უჯრედი გამოიმუშავებს პერფორინსა და პროტეოლიზურ ფერმენტებს (გრენზიმებს) რომლებიც სამიზნე უჯრედების სიკვდილს იწვევს. ფერადი SEM აჩვენებს სიმსივნურ უჯრედში აპოპტოზის ადრეულ ეტაპზე პერფორინით წარმოქმნილ ფორას. TCR = T უჯრედის რეცეპტორი.

1 მას შემდეგ, რაც მაკროფაგი ჩაყლაპავს და შლის ბაქტერიას, ის გამოავლენს პეპტიდური ანტიგენისა და II კლასის MHC მოლეკულის კომპლექსს. ჰელპერი T უჯრედი, რომელიც აღნიშნულ კომპლექსს ცნობს, აქტივდება მაკროფაგის მიერ გამოყოფილი ციტოკინების საშუალებით და წამორმნის გააქტივებული ჰელპერი T უჯრედების კლონს (აქ არ არის ნაჩვენები).

2 B უჯრედი, რომელმაც აიღო და დაშალა იგივე ბაქტერია, გამოავლენს II კლასის MHC პეპტიდურ ანტიგენურ კომპლექსს. გამოვლენილი ანტიგენის სპეციფიკური რეცეპტორის მქონე აქტივირებული ჰელპერი T უჯრედი უკავშირდება B უჯრედს. ციტოკინების დახმარებით მიმდინარე ეს ურთიერთქმედება T უჯრედიდან ააქტივებს B უჯრედს.

3 გააქტივებული B უჯრედი იყოფა და დიფერენცირდება მეხსიერების B უჯრედად და ანტისხეულების წარმოქმნელ პლაზმურ უჯრედებად. გამოყოფილი ანტისხეული იმავე ანტიგენის მიმართ არის სპეციფიკური, რომელმაც პასუხი დაიწყო.



▲ **სურათი 43.17** ჰუმორული იმუნური პასუხი. ცილოვანი ანტიგენების უმეტესობა რთავს ჰუმორულ პასუხს. მაკროფაგი (აქ ნაჩვენები), ან დენდრიტული უჯრედი ააქტივებს T ჰელპერს. უჯრედის პლაზმური მემბრანის TEM ავლენს სავსე ენდოპლაზმურ რეტიკულუმს, რაც ცილის წარმოქმნის უჯრედების დამახასიათებელი ზოგადი თვისებაა TCR = T უჯრედის რეცეპტორი A მიუთითებს სტიმულაციზე.

ინტერნალიზაციასა და წარდგენას, რომელსაც სპეციფიკურად უკავშირდება.

ანტიგენები, რომლებიც ანტისხეულების წარმოქმნას მხოლოდ T ჰელპერების დახმარებით იწვევენ, როგორც სურათ 43.17-ზეა ნაჩვენები, T-დამოკიდებულ ანტიგენებად იწოდება.

ზოგ ანტიგენს შეუძლია უჯრედული პასუხის გამოწვევა T ჰელპერების ჩართვის გარეშე. ასეთი T-დამოუკიდებელი ანტიგენები მოიცავს ბევრი ბაქტერიული კაპსულის პოლისაქარიდებს და ცილებს, რომლებიც ბაქტერიების შოლტებს ქმნის.

ამ მოლეკულების განმეორებითი სუბერთეულები უკავშირდება ერთ უჯრედზე არსებულ რამდენიმე ანტიგენურ რეცეპტორს, რაც უზრუნველყოფს საკმარის სტიმულს ციტოკინების დახმარების გარეშე უჯრედთა აქტივაციისთვის.

T-დამოუკიდებელ ანტიგენებზე პასუხი ძალიან მნიშვნელოვანია ბევრი ბაქტერიისგან დაცვისთვის.

ეს პასუხი ჩვეულებრივ უფრო სუსტია, ვიდრე T-დამოკიდებული ანტიგენების პასუხი და არ იწვევს მეხსიერების უჯრედების წარმოქმნას.

უჯრედებით შეცნობადი ანტიგენების უმეტესობა უამრავ ეპიტოპს შეიცავს. ამ მიზეზით, ცალკეულ ანტიგენთან შეჯახება ჩვეულებრივ იწვევს განსხვავებული B უჯრედების სტიმულაციას, რომელთაგან თითოეული ათასობით პლაზმური უჯრედის წარმოქმნას განაპირობებს. ერთი კლონის ყველა პლაზმური უჯრედი გამოყოფს სპეციფიკურ ანტისხეულებს იმ ეპიტოპის მიმართ, რომელმაც მისი წარმოქმნა განაპირობა. თითოეული პლაზმური უჯრედი ერთ წამში გამოყოფს დაახლოებით 2,000 ანტისხეულის მოლეკულას. შემდეგ თავებში უფრო ახლოს შევხედავთ ანტისხეულებს და განვიხილავთ იმას, როგორ ხდება მათ მიერ ანტიგენის განადგურება.

## ანტისხეულების კლასები

გამოყოფილ ანტისხეულს B უჯრედის რეცეპტორის მსგავსი ფორმა აქვს (იხ. სურ. 43.8 ა), მაგრამ არ აქვს ტრანსმემბრანული უბანი, რომელიც მას პლაზმურ მემბრანასთან დააკავშირებდა. ანტისხეულის ანტიგენდამაკავშირებელი უბანი პასუხისმგებელია სპეციფიკური ანტიგენის შეცნობაზე. Y ფორმის მოლეკულის კუდი, რომელიც მძიმე ჯაჭვის კონსტანტურ (C) უბნებს მოიცავს, პასუხისმგებელია ანტისხეულის განაწილებაზე სხეულში და ასევე იმ მექანიზმებზე, რომლებითაც ის ანტიგენის განადგურებას უზრუნველყოფს. არსებობს მძიმე ჯაჭვის კონსტანტური უბნების ხუთი ძირითადი ტიპი, რომლებიც ანტისხეულის ჯგუფებს განსაზღვრავენ.

კლასის სახელი დაფუძნებულია ანტისხეულის ალტერნატიულ სახელწოდებაზე – იმუნოგლობულინებზე. ანტისხეულების ამ კლასების სტრუქტურა და ფუნქციები შეჯამებულია სურათ 43.18-ზე. ყურადღება მიაქციეთ, რომ ორი კლასი არსებობს როგორც ძირითადი ანტისხეულის მოლეკულის პოლიმერი: IgM, როგორც პენტამერი და IgA, როგორც დიმერი. სხვა სამი კლასი – IgG, IgE და Ig, მონომერებია.

ანტისხეულების სპეციფიკურობის სიძლიერე და თვისება ანტიგენ-ანტისხეულის დაკავშირებისა ფართოდ გამოიყენება ლაბორატორიულ კვლევებში, კლინიკურ დიაგნოსტიკაში და დაავადებათა მკურნალობაში. ზოგი ანტისხეული პოლი-

ლონურია: ისინი ბევრი განსხვავებული B უჯრედის კლონირების პროდუქტს წარმოადგენენ, რომელთაგან თითოეული სხვადასხვა ეპიტოპისთვის არის სპეციფიკური. მიკრობული ანტიგენის სხეულში შეყვანისას გამომუშავებული ანტისხეულები პოლიკლონურია. ამისგან განსხვავებით, სხვა ანტისხეულები მონოკლონურია: ისინი კულტურაში ცალკეული უჯრედული კლონისგან წარმოიქმნება. ასეთი კულტურით წარმოქმნილი ყველა მონოკლონური ანტისხეული იდენტურია და ანტიგენის ერთი და იგივე ეპიტოპის მიმართ არის სპეციფიკური.

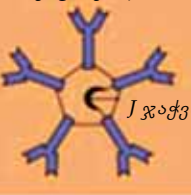
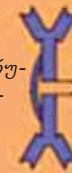
ფუნდამენტურ კვლევასა და მედიცინაში მონოკლონური ანტისხეულები განსაზღვრული მოლეკულების გამოსავლენად და მოსანიშნად გამოიყენება. მაგალითად, სიმსივნის გარკვეულ ტიპებს სიმსივნის უჯრედების მიმართ სპეციფიკური მონოკლონური ანტისხეულებით მკურნალობენ. აღნიშნული ანტისხეულები დაკავშირებულია ტოქსინის მოლეკულასთან. ტოქსინდაკავშირებული ანტისხეულები შერჩევითად უკავშირდებიან და კლავენ სიმსივნურ უჯრედებს.

## ანტიგენების ანტისხეულით წარმართული განადგურება

ანტისხეულების დაკავშირება ანტიგენებთან არის საფუძველი ანტიგენის განადგურებისთვის (სურ. 43.19). ამის უმარტივესი მაგალითია ვირუსის ნეიტრალიზაცია. ამ დროს ანტისხეულები უკავშირდებიან ვირუსის ზედაპირზე არსებულ განსაზღვრულ ცილებს და ბლოკირებას უკეთებენ ვირუსის უნარს, მოახდინოს მასპინძლის უჯრედის დასნეობვნება. ამის მსგავსად, ანტისხეულებს შეუძლიათ დაუკავშირდნენ პათოგენურ ბაქტერიებს და დაფარონ ბაქტერიის ზედაპირის უმეტესი ნაწილი და ამრიგად მოახდინონ მათი ნეიტრალიზაცია. პროცესში, რომელსაც ოპსონიზაცია ჰქვია, დაკავშირებული ანტისხეულები აძლიერებენ მაკროფაგის კავშირს მიკრობთან და ამგვარად ზრდიან ფაგოციტოზის სიხშირეს.

ბაქტერიის ან ვირუსის ანტისხეულებით წარმართვადი აგლუტინაცია ქმნის აგრეგატებს, რომლებიც შეიძლება შთაინთქას მაკროფაგებით. აგლუტინაცია შესაძლებელია, რადგან ანტისხეულის ყოველ მოლეკულას აქვს, სულ მცირე, ორი ანტიგენდამაკავშირებელი უბანი. ამრიგად, ანტისხეულებს სხვადასხვა ბაქტერიული უჯრედის ან ვირუსის იდენტურ ეპიტოპებთან დაკავშირების და მათი გაერთიანების უნარი აქვთ. თავიანთი პენტამერული სტრუქტურის გამო, IgM ანტისხეულებს შეუძლიათ ერთდროულად ხუთ ან მეტ ბაქტერიასა და ვირუსს დაუკავშირდნენ (სურ. 43.19). პრეციპიტაციის პროცესში ანტისხეულები უკავშირდებიან ანტიგენის ხსნად მოლეკულებს, რომლებიც სხეულის სითხეებშია გახსნილი და ქმნიან უძრავ აგრეგატებს, რომლებიც ფაგოციტებით ნადგურდებიან.

როგორც ადრე ნაიკითხეთ, ბევრ მიკრობზე არსებული ნაერთები სხეულის თანდაყოლილი იმუნიტეტის კომპლემენტარულ სისტემას ააქტივებენ. კომპლემენტარული სისტემა მონაწილეობას იღებს მიკრობებისა და ტრანსპლანტური უჯრედების ანტისხეულებით განადგურებაში.

|                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>IgM</b><br/>(პენტამერი)</p>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>პირველი Ig კლასი წარმოიქმნება ანტიგენთან პირველი კონტაქტის შემდეგ; შემდეგ მისი კონცენტრაცია სისხლში მცირდება.</li> <li>სტიმულირებს ანტიგენის ნეიტრალიზაციას და აგლუტინაციას; ძალიან ეფექტურია დამატებით აქტივაციაში (იხილეთ სურათი 43.19)</li> </ul>                                                       |
| <p><b>IgG</b><br/>(მონომერი)</p>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ყველაზე მრავალრიცხოვანი Ig კლასი სისხლში; ასევე არის ქსოვილურ სითხეში.</li> <li>მხოლოდ ეს Ig კლასი აღწევს პლაცენტაში და განაპირობებს ნაყოფის პასიურ იმუნიტეტს.</li> <li>განაპირობებს ანტიგენების ოპსონიზაციას, ნეიტრალიზაციას და აგლუტინაციას; დამატებით აქტივაციაში IgM-ზე ნაკლებად ეფექტურია.</li> </ul> |
| <p><b>IgA</b><br/>(დიმერი)</p>  <p>სეკრეტორული კომპონენტები</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>გვხვდება სეკრეციისას, მაგალითად, ცრემლის, ოფლის, ლორწოს და რძის.</li> <li>ახორციელებს ლორწოვანი მემბრანის ლოკალურ დაცვას ანტიგენების ნეიტრალიზაციის და აგლუტინაციის საშუალებით (იხ. სურათი 43.19).</li> <li>გვხვდება რძეში, განაპირობებს ძუძუს მწოველი ახალშობილის პასიურ იმუნიტეტს.</li> </ul>            |
| <p><b>IgE</b><br/>(მონომერი)</p>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>ინიცირებს ალერგიული რეაქციის გამოწვევას ჰისტამინისა და სხვა ქიმიური ნაერთების გამოყოფას მასტოციტებიდან და ბაზოფილებიდან (იხ. სურათი 43.20).</li> </ul>                                                                                                                                                     |
| <p><b>IgD</b><br/>(მონომერი)</p>  <p>ნსმემბრანული უბანი</p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>ძირითადად გვხვდება ხელუხლებელი B უჯრედების ზედაპირზე, რომლებიც არ იყვნენ ანტიგენების გავლენის ქვეშ.</li> <li>მოქმედებს ანტიგენის რეცეპტორის სახით B უჯრედების ანტიგენით სტიმულირებულ ზრდაში და დიფერენციაში. (კლონალური სელექცია).</li> </ul>                                                              |

▲ **სურათი 43.18 იმუნოგლობულინების ხუთი კლასი.** ყველა კლასი შედგება მსგავსი Y-ფორმის მოლეკულებისგან, რომელშიც კუდის უბანი განსაზღვრავს ყოველი კლასისთვის დამახასიათებელ გავრცელებასა და ფუნქციას. IgM და IgA შეიცავს J ჯაჭვს (რომელიც არ არის დაკავშირებული გენის J სეგმენტთან, რომელიც მონომერულ უბნებს ერთად გაჩერებაში ეხმარება). როდესაც IgA ანტისხეული გამოიყოფა ლორწოვანი მემბრანიდან, ის იძენს სეკრეტორულ კომპონენტს, რომელიც იცავს მას ფერმენტებით დაშლისგან.

ამ შემთხვევაში, მიკრობსა ან უცხო უჯრედზე ანტიგენ-ანტისხეულის კომპლექსი უკავშირდება კომპლემენტარული სისტემის ცილებს. აღნიშნული ურთიერთქმედება რთავს რეაქციებს, რომლებშიც ყოველი კომპლემენტარული ცილა ყველა მომდევნო კომპონენტს ააქტივებს. საბოლოოდ, გააქტივებული კომპლემენტარული სისტემა ქმნის **მემბრანაზე თავდამსხმელ კომპლექსს (MAC)**, რომელიც მემბრანაზე ხვრელს წარმოქმნის.

იონები და წყალი შედის უჯრედში და იწვევს მის გაბერვასა და დაშლას (**იხ. სურ. 43.19 მარჯვენა**). თანდაყოლილი ან შეძენილი იმუნიტეტით გააქტივებული კომპლემენტარული სისტემის კასკადი იწვევს მიკრობთა დაშლას და ისეთი გააქტივებული კომპლემენტარული ცილების წარმოქმნას, რომლებიც ანთებისა და ფაგოციტოზის პროცესში იღებენ მონაწილეობას.

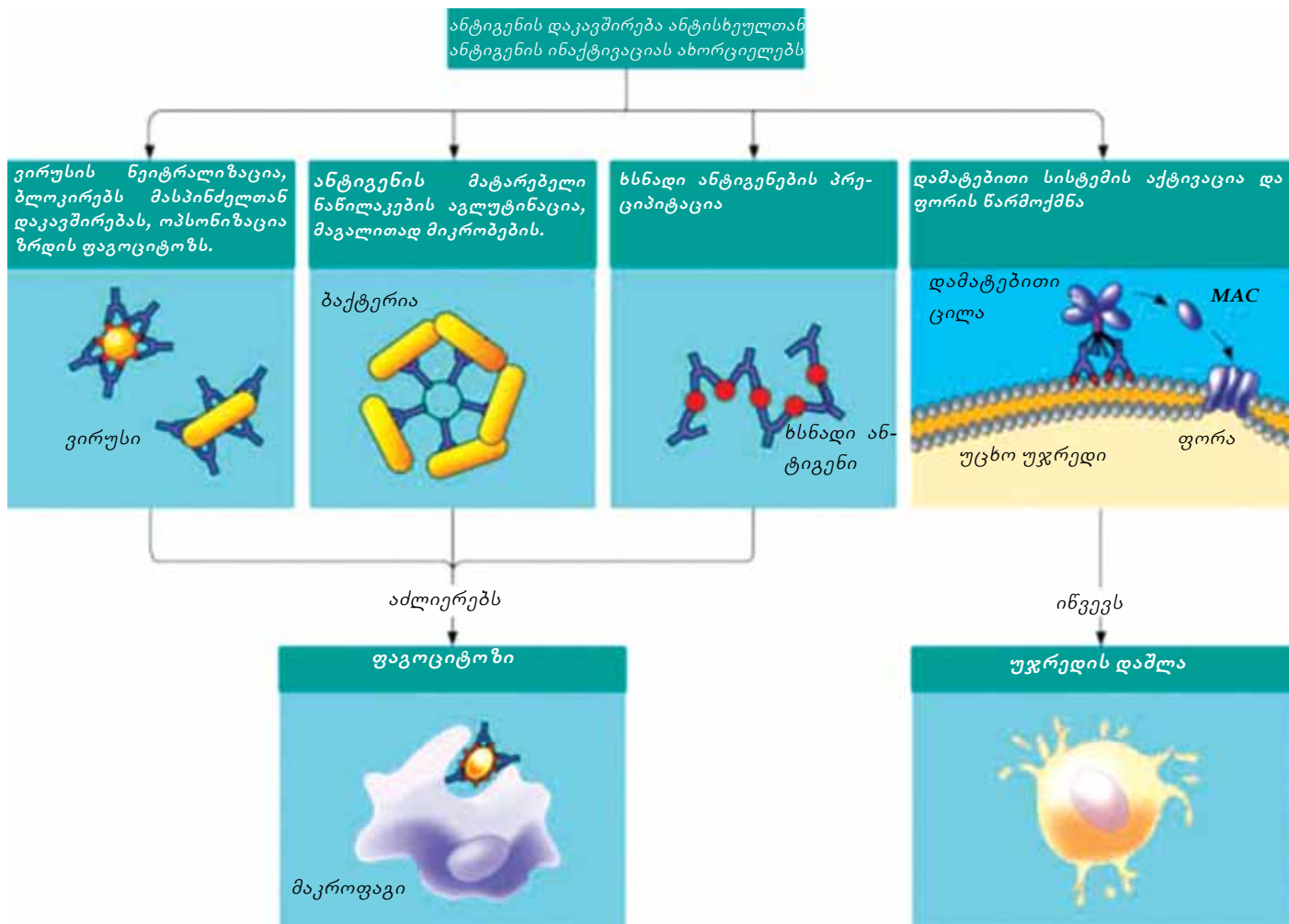
როგორც **სურათი 43.19** გვიჩვენებს, ანტისხეულები ფაგოციტოზს რამდენიმე გზით უწყობენ ხელს. გავიხსენოთ, რომ ფაგოციტოზით მაკროფაგებსა და დენდრიტულ უჯრედებში ხდება ანტიგენის წარდგენა და თ ჰელპერების სტიმულაცია, რომლებიც, თავის მხრივ, იმ უჯრედებს ასტიმულირებენ, რომელთა ანტისხეულებიც მონაწილეობენ ფაგოციტოზში. ეს თანდაყოლ და შეძენილ იმუნიტეტს შორის არსებული დადებითი უკუკავშირი ხელს უწყობს ინფექციაზე კოორდინირებულ და ეფექტურ პასუხს.

## აქციოტი და პასიოტი იმუნიზაცია

იმუნიტეტი, რომელიც წარმოიქმნება სხეულში ბუნებრივი ინფექციური აგენტის მოხვედრით, **აქტიურ იმუნიტეტად** იწოდება. იმუნიტეტი აქტიურია რამდენადაც ის დამოკიდებულია ადამიანის საკუთარი ლიმფოციტების მოქმედებაზე და პათოგენის მიმართ სპეციფიკური მეხსიერების უჯრედების გამომუშავებაზე. აქტიური იმუნიტეტი შეიძლება ასევე განვითარდეს **იმუნიზაციის** გზით, რომელსაც ხშირად **ვაქცინაციას** უწოდებენ (ლათინურიდან ვაცცა, ძროხა). პირველი ვაქცინა შედგებოდა ძროხის ყვავილის გამომწვევი ვირუსებისგან. ეს არის მსუბუქი დაავადება, რომელიც ძროხებში გვხვდება, თუმცა იშვიათად ადამიანებშიც აღინიშნება.

გვიან 1700-იან წლებში ინგლისელი ექიმი ედვარდ ჯენერი დააკვირდა, რომ მერძევე ქალები, რომლებსაც მანამდე გადატანილი ჰქონდათ ძროხის ყვავილი, მდგრადები იყვნენ ჩუტყვავილას ინფექციების მიმართ. 1796 წელს, მის ახლა უკვე ცნობილ ექსპერიმენტში, ჯენერმა გაფხაჭხა ფერმერი ბიჭი ვირუსის მქონე ნემსით, რომელიც შეიცავდა დაავადებული მერძევე ქალის ჭრილობიდან აღებულ სითხეს. როდესაც ბიჭს მოგვიანებით შეეყარა ჩუტყვავილას ვირუსი, ის აღარ დაავადდა. ძროხის ყვავილის ვირუსი იცავს ჩუტყვავილას ვირუსისგან, რადგან ეს ორი ვირუსი იმდენად მსგავსია, რომ იმუნური სისტემა მათ განსხვავებას ვერ ახერხებს.

ძროხის ვირუსით ვაქცინაცია ახდენს იმუნური სისტემის სენსიტიზაციას ისე, რომ ის ძლიერად რეაგირებს თუ მოგვიანებით ძროხის, ან, რაც უფრო მნიშვნელოვანია, ჩუტყვავილას ვირუსი შეიჭრება ორგანიზმში.



▲ **სურათი 43.19 ანტიგენის განადგურების ანტისხეულით წარმართული მექანიზმი.** ანტისხეულების ანტიგენებთან დაკავშირება მონიშნავს მიკრობებს, უცხო ნაწილაკებს და ხსნად ანტიგენებს, რათა მოხდეს მათი ინაქტივაცია და განადგურება. კომპლიმენტური სისტემის აქტივაციით, მემბრანაზე თავდამსხმელი კომპლექსი (MAC) ქმნის ფორებს უცხო უჯრედზე. ფორები იონებს და წყალს უჯრედში შესვლის საშუალებას აძლევს, რაც უჯრედის გაბერვასა და დაშლას იწვევს.

თანამედროვე ვაქცინა შეიცავს ინაქტივირებულ ბაქტერიულ ტოქსინებს, მოკლულ ან დასუსტებულ მიკრობებს, მათ ნაწილებს, ან ზოგჯერ მიკრობული ცილის მაკოდირებელ გენსაც კი, რომლებიც ჩვეულებრივ დაავადებას არ იწვევენ. ეს აგენტები იწვევენ მყისიერ იმუნურ პასუხს და ხანგრძლივ იმუნოლოგიურ მემორიზაციას (მემორიზაციის უჯრედების წყალობით).

ვაქცინირებული ადამიანი, რომელსაც შეხვდა ის პათოგენი, რომლის ვაქცინაც გაკეთებული ჰქონდა, ისევე სწრაფ მეორად პასუხს ავითარებს, როგორც ის ადამიანი, რომელსაც პათოგენი ადრეც შეხვდა. ვაქცინაციის მსოფლიო კამპანიამ უზრუნველყო ჩუტყვავილას აღმოფხვრა მეოცე საუკუნის 70-იან წლებში.

პატარა ბავშვების რუტინულმა იმუნიზაციამ განვითარებად ქვეყნებში დრამატულად შეამცირა სხვა ინფექციების შემთხვევები, როგორიცაა პოლიომიელიტი, ყივანახველა

და ა.შ. სამწუხაროდ, ყველა ინფექციური აგენტი ადვილად არ ექვემდებარება ვაქცინაციას. მაგალითად, პათოგენების ახალი შტამების გაჩენა მცირედ შეცვლილი ზედაპირის ანტიგენებით ართულებს ზოგი მიკრობისთვის ვაქცინის განვითარებას. ასეთ მიკრობებს მიეკუთვნება მალარიის პარაზიტი.

იმუნიტეტი შეიძლება განვითარდეს ერთი ადამიანისგან, რომელმაც განსაზღვრული დაავადება გადაიტანა, სხვაში ანტისხეულების გადატანით. ამას **პასიურ იმუნიტეტს** უწოდებენ, რადგან ის არ არის რეციპიენტის B და T უჯრედებზე დამოკიდებული. სანაცვლოდ, გადატანილი ანტისხეულები მიმართულნი არიან იმისკენ, რომ მყისიერად დაშალონ ნებისმიერი მიკრობი, რომლისთვისაც ისინი სპეციფიკურობას ავლენენ. პასიური იმუნიტეტი მყისიერ დაცვას უზრუნველყოფს, მაგრამ ის გრძელდება მხოლოდ იმდენ ხანს, რამდენსაც გადატანილი ანტისხეულები ცოცხლობენ (კვირიდან რამდენიმე თვემდე). პასიური იმუნიზაცია ბუნებრივად

ვლინდება, როდესაც ფეხმძიმე ქალების Ig ანტისხეულები გადაიან პლაცენტას და გადადიან ჩანასახში. გარდა ამისა, Ig ანტისხეულები გადაეცემა დედისგან შვილებს რძით გამოკვების დროს. ეს ეხმარება ბავშვის დაცვას ინფექციებისგან, სანამ ბავშვის იმუნური სისტემა მომწიფებას განიცდის.

ხელოვნურ პასიურ იმუნიტეტში, იმუნიზებული ცხოველის ანტისხეულები შეიყვანება არაიმუნიზირებულ ცხოველში.

მაგალითად, თუ პიროვნებას ცოფიანი ცხოველი უკბენს, შესაძლოა შევეყვანოთ ანტისხეულები, რომლებიც სხვა ადამიანში გამოიშავდა ცოფის სანინალმდეგო ვაქცინაციის შედეგად. ეს ღონისძიება მნიშვნელოვანია, რამდენადაც ცოფი შეიძლება სწრაფად გავრცელდეს და აქტიურ იმუნიზაციაზე პასუხი ძალიან ნელი აღმოჩნდეს მსხვერპლის გადასარჩენად. დიდი ნაწილი იმ ადამიანებისა, ვისაც ცოფის ვირუსი შეხვედრია, პასიურად და აქტიურად იმუნიზებულია.

შეყვანილი ანტისხეულები ვირუსს აკონტროლებენ მანამ, სანამ მსხვერპლის აქტიური იმუნიზაციით წარმოქმნილი საკუთარი იმუნური პასუხი აიღებს ფუნქციებს თავის თავზე.

### ▶ ჯანცოცია ც/სცი 43.3

1. აღწერეთ ქვემოთ ჩამოთვლილ უჯრედთა ტიპების მთავარი როლი ანტიგენისა და ციტოკინების მიერ მათი გააქტივებისას: T ჰელპერები, ციტოტოქსიკური T უჯრედები და B უჯრედები.
2. რა ტიპის უჯრედები და ფუნქციები არ ექნებოდა თიმუსის გარეშე დაბადებულ ბავშვს?
3. განიხილეთ, როგორ გვეხმარებიან ანტისხეულები ინფექციებისა და/ან ინფექციების ეფექტებისგან დაცვაში.
4. ახსენით, რატომ უზრუნველყოფს პასიური იმუნიზაცია ინფექციისგან ხანმოკლე დაცვას, მაშინ, როცა აქტიური იმუნიზაცია ხანგრძლივი დაცვის საფუძველია?

### ▶ ჯანცოცია 43.4

## იმუნური სისტემის უნარი, განასხვავოს საკუთარი უცხო სგან, ზღუდავს ქსოვილის ციანსპლანცაციას

გარდა იმისა, რომ განასხვავებს შემოჭრილ პათოგენს სხეულის საკუთარი უჯრედებისგან, იმუნური სისტემა იწყებს ომს სხვა ინდივიდის უჯრედების წინააღმდეგაც. მაგალითად, კანი, რომელიც ერთი ადამიანიდან მეორე გენეტიკურად განსხვავებულ ადამიანშია გადანერგილი, ჯანსაღად შენარჩუნდება, დაახლოებით, ერთი კვირის განმავლობაში, მაგრამ შემდეგ განადგურდება რეციფიენტის იმუნური სისტემით (საინტერესოა, რომ ფეხმძიმე ქალი არ განდევნის ჩანასახს, როგორც არასაკუთარ ქსოვილს. ამ შემთხვევაში, პლაცენტის სტრუქტურა, რომელიც 46-ე თავშია აღწერილი, ნამყვანია ამ

მიღებისთვის). დაიმახსოვრეთ, რომ სხეულის რეაქცია შეუ-საბამო სისხლის გადასხმის, ან სხვა ქსოვილისა თუ მთლიანი ორგანოს გადანერგვის დროს, სულაც არ არის იმუნური სისტემის დარღვევა, არამედ ჯანსაღი იმუნური სისტემის ნორმალური რეაქციაა უცხო აგენტის საპასუხოდ.

## სისხლის ჯგუფები და გადასხმა

მე-14 თავში განვიხილეთ სისხლის ABO ჯგუფების გენეტიკა ადამიანებში. გაიხსენეთ, რომ სისხლის A ტიპის წითელ უჯრედებს ზედაპირზე აქვთ ანტიგენების მოლეკულები. A ანტიგენების როგორც უცხო შეცნობა შეიძლება მოხდეს, როდესაც ისინი სხვა ორგანიზმში მოხვდებიან.

ამის მსგავსად, B ანტიგენი ნაპოვნია სისხლის ტიპის წითელ უჯრედებზე. ორივე A და B ანტიგენი ნაპოვნია სისხლის ტიპის წითელ უჯრედებზე. არცერთი ეს ანტიგენი არ მოიპოვება O ტიპის სისხლის წითელ უჯრედებზე (იხ. ცხრილი 14.2).

A ტიპის სისხლის მქონე ინდივიდები, რა თქმა უნდა, არ წარმოქმნიან ანტისხეულებს A ტიპის ანტიგენების წინააღმდეგ, რადგან ისინი საკუთარის მიმართ ტოლერანტული არიან. მაგრამ ამ ინდივიდებს აქვთ B ტიპის ანტიგენების მიმართ ანტისხეულები, მიუხედავად იმისა, ჰქონია თუ არა ინდივიდს შეხება ტიპის სისხლთან! შესაძლოა გაგიკვირდეთ, რომ უცხო სისხლის ჯგუფის ანტიგენების შესაბამისი ანტისხეულები მაშინაც კი არსებობს სხეულში, როცა მას შეხება არ ჰქონია უცხო სისხლის უჯრედებთან.

ახსნა არის ის, რომ ეს ანტისხეულები წარმოიქმნიან ორგანიზმის ნორმალური ბაქტერიების ზედაპირზე არსებული ეპიტოპებისთვის, რომლებიც ძალიან ჰგავს სისხლის ჯგუფების ანტიგენებს.

მაგალითად, A ტიპის სისხლის მქონე ადამიანი წარმოქმნის ანტისხეულებს B ტიპის მსგავსი ბაქტერიული ეპიტოპების წინააღმდეგ, რომელსაც იმუნური სისტემა უცხოად აღიქვამს, მაგრამ არ წარმოქმნის ტიპის მსგავსი ბაქტერიული ეპიტოპების წინააღმდეგ, რადგან მას საკუთრად აღიქვამს.

წინასწარ არსებული ანტი-B ანტისხეულები A ტიპის სისხლის მქონე ადამიანში გამოიწვევს მყისიერ გამანადგურებელ რეაქციას, თუკი ტიპის სისხლი გადაესხა. ეს რეაქცია მოიცავს გადასხმული წითელი უჯრედების დაშლას, რასაც შეიძლება მოყვეს კანკალი, ციება, შოკი და თირკმლის ფუნქციის დარღვევა. იგივე პრინციპით ანტი-A ანტისხეულები ტიპის სისხლის მქონე რეციფიენტში მოქმედებს A ტიპის წითელი უჯრედების წინააღმდეგ. ეს რეაქცია შეიძლება შემცირდეს, თუ მოხდება მხოლოდ უჯრედების გადატანა მთელი სისხლის ნაცვლად ისე, რომ დონორის სითხეში მყოფი ანტისხეულები არ გადაიტანება.

ცხრილ 43.1-ში ჩამოთვლილია რეციპიენტისა და დონორის კომბინაციები, რომლებიც უსაფრთხოა და ისინი, რომლებიც გადასხმისას მწვავე რეაქციას იწვევენ. მიაქციეთ ყურადღება, რომ ტიპის სისხლის მქონე ადამიანს შეუძლია უსაფრთხოდ მიიღოს ნებისმიერი ტიპის სისხლი (და, აქედან გამომდინარე, „უნივერსალურ რეციპიენტად“ იწოდება). ტიპის სისხლი შეიძლება უსაფრთხოდ გადაესხას ნებისმიერ რეციპიენტს (აქედან გამომდინარე, „უნივერსალურ დონორს“ უწოდებენ).

სისხლის ჯგუფის ანტიგენები და შესაბამისი ბაქტერიული

ეპიტოპები პოლისაქარიდებია. ასეთი პოლისაქარიდული ანტიგენები იწვევენ იმუნურ პასუხს, მაგრამ მეხსიერების უჯრედები არ წარმოიქმნება. შედეგად, ანტისისხლის ჯგუფის ანტისხეულები ყოველთვის IgM (პირველადი პასუხისას წარმოქმნილი) უფროა, ვიდრე Ig, რომელიც მეორადი პასუხისას წარმოიქმნება. ეს კარგია ორსულობისას, რადგან IgM არ გადის პლაცენტას და, ამდენად, ჩანასახთან არანაირი საფრთხე არ მიდის დედის სისხლიდან, რომელიც მასთან შეუთავსებელი შეიძლება იყოს. სხვა ტიპის სისხლის წითელი უჯრედის ანტიგენი Rh ფაქტორი შესაძლოა ჩანასახისთვის საზიფათოც კი აღმოჩნდეს, რამდენადაც ცილოვანი ანტიგენი Rh ფაქტორი იწვევს იმუნურ რეაქციას, რომელშიც მეხსიერების უჯრედები წარმოიქმნება. მოგვიანებით, Rh ფაქტორის ზემოქმედება მეხსიერების უჯრედებზე იწვევს ანტი Rh ანტისხეულების -IgG-ს წარმოქმნას.

პოტენციურად საშიში ვითარება შეიძლება აღმოცენდეს, როდესაც რეზუსუარყოფითიანი დედა (რეზუსის ფაქტორის არმქონე) ატარებს რეზუსდადებით შვილს, რომელსაც ფაქტორი შთამომავლობით მამისგან გადაეცა. თუ ჩანასახის სისხლის მცირე რაოდენობა გადის პლაცენტას, რაც შეიძლება ორსულობისას მოგვიანებით ან მშობიარობისას მოხდეს, დედას უჩნდება ჰუმორული პასუხი რეზუს ფაქტორის მიმართ.

საფრთხე აღმოცენდება შემდგომი ორსულობებისას რეზუსდადებითიანი ჩანასახის შემთხვევაში, როდესაც დედის რეზუსსპეციფიკურიმეხსიერების უჯრედებიჩანასახისრეზუსის ფაქტორს შეეჯახება. ეს უჯრედები წარმოქმნიან ანტი რეზუს Ig ანტისხეულებს, რომლებსაც პლაცენტის გავლა და ჩანასახის სისხლის წითელი უჯრედების დაშლა შეუძლიათ. ამისთვის ხელის შეშლის მიზნით, დედაში ორსულობის დაახლოებით მეშვიდე თვეს ან მშობიარობისთანავე შეჰყავთ ანტი რეზუს ანტისხეულები. ამის შედეგად დედა პასიურად (ხელოვნურად) იმუნიზებული ხდება, რათა საკუთარი იმუნური სისტემის ჩართვამდე და იმუნოლოგიური მეხსიერების გამომუშავებამდე, რომელიც მომავალ რეზუსდადებითიან ბავშვებს დააზიანებს, განადგურდეს ჩანასახის რეზუს ფაქტორის შემცველი სისხლის

წითელი უჯრედები, რომლებიც პლაცენტას კვეთენ.

## ქსოვილისა და ორგანოების ტრანსპლანტაცია

მთავარი ქსოვილშეთავსების კომპლექსის (MHC) მოლეკულები პასუხისმგებელნი არიან იმუნური პასუხის სტიმულაციაზე, რომელიც გადანერგილი ორგანოს ან ქსოვილის განდევნას იწვევს. როგორც მანამდე წაიკითხეთ, MHC-ის პოლიმორფიზმი იძლევა იმის გარანტიას, რომ არც ერთ შემთხვევაში ორი ადამიანი, იდენტური ტყუპების გარდა, არ შეიძლება შეიცავდეს ერთნაირ MHC მოლეკულებს. ასე რომ, ტრანსპლანტაციისას უმეტეს პაციენტში ადგილი აქვს განდევნის რეაქციას იმიტომ, რომ დონორის სულ მცირე რამდენიმე MHC მოლეკულა რეციპიენტისთვის უცხო აღმოჩნდება. არანაირი განდევნის რეაქციის საშიშროება არ არის იდენტური ტყუპების შემთხვევაში ან თუ ქსოვილი სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეში გადაინერგა.

არაიდენტურ ტრანსპლანტატებში უნდა იყოს მცდელობა განდევნის რეაქციის მინიმიზაციისა. ისეთი დონორი უნდა იქნეს შერჩეული, რომლის ქსოვილსაც ექნება რეციპიენტის MHC მოლეკულებთან რაც შეიძლება მეტი მსგავსება. დამატებით, რეციპიენტი იღებს წამლებს, რომლებიც იმუნურ პასუხს თრგუნავს. მაგრამ ამ წამლებმა შეიძლება რეციპიენტი უფრო მგრძნობიარე გახადოს ინფექციებისა და სიმსივნის მიმართ მკურნალობის განმავლობაში.

ძვლის ტვინის ტრანსპლანტაციისას, ტრანსპლანტანტი უფრო მეტად, ვიდრე რეციპიენტი, წარმოადგენს იმუნური განდევნის წყაროს. ძვლის ტვინის ტრანსპლანტანტები გამოიყენება ლეიკემიის ან სხვა სიმსივნეებისას ისევე, როგორც სხვადასხვა პემატოლოგიური დაავადებისას. მსგავსად სხვა გადანერგვებისა, ამ შემთხვევაშიც ცდილობენ, რომ დონორისა და რეციპიენტის MHC რაც შეიძლება ჰგავდეს ერთმანეთს. ტრანსპლანტური ძვლის ტვინის მიღებამდე რეციპიენტი გადის დასხივებას, რათა ნებისმიერ ანომალურ უჯრედთან ერთად განადგურდეს მისი საკუთარი ძვლის ტვინის უჯრედები.

| ცხრილი 43.1 სისხლის გადასხმისას სხვა ჯგუფებთან თავსებადი და შუთავსებადი სისხლის ჯგუფები*. |                                  |                                                                                             |   |    |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---|----|---|
| რეციპიენტის სისხლის ჯგუფი                                                                 | ანტისხეულები რეციპიენტის სისხლში | გადასხმისას რეაქცია არის (+), ან არ არის (-): დონორის სისხლის ჯგუფი (დალექილი ერიტროციტები) |   |    |   |
|                                                                                           |                                  | A                                                                                           | B | AB | O |
| A                                                                                         | ანტი B                           | —                                                                                           | + | +  | — |
| B                                                                                         | ანტი A                           | +                                                                                           | — | +  | — |
| AB                                                                                        | ანტი B ან ანტი A არ არის         | —                                                                                           | — | —  | — |
| O                                                                                         | ანტი B და ანტი A                 | +                                                                                           | + | +  | — |

\* AB ტიპის სისხლის მქონე ინდივიდები უნივერსალური რეციპიენტებია (ლურჯი მწკრივი), O ტიპის სისხლის მქონე ინდივიდები უნივერსალური დონორებია (მწვანე სვეტი).

ასეთი მკურნალობა აქტიურად აქვეითებს რეციპიენტის იმუნურ სისტემას და ტოვებს გადანერგილი სისტემის განდევნის ნაკლებ ალბათობას. ყველაზე დიდი საფრთხე ძვლის ტვინის გადანერგვისას არის ის, რომ დონორის ძვლის ტვინის ლიმფოციტები რეციპიენტის წინააღმდეგ იმუშავენ.

ეს რეაქცია მნიშვნელოვნად მცირდება, თუკი დონორისა და რეციპიენტის MHC კარგად შეესაბამება ერთმანეთს. ძვლის ტვინის დონორის პროგრამები მუდმივად ეძებს მოხალისეებს მთელ მსოფლიოში. MHC-ის დიდი მრავალფეროვნებიდან გამომდინარეობს პოტენციური დონორების ჯგუფების მრავალგვარობა.

## კონცეფცია ცისტი 43.4

1. ახსენით, რატომ განიხილება სისხლის მქონე პაციენტი უნივერსალურ რეციფიენტად.
2. ძვლის ტვინის გადანერგვისას არის საშიშროება, რომ აღმოცენდეს გადანერგილი სისტემის რეაქცია რეციფიენტის წინააღმდეგ. რატომ არის ეს რეაქცია კონკრეტულად ძვლის ტვინის ტრანსპლანტაციისთვის?
3. მძიმედ დამწვარი პაციენტებს ხშირად სჭირდებათ კანის გადანერგვა. რა უპირატესობა აქვს პაციენტის სხეულის დაუზნვარი უბნიდან კანის გადანერგვას სხვა ადამიანის კანის გადანერგვასთან შედარებით?

## კონცეფცია 43.5

### გადაჭარბებულმა, საკუთარი თავისკენ მიმართულმა ან შემციბებულმა იმუნოტმა პასუხმა შესაძლოა დაავადება გამოიწვიოს

ლიმფოციტების კარგად რეგულირებული ურთიერთქმედება უცხო სხეულებთან, ერთმანეთთან და სხეულის სხვა უჯრედებთან უზრუნველყოფს ბევრი პათოგენისგან ექსტრაორდინალურ დაცვას. თუ ეს დახვეწილი ბალანსი დაირღვა იმუნური სისტემის არასწორი მოქმედების გამო, ინდივიდზე ეფექტი ფართო საზღვრებში ცვალებადობს – დანეყბული მცირე უსიამოვნებებისგან, ხშირად დამთავრებული აუტოიმუნური და იმუნოდეფიციტური მდგომარეობის ფატალური შედეგებით.

### ალოტგიები

ალერგია არის გადაჭარბებული პასუხი (ჰიპერსენსიტიურობა) განსაზღვრულ ანტიგენებზე, რომელთაც ალერგენებს უწოდებენ. ალერგიების წარმოქმნის ერთი ჰიპოთეზა

გვთავაზობს, რომ ის არის პარაზიტულ ჭიებზე იმუნური სისტემის პასუხის ევოლუციური ნარჩენი. ჭიებთან მეტრძოლი ჰუმორული მექანიზმი ძალიან ჰგავს ალერგიულ პასუხს, რომელიც ისეთ დაავადებებს იწვევს, როგორიცაა ციება და ალერგიული ასთმა.

ალერგიის ყველაზე გავრცელებული ფორმები მოიცავს Ig კლასის ანტისხეულებს (იხ. სურ. 43.18). მაგალითად, თივის ციება ვლინდება, როდესაც პლაზმური უჯრედები გამოყოფენ Ig ანტისხეულებს მტვრის მარცვლის ზედაპირზე არსებული ანტიგენებისთვის. ამ ანტისხეულების ნაწილი კუდიით უკავშირდება შემაერთებელ ქსოვილში არსებულ მასტოციტებს.

მოგვიანებით, როცა მტვრის მარცვლები ხელახლა შეიჭრება სხეულში, ისინი უკავშირდებიან შემაერთებელი ქსოვილის უჯრედებზე არსებულ Ig ანტისხეულის ანტიგენდამაკავშირებელ უბნებს. აღნიშნული ურთიერთქმედება აკავშირებს გვერდითა ანტისხეულებს. ეს იწვევს ჰისტამინისა და სხვა ანთებითი აგენტების გამოყოფას გრანულებიდან (ვეზიკულებიდან), რასაც დეგრანულაცია ეწოდება (სურ. 43.20). გაიხსენეთ, რომ ჰისტამინი იწვევს წვრილი კაპილარების გაფართოებასა და განვლადობის გაზრდას. სისხლძარღვების ასეთ ცვლილებებს მიეყვარათ ტიპურ ალერგიულ სიმპტომებამდე, როგორიცაა ცემინება, ცხვირში გამონადენი, აცრემლებული თვალები და გლუვი კუნთების შეკუმშვა, რამაც შეიძლება სუნთქვის სირთულეები გამოიწვიოს. ანტიჰისტამინური პრეპარატები ჰისტამინის რეცეპტორის ბლოკირების გზით ამცირებს ალერგიულ სიმპტომებს.

მწვავე ალერგიულ პასუხს ხანდახან ანაფილაქსიურ შოკამდეც მიეყვარათ. ამ შემთხვევაში მთელი სხეული ახორციელებს სიცოცხლისთვის სახიფათო რეაქციას, რაც ალერგიის წარდგენის საპასუხოდ წამების განმავლობაში შეიძლება გამოვლინდეს. ანაფილაქსიური შოკი ვითარდება, როცა ფართოდ გავრცელებული მასტოციტების დეგრანულაცია მიმდინარეობს, რაც იწვევს პერიფერიული სისხლძარღვების გაფართოებას და სისხლის წნევის სწრაფ ვარდნას. ფუტკრის შხამზე ან პენიცილინზე ალერგიულმა რეაქციამ იმ ადამიანებში, ვინც აღნიშნულის მიმართ ალერგიულია, შეიძლება ანაფილაქსიური შოკის განვითარება გამოიწვიოს. ამის მსგავსად, ადამიანები, რომლებიც ძლიერ ალერგიულები არიან თევზზე, მიწის თხილზე ან სხვა საკვებზე, გარდაცვლილან უმცირესი რაოდენობით აღნიშნული ალერგენების მიღებითაც კი. ზოგი ადამიანი, რომელიც მძიმე ალერგიით არის დაავადებული, თან ატარებს ეპინეფრინით სავსე პატარა შპრიცს, რომელიც ალერგიულ პასუხს ებრძვის.

### აუტოიმუნური დაავადებები

ზოგ ადამიანში იმუნური სისტემა კარგავს საკუთარს მიმართ ტოლერანტულობას და სხეულის გარკვეულ მოლეკულებთან ბრძოლას იწყებს, რაც იწვევს აუტოიმუნური დაავადებების დიდ ნაწილს. სისტემური წითელი ქარის დროს იმუნური სისტემა წარმოქმნის ანტისხეულებს (რომლებიც აუტოანტისხეულებად იწოდება) საკუთარი მოლეკულების ფართო სპექტრის წინააღმდეგ, უჯრედთა დაშლისას

წარმოქმნილი ჰისტონებისა და **დნმ**-ის ჩათვლით. წითელი ქარი ხასიათდება კანზე გამონაყარით, ციებით, ართრიტითა და თირკმელების დისფუნქციით. სხვა ანტისხეულით გამოწვეული აუტოიმუნური დაავადება არის რევმატოიდული ართრიტი, რომელიც იწვევს სახსრების ხრტილისა და ძვლის მტკივნეულ ანთებასა და დაზიანებას (**სურ. 43.21**). ინსულინდამოკიდებული დიაბეტის დროს პანკრეასის ინსულინის წარმოქმნილი ბეტა უჯრედები ავტოიმუნური თ უჯრედების სამიზნე ხდება.

სხვა მაგალითია გაფანტული სკლეროზი, ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ქრონიკული ნევროლოგიური დაავადება განვითარებად ქვეყნებში. ამ დაავადებაში T უჯრედები შედის ცენტრალურ ნერვულ სისტემაში და შლის ზოგი ნეირონის მიეღინის გარსს (**იხ. სურ. 48.5**). შედეგად, ნევროლოგიური დარღვევების დიდ რიცხვს იწვევს.

აუტოიმუნური დაავადებების მექანიზმები სრულად გარკვეული არ არის. დიდი ხნის განმავლობაში ფიქრობდნენ, რომ აუტოიმუნური დაავადების მქონე ადამიანებს საკუთარის წინააღმდეგ მოქმედი ლიმფოციტები ჰქონდათ, რომლებიც ახერხებდნენ განვითარების პროცესში განადგურებისგან თავის დაღწევას. დღეს ვიცით, რომ ჯანმრთელ ადამიანებსაც აქვთ საკუთარის წინააღმდეგ მოქმედი ლიმფოციტები, რომლებიც მარეგულირებელი მექანიზმებით უფუნქციონი ხდებიან და, ამდენად, ვერ ახერხებენ აუტოიმუნური რეაქციების გამოწვევას. ასე რომ, აუტოიმუნური დაავადებები, როგორც ჩანს, იმუნური სისტემის მარეგულირებელი მექანიზმების დარღვევის მიზეზი უნდა იყოს.

## იმუნოდეფიციტური დაავადებები

იმუნური სისტემის უუნარობა, პათოგენებისგან ან სიმ-სიგნური უჯრედებისგან დაიცვას ორგანიზმი, მიუთითებს ამ სისტემაში გარკვეული დეფიციტის არსებობაზე. იმუნოდეფიციტური დაავადება, რომელიც განპირობებულია იმუნური სისტემის გენეტიკური ან განვითარებადი დეფექტებით, პირველად იმუნოდეფიციტად იწოდება. იმუნოდეფიციტის დაავადება, რომელიც სიცოცხლეში მოგვიანებით ვითარდება განსაზღვრულ ქიმიურ თუ ბიოლოგიურ აგენტებთან შეხვედრის შედეგად, შეძენილ ან მეორად იმუნოდეფიციტად მოიხსენიება. რაც არ უნდა იყოს იმუნოდეფიციტის მიზეზი და ბუნება, ასეთი ტიპის დაავადების მქონე ადამიანი ხშირი და შექცევადი ინფექციების სამიზნეა და ასევე სიმსივნის მიმართაც უფრო მგრძნობიარეა.

### თანდაყოლილი (პირველადი) იმუნოდეფიციტი

თანდაყოლილი იმუნიტეტი ამა თუ იმ ტიპის იმუნური უჯრედების ან განსაზღვრული ცილების, მაგალითად, IgA ანტისხეულების, ან კომპლემენტარული კომპონენტების, წარმოქმნის დეფექტია. გენეტიკურ დეფექტზე დამოკიდებულებით შეიძლება თანდაყოლილი და შეძენილი ან ორივე დაცვა დაირღვეს. მწვავე კომბინირებული იმუნოდეფიციტის (SCID) დროს, შეძენილი იმუნიტეტის ჰუმორული და უჯრედული პასუხი არ ფუნქციონირებს. ასეთი გენეტიკური დაავადებისას

ადამიანების დიდი ხნით გადარჩენა ძვლის ტვინის გადანერგვას მოითხოვს, რომელიც ორგანიზმის ფუნქციური ლიმფოციტებით მომარაგებას გააგრძელებს.

ერთი ტიპის SCID-ის დროს ფერმენტ ადენოზინ დეამინაზას დეფიციტი იწვევს და თ უჯრედებისთვის ტოქსიკური ნივთიერებების დაგროვებას. მეოცე საუკუნის ადრეული 90-იანი წლებიდან სამედიცინო მკვლევრებმა გამოსცადეს ამ დაავადების გენური თერაპია, რომლის დროსაც ადამიანის საკუთარი ძვლის ტვინის უჯრედებს აცილებენ, გენეტიკური ინჟინერიით შეაქვთ ფუნქციური ადენოზინ დეამინაზას გენი და შემდეგ უბრუნებენ სხეულს (**იხ. სურ. 20.16**). უკანასკნელ ხანებში მიღწეული წარმატება იყო SCID-ის მქონე 2 წლის ბავშვი, რომელსაც ადენოზინ დეამინაზას გენი ჩაუნერგეს. მკურნალობიდან დაახლოებით 2 წლის შემდეგ მისი და თ უჯრედები კვლავ ნორმალურად ფუნქციონირებდა. როდესაც მისი ოჯახის წევრი ჩუტყვავილათი დაავადდა, ბავშვს ავადმყოფობის ნიშნები არ გამოუვლინდა, რაც მისი იმუნური სისტემის კარგად ფუნქციონირებაზე მიუთითებდა.

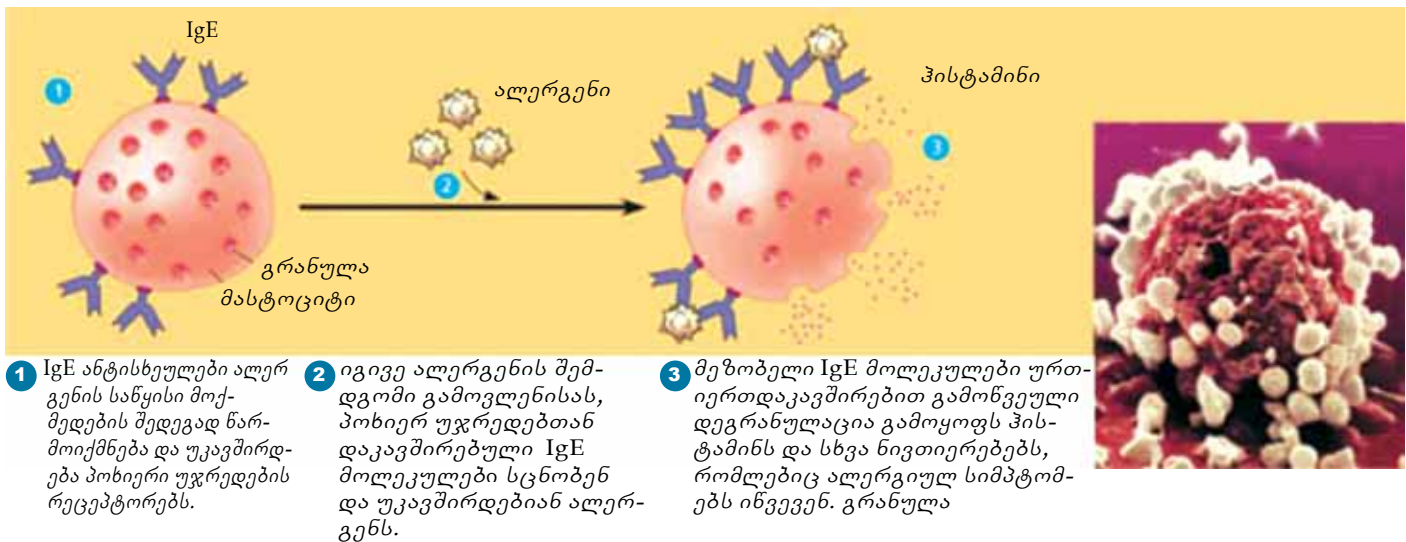
### შეძენილი (მეორადი) იმუნოდეფიციტი

იმუნიტეტის დისფუნქციები, რომლებიც სიცოცხლეში მოგვიანებით ვითარდება, შესაძლოა მრავალნაირი აგენტის მოქმედებამ განაპირობოს. აუტოიმუნურ დაავადებებთან ან გადანერგილ ქსოვილის განდევნასთან საბრძოლველად გამოყენებულმა წამლებმა შეიძლება ძლიერად დათრგუნოს იმუნური სისტემა და იმუნოდეფიციტის მდგომარეობამდე მიგვიყვანოს. გარდა ამისა, იმუნური სისტემის დათრგუნვა შეიძლება ამა თუ იმ ტიპის სიმსივნემაც გამოიწვიოს, განსაკუთრებით, ჰოჯკინის დაავადებამ, რომელიც ლიმფურ სისტემას აზიანებს. შეძენილი იმუნოდეფიციტი შეიძლება იყოს ფიზიოლოგიური სტრესით გამოწვეული დროებითი მოვლენა ან დამანგრეველი მდგომარეობა, როგორც არის ვირუსული დაავადება შეძენილი იმუნოდეფიციტის სინდრომი (AIDS).

**სტრესი და იმუნური სისტემა.** ჯანმრთელი იმუნური მოქმედება ენდოკრინულ და ნერვულ სისტემებზეა დამოკიდებული. თითქმის 2,000 წლის წინ ბერძენმა ექიმმა გალენმა ჩანერა, რომ დეპრესიით დაავადებული ადამიანები უფრო მიდრეკილნი იყვნენ სიმსივნის განვითარების მიმართ. არსებობს მზარდი დამამტკიცებელი საბუთები, რომ ფიზიკურმა და ემოციურმა სტრესმა შეიძლება იმუნიტეტი დააზიანოს. სტრესის დროს ადრენალური ჯირკვლის მიერ გამოყოფილი ჰორმონები გავლენას ახდენს სისხლის თეთრ უჯრედებზე და თრგუნავს იმუნურ სისტემას.

ემოციურ მდგომარეობასა და იმუნიტეტის მოქმედებას შორის კავშირი ნერვულ სისტემასაც მოიცავს. ესა თუ ის ნეიროტრანსმიტერი, რომელიც ბედნიერებისა და მოსვენების განცდისას გამოიყოფა, აძლიერებს იმუნიტეტს.

ერთ კვლევაში კოლეჯის სტუდენტები გამოიკვლიეს გამოცდებისა და დასვენების შემდგომ პერიოდებში. მათი იმუნური სისტემა რამდენიმე კუთხით დაზიანებული იყო გამოცდების კვირის განმავლობაში, მაგალითად, ინტერფერონის დონე უფრო დაბალი იყო. ეს და სხვა დაკვირვება



▲ **სურათი 43.20 მასტოციტები, IgE, და ალერგიული პასუხი.** ფერადი SEM აჩვენებს დეგრანულირებულ მასტოციტებს, რომლებიც გამოყოფენ ჰისტამინსა და სხვა ანთებითი აგენტების გრანულებს.

მიუთითებს, რომ ჯანმრთელობის ზოგადი მდგომარეობა და გუნება-განწყობა გავლენას ახდენს იმუნიტეტზე. არსებობს ნერვული და იმუნური სისტემების კავშირის ფიზიოლოგიური მტკიცებულებებიც: ნეიროტრანსმიტერების რეცეპტორები ლიმფოციტებზე იქნა აღმოჩენილი, და ნერვების ქსელი ღრმად იჭრება თიმუსში.



▲ **სურათი 43.21 რევმატოიდული ართრიტით დეფორმირებული ხელის რენტგენული სურათი.**

**შეძენილი იმუნოდეფიციტის სინდრომი (AIDS).** AIDS-ის ქართული თარგმანია შიდსი. შიდსიანი ადამიანების დაავადება ადვილად ხდება სხვადასხვა ინფექციით და კიბოთი. მაგალითად, ნეუმოცისტის ცარიინი-ით გამოწვეულმა ინფექციამ შეიძლება შიდსიან ადამიანებში ფილტვების მწვავე ანთება გამოიწვიოს, მაგრამ ჯანსაღი იმუნური სისტემის მქონე პირებში

წარმატებულად ითრგუნება.

ამის მსგავსად, კაპოშის სარკომა იშვიათი კიბოა, რომელიც განსაკუთრებით ხშირად შიდსიანებში ვითარდება. ასეთი დაავადებები, ნევროლოგიურ დარღვევებთან და სხვა ფიზიოლოგიურ პათოლოგიებთან ერთად, სიკვდილის მიზეზი ხდება.

რამდენადაც შიდსის დროს T ჰელპერები ილუპება, ჰუმორული და უჯრედული პასუხი ზიანდება. T ჰელპერების დაკარგვა ადამიანის იმუნოდეფიციტის ვირუსის (HIV), რეტროვირუსის (**სურ. 43.22**) მოქმედების შედეგია.

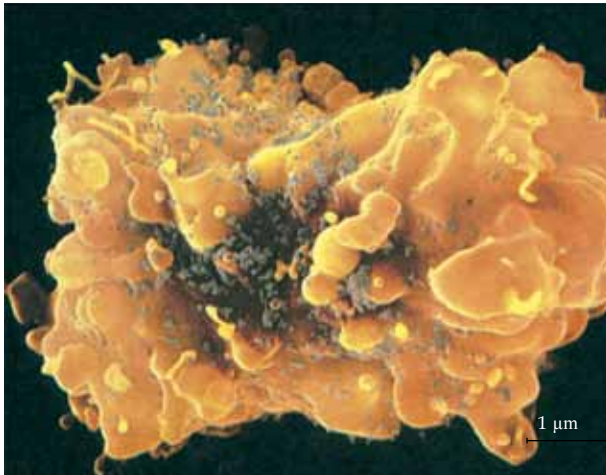
HIV შედის უჯრედებში სამი ცილის გამოყენებით, რომ-

ლებიც იმუნურ პასუხში მონაწილეობენ. HIV-ის მთავარი რეცეპტორი T უჯრედებზე CD4 მოლეკულაა. ვირუსი სხვა ტიპის უჯრედებსაც აზიანებს, როგორიცაა მაკროფაგები და ტვინის უჯრედები, რომლებსაც CD4 მოლეკულები უფრო დაბალი დონით გამოხატული აქვს. HIV-ის შესვლას სჭირდება უჯრედის ზედაპირის ცილა – კორეცეპტორი, რომელსაც ფუზინს უწოდებენ და რომელიც HIV-ით დაზიანებული ყველა უჯრედის ზედაპირზე მოიპოვება. სხვა ტიპის კორეცეპტორი მხოლოდ მაკროფაგებსა და T ჰელპერებზეა გამოხატული.

ეს ორივე ტიპის კორეცეპტორი არაინფიცირებულ უჯრედებზე მოქმედებს როგორც ქემოკინების რეცეპტორები. ეს ცილები პირველად HIV-ის კორეცეპტორებად აღიარებული იყო მას შემდეგ, რაც ნახეს, რომ ქემოკინებს HIV-ის უჯრედში შეჭრისთვის ხელის შეშლა შეეძლო.

როდესაც ვირუსი უჯრედში შეიჭრება, HIV **რნმ** განიცდის რევერსიულ ტრანსკრიპციას და შედეგად მიღებული დნმ მასპინძელი უჯრედის გენომში ჩაშენდება. ამ ფორმით გენომს შეუძლია ვირუსის ახალი ნაწილაკების წარმოქმნა (**იხ. სურ. 18.10**). გამოდის, რომ ინფიცირებული უჯრედის ტრანსკრიპციისა და ტრანსლაციის მანქანები ჩათრეულია ვირუსის სასარგებლოდ. T უჯრედების სიკვდილი HIV ვირუსის საშუალებით ორი გზით უნდა ხდებოდეს. ვირუსის რეპროდუქციას ემორჩილება ინფიცირებული უჯრედი, რის შედეგადაც უჯრედი ილუპება. ინფიცირებული და ჯანსაღი უჯრედები განიცდიან ვირუსით გამოწვეულ აპოპტოზს.

ამ დროისთვის HIV ინფექცია ვეღარ იკურნება, თუმცა განსაზღვრულ წამლებს შეუძლია HIV-ის გამრავლების დათრგუნვა და შიდსის გავრცელების შეჩერება. აღნიშნული წამლები ძალიან ძვირია და ყველა ინფიცირებულ ადამიანს ხელი არ მიუწვდება მათზე. გარდა ამისა, გამრავლების ყოველ ჯერზე ვირუსში მიმდინარე მუტაციური ცვლილებები HIV-ის ახალ ფორმას წარმოქმნის, რომელიც მდგრადია წამლის მიმართ.



▲ სურათი 43.22 HIV-ით ინფიცირებული T უჯრედები. ამ ფერად SEM-ზე ნაჩვენებია ახლადწარმოქმნილი ვირუსის ნაწილაკები (რუხი), რომლებიც გამოიკვეთება T უჯრედის ზედაპირიდან.

წამლების კომბინაციის გამოყენებამ შეიძლება შეამციროს წამლის მიმართ მდგრადობის წარმოქმნა, რადგან ერთი წამლის მიმართ მდგრადი ვირუსი სხვა წამლით განადგურდება. მაგრამ მრავალი წამლის მიმართ მდგრადი ფორმების წარმოქმნა ზოგ პაციენტში წამლის „კოქტეილის“ ეფექტურობას ამცირებს. HIV-ის ზედაპირული ანტიგენის ხშირი მუტაციური ცვლილება ასევე უშლის ხელს ეფექტური ვაქცინის წარმოებას.

HIV-ის გადატანა ინფიცირებული უჯრედების შემცველი სხეულის სითხის საშუალებით ხდება, როგორცაა სპერმა ან სისხლი. დაუცველი სქესობრივი აქტი (პრეზერვატივის გარეშე) ჰომოსექსუალისტებს შორის, ასევე HIV-ის შემცველი ნემსები (ძირითადად, ინტრავენური ნარკოტიკების მომხმარებლებში) აშშ-ში ვირუსის გავრცელების უმთავრესი მიზეზია. თუმცა ჰეტეროსექსუალებშიც HIV-ის გავრცელება სწრაფად იზრდება პარტნიორებს შორის დაუცველი სქესობრივი აქტის შედეგად. აფრიკასა და აზიაში გადაცემა ძირითადად სწორედ ჰეტეროსექსუალური გზით ხდება.

2003 წლის დეკემბრის მოხსენებაში შიდსის გაერთიანებული ერების ერთობლივმა პროგრამამ აღრიცხა, რომ მსოფლიოში HIV/შიდსით ინფიცირებული 40 მილიონი ადამიანია.

გავრცელების სიჩქარის შესამცირებლად საუკეთესო მიდგომა ხალხის განათლებაა ინფიცირებული ნემსებისა და დაუცველი სქესობრივი აქტის გზით ვირუსის გადაცემის შესახებ. მართალია პრეზერვატივი HIV-ის (ან მსგავსი გზით გავრცელებადი ვირუსების, როგორცაა ჰეპატიტი) გადაცემის

რისკს სრულად ვერ აღმოფხვრის, ეს გზა მნიშვნელოვნად ამცირებს აღნიშნულ რისკს. ნებისმიერი ადამიანი, რომელსაც ნებისმიერი სახის – ვაგინალური, ორალური ან ანალური – სქესობრივი აქტი აქვს პოტენციურად ინფიცირებულ პაციენტთან, ვირუსით დაავადების რისკის ქვეშ იმყოფება.

## კონკლუზია ცისდი 43.5

1. როგორ გავლენას მოახდენს მაკროფაგების დეფიციტი თანდაყოლილ და შეძენილ იმუნიტეტზე?
2. ბევრი ანტიალერგიული წამალი ბლოკირებას უკეთებს მასტოციტის პასუხს. ახსენით, როგორ მოახერხებს ეს წამლები ისეთი ალერგიის ეფექტურ მკურნალობას, როგორცაა თივის ციება.
3. ბულბოსპინალური პარალიზის დროს, ანტისხეულები ნერვ-კუნთოვან შეერთებებში აცეტილქოლინის რეცეპტორებს უკავშირდება, მათ ბლოკირებას ახდენს და ამ გზით ხელს უშლის კუნთის შეკუმშვას. რომელს მიეკუთვნება აღნიშნული დაავადება, იმუნოდეფიციტის, აუტოიმუნურ დაავადებას თუ ალერგიას? ახსენით.
4. ადამიანებს, ვისაც ქემოკინების გენეტიკური მუტაციის გამო არაფუნქციონირებადი რეცეპტორები აქვთ, HIV ვირუსის მიმართ იმუნიტეტი აქვთ. ახსენით ეს აღმოჩენა.

## ბიბლიური კონცეფციის შიგნით

### კონცეფცია 43.1

#### თანდაყოლილი იმუნიტეტი ინტეგრირებისგან დაცვას უზრუნველყოფს

- ▶ **გარეგანი დაცვა** ინტაქტური კანი და ლორწოვანი მემბრანა ქმნის ფიზიკურ ბარიერებს, რომლებიც ხელს უშლიან მიკროორგანიზმებისა და ვირუსების შეჭრას. ამ მემბრანებში წარმოქმნილი ლორწო, კანისა და კუჭის დაბალი pH და ლიზოციმით დაშლა იცავს ინფექციური პათოგენებისგან.
- ▶ **შიდა უჯრედული და ქიმიური დაცვა** ფაგოციტური უჯრედები ინელებენ მიკრობებს, რომლებიც აღწევენ გარეგან თანდაყოლილი იმუნიტეტის ბარიერებში და რთავენ ანთებით პასუხს. კომპლემენტარული ცილები, ინტერფერონები და სხვა ანტიმიკრობული ცილები ასევე მოქმედებენ შეჭრილი მიკრობების წინააღმდეგ. ადგილობრივი ანთების დროს, ჰისტამინი და დაზიანებული უჯრედიდან გამოყოფილი სხვა ნივთიერებები ხელს უწყობენ სისხლძარღვების ცვლილებას, რაც სითხეს, უფრო მეტ ფაგოციტსა და ანტიმიკრობულ ცილას ქსოვილში შესვლის საშუალებას აძლევს. ბუნიტური კილელები (NK) ახერხებენ ვირუსით ინფიცირებული ან სიმსივნური უჯრედების აპოპტოზის გზით განადგურებასაც.
- ▶ **უხერხემლოთა იმუნური სისტემა** მწერები თავს ხერხემლიანების თანდაყოლილი იმუნიტეტის მსგავსი მექანიზმებით იცავენ.

### კონცეფცია 43.2

#### შეძენილ იმუნიტეტში, ლიმფოციტები უზრუნველყოფენ ინტეგრირებისგან სპეციფიკურ დაცვას

- ▶ **ლიმფოციტის მიერ ანტიგენის შეცნობა** ლიმფოციტების რეცეპტორები ანტიგენის მცირე ნაწილს – ეპიტოპს უკავშირდება. B უჯრედები ცნობენ ინტაქტურ ანტიგენს. T უჯრედები ცნობენ ანტიგენების მცირე ფრაგმენტებს (პეპტიდურ ანტიგენებს), რომლებიც დაკავშირებულია უჯრედის ზედაპირულ ცილასთან — ჰისტოშეთავსების მთავარ კომპლექსთან (MHC). პირველი კლასის MHC მოლეკულები მოთავსებულია ყველა ბირთვიან უჯრედზე

და ცილოვან ანტიგენებს წარუდგენენ ციტოტოქსიკურ T უჯრედებს. მეორე კლასის MHC მოლეკულები ძირითადად დენდრიტულ უჯრედებზე, მაკროფაგებსა და B უჯრედებზე (ანტიგენის წარმდგენი უჯრედები) გვხვდება და ცილოვან ანტიგენებს T უჯრედებს წარუდგენენ.

- ▶ **ლიმფოციტების განვითარება** B ლიმფოციტები ღეროვანი უჯრედებიდან ძვლის ტვინში, ხოლო T ლიმფოციტები თიმუსში წარმოიქმნება. განვითარების ადრეულ ეტაპებზე, გენის მუდმივი შემთხვევითი გადაწყობა ქმნის ფუნქციურ გენებს, რომლებიც B ან T ლიმფოციტების ანტიგენის რეცეპტორების ჯაჭვებს აკოდირებს. ერთი ლიმფოციტის მიერ წარმოქმნილი ყველა ანტიგენის რეცეპტორი ერთი ანტიგენისთვის არის სპეციფიკური. საკუთარის წინააღმდეგ მიმართული ლიმფოციტები, რომელთა რეცეპტორებიც სხეულის ნორმალურ კომპონენტებს უკავშირდება ნადგურდება ან ინაქტივაციას განიცდის. პირველად იმუნურ პასუხში, ანტიგენის დაკავშირება მომწოდებელ ლიმფოციტთან იწვევს ლიმფოციტის გაყოფასა და დიფერენცირებას (კლონური გადარჩევა), წარმოიქმნება ხანმოკლე სიცოცხლის მქონე გააქტივებული ეფექტორული უჯრედები და ხანგრძლივად სიცოცხლისუნარიანი მეხსიერების უჯრედების კლონი. ეს მეხსიერების უჯრედები პასუხისმგებელი არიან უფრო ეფექტური მეორადი პასუხის განხორციელებაზე.

### კონცეფცია 43.3

#### პრემორული და უჯრედული იმუნიტეტი იცავს სხვადასხვა ტიპის საფრთხისგან

- ▶ **T ჰელპერები: პასუხი თითქმის ყველა ანტიგენზე** T ჰელპერები წარმოქმნიან CD4, ზედაპირულ ცილას, რომელიც ანტიგენის მაპრეზენტირებელ უჯრედზე აძლიერებენ მათ დაკავშირებას II კლასის MHC მოლეკულებისა და ანტიგენის კომპლექსთან. გააქტივებული T ჰელპერი გამოყოფს რამდენიმე განსხვავებულ ციტოკინს, რომელიც სხვა ლიმფოციტების სტიმულაციას იწვევს.
- ▶ **ციტოტოქსიკური T უჯრედები: პასუხი ინფიცირებულ და სიმსივნურ უჯრედებზე** ციტოტოქსიკური T უჯრედები წარმოქმნიან CD8, ზედაპირულ ცილას, რომელიც აძლიერებს მათ დაკავშირებას I კლასის MHC მოლეკულების ანტიგენურ კომპლექსთან ინფიცირებულ, სიმსივნურ და გადანერგილ ქსოვილებზე. აქტივირებული ციტოტოქსიკური T უჯრედები გამოყოფენ ცილებს, რომლებიც მათი სამიზნე უჯრედების განადგურებას იწვევენ.
- ▶ **B უჯრედები: პასუხი უჯრედგარე პათოგენზე** უჯრედ-

დების კლონური გადარჩევა წარმოქმნის ანტისხეულების გამოყოფა პლაზმურ უჯრედებს, რომელიც ჰუმორული იმუნიტეტის ეფექტორული უჯრედებია. ანტისხეულების ხუთ მთავარ კლასს გამოყოფენ, რომლებიც განსხვავდებიან გავრცელებისა და ფუნქციის მიხედვით. ანტისხეულების პათოგენის ზედაპირზე არსებულ ანტიგენთან დაკავშირება იწვევს მიკრობის განადგურებას ფაგოციტოზის გზით და კომპლიმენტის საშუალებით წარმართული ლიზისით.

- ▶ **აქტიური და პასიური იმუნიზაცია** აქტიური იმუნიტეტი ვითარდება ბუნებრივად ინფექციების საპასუხოდ. ის ასევე ვითარდება ხელოვნურადაც, იმუნიზაციის (ვაკცინაციის) გზით. იმუნიზაციაში მიკრობის არაპათოგენური ფორმა ან მისი ნაწილი ამჟღავნებს იმუნურ პასუხს და ავითარებს იმუნოლოგიურ მეხსიერებას აღნიშნული მიკრობის მიმართ. პასიური იმუნიტეტი, რომელიც უზრუნველყოფს მყისიერ, ხანმოკლე დაცვას, ყალიბდება ბუნებრივი გზით, როდესაც IgG კვეთს პლაცენტას და გადადის დედიდან შვილში, ან როდესაც IgA დედიდან შვილს ძუძუთი კვებისას გადაეცემა. ის შეიძლება იმუნიტეტის არმქონე ადამიანში ანტისხეულების ინექციით ხელოვნურადაც ჩამოყალიბდეს.

## კონცეფცია 43.4

### იმუნური სისტემის უნარი, განასხვავოს საკუთარი უცხოგან, ზღუდავს ქსოვილის გადანეჭვას

- ▶ **სისხლის ჯგუფები და გადასხმა** სისხლის წითელ უჯრედებზე არსებული ანტიგენები განსაზღვრავენ ადამიანს A, B, AB თუ O სისხლის ჯგუფი აქვს. გამომდინარე იქედან, რომ სისხლის უცხო ანტიგენების მიმართ ანტისხეული სისხლში იმთავითვე არსებობს, შეუთავსებელი სისხლის გადასხმის შემთხვევაში, გადასხმული უჯრედების დაშლა იწყება. რეზუს ფაქტორი არის სისხლის წითელი უჯრედების სხვა ანტიგენი და ქმნის სირთულეებს, როდესაც რეზუსუარყოფითიანი დედა რეზუსდადებითიანი ნაყოფს ატარებს.
- ▶ **ქსოვილისა და ორგანოს გადანერგვა** MHC მოლეკულები პასუხისმგებელნი არიან გადანერგილი ტრანსპლანტატის განდევნის რეაქციის სტიმულაციაზე. წარმატებული ტრანსპლანტაციის შანსები იზრდება, როდესაც დონორისა და რეციპიენტის MHC ქსოვილის ტიპები კარგად შეესაბამება ერთმანეთს და როდესაც რეციპიენტს იმუნოსუპრესორული წამლები მიეცემა. ძვლის ტვინის ტრანსპლანტში არსებულმა ლიმფოციტებმა შეიძლება გამოიწვიოს მასპინძლის საწინააღმდეგო რეაქცია.

## კონცეფცია 43.5

### გადაჭარბებული, საკუთარისკენ მიმართული

### ან შემცირებულ იმუნურ პასუხს, დაავადების გამძვავვა შეუძლია

- ▶ **ალერგიები** ლოკალიზებულ ალერგიებში, როგორიცაა თივის ციება, IgE ანტისხეულები, რომლებიც ალერგენტთან პირველადი შეხებისას წარმოიქმნება, უკავშირდება მასტოციტებს. როდესაც შემდგომში იგივე ალერგენი შეიჭრება ორგანიზმში, ის უკავშირდება მასტოციტთან ასოცირებულ IgE მოლეკულას და უჯრედის მიერ ჰისტამინისა და სხვა მედიატორების გამოყოფას განაპირობებს, რომლებიც სისხლძაღვების ცვლილებებსა და დამახასიათებელ სიმპტომებს იწვევენ.
- ▶ **აუტოიმუნური დაავადებები** იმუნური სისტემის მიერ საკუთრის მიმართ მდგრადობის დაკარგვამ შეიძლება აუტოიმუნური დაავადებები გამოიწვიოს, როგორიც არის გაფანტული სკლეროზი, რევმატიოიდიული ართრიტი და ინსულინდამოკიდებული დიაბეტი.
- ▶ **იმუნოდეფიციტური დაავადებები** თანდაყოლილი (პირველადი) იმუნოდეფიციტი მემკვიდრული დეფექტის შედეგია, რომელიც თანდაყოლილი ჰუმორული და უჯრედული იმუნიტეტის ნორმალურ ფუნქციონირებას არღვევს. შიდა არის შეძენილი (მეორადი) იმუნოდეფიციტი, რომელსაც ადამიანის იმუნოდეფიციტის ვირუსი (HIV) იწვევს. HIV ინფექციას T ჰელპერების დაზიანება მოყვება, რაც პაციენტს, ჰუმორული და უჯრედული იმუნიტეტის დეფიციტის გამო მიდრეკილს ხდის დაავადებების მიმართ.

## შეამჩმეთ საკუთარი ცოდნა

### თვითშეფასება

1. ჩამოთვლილთაგან, რომელი არ არის თანდაყოლილი, არასპეციფიკური დაცვის სიტემის ნაწილი?
  - ა. ბუნებრივი კილერები (NK);
  - ბ. ანთება;
  - გ. ნეიტროფილებით განხორციელებული ფაგოციტოზი;
  - დ. მაკროფაგებით განხორციელებული ფაგოციტოზი;
  - ე. ანტისხეულები;
2. ჩამოთვლილთაგან, რომელი არის ადგილობრივი ანთების ადრეული სტადიის დამახასიათებელი?
  - ა. არტერიოლების შევიწროვება;
  - ბ. ციება;
  - გ. ციტოტოქსიკური T უჯრედებით თავდასხმა;
  - დ. ჰისტამინის გამოყოფა;
  - ე. ანტისხეულითა და კომპლიმენტით მიკრობის დაშლა;
3. ჩამოთვლილთაგან, რომელი არ არის მწერის ინფექციისგან დაცვითი სისტემის კომპონენტი?
  - ა. ფენოლოქსიდაზას აქტივაცია, რომელიც პარაზიტის ირგვლივ დიდი მარაგების წარმოქმნას იწვევს.

- ბ. ბუნებრივი კილერების აქტივაცია;
  - გ. ჰემოციტებით ფაგოციტოზი;
  - დ. ანტიმიკრობული ცილების წარმოქმნა;
  - ე. დამცველობითი გარე ჩონჩხი;
4. ანტისხეულის რომელ ნაწილს უკავშირდება ეპიტოპი?
- ა. ანტისხეულის დაკავშირების საიტს;
  - ბ. მძიმე ჯაჭვის მხოლოდ კონსტანტურ უბნებს;
  - გ. მსუბუქი და მძიმე ჯაჭვების ვარიანტულ უბნებს;
  - დ. მხოლოდ მსუბუქი ჯაჭვების კონსტანტურ უბნებს;
  - ე. ანტისხეულის კუდს;
5. ჩამოთვლილთაგან, რომელი არ არის სიმართლე T ჰელპერებისთვის?
- ა. ისინი მოქმედებენ ჰუმორულ და უჯრედულ პასუხებში.
  - ბ. ისინი სცნობენ II კლასის MHC მოლეკულების მიერ წარდგენილ პოლისაქარიდულ ფრაგმენტებს;
  - გ. მათ აქვთ ზედაპირის CD4 მოლეკულა;
  - დ. ისინი HIV ვირუსის სამიზნეს წარმოადგენენ;
  - ე. აქტივაციისას ციტოკინებს გამოყოფენ;
6. ჩამოთვლილი მოლეკულებიდან, რომელი არის წყაროსთან შეცდომით დაწყვილებული?
- ა. ლიზოციმი-ცრემლი;
  - ბ. ინტერფერონი-ვირუსით-ინფიცირებული უჯრედები;
  - გ. ანტისხეულები- B უჯრედები;
  - დ. ქემოკინები-ციტოტოქსიკური T უჯრედები;
  - ე. ციტოკინები – ჰელპერი T უჯრედები;
7. ჩამოთვლილთაგან, რომელი აღწერს ყველაზე უკეთ გზას, რომლითაც B და ციტოტოქსიკური T უჯრედები პასუხობენ შემოჭრილ აგენტებს?
- ა. B უჯრედები ახორციელებენ აქტიურ იმუნიტეტს, ციტოტოქსიკური T უჯრედები პასიურ იმუნიტეტს;
  - ბ. B უჯრედები უშუალოდ კლავენ ვირუსებს. ციტოტოქსიკური T უჯრედები კლავენ ვირუსით ინფიცირებულ უჯრედებს.
  - გ. B უჯრედები ახორციელებენ უჯრედულ იმუნიტეტს, ციტოტოქსიკური T უჯრედები კი ჰუმორულ იმუნიტეტს;
  - დ. B უჯრედები პასუხობენ პირველად შემოჭრილ აგენტს, ციტოტოქსიკური T უჯრედები მომდევნო ჯერებზე აქტივდებიან;
8. ჩამოთვლილთაგან, რომელი განაპირობებს აქტიურ იმუნიტეტს?
- ა. დედისეული ანტისხეულების გადასვლა განვითარებად ჩანასახში;
  - ბ. ანთებითი პასუხი ქინძისთავის შესობაზე;
  - გ. ცოფისადმი იმუნიტეტის მქონე ადამიანებიდან მიღებული შრატის შეყვანა;
  - დ. ჩუტყვავილას ვაქცინის შეყვანა;
  - ე. დედისეული ანტისხეულების გადასვლა ახალდადაბულ ბავშვში.
9. რეზუსუარყოფითი დედის რეზუსდადებითიანი ბავშვის დაბადების შემდგომ დედას უკეთებენ რეზუს ფაქტორის მიმართ სპეციფიკურ ანტისხეულებს. ამ მიდგომის მიზანი არის:

ვის დაბადების შემდგომ დედას უკეთებენ რეზუს ფაქტორის მიმართ სპეციფიკურ ანტისხეულებს. ამ მიდგომის მიზანი არის:

- ა. დედის დაცვა ბავშვის სისხლის წითელი უჯრედების დედის ორგანიზმში რეზუს ფაქტორის მიმართ მეხსიერების B უჯრედების წარმოქმნისთვის ხელის შეშლა;
- ბ. მომავალი რეზუსდადებითი ბავშვების დაცვა;
- გ. რეზუს ანტიგენის მიმართ იმუნური პასუხის გამოწვევა;
- დ. ბ და გ ორივე სწორია;

10. HIV სამიზნეები მოიცავს ქვემოთ ჩამოთვლილთაგან ყველას გარდა;
- ა. მაკროფაგებისა;
  - ბ. ციტოტოქსიკური T უჯრედებისა;
  - გ. ჰელპერი T უჯრედებისა;
  - დ. CD4 და ფუზინის შემცველი უჯრედებისა;
  - ე. ტვინის უჯრედებისა;

## უჯრედული კავშირი

უხერხემლოთა წარმატების ერთი მიზეზი, რომლებიც დედამიწაზე მოხინაძრე სახეობების 90%-ს შეადგენენ, არის მათი ეფექტური დაცვა მიკრობების წინააღმდეგ. აღწერეთ ერთი მექანიზმი, რომლითაც უხერხემლოები თავდასხმელებს უმკლავდებიან და განიხილეთ, როგორ შეესაბამება ეს მექანიზმი ხეხემლიანებში არსებული იმუნური სისტემის ევოლუციურ ადაპტაციას.

## მცენიჭი კლუჯა

ინტერფერონ-γ-ს ერთი ეფექტი არის I კლასის MHC მოლეკულების რაოდენობის გაზრდა უჯრედის ზედაპირზე. წარმოვიდგინოთ, რომ თქვენ გსურთ მისი ეფექტურობის გამოკვლევა ვირუსული ინფექციებისა და სიმსივნეების სამკურნალოდ. ინტერფერონ-γ-ს რა ეფექტებს იწინასწარმეტყველებდით ლაბორატორული ცხოველების იმუნურ პასუხზე ა. ვირუსით ინფიცირებულ და ბ. სიმსივნური უჯრედებისთვის.

## მცენიჭი, ფუნდამენტური და საზოგადოებრივი

ინექცირებადი ინაქტივირებული (მოკლული) ვაქცინა და ორალურად მისაღები დასუსტებული (ცოცხალი) ვაქცინა პოლიოვირუსის საწინააღმდეგოდ იმუნიზაციისთვის გამოიყენება, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს თავისა და ზურგის

ტვინში ნერვული უჯრედების დაზიანების გზით პარალიზი? ორალური ვაქცინა აღარ არის რეკომენდებული დასავლეთის ქვეყნებში, სადაც პოლიომიელიტი აღმოფხვრილია, რამდენადაც ამ ვაქცინაში ცოცხალმა ვირუსმა შეიძლება მუტაცია განიცადოს უფრო ვირულენტურ ფორმად და ხელახლა გავრცელდეს მოსახლეობაში. მაგრამ ორალური ვაქცინის გამოყენება გრძელდება იმ ქვეყნებში, სადაც პოლიომიელიტი არსებობს, რადგანაც მისი შეყვანა უფრო ადვილი (ნემსი არ არის

საჭირო) და მაღალეფექტურია. უფრო მეტიც, დასუსტებული ვირუსი შეიძლება გავრცელდეს (და იმუნიზაცია გამოიწვიოს) არავაქცინირებულ ადამიანებზე. ალბათ ხვდებით რომ მუტაციის რისკი (დაახლოებით 1 12 მილიონში) მისაღებია თუკი ორალური ვაქცინაციის სარგებელს შევადარებთ. როგორ ფიქრობთ, რა გადანეგეტილება უნდა იქნას მიღებული აღნიშნულ საკითხთან დაკავშირებით?

# 44

## ოსმორეგულაცია და გამოყოფა



▲ სურათი 44.1 ფრინველები, სალვინის ალბატროსები (*Diomedea cauta salvini*), ზღვის წყალს უარყოფითი ეფექტის გარეშე სვამენ.

### ბიბლიოთეკის კონცეფციები

- 44.1** ოსმორეგულაციით წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების შეთვისებისა და გამოყოფის დაბალანსება ხორციელდება.
- 44.2** ცხოველის აზოტოვანი ნარჩენები მათ ფილოგენეზსა და საარსებო გარემოს ასახავს.
- 44.3** სხვადასხვა გამომყოფი სისტემები მილაკოვანი სტრუქტურის ვარიაციებია.
- 44.4** ნეფრონი და მასთან დაკავშირებული სისხლძარღვები ძუძუმწოვართა თირკმლის ერთეულს წარმოადგენს.
- 44.5** ძუძუმწოვართა თირკმლის უნარი, ორგანიზმში წყალი შეაკავოს, ხმელეთზე მოხინაღრე ცხოველების ერთერთი მთავარი ადაპტაციაა.
- 44.6** სხვადასხვა საარსებო გარემოში ხერხემლიანთა თირკმლის განსხვავებული ადაპტაციები განვითარდა.

### შესავალი

#### წინასწორება

ცხოველის ფიზიოლოგიური სისტემები, დანეშებული უჯრედებიდან და ქსოვილებიდან, დამთავრებული ორგანოებითა და ორგანოთა სისტემებით, თხევად გარემოში ფუნქციონირებენ. ასეთი სისტემების ფუნქციონირებისთვის, გარემო, კერძოდ კი წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციები, ვინაო ფარგლებში უნდა იქნეს შენარჩუნებული. ხშირად, ამის გამო, ცხოველებს გარეგანი გარემოსთან გამკლავება ესაჭიროება. მაგალითად, მტკნარი წყლის ცხოველები, რომელთა საარსებო გარემო სხეულის სითხეების განზავების საფრთხეს ქმნის, ისეთ ადაპტაციებს ავლენენ, რომელიც წყლის შეთვისებას ამცირებს, ხსნარებს ინარჩუნებს და გარემოში არსებულ მარილებს ითვისებს.

მეორე უკიდურესობაში, უდაბნოსა და ზღვის ცხოველების შემთხვევაში, არსებობს გამოშრობის და წყლის სწრაფად დაკარგვის საფრთხე (სურათი 44.1). ასეთ გარემოში წარმატება წყლის შენარჩუნებასა და ზედმეტი მარილების გამოყოფაზეა დამოკიდებული.

იმავედროულად, მეტაბოლიზმი მოითხოვს მავნე პროდუქტებისგან ორგანიზმის გათავისუფლებას. ცილებისა და ნუკლეინის მჟავების დაშლა განსაკუთრებულად პრობლემურია, რამდენადაც ამ დროს წარმოქმნილი პირველადი მეტაბოლური ნარჩენები შეიძლება ძლიერ ტოქსიკური იყოს. მაგალითად, ტოქსიკურია ამონიუმი. კვლევები, რომელიც ეძღვნება იმას, როგორ უმკლადებიან ცხოველები აღნიშნულ ფიზიოლოგიურ გამოწვევებს, ჰომეოსტაზის ყველაზე ცნობილ მაგალითებს გვაძლევს. აღნიშნულ თავში ფოკუსი კეთდება ორ მთავარ ჰომეოსტაზურ პროცესზე: **ოსმორეგულაციაზე**, რომელიც გულისხმობს, როგორ ახერხებენ ცხოველები ხსნარის კონცენტრაციის შენარჩუნებას, წყლის შეთვისებისა და დაკარგვის ბალანსის დაცვას, და **გამოყოფაზე**, რაც იმას გულისხმობს, როგორ ახერხებენ ცხოველები აზოტის შემცველი მეტაბოლიზმის მავნე პროდუქტებისგან გათავისუფლებას.

### კონცეფცია 44.1

#### ოსმორეგულაციით წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების შეთვისებისა და გამოყოფის დაბალანსება ხორციელდება

ოსმორეგულაციით წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების შეთვისებისა და გამოყოფის დაბალანსება ხორციელდება თერმორეგულაციის მსგავსად, რომელიც სითბოს წარმოქმნისა და დაკარგვის დაბალანსებას გულისხმობს (იხილეთ თავი 40), ცხოველს აქვს უნარი არეგულიროს მისი სხეულის ქიმიური შემადგენლობა და მოანესრიგოს წყლისა და გახსნილი ნივთიერებების შეთვისება და გაცემა. ოსმორეგულაცია ეფუძნება ხსნარების კონტროლირებულ მოძრაობას შინაგან სითხეებსა და გარეგან გარემოს შორის. ეს პროცესი წყლის

მოძრაობასაც არეგულირებს, რომელიც ხსნარებში ოსმოსით გადაადგილდება. ცხოველს ასევე სჭირდება მეტაბოლიზმის მავნე პროდუქტებიდან გათავისუფლება, მანამ, სანამ ისინი დამაზიანებელ დონეს მიაღწევენ.

## ოსმოსი

ყველა ცხოველი, მათი ფილოგენეზის, საბინადრო გარემოს ან მავნე გამოყოფილი პროდუქტების ტიპის მიუხედავად, ოსმორეგულაციის პრობლემას აწყდება: დროთა განმავლობაში, წყლის შეთვისებისა და კარგვის ბალანსი უნდა მოწესრიგდეს. თუ ადგილი აქვს წყლის გახანგრძლივებულ შეთვისებას, უჯრედის კედლის არარსებობის გამო, ცხოველური უჯრედები იბერება და სკდება, ხოლო წყლის მნიშვნელოვანი რაოდენობით დაკარგვის შემთხვევაში კი იჭმუხნება და კვდება.

წყალი უჯრედებში ოსმოსის საშუალებით შედის და გამოდის. გაიხსენეთ მე-7 თავი, რომ ოსმოსი არის დიფუზიის განსაკუთრებული სახე, რომელიც წყლის ნახევრადგანვლად მემბრანაში გადაადგილებას წარმოადგენს. ის ვლინდება, როდესაც ოსმოსური წნევით ან **ოსმოლარობით** (ხსნარის მთლიანი კონცენტრაცია, რომელიც მოლარობით ან ხსნარის ერთ ლიტრზე გახსნილი ნივთიერების მოლებით არის გამოხატული; იხილეთ მე-3 თავი) ორი განსხვავებული ხსნარი ნახევრადგანვლადი მემბრანითაა გაყოფილი.

ამ თავში ოსმოლარობის გასაზომად გამოყენებულია ერთეული მილიოსმოლი ერთ ლიტრზე მოსმ/ლ. 1 მოსმ/ლ ტოლია ხსნარის 10-3 კონცენტრაციის. ადამიანის სისხლის ოსმოლარულობა დაახლოებით 300 მოსმ/ლ-ა, ზღვის წყლის ოსმოლარობა კი დაახლოებით 1000 მოსმ/ლ. ორ ხსნარს, რომლებიც შერჩევითად განვლადი მემბრანითაა გამოყოფილი და ერთნაირი ოსმოლარობა აქვს, იზოოსმოსურ ხსნარებს უწოდებენ. იზოოსმოსურ ხსნარებს შორის არ ხდება წყლის ჯაჭვური მოძრაობა. თუმცა, წყლის მოლეკულები მუდმივად კვეთენ მემბრანას, ეს გადაკვეთა ორივე მიმართულებით ერთნაირი სიჩქარით ხდება. როდესაც ორი ხსნარი ოსმოლარობით განსხვავდება, მას, რომელსაც გახსნილი ნივთიერების მაღალი კონცენტრაცია აქვს, *ჰიპეროსმოსურს* უწოდებენ, უფრო განზავებულს კი — *ჰიპოოსმოსურს*. წყალი ოსმოსის გზით *ჰიპოოსმოსური* ხსნარებიდან *ჰიპეროსმოსურის*კენ გადადის დიფუზიის გზით.

## ოსმოსის გზით შინაგანი გატარების შინაარსის სითბურის

წყლის შეთვისებასა და დაკარგვას შორის ბალანსის შესანარჩუნებლად ორი მთავარი მარეგულირებელი მექანიზმი არსებობს. ერთი მხოლოდ ზღვის ცხოველებისთვის არის დამახასიათებელი და წარმოადგენს იმას, რომ ისინი გარემოსთან იზოოსმოსური არიან. ის ცხოველები, რომლებიც ოსმოლარობას აქტიური მექანიზმებით არ აწესრიგებენ, **ოსმოკონფორმერების** სახელით არიან ცნობილი. ოსმოკონფორმერების ოსმოლარობა ისეთივეა, როგორიც მათი საარსებო გარემოსი, ამიტომ არ არსებობს წყლის შეთვისებისა თუ კარგვის ტენდენცია. ოსმოკონფორმერები ხშირად ისეთ წყლებში ბინად-

რობენ, რომლებსაც ძალიან სტაბილური შემადგენლობა აქვთ და აქედან გამომდინარე, მდგრადი შინაგანი ოსმოლარობით ხასიათდებიან. ამისგან განსხვავებით, **ოსმორეგულატორები** ის ცხოველები არიან, რომელთა სხეულის სითხეები გარემოს იზოოსმოსური არ არის. ისინი შინაგან ოსმოლარობას აკონტროლებენ. ოსმორეგულატორები წყალს გარეთ გამოყოფენ, თუკი მათ ჰიპოოსმოსურ გარემოში უწევთ ყოფნა ან პირიქით, შეითვისებენ, როდესაც ჰიპეროსმოსურ გარემოში ხვდებიან. ოსმორეგულაცია ცხოველებს აძლევს საშუალებას, ისეთ გარემოში იარსებონ, სადაც ოსმოკონფორმერები არ არიან, ამის მაგალითია მტკნარი წყლისა და ხმელეთის ცხოველები. ოსმორეგულაცია ასევე ზღვის ბევრ ცხოველს საშუალებას აძლევს, შეინარჩუნოს ზღვის წყლისგან განსხვავებული შინაგანი ოსმოლარობა.

როდესაც ცხოველები გარემოსა და სხეულს შორის განსხვავებულ ოსმოლარობას ინარჩუნებენ, ოსმორეგულაცია ენერგიის ხარჯვასთან არის დაკავშირებული. რამდენადაც დიფუზია სისტემაში კონცენტრაციის გათანაბრებისკენ არის მიმართული, ოსმორეგულაციას, ოსმოსური გრადიენტის შესანარჩუნებლად ენერგიის ხარჯვა უწევს. ეს კი წყალს აძლევს საშუალებას, იმოძრაოს როგორც შიგნით, ისე გარეთ. ცხოველები ამას აქტიური ტრანსპორტის გამოყენებით აკეთებენ.

ენერგიის დანახარჯი იმაზეა დამოკიდებული, რამდენად განსხვავდება სხეულის ოსმოლარობა გარემოსგან, რამდენად ადვილად ახერხებს წყალი და მასში გახსნილი ნაერთები ცხოველის ზედაპირის გავლით მოძრაობას და რამდენი მუშაობაა საჭირო მემბრანის გავლით ხსნარების გადასატანად. სხეულის სითხეებს (240-450 მოსმ/ლ), მტკნარ წყალს (0.5-15 მოსმ/ლ) და ზღვის წყალს (დაახლოებით 1,000 მოსმ/ლ) შორის კონცენტრაციული სხვაობის გამო ძვლოვანი თევზების ოსმორეგულაცია მოსვენების მეტაბოლური პროცესების დაახლოებით 5% მოითხოვს. კიბოსნაირის (რომელიც ჩრილოეთ ამერიკაში მდებარე იუტას დიდ მარილიან ტბასა და სხვა მარილიან ტბებში ბინადრობს), შინაგანი და გარეგანი ოსმოლარობის გრადიენტი ძალიან დიდია და შესაბამისად ოსმორეგულაციის ხარჯიც ძალიან მაღალია. კერძოდ იგი მოსვენების მეტაბოლიზმის 30% შეადგენს. ამისგან განსხვავებით, ზღვის ოსმოკონფორმერები, რომლებიც ზღვის წყლის იზოოსმოსურები არიან, ოსმორეგულაციაზე მცირე ენერგიას ხარჯავენ.

ცხოველთა უმეტესობა (მიუხედავად იმისა, ოსმოკონფორმერები, თუ ოსმორეგულატორები არიან) რომლებიც ვერ უძლებენ გარემოს ოსმოლარობის მნიშვნელოვან შეცვლას, **სტენოჰალინებად** (ბერძნულიდან სტენოს - ვიწრო, ჰალინე — მარილი) იწოდება, ხოლო **ეურიჰალინური** (ბერძნულიდან ეუროს — ფართო) ცხოველები (რომლებიც როგორც ოსმოკონფორმერებს, ისე ოსმორეგულატორებს მოიცავენ), გარეგანი ოსმოლარულობის დიდი ფლუქტუაციის ამტანები არიან. ოსმორეგულატორი ეურიჰალინების მაგალითია ორაგულის სხვადასხვა სახეობა. უფრო უკეთესი მაგალითია თევზი, რომელსაც ტილაპიას უწოდებენ (ფართოდ გავრცელებულია აფრიკაში; მათ ამრავლებენ თევზების ფერმაებში და იყენებენ საჭმელად). ამ თევზს მარილის ნებისმიერ კონცენტრაციასთან შეგუება შეუძლია, დანყებული მტკნარი წყლიდან დამ-



▲ **სურათი 44.2** დიდპირა ტილაპია (*Tilapia mossambica*) უკიდურესად ევრიპალინური (სხვადასხვა მარილიანობის ამტანი) ოსმორეგულატორია.

თავრებული ჰიპეროსმური ხსნარით რომლის ოსმოლარობა ორჯერ უფრო მეტია, ვიდრე ზღვის წყლის (**სურათი 44.2**). ქვემოთ, ჩვენ დანვრილებით მიმოვიხილავთ ოსმორეგულაციის გამაუმჯობესებელ რამდენიმე ადაპტაციას, რომელიც ზღვის, მტკნარი წყლისა და ხმელეთის ცხოველებში განვითარდა.

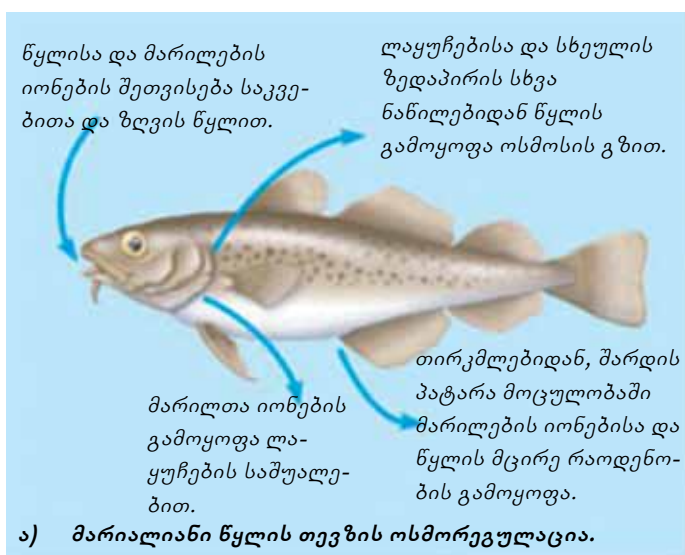
## ზღვის ცხოველები

ცხოველები თავდაპირველად ზღვაში განვითარდნენ და ნებისმიერ სხვა საარსებო გარემოსთან შედარებით იქ ცხოველთა ყველაზე მეტი ჯგუფია აღმოჩენილი. ზღვის უხერხემლოთა უმეტესობა ოსმოკონფორმერია. მათი მთლიანი ოსმოლარობა (ყველა გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაციის ჯამი) ზღვის წყლის მსგავსია, მაგრამ ისინი ზღვის წყლისგან მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან განსაზღვრული გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციით. ასე რომ, ის ცხოველიც კი,

რომელიც ოსმოლარობით გარემოს იდენტურია, არეგულირებს მისი შინაგანი ხსნარების შემადგენლობას.

ზღვის ხერხემლიანები და ზოგი ზღვის უხერხემლო ოსმორეგულატორებს მიეკუთვნება. ამ ცხოველთა უმეტესობისთვის, ოკეანე ძლიერად მადეჰიდრირებელი გარემოა, რამდენადაც ის გაცილებით უფრო მარილიანია ვიდრე შინაგანი სითხეები და წყალიც ოსმოსის გზით მათი სხეულიდან გარეთ გამოდის. ბევრი ძვლოვანი თევზი, როგორც არის ვირთევზა (ქორჭილასნაირი თევზების წარმომადგენელი), ჰიპოოსმოსურია ზღვის წყალთან შედარებით და ამის გამო, მუდმივად კარგავს წყალს ოსმოსის გზით და იღებს მარილებს დიფუზიისა და კვების გზით (**სურათი 44.3 ა**). თევზები წყლის კარგვას ზღვის წყლის დიდი რაოდენობით შეთვისებით ინაზღაურებენ. მათი ლაყუჩები და კანი ნატრიუმის ქლორიდს გამოყოფენ. ზღვის თევზების თირკმელები ზედმეტ კალციუმს, მაგნიუმსა და სულფატებს წყლის ძალიან მცირე რაოდენობასთან ერთად, გარეთ გამოყოფენ.

ზღვის ზვიგენებისა და ხრტილოვანი თევზების (იხ. თავი 34) უმეტესობა განსხვავებულ ოსმორეგულაციურ “სტრატეგიას” იყენებენ. ძვლოვანი თევზების მსგავსად, მათი შინაგანი მარილის კონცენტრაცია გაცილებით უფრო ნაკლებია, ვიდრე ზღვის წყლისა. ამის გამო, მარილი ცდილობს წყლიდან სხეულში გადასვლას, განსაკუთრებით ლაყუჩების გავლით. ზვიგენების თირკმელები ამ მარილების ნაწილს გარეთ გამოყოფს, ნარჩენი კი ან ფეკალური მასით გამოიყოფა, ან სფეციფიკური ორგანოს საშუალებით, რომელსაც რექტალურ ჯირკვალს უწოდებენ. ძვლოვანი თევზებისგან განსხვავებით, მარილის შედარებით დაბალი კონცენტრაციის მიუხედავად, ზღვის ზვიგენები დიდი რაოდენობით წყალს არ კარგავენ. ამის ახსნა არის ის, რომ ზვიგენები ინარჩუნებენ შარდში აზოტოვანი ნაერთების (ბევრი ცხოველის ცილებისა და ნუკლეინის მჟავების მეტაბოლიზმის პროდუქტები, იხ. თავი 44.8) მაღალ კონცენტრაციას. გახსნილი ორგანული ნივთიერება ტრიმეთილამინოქსიდი (TMAO) ცილებს შარდოვანათი და-



▲ **სურათი 44.3** ზღვისა და მტკნარი წყლის ძვლოვანი თევზების ოსმორეგულაცია: შედარება.

ზიანებისგან იცავს (თუ თქვენ როდესმე მოგიმზადებიათ ზვიგენის ხორცი, გეცოდინებათ, რომ ის შარდოვანას მოსაცილებლად მტკნარ წყალში უნდა ჩაილბოს). ზვიგენის სხეულის სითხეების (მარილები, შარდოვანა, TMAO და სხვა ნაერთები) მთლიანი კონცენტრაცია 1,000 მოსმ/ლ-ზე მეტია და აქედან გამომდინარე, ზღვის წყალთან შედარებით ცოტა უფრო ჰიპეროსმოსურია. შედეგად, წყალი ოსმოსის გზით და საკვებით (ზვიგენები არ სვამენ) ნელა შედის ზვიგენის სხეულში და წყლის ეს მცირე რაოდენობა თირკმლებში წარმოქმნილი შარდის საშუალებით გარეთ გამოიყოფა.

## მტკნარი წყლის ცხოველები

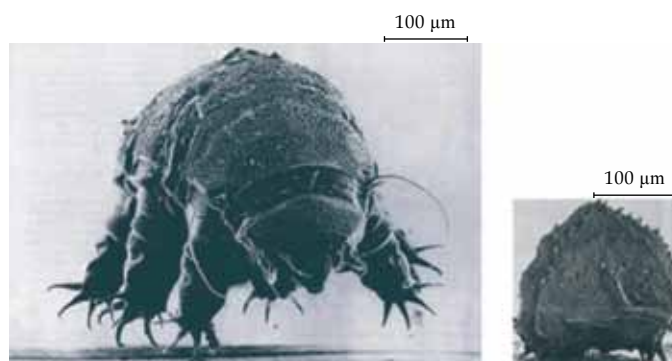
მტკნარი წყლის ცხოველების ოსმორეგულატორული პრობლემები საპირისპიროა, ზღვის ცხოველებთან შედარებით. მტკნარი წყლის ცხოველები მათი შინაგანი სითხეების ოსმოლარობის გამო (რომელიც გარემოსთან შედარებით გაცილებით უფრო მაღალია), მუდმივად იღებენ წყალს ოსმოსის გზით და კარგავენ მარილების დიფუზიით. მტკნარი წყლის ცხოველების უმეტესობის ორგანიზმის სითხეებს გახსნილი ნივთიერებების უფრო დაბალი კონცენტრაცია აქვთ, ვიდრე ზღვის წყალში მოზინადრე მათ ნათესავენ, რაც დაბალმარილიან მტკნარ წყალში არსებობის წინაპირობაა. მაგალითად, თუ ზღვის მოლუსკებს 1,000 მოსმ/ლ კონცენტრაცია აქვთ, ზოგ მტკნარი წყლის მოლუსკს დაახლოებით 40 მოსმ/ლ აქვს. გარემოსა და სხეულის სითხეებს შორის შემცირებული ოსმოლარული სხვაობა ამცირებს იმ ენერგიას, რომელსაც ცხოველები ოსმორეგულაციისთვის ხარჯავენ.

ბევრი მტკნარი წყლის ცხოველი, მათ შორის თევზი, ქორჭილა, წყლის ბალანსს ძალიან განზავებული შარდის გამოყოფის ხარჯზე ინარჩუნებს. დიფუზიითა და შარდით დაკარგული მარილები საკვებითა და ლაყუჩების საშუალებით მათი შენთვის ხარჯზე ანაზღაურდება. ლაყუჩების ქლორის უჯრედები (როგორც ეს ქვემოთ არის აღწერილი; იხილეთ [სურათი 44.3 ბ](#)) აქტიურად ატარებენ ქლორისა და ნატრიუმის იონებს.

ორაგული და სხვა ევრიპალინური თევზები, რომლებიც ზღვის წყალსა და მტკნარ წყალში მიგრირებენ, ოსმორეგულაციის სტატუსის დრამატულ ცვლილებებს განიცდიან. მაშინ, როდესაც ოკეანეში ორაგულის ოსმორეგულაცია სხვა ზღვის თევზების მსგავსად, ზღვის წყლის სმითა და ჭარბი მარილების ლაყუჩების საშუალებით გამოყოფით მიმდინარეობს, მას შემდეგ, რაც ის მტკნარ წყალში მიგრირებს, ორაგული წვეტს წყლის დაღევას და დიდი რაოდენობით განზავებული შარდის წარმოქმნას იწყებს, მისი ლაყუჩები, მსგავსად იმ თევზებისა, რომლებიც მთელ თავის ცხოვრებას მტკნარ წყლებში ატარებენ — განზავებული გარემოდან მარილების შეთვისებას იწყებენ.

## დროებით წყლებში მცხოვრები ცხოველები

დეჰიდრატაცია ცხოველთა უმეტესობისთვის სასიკვდილოა, მაგრამ ზოგი წყლის უხერხემლო, რომელიც დროებით გუბებში ცხოვრობს, საცხოვრებელის ამოშრობისას თითქმის მთლიანად კარგავს წყალს და ძილის მდგომარეობაში გადადის. ეს მნიშვნელოვანი ადაპტაცია ანჰიდრობიოზის („წყლის გარეშე სიცოცხლის“) სახელით არის



ა) ჰიდრატირებული ტარგიდრადა (*Tardigrade*).

ბ) დეჰიდრატირებული ტარგიდრადა

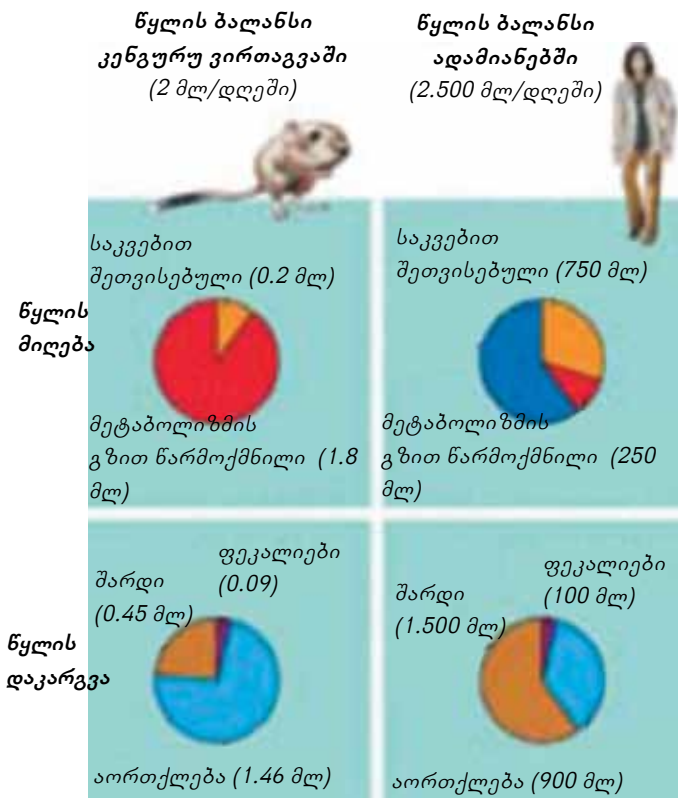
▲ [სურათი 44.4](#) ანჰიდრობიოზი. წყლის დათვები — (*Tardigrade*) ნიადაგსა და ნესტიანი მცენარეების დროებით გუბურებსა და წვეთებში ბინადრობენ (*SEM*).

ცნობილი. ყველაზე გასაოცარ მაგალითებს შორის არის ნელა მოძრავი წყლის დათვები (*Tardigrada*), უმცირესი ზომის უხერხემლოები, რომელთა სიგრძე 1 მმ-ზე ნაკლებია ([სურათი 44.4](#)). აქტიურ ჰიდრირებულ მდგომარეობაში ([იხ. სურათი 44.4 ა](#)) ეს ცხოველები დაახლოებით 85% წყალს შეიცავენ, მაგრამ მათ შეუძლიათ წყლის 2%-მდე დეჰიდრატაცია და არააქტიურ ფორმაში გადასვლა ([იხ. სურათი 44.4 ბ](#)); ისინი გამომშრალ მდგომარეობაში ათწლეულების განმავლობაში (და ეგებ მეტიც) შეიძლება გადარჩნენ, ხოლო წყლის დამატებისას, რამდენიმე წუთში რეჰიდრირდებიან და მოძრაობასა და კვებას იწყებენ.

ანჰიდრობიოტურ ცხოველებს უნდა ჰქონდეთ ადაპტაციები, რომლებიც მათ უჯრედულ მემბრანებს ინტაქტურს შეინახავს. მკვლევრები იწყებენ იმის შესწავლას, როგორ ახერხებენ ზღვის დათვები გამოშრობის გადატანას. ანჰიდრობიოტური მრგვალი ჭიების (ნემატოდების) კვლევებმა აჩვენა, რომ დეჰიდრირებული ცხოველები შაქრების დიდ რაოდენობას შეიცავენ. კერძოდ, დისაქარიდებს, რომლებსაც ტრეჰალოზები ეწოდებათ. დისაქარიდები უჯრედებს იცავენ ვინაიდან ჩაენაცვლებიან წყალს რომელიც მემბრანასა და ცილებთან არის დაკავშირებული. ბევრი მწერი, რომელიც ზამთარში გაყინვას უძლებს, მემბრანის დაცვის მიზნით ასევე ტრეჰალოზებს იყენებს.

## ხმელეთის ცხოველები

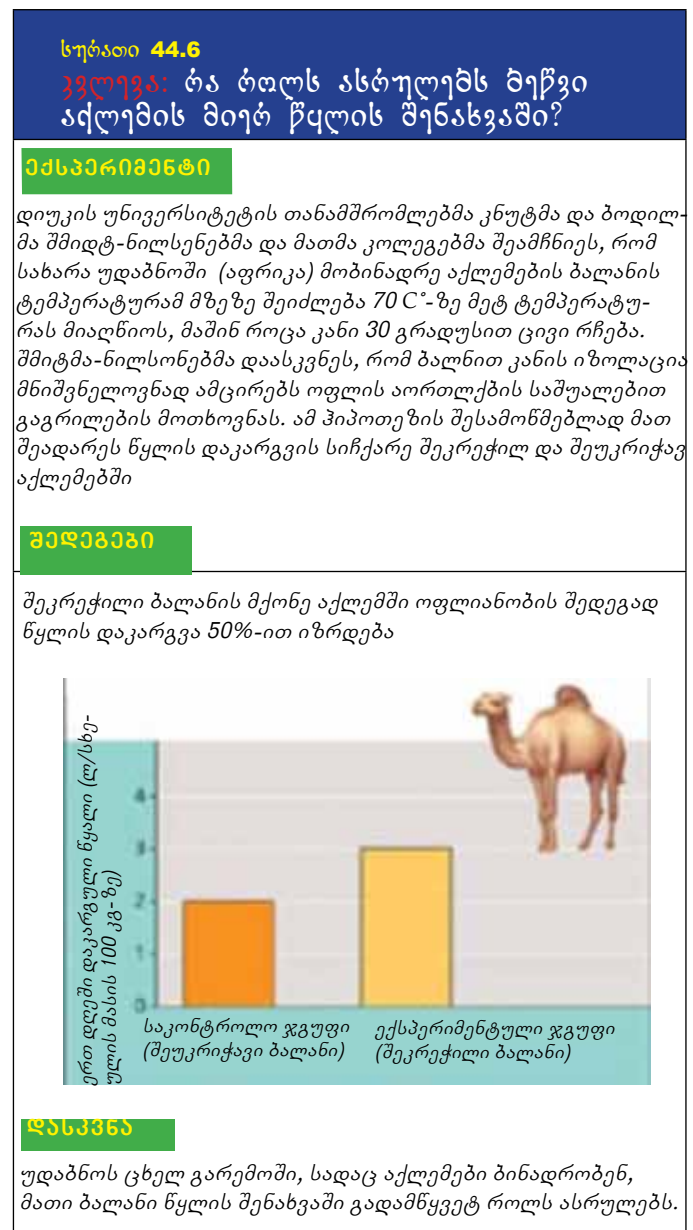
გამოშრობის საფრთხე ხმელეთის ცხოველებისა და მცენარეებისთვის მთავარი პრობლემაა. ადამიანები ილუპებიან, თუკი ისინი სხეულის სითხის 12% კარგავენ. ძუძუმწოვრები, რომლებიც მშრალ გარემოში განვითარდნენ (მაგალითად, აქლემი) უძლებენ დეჰიდრატაციის ორმაგ დონეს. ის ადაპტაციები, რომლებიც წყლის დაკარგვას ამცირებს, ხმელეთზე ცხოვრებისა და გადარჩენის მთავარ ფაქტორებს წარმოადგენენ. მსგავსად ხმელეთის მცენარეების ცვილოვანი კუტიკულისა, რომელიც მათ წარმატებას უზრუნველყოფს, ხმელეთზე მოზინადრე ცხოველების სხეულის საფარველიც იცავს მათ დეჰიდრირებისგან. ამის მაგალითებს წარმოადგენს



▲ სურათი 44.5 წყლის ბალანსი ხმელეთის ორ ძუძუმწოვარში. კენგურუ ვირთაგვები, რომლებიც ამერიკის სამხრეთ დასავლეთით ბინადრობენ, ძირითადად მშრალი თესლით იკვებებიან და წყალს არ სვამენ. კენგურუ ვირთაგვა წყალს აირთა მიმოცვლის დროს აორთქლების გზით კარგავს და ძირითადად მეტაბოლიზმის შედეგად წარმოქმნილ აკომპენსირებს. ამისგან განსხვავებით, ადამიანი წყლის უმეტეს ნაწილს შარდით გამოყოფს და საკვებითა და სასმელით იღებს.

მწერების გარეგანი ჩონჩხის ცვილოვანი შრეები, ხმელეთის ლოკოკინების ნიჟარები და ხმელეთის ცხოველების სხეულის საფარველის — კანის მკვდარი კერატინიზებული უჯრედები. ხმელეთის ბევრი ცხოველს, განსაკუთრებით უდაბნოს მობინადრეებს, ღამის ცხოვრების ნირი ახასიათებთ. ეს ღამის ჰაერის შედარებით დაბალი ტემპერატურისა და შედარებით მაღალი ტენიანობის გამო, წყლის აორთქლებით დაკარგვას ამცირებს.

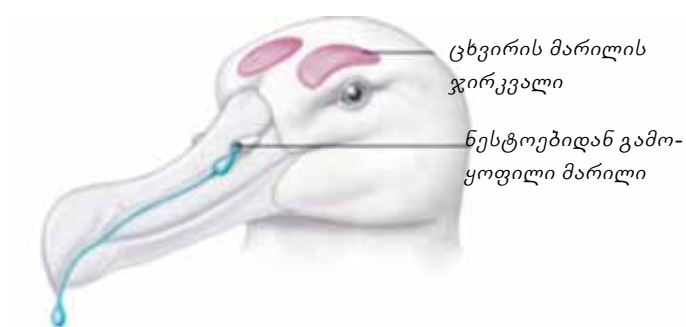
ამ ადაპტაციების მიუხედავად, ხმელეთის ცხოველთა უმეტესობა, აირთა ცვლის ტენიანი ზედაპირებით, შარდით, ფეკალური მასებითა და კანით, მნიშვნელოვანი რაოდენობის წყალს კარგავს. ხმელეთის ცხოველები მათი წყლის ბიუჯეტს ტენიანი საკვების მიღებით, წყლის დაღვითა და მეტაბოლური წყლის (უჯრედული სუნთქვისას წარმოქმნილი წყალი) გამოყენებით აბალანსებენ. ზოგი ცხოველი, როგორებიც არიან მწერის მჭამელი უდაბნოს ფრინველები და ქვეწარმავლები, ისე კარგად არიან შეგუებულნი წყლის დაკარგვის მინიმალ-იზაციასთან, რომ ისინი უდაბნოებში წყლის დაღვის გარეშე დიდხნას ძლებენ. კენგურუსებრი ვირთაგვები იმდენად მცირე რაოდენობით კარგავენ წყალს, რომ დანაკარგის 90% მეტაბოლური წყლით შეუძლიათ აინაზღაურონ (სურათი 44.5) და დარჩენილი 10% მათ საკვებ რაციონში შემავალი მარცვლებით შეივსება. უდაბნოსთან ცხოველთა შეგუების კვლევებში,



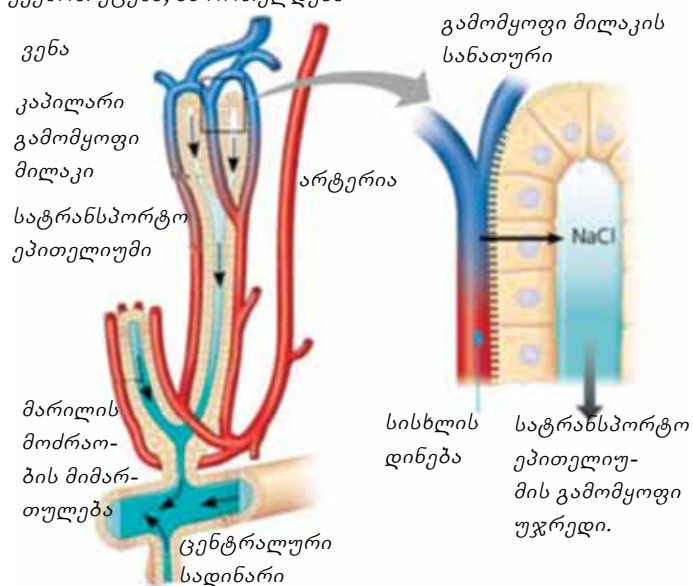
ფიზიოლოგებმა აღმოაჩინეს, რომ წყლის შენარჩუნების უმეტესი ნაწილი ისეთ მარტივ ანატომიურ თავისებურებებთან არის დაკავშირებული, როგორიც არის მაგალითად აქლემის კუბი (სურათი 44.6).

## საცრანსპორტო უპირობები

ოსმორეგულაციის საბოლოო ფუნქცია უჯრედული ციტოპლაზმის შემადგენლობის შენარჩუნებაა, მაგრამ ცხოველთა უმეტესობა ამას არაპირდაპირი გზით აკეთებს, არეგულირებს უჯრედგარე სივრცეში სითხის შემადგენლობას. მწერებსა და სხვა ცხოველებში, რომლებსაც მიმოქცევის ღია სისტემები აქვთ, ეს სითხე ჰემოლიმფაა (იხილეთ თავი 42). ხერხემლიანებში და სხვა ცხოველებში, რომლებსაც დახურული



(ა) ალბატროსის მარილის ჯირკვალის სადინარის გავლით ნესტოში იხსნება, მარილიანი ხსნარი ან ნისკარტის წვერიდან ქვემოთ ეცემა, ან ორთქლდება



(ბ) მარილის გამომყოფი ჯირკვლის ათასი მილაკიდან ერთ-ერთი, ყველა მილაკს ირგვლივ სატრანსპორტო ეპითელიუმი აქვს. ის შემორტყმულია კაპილარებით და ჩაედინება ცენტრალურ არხში.

(გ) სეკრეტორულ უჯრედებს აქტიური ტრანსპორტის გზით მარილები სისხლიდან მილაკებში გადააქვთ. სისხლი მარილის სეკრეციის საწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრაობს. მილაკში მარილის კონცენტრაციის გრადიენტის შენარჩუნებით, ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების სისტემა ზრდის მარილის გადატანას სისხლიდან მილაკის სანათურში.

▲ **სურათი 44.7 ფრინველების მარილის გამომყოფი ჯირკვლები.** ნისკარტის მარილის ჯირკვალი, ნესტოები გამოყოფილი მარილით.

მიმოქცევის სისტემა აქვთ უჯრედები ქსოვილური სითხითაა გარშემორტყმული. ის არაპირდაპირი გზით, სისხლის შემადგენლობით კონტროლირდება. სითხის შემადგენლობის შენარჩუნება განსაკუთრებულ სტრუქტურებზეა დამოკიდებული, დაწყებული უჯრედული სტრუქტურებიდან, დამთავრებული ისეთი რთული ორგანოებით, როგორიც თირკმელებია. **სატრანსპორტო ეპითელიუმი** არის ერთი ან რამდენიმე ეპითელური უჯრედების შრე რომელიც ხსნარების მოძრაობას აკონტროლებს და ოსმოსური რეგულაციისა და მეტაბოლიზმის მავნე პროდუქტების გამოყოფის მნიშვნელოვან კომპონენტებს წარმოადგენს. ცხოველებს აღნიშნული ეპითელუმის შეიძლება რამდენიმე განსხვავებული ტიპი ჰქონდეთ. სატრანსპორტო ეპითელიუმი მოცემულ ხსნარებს განსაზღვრული რაოდენობით და განსაზღვრული მიმართულებით ამოძრავებს. სატრანსპორტო ეპითელიუმი ზოგჯერ უშუალოდ გარე გარემოსკენ არის მიმართული, ან ამოფენს იმ არხებს, რომლებიც ხვრელებით გარეთ იხსნებიან. გაუმტარი, მჭიდროდ შეკავშირებული ეპითელური უჯრედები (**იხ. სურათი 6.31**) ქმნიან ბარიერს ქსოვილსა და გარემოს შორის. ასეთი განლაგება უზრუნველყოფს იმას, რომ ნებისმიერი ნივთიერება, რომელიც ცხოველსა და გარემოს შორის მიმოიცვლება, შერჩევით განვლად მემბრანას გადის.

ცხოველთა უმეტესობაში **სატრანსპორტო ეპითელიუმი** რთულ მილაკოვან ბადეს ქმნის, რომელსაც ზედაპირის დიდი ფართობი გააჩნია. საუკეთესო მაგალითად ზღვის ფრინველების მარილის ჯირკვლები გამოდგება, რომელიც ჭარბ ნატრიუმის ქლორიდს სისხლიდან გამოყოფს (**სურათი 44.7**). მაგალითად, ალბატროსს, რომელიც თევებს ან წლებსაც კი ზღვაში ატარებს და საკვებსა და წყალს ოკეანიდან იღებს, შეუძლია ზღვის წყლის დაღევა, რადგანაც მისი ნისკარტის მარილის ჯირკვლები უფრო მარილიან სითხეს გამოყოფენ, ვიდრე ოკეანის წყალია. ასე რომ, მიუხედავად იმისა, რომ ზღვის წყლის დაღევას ორგანიზმში დიდი რაოდენობით მარილები შეაქვს, ფრინველი ამ გზით დიდი რაოდენობით წყალსაც შეითვისებს. ადამიანებს, რომლებიც ზღვის წყალს სვამენ, ჭარბი მარილებისგან გათავისუფლებისთვის, უფრო მეტი წყლის გამოყოფა უწევთ, ვიდრე დაღევისას მიიღებენ.

განსაზღვრული ტიპის სატრანსპორტო ეპითელიუმში პლაზმური მემბრანის მოლეკულური სტრუქტურა გახსნილი ნივთიერებების გადაადგილები მიმართულებას განსაზღვრავს. მარილის გამომყოფი ჯირკვლებისგან განსხვავებით, მტკნარი წყლის თევზების ლაყუჩების სატრანსპორტო ეპითელიუმი, გარშემომყოფი გამხსნელი წყლიდან სისხლისაკენ მარილების გადასატანად აქტიურ ტრანსპორტს იყენებს. გამომყოფი ორგანოების სატრანსპორტო ეპითელიუმს ხშირად ორმაგი ფუნქცია აკისრია, კერძოდ წყლის ბალანსის შენარჩუნება და მეტაბოლური ნარჩენების გამოყოფა.

## კონცეფცია ტესტი 44.1

1. მტკნარი წყლის თევზების სისხლში გარშემომყოფი წყლიდან მარილების გადაადგილებას ატფ-ის ენერგიის ხარჯვა სჭირდება. რატომ?
2. რატომ მიეკუთვნებიან არამტკნარი წყლის თევზები ოსმოკონფორმერებს?
3. ზღვის ძვლოვან თევზებთან შედარებით როგორ ახერხებენ ზვიგენები, ოსმორეგულაციისთვის პროპორციულად ნაკლები ენერგიის დახარჯვას?

## კონცეფცია 44.2

### ცხოველის აზოტოვანი ნაჩრენები მათ ფილოგენეზსა და საატსებო გატემის ასახავს

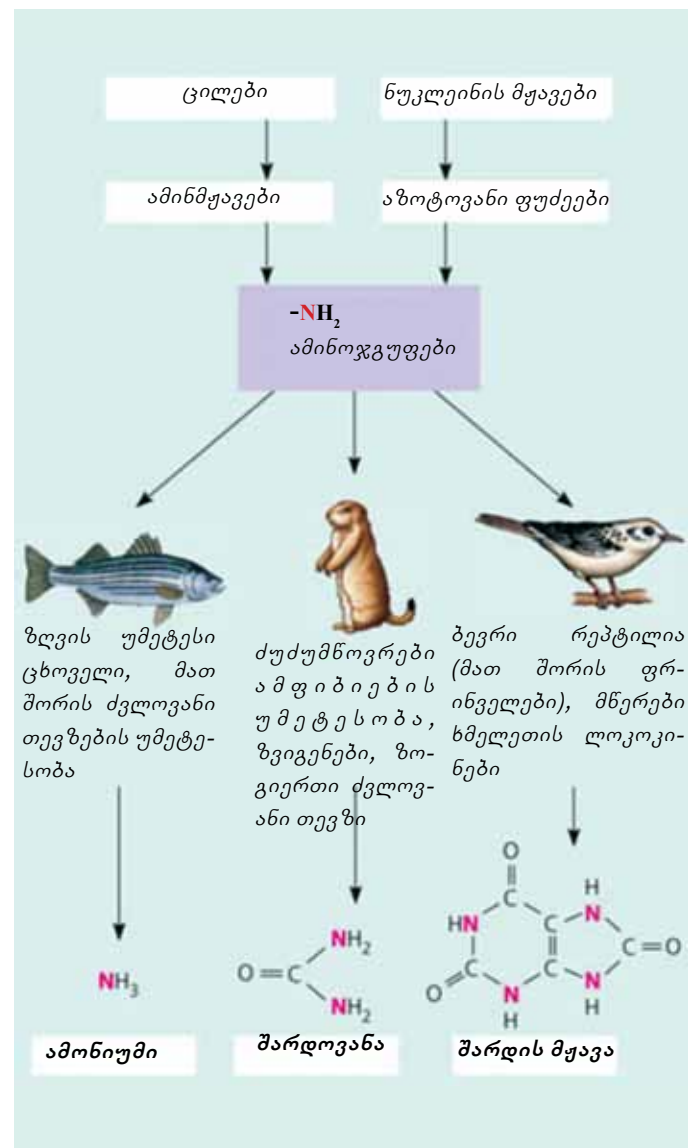
ვინაიდან მეტაბოლიზმის პროდუქტების უმეტესობა გარეთ გამოსაყოფად წყალში უნდა გაიხსნას, ცხოველის მავნე პროდუქტების ტიპსა და რაოდენობას დიდი გავლენა აქვს წყლის ბალანსზე. ოსმორეგულაციაზე მათი გავლენის კუთხით, ყველაზე მნიშვნელოვანი აზოტოვანი (აზოტის შემცველი) პროდუქტებია, რომლებიც ცილებისა და ნუკლეინის მჟავების დაშლისას წარმოიქმნება (სურათი 44.8). როდესაც აღნიშნული მაკრომოლეკულები ნახშირწყლებად ან ცხიმებად გარდაქმნის მიზნით იშლება, ფერმენტები აზოტს ძლიერ ტოქსიკური მოლეკულის — ამონიუმის ( $\text{NH}_3$ ) სახით აცილებენ. ზოგი ცხოველი ამონიუმს უშუალოდ გარეთ გამოყოფს, მაგრამ ბევრი სახეობის წარმომადგენლები კი მას ნაკლებად ტოქსიკურ ნაერთებად გარდაქმნიან. ამ გარდაქმნის პროცესს ატფ-ის ენერგია ესაჭიროება

### აზოტოვანი ნაჩრენების ფორმები

სხვადასხვა ცხოველი აზოტოვან პროდუქტებს განსხვავებული ფორმით წარმოქმნის. ეს ფორმებია: ამონიუმი, შარდოვანა ან შარდის მჟავა, რომლებიც ტოქსიკურობითა და ენერგეტიკული დანახარჯით განსხვავდებიან.

#### ამონიუმი

რამდენადაც ამონიუმი ძლიერ ხსნადია, და ამავე დროს ცხოველები ვერ იტანენ მის მაღალ კონცენტრაციას, ისეთ ცხოველებს, რომლებიც აზოტოვანი პროდუქტების გამოყოფას ამონიუმის სახით ახდენენ, წყლის დიდი რაოდენობის მიღება სჭირდებათ. ამიტომაც, ამონიუმის გამოყოფა უფრო ხშირია წყლის ორგანიზმებში. ამონიუმის მოლეკულები ადვილად გადიან მემბრანაში და დიფუზიის გზით გარშემომყოფ წყალში გამოიყოფიან. ბევრ უხერხემლოში, ამონიუ-



▲ სურათი 44.8 აზოტოვანი ნარჩენები.

მის გამოყოფა სხეულის მთელი ზედაპირით ხდება. თევზებში, ამონიუმის დიდი წილი ამონიუმის იონის სახით ლაყუჩების ეპითელიუმით გამოიყოფა, თირკმლები კი აზოტოვანი ნარჩენების მცირე რაოდენობას გამოყოფენ. მტკნარი წყლის თევზებში ლაყუჩების ეპითელიუმი წყლიდან ამონიუმის იონების სანაცვლოდ ნატრიუმის იონებს იღებენ, რაც გარემომცველ წყალთან შედარებით სხეულის სითხეებში ნატრიუმის იონების გაცილებით უფრო მაღალი კონცენტრაციის შენარჩუნებაში ეხმარება.

#### შარდოვანა

მუხედვად იმისა, რომ ამონიუმი კარგად გამოიყოფა წყლის ბევრ ცხოველში, მისი გამოყოფა ხმელეთის ორგანიზმებისთვის ნაკლებად ხელსაყერელია. ვინაიდან ამონიუმი ძალიან ტოქსიკურია, ის შეიძლება ძლიერ განზავებული ხსნარის სახით გადაადგილდეს და გამოიყოს. ამისთვის წყლის

დიდი მოცულობა არის საჭირო. ხმელეთის ცხოველებისა და ზღვის ორგანიზმების (რომლებიც წყალს გარემოში ოსმოსის გზით გამოყოფს) უმეტესობას არ აქვს საკმარისი ხელმისაწვდომი წყალი. ზრდასრული ამფიბიების უმეტესობა, ზვიგენები და ზღვის ზოგიერთი ძვლოვანი თევზი ძირითადად შარდოვანას გამოყოფს. ეს ნივთიერება ხერხემლიანთა ღვიძლში, მეტაბოლურ ციკლში ამონიუმის ნახშირორჟანგთან დაკავშირების გზით წარმოიქმნება. მიმოქცევის სისტემას შარდოვანა გამოყოფს ორგანოებთან – თირკმლებთან გადააქვს.

შარდოვანას მთავარი უპირატესობა მისი დაბალი ტოქსიკურობაა. იგი დაახლოებით 10 000 უფრო ნაკლებია ვიდრე ამონიუმის ტოქსიკურობა. ეს ცხოველებს საშუალებას აძლევს, შარდოვანა მაღალი კონცენტრაციებით გადაიტანონ და დააგროვონ. ამის გარდა, შარდოვანას გამოყოფს ცხოველებს გაცილებით ნაკლები რაოდენობის წყალი ესაჭიროებათ. შარდოვანას კონცენტრირებული ხსნარის გამოყოფისას, ამონიუმის განზავებულ ხსნართან შედარებით, მოცემული რაოდენობის აზოტის გამოყოფისთვის გაცილებით ნაკლები რაოდენობის წყალი იკარგება. შარდოვანას მთავარი ნაკლი ის არის, რომ ცხოველებს ამონიუმიდან მის წარმოსაქმნელად ენერგიის ხარჯვა უწევთ. ბიოენერგეტიკული თვალსაზრისით, ჩვენ ვვარაუდობდით, რომ ცხოველები, რომლებიც სიცოცხლის ნაწილს წყალში და ნაწილს კი ხმელეთზე ატარებენ, ამონიუმისა და შარდოვანას გამოყოფის გადართვით ხასიათდებიან. ამონიუმის გამოყოფისას, ისინი ზოგავენ ენერგიას, ხოლო შარდოვანას გამოყოფისას კი წყალს. მართლაც, ბევრი ამფიბია ამონიუმს მაშინ გამოყოფს, როდესაც ის თავკომბალას სტადიაშია და ხმელეთის ზრდასრულ ფორმად გარდაქმნის შემდეგ ის შარდოვანას გამოყოფაზე გადაერთვება.

## შარდის მჟავა

მწერები, ხმელეთის ლოკოკინები, ბევრი რეპტილიან, მათმწერები, ხმელეთის ლოკოკინები, ბევრი ქვეწარმავალი და ფრინველი, აზოტოვან ნაშთებს შარდის მჟავას სახით გამოყოფენ. შარდოვანას მსგავსად, შარდის მჟავაც ნაკლებად ტოქსიკურია. თუმცა, განსხვავებით შარდოვანასა და ამონიუმისგან, შარდის მჟავა წყალში ძალიან ცუდად იხსნება და წყლის ძალიან მცირე დანაკარგით, ნახევრად მყარი სახით გამოიყოფა. ეს დიდი უპირატესობაა იმ ცხოველებისთვის, რომლებსაც წყალთან შეხება ნაკლებად აქვთ, მაგრამ ამისთვის ხარჯის გაწევა უწევთ: შარდის მჟავა ენერგეტიკულად უფრო ძვირადღირებულია, ვიდრე შარდოვანა და ამონიუმიდან მის წარმოსაქმნელად ატფ-ის მნიშვნელოვანი რაოდენობა იხარჯება.

## ფეოლუციისა და გატომის გაფლანა აზოტოვან ნატჩინებზე

გამოყოფილი აზოტოვანი ნარჩენი პროდუქტების ტიპი საარსებო გარემოსა (განსაკუთრებით წყლის ხელმისაწვდომ-

ობაზე) და ევოლუციურ წარსულზეა დამოკიდებული (იხ. სურათი 44.8). მაგალითად, შარდის მჟავის და შარდოვანას გამოყოფა ცხოველთა განსხვავებულ ადაპტაციას წარმოადგენს იმისთვის, რომ აზოტოვანი ნარჩენების გამოყოფა წყლის მინიმალური დანაკარგით მოხდეს. ერთი-ერთი ფაქტორი, რომელიც, როგორც ჩანს, მნიშვნელოვანია იმისათვის თუ რომელი გამოყოფის ალტერნატივა გამოიყენება, არის გამრავლების გზა. ხსნადი მეტაბოლური პროდუქტები შეიძლება დიფუნდირდეს ამფიბიების უნაჭუჭო კვერცხიდან ან გადატანილ იქნას დედის სისხლით ძუძუმწოვრების ჩანასახის შემთხვევაში. ნაჭუჭიანი კვერცხი, რაც ფრინველებისა და ქვეწარმავლებისთვის არის დამახასიათებელი, აირების მიმართ გამტარია, მაგრამ ხსნარებს არ ატარებს, რაც იმას ნიშნავს, რომ ხსნადი აზოტოვანი პროდუქტები, რომლებიც ჩანასახის მიერ გამოიყოფა ნაჭუჭში, შეიძლება მოემწყვდეს და საშიშ დონემდე დაგროვდეს (მართალია, შარდოვანა გაცილებით ნაკლებად საშიშია, ვიდრე ამონიუმი, მაგრამ ძალიან მაღალ კონცენტრაციებზე ისიც ტოქსიკური ხდება). შარდის მჟავას, როგორც აზოტოვანი პროდუქტის განვითარებამ, უპირატესობა წარმოქმნა, რადგანაც ის ხსნარებიდან ილექება და ორგანიზმის გამოჩეკვამდე კვერცხში უვნებლად ინახება.

ხერხემლიანების აზოტოვანი პროდუქტის ტიპი საარსებო გარემოსა და ევოლუციურ ხაზზეა დამოკიდებული. მაგალითად, ხმელეთის კუ (რომელიც ხშირად მშრალ გარემოში ბინადრობს) ძირითადად შარდის მჟავას გამოყოფს, მაშინ, როდესაც წყლის კუ როგორც შარდოვანას, ისევე ამონიუმს გამოიმუშავებს. ზოგ სახეობაში, გარემო პირობების ცვლილების შესაბამისად, ინდივიდებს აზოტოვანი პროდუქტების შეცვლა შეუძლიათ. მაგალითად, ზოგი კუ, რომელიც ჩვეულებრივ შარდოვანას გამოყოფს, ტემპერატურის ზრდისა და წყლის ნაკლებობის პირობებში, შარდის მჟავას გამოყოფაზე გადაერთვება. ეს კიდევ ერთი მაგალითია იმისა, თუ როგორ ხდება გარემო პირობების მიმართ ორ დონეზე რეაქცია: თაობებში ევოლუცია განსაზღვრავს სახეობის ფიზიოლოგიური პასუხის ფარგლებს, მაგრამ სიცოცხლის განმავლობაში ცალკეული ორგანიზმები აღნიშნული ფარგლების შიგნით ფიზიოლოგიურ შეგუებებს ქმნიან. გამომუშავებული აზოტოვანი პროდუქტების რაოდენობა დაკავშირებული არის ენერგეტიკულ ბიუჯეტთან, რამდენადაც ის იმაზეა დამოკიდებული, რა ტიპის და რამდენად განსხვავებული საკვებით იკვებება ცხოველი. გამომდინარე იქიდან, რომ ენდოთერმები ენერგიას დიდი რაოდენობით იყენებენ, მოცულობის ერთეულზე ისინი უფრო ბევრს ჭამენ და უფრო მეტ აზოტოვან პროდუქტს გამოიმუშავებენ ვიდრე ექტოთერმები. მტაცებლები, რომლებიც ენერგიის უმეტესობას ცილებიდან წარმოქმნიან, უფრო მეტ აზოტს გამოყოფენ, ვიდრე ის ცხოველები, რომლებიც უფრო ცხიმოვან და ნახშირწყლოვან წყაროებზე არიან დამოკიდებულნი.

## კონცეფცია ცესტი 44.2

1. წყალში მობინადრე კალის ლარვა, ამონიუმს გამოყოფს, მაშინ, როდესაც ხმელეთზე მობინადრე ზრდასრული კალიები შარდის მჟავას გამოყოფენ, რატომ?
2. რა როლს ასრულებს ხერხემლიანთა ღვიძლი ორგანიზმის აზოტოვანი ნარჩენების გადამუშავებაში?
3. მშრალ გარემოში რა უპირატესობა აქვს შარდის მჟავას, როგორც აზოტოვანი ნარჩენის ტიპს?

## კონცეფცია 44.3

### სხვადასხვა გამომყოფი სისტემები მილაკოვანი სტრუქტურის ვატიაციებია

მიუხედავად იმისა, რომ წყლის ბალანსის პრობლემები ძალიან განსხვავდება ხმელეთზე, მარილიან წყლებსა და მტკნარ წყლებში, მათი გადაჭრა დამოკიდებულია გახსნილი ნივთიერებების გადაადგილებაზე შინაგან სითხეებსა და გარე გარემოს შორის. ამ გადაადგილების ძირითადი ნაწილი გამომყოფი ორგანოებით ხორციელდება. ისინი ჰომეოსტაზში წამყვან როლს ასრულებენ, ვინაიდან სხეულის სითხეების შემადგენლობას აწესრიგებენ.

### გამომყოფის პრეტესები

სანამ ჩვენ განსაზღვრულ გამომყოფ სისტემას აღვწერთ, განვიხილოთ გამოყოფის პროცესი. მიუხედავად იმისა, რომ გამომყოფი სისტემები მრავალფეროვანია, თითქმის ყველა მათგანი წარმოქმნის თხევად ნარჩენს - შარდს. ეს პროცესი რამდენიმე საფეხურს მოიცავს (**სურათი 44.9**). პირველი, სხეულის სითხე (სისხლი, ცელომური სითხე ან ჰემოლიმფა) გროვდება; სითხის საწყისი შეგროვება, ნახევრადგანვლადი მემბრანით ფილტრაციას მოიცავს. ნახევრადგანვლადი მემბრანა სატრანსპორტო ეპითელიუმის ერთი შრისგან შედგება. ეს მემბრანები სხეულის სითხეებში ცილებს, უჯრედებსა და მთელ რიგ დიდი ზომის მოლეკულებს აკავებს. ჰიდროსტატიკური წნევა (ბევრ ცხოველში სისხლის წნევა) წყალსა და გახსნილ ნივთიერებებს, როგორებიცაა მარილები, შაქრები, ამინომჟავები და აზოტოვანი ნარჩენები გამომყოფ სისტემაში განდევნის. წარმოქმნილ სითხეს ფილტრატი ეწოდება.

ფილტრაციის პროცესი არაშერჩევითია. ამიტომ, მნიშვნელოვანია, რომ მცირე ზომის საჭირო მოლეკულები ფილტრატიდან ორგანიზმის სითხეებში უკან გადმოვიდეს. ამ პროცესის მეორე ეტაპზე, შერჩევითი რეაბსორბციისას, გამომყოფი სისტემა აქტიური ტრანსპორტის გზით მოქ-

მედებს და საჭირო გახსნილი ნივთიერებები, როგორიცაა გლუკოზა, განსაზღვრული მარილები და ამინომჟავები, ფილტრატიდან რეაბსორბირდება. არამთავარი გახსნილი ნივთიერებები და ნარჩენები (მაგალითად, ქარბი მარილები და ტოქსინები) ფილტრატი რჩება ან შერჩევითი სეკრეციით, აქტიური ტრანსპორტის გზით მასში გადადის. სხვადასხვა გახსნილი ნივთიერების გადატუმბვა ფილტრატიდან ან მასში გადატანა წყლის ოსმოსურ გადაადგილებასაც აწესრიგებს. გადამუშავებული ფილტრატი სხეულიდან და სისტემიდან შარდის სახით გამოიყოფა.

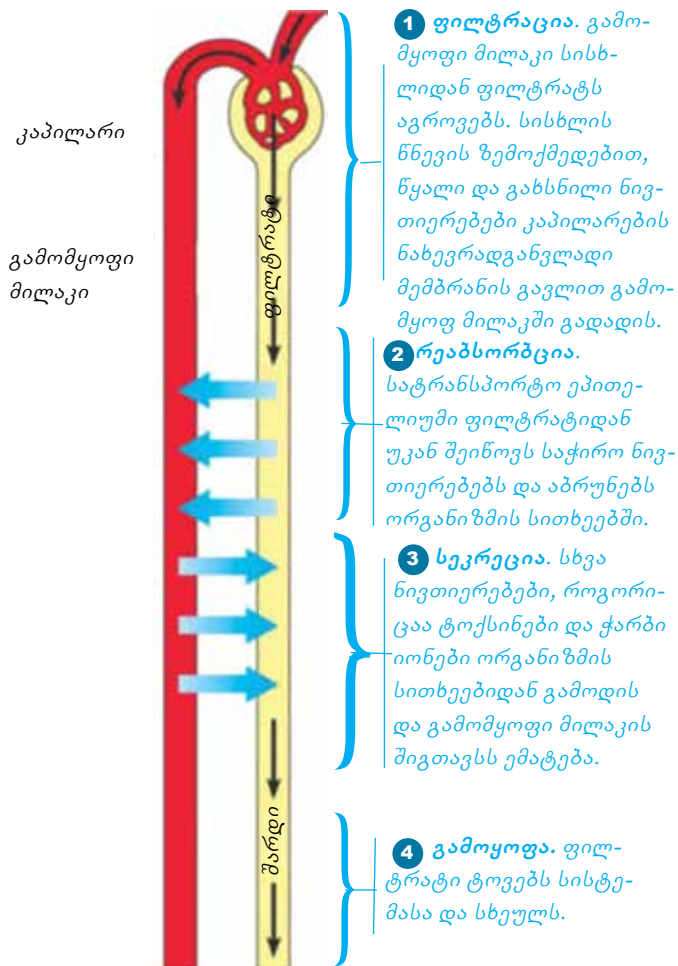
### გამომყოფი სისტემის მიმოხილვა

ცხოველთა ჯგუფებში, სისტემა, რომელიც ძირითად გამომყოფ ფუნქციას ასრულებს, ძალიან მრავალფეროვანია. ასეა თუ ისე, ისინი მიღების რთული სისტემის სახით არიან წარმოდგენილი და წყლისა და გახსნილი ნივთიერებების (მათ შორის აზოტოვანი ნარჩენების) მიმოცვლისთვის ფართო ზედაპირს ქმნიან.

### პროტონეფრიდიუმი: ცეცხლის ნათურის სისტემა

ბრტყელ ჭიებს აქვთ გამომყოფი სისტემა, პროტონეფრიდიუმი, რომელსაც პროტონეფრიდიუმს უწოდებენ. ბრმად დაბოლოებული მილაკია, რომელსაც სხეულში შიგნით გასახსნელი ხვრელი არ აქვს. როგორც **სურათი 44.10**-ზეა ნაჩვენები, მილაკები სხეულის შიგნით იტოტება და უჯრედული ერთეულით ბოლოვდება, რომელსაც ცეცხლის ნათურას უწოდებენ. ცეცხლის ნათურას წამწამები აქვს, რომელიც მილაკებისკენ პროეცირდება (მოციმციმე წამწამები მოციმციმე ცეცხლს ჰგავს, აქედან მოდის სახელიც — ცეცხლის ნათურა). წამწამების მოძრაობა წყალს და მასში გახსნილ ნივთიერებებს ქსოვილური სითხიდან ცეცხლის ნათურაში (ფილტრაცია) აგზავნის და შემდეგ ნეფრიდიოფორების საშუალებით შარდს მიღებიდან გარეთ გამოყოფს. მტკნარი წყლის ბრტყელ ჭიებში გამოყოფილი შარდი ძლიერ განზავებულია, რაც გარემოდან წყლის ოსმოსურ შთანთქმას ეხმარება. როგორც ჩანს, მიღებში შარდის გარეთ გამოყოფამდე, გახსნილი ნივთიერებების დიდი ნაწილის რეაბსორბცია ხდება.

მტკნარი წყლის ბრტყელი ჭიების ცეცხლის ნათურის სისტემა, როგორც ჩანს, ძირითადად ოსმრეგულაციის ფუნქციას ასრულებს. მეტაბოლური პროცესების უმეტესი ნარჩენი, ცხოველის სხეულიდან გარეთ დიფუნდირდება ან საჭმლის მომნელებელი არხის პირის ხვრელით გამოიყოფა (**იხ. სურათი 33.10**). ზოგ პარაზიტულ ბრტყელ ჭიაში, რომლებიც გარემოს იზოოსმოტური არიან, პროტონეფრიდიები აზოტოვანი ნარჩენების გამოყოფის ფუნქციას ასრულებენ. ეს ფუნქციური განსხვავება უჩვენებს იმას, რომ ერთი და იგივე სტრუქტურა, რომელიც საერთოა ორგანიზმების ჯგუფებისათვის განსხვავებულ გარემოში, განსხვავებულ ადაპტაციით შეიძლება ხასიათდებოდეს. პროტონეფრიდიები აგრეთვე გვხვდება მოლუსკების ლარვებში და ლანცეტებშიც. ჩამოთვლილი ცხოველთა სახეობების გასახსენებლად იხილეთ თავები 33 და 34).

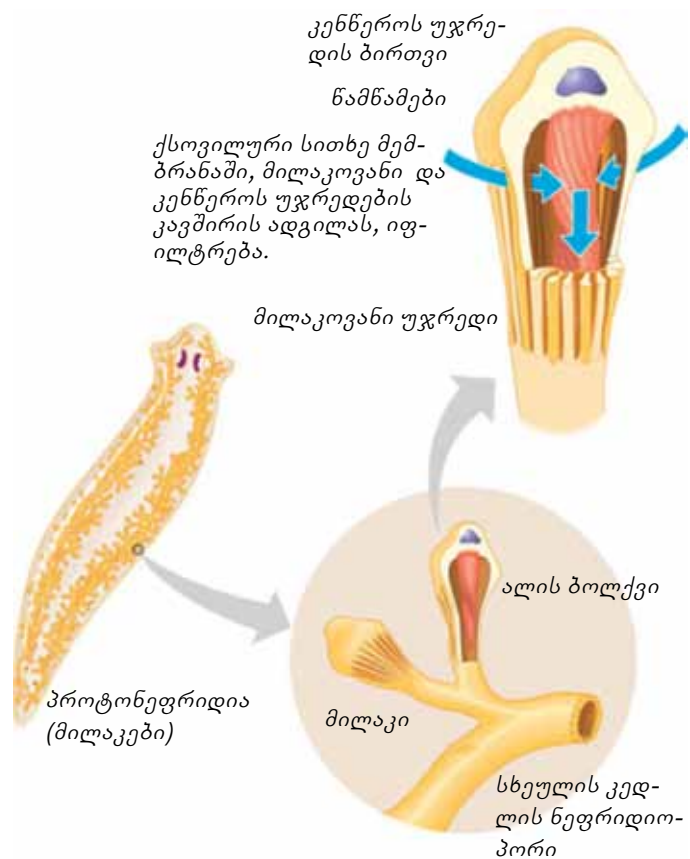


▲ **სურათი 44.9** გამოყოფილი სისტემის მთავარი ფუნქციები: მიმოხილვა. გამოყოფილი სისტემის უმეტესობა ფილტრატს, სხეულის სითხეების წნევით გაფილტვრის და შემდგომი გარდაქმნის გზით წარმოქმნის. ეს დიაგრამა ხერხეულიანთა გამოყოფილი სისტემის მიხედვით არის მოდელირებული.

## მეტანეფრიდიუმები

მილაკოვანი გამოყოფილი სისტემის სხვა ტიპი არის მეტანეფრიდიუმი, რომელსაც ორგანიზმის სითხეების შესაგროვებლად შინაგანი ხვრელები აქვს (**სურათი 44.11**). მეტანეფრიდიუმი რგოლოვანი ქიების უმეტესობაშია ნაპოვნი, მათ შორის ჭიაყელაშიც. ჭიაყელას თითოეულ სეგმენტს მეტანეფრიდიუმის წყვილი აქვს, რომლებიც ცელომშია მოთავსებული და კაპილარული ბადით არის გარშემორტყმული. მეტანეფრიდიუმის შიდა ხვრელს წამწამოვანი ყელი აქვს, რომელსაც ნეფროსტომას უწოდებენ. სითხე ნეფროსტომაში შედის და დახვეულ შემკრებ მილაკში გადადის, რომელიც პატარა შარდის ბუშტს შეიცავს. ეს უკანასკნელი გარეთ ნეფრიდიოპორით იხსნება.

ჭიაყელას მეტანეფრიდიუმს გამოყოფილი და ოსმორეგულაციის ფუნქციები აკისრია. როდესაც შარდი მილაკებში მიედინება, სანათურის შემომსაზღვრელი სატრანსპორტო ეპითელიუმში გახსნილი ნივთიერებების უმეტეს ნაწილს რეაბ-

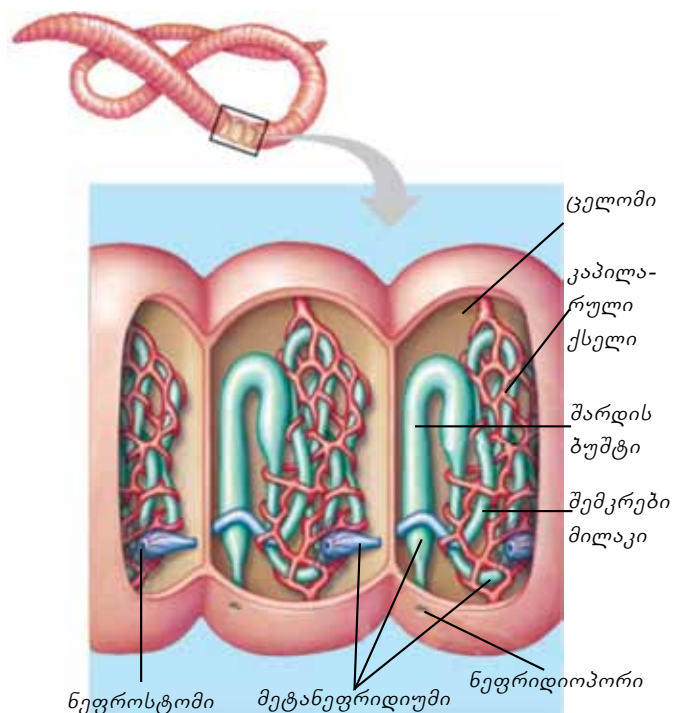


▲ **სურათი 44.10** პროტონეფრიდიუმები: პლანარიას ცეცხლის-ნათურის სისტემა. პროტონეფრიდიუმები დატოტვილი შინაგანი მილაკებია, რომლებიც ძირითადად ოსმორეგულაციის ფუნქციას ასრულებენ.

სორბირებს და კაპილარების სისხლში აბრუნებს. აზოტოვანი პროდუქტები მილაკებში რჩება და გარეთ გამოიყოფა. ჭიაყელა ნოტიო ნიადაგებში ბინადრობს და წყალს ოსმოსის გზით კანის საშუალებით ითვისებს. მეტანეფრიდიუმების შიგთავსი სხეულის სითხეებთან მიმართებაში ჰიპოსმოზურია და ამიტომ განზავებული შარდის წარმოქმნით წყლის შესვლას აბალანსებს.

## მალპიგის მილაკები

მწერებსა და ხმელეთის სხვა ფეხსახსრიანებს განსაკუთრებული ორგანოები აქვთ, რომლებსაც **მალპიგის მილაკებს** უწოდებენ და რომლებიც აზოტოვანი ნაშთების გამოყოფისა და ოსმორეგულაციის ფუნქციებს ასრულებენ (**სურათი 44.12**). მალპიგის მილაკები მომწელებელ არხში იხსნება და ბრმა დაბოლოებით ჰემოლიმფას (მიმოქცევა სითხეს) უკავშირდება. მილაკებში მოთავსებული სატრანსპორტო ეპითელიუმში ჰემოლიმფიდან, მილის სიღრმეში გახსნილი ნივთიერებებს (მათ შორის აზოტოვან ნარჩენებსაც) გამოიყოფს. წყალი გახსნილი ნივთიერებებს ოსმოსის გზით მიჰყვება და სითხე შემდეგ სწორ ნაწლავში გადადის, სადაც გახსნილი ნივთიერებების უმეტესობა უკან, ჰემოლიმფაში, შეიწოვება. წყა-



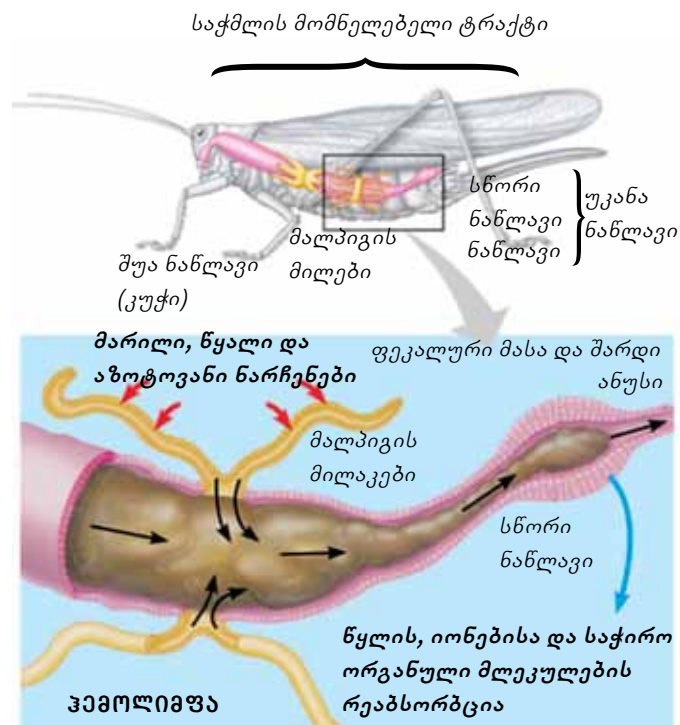
▲ **სურათი 44.11** ჭიაყელას მეტანეფრიდიუმი. ჭიის თითოეული სეგმენტი მეტანეფრიდიუმის წყვილს შეიცავს, რომელიც წინა მეზობელი სეგმენტის ცელომის სითხეს აგროვებს (აქ თითო წყვილიდან მხოლოდ ერთი მეტანეფრიდიუმია ნაჩვენები).

ლი ამ შემთხვევაშიც მიყვება გახსნილ ნივთიერებებს და აზოტოვანი პორდუქტები – ძირითადად შარდის მჟავა – თითქმის მშრალი სახით ფეკალურ მასასთან ერთად გარეთ გამოდის. წყლის შენარჩუნების თვალსაზრისით, მწერების მაღალეფექტური გამოყოფის სისტემა მათი ხმელეთზე გავრცელების დიდი წარმატების ერთ-ერთი მიზეზია.

### ხერხემლიანების თირკმლები

ხერხემლიანების თირკმლები ოსმორეგულაციასა და გამოყოფის ფუნქციებს ასრულებენ. ცხოველების ბევრი ჯგუფის გამომყოფი ორგანოების მსგავსად, თირკმლებიც მილაკებისგან შედგება. ვინაიდან ოსმოკონფორმერს, სალამურას ახლო ნათესავი მიქსინას (ყხინიდა), რომელიც ერთ-ერთი ყველაზე პრიმიტიულ ქორდიანი ცხოველია, სეგმენტურად განლაგებული გამომყოფი მილაკებისგან შემდგარი თირკმლები აქვს, შეგვიძლია ვიფიქროთ, რომ ხერხემლიანების წინაპრებს სეგმენტური გამომყოფი სისტემა ჰქონდათ.

ხერხემლიანთა უმეტესობის თირკმლები კომპაქტური არასეგმენტური ორგანოა, რომელიც მაღალორგანიზებულად განლაგებული დიდი რაოდენობით მილაკისგან შედგება. მილაკებთან უშუალოდ დაკავშირებულია კაპილარების ხშირი



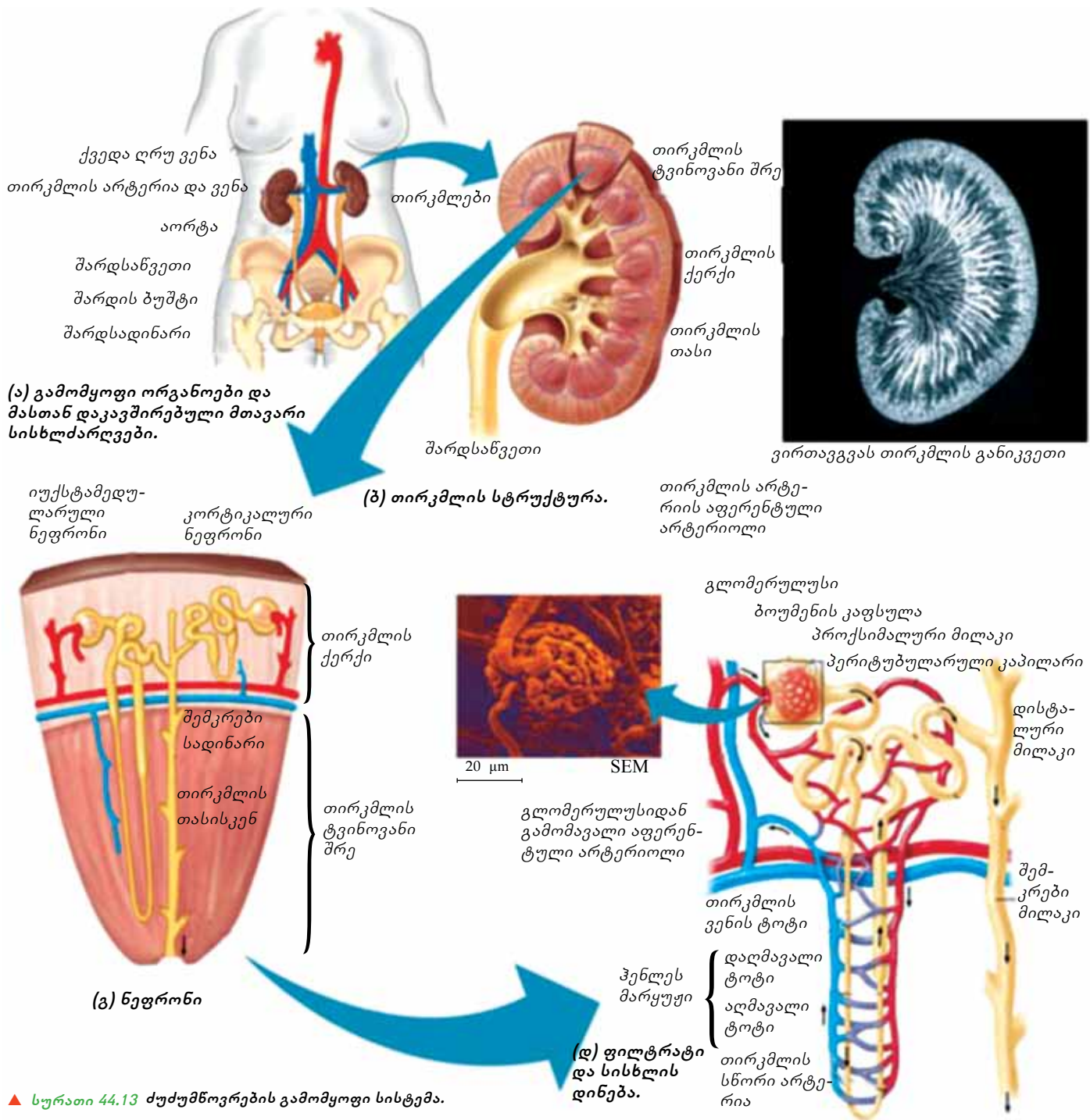
▲ **სურათი 44.12** მწერების მალპიგის მილაკები. მალპიგის მილაკები მომწებლებელი არხის გარეთ გამოსული მილაკებია და აზოტოვანი ნაშთების გამოყოფისა და ოსმორეგულაციის ფუნქციებს ასრულებს.

ბადე, რომელიც მილაკების მსგავს სხვა სტრუქტურებთან ერთად შარდის სხეულიდან გარეთ გამოყოფას უზრუნველყოფს.

შემდეგ ორ განყოფილებაში, ჩვენ ყურადღებას ძუძუმწოვრების გამომყოფი სისტემაზე გავამახვილებთ და ნიმუშად ადამიანების გამომყოფი სისტემას გამოვიყენებთ. განსხვავებულ გარემოში გამოყოფის ფუნქციის ევოლუციური ცვლილებების განხილვისთვის თავს ხერხემლიანების სხვადასხვა კლასის გამომყოფი სისტემის შედარებით დავასრულებთ.

## კანცეფცია ცესი 44.3

1. ანატომიური განსხვავებისა და ევოლუციური წარმოშობის მიუხედავად, გამომყოფი სისტემის ფუნქციონირების რა ფუნდამენტური პროცესები არსებობს?
2. აღწერეთ მილაკების ქსელით შექმნილი გამომყოფი სისტემის უპირატესობა.



## ნეფრონი და მასთან დაკავშირებული სისხლძარღვები ბუბუღ-ოვანთა თირკმლის ერთეულს წარმოადგენს

ძუძუმწოვრების გამომყოფი სისტემის ცენტრი თირკმელია, რომელიც წყლის ბალანსისა და მარილთა რეგულაციის მთავარ უბანსაც წარმოადგენს. ძუძუმწოვრებს თირკმლების წყვილი აქვს. თითოეული თირკმელი ლობიოს თესლის ფორმისაა და ადამიანში 10 სმ სიგრძე აქვს, იგი სისხლით **თირკმლის არტერიით** მარაგდება და მისგან **თირკმლის ვენა** გამოდის (**სურათი 44.13 ა**).

თირკმელში სისხლის დინება უხვია. ადამიანებში თირკმელები სხეულის მასის 1%-ზე ნაკლებს შეადგენენ, მაგრამ მოსვენებული გულის გამოსავლის 20%-ს იღებენ. შარდი თირკმელს **შარდსანვეთების** საშუალებით ტოვებს და ორივე შარდსანვეთი **შარდის ბუშტს** უკავშირდება. შარდვის დროს, შარდი შარდის ბუშტიდან **შარდსადინარით** გამოიყოფა, რომელიც ქალებში საშოსთან, ხოლო მამაკაცებში პენისში იხსნება. შარდის ბუშტსა და შარდსადენს შორის არსებული სფინქტერი, რომელიც ნერვული სისტემის კონტროლის ქვეშ იმყოფება, შარდის გამოყოფას არეგულირებს.

## ნეფრონის სტრუქტურა და ფუნქციები

ძუძუმწოვრების თირკმელებს ორი განსხვავებული უბანი აქვთ, თირკმლის გარეთა შრე რომელსაც **ქერქი** ეწოდება და შიგნითა შრე — **ტვინოვანი** (**სურათი 44.13 ბ**). ორივე უბანში მიკროსკოპული მილაკები და მათთან დაკავშირებული სისხლძარღვოვანი ქსელებია მოთავსებული. ხერხემალიანთა თირკმლის ფუნქციური ერთეული ნეფრონი — ერთი გრძელი მილისგან და კაპილარული გორგალისგან შედგება. გორგალს **გლომერულუსს** უწოდებენ (**სურათი 44.13 გ და დ**). მილის ბრმა ბოლო ფიალის ფორმის გაფართოებას ქმნის, რომელსაც **ბოუმენის კაფსულა** ეწოდება და, რომელიც, გლომერულუსს შემოსაზღვრავს. ადამიანის თითოეული თირკმელი მილიონობით ნეფრონს შეიცავს. მილაკების ჯამური სიგრძე 80 კმ-ია.

## სისხლის ფილტრაცია

ფილტრაცია ხდება, როდესაც სისხლის წნევა სისხლის სითხეს ბოუმენის კაფსულის გლომერულუსში განდევნის (**იხ. სურათი 44.13 ბ**). კაფსულის განსაკუთრებული უჯრედები, რომლებსაც პოდოციტებს უწოდებენ, და ფორებიანი კაპილარები წყლისა და მცირე ზომის გახსნილი ნივთიერებების მიმართ განვლადია, მაგრამ დიდი ზომის მოლეკულების (მაგალითად, პლაზმის ცილების) მიმართ კი — განუვლადი. მცირე ზომის მოლეკულების ფილტრაცია არაშერჩევითად მიმდინარეობს და ბოუმენის კაფსულის ფილტრატი შეიცავს

მარილებს, გლუკოზას, ამინომჟავებს, ვიტამინებს, აზოტოვან პროდუქტებს (როგორც არის შარდოვანი) და სხვა მცირე ზომის მოლეკულების ნარევს, რომელიც მსგავსია სისხლის პლაზმაში ამ ნივთიერებების კონცენტრაციის.

## ფილტრატის გზა

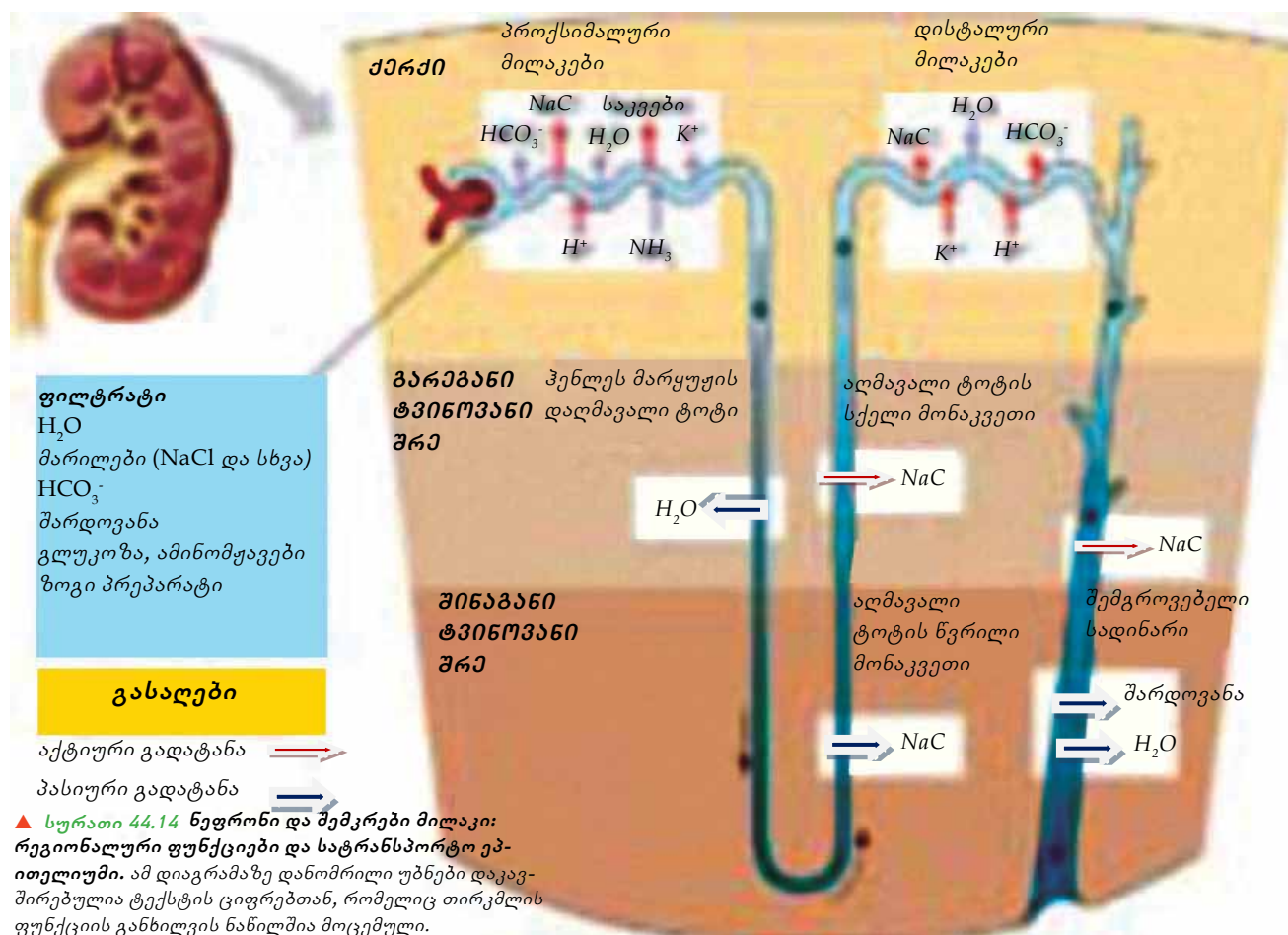
ფილტრატი ბოუმენის კაფსულიდან ნეფრონის შედეგ უბნებს გაივლის: ჰენლეს მარყუჟის **პროქსიმალურ მილაკს**, **მარყუჟს**, დაღმავალ ტოტს, აღმავალ ტოტს და **დისტალურ მილაკს**. დისტალური მილაკი **შემკრებ მილაკში** გადადის, რომელიც გადამუშავებულ ფილტრატს ბევრი ნეფრონიდან იღებს. ეს ფილტრატი ბევრი შემკრები არხიდან **თირკმლის ფიალას** უკავშირდება, რომელიც, თავის მხრივ, შარდსანვეთში გადადის.

ადამიანის თირკმელში, ნეფრონების დაახლოებით 80% შემცირებულ ჰენლეს მარყუჟს შეიცავს და თითქმის მთლიანად **ქერქოვან შრეში** თავსდება. დარჩენილი 20%, **იუქსტამედულარული ნეფრონები**, კარგად განვითარებული მარყუჟების მქონეა და თირკმლის ტვინოვან შრეში ღრმად თავსდება. იუქსტამედულარული ნეფრონები მხოლოდ ძუძუმწოვრებსა და ფრინველებს ახასიათებს. სხვა ხერხემალიანების ნეფრონებს ჰენლეს მარყუჟი არ აქვთ. იუქსტამედულარული ნეფრონები, რომლებიც ძუძუმწოვრებს შესაძლებლობას აძლევს, სისხლთან მიმართებაში ჰიპეროსმოსური შარდი წარმოქმნან, წყლის შენახვის თვალსაზრისით ძალიან მნიშვნელოვანი ადაპტაციაა.

ნეფრონი და შემკრები მილაკები სატრანსპორტო ეპითელიუმითაა ამოფენილი და შარდის წარმოსაქმნელად ფილტრაციას აწარმოებენ. ამ ეპითელიუმის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ამოცანა წყლისა და გახსნილი ნივთიერებების რეაბსორბციაა. ყოველდღე ადამიანის თირკმელში 1100-2000ლ სისხლი გადის, რაც სხეულის სისხლის საერთო მოცულობას 275-ჯერ აღემატება. სისხლის ასეთი მოძრაობის შედეგად, ნეფრონი და შემკრები მილაკები 180ლ საწყის ფილტრატს წარმოქმნის, რაც საშუალო ადამიანის სხეულის წონას ორ-სამჯერ აღემატება. აქედან, თითქმის მთელი შაქრები, ვიტამინები და სხვა ორგანული ნივთიერებები, ისევე როგორც წყლის 99% სისხლში რეაბსორბირდება და გარეთ გამოსაყოფად მხოლოდ 1.5ლ რჩება.

## ნეფრონთან დაკავშირებული სისხლძარღვები

თითოეული ნეფრონი სისხლით აფერენტული არტერიოლით მარაგდება, რომელიც თირკმლის არტერიის ტოტს წარმოადგენს და რომელიც გლომერულუსის კაპილარებად იყოფა (**იხ. სურათი 44.13 დ**). კაპილარები გლომერულუსიდან გამოსვლისას ერთიანდება და **ეფერენტულ არტერიოლს** ქმნიან. ეს სისხლძარღვი შემდეგ იყოფა და **პერიტუბულურ კაპილარებს** ქმნის, რომელიც პროქსიმალურ და დისტალურ მილაკებს ერტყმის გარს. სხვა კაპილარები ქვემოთ გრძელდება და ქმნის **vasa recta**-ს, რომელიც ჰენლეს მარყუჟს ერტყმის გარს. ეს კაპილარებიც მარყუჟს ქმნიან, რომლის დაღმავალი და აღმავალი ძარღვებიც სისხლს ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით ატარებს. მიუხედავად იმისა, რომ გამომყოფი



მილაკები და მათი გარშემომრტყმელი კაპილარები მჭიდროდ არიან დაკავშირებული, ისინი ნივთიერებებს უშუალოდ არ ცვლიან. მილაკები და კაპილარები ქსოვილურ სითხეშია მოთავსებული, რომლის გავლითაც სხვადასხვა ნივთიერება სისხლის პლაზმასა და ნეფრონის მილაკების ფილტრატს შორის დიფუნდირებს. ეს გაცვლა ნეფრონებში სისხლისა და ფილტრატის დინების ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით ძლიერდება.

## სისხლის ფილტრაციიდან შარდამდე: ღაწვტილუბითი მიმოხილვა

ამ განყოფილებაში ჩვენ ყურადღებას გავამახვილებთ იმაზე, როგორ ხდება ფილტრატის შარდად გარდაქმნა ძუძუმწოვრების ნეფრონსა და შემკრებ მილაკში. შემოხაზული ციფრები 44.14 სურათის ციფრებს შეესაბამება.

- 1. პროქსიმალური მილაკი.** პროქსიმალურ მილაკში სეკრეცია და რეაბსორბცია ფილტრატის შემდგენლობასა და მოცულობას მნიშვნელოვნად ცვლის. მაგალითად, სატრანსპორტო ეპითელიუმის უჯრედები ახდენენ წყალბადის იონების კონტროლირებულ გამოყოფას რაც

ორგანიზმის სითხეების შედარებით მუდმივი  $\text{pH}$ -ის შენარჩუნებას უწყობენ ხელს. ეს უჯრედები ასევე ასინთეზებენ და გამოყოფენ ამონიუმს, რომელიც ანეიტრალებს მჟავას და იცავს ფილტრატს ძლიერი შემჟავიანებისგან. რაც უფრო მჟავაა ფილტრატი, მით უფრო მეტ ამონიუმს გამოყოფენ უჯრედები. მიუხედავად იმისა, რომ აზოტოვანი პროდუქტების უმეტესობა შარდოვანას სახით გამოიყოფა, ძუძუმწოვრების შარდი ზოგჯერ ამ წყაროდან წარმოქმნილ ამონიუმს შეიცავს. პროქსიმალური მილაკები მნიშვნელოვანი ბიკარბონატული ბუფერის რეაბსორბციასაც ახდენენ. ნამლები და სხვა მომწამვლელი ნივთიერებები, რომელიც ღვიძლში გადის, პერიტუბულარული კაპილარებიდან ქსოვილური სითხისა და ეპითელიუმის გავლით პროქსიმალურ მილაკში გადადის. ამის საპირისპიროდ, საჭირო საკვები ნივთიერებები მათ შორის გლუკოზა, ამინომჟავები და კალიუმის იონები აქტიურად ან პასიურად ფილტრატიდან ქსოვილურ სითხეში და შემდგომ პერიტუბულარულ კაპილარებში გადადის.

პროქსიმალური მილაკის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ფუნქცია, საწყისი ფილტრატის დიდი მოცულობიდან ნატრიუმის ქლორიდისა და წყლის რეაბსორბციაა. ფილტრატის მარილი, სატრანსპორტო ეპითელიუმის უჯრე-

დებში დიფუნდირდება და უჯრედების მემბრანები ნატრიუმის იონებს აქტიური ტრანსპორტის გზით ქსოვილურ სითხეში გადაიტანენ. დადებითი მუხტის ტრანსპორტი, ქლორის უარყოფითი იონის მილაკის გარეთ გადატანით ბალანსდება. როდესაც მარილები ფილტრატიდან ქსოვილურ სითხეში გადადის, წყალიც ოსმოსის გზით თან მიყვება. ეპითელიუმის გარეთა მხარეს ზედაპირის გაცილებით ნაკლები ფართობი აქვს, ვიდრე სანათურისკენ მიმართულ მხარეს, რაც ამცირებს მარილებისა და წყლის მილაკში გაჟონვის ალბათობას. ამის ნაცვლად, მარილები და წყალი ქსოვილური სითხიდან პერიტუბულარულ კაპილარებში გადადის.

**2. ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალი ტოტი.** როდესაც ფილტრატი ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალ ტოტში მიედინება, წყლის რეაბსორბცია გრძელდება. აქ სატრანსპორტო ეპითელიუმი კარგად განვლადია წყლისთვის, მაგრამ ნაკლებად განვლადია მარილებისა და მცირე ზომის გახსნილი ნივთიერებებისთვის. იმისთვის, რომ წყალი მილაკიდან გარეთ გამოვიდეს, მილაკის გარშემო მოყოფი ქსოვილური სითხე, მილაკის ფილტრატთან შედარებით ჰიპეროსმოსური უნდა იყოს. ქსოვილური სითხის ოსმოლარობა არ იზრდება ქერქის გარეთა ნაწილიდან თირკმლის ტვინოვანი შრისკენ. ასე რომ, ფილტრატი, რომელიც ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალი ტოტით ტვინოვან შრეში ქვევით მიემართება აგრძელებს წყლის კარგვას სულ უფრო მზარდი ოსმოლარობით, რაც ფილტრატის კონცენტრაციის გაზრდას განაპირობებს.

**3. ჰენლეს მარყუჟის აღმავალი ტოტი.** ფილტრატი, იუქსტამედულარული ნეფრონების შემთხვევაში ტვინოვანი შრის სიღრმეში მარყუჟის წვერს აღწევს, შემდეგ აღმავალი ტოტით, უკან ქერქისკენ ბრუნდება. აღმავალი ტოტის სატრანსპორტო ეპითელიუმი განვლადია მარილების მიმართ, მაგრამ არაგანვლადია წყლისთვის. აღმავალ ტოტს ორი სპეციალიზებული უბანი აქვს: მარყუჟის წვერთან ახლოს მყოფი თხელი სეგმენტი და დისტალური მილის მეზობლად მოთავსებული სქელი სეგმენტი. როდესაც დაღმავალ ტოტში კონცენტრირებული ფილტრატი თხელ სეგმენტს უახლოვდება, ნატრიუმის ქლორიდი განვლადი მილაკიდან ქსოვილურ სითხეში გადადის. ეს მოძრაობა ტვინოვან შრეში ქსოვილური სითხის ოსმოლარობას ზრდის. ფილტრატიდან მარილის ინტენსიური გადასვლა აღმავალი ტოტის სქელ სეგმენტშიც გრძელდება, მაგრამ აქ ეპითელიუმი ნატრიუმის ქლორიდის გადატანას ქსოვილურ სითხეში აქტიური გზით ახორციელებს. მარყუჟის აღმავალ ტოტში ფილტრატის მოძრაობისას მილაკიდან წყლის გამოსვლის გარეშე მარილის დაკარგვა ფილტრატის განზავებას განაპირობებს.

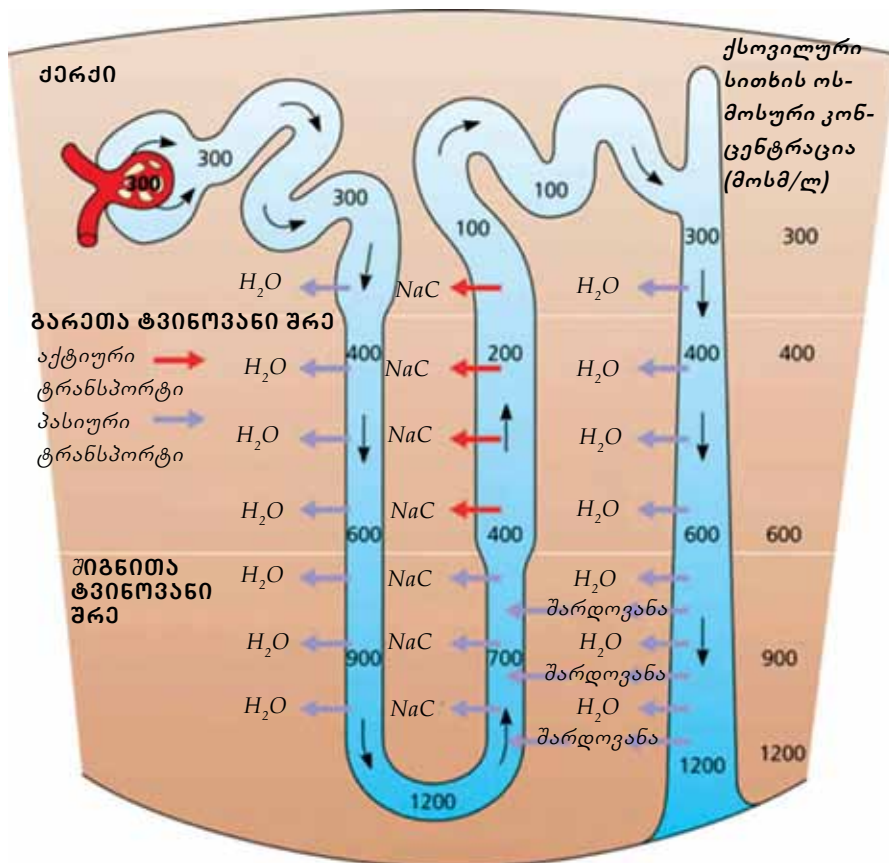
**4. დისტალური მილაკი.** დისტალური მილაკი, აკონტროლებს ფილტრატში გამოყოფილი კალიუმის იონის რაოდენ-

ობას და ნატრიუმის ქლორიდის რეაბსორბციის ინტენსივობას, და ამრიგად მთავარ როლს თამაშობს ორგანიზმის სითხეებში კალიუმის იონისა და ნატრიუმის ქლორიდის კონცენტრაციის რეგულაციაში. პროქსიმალური მილაკის მსგავსად, დისტალური მილაკი ასევე მონაწილეობს იღებს pH-ის რეგულაციაში, ვინაიდან აკონტროლებს წყალბადის იონების სეკრეციას და ბიკარბონატების რეაბსორბციას.

**5. შუამკრები მილაკი.** შემკრებ მილაკს ფილტრატი ტვინოვანი შრიდან თირკმლის ფიალაში გადააქვს. შემკრები მილაკის სატრანსპორტო ეპითელიუმი, ნატრიუმის ქლორიდის აქტიური რეაბსორბციის გზით მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს იმას, შარდით რამდენი მარილი გამოიყოფა. მისი გამტარობის ხარისხი ჰუმორული კონტროლის ქვეშ იმყოფება. ის წყლის გამტარია, მაგრამ არ ატარებს მარილებს ან შარდოვანას. ასე რომ, როდესაც ფილტრატი თირკმლის ოსმოლარობის გრადიენტს გადაკვეთს, ის მზარდად კონცენტრირებული ხდება, რადგანაც ჰიპეროსმოსურ ქსოვილურ სითხეში გადასვლით წყალს კარგავს. შიგნითა ტვინოვან შრეში მილაკი შარდოვანას მიმართ განვლადი ხდება. შარდოვანას მაღალი კონცენტრაციის გამო, ფილტრატში შარდოვანას ნაწილი მილაკიდან გარეთ, ქსოვილურ სითხეში გადადის. ნატრიუმის ქლორიდთან ერთად, აღნიშნული შარდოვანა მონაწილეობს იღებს ტვინოვანი შრის ქსოვილური სითხის ოსმოლარობის შექმნაში. ეს მაღალი ოსმოლარობა კი ძუძუმწოვართა თირკმელს საშუალებას აძლევს, შეინარჩუნოს წყალი ორგანიზმის სითხეებთან შედარებით ჰიპეროსმოსური შარდის გამოყოფისას.

## ▶ **ჯანსუფცია ცუსცი 44.4**

1. გლომერულუსში მიმავალი აფერენტულ არტერიოლაში მყოფი სისხლის წნევის შემცირება, როგორ გავლენას მოახდენდა ბოუმენის კაფსულაში სისხლის ფილტრაციაზე?
2. სხვადასხვა წამალი შემკრები მილაკის ეპითელიუმს ნაკლებად გამტარს ხდის წყლის მიმართ. რა გავლენას მოახდენდა ეს წამლები თირკმლის ფუნქციაზე?
3. თირკმლის ეს ნაწილები ჩამოთვალეთ იმ რიგის მიხედვით, რომლითაც მათში ფილტრატი მოძრაობს: პროქსიმალური მილაკი, ბოუმენის კაფსულა, დისტალური მილაკი, ჰენლეს მარყუჟი.



**▲ სურათი 44.15 როგორ ახდენს ადამიანის თირკმელი შარდის კონცენტრირებას:** ორი-გახსნილი ნივთიერების მოდელი. ორი გახსნილი ნივთიერება მონაწილეობს იღებს ქსოვილური სითხის ოსმოლარულობის შექმნაში. ესენია ნატრიუმის ქლორიდი და შარდოვანა. ჰენლეს მარყუჟი ინარჩუნებს ნატრიუმის ქლორიდის ქსოვილური სითხის გრადიენტს, რომელიც დაღმავალ ტოტში იზრდება და აღმავალში კი მცირდება. შარდოვანა ტვინოვანი შრის ქსოვილური სითხეში შემკრები მილაკიდან დიფუნდირებს (ფილტრატის შარდოვანას უმეტესი ნაწილი შემკრებ მილაკში რჩება და გამოიყოფა). ფილტრატი ქერქსა და ტვინოვან ნაწილს შორის სამ წვერს ქმნის: შემკრებ მილაკში ჯერ ქვევით, მერე ზევით და შემდეგ ისევ ქვევით. როდესაც ფილტრატი შემკრებ მილაკში მიედინება, ოსმოსის გზით დიდი რაოდენობით წყალი მილაკიდან გადადის და გახსნილი ნივთიერებების (მათ შორის შარდოვანას, რომელიც ფილტრატში რჩება) კონცენტრირება ხდება.

## ▶ **ჯანცოცია 44.5**

**ბუბჰმწოჯართა თირკმლის  
უნატი, ოტგანიზმში წყალი  
შეაჯაფოს, ხმელუთჯო მამინადტო  
ცხოჯლომის ოტოტოთი მთაჯატი  
ადაპცაციაა**

ძუძუმწოვრების თირკმლებში კოოპერაციული მოქმედება და ზუსტი განლაგება ჰენლეს მარყუჟებისა და შემკრები მილაკების პასუხისმგებელია ოსმოსური გრადიენტის შექმნაზე, რომელიც შარდის კონცენტრირებას განაპირობებს. მაგრამ მიუხედავად ასეთი მაღალი ორგანიზაციისა, ოსმოსური

განსხვავების შენარჩუნება და ჰიპეროსმოსური შარდის წარმოქმნა შესაძლებელია, მხოლოდ იმით, რომ კონცენტრაციული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ გახსნილი ნივთიერებების გადასატანად მნიშვნელოვანი ენერგია იხარჯება. ნეფრონები – განსაკუთრებით ჰენლეს მარყუჟი – შეიძლება ენერგიის მომხმარებელ პატარა მანქანად განვიხილოთ, რომლის ფუნქციაც არის თირკმელში მაღალი ოსმოლარული უბნის შექმნა, რომელიც შემკრები მილაკის ფილტრატიდან წყლის გამოსატანად იქნება გამოყენებული. ოსმოსურ გრადიენტის შექმნაში ორი მთავარი გახსნილი ნივთიერება მონაწილეობს ნატრიუმის ქლორიდი, რომელიც თირკმლის ტვინოვან შრეში, ჰენლეს მარყუჟებით არის დამარაგებული და შარდოვანა, რომელიც შიგნითა ტვინოვანი შრის შემკრები მილაკის ეპითელიუმში ჟონავს (იხ. სურათი 44.14).

ძუძუმწოვართა თირკმლის, როგორც წყლის შემაკავებელი ორგანოს ფიზიოლოგიის უკეთ გასაგებად, გავყვეთ ფილტრატის დინებას გამოყოფილ მილაკებში, ამჯერად ყურადღებას იმაზე გავამახვილებთ, როგორ ინარჩუნებენ იუქსტამედულარული ნეფრონები ოსმოსურ გრადიენტს, და იყენებენ ამ გრადიენტს ჰიპეროსმოსური შარდის წარმოქმნისთვის (სურათი 44.15). როდესაც ფილტრატი ბოუმენის კაფსულადაც პროქსიმალური მილაკისკენ მიდის მისი ოსმოლარობა, სისხლის მსგავსად 300 მოსმ/ლ-ია. როდესაც ფილტრატი თირკმლის ქერქის პროქსიმალურ მილაკში გადის, წყლისა და მარილების დიდი რაოდენობა რეაბსორბირდება. ასე რომ, ფილტრატის მოცულობა მნიშვნელოვნად მცირდება, მაგრამ მარილების დაკარგვის გამო, მისი ოს-

მოლარულობა თითქმის იგივე რჩება.

როდესაც ფილტრატი ქერქიდან ტვინოვანი ნივთიერებისკენ ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალ ტოტში მოძრაობს, ფილტრატის ოსმოლარობა იზრდება და გახსნილი ნივთიერებები, მათ შორის ნატრიუმის ქლორიდი, უფრო კონცენტრირებული ხდება. ყველაზე მაღალი ოსმოლარობა (დაახლოებით 1200 მოსმ/ლ) ჰენლეს მარყუჟის იდაყვში ფიქსირდება. როდესაც ფილტრატი რკალში შემოუხვევს და აღმავალ ტოტში შედის, რომელიც გამტარია მარილების, მაგრამ არა წყლის მიმართ, მარილების დიფუზია მაქსიმალური ხდება. ასე რომ, ჰენლეს მარყუჟის ორი ტოტი თირკმლის ქსოვილური სითხის ოსმოსურ გრადიენტის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. დაღმავალი ტოტი მარილიან ფილტრატს ქმნის. ნატრიუმის ქლორიდი აღმავალი ტოტიდან შემდეგ დიფუნდირებს რათა თირკმლის ტვინოვანი შრის ქსოვილური სითხის მაღალი ოსმოლარულობა შენარჩუნდეს. ყურადღება მიაქციეთ, რომ ჰენლეს მარყუჟს ურთიერთსაწინააღ-

დეგო დინების სისტემასთან (რომელიც თევზების ლაყუჩებში ჟანგბადის აბსორბციის მაქსიმალიზაციას განაპირობებს და ენდოთერებში სითბოს დაკარგვას ამცირებს; **იხ. სურათი 40.15**) რამდენიმე მსგავსი თვისება აქვს. (**სურათი 42.21**) იმ შემთხვევებში, ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების მექანიზმები ჟანგბადის ან სითბოს, გრადიენტის მიმართულებით პასიურ მოძრაობას წარმოადგენს. ამისგან განსხვავებით, ჰენლეს მარყუჟის ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების მექანიზმი ენერგიას მარყუჟის აღმავალი ტოტის ფილტრაციიდან ნატრიუმის ქლორიდის აქტიური ტრანსპორტისთვის ხარჯავს. ასეთ ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების სისტემას ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების მულტიპლიციერების სისტემას უწოდებენ. ჰენლეს მარყუჟის აღნიშნული სისტემა თირკმლის შიგნით მაღალ მარილის კონცენტრაციას უზრუნველყოფს და თირკმელს საშუალებას აძლევს კონცენტრირებული შარდი წარმოქმნას. რა უშლის ხელს vasa recta-ს კაპილარებს გრადიენტის გაფანტვაში, ნატრიუმის ქლორიდის მაღალკონცენტრირებული სითხის გადატანის შედეგად? ყურადღება მიაქციეთ, **სურათ 44.13**. რომ ვასა რეცტა თავისი დაღმავალი და აღმავალი ძარღვებით, რომლითაც სისხლი თირკმლის ოსმოსური გრადიენტის საწინააღმდეგოდ მოძრაობს. ასევე ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების სისტემაა, როდესაც დაღმავალ ტოტს სისხლი შიდა ტვინოვან შრეში გადააქვს; წყალი სისხლიდან იკარგება და ნატრიუმის ქლორიდი კი მასში დიფუნდირებს. ეს დინებები ბრუნდება, როდესაც სისხლი აღმავალ ტოტში ქერქსიკენ უკან მიემართება და წყალი სისხლში შედის მარილი კი გარეთ დიფუნდირებს. ასე რომ, ვასა რეცტა-ს შეუძლია ოსმოსურ გრადიენტთან ურთიერთქმედების გარეშე თირკმელი საკვები ნივთიერებებით და სხვა მნიშვნელოვანი ნაერთებით მოამარაგოს, რომელიც თირკმელს ჰიპეროსმოსური შარდის გამოყოფის საშუალებას აძლევს.

ჰენლეს მარყუჟის და vasa recta-ს ურთიერთსაწინააღმდეგო დინება საშუალებას იძლევა ქერქსა და ტვინოვან შრეს შორის მკვეთრი ოსმოსური გრადიენტი შენარჩუნდეს. დიფუზიის გზით ნებისმიერი ოსმოსური გრადიენტი გაქრება, თუ მის შესაწარმუნებლად ენერგია არ დაიხარჯა. თირკმელში ეს დანახარჯი ჰენლეს მარყუჟის აღმავალი ტოტის სქელ სეგმენტში ვლინდება, სადაც ნატრიუმის ქლორიდი აქტიური ტრანსპორტის გზით მილაკიდან გარეთ გადის. ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების დადებით მხარეებთან ერთად აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ ეს პროცესი (თირკმლის სხვა აქტიურ სატრანსპორტო სისტემებთან ერთად) მნიშვნელოვანი რაოდენობის ატფ-ის დანახარჯს მოითხოვს და ყველა სხვა ორგანოსთან შედარებით, თირკმელს ზომიდან გამომდინარე, მას ყველაზე მაღალი მეტაბოლური აქტივობა ახასიათებს.

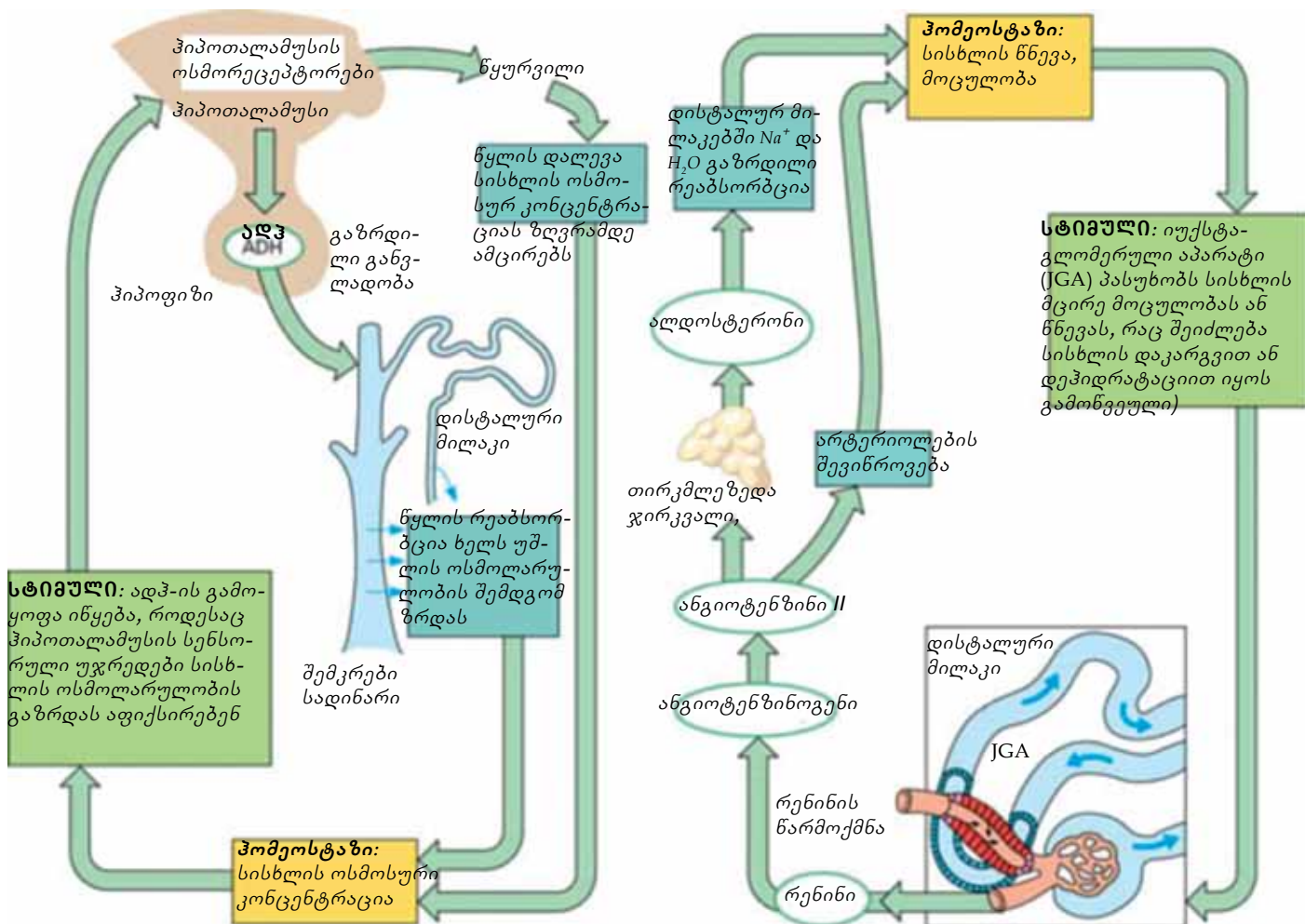
მაშინ, როდესაც ფილტრატი დისტალურ მილაკს აღწევს, ის სხეულის სითხეებთან შედარებით ჰიპოოსმოსური ხდება, რადგანაც აღმავალი ტოტის სქელ უბანში ნატრიუმის ქლორიდის აქტიური ტრანსპორტით გარეთ გადაიტანება. შემდეგ ფილტრატი ისევ ტვინოვანი შრისკენ ჩადის, ამჯერად უკვე შემკრებ მილაკში, რომელიც წყლის მიმართ გამტარია, მარილების მიმართ კი არა. ამის გამო, როდესაც ფილტრატი ქერქიდან ტვინოვანი შრისკენ გადადის და გაზრდილი ოსმოლარულობის ქსოვილურ სითხეს უპირისპირდება, ოსმოსი მისგან წყალს გამოდევნის. ეს იწვევს ფილტრატში მარილების, შარდოვანასა და სხვა გახსნი-

ლი ნივთიერებების კონცენტრირებას. შარდოვანას ნაწილი შემკრები მილაკის ქვედა უბნებში გაჟონავს და შიგნითა ტვინოვანი შრის ქსოვილური სითხის მაღალი ოსმოლარულობის ჩამოყალიბებაში იღებს მონაწილეობას (შარდოვანა დიფუზიის გზით ჰენლეს მარყუჟში უკან ბრუნდება, მაგრამ შემკრებ მილაკში მისი გამოდინება, ქსოვილურ სითხეში შარდოვანას მაღალ კონცენტრაციას განაპირობებს) თირკმლიდან გარეთ გამოსვლამდე, შარდმა შიგნითა ტვინოვან შრეში შეიძლება ქსოვილური სითხის ოსმოლარულობას მიაღწიოს, რომელიც 1200მოსმ/ლ კი შეიძლება იყოს. თუმცა ტვინოვანი შრის ქსოვილური სითხე შარდის იზოოსმოსურია, სისხლთან და სხეულის სხვა ნაწილების ქსოვილურ სითხესთან მიმართებაში ის ჰიპეროსმოსური გამოდის. ეს მაღალი ოსმოსურობა გახსნილ ნივთიერებებს საშუალებას აძლევს, შარდში დარჩნენ და ორგანიზმიდან წყლის უმცირესი დანაკარგით გამოიყონ. იუქსტამედულარული ნეფრონი, შარდის მაკონცენტრირებელი ფუნქციით ხმელეთზე არსებობისთვის უმნიშვნელოვანესი ადაპტაციაა, რაც ძუძუმწოვრებს საშუალებას აძლევს, მარილები და აზოტოვანი ნარჩენები წყლის გაფლანგვის გარეშე მოიშოროს თავიდან. როგორც ვნახეთ, ძუძუმწოვრების თირკმლის უნარი - ჰიპეროსმოსური შარდი წარმოქმნას მთლიანად დამოკიდებულია ქერქისა და ტვინოვან ნაწილში მილაკების და შემკრები სადინების ზუსტ განლაგებაზე. აქედან გამომდინარე, თირკმელი საუკეთესო მაგალითია იმისა, თუ ორგანოს ფუნქცია როგორ მჭიდრო კავშირშია მის სტრუქტურასთან.

## თირკმლის ფუნქციის ბეჭედი

ძუძუმწოვართა თირკმლის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ასპექტი ის არის, რომ მას შეუძლია შარდის მოცულობისა და ოსმოლარულობის რეგულაცია, იმისდამხედვით თუ როგორია ცხოველის მარილებისა და წყლის ბალანსი და შარდის წარმოქმნის სისწრაფე. დიდი რაოდენობის მარილების მიღების და წყლის დეფიციტის შემთხვევაში, ძუძუმწოვრებს შარდისა და მარილების გამოყოფა წყლის უმცირესი დანაკარგით და მცირე მოცულობის ჰიპეროსმოსური შარდის წარმოქმნით შეუძლიათ. მაგრამ თუ მარილების ნაკლებობაა და სითხის მიღება კი ინტენსიურად მიმდინარეობს, თირკმელი წარმოქმნის დიდი მოცულობის ჰიპოოსმოსურ შარდს. ამ ჭარბი წყლის მოცილებას მარილის მცირე დანაკარგით ახერხებს (70მოსმ/ლ განზავებით, რაც ადამიანის სისხლთან შედარებით, რომელიც 300მოსმ/ლ გაცილებით უფრო განზავებულია). ოსმორეგულაციის ფუნქციის ეს ცვალებადობა ნერვული და ჰუმორული კონტროლით მიიღწევა.

წყლის ბალანსის რეგულაციისთვის ერთერთი მნიშვნელოვანი ჰორმონი არის **ანტიდიურეზული ჰორმონი (ADH) (სურათი 44.16 ა)**. ტვინში, ჰიპოთალამუსში წარმოიქმნება და უკანა ჰიპოფიზის საშუალებით გამოიყოფა. ჰიპოთალამუსის ოსმორეცეპტორული ურჯედები სისხლის ოსმოლარულობის მონიტორინგს ახდენენ. როდესაც ის 300მოსმ/ლ უფრო მეტად იზრდება (სავარაუდოდ, ძლიერ მარილიანი საკვების მიღებისა ან მოჭარბებული ოფლიანობისას) სისხლში უფრო მეტი გამოიყოფა და თირკმელს აღწევს. ჰორმონი ეპითელიუმის წყლის მიმართ გამტარობას ზრდის. ეს აძლიერებს წყლის რეაბსორბციას, ამცირებს შარდის მოცულობას და ხელს უშლის



(ა) ანტიდიურეზული ჰორმონი აძლიერებს ორგანიზმში სითხის შენარჩუნებას, რამდენადაც ზრდის თირკმლის მიერ წყლის შეკავებას.

(ბ) რენინ-ანგიოტენზინ-ალდოსტერონის სისტემა (RAAS) იწვევს სისხლის მოცულობისა და წნევის გაზრდას.

▲ **სურათი 44.16 უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმით თირკმლის ჰორმონალური კონტროლი.**

სისხლის ოსმოლარულობის შემდგომ ზრდას. უარყოფითი უკუკავშირის გზით სისხლის დაქვეითებული ოსმოლარულობა ჰიპოთალამუსის ოსმორეცეპტორების მოქმედებას ამცირებს და ნაკლები გამოიყოფა. მაგრამ საჭმელში დამატებითი წყლის მიწოდებამ ან წყლის დაღევამ შეიძლება ოსმოლარულობა უკან 300მოსმ/ლ მდგომარეობას დაუბრუნოს.

ამის საწინააღმდეგოდ, როდესაც ადგილი აქვს წყლის დიდი რაოდენობით მიღებას, მცირდება სისხლის ოსმოლარულობა და ძალიან ცოტა რაოდენობით გამოიყოფა. ეს ამცირებს დისტალური და შემკრები მილაკების განვლადობას. დისტალური მილაკებითა და შემკრები მილაკებით წყლის რეაბსორბცია მცირდება, რაც, თავის მხრივ, განზავებული შარდის წარმოქმნას განაპირობებს (გაზრდილ შარდის გამოყოფას დიურეზი ეწოდება, ეს არის მიზეზი, რის გამოც ჰორმონს, რომელიც ამ მდგომარეობას ეწინააღმდეგება, ანტიდიურეზულ ჰორმონი დაარქვეს). ალკოჰოლმა შეიძლება წყლის ბალანსი დაარღვიოს, ვინაიდან ის ამცირებს -ს გამოყოფას რაც, თავის მხრივ, მოჭარბებულ შარდვას, წყლის დიდი რა-

ოდენობით კარგვასა და დეჰიდრატაციას განაპირობებს (რაც შეიძლება ნაბახუსევის სინდრომის ზოგიერთი სიმპტომის მიზეზი იყოს). სისხლის ოსმოლარულობა, ADH-ს გამოყოფა და თირკმელში წყლის რეაბსორბცია ურთიერთდაკავშირებულია უკუკავშირებითი მარყუჟით, რაც ჰომეოსტაზის სისტემას წარმოადგენს. მეორე მარეგულირებელი მექანიზმი მოიცავს განსაკუთრებულ ქსოვილს, რომელსაც **იუქსტაგლომერულარული აპარატი (JGA)** ეწოდება და, რომელიც, გლომერულუსის მომმარაგებელ აფერენტულ არტერიასთან არის მოთავსებული (**სურათი 44.16 ბ**). როდესაც სისხლის წნევა ან მოცულობა აფერენტულ არტერიოლაში ეცემა (მაგალითად მარტლების შემცირებული რაოდენობით მიღებისას, ან სისხლის დაკარგვისას), ფერმენტი რენინი იწყებს ქიმიურ რეაქციას რომელიც პლაზმის ცილა ანგიოტენზინ I ცილა ანგიოტენზინ II გარდაქმნის. ეს უკანასკნელი მოქმედებს როგორც ჰორმონი და არტერიოლების შევიწროვებით სისხლის წნევას ზრდის, რაც, თავის მხრივ, კაპილარებისკენ (მათ შორის თირკმლის კაპილარებისკენაც) სისხლის გადასვლას ამ-

ცირებს. ანგიოტენზინი II ასევე ასტიმულირებს ნეფრონების პროქსიმალურ მილაკებს, რაც ნატრიუმის ქლორიდისა და წყლის რეაბსორბციას ზრდის. ეს კი ამცირებს შარდში გამოყოფილი მარილებისა და წყლის რაოდენობას და შედეგად ზრდის სისხლის მოცულობასა და წნევას. ანგიოტენზინი II-ს სხვა ეფექტი თირკმელზედა ჯირკვლის სტიმულირებაა, რათა მან ჰორმონი ალდოსტერონი გამოყოფს. ეს ჰორმონი ნეფრონის დისტალურ მილაკზე მოქმედებს და ნატრიუმის იონებისა და წყლის რეაბსორბციას აძლიერებს, რაც შედეგად სისხლის მოცულობასა და წნევას ზრდის. შეჯამების სახით შეიძლება ითქვას, რომ **რენინ-ანგიოტენზინ-ალდოსტერონის სისტემა (RAAS)** არის ჰომეოსტაზურ სისტემაში მოქმედი უკუკავშირის წრედის ნაწილი. სისხლის წნევისა და მოცულობის შემცირება რთავს JGA-დან რენინის გამოყოფას. **ანგიოტენზინ II** და ალდოსტერონის მოქმედების შედეგად სისხლის წნევისა და მოცულობის გაზრდა ამცირებს რენინის გამოყოფას. ADH და RAAS ფუნქცია შესაძლოა გადაჭარბებული მოგვეჩვენოს, მაგრამ ეს არასწორი შეხედულება იქნება. ორივე ზრდის წყლის რეაბსორბციას, მაგრამ ისინი განსხვავებულ ოსმორეგულატორულ პრობლემებს აგვარებენ. გამოყოფა არის სისხლის გაზრდილ ოსმოლარულობაზე პასუხი, რომელიც შეიძლება წყლის ჭარბი დაკარგვის ან არაადეკვატური რაოდენობით მიღების შედეგი იყოს. ვითარება, რომელიც მარილებისა და ორგანიზმის სითხეების დაკარგვას იწვევს – მაგალითად, სხეულის დაზიანება, ან მწვავე დიარეა – სისხლის წნევას ოსმოლარულობის გაზრდის გარეშე შეამცირებს. ეს კი არ გამოიწვევს ადჰ-ის გამოყოფის ცვლილებას, მაგრამ RAAS უპასუხებს სისხლის მოცულობისა და წნევის დაცემას ნატრიუმის იონებისა და წყლის რეაბსორბციის გაზრდით. ADH და RAAS ჰომეოსტაზში ერთმანეთის პარტნიორებს წარმოადგენენ. მხოლოდ თირკმელში წყლის რეაბსორბციის სტიმულირებით ნატრიუმის იონების კონცენტრაციას შეამცირებდა, მაგრამ RAAS სტიმულირება ნატრიუმის იონების რეაბსორბციისა ეხმარება ბალანსის შენარჩუნებაში.

სხვა ჰორმონი არის **ატრიალური ნატრიურული ფაქტორი (ANF)**. ის ეწინააღმდეგება RAAS-ს. სისხლის წნევისა და მოცულობის გაზრდის საპასუხოდ წინაგულის კედელი ANF-ს გამოყოფს. ეს უკანასკნელი აკავებს რენინის გამოყოფას, ამცირებს შემკრები მილაკის მიერ ნატრიუმის ქლორიდის რეაბსორბციას და ამცირებს თირკმელზედა ჯირკვლიდან ალდოსტერონის გამოყოფას. ეს მოქმედება ამცირებს სისხლის წნევასა და მოცულობას. ასე რომ, ADH, RAAS და ANF ქმნიან დახვეწილ სისტემას, რომელიც ამოწმებს, აბალანსებს და არეგულირებს თირკმლის უნარს სისხლის ოსმოლარობა, მარილთა კონცენტრაცია, მოცულობა და წნევა გააკონტროლოს. ზუსტი მარეგულირებელი როლი აქტიური კვლევის საგანია. ძუძუმწოვართა თირკმლის ფუნქციის სწრაფი ცვლილება საშუალებას იძლევა სწრაფად შეეწყოს ოსმორეგულაციისა და გამოყოფის მოთხოვნებს. სამხრეთამერიკული ვამპირი ღამურა ამ ფუნქციური მოქნილობის მაგალითია (**სურათი 44.17**). ამ სახეობის ღამურები დიდი ზომის ფრინველებითა და ძუძუმწოვრებით იკვებებიან. მსხვერპლის კანში ჩასარჭობად ისინი ბასრ კბილებს იყენებენ და შემდეგ ჭრილობიდან სისხლს წოვენ. ღამურას ნერწყვში არსებული ანტიკოაგულანტი სისხლის შედედებას უშლის ხელს, მაგრამ ჩვეულებრივ მათი მსხვერპლი სერიოზულად არ ზიანდება.



▲ **სურათი 44.17** ვამპირი ღამურა (*Desmodus rotundus*), უნიკალური გამომყოფი სისტემის მქონე ძუძუმწოვარი.

რამდენადაც ვამპირი ღამურები, შესაბამისი მსხვერპლის მოსაძებნად დიდი ხნის განმავლობაში გრძელ მანძილზე დაფრინავენ, ისინი ცდილობენ მსხვერპლისგან რაც შეიძლება მეტი სისხლი ამოწოვონ, იმდენად ბევრიც კი, რომ შეიძლება ძალიან დამძიმდნენ და ფრენაც ვეღარ შეძლონ. ღამურას თირკმლები, უშუალოდ კვების დროს, შეთვისებული წყლის დიდი რაოდენობას განზავებული შარდის სახით გამოყოფენ, რამაც ერთ საათში სხეულის 24% შეიძლება შეადგინოს.

მას შემდეგ, რაც აფრენისთვის საკმარის წონას დაკარგავენ, ღამურებს შეუძლიათ თავის გამოქვაბულს დაუბრუნდნენ, სადაც ისინი მთელ დღეს ატარებენ. საცხოვრებელში ღამურა რეგულაციის განსხვავებულ პრობლემებს ეჯახება. მისი საკვები ძირითადად ცილაა, რომელიც შარდოვანას დიდი რაოდენობას წარმოქმნის – მაგრამ საცხოვრებელში მყოფ ღამურას არ აქვს საშუალება საკმარისი წყალი მოიპოვოს, რათა შარდის განზავება მოხდეს. ამის ნაცვლად, მათი თირკმელი იწყებს მცირე რაოდენობით მაღალკონცენტრირებული (4,600 მოსმ/ლ) შარდის წარმოქმნას. ეს მნიშვნელოვანი შეგუებულობაა იმისთვის, რომ მოხდეს რაც შეიძლება მეტი წყლის დამარაგება. ვამპირი ღამურების უნარი დიდი რაოდენობით განზავებული შარდის მაგივრად მცირე რაოდენობის ძალიან ჰიპეროსმოსური შარდი წარმოქმნას, საკვების წყაროსთან ადაპტაციის მნიშვნელოვანი ნაწილია.

## ▶ განცოცხალი ცისტი 44.5

1. როგორ გავლენას ახდენს ალკოჰოლი სხეულის წყლის ბალანსზე?
2. როგორ გავლენას ახდენს მარილიანი საკვების მიღება თირკმლის ფუნქციაზე?
3. განსაზღვრეთ ჰენლეს მარყუჟის ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით დინების მსგავსი მახასიათებლის ფუნქციური შედეგი.

კუპუმნოვრები

ძუძუმწოვრებს, რომლებიც ყველაზე უფრო ჰიპეროსმოსურ შარდს გამოყოფენ (მაგალითად, როგორც არის ავსტრალიური მხტუნავი თავი და უდაბნოს სხვა ცხოველები) განსაკუთრებულად გრძელი ჰენლეს მარყუჭი აქვთ. გრძელი მარყუჭი თირკმელში მკვეთრ ოსმოსურ გრადიენტს ინარჩუნებს, რის შედეგადაც, შარდი, რომელიც შემკრები მილაკით ქერქოვანი შრიდან ტვინოვანში გადადის, ძლიერ კონცენტრირებული ხდება. ამისგან განსხვავებით, თავის, ანდატრასა და წყლის სხვა ცხოველებს, რომლებიც დროის დიდ ნაწილს მტკნარ წყალში ატარებენ და იშვიათად



კენგურუსებრი ვირთავა (*Dipodomys spectabilis*)

ეჯახებიან დეჰიდრატაციის პრობლემებს, ძალიან მოკლე მარყუჭიანი ნეფრონები აქვთ და შესაბამისად გაცილებით უფრო ნაკლებად შეუძლიათ კონცენტრირებული შარდის წარმოქმნა. ხმელეთის ძუძუმწოვრებს, რომლებიც ნესტიან პირობებში ცხოვრობენ საშუალო სიგრძის ჰენლეს მარყუჭი აქვთ და, შესაბამისად, აქვთ იმის უნარი, რომ წყლისა და უდაბნოს ცხოველებთან შედარებით საშუალო კონცენტრაციის შარდი გამოიმუშაონ.



თახვი (*Castor canadensis*)

ფრინველები და სხვა რეპტილიები



დიდი კალიფორნიული გუგული (*Geococcyx californianus*)

ფრინველებს ძუძუმწოვრების მსგავსად, იუქსტამედულარული ნეფრონების მქონე თირკმლები აქვთ, რაც ორგანიზმში წყლის შენახვას უწყობს ხელს. მაგრამ ფრინველების ნეფრონებს გაცილებით უფრო მოკლე ჰენლეს მარყუჭი აქვთ. ამის გამო, ფრინველების თირკმლებს არ შეუძლიათ შარდის ძლიერ კონცენტრირება ისეთ ოსმოლარობამდე, სადამდეც ძუძუმწოვრების თირკმელი ახერხებს. თუმცა ისინი ჰიპეროსმოსურ შარდს წარმოქმნიან, ფრინველების მთავარი ადაპტაცია წყლის შენარჩუნების მიზნით, შარდის მჟავას გამოყოფაა,

რომელიც აზოტოვანი ცვლის ნარჩენი ნაერთია და რომელიც შეიძლება მშრალი სახით გამოიყოს, რის ხარჯზეც შარდის მოცულობა მცირდება. სხვა რეპტილიების თირკმლებს მხოლოდ კორტიკალური ნეფრონები აქვთ და ორგანიზმის სითხეების იზოოსმოსურ შარდს წარმოქმნიან. კლოაკას ეპითელიუმი (იხილეთ თავი 34) წყლის რეაბსორბციას ფეკალური მასიდან და შარდიდან ახდენს და წყლის შეკავებაში ეხმარება. ფრინველების მსგავსად, ხმელეთის ქვეწარმავალთა უმეტესობა აზოტოვან ნარჩენებს შარდის მჟავას სახით გამოყოფს.



უდაბნოს იგუანა (*Dipsosaurus dorsalis*)

მტკნარი წყლის თევზები და ამფიბიები



ცისარტყელასებრი კალმახი (*Oncorhynchus mikiss*)

იმის გამო, რომ მტკნარი წყლის თევზები გარემოსთან მიმართებაში მათი ეპითელიუმით, წყლის რეაბსორპციის პრობლემები არიან მათ ჭარბიტიის გზით ინახავენ.

წყლის გამოყოფა გამუდმებით ესაჭიროებათ. ძუძუმწოვრებისა და ფრინველებისგან განსხვავებით, მტკნარი წყლის თევზები დიდი რაოდენობის განზავებულ შარდს წარმოქმნიან. მათი თირკმლები, რომელთაც დიდი რაოდენობით ნეფრონები აქვთ, ფილტრატს მაღალი სიხშირით წარმოქმნიან. მტკნარი წყლის თევზები მარილების შენარჩუნებას დისტალურ ტუბულულებში მათი რეაბსორბციის გზით

ახერხებენ, ტოვებენ რა წყალს მილაკებში. ამფიბიების თირკმლები მტკნარი წყლის თირკმლების მსგავსად მუშაობს. მტკნარ წყალში, ამფიბიების კანი აქტიური ტრანსპორტის გზით მარილების აკუმულირებას ახდენს და თირკმლები განზავებულ შარდს გამოყოფენ. ხმელეთზე, სადაც დეჰიდრატაცია ოსმორეგულაციის მთავარ პრობლემას წარმოადგენს ბაყაყები

ბაყაყი (*Rana temporaria*)



ზღვის ქვლოვანი თევზები



ჩრდილოეთის ლურჯფარფილანი თინუსი (*Thunnus thynnus*)

იქიდან გამომდინარე, რომ ისინი გარემოს მიმართ ჰიპეროსმოსურები არიან, ძვლოვანი თევზები კარგავენ წყალს და საბინადრო გარემოდან ჭარბ მარილს იღებენ. გარემოს ეს გამოწვევები, მათი მტკნარი წყლის ნათესავებისთვის არსებული გამოწვევების საწინააღმდეგოა. მტკნარი წყლის თევზებისგან განსხვავებით, ზღვის ძვლოვან თევზებს უფრო მცირე რაოდენობით და პატარა ნეფრონები აქვთ, რომლებსაც დისტალური ტუბულულები არ ახასიათებთ. ამასთან ერთად, ზღვის თევზების უმეტესობის თირკმლებს გლომერულები ან საერთოდ არ აქვთ, ან მცირე ზომის აქვთ. ასე რომ, ზღვის თევზების თირკმლებს ფილტრაციის დაბალი სიხშირე ახასიათებთ და მცირე რაოდენობით შარდს წარმოქმნიან. თირკმლების მთავარი ფუნქცია ისეთი ორმუხტიანი იონების მოცილებაა, როგორიცაა კალციუმის, მაგნიუმის, სულფატის იონები. მათ თევზი ზღვის წყლის გამუდმებით დაღვების გზით იღებს. ზღვის თევზები ამ იონების სეკრეციას ნეფრონის პროქსიმალურ მილაკში ახდენენ და შემდეგ შარდთან ერთად გარეთ გამოყოფენ.

## ▶ კონცეფცია 44.6

### სხვადასხვა საატესტო გარემოში ხერხემლიანთა თირკმლის განსხვავებული ადაპტაციები განვითარდა

ხერხემლიანი ცხოველების წარმომადგენლები ძალიან მრავალფეროვან გარემოში სახლობენ, დაწყებული წვიმიანი ტყეებით დამთავრებული უდაბნოებითა და ძალიან მარილიანი წყლიან გარემოდან დაწყებული დამთავრებული მაღალი მთის უაღრესად განზავებულ ტბებით. ხერხემლიანი ცხოველების თირკმლის ნეფრონის სტრუქტურისა და ფუნქციის მრავალფეროვნება საშუალებას იძლევა ოსმორეგულაციის სხვადასხვა გარემოში. ხერხემლიანთა თირკმლის ადაპტაციები კარგად ვლინდება ძლიერ განსხვავებული საარსებო გარემოს მქონე სახეობათა შედარებით, ან ერთ გარემოში მოხინაღრე

სხვადასხვა ჯგუფის წარმომადგენელთა შედარებით (სურათი 44.18).

ყველა ცხოველში, შინაგანი ფიზიოლოგიური მანქანები, რომლებსაც ჩვენ ორგანოებს ვუწოდებთ, მუდმივად მუშაობენ და ინარჩუნებენ გახსნილი ნივთიერებების, წყლისა და აზოტოვანი ნარჩენების ბალანსს. დეტალები, რომელიც ჩვენ ამ თავში მიმოვიხილეთ, მხოლოდ ზედაპირულ ინფორმაციას იძლევიან იმ რთულ ნერვულ და ჰუმორული მექანიზმების შესახებ, რომლებიც აღწერილი ჰომეოსტაზის რეგულაციაში იღებენ მონაწილეობას. შემდეგი თავი ჰომეოსტაზის ჰორმონალურ კონტროლს მიმოიხილავს.

## ▶ კონცეფცია ცისტი 44.6

1. როგორ მიუთითებს ნეფრონთა რიცხვი და სიგრძე თევზების საცხოვრებელზე? რა ინფორმაციას იძლევა ეს შარდის წარმოქმნის სიხშირეზე?

## 44-ე თავის შემაწმენა

### ძირითადი კონცეფციების შემაწმენა

## ▶ კონცეფცია 44.1

### ოსმორეგულაციით წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების შეთვისებისა და გამოყოფის დამალანსება ზოტციოდება

- ▶ ოსმორეგულაცია ორგანიზმის შინაგან სითხეებსა და გარემოს შორის გახსნილი ნივთიერებების კონტროლირებულ მოძრაობაზეა დამოკიდებული. ასევე დამოკიდებულია წყლის გადაადგილებაზე, რომელიც ოსმოსით ხორციელდება.
- ▶ **ოსმოსი** უჯრედებს ოსმოსურ ნამატსა და წყლის დაკარგვას შორის ბალანსის შენარჩუნება სჭირდებათ. სხვადასხვა გარემოში წყლის შეთვისება და დაკარგვა ოსმორეგულაციის განსხვავებული მექანიზმებით ბალანსდება.
- ▶ **ოსმოსის გამოწვევები** ოსმოკონფორმერები, რომლებიც მხოლოდ ზღვის ცხოველებია, მათ გარემოსთან მიმართებაში იზოოსმოსურები არიან და არ არეგულირებენ შინაგან ოსმოლარობას. ოსმორეგულატორები ენერგიას ჰიპეროსმოსურ ან ჰიპოოსმოსურ გარემოში წლის შეთვისებასა და

გაცემაზე ხარჯავენ. ზღვის ორგანიზმებს შორის, უხერხემლოების უმეტესობა ოსმოკონფორმერია. ზვიგენების ოსმოლარობა ზღვის წყალთან შედარებით ცოტა უფრო მაღალია, რადგანაც ისინი შარდს აგროვებენ. ზღვის ძვლოვანი თევზები წყალს ჰიპეროსმოსურ გარემოში კარგავენ და ზღვის წყალს სვამენ. ზღვის ხერხემლიანები ზედმეტ მარილს რექტალური ჯირკვლებით, ლაყუჩებით, მარილის გამოყოფი ჯირკვლებით ან თირკმლებით გამოყოფენ. მტკნარი წყლის ცხოველები, რომლებიც ჰიპოოსმოსური გარემოდან წყალს მუდმივად შეითვისებენ, განზავებულ შარდს გამოყოფენ. დაკარგული მარილი კვებით ან ლაყუჩების მიერ იონთა შეთვისებით ჩაინაცვლება. ხმელეთის ცხოველები გამოშრობას ქცევითი ადაპტაციებით, წყლის შემნახველი გამოყოფი ორგანოებით და წყლის მაღალი შემცველობის საკვების მიღებით ან წყლის სმით ებრძვიან. წყლის გარემოში დროებით მოხინაღრე ცხოველები შეიძლება ანჰიდრობიოტურები იყვნენ.

- ▶ **სატრანსპორტო ეპითელიუმი** წყლის ბალანსი და ნარჩენების გამოყოფა სატრანსპორტო ეპითელიუმზეა დამოკიდებული. განსაკუთრებული ეპითელიური უჯრედების შრეები გახსნილი ნივთიერებების გადაადგილებას არეგულირებენ, რომელიც ნარჩენების გამოყოფისთვის და ორგანიზმის სითხეების ცვალებადობის რეგულირებისთვის არის საჭირო.

## კონცეფცია 44.2

### ცხოვლის აზოტოვანი ნარჩენები მათ ფილტვანგზსა და საცხოვრებელ გატარების აიბეკლავს

- ▶ **აზოტოვანი ნარჩენების ფორმები** ცილებისა და ნუკლეინის მჟავების მეტაბოლიზმი ნარმოქმნის ამონიუმს, ტოქსიკურ პროდუქტს, რომელიც სამი ფორმით გამოიყოფა. წყლის ცხოველების უმეტესობა ამონიუმს სხეულის ზედაპირიდან ლაყუჩების ეპითელიუმით გამოყოფს. ძუძუმწოვრებისა და ზრდასრული ამფიბიების უმეტესობის ღვიძლი ამონიუმს ნაკლებად ტოქსიკურ შარდოვანად გარდაქმნის, რომელიც თირკმლებისკენ გადაიტანება, კონცენტრირდება და წყლის მინიმალური დანაკარგით გამოიყოფა. შარდის მჟავა უხსნადია და ხმელეთის ლოკოკინების, მწერების და ბევრი რეპტილიას მათ შორის ფრინველების შარდში გამოიყოფა.
- ▶ **ევოლუციის და გარემოს გავლენა აზოტოვან ნარჩენებზე** გამოყოფილი აზოტოვანი ნარჩენების ტიპი დამოკიდებულია ცხოველის საცხოვრებელ გარემოსა და მის ევოლუციურ ისტორიაზე. გამოყოფილი აზოტოვანი ნარჩენების რაოდენობა დაკავშირებულია ენერგეტიკულ ბიუჯეტთან.

## კონცეფცია 44.3

### სხვადასხვა გამომყოფი სისტემები მილაკოვანი თემის ჯაბიაციებში

- ▶ **გამყოფის პროცესი** გამომყოფი სისტემების უმეტესობა შარდს, ორგანიზმის სითხეების ფილტრატის დამუშავების შედეგად წამოქმნის. გამომყოფი სისტემების მთავარი ფუნქციებია ფილტრაცია (სხეულის სითხეების წნევით გაფილტვრა და ფილტრატის წარმოქმნა) და შერჩევითი რეაბსორბციით (ფილტრატიდან საჭირო გახსნილი ნივთიერებების უკან შეწოვა) ფილტრატიდან შარდის წარმოქმნა და სეკრეცია (სხეულის სითხეებიდან ფილტრატში ტოქსინებისა და სხვა გახსნილი ნივთიერებების დამატება).
- ▶ **გამომყოფი სისტემის მიმოხილვა** ექსტრაცელულარული სითხე ჭიაყელას ცეცხლის-ნათურის სისტემის პროტონეფრიდიებში იფილტრება; ეს მილაკები განზავებულ სითხეს გამოყოფენ და ოსმორეგულაციაში იღებენ მონაწილეობას. ჭიაყელას ყოველ სეგმენტს ღია დაბოლოებული მეტანეფრიდიუმი აქვს. ეს არის მილაკი, რომელიც ცელომურ სითხეს კრებს და გამოსაყოფად განზავებულ შარდს წარმოქმნის. მწერებში ჰემოლიმფიდან აზოტოვანი ნარჩენების გამოყოფა და ოსმორეგულაცია მალპიგის მილაკებით ხორციელდება. მწერები შედარებით მშრალ გამოსაყოფ მასას წარმოქმნიან, რაც ხმელეთზე არსებობისთვის მნიშვნელოვანი ადაპტაციაა. თირკმელები ხერხემლიანთა გა-

მომყოფი ორგანოებია და მონაწილეობენ ოსმორეგულაციაში და გამოყოფაში,

## კონცეფცია 44.4

### ნეფრონი და მასთან დაკავშირებული სისხლძარღვები ბუბრეფრეზია თირკმლის ერთეულს წარმოადგენენ

- ▶ **ნეფრონისა და მასთან დაკავშირებული სტრუქტურების აგებულება და ფუნქციები** გამომყოფი მილაკები (რომელიც ნეფრონისა და შემკრები მილაკებისგან შედგება) და მასთან დაკავშირებული სისხლძარღვები თირკმელს ქმნიან. ფილტრაცია ხორციელდება, როდესაც სისხლიდან სითხე, წნევით ბოუმენის კაფსულის გლობერულუსებში გადადის. მცირე ზომის მოლეკულების ფილტრაცია შერჩევით ხასიათს არ ატარებს და ამიტომაც ბოუმენის კაფსულის ფილტრატი მცირე ზომის მოლეკულების ნარევს შეიცავს, რომელიც სისხლის პლაზმის ანარეკლია. რამდენიმე ნეფრონის სითხე შემკრებ მილაკში მიედინება. შარდსაწვეთი შარდს თირკმლის თასიდან შარდის ბუშტისკენ აგზავნის.
- ▶ **სისხლის ფილტრატიდან შარდამდე: დანვრელებითი მიმოხილვა** ნეფრონები სისხლის შემადგენლობას ფილტრაციით, სეკრეციითა და რეაბსორბციით აკონტროლებენ. პროქსიმალურ მილაკში სეკრეცია და რეაბსორბცია მნიშვნელოვნად ცვლის ფილტრატის მოცულობასა და შემადგენლობას. ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალი ტოტი გამტარია წყლის მიმართ, მაგრამ არ ატარებს მარილებს. წყალი ოსმოსის გზით, ჰიპეროსმოსური ქსოვილური სითხისკენ გადადის. მარილები, ჰენლეს მარყუჟის აღმავალი ტოტის კონცენტრირებული ფილტრატიდან გარეთ გადადის. დისტალური მილაკი წამყვან როლს თამაშობს სხეულის სითხეების კალიუმის იონებისა და ნატრიუმის ქლორიდის კონცენტრაციის რეგულაციაში. შემკრები მილაკს ფილტრატი ტვინოვანი შრის გავლით თირკმლის თასში გადაქვს და ნატრიუმის ქლორიდის რეაბსორბციაში იღებს მონაწილეობას.

## კონცეფცია 44.5

### ბუბრეფრეზია თირკმლის უნაბი თბგანიზმში წყალი დააჯავს, ხმელეთზე მომინაბრ ცხოველების მთავარი ადაპტაციაა

- ▶ **გახსნილი ნივთიერებების გრადიენტი და წყლის შენახვა** ძუძუმწოვრების თირკმელში ჰენლეს მარყუჟისა და შემკრები მილაკების ზუსტი განლაგება და კოპერაციული მუშაობა იმ ოსმოსური გრადიენტის წარმოქმნაზე პასუხისმგებელი, რომელიც შარდის კონცენტრირებას განაპირობებს. ურთიერთსაწინააღმდეგო დინების მრავალჯერადი

სისტემა, რომელიც ჰენლეს მარყუჟს მოიცავს, თირკმლის შიგნით მარილის მაღალ კონცენტრაციას ინარჩუნებს და ეს კი კონცენტრირებული შარდის წარმოქმნის საშუალებას იძლევა. შემკრები მილაკი, რომელიც წყლის მიმართ გამტარია, მაგრამ მარილებს არ ატარებს ფილტრატს თირკმლის ოსმოსური გრადიენტის მიმართულებით გადაადგილებს და ოსმოსის ზემოქმედებით ფილტრატიდან ბევრი წყალი გადმოდის. შარდოვანა, რომელიც ტვინოვანი შრის გავლისას შემკრები მილაკიდან გარეთ გამოდის ნატრიუმის ქლორიდთან ერთად ოსმოსური გრადიენტის შექმნაში იღებს მონაწილეობას, რომელიც თირკმელს საშუალებას აძლევს წარმოქმნას სისხლთან შედარებით ჰიპეროსმოსური შარდი.

- **თირკმლის ფუნქციის რეგულაცია** შარდის ოსმოლარობა თირკმელში ნერვული და ჰუმორული სისტემებით კონტროლირებადი წყლისა და მარილების რეაბსორბციით რეგულირდება. ეს რეგულაცია მოიცავს ანტიდიურეზული ჰორმონის (ADH), რენინ-ანგიოტენზინ-ალდოსტერონის სისტემის (RAAS) და ატრიალური ნატრიურეტიული ფაქტორის (ANF) მოქმედებას.

## კონცეფტია **44.6**

### სხვადასხვა საზინადრო გატყვით სტრუქტურული თირკმლის განსხვავებული ადაპტაციები განვითარდა

- ნეფრონის ფორმა და ფუნქციები ხერხემალიანთა სხვადასხვა ჯგუფში უშუალოდ არის დაკავშირებული ცხოველის საცხოვრებელ გარემოსა და ოსმორეგულაციის მოთხოვნებთან. უდაბნოს ცხოველები, რომლებიც ყველაზე უფრო ჰიპეროსმოსურ შარდს გამოყოფენ, განსაკუთრებით გრძელ ჰენლეს მარყუჟს შეიცავენ. ხოლო ტენიან გარემოში ან წყალში მოზინადრე ცხოველებს მოკლე მარყუჟი აქვთ და ნაკლებად კონცენტრირებულ შარდს წარმოქმნიან. თუმცა ფრინველებს ჰიპეროსმოსური შარდის გამოშვების უნარი აქვთ, მთავარი ადაპტაცია მათში მაინც აზოტოვანი ნარჩენების შარდის მჟავას სახით გამოყოფის უნარია. ხმელეთის რეპტილიების უმეტესობა ასევე შარდის მჟავას გამოყოფს. მტკნარი წყლის თევზები და ამფიბიები დიდი რაოდენობის და ძლიერ განზავებულ შარდს წარმოქმნიან. ზღვის ძვლოვანი თევზების თირკმლებს ფილტრაციის დაბალი სიხშირე აქვთ და ძალიან მცირე რაოდენობის შარდს გამოყოფენ.

## შეამოწმეთ საკუთარი ცოდნა თვითშეფასება

1. ჭიკაელას მეტანეფრიდიასგან განსხვავებით, ძუძუმწოვრების ნეფრონი:

- ა. უშუალოდ არის დაკავშირებული კაპილარულ ქსელთან;
  - ბ. შარდს მილაკის შიგნით სითხის შემადგენლობის შეცვლით წარმოქმნის.
  - გ. ფუნქციონირებს ოსმორეგულაციაში და აზოტოვანი ნარჩენების გამოყოფაში;
  - დ. გადაამუშავებს სისხლს და არა ცელომურ სითხეს;
  - ე. აქვს სატრანსპორტო ეპითელიუმი;
2. ქვემოთ ჩამოთვლილთაგან, რომელი არ არის ნორმალური პასუხი, ადამიანებში სისხლის ოსმოლარულობის გაზრდაზე?
    - ა. შემკრები მილაკის წყლის მიმართ განვლადობის გაზრდა;
    - ბ. წყურვილის გაძლიერება;
    - გ. ჰიპოფიზის მიერ ადჰ გამოყოფა;
    - დ. უფრო განზავებული შარდის წარმოქმნა;
    - ე. შემცირებული შარდის წარმოქმნა;
  3. თირკმლის ტვინოვანი შრის მაღალი ოსმოლარულობა შენარჩუნებულია ქვემოთ ჩამოთვლილი ყველა გზით გარდა ერთისა. რომელია ეს ერთი?
    - ა. ჰენლეს მარყუჟის აღმავალი ტოტიდან მარილის დიფუზია;
    - ბ. აღმავალი ტოტის ზედა უბნიდან მარილის აქტიური ტრანსპორტი;
    - გ. იუქსტამედულარული ნეფრონის სივრცითი მოწყობა;
    - დ. შარდოვანას დიფუზია შემკრები მილაკიდან;
    - ე. ჰენლეს მარყუჟის დაღმავალი ტოტიდან მარილების დიფუზია.
  4. მონიშნეთ ის წყვილი, რომელშიც აზოტოვანი ნარჩენი არასწორედ არის დაწყვილებული მისი გამოყოფის სარგებელთან:
    - ა. შარდოვანა – ამონიუმთან შედარებით დაბალი ტოქსიკურობა;
    - ბ. შარდის მჟავა – შესაძლოა პრეციპიტატის სახით დამარაგდეს;
    - გ. ამონიუმი – წყალში ძლიერ ხსნადი;
    - დ. შარდის მჟავა – გამოყოფისას წყლის მინიმალური დანაკარგი;
    - ე. შარდოვანა – წყალში ძლიერ უხსნადი;
  5. მტკნარი წყლის კიბოსნაირების ორგანიზმის სითხეებს აქვთ უფრო დაბალი ოსმოლარობა, ვიდრე ნათესაურად ახლოს მყოფ ზღვის კიბოსნაირების ორგანიზმის სითხეებს. ჩამოთვლილთაგან, რომელი სარგებელი მოაქვს მტკნარი წყლის კიბოსნაირების შემცირებულ ოსმოლარულობას?
    - ა. ორგანიზმის სითხეებში წყლის შესვლის სიხშირის გაზრდა;
    - ბ. წყლის დაკარგვის სიხშირის შემცირება;
    - გ. ოსმორეგულაციაში ენერგიის დანახარჯის შემცირება;
    - დ. მარილების დანაკარგის სიხშირის გაზრდა;
    - ე. გარემოდან მარილების შეთვისების სიხშირის შემცირება;

6. ნეფრონში მიმდინარე პროცესებიდან, რომელია ყველაზე ნაკლებად სელექტური?
  - ა. სეკრეცია;
  - ბ. რეაბსორბცია;
  - გ. აქტიური ტრანსპორტი;
  - დ. ფილტრაცია;
  - ე. ჰენლეს მარყუჟის მიერ მარილების გადატუმბვა;
7. ქვემოთ ჩამოთვლილ ცხოველთაგან, რომელი წარმოქმნის ყველაზე მცირე მოცულობის შარდს?
  - ა. ზღვის ზვიგენი;
  - ბ. ორაგული მტკნარ წყალში;
  - გ. ზღვის ძვლოვანი თევზი;
  - დ. მტკნარი წყლის ძვლოვანი თევზი;
  - ე. ნიკარაგუას მტკნარწყლიანი ტბის მცხოვრები ზვიგენი;
8. აფრიკული ფილტვიანი თევზი, რომელიც ხშირად მტკნარ წყლიდან სტაგნატურ ავზებშია ნაპოვნი, აზოტოვან ნარჩენებს შარდოვანას სახით გამოყოფს. რა არის ამ ადაპტაციის უპირატესობა?
  - ა. შარდოვანას სინთეზირებისთვის უფრო ნაკლები ენერგიაა საჭირო ვიდრე ამონიუმის სინთეზირებისთვის. პატარა სტაგნატური ავზები არ უზრუნველყოფს საკმარის წყალს ამონიუმის განსაზავებლად.
  - ბ. მაღალტოქსიკური შარდოვანა ავზს არახელსაყრელს ხდის პოტენციური კონკურენტებისთვის;
  - დ. შარდოვანა ქმნის ნალექს და არ გროვდება გარშემომყოფ წყალში.
  - ე. სისხლში შარდოვანას წარმოქმნა თევზს გარემოსთან მიმართებაში ჰიპოოსმოსურს ხდის.
9. ჩამოთვლილ სახეობებთაგან, ბუნებრივი გადარჩევა რომელში შეუწყობს ხელს იუქსტამედულარული ნეფრონის ყველაზე მაღალი პროპორციით განვითარებას?
  - ა. მდინარის ნავი;
  - ბ. ტროპიკულ წვიმიან ტყეებში მოხინადრე თავგების სახეობები;
  - გ. ზომიერ ფართოფოთლოვან ტყეებში მოხინადრე თავგების სახეობები;
  - დ. უდაბნოში მცხოვრები თავგის სახეობები;
  - ე. თახვი;
10. შაქრიანი დიაბეტის (diabetes insipidus) დროს წარმოიქმნება დიდი რაოდენობით განზავებული შარდი. ქვემოთ ჩამოთვლილთაგან, რომელია აღნიშნულ მდგომარეობასთან შესაბამისობაში?
  - ა. შარდში ნატრიუმის მაღალი კონცენტრაცია;
  - ბ. მცირე რაოდენობით ADH-ის წარმოქმნა;
  - გ. ADH-ის ჭარბი წარმოქმნა;

- დ. ალდოსტერონის ჭარბი წარმოქმნა;
- ე. ანგიოტენზინ II ჭარბი წარმოქმნა;

## უძლუფი კაჟი

ხერხედიანებისა და მწერების ევოლუციური წარმატება ხმელეთზე დიდწილად მათ ოსმორეგულაციის უნარზეა დამოკიდებული, ცირკულაციის თვალსაზრისით და ფიზიოლოგიური მექანიზმებით, რომელიც სხეულში წყლის შეკავებას უზრუნველყოფს ანატომიურად შეადარეთ მალპიგის მილაკები ნეფრონს

## მეცნიერული კვლევა

მერიამის კენგურუ ვირთაგვები (*Dipodomys merriami*) ჩრდილოეთ ამერიკის აღმოსავლეთ ნაწილის მკვიდრები არიან, სადაც ისინი განსხვავებულ საარსებო გარემოში ბინადრობენ. დაწყებული ნესტიანი, გრილი ტყეებიდან, დამთავრებული კონტინენტის ძალიან ცხელი და მშრალი ადგილებით. ადგილობრივ პოპულაციებზე მოქმედმა ბუნებრივმა გადარჩევამ მერიამის კენგურუ ვირთაგვების პოპულაციებში წყლის შეკავების განსხვავებული მექანიზმები წარმოქმნა. წყლის აორთქლებით დაკარგვის სიხშირესთან მიმართებაში, მშრალ და ნესტიან გარემოში მოხინადრე პოპულაციებისთვის ჩამოაყალიბეთ ჰიპოთეზა. აორთქლებული წყლის სენსორის გამოყენებით როგორ შეამოწმებდით თქვენს ჰიპოთეზას?

## მეცნიერება, ფიქცია და საზოგადოება

თირკმლები, წარმატებით გადანერგილი პირველი ორგანოებია. დონორს შეუძლია ერთი თირკმლით ნორმალური სიცოცხლე გააგრძელოს, რაც შესაძლებლობას იძლევა, რომ ადამიანმა ნათესავებს ან მსგავსი ქსოვილების მქონე უცხო ადამიანებს თირკმელი გადაუნერგოს. ზოგიერთ ქვეყანაში, ღარიბი ადამიანები თირკმლებს ტრანსპლანტაციისთვის ყიდ-იან. რა ეთიკური საკითხებია დაკავშირებული ორგანოების კომერციასთან?

# 45

## ჰორმონები და ენდოკრინული სისტემა



▲ სურათი 45.1 პეპელა (Anise swallowtail)  
ახლანდელ გამოცემა თვისი ქუპრიდან.

### ბიბლიოთეკის კონცეფციები

- 45.1** ენდოკრინული და ნერვული სისტემები ცხოველების ფიზიოლოგიური პროცესების რეგულაციაში მოქმედებენ ინდივიდუალურად და ერთობლივად
- 45.2** ჰორმონები და სხვა ქიმიური სიგნალები უკავშირდება სამიზნე უჯრედების რეცეპტორებს, რომლებიც დასაბამს აძლევენ სპეციფიკურ უჯრედულ პასუხებს
- 45.3** ჰიპოთალამუსი და ჰიპოფიზი ხერხემლიანების ენდოკრინული სისტემის მრავალი ფუნქციის ინტეგრაციას ახდენენ
- 45.4** არაჰიპოფიზური ჰორმონები უწყობენ ხელს მეტაბოლიზმს, ჰომეოსტაზს, განვითარებას და ქცევის რეგულაციას
- 45.5** უხერხემლოთა მარეგულირებელ სისტემები მოიცავენ ენდოკრინული და ნერვული სისტემების ურთიერთქმედებას

### შესავალი

#### ორგანიზმის შიდა მანძილზე მოქმედი ბიოლოგიური პროცესები

სახლკარო კატების კნაილსა და მოზარდების უხასიათობას ადამიანები ჰორმონების მოქმედებით ხსნიან. აშშ-ში მილიონზე მეტი დიაბეტიით დაავადებული ადამიანი იღებს ჰორმონ ინსულინს. ზოგიერთი ჰორმონი გამოიყენება კოსმეტიკაში კანის სიგლუვის შესანარჩუნებლად ან საქონლის გამოსაკვებად, ცხიმოვანობის გაზრდის მიზნით. ეს ძლიერი ნივთიერებები ჩართული არიან მნიშვნელოვან ტრანსფორმაციებშიც. ზრდის პერიოდში პეპლები (სურათი 45.1) განიცდიან სხეულის ფორმის სრულ ცვლილებას — მეტამორფოზს, რაც ჰორმონებით რეგულირდება. შინაგანი კავშირები, რომლებიც ირთვებიან ჰორმონების ზემოქმედებით მწერის ზრდასულ ორგანიზმის ჰორმონულ განვითარებას განაპირობებს.

ცხოველური ჰორმონი (ბერძნულიდან ჰორმან - ამაგზნებელი) წარმოადგენს ქიმიურ სიგნალს, რომელიც გამოიყოფა უჯრედ გარეთა სითხეში, გადაიტანება მიმოქცევის სისტემაში (სისხლში ან ჰემოლიმფაში) და სხეულში მარეგულირებელ მექანიზმებს გადასცემს. ჰორმონს შეუძლია მიაღწიოს ორგანიზმის ყველა ნაწილს, მაგრამ მხოლოდ გარკვეული ტიპის — სამიზნე უჯრედები არიან მზად საპასუხოდ. ამგვარად, მოცემული ჰორმონი სისხლის ნაკადში მოძრაობის დროს ინვესტს განსაზღვრულ პასუხებს - მაგალითად, ცვლილებებს მეტაბოლიზმის მსვლელობაში — თავის სამიზნე უჯრედებზე მოქმედებისას, მაშინ, როდესაც სხვა ტიპის უჯრედზე ეს ჰორმონი გავლენას არ ახდენს.

ამ თავში აღწერილი იქნება თუ როგორ მიესადაგება ბიოლოგიური მაკონტროლებელი

სისტემების ფუნქციონირების ძირითადი პრინციპები ჰორმონების მოქმედებას. ყურადღება გამახვილდება ჰორმონებზე, რომლებიც ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას უწყობს ხელს. 46-ე და 47-ე თავებში განხილული იქნება ჰორმონების როლი ზრდის, განვითარებისა და რეპროდუქციის რეგულაციაში. ამ თავში გაეცნობით ხერხემლიანების ჰორმონების მთავარ ტიპებს, ორგანიზმში მათი ფორმირების ადგილს და მთავარ ეფექტებს. გარდა ამისა, განხილდება შესაბამისი მარეგულირებელი მექანიზმები უხერხემლოებში.

### კონცეფცია 45.1

#### ენდოკრინული და ნაგებობის სისტემები ცხოველების ფიზიოლოგიური პოტენციალის ბიოლოგიაში მოქმედებენ ინდივიდუალურად და ერთობლივად

ცხოველებს შინაგანი კომუნიკაციის და რეგულაციის ორი სისტემა აქვთ — ნერვული და ენდოკრინული. ნერვულ სისტემაში, რომელსაც განვიხილავთ 48-ე თავში, მაღალი სიჩქარის ელექტრული სიგნალები სპეციალიზებული უჯრედების - ნეირონების საშუალებით გადაიგზავნება. სწრაფი სიგნალები

არეგულირებენ გარემოს მოულოდნელი ცვლილებების საპასუხოდ ორგანიზმის ნაწილების რეაქციას, მაგალითად, ხელის მკვეთრ აწევას ცხელი საგნიდან, ან გუგების გაფართოვებას ბნელ ოთახში შესვლისას.

ცხოველის ჰორმონების გამომყოფი უჯრედები ერთიანად ქმნიან **ენდოკრინულ სისტემას**. ჰორმონები ახდენენ შენელებულ, მაგრამ ხანგრძლივად მოქმედ პასუხების კოორდინაციას ისეთ სტიმულებზე, როგორიცაა სტრესი, დეჰიდრატაცია და სისხლში გლუკოზის დაბალი დონე. ჰორმონები არეგულირებს აგრეთვე განვითარების ხანგრძლივ პროცესებს, სხეულის სხვადასხვა ნაწილის ინფორმირებით, რა სისწრაფით გაიზარდოს ან როდის განავითარდეს ის ნიშან-თვისებები, რომლებიც განასხვავებს მამრს მდედრისაგან ან ახალგაზრდას ზრდასრულისგან. ჰორმონების გამომყოფ ორგანოებს ანუ **ენდოკრინულ ჯირკვლებს** მიაკუთვნებენ უსაღინარო ჯირკვლებს, ვინაიდან ისინი ქიმიურ მესენჯერებს პირდაპირ უჯრედგარე სითხეში გამოყოფენ. აქედან ქიმიური ნივთიერებები სისხლის მიმოქცევის სისტემაში გამოიყოფა დიფუზიის გზით.

## ენდოკრინული და ნერვული სისტემების ურთიერთქმედება

მიუხედავად საკმარისი განსხვავებისა ენდოკრინულ და ნერვულ სისტემებს შორის, ამ ორ მარეგულირებელ სისტემაში გამავალი რეალური ზღვარი მაინც ბუნდოვანია. კერძოდ, გარკვეული სპეციალიზებული ნერვული უჯრედები, ცნობილი როგორც **ნეიროსეკრეტორული უჯრედები**, უჯრედგარე სითხის გავლით ჰორმონებს სისხლში გამოყოფენ. ისეთ განსხვავებულ ცხოველებში, როგორიცაა მწერები და ხერხემლიანები, თავის ტვინის ნაწილი შეიცავს ნეიროსეკრეტორულ უჯრედებს. ჰორმონებს, რომლებსაც გამოყოფენ ნეიროსეკრეტორული უჯრედები, ზოგჯერ ნეიროჰორმონებს უწოდებენ, რაც მათ ენდოკრინული ჯირკვლების მიერ გამოყოფილი „კლასიკური“ ჰორმონებისგან განასხვავებენ.

რამდენიმე ქიმიური ნივთიერება ასრულებს როგორც ჰორმონის როლს ენდოკრინულ სისტემაში, ასევე ქიმიური სიგნალის როლს ნერვულ სისტემაში. მაგალითად, ეპინეფრინი, ხერხემლიანების ორგანიზმში ფუნქციონებს როგორც ე.წ. „თავდასხმა-თავდაცვის“ („fight-or-flight“) ჰორმონი (გამოიყოფა თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერებით, ენდოკრინული ჯირკვლით) და როგორც ნეიროტრანსმიტერი, ლოკალური ქიმიური სიგნალი, რომელიც გადასცემს მესიჯს ნერვულ სისტემაში (იხ. თავი 48). გარდა ამისა, ნერვული სისტემა მონაწილეობს ზოგიერთი ხანგრძლივი პასუხის რეგულაციაში – მაგალითად, ბევრი ცხოველის დღე-ღამური და რეპროდუქციული ციკლების კონტროლში – ხშირად, ენდოკრინული ჯირკვლების სეკრეციის გაზრდით ან შემცირების გზით. ამგვარად, თუმცა ენდოკრინული და ნერვული სისტემები ანატომიურად განსხვავდება, ისინი რიგი ფიზიოლოგიური პროცესების რეგულაციაში ურთიერთქმედებენ.

## მაკონტროლდებული გზები და უკუკავშირების მატყუქები

განვიხილოთ მე-40 თავში მოყვანილი ბიოლოგიური მაკონტროლებელი სისტემების ფუნდამენტური კონცეპციები და გამოვიყენოთ ისინი ჰორმონულ რეგულაციაში. რეცეპტორი ან სენსორი შეიგრძნობს სტიმულს, მაგალითად, სისხლში კალციუმის დონის ცვლილებას და აგზავნის ინფორმაციას მაკონტროლებელ ცენტრში. შესული ინფორმაციის შედარების შემდეგ ნორმასთან ანუ „მოცემულ“ სიდიდესთან, მაკონტროლებელი ცენტრი აგზავნის სიგნალს, რომელიც წარმართავს ეფექტორის პასუხს. ენდოკრინულ და ნეიროენდოკრინულ გზებში გამოსული სიგნალი, წოდებული ეფერენტულ სიგნალად, არის ჰორმონი ან ნეიროჰორმონი, რომელიც განსაზღვრულ ეფექტორულ ქსოვილზე მოქმედებს და სპეციფიკურ ფიზიოლოგიურ ან განვითარებასთან დაკავშირებულ ცვლილებებს იწვევს.

**სურათი 45.2**-ზე ნაჩვენებია მარტივი ჰორმონული გზის სამი ტიპი, რომელიც მაკონტროლებელი სისტემის ამ ძირითად ფუნქციურ კომპონენტებს შეიცავს. სურათზე არ არის ნაჩვენები რთული ნეიროენდოკრინული გზები, სადაც ერთი ენდოკრინული ქსოვილით გამოყოფილი ჰორმონი მოქმედებს მეორე ენდოკრინულ ქსოვილზე და აკონტროლებს მის მიერ სხვადასხვა ჰორმონის გამოყოფასა და შემდეგ მათ სამიზნე ქსოვილზე მოქმედებას. წინამდებარე, ან სხვა თავებში შეისწავლით დაახლოებით 20 სხვადასხვა ჰორმონს, რომლებიც ახორციელებენ ამ ზოგადი ტიპის ერთერთ მარტივ ან რთულ რეგულაციის ტიპს.

მაკონტროლებელი გზის მეორე ზოგადი მახასიათებელი არის უკუკავშირის მარყუჟი, რომელიც პასუხს საწყის სტიმულთან აკავშირებს. უარყოფით უკუკავშირში ეფექტორული პასუხი საწყის სტიმულს ასუსტებს იქამდე, სანამ პასუხი წყდება. სხვადასხვა ცოცხალ არსებაში ასეთი უკუკავშირის მექანიზმი ეწინააღმდეგება სისტემის მიერ მკვეთრ რეაგირებას მძაფრი ფლუქტუაციების რეგულირებით. **უარყოფითი უკუკავშირი** მოქმედებს მრავალი ენდოკრინული და ნერვული მექანიზმის მეშვეობით, განსაკუთრებით კი ის ჰომეოსტაზის შენარჩუნებაშია ჩართული (იხ. თავი 40). ამ თავში, მოგვიანებით, ჩვენ გამოვიკვლევთ, თუ როგორ მონაწილეობს უარყოფითი უკუკავშირი სისხლში კალციუმისა და გლუკოზის დონის ჰორმონულ კონტროლში.

უარყოფითი უკუკავშირის საპირისპიროდ, რომელიც ასუსტებს სტიმულს, დადებითი უკუკავშირი აძლიერებს მას და პასუხის გაზრდასაც იწვევს. დადებითი უკუკავშირის მაგალითია ნეიროჰორმონული გზა, რომელიც არეგულირებს ძუძუს დერიდის რძის გამოყოფას (**იხ. სურ. 45.2 ბ**). წოვით მოძრაობები ასტიმულირებს სენსორულ ნერვულ უჯრედებს ძუძუს დერილებში. შესაბამისი ნერვული სიგნალები ჰიპოთალამუსის მაკონტროლებელ ცენტრში აღწევს. ჰიპოთალამუსიდან გამოსული სიგნალი იწვევს ნეიროჰორმონ ოქსიტოცინის გამოყოფას უკანა ჰიპოფიზიდან. შემდეგ ოქსიტოცინი სარძევე ჯირკვლებიდან რძის გამოყოფას განაპირობებს. რძის გამოყოფა, თავის მხრივ, წოვით მოძრაობებს და გზის სტიმულაციას აძლიერებს იქამდე, სანამ ბავშვი არ დაკმაყოფილდება.

## კონცეფცია 45.1

1. რით განსხვავდება ნეიროჰორმონები „კლასიკური“ ჰორმონებისგან? რით ემსგავსება ერთმანეთს?
2. განსხვავებული ბიოლოგიური მაკონტროლებული სისტემები ზოგადი მახასიათებლებითაა წარმოდგენილი: რეცეპტორი/სენსორი, მაკონტროლებელი ცენტრი, ეფერენტული სიგნალი და ეფექტორი. სქემატურად გამოსახეთ ამ კომპონენტების განლაგება მარტივ ენდოკრინულ გზაში და მარტივ ნეიროჰორმონულ გზაში.
3. ახსენით, უარყოფითი უკუკავშირისგან განსხვავებით, დადებით უკუკავშირს რატომ არ აქვს ჰორმონული გზების ზოგადი მახასიათებლები, რომელიც ხელს უწყობს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას.

## კონცეფცია 45.2

### ჰორმონები და სხვა ქიმიური სიგნალები უკავშირდება სამიზნე უჯრედების რეცეპტორებს, რომლებიც დასაბამს აძლევს სპეციფიკურ უჯრედულ პასუხებს

ჰორმონები ორგანიზმის შორ მანძილზე მოქმედი ქიმიური რეგულატორებია. ისინი მთელ ორგანიზმში სამიზნე უჯრედებს ინფორმაციას სისხლის ნაკადის გზით გადასცემენ. სხვა ქიმიური სიგნალები, რომლებსაც ლოკალურ რეგულატორებს უწოდებენ, ინფორმაციას სეკრეტორული უჯრედის ახლოს მდებარე სამიზნე უჯრედებსავე ატარებენ. გარდა ამისა, არის სხვა ქიმიური სიგნალები, ე.წ. ფერომონები, რომლებსაც ინფორმაცია გადააქვთ სახეობის სხვადასხვა ინდივიდს შორის, მაგალითად მენწყილის მისაზიდად გამრავლებისათვის. ამ თავში, როგორც უკვე ვახსენეთ, შევხებით ჰორმონებს (და ნეიროჰორმონებს), რომლებიც რეპროდუქციაში პირდაპირ არ არიან ჩართული.

ხერხემლიანებში, როგორც ჰორმონი, მოლეკულების სამი მთავარი კლასი ფუნქციონირებს: ცილები და პეპტიდები (მცირე ზომის პოლიპეპტიდები, რომლებიც შეიცავს 30-მდე ამინომჟავას), ამინომჟავებიდან წარმოებული ამინები და სტეროიდები. მრავალი ცილა/პეპტიდი და ამინური ჰორმონი წყალში ხსნადია, ხოლო სტეროიდული ჰორმონი — წყალში უხსნადი.

მიუხედავად მათი ქიმიური ბუნებისა, ნებისმიერი მოლეკულის სიგნალის გადაცემა სამ მნიშვნელოვან ეტაპს მოიცავს: რეცეპცია, სიგნალის ტრანსდუქცია და პასუხი (იხ. მე-11 თავი).

სიგნალის რეცეპცია გულისხმობს სასიგნალო მოლეკულის სამიზნე უჯრედთან ან უჯრედზე მოთავსებულ სპეციფიკურ რეცეპტორულ ცილასთან დაკავშირებას. ყოველ სასიგნალო მოლეკულას აქვს განსაზღვრული ფორმა, რომლის ამოცნობა ამ სიგნალის რეცეპტორებს უნდა შეეძლოს. რეცეპტორები მოთავსებული უნდა იყოს სამიზნე უჯრედის პლაზმურ მემბრანაში ან უჯრედის შიგნით. სასიგნალო მოლეკულის დაკავშირება რეცეპტორულ ცილასთან იწვევს სამიზნე უჯრედში სიგნალის ტრანსდუქციას, რომელიც თავის მხრივ იწვევს პასუხს — ცვლილებას უჯრედის ქცევაში. უჯრედი, რომელსაც არ აქვს რეცეპტორები განსაკუთრებული ქიმიური სიგნალისთვის, ამ სიგნალს არ პასუხობს.

ახლა უფრო დეტალურად შევხებით სხვადასხვა ტიპის ქიმიური სიგნალებით გამოწვეულ სიგნალის ტრანსდუქციასა და უჯრედულ პასუხებს.

### წყალში ხსნადი ჰორმონების უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორები

წყალში ხსნადი ჰორმონების რეცეპტორების უმეტესობა პლაზმურ მემბრანაზე არის მოთავსებული (სურათი 45.3). ჰორმონების დაკავშირება თავის რეცეპტორებთან იწვევს სიგნალის ტრანსდუქციის გზის გააქტივებას. ამ დროს ადგილი აქვს უჯრედული ცილების ცვლილებების რიგს, რომელიც უჯრედგარე ქიმიურ სიგნალს სპეციფიკურ უჯრედში და პასუხად გარდაქმნის. ჰორმონზე და სამიზნე უჯრედზე დამოკიდებულებით პასუხი შეიძლება იყოს: ფერმენტის აქტივაცია, ცვლილება მოლეკულების შთანთქმასა ან სეკრეციაში, ან ციტოქინეზის გადანაწილება. ზოგიერთი უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორებიდან სიგნალის ტრანსდუქცია აქტივებს ცილებს ციტოპლაზმაში, რომლებიც შემდეგ გადაადგილდება ბირთვში და პირდაპირ ან არაპირდაპირ გზით არეგულირებს სპეციფიკური გენების ტრანსკრიფციას.

ადრეული მონაცემები უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორების როლის შესახებ სიგნალის ტრანსდუქციის გზების ჩართვაში, მიღებულია გამოკვლევებით თუ როგორ ასტიმულირებს ჰორმონი ეპინეფრინი გლიკოგენის დაშლას გლუკოზად (იხ. თავი 11). სხვა მტკიცებულება უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორების როლის შესახებ არის ბაყაყის კანის ფერის ცვლილებები, ადაპტაცია, რომელიც ბაყაყს ცვალებადი განათების დროს მასკირებაში ეხმარება. კანის უჯრედები, ე.წ. მელანოციტები, ციტოპლაზმურ ორგანოებში - მელანოსომებშია მოთავსებული და მუქ ყავისფერ პიგმენტ მელანინს შეიცავს. ბაყაყის კანი ღია შეფერილობისაა, როდესაც მელანოსომების კლასტრები უჯრედის ბირთვის გარშემოა შემჭიდროებული და უფრო მუქი შეფერილობისაა, როდესაც მელანოსომები ციტოპლაზმაშია გაშლილი. პეპტიდი - მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონი მელანოსომების განლაგებას და, ამგვარად, ბაყაყის კანის შეფერილობას აკონტროლებს. მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონის დამატება პიგმენტის შემცველი უჯრედების გარემომცველ ინტერსტიციალურ სითხეში მელანოსომების გაფანტვას იწვევს. მიუხედავად ამისა, მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონის პირდაპირი მიკროინექცია ცალკეულ მელანოციტში არ იწვევს



(ა) მარტივი ენდოკრინული გზა.



(ბ) მარტივი ნეიროჰორმონული გზა.



(გ) მარტივი ნეიროენდოკრინული გზა.

▲ **სურათი 45.2** მარტივი ჰორმონული მაკონტროლებელი გზების ძირითადი პატერნები. თითოეულ გზაში, რეცეპტორ/სენსორი (ციხფერი) ავლენს ცვლილებას ზოგიერთ შინაგან და გარეგან სტიმულში და ატყობინებს მაკონტროლებელ ცენტრს (ოქროსფერი). მაკონტროლებელი ცენტრი აგზავნის ეფერენტულ სიგნალს — ჰორმონს (წითელი წრეები), ან ნეიროჰორმონს (წითელი კვადრატები). ენდოკრინული უჯრედი ასრულებს რეცეპტორის და მაკონტროლებელი ცენტრის ფუნქციებს.

მელანოსომის დისპერსიას — რაც ამტკიცებს, რომ ჰორმონ-სა და ზედაპირულ რეცეპტორს შორის ურთიერთქმედება საჭიროა ჰორმონის მოქმედებისთვის.

ცალკეულ ჰორმონს შეუძლია გამოიწვიოს სხვადასხვა პასუხი სამიზნე უჯრედებში ჰორმონისთვის განსხვავებული რეცეპტორებით, განსხვავებული სიგნალების ტრანსდუქციული გზებით და/ან განსხვავებული ეფექტორული ცილებით. განვიხილოთ ეპინეფრინის მრავალგვარი ეფექტები ორგანიზმის პასუხების ჩამოყალიბებისას ხანმოკლე სტრესზე (სურათი 45.4). მაგალითად, ღვიძლის უჯრედები და ჩონჩხის კუნთების მომმარაგებელი სისხლძარღვების გლუვი კუნთები შეიცავს ეპინეფრინის β ტიპის რეცეპტორებს, მაშინ, როდესაც წვრილი ნაწლავების სისხლძარღვების გლუვი კუნთები ეპინეფრინის α ტიპის რეცეპტორებს შეიცავს. ეს ქსოვილები განსხვავებულად პასუხობენ ეპინეფრინს. ის იწვევს სისხლის ნაკადის შემცირებას საჭმლის მომნელებელ ტრაქტში

და გლუკოზის მიწოდების გაზრდას ჩონჩხის დიდ კუნთებში. ეს ეფექტები კრიტიკულ ვითარებაში ორგანიზმს სწრაფ რეაგირებაში ეხმარება.

## ლიპიდებში ხსნადი ჰორმონების უჯრედშიდა რეცეპტორები

პირველი მონაცემები იმის თაობაზე, რომ ზოგიერთი ჰორმონის რეცეპტორი მოთავსებულია სამიზნე უჯრედის შიგნით, ხერხემლიანების ჰორმონების ესტროგენის და პროგესტერონის შესწავლის შედეგადაა მიღებული. ეს სტეროიდული ჰორმონები ძუძუმწოვართა უმრავლესობის, მათ შორის ადამიანის, მდედრის ნორმალური განვითარებისა და რეპროდუქციული სისტემის ფუნქციონირებისთვისაა აუცილებელი. 1960-იანი წლების დასაწყისში მკვლევრების მიერ ნაჩვენები იყო, რომ ესტროგენი და პროგესტერონი მდედრი ვირთაგვას რეპროდუქციული ტრაქტის

უჯრედების ბირთვებში გროვდება. ესტროგენი არ გროვდება იმ ქსოვილების უჯრედებში, რომლებიც ესტროგენს არ პასუხობს. ამ დაკვირვებების საფუძველზე ნაგარაუდევია, რომ სტეროიდული ჰორმონების მიმართ მგრძნობიარე უჯრედები შიდა რეცეპტორულ მოლეკულებს შეიცავს, რომლებიც ამ ჰორმონებს სპეციფიკურად უკავშირდება.

მკვლევრებმა მოგვიანებით იმ უჯრედშიდა ცილების იდენტიფიცირება მოახდინეს, რომლებიც, როგორც სტეროიდული ჰორმონების, თიროიდული ჰორმონების და ვიტამინ -ს ჰორმონული ფორმის რეცეპტორებად ფუნქციონირებენ. ყველა ეს ჰორმონი მცირე ზომის, უმეტესად არაპოლარული (ჰიდროფობური) მოლეკულაა, რომელიც უჯრედული მემბრანების ჰიდროფობურ შიდა ნაწილში ადვილად დიფუნდირებს. ჩვეულებრივ, უჯრედშიდა რეცეპტორები სამიზნე უჯრედში სიგნალის ტრანსდუქციის მთლიან ამოცანას ასრულებს. ქიმიური სიგნალი ააქტიურებს რეცეპტორს, რომელიც შემდეგ უჯრედის პასუხს უშუალოდ იწვევს. თითქმის ყველა შემთხვევაში ლიპიდებში ხსნადი ჰორმონით გააქტივებული უჯრედშიდა რეცეპტორი ტრანსკრიპციის ფაქტორს წარმოადგენს, ხოლო პასუხი გენის ექსპრესიის ცვლილებაში ვლინდება.

უჯრედშიდა რეცეპტორების უმრავლესობა ლოკალიზებულია ბირთვში (**სურათი 45.3 ბ**) იმ დროს, როდესაც ისინი ჰორმონის მოლეკულებს უკავშირდება. ჰორმონი მოლეკულები სისხლის მიმოქცევის სისტემიდან უჯრედგარეთა სითხის გავლით უჯრედში დიფუნდირებს. წარმოქმნილი ჰორმონ-რეცეპტორული კომპლექსები, თანმიმდევრულად უკავშირდება უჯრედის დნმ-ის სპეციფიკურ საიტებს და სფეციფიკური გენების ტრანსკრიფციას ასტიმულირებს. თუმცა, სტეროიდული ჰორმონების ზოგიერთი რეცეპტორი დაკავებულია ციტოპლაზმაში ჰორმონის იქ არ არსებობის შემთხვევაშიც. სტეროიდული ჰორმონის დაკავშირება მის ციტოპლაზმურ რეცეპტორთან ჰორმონ-რეცეპტორულ კომპლექსს ქმნის, რომელსაც ბირთვში გადაადგილება და სპეციფიკური გენების ტრანსკრიპციის სტიმულირება შეუძლია (**იხ. სურათი 11.6**).

ორივე შემთხვევაში, ჰორმონით სტიმულაციის საპასუხოდ წარმოქმნილი მრნმ-ის ტრანსლაცია ციტოპლაზმაში ხდება და რის შედეგად ახალი ცილები წარმოიქმნება. მაგალითად, ესტროგენი იწვევს მდედრი ფრინველების რეპროდუქციული სისტემის უჯრედებში ოვალბუმინის, კვერცხის ცილაში მთავარი ცილის, დიდი რაოდენობით სინთეზს.

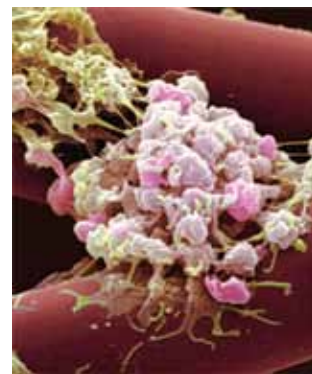
ისევე როგორც ჰორმონებს, რომლებიც უკავშირდება უჯრედის ზედაპირულ რეცეპტორებს და ჰორმონებს, რომლებიც უჯრედშიდა რეცეპტორებს უკავშირდება, სხვადასხვა სამიზნე უჯრედში განსხვავებული ეფექტების გამოწვევა შეუძლია. ესტროგენი, რომელიც ასტიმულირებს ფრინველების რეპროდუქციულ სისტემაში ოვალბუმინის წარმოქმნას, ფრინველების ღვიძლში სხვა ცილების წარმოქმნას იწვევს. ერთსა და იმავე ჰორმონს სხვადასხვა სახეობაში შესაძლოა განსხვავებული ეფექტები ჰქონდეს. მაგალითად, ფარისებრი ჯირკვლით გამოყოფილი თიროქსინი ადამიანებსა და სხვა ხერხემლიანებში მეტაბოლიზმს არეგულირებს. თუმცა, ბაყაყებში თიროქსინს დამატებითი ეფექტები აქვს: ის იწვევს თავკომბალას მეტამორფოზს პატარა ბაყაყად, ასტიმულირებს თავკომბალას კუდის განვითარებას და სხვა ცვლილებებს.

## ლოკალური ბეგულაციებით პათაჯინული სიგნალების გადაცემა

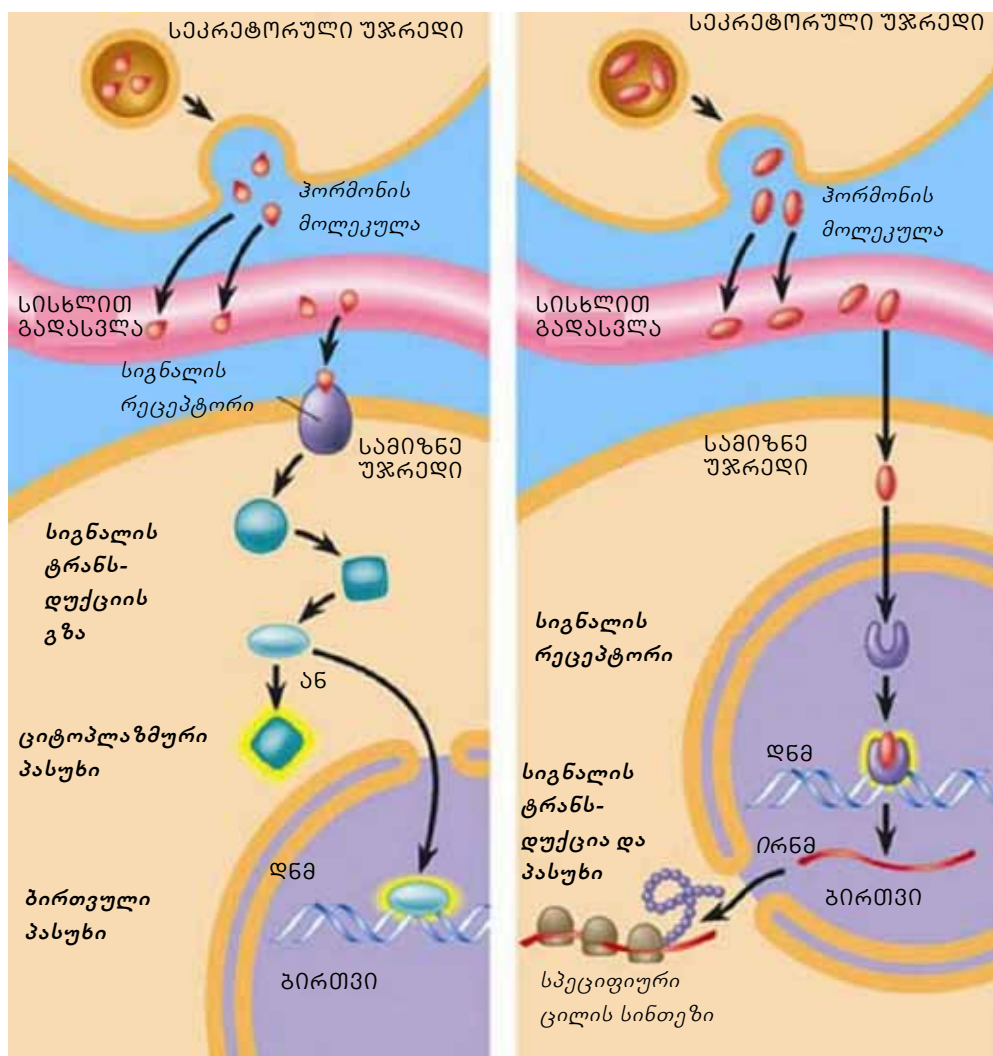
სანამ გავაგრძელებთ ენდოკრინულ სისტემასა და ჰორმონულ რეგულაციაზე მსჯელობას, მოკლედ განვიხილოთ ლოკალური რეგულატორები. ჰორმონებით შორ მანძილზე ენდოკრინული სიგნალების გადაცემის საპირისპიროდ, ლოკალური რეგულატორები სიგნალებს მოსაზღვრე უჯრედებს შორის გადასცემენ. აღნიშნული პროცესი წარმოადგენს სიგნალის პარაკრინულ გადაცემას (**იხ. სურათი 11.4**). გამოყოფის შემდეგ, ლოკალური რეგულატორები ახლომდებარე სამიზნე უჯრედებზე ნამებში ან მილინამებშიც კი მოქმედებენ. ისინი უჯრედულ პასუხებს ჰორმონებზე უფრო სწრაფად იწვევენ. ზოგიერთ ლოკალურ რეგულატორს აქვს უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორები; სხვებს - უჯრედშიდა რეცეპტორები. ლოკალური რეგულატორების დაკავშირება მათ სპეციფიკურ რეცეპტორებთან იწვევს სამიზნე უჯრედებში იგივე პროცესებს, რასაც ჰორმონები იწვევენ (**იხ. სურათი 45.3**).

ქიმიური ნაერთების რამდენიმე ტიპი ფუნქციონირებს როგორც ლოკალური რეგულატორი. ბევრი ნეიროტრანსმიტერი, საკვანძო მნიშვნელობის ლოკალური რეგულატორები ნერვულ სისტემაში ამინომჟავის დერეგულაცია. პეპტიდ/ცილოვან ლოკალურ რეგულატორებს ეკუთვნიან ციტოკინები (cytokines), რომლებიც მონაწილეობს იმუნურ პასუხებში (იხილეთ 43-ე თავი), და **ზრდის ფაქტორების** უმეტესობა, რომლებიც უჯრედის პროლიფერაციას და დიფერენციაციას ასტიმულირებენ. ზრდის ფაქტორები უჯრედგარე არეში უნდა ხვდებოდეს, რათა მრავალი ტიპის უჯრედის ნორმალური ზრდა, დაყოფა და განვითარება არეგულიროს. ზრდის სხვადასხვა ფაქტორის ფუნქციები უჯრედის დაყოფისა და ქსოვილების განვითარების რეგულაციაში სხვა თავებშია განხილულია.

სხვა მნიშვნელოვანი ნივთიერებები უჯრედის დაყოფისა და ქსოვილების განვითარების რეგულაციაში სხვა თავებშია განხილულია. აზოტის ოქსიდი (NO). როდესაც სისხლის ჟანგბადის დონე ეცემა, სისხლძარღვების კედლების ენდოთელური უჯრედები ასინთეზებს და გამოყოფს NO-ს. აზოტის ოქსიდი ააქტიურებს ფერმენტს, რომელიც ადუნებს მოსაზღვრე გლუვი კუნთის უჯრედებს. თავის მხრივ, ეს პროცესი აფართოვებს სისხლძარღვებს და აუმჯობესებს სისხლის ნაკადს ქსოვილებში. აზოტის ოქსიდი ასევე მონაწილეობს მამრების სასქესო ფუნქციებში პენის-



**▲ სურათი 45.5 თრომბოციტების აგრეგაცია, რომელიც ნაწილობრივ რეგულირდება პროსტაგლანდინებით.** სისხლძარღვის კედლის დაზიანების შემდეგ, თრომბოციტები (ვარდისფერი და ალისფერი) წარმოქმნიან ზედაპირს და ადჰერირება ერთმანეთზე, როგორც ნაჩვენებია სკანირებული ელექტრონული მიკროსკოპით მიღებულ ამ ფერად სურათზე.



(ა) რეცეპტორი პლაზმურ მემბრანაში.

(ბ) რეცეპტორი უჯრედის ბირთვში.

▲ **სურათი 45.3** ჰორმონული სიგნალიზაციის მექანიზმები: განხილვა. (ა) წყალში ხსნადი ჰორმონები უკავშირდება რეცეპტორის ცილას სამიზნე უჯრედის ზედაპირზე. ეს ურთიერთქმედება ქმნის სიგნალის ტრანსდუქციულ გზას, რომელიც იწვევს ცვლილებებს ციტოპლაზმის ფუნქციებში ან ბირთვის გენის ტრანსკრიფციაში. (ბ) ლიპიდში ხსნადი ჰორმონი გაივლის სამიზნე უჯრედის პლაზმურ მემბრანას და უკავშირდება უჯრედშიდა რეცეპტორს ციტოპლაზმაში ან ბირთვში. სიგნალ-რეცეპტორის კომპლექსი მოქმედებს, როგორც ტრანსკრიფციის ფაქტორი, ჩვეულებრივ გენის ექსპრესიის გამააქტიურებელი.

ში სისხლის ნაკადის გაზრდითა და ერექციის წარმოქმნით. მაღალი რეაქტიულობის და პოტენციურად ტოქსიკური, ჩვეულებრივ, ცვლილებებს სამიზნე უჯრედებში რამდენიმე წამიანი კონტაქტით იწვევს და შემდეგ იშლება. წამალი ვიაგრა, (sildenafil citrate) კურნავს მამრობით ერექციულ დისფუნქციას, ხელს უწყობს ერექციას NO-ს დაშლის შეფერხებით. აზოტის ოქსიდი ასრულებს სხვა ფუნქციებსაც, მაგალითად: ნერვულ სისტემაში ის ფუნქციონირებს როგორც ნეიროტრანსმიტერი და სისხლის გარკვეული თეთრი უჯრედებით გამოყოფილ NO-ს შეუძლია გაანადგუროს ბაქტერიები და სიმსივნური უჯრედები ორგანიზმის თხევად გარემოში.

ლოკალური რეგულატორების ჯგუფი, **პროსტაგლან-**

**დინები (PGs)**, მოდიფიცირებული ცხიმოვანი მჟავებია. ისინი ხშირად პლაზმურ მემბრანაში ლიპიდებიდან იწარმოება. მათ ასე უწოდებენ იმიტომ, რომ პირველად აღმოაჩინეს ჯირკვალ პროსტატას სეკრეტში, რომელიც მონაწილეობს სპერმის წარმოქმნაში. მრავალი ტიპის უჯრედებით ინტერსტიციალურ სითხეში გამოყოფილი პროსტაგლანდინები ქსოვილზე დამოკიდებულებით უჯრედებს სხვადასხვა გზით არეგულირებს. მდედრის რეპროდუქციულ ტრაქტში შეღწეული სპერმით პროსტაგლანდინები ასტიმულირებენ მდედრის საშვილოსნოს კედლის გლუვ კუნთებს, რათა შეიკუმშონ და ამით ეხმარებიან სპერმას მიაღწიოს კვერცხუჯრედს. მშობიარობის დროს, მდედრის პლაცენტის უჯრედებით გამოყოფილი პროსტაგლანდინები საშვილოსნოს ახლომდებარე კუნთების აგზნებადობის მომატებით ხელს უწყობს მშობიარობის გამოწვევას (**იხ. სურათი 46.18**).

იმუნურ სისტემაში სხვადასხვა პროსტაგლანდინი ხელს უწყობს სიცხისა და ანთებითი პროცესის გამოწვევას და ასევე ტკივილის შეგრძნების გაძლიერებას. ასპირინისა და იბუპროფენის ანთების საწინააღმდეგო ეფექტი განპირობებულია ამ წამლების მიერ პროსტაგლანდინების სინთეზის შეკავებით. პროსტაგლანდინები ასევე მონაწილეობს სისხლის ფორფიტების (Trombocytes) აგრეგაციის რეგულაციაში — სისხლის კოაგულაციის ფორმირების ადრეულ საფეხურზე (**სურათი 45.5**). ამიტომ, ექიმები ურჩევენ

ადამიანებს, რომლებიც იმყოფებიან გულის შეტევის რისკის ქვეშ, ასპირინი რეგულარულად მიიღონ.

სასუნთქ სისტემაში ორი პრსტაგლანდინი ძალიან მსგავსი მოლეკულური სტრუქტურით საწინააღმდეგოდ მოქმედებს ფილტვების სისხლძარღვების კედლების გლუვი კუნთების უჯრედებზე. პროსტაგლანდინი ანვდის კუნთოვან უჯრედებს მოდუნების სიგნალს, რაც აფართოვებს სისხლძარღვს და ხელს უწყობს სისხლის ჟანგბადით გამდიდრებას. პროსტაგლანდინი გადასცემს კუნთოვან უჯრედებს შეკუმშვის სიგნალს, ავიწროვებს სისხლძარღვებს და ახდენს ფილტვებში სისხლის ნაკადის შემცირებას. ამ ორი ანტაგონისტური ქიმიური სიგნალის შეფარდებითი კონცენტრაციის ცვლილება

განსხვავებული რეცეპტორები → განსხვავებული უჯრედული პასუხები



▲ **სურათი 45.4 ერთი ქიმიური სიგნალი - განსხვავებული პასუხები.** ეპინეფრინი, თავდაცვან-თავდასხმის უმთავრესი ჰორმონი, იწვევს განსხვავებულ პასუხებს სხვადასხვა სამიზნე უჯრედში. სამიზნე უჯრედების პასუხები შესაძლოა განსხვავდებოდეს, თუ მათ ჰორმონისათვის განსხვავებული რეცეპტორები გააჩნია (შეადარეთ (ა) და (ბ) ერთმანეთს). სამიზნე უჯრედები ერთი და იმავე რეცეპტორებით ავლენს განსხვავებულ პასუხებს. თუ მათ განსხვავებული სიგნალის ტრანსდუქციის გზები და/ან ეფექტორული ცილები გააჩნია (შეადარეთ (ბ) და (გ) ერთმანეთს).

ეხმარება ცვალებად გარემოში ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას. მოგვიანებით შევხვდებით სხვა ანტაგონისტურ სიგნალებს, რომლებიც ანონასწორებენ ერთმანეთს.

## ქანცოვცია ცესცი 45.2

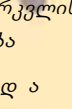
1. რით განსხვავდება წყალში ხსნადი ჰორმონებით და სტეროიდული ჰორმონებით სამიზნე უჯრედებში გამომწვეული პასუხების მექანიზმები?
2. ახსენით, როგორ შეუძლია ერთ ჰორმონს, როგორიცაა ეპინეფრინი, გამოიწვიოს განსხვავებული პასუხი სხვადასხვა ქსოვილში.
3. რატომ შეუძლიათ ისეთ ლოკალურ რეგულატორებს, როგორიცაა პროსტაგლანდინები, ჩვეულებრივ უფრო სწრაფად გამოიწვიოს პასუხები თავის სამიზნე უჯრედებში, ვიდრე ჰორმონებს?

## ქანცოვცია 45.3

### ჰიპოთალამუსი და ჰიპოფიზი სერქემლიანების ენდოკრინული სისტემის მრავალი ფუნქციის ინცეგრაციას ახდენენ

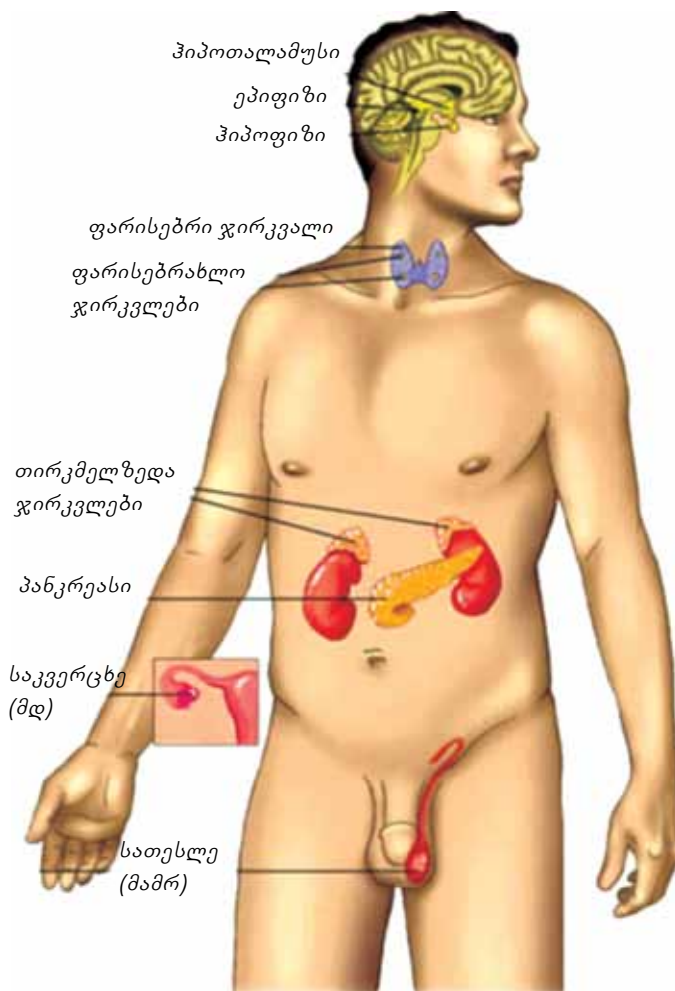
აქამდე ჩვენ განვიხილეთ ჰორმონალური რეგულატორული გზების ძირითადი კომპონენტები და ჰორმონალური სიგნალის უჯრედულ პასუხად გარდაქმნის ფენომენი. ახლა ჩვენ შევეხებით სერქემლიანების ძირითადი ჰორმონების ფიზიოლოგიურ ეფექტებს და ენდოკრინული სისტემის როლს ორგანიზმის აქტივობის შესაბამისობაში მოყვანაში ცვლად გარემოსთან. ჩვენ ვიწყებთ ჰიპოთალამუსითა და ჰიპოფიზით, რომლებიც ენდოკრინული სისტემის უმეტეს ნაწილს აკონტროლებენ.

კითხვის პროცესში თქვენ შეიძლება სურვილი გაგიჩნდეთ განიხილოთ 45.1 ცხრილი, რომელიც აჯამებს ადამიანის ძირითადი ჰორმონების მოქმედებას და **სურათი 45.6**, რომელზეც ნაჩვენებია ადამიანის ორგანიზმის ძირითადი ენდოკრინული ჯირკვლები. ყოველი განყოფილების ტექსტს თან

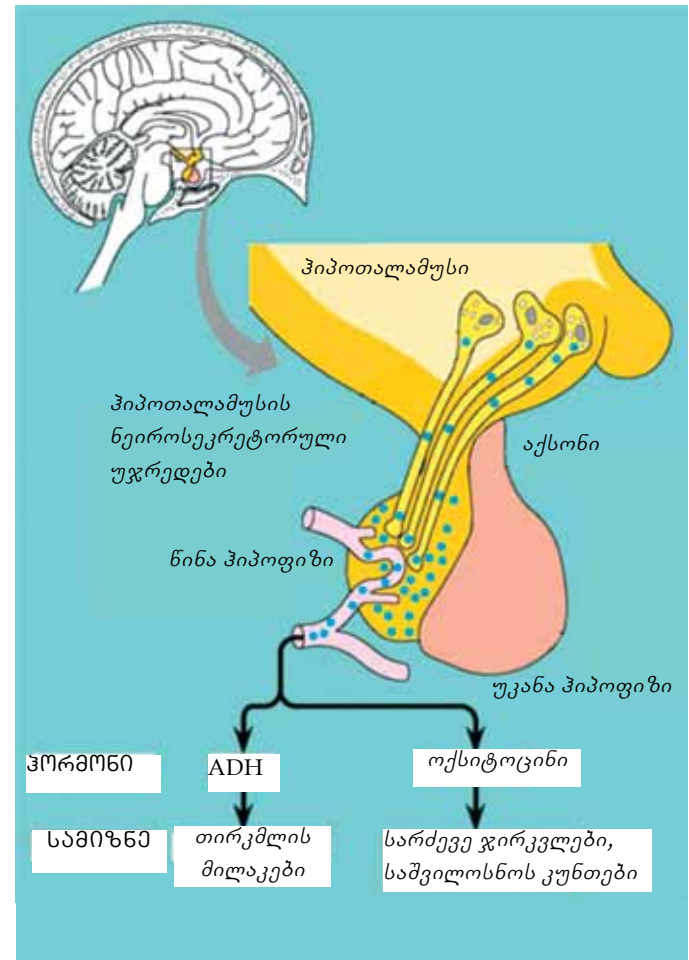
| ცხრილი 45.1 ადამიანის მთავარი ენდოკრინული ჯირკვავი და მათი ჰორმონები                 |                                                                                     |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| ჯირკვავი                                                                             | ჰორმონი                                                                             | ქიმიური კლასი                                                                                                                                      | მოქმედების მაგალითები                                                                                                                                                                                                               | რეგულაცია                                                 |
| <b>ჰიპოთალამუსი</b>                                                                  |    | ჰიპოფიზიდან გამოთავისუფლებული ჰორმონები და ჰორმონები, რომლებიც არეგულირებენ წინა ჰიპოფიზს (იხილეთ ქვემოთ)                                          |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                           |
| <b>ჰიპოფიზი</b><br>უკანა ჰიპოფიზი (გამოყოფს ჰიპოთალამუსში წარმოქმნილ ნეიროჰორმონებს) |    | ოქსიტოცინი პეპტიდი<br>ანტიდიურეზული ჰორმონი (ADH) პეპტიდი                                                                                          | ასტიმულირებს საშვილოსნოსა და სარძევე ჯირკვლების უჯრედების შეკუმშვებს<br>ხელს უწყობს თირკმლებში წყლის რეტენციას                                                                                                                      | ნერვული სისტემით<br>წყლის/მარილების ბალანსით              |
| <b>წინა ჰიპოფიზი</b>                                                                 |    | ზრდის ჰორმონი (GH) ცილა<br>პროლაქტინი (PRL) ცილა                                                                                                   | ასტიმულირებს ზრდასა (განსაკუთრებით ძვლების) და მეტაბოლურ ფუნქციებს<br>ასტიმულირებს კვერცხუჯრედისა და სპერმის წარმოქმნას                                                                                                             | ჰიპოთალამური ჰორმონებით<br>ჰიპოთალამური ჰორმონებით        |
| <b>ფოლიკულ-მასტიმულირებელი ჰორმონი (FSH)</b>                                         |                                                                                     | გლიკოპროტეინი                                                                                                                                      | ასტიმულირებს რძის წარმოქმნასა და გამოყოფას                                                                                                                                                                                          | ჰიპოთალამური ჰორმონებით                                   |
| <b>მალუთეინიზებელი ჰორმონი (LH)</b>                                                  |                                                                                     | გლიკოპროტეინი                                                                                                                                      | ასტიმულირებს საკვერცხეებსა და სათესლეებს                                                                                                                                                                                            | ჰიპოთალამური ჰორმონებით                                   |
| <b>თიროიდ-მასტიმულირებელი ჰორმონი (TSH)</b>                                          |                                                                                     | გლიკოპროტეინი                                                                                                                                      | ასტიმულირებს ფარისებრ ჯირკვალს                                                                                                                                                                                                      | სისხლში თიროქსინით<br>ჰიპოთალამური ჰორმონებით             |
| <b>ადრენოკორტიკოტროპული (ACTH)</b>                                                   |                                                                                     | ჰორმონი პეპტიდი                                                                                                                                    | ასტიმულირებს თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქოვანი შრიდან გლუკოკორტიკოიდების გამოყოფას                                                                                                                                                     | გლუკოკორტიკოიდებით;<br>ჰიპოთალამური ჰორმონებით            |
| <b>ფარისებრი ჯირკვალი</b>                                                            |   | ტრიიოდოთირონინი (T <sub>3</sub> ) და თიროქსინი (T <sub>4</sub> ) ამინი                                                                             | ასტიმულირებს და ინარჩუნებს მეტაბოლური პროცესებს                                                                                                                                                                                     | თიშ-ით                                                    |
| <b>ფარისებრ ახლო ჯირკვლები</b>                                                       |  | კალციტონინი პეპტიდი<br>პარათიროიდული ჰორმონი (PTH) პეპტიდი                                                                                         | აქვეითებს სისხლში კალციუმის დონეს<br>ზრდის სისხლში კალციუმის დონეს                                                                                                                                                                  | სისხლში კალციუმით<br>სისხლში კალციუმით                    |
| <b>პანკრეასი</b>                                                                     |  | ინსულინი ცილა<br>გლუკაგონი ცილა                                                                                                                    | აქვეითებს სისხლში გლუკოზის დონეს<br>ზრდის სისხლში გლუკოზის დონეს                                                                                                                                                                    | სისხლში გლუკოზით<br>სისხლში გლუკოზით                      |
| <b>თირკმელზედა ჯირკვალი</b>                                                          |  | თირკმელზედა ჯირკვლის ეპინეფრინი და ტეინოვანი ნივთიერება ამინი<br>თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი გლუკოკორტიკოიდი სტეროიდი<br>მინერალკორტიკოიდი სტეროიდი | ზრდის სისხლში გლუკოზის დონეს; ზრდის მეტაბოლურ აქტივობებს; ინვესტ გარკვეული სისხლძარღვების კონსტრიქციას<br>ზრდის სისხლში გლუკოზის დონეს<br>ხელს უწყობს თირკმლებში Na <sup>+</sup> -ის რეაბსორბციასა და K <sup>+</sup> -ის ექსკრეციას | ნერვული სისტემით<br>ACTH-ით სისხლში<br>K <sup>+</sup> -ით |
| <b>გონადები</b>                                                                      |                                                                                     |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                           |
| <b>სათესლეები</b>                                                                    |  | ანდროგენები სტეროიდი                                                                                                                               | უზრუნველყოფს სპერმის ფორმირებას; ხელს უწყობს მამაკაცის მეორადი სასქესო ნიშნების განვითარებასა და შენარჩუნებას                                                                                                                       | FSH და LH-ით                                              |
| <b>საკვერცხეები</b>                                                                  |  | ესტროგენები სტეროიდი<br>პროგესტერონი სტეროიდი                                                                                                      | ასტიმულირებს საშვილოსნოს ამომფენი გარსის განვითარებასა და ხელს უწყობს მდედრის მეორადი სასქესო ნიშნების განვითარებასა და შენარჩუნებას<br>ხელს უწყობს საშვილოსნოს ამომფენი გარსის განვითარებას                                        | FSH და LH-ით<br>FSH და LH-ით                              |
| <b>ეპიფიზი</b>                                                                       |  | მელატონინი ამინი                                                                                                                                   | ჩართულია ბიოლოგიურ რითმებში                                                                                                                                                                                                         | სინათლე/სიბნელის ციკლებით                                 |



ახლავს დიაგრამები მცირე კომენტარით, რომელიც დაგეხმარებათ ყველა ჯირკვლის ადგილმდებარეობის გახსენებაში. გაითვალისწინეთ, რომ ჰორმონების გამოყოფი უჯრედები გვხვდება მრავალ ორგანოში, რომელიც სხვადასხვა სისტემას მიეკუთვნება: გულის, თირკმლის, ღვიძლის, კუჭის, წერილი ნაწლავების, თირკმლებისა და პლაცენტის ჩათვლით. ამ არაენდოკრინული ორგანოებიდან გამოთავისუფლებული ზოგიერთი ჰორმონი განხილულ იქნება სხვა თავებში.



▲ **სურათი 45.6** ამ თავში განხილული ადამიანის ენდოკრინული ჯირკვლები. აქ ნაჩვენებია ჯირკვლების გარდა, მრავალი ორგანო ძირითადი არაენდოკრინული ფუნქციებით ასევე გამოყოფს ჰორმონებს



▲ **სურათი 45.7** უკანა ჰიპოფიზის ჰორმონების წარმოქმნა და გამოთავისუფლება. უკანა ჰიპოფიზი წარმოადგენს ჰიპოთალამუსის ერთგვარ გაფართოებას. ჰიპოთალამუსის გარკვეული ნეიროსეკრეტორული უჯრედები წარმოქმნიან ანტიდიურეზულ ჰორმონს (ADH) და ოქსიტოცინს, რომლებიც ტრანსპორტირდება უკანა ჰიპოფიზში, სადაც ეს ჰორმონები ინახება. ნერვული სიგნალები ტვინიდან განაპირობებს ამ ნეიროჰორმონების გამოთავისუფლებას.

## ჯგუშობა ჰიპოთალამუსსა და ჰიპოფიზს შორის

**ჰიპოთალამუსი** შეიცავს ნეიროსეკრეტორული უჯრედების ორ ჯგუფს. ერთი ჯგუფი არის სადაც გამოსაყოფი ჰორმონები ინახება. მეორე ჯგუფი არეგულირებს ჰიპოთალამუსის ფუძეში მდებარე ლიმნის მარცვლის ზომის ორგანოს — **ჰიპოფიზის** აქტივობას. არც ერთი ორგანო არ აჩვენებს ისე კარგად მჭიდრო სტრუქტურულ, ფუნქციურ და განვითარების ურთიერთკავშირებს ენდოკრინულსა და ნერვულ სისტემებს შორის, როგორც ჰიპოფიზი. მას აქვს განცალკევებული უკანა და წინა ნაწილები, რომლებიც ფაქტიურად ორი გაერთიანებული ჯირკვალია. ისინი ემბრიონის სხვადასხვა უბნიდან ვითარდებიან და ძალიან განსხვავებულ ფუნქციებს ასრულებენ.

**უკანა ჰიპოფიზი** ანუ **ნეიროჰიპოფიზი** ჰიპოთალამუსის ერთგვარი გაფართოებაა. იგი ემბრიონული განვითარების პერიოდში იზრდება ქვემოთ, პირის მიმართულებით. მასში ინახება და გამოიყოფა ორი ჰორმონი, რომლებიც სინთეზდება ჰიპოთალამუსში მდებარე ნეიროსეკრეტორული უჯრედების მიერ; ამ უჯრედების გრძელი მორჩები (აქსონები) ჰორმონებს უკანა ჰიპოფიზს აწვდის (**სურათი 45.7**).

**წინა ჰიპოფიზი** ანუ **ადენოჰიპოფიზი** ემბრიონის პირის თავზე მდებარე ნაოჭის ქსოვილიდან ვითარდება, ტვინის მიმართულებით იზრდება და საბოლოოდ, პირთან კავშირებს კარგავს. წინა ჰიპოფიზი შეიცავს ენდოკრინულ უჯრედებს, რომლებიც ასინთეზებს და, სულ მცირე, ექვს სხვადასხვა ჰორმონს გამოყოფს. ამ ჰორმონებიდან რამდენიმეს თავის სამიზნე სხვა ენდოკრინული ჯირკვლები აქვს. ჰორმონებს, რომლებიც არეგულირებს ენდოკრინული ორგანოების ფუნქციონირებას, **ტროფულ ჰორმონებს** უწოდებენ. მათ, ორგანიზმში ენდოკრინული სიგნალების კოორდინაციაში, განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება.

წინა ჰიპოფიზი, თავის მხრივ, ჰიპოთალამუსის ნეიროსეკრეტორულ უჯრედებში სინთეზირებული ტროპული ჰორმონებით რეგულირდება. ჰიპოთალამუსის ზოგიერთი ტროპული ჰორმონი (რილიზინგ (გამშვები) ჰორმონები) ახდენს წინა ჰიპოფიზიდან ჰორმონების გამოთავისუფლების

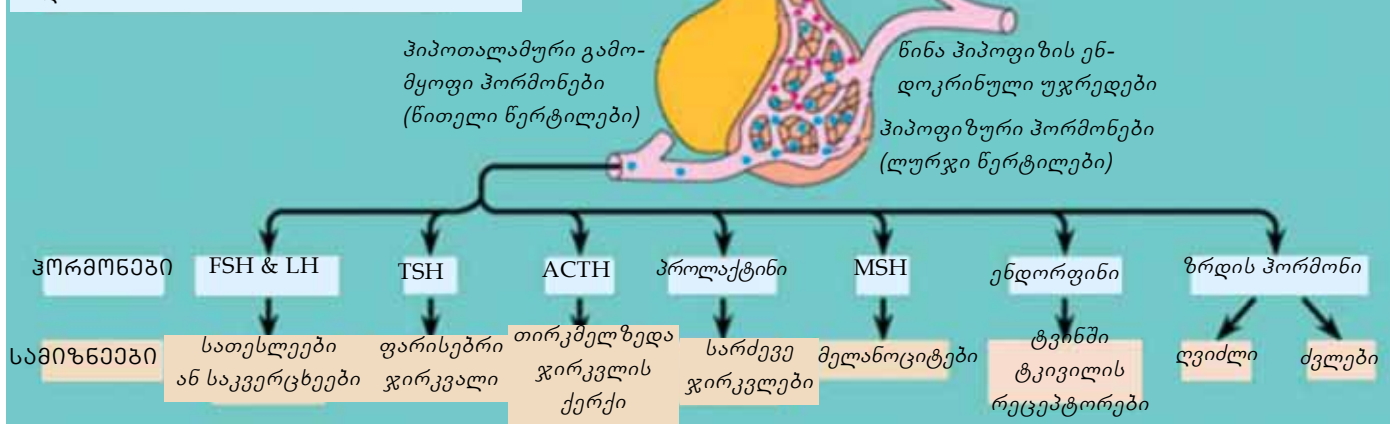
სტიმულაციას, მაშინ, როდესაც სხვა ჯგუფი (ინჰიბიტორული ჰორმონები, შემაკავებელი) აკავებს მისი ჰორმონების სეკრეციას. ჰიპოთალამუსის გამშვები და შემაკავებელი ჰორმონები გამოიყოფა ჰიპოთალამუსის ფუძეში კაპილარების ახლოს (**სურათი 45.8**).

კაპილარები გადადის მოკლე სისხლძარღვებში, რომლებსაც ჰიპოთალამო-ჰიფოზიურ სისხლძარღვთა კარის სისტემას უწოდებენ. ის წინა ჰიპოფიზში მეორად კაპილარულ ქსელად იყოფა. ამ გზის საშუალებით ჰიპოთალამუსის ტროპული ჰორმონები მათ მიერ კონტროლირებად ჯირკვლამდე პირდაპირ აღწევს. წინა ჰიპოფიზის ყველა ჰორმონი, სულ მცირე, ერთი გამშვები ჰორმონით მაინც კონტროლდება. ზოგიერთს როგორც გამშვები ჰორმონი, ასევე შემაკავებელი ჰორმონი აკონტროლებს.

## უკანა ჰიპოფიზის ჰორმონები

როგორც 45.7 სურათზეა ნაჩვენები, უკანა ჰიპოფიზიდან ორი ჰორმონი - ანტიდიურეზული ჰორმონი ( ) და ოქსიტოცინი გამოთავისუფლდება. ეს ორივე პეპტიდი ჰიპოთალამუსის ნეიროსეკრეტორული უჯრედების მიერ სინთეზდება და ნეიროჰორმონებს წარმოადგენენ. ისინი შედარებით მარტივი მოქმედებით ხასიათდებიან (იხ. სურათი 45.2 ბ).

**მხოლოდ კვებითი მოქმედება:** ფოლიკულ-მასტიმულირებელი ჰორმონი – FSH  
მალუთეინიზებელი ჰორმონი – LH  
თიროიდ მასტიმულირებელი ჰორმონი – TSH  
ადრენოკორტიკოტროპული ჰორმონი – ACTH  
**მხოლოდ არაკვებითი მოქმედება:**  
პროლაქტინი მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონი – MSH,  
ენდორფინი  
**არაკვებითი და კვებითი მოქმედება:**  
ზრდის ჰორმონი



▲ **სურათი 45.8 წინა ჰიპოფიზის ჰორმონების წარმოქმნა და გამონთავისუფლება.** წინა ჰიპოფიზში სინთეზირებული ჰორმონების გამონთავისუფლება კონტროლდება ჰიპოთალამური რილიზინგ და ინჰიბიტორული (შემაკავებელი) ჰორმონებით. ჰიპოთალამური ჰორმონები გამოიყოფა ნეიროსეკრეტორული უჯრედების მიერ და გადადის ჰიპოთალამუსის კაპილარულ ქსელში. ეს კაპილარები გადადის ჰიპოთალამო-ჰიპოფიზარულ სისხლძარღვთა კარის სისტემაში, რომელიც უკავშირდება მეორად კაპილარულ ქსელს წინა ჰიპოფიზში. წინა ჰიპოფიზის მიერ წარმოქმნილი ყოველი ჰორმონი გამოიყოფა სპეციფიკურ რილიზინგ ჰორმონის საპასუხოდ.

**ანტიდიურეზული ჰორმონი (ADH)** მოქმედებს თირკმლებზე და ზრდის წყლის შეკავებას (რეტენციას) და შარდის მოცულობას ამცირებს. ის იმ მექანიზმის ნაწილია, რომელიც განაპირობებს სისხლის ოსმოსური წნევის (ოსმოლარობის) რეგულაციას. ეს მექანიზმი ასახავს ჰომეოსტაზის შესანარჩუნებლად უარყოფითი უკუკავშირის მნიშვნელობას და ჰიპოთალამუსის ცენტრალურ როლს აღნიშნულ პროცესში. ჰიპოთალამუსი ნაწილია როგორც ენდოკრინული სისტემის, ასევე ნერვული სისტემის.

იხილეთ **სურათი 44.16** იმისთვის, რომ გავიხსენოთ ის ფუნქციონირება ამ რთულ რეგულატორულ ჯაჭვში.

**ოქსიტოცინი** საშვილოსნოს კუნთებზე მოქმედებით იწვევს მათ შეკუმშვას მშობიარობის დროს. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ის აგრეთვე სარძევე ჯირკვლებიდან ძუძუთი კვების დროს რძის გამოყოფას იწვევს. ოქსიტოცინის სიგნალი ორივე შემთხვევაში დადებით უკუკავშირის წარმოადგენს.

## წინა ჰიპოფიზის ჰორმონები

წინა ჰიპოფიზში მრავალი განსხვავებული ჰორმონი (**იხ. სურათი 45.8**) წარმოიქმნება. ოთხი მათგანი მკაცრად ტროპული ჰორმონის სახით მოქმედებს — ასტიმულირებს ფარისებრი ჯირკვლიდან, თირკმელზედა ჯირკვლიდან და სასქესო ჯირკვლებიდან ჰორმონების სინთეზსა და გამოყოფას. რამდენიმე სხვა ახდენს მხოლოდ პირდაპირ ანატროფულ ეფექტებს არაენდოკრინულ ორგანოებზე, ხოლო ერთს — ზრდის ჰორმონს — აქვს როგორც ტროფული, ასევე ანატროფული მოქმედება.

## ტროფული ჰორმონები

წინა ჰიპოფიზიდან გამოყოფილი სამი, მხოლოდ ტროფული მოქმედების მქონე ჰორმონი ერთმანეთთან ქიმიური სტრუქტურით მჭიდროდ არის დაკავშირებული. **ფოლიკულ-მასტიმულირებელი (FSH)**, **მალუთეინიზებელი (LH)** და **თიროიდმასტიმულირებელი (TSH)** ჰორმონები ერთმანეთის მსგავსი გლიკოპროტეინებია. გლიკოპროტეინი წარმოადგენს ცილას, რომელსაც მიერთებული აქვს ნახშირწყლები. FSH-სა და LH-ს გონადოტროპინებსაც უწოდებენ, რადგანაც ისინი მამრისა და მდედრის გონადების (სასქესო ჯირკვლების), სათესლეებისა და საკვერცხეების აქტივობას ასტიმულირებენ. თშ ხელს უწყობს თიროიდული (ფარისებრი) ჯირკვლის ნორმალურ განვითარებასა და თიროიდული ჰორმონების წარმოქმნას.

**ადრენოკორტიკოტროპული ჰორმონი (ACTH)** წინა ჰიპოფიზის მეოთხე ტროფული ჰორმონია, რომელიც სტრუქტურით დანარჩენებისაგან განსხვავდება. ის პეპტიდურ ჰორმონს წარმოადგენს, რომელიც დიდი პრეკურსორი ცილის დაშლის შედეგად მიიღება. ჩთ თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქში სტეროიდული ჰორმონების წარმოქმნასა და სეკრეციას ასტიმულირებს.

წინა ჰიპოფიზის ოთხივე ტროპული ჰორმონი რთულ ნეიროენდოკრინულ გზებში მონაწილეობს. ყოველ გზაში, ტვინისკენ მიმართული სიგნალები ჰიპოთალამური ნეიროჰორ-

მონების გამონთავისუფლებას ასტიმულირებს, რაც, თავის მხრივ, წინა ჰიპოფიზიდან გარკვეული ტროპული ჰორმონის სეკრეციას განაპირობებს. შემდგომ, წინა ჰიპოფიზის ტროპული ჰორმონი მოქმედებს მის სამიზნე ენდოკრინულ ქსოვილზე და სხვა ჰორმონის გამოყოფას ასტიმულირებს. ეს სისტემურ მეტაბოლურ ან განვითარების ეფექტებს იწვევს. უფრო მოგვიანებით ამ თავში დეტალურად განვიხილავთ ჰორმონულ გზებს, რომლებშიც ჩართულია TSH და ACT. 46-ე თავში განვიხილავთ, როგორ არეგულირებს FSH და რეპროდუქციულ ფუნქციებს. ნახავთ, რომ უარყოფითი უკუკავშირის რგოლები გადამწყვეტია ამ კომპლექსური გზების რეგულაციაში.

## ანატროფული ჰორმონები

წინა ჰიპოფიზიდან წარმოიქმნება ანატროფული ჰორმონები -პროლაქტინი, მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონი (MSH) და ხ-ენდორფინი. ეს პეპტიდური ჰორმონები, რომელთა სეკრეცია ჰიპოთალამური ჰორმონებით კონტროლდება, მარტივ ნეიროენდოკრინულ გზებში მოქმედებენ (**იხ. სურათი 45.2 გ**).

**პროლაქტინის (PRL)** ყველაზე უფრო აღსანიშნავი თავისებურება არის მის მიერ გამოწვეული ეფექტების დიდი მრავალფეროვნება ხერხემლიანთა სხვადასხვა სახეობაში. მაგალითად, ძუძუმწოვრებში პროლაქტინი სარძევე ჯირკვლების ზრდასა და რძის სინთეზს ასტიმულირებს; არეგულირებს ცხიმების მეტაბოლიზმს და გამრავლებას ფრინველებში; მეტამორფოზის დაწყებას ამფიბიებში, სადაც მას, როგორც ლარვის ზრდის ჰორმონს, ასევე შეუძლია იმოქმედოს; არეგულირებს მარილებისა და წყლის ბალანსს მტკნარი წყლის თევზებში. ეს ჩამონათვალი მიუთითებს, რომ პროლაქტინი არის ევოლუციურად ძველი ჰორმონი, რომლის ფუნქციებიც დიფერენცირდა სხვადასხვა ჯგუფის ხერხემლიანების ევოლუციის პროცესში.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, **მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონი (MSH)** არეგულირებს ზოგიერთი თევზის, ამფიბიისა და ქვეწარმავლის კანის პიგმენტის შემცველი უჯრედების აქტივობას. ძუძუმწოვრებში შ, როგორც ჩანს, მოქმედებს ტვინის ნეირონებზე და შიმშილს აკავებს.

ხ-ენდორფინი მიეკუთვნება ქიმიურ ნივთიერებათა კლასს, რომლებსაც ენდორფინებს უწოდებენ. თავის ტვინში გარკვეული ნეირონები ასევე წარმოქმნიან **ენდორფინებს** (**იხ. 48-ე თავი**). ყველა ენდორფინი უკავშირდება რეცეპტორებს ტვინში და თრგუნავს ტკივილის პერცეფციას. ზოგიერთი მკვლევარი ვარაუდობს, რომ ე.წ. „რუნერ“ სიგპ“ (ეიფორია) ნაწილობრივ ენდორფინების გამონთავისუფლების შედეგია, როდესაც სტრესი და ტკივილი ორგანიზმში აღწევს კრიტიკულ დონეს. როგორც MSH, ასევე ხ-ენდორფინი მიიღება ერთი და იგივე პრეკურსორი ცილის დაშლის შედეგად, რომელიც აგრეთვე დასაბამს აძლევს ACTH-ს.

## ზრდის ჰორმონი

**ზრდის ჰორმონი (GH)** იმდენად ჰგავს სტრუქტურით პროლაქტინს, რომ მეცნიერებმა წამოაყენეს ჰიპოთეზა მათი ერთი და იმავე წინამორბედი გენისგან განვითარების თაო-

ბაზე. სამიზნე ქსოვილებზე აქვს როგორც ტროფული, ასევე არატროფული ეფექტები. მისი მთავარი ტროფული მოქმედება ლეიძლის სტიმულაციაა — **ინსულინის მსგავსი ზრდის ფაქტორების (IGFs)** გამოსათავისუფლებად. ეს ფაქტორები სისხლში ცირკულირებენ და პირდაპირ ძვლისა და ხრტილების ზრდას ასტიმულირებენ. GH-ის არარსებობისას მოუმწიფებელი ცხოველის ჩონჩხი წყვეტს ზრდას.

GH-ის ინექცია ნაწილობრივ აღადგენს ცხოველის ზრდას ამ ჰორმონის საკუთარ წყაროს ექსპერიმენტულად მოკლებულ ცხოველებში. ასევე განაპირობებს სხვადასხვა მეტაბოლურ ეფექტებს, რომლებმაც შესაძლოა გაზარდოს სისხლში გლუკოზის შემცველობა და ამგვარად უპირისპირდება ინსულინის ეფექტებს (ამ თავში მოგვიანებით იქნება განხილული). GH-ის წარმოქმნის ნორმიდან გადახრას ადამიანებში სხვადასხვა დარღვევა მოჰყვება, იმის მიხედვით, ადგილი აქვს ჰიპერსეკრეციას (ჭარბი რაოდენობა) თუ ჰიპოსეკრეციას (მცირე რაოდენობა) და როდის ვლინდება პრობლემა. GH-ის ჰიპერსეკრეცია ბავშვობაში იწვევს გიგანტიზმს, როდესაც ადამიანი იზრდება უჩვეულოდ მაღალი 2.4მ-მდე სიმაღლის, თუმცა სხეულის პროპორციები შედარებით ნორმალური რჩება. -ის გადაჭარბებული წარმოქმნა ზრდასრულობაში – მდგომარეობა, ცნობილი როგორც აკრომეგალია, ასტიმულირებს ძვლის ზრდას სახის, ხელებისა და ტერფების ძვლოვან ქსოვილში, რომელიც ჯერ კიდევ მგრძნობიარეა ჰორმონისადმი.

GH-ის ჰიპოსეკრეცია ბავშვობის ასაკში აყვანებს ლულოვანი ძვლების ზრდას, რის გამოც, შესაძლებელია ჰიპოფიზური ჯუჯის განვითარება. ამ დარღვევის მქონე ადამიანები სიმაღლეში აღწევენ დაახლოებით მხოლოდ 4 ფუტს (1.2მ), თუმცა სხეულის პროპორციები რჩება შედარებით ნორმალური. თუ დიაგნოსტიკა მოხდება სქესობრივ მომწიფებამდე ჰიპოფიზური ჯუჯა შესაძლოა წარმატებულად განიკურნოს ადამიანის GH-ით. მრავალი წელია, რაც გვამების ჰიპოფიზიდან გამოყოფილ GH-ზე მოთხოვნა მნიშვნელოვნად შემცირდა. 1980-იანი წლების შუა პერიოდში გენურმა ინჟინრებმა შეძლეს ადამიანის GH-ის სინთეზი, ჰორმონის მაკოდირებელი დნმ-ის ბაქტერიაში ჩანერგვით (იხ. თავი 20). გენური ინჟინერიით შექმნილი GH-ით თერაპია ჰიპოფიზური ჯუჯობით დაავადებული ბავშვებისათვის დღეისათვის პრაქტიკაში წარმატებით ინერგება.

ზოგიერთი ათლეტი იღებს GH-ს იმ იმედით, რომ სპორტულ შედეგებს გაიუმჯობესებს. თუმცა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ზრდასრულ ადამიანებში, რომლებიც არ განიცდიან ჰორმონის დეფიციტს, GH-ს კუნთის მასასა და სიძლიერეზე მცირე გავლენა აქვს.

## კანცელცია ცქსდი 45.3

1. როგორ არის შესაძლებელი, რომ ჰიპოფიზის ორი, ერთმანეთთან ასე მჭიდროდ დაკავშირებული ჯირკვალის განსხვავებოდეს წარმოშობითა და ფუნქციით?
2. განიხილეთ ტროფული ჰორმონების როლი ენდოკრინული სისტემის რეგულაციაში.
3. ჰორმონული კონტროლის რომელი გზა (იხილეთ კონცეფცია 45.1) არის დამახასიათებელი (ა) პროლაქტინისათვის, (ბ) ადრენოკორტიკოტროპული ჰორმონისათვის (ACTH) და (გ) ოქსიტოცინისთვის?

## კანცელცია 45.4

### ატაჰიპოფიზური ჰორმონები უქცობენ სქოს მეცამოლიზმს, ჰომოცცაზს, განვითარებას და ცცოვის რეგულაციას

ახლა შევისწავლოთ ზოგიერთი არაჰიპოფიზური ჰორმონის ძირითადი ფუნქციები და მათი წარმოქმნელი ენდოკრინული ჯირკვლები. წინა ჰიპოფიზის ტროფული ჰორმონები ამ ჰორმონებიდან ზოგიერთის და არა ყველა მათგანის გამოყოფას აკონტროლებს.

### თითდიღული ჰორმონები



ადამიანებსა და სხვა ძუძუმწოვრებში ფარისებრი ჯირკვალის (თიროიდული) ტრაქეის ვენტრალურ ზედაპირზე მდებარეობს. იგი ორი ნაწილისგან შედგება (იხ. სურათი 42.23). მრავალ სხვა ხერხემლიანში ჯირკვლის ორი ნახევარი განცალკევებულია საყლაპავის ორ მხარეს.

ფარისებრი ჯირკვალის წარმოქმნის ორ ძალიან მსგავს ჰორმონს, რომლებიც მიიღება ამინომჟავა თიროზინისგან: **ტიროიდოთირონინს (T3)**, რომელიც იოდის სამი ატომისგან შედგება და **ტიტრაიოდოთირონინს**, ანუ **თიროქსინს (T4)**, რომელიც იოდის ოთხ ატომს შეიცავს. ძუძუმწოვრებში ფარისებრი ჯირკვალის ძირითადად T4-ს გამოყოფს, მაგრამ სამიზნე უჯრედები მის უმეტეს წილს გარდაქმნის T3-ად, იოდის ერთი ატომის მოცილებით. მიუხედავად იმისა, რომ ორივე ჰორმონს უჯრედის ბირთვში განლაგებული ერთი და იგივე რეცეპტორული ცილა იკავშირებს, რეცეპტორს გააჩნია უფრო

მაღალი აფინიტეტი T3-ის მიმართ ვიდრე T4-თან. ამგვარად, უმეტესად თ3 იწვევს პასუხებს სამიზნე უჯრედებში.

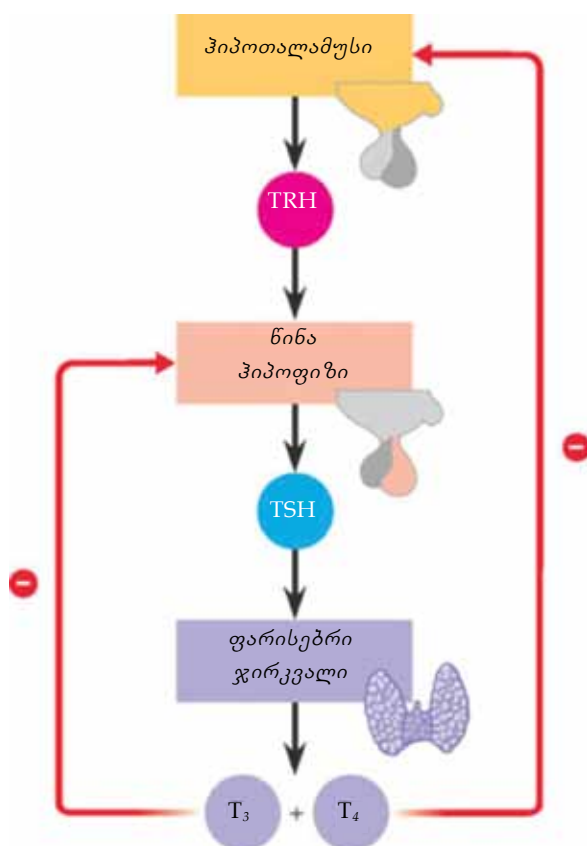
ჰიპოთალამუსი და წინა ჰიპოფიზი აკონტროლებს თიროიდული ჰორმონების სეკრეციას და მათ ეფექტებს ცხოველის ორგანიზმზე. ეს პროცესი მოიცავს კომპლექსურ ნეიროენდოკრინულ გზას ორი უარყოფითი უკუკავშირის მარყუჟით (სურათი 45.9).

ფარისებრი ჯირკვალის ხერხემლიანების განვითარებასა და მომწიფებაში გადამწყვეტ როლს ასრულებს. თიროიდული კონტროლის შთაბეჭდავ მაგალითს წარმოადგენს თავკომბალას მეტამორფოზი ბაყაყად. ეს პროცესი მრავალი განსხვავებული ქსოვილის საფუძვლიან რეორგანიზაციას მოიცავს. სხვა ცხოველებზე ჩატარებულმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ თიროიდული ჰორმონები საჭიროა ძვლის წარმოქმნელი უჯრედების ნორმალური ფუნქციონირებისთვის და ტვინის ემბრიონული განვითარების დროს ნერვული უჯრედების დატოტებისთვის.

ფარისებრი ჯირკვალის ანალოგიურად მნიშვნელოვანია ადამიანის განვითარებისთვის. კრეტინიზმისთვის (თიროიდული დეფიციტის მემკვიდრეობითი ფორმა), ჩონჩხის ზრდის შეჩერება და მწირი ფსიქიკური განვითარებაა დამახასიათებელი. ამ დეფექტების პრევენცია ხშირად შესაძლებელია, ნაწილობრივ მაინც, თუ თიროიდული ჰორმონებით მკურნალობა სიცოცხლის ადრეულ სტადიაზე დაიწყება. ფარისებრი ჯირკვალს მნიშვნელოვანი ჰომეოსტაზური ფუნქციებიც აქვს. მაგალითად, ზრდასრულ ძუძუმწოვრებში თიროიდული ჰორმონები სისხლის ნორმალური წნევის, გულისცემის სიხშირის, კუნთური ტონუსის, საჭმლის მონელებისა და რეპროდუქციული ფუნქციების შენარჩუნებას უწყობს ხელს.

T3 და T4 მნიშვნელოვანია ორგანიზმის ბიოენერგეტიკისთვის, ჰორმონები უმთავრესად იწვევენ ჟანგბადის მოხმარების და უჯრედულ მეტაბოლიზმში სიჩქარის გაზრდას. სისხლში ამ ჰორმონების ძალიან ქარბ ან ძალიან მცირე რაოდენობას შედეგად სერიოზული მეტაბოლური დარღვევები მოჰყვება. ადამიანებში თიროიდული ჰორმონების მოჭარბებულმა სეკრეციამ, რომელიც ცნობილია როგორც ჰიპერთიროიდიზმი, შესაძლოა გამოიწვიოს სხეულის მაღალი ტემპერატურა, გაძლიერებული ოფლიანობა, წონის დაკარგვა, გაღიზიანებადობა და სისხლის მაღალი წნევა. ჰიპერთიროიდიზმის ყველაზე გავრცელებული ფორმა არის ბაზედოვის დაავადება (რავე'ს დისეასე); გადმოკარკლული თვალები, რაც გამონეწულია თვალების უკან სითხის აკუმულაციით, ამ დაავადების ტიპური სიმპტომია (სურათი 45.10). ჰიპოთიროიდიზმმა, საპირისპირო მდგომარეობამ, შესაძლოა გამოიწვიოს კრეტინიზმი ბავშვებში და ისეთი სიმპტომები, როგორიც არის წონის მატება, ლეტარგია და ზრდასრულებში სიცივის აუტანლობა.

საკვებში იოდის დეფიციტმა შესაძლოა გამოიწვიოს ჩიყვი, ფარისებრი ჯირკვლის გაზრდა (იხ. სურათი 2.3). საკმარისი რაოდენობით იოდის გარეშე ფარისებრი ჯირკვალს არ შეუძლია ადეკვატური რაოდენობის T3-ისა და T4-ის სინთეზი და შედეგად სისხლში T3-ისა და T4-ის დაბალი დონე ჩვეულ ნეგატიურ უკუკავშირს ჰიპოთალამუსსა და წინა ჰიპოფიზზე

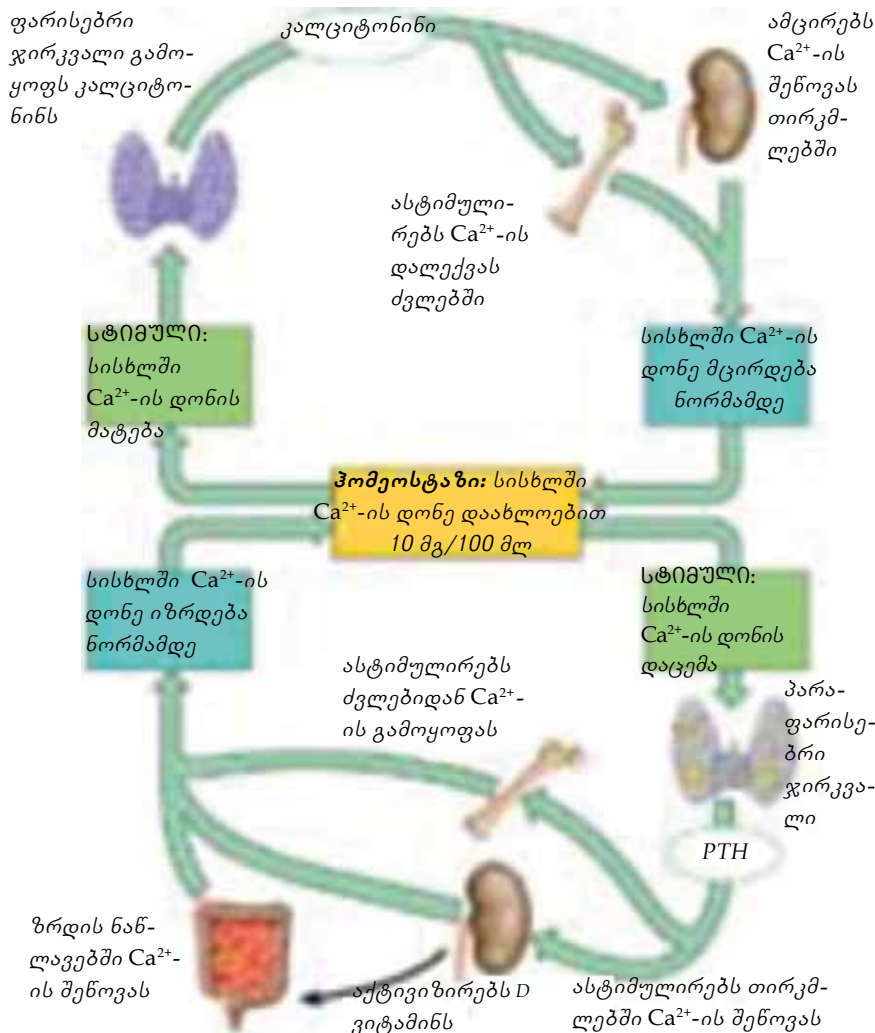


▲ **სურათი 45.9** ფარისებრი ჯირკვლიდან T<sub>3</sub>-ისა და T<sub>4</sub>-ის სეკრეციის უკუკავშირით რეგულაცია. ჰიპოთალამუსი გამოყოფს TSH-ის - rilizing hormones (TSH), რომელიც ასტიმულირებს წინა ჰიპოფიზიდან თიროიდ-მასტიმულირებელი ჰორმონის (TSH) სეკრეციას. შემდგომ TSH ახდენს ფარისებრი ჯირკვალში თიროიდული ჰორმონების T<sub>3</sub>-ისა და T<sub>4</sub>-ის სინთეზსა და გამონთავისუფლებას. ეს ჰორმონები ჰიპოთალამუსსა და წინა ჰიპოფიზზე TRH-ისა და TSH-ის გამონთავისუფლების ინჰიბიციით უარყოფით უკუკავშირს განაპირობებს.

ვერ უზრუნველყოფს (იხ. სურათი 45.9). აქედან გამომდინარე ჰიპოფიზი განაგრძობს თშ-ის სეკრეციას და TS-ის დონისა და ფარისებრი ჯირკვლის ზრდას იწვევს.



► **სურათი 45.10** გრეივის ბაზედოვის დაავადება. ადამიანებში ჰიპერთიროიდიზმის ყველაზე მეტად გავრცელებული ფორმა. თვალების უკან ქსოვილი ხდება გადმოკარკლული და ფიბროზული, რაც იწვევს თვალების გადმოქაჩვის დამახასიათებელ სიმპტომს.



▲ **სურათი 45.11** კალციუმის პომეოსტაზის ჰორმონალური კონტროლი ძუძუმწოვრებში. უარყოფითი უკუკავშირის სისტემაში ჩართულია ორი ანტაგონისტური ჰორმონი, კალციტონინი და პარათიროიდული ჰორმონი (PTH), ინარჩუნებს სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის კონცენტრაციას ნორმასთან ახლოს.

გარდა უჯრედებისა, რომლებიც წარმოქმნის T3-სა და T4-ს, ძუძუმწოვრების ფარისებრი ჯირკვალის შეიცავს კალციტონინის წარმომქმნელ ენდოკრინულ უჯრედებს. ეს ჰორმონი მოქმედებს პარათიროიდულ ჰორმონთან ერთობლივად კალციუმის პომეოსტაზის შესანარჩუნებლად, როგორც შემდგომ იქნება აღწერილი.

## პათათიროიდული ჰორმონი და კალციტონინი: სისხლში კალციუმის შემცველობის კონტროლი



სისხლში კალციუმის დონის ზუსტი პომეოსტაზური კონტროლი კრიტიკული მნიშვნელობისაა, რადგანაც კალციუმის იონები (Ca<sup>2+</sup>) არსებით როლს ასრულებს

ყველა უჯრედის ნორმალურ ფუნქციონირებაში. თუ სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონე მნიშვნელოვნად დაბლა დაინევს, ჩონჩხის კუნთები იწყებენ კონველსიურ შეკუმშვას; ეს მდგომარეობაა, რომელიც ტეტანუსის სახელითაა ცნობილი.

თუ ამის კორექცია არ მოხდება, ტეტანუსი სასიკვდილო იქნება. ძუძუმწოვრებში ურთიერთსაპირისპირო მოქმედების ორი ჰორმონი — პარათიროიდული ჰორმონი და კალციტონინი — ასრულებს მთავარ როლს სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონის შენარჩუნებაში. Ca<sup>2+</sup>-ის ნორმალური კონცენტრაცია დაახლოებით 10მგ/100მლ (**სურათი 45.11**).

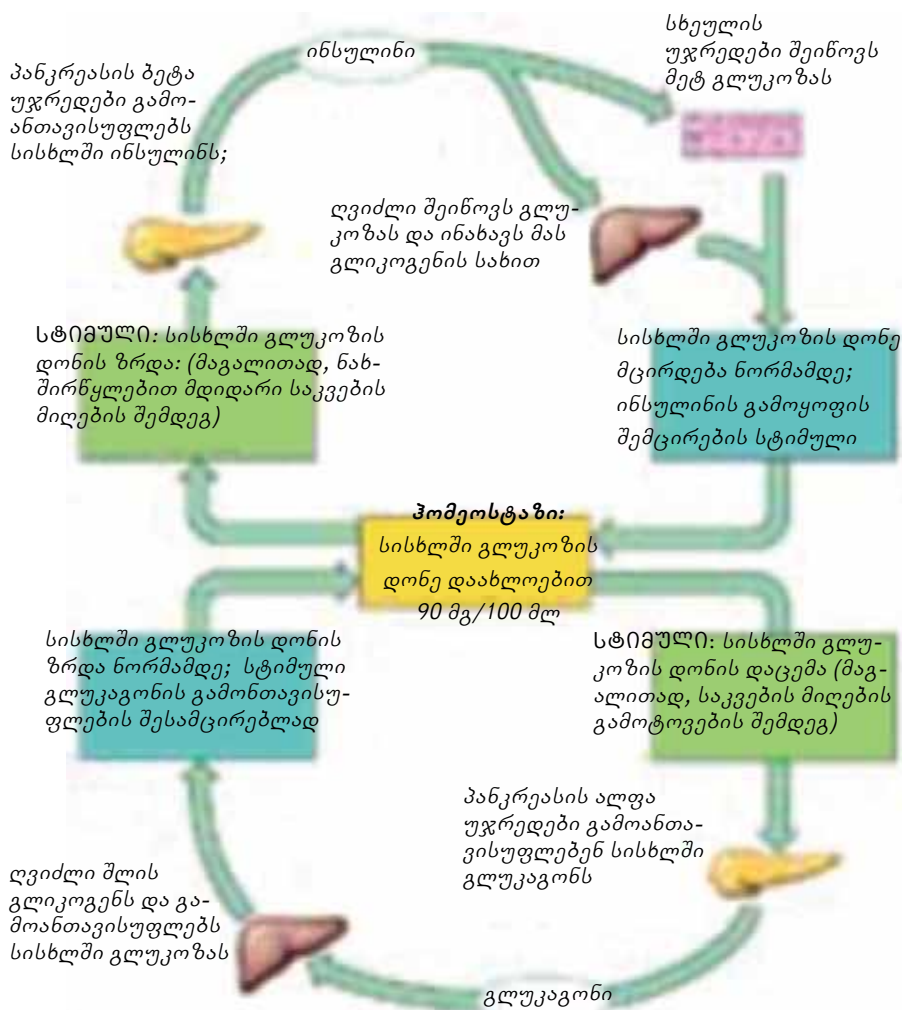
როდესაც სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონე ნორმაზე დაბლა ეცემა, გამონთავისუფლებს პარათიროიდული ჰორმონი (PTH). PTH-ს წარმოქმნის ოთხი პატარა სტრუქტურა, ფარისებრახლო ჯირკვლები, რომლებიც ფარისებრი ჯირკვლის ზედაპირზეა მოთავსებული. თ ზრდის სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონეს პირდაპირი და არაპირდაპირი ეფექტებით. თ ძვლებში, სპეციალური უჯრედების - ოსტეოკლასტების მინერალიზებული მატრიქსის დაშლას და სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის გამონთავისუფლებას იწყებს. თირკმლებში ის პირდაპირ ახდენს Ca<sup>2+</sup>-ის რეაბსორბციას თირკმლის მილაკებიდან. PT-ს ასევე აქვს არაპირდაპირი გავლენა თირკმლებზე - ხელს უწყობს ვიტამინის აქტიურ ჰორმონულ ფორმად გარდაქმნას.

**D ვიტამინის** არააქტიური ფორმა, სტეროიდ-წარმოებული მოლეკულა მიიღება საკვებიდან ან სინთეზირდება კანში. ვიტამინის აქტივაცია იწყება ღვიძლში და მთავრდება თირკმლებში. ეს პროცესი სტიმულირდება PT-ით. ვიტამინის აქტიური ფორმა პირდაპირ მოქმედებს ნაწლავებზე, ასტიმულირებს Ca<sup>2+</sup>-ის შეთვისებას საკვებიდან და ახდენს თ-ის ეფექტის გაძლიერებას.

სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონის მატება ნორმაზე მაღლა ხელს უწყობს ფარისებრი ჯირკვლიდან კალციტონინის გამონთავისუფლებას. **კალციტონინით** გამოწვეული ეფექტები ძვალსა და თირკმლებზე PT-ის საპირისპიროა, და ამგვარად, ის დაბლა სწევს სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონეს.

სისხლში Ca<sup>2+</sup>-ის დონის რეგულაცია იმის ნათელ მაგალითს წარმოადგენს, როგორ ხდება, რომ საპირისპირო ეფექტების მქონე ორი ჰორმონი - ამ შემთხვევაში- PTH და კალციტონინი - აბალანსებს ერთმანეთს, მკაცრ რეგულაციას ახდენს და ინარჩუნებს პომეოსტაზს. ყოველი ჰორმონი ფუნქციონირებს მარტივი ენდოკრინული გზით, რომელშიც ჰორმონის გამომყოფი უჯრედებიდან განისაზღვრება დასარეგულირებელი ცვლილებები (**იხ. სურათი 45.2 ა**).

კლასიკური უკუკავშირით, რომელიმე ჰორმონით გამოწვეული პასუხი რთავს ანტაგონისტი ჰორმონის გამონთავისუ-



▲ **სურათი 45.12 გლუკოზის ჰომეოსტაზის შენარჩუნება ინსულინითა და გლუკაგონით.** ინსულინისა და გლუკაგონის ანტაგონისტური ეფექტები ხელს უწყობს სისხლში გლუკოზის დონის შენარჩუნებას ნორმასთან ახლოს. სისხლში გლუკოზის დონის მატება ფონურ მარეგულაციურ მალა ხელს უწყობს პანკრეასიდან ინსულინის გამოთავისუფლებას, რასაც მოჰყვება ჭარბი გლუკოზის სისხლიდან გამოძევება და მისი შენახვა გლიკოგენის სახით. სისხლში გლუკოზის დონის დაცემა ნორმაზე დაბლა ასტიმულირებს პანკრეასს გლუკაგონის გამოსაყოფად, რის შედეგადაც ღვიძლი ზრდის სისხლში გლუკოზის დონეს.

ფლებას და ამგვარად, მინიმუმამდე დაჰყავს სისხლში  $Ca^{2+}$ -ის კონცენტრაციის ფლუქტუაცია.

## ინსულინი და გლუკაგონი: სისხლში გლუკოზის კონცენტრაცია



მიუხედავად იმისა, რომ პანკრეასი განიხილება როგორც ძირითადი ენდოკრინული ჯირკვავი, ჰორმონის გამოყოფი უჯრედები შეადგენს მისი წონის მხოლოდ 1-2%-ს. პანკრეასის დანარჩენი ნაწილი ბიკარბონატის იონებს და საჭმლის მომნელებელ ფერმენტებს

წარმოქმნის. ისინი გამოთავისუფლდება მცირე ზომის სადინრებში და პანკრეასის სადინარის საშუალებით წვრილ ნაწლავებში გადაიტანება (**იხ. სურათი 41.19**).

ქსოვილებსა და ჯირკვლებს, რომელთა მიერ გამოყოფილი ნივთიერებები ჩაედინება სადინრებში, ეგზოკრინულ უწოდებენ. ამგვარად, პანკრეასი ორმაგი (შერეული), ენდოკრინული და ეგზოკრინული ჯირკვავია მნიშვნელოვანი ფუნქციებით, როგორც ენდოკრინული, ასევე საჭმლის მომნელებელი სისტემებისთვის.

ენდოკრინული უჯრედების კლასტერები (**ლანგერჰანსის კუნძულები**) მიმოზნეულია პანკრეასის მთელ ეგზოკრინულ ქსოვილში. ყოველ კუნძულს აქვს ალფა უჯრედების პოპულაცია, რომელიც წარმოქმნის ჰორმონ **გლუკაგონს** და ბეტა უჯრედების პოპულაცია, რომელიც წარმოქმნის **ინსულინს**. ეს ორივე ცილა-ჰორმონი, ყველა ენდოკრინული სიგნალის მსგავსად გამოიყოფა უჯრედგარე სითხეში და სისხლის ცირკულაციურ სისტემაში ჩაერთვება.

ინსულინი და გლუკაგონი წარმოადგენს ანტაგონისტურ ჰორმონებს, რომლებიც არეგულირებს სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციას (**სურათი 45.12**). ეს არის კრიტიკული მნიშვნელობის ბიოენერგეტიკული და ჰომეოსტაზური ფუნქცია, რადგანაც გლუკოზა მთავარი საწვავია უჯრედული სუნთქვისთვის და მნიშვნელოვანი წყაროა ნახშირბადის ჩონჩხის ორგანული ნაერთების სინთეზისათვის. მეტაბოლური ბალანსი დამოკიდებულია სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციის შენარჩუნებაზე ნორმალურთან ახლოს, რომელიც არის დაახლოებით 90 მგ/100მლ ადამიანებში.

როდესაც სისხლში გლუკოზა აჭარბებს ამ დონეს, გამოთავისუფლდება ინსულინი და ამას შედეგად მოჰყვება სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციის შემცირება. სისხლში გლუკოზის დონის ნორმალურზე დაბლა დაწევისას, გამოთავისუფლდება გლუკაგონი, რასაც შედეგად მოჰყვება სისხლში გლუკოზის კონცენტრაციის გაზრდა. ორივე ჰორმონი მოქმედებს მარტივი ენდოკრინული გზით, რომელიც უარყოფითი უკუკავშირით რეგულირდება. ამ ორი გზის კომბინაცია სისხლში გლუკოზის შემცველობის ნატიფი რეგულაციის საშუალებას იძლევა.

## ინსულინისა და გლუკაგონის სამიზნე ქსოვილები

ინსულინი სისხლში გლუკოზის დონეს სწევს დაბლა. იგი ასტიმულირებს თითქმის ყველა უჯრედის მიერ სისხლიდან გლუკოზის შეთვისების, გარდა ტვინის უჯრედებისა (ტვინის უჯრედებისთვის დამახასიათებელია გლუკოზის შეთვისება

ინსულინის გარეშე და ამის შედეგად, ცირკულირებადი სან-ვაგი ტვინისთვის თითქმის ყოველთვისაა ხელმისაწვდომი) ინსულინი ასევე ამცირებს სისხლში გლუკოზის შემცველობას ღვიძლში გლიკოგენის დაშლის შენელებით. აგრეთვე ამინომჟავებისა და გლიცეროლის (ცხიმებიდან მიღებული) გლუკოზად გარდაქმნის ინჰიბირებით.

ღვიძლი, ჩონჩხის კუნთები და ადიპოზური ქსოვილი ინახავს დიდი რაოდენობით სანვას და განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბიოენერგეტიკისთვის. ღვიძლი და კუნთები შაქარს გლიკოგენის სახით ინახავს, ხოლო ადიპოზური ქსოვილის უჯრედები შაქრებს გარდაქმნიან ცხიმებად.

ღვიძლი წარმოადგენს საკვანძო მნიშვნელობის სანვავის გადამამუშავებელ ცენტრს, რადგანაც მხოლოდ ღვიძლის უჯრედებია გლუკაგონისადმი მგრძნობიარე. ნორმალურ პირობებში, გლუკაგონი იწყებს ეფექტის გამოვლენას მანამ, სანამ სისხლში გლუკოზის დონე დაეცემა ნორმაზე დაბლა. მართლაც, როგორც კი სისხლში გლუკოზის სიჭარბე აღმოიფხვრება, გლუკაგონი გადასცემს სიგნალებს ღვიძლის უჯრედებს, რათა გაზარდოს გლიკოგენის ჰიდროლიზი, გარდაქმნას ამინომჟავები და გლიცეროლი გლუკოზად და ნელა, კვლავ დაიწყოს გლუკოზის გამოთავისუფლება სისხლის მიმოქცევის სისტემაში.

გლუკაგონისა და ინსულინის ანტაგონისტური ეფექტები სასიცოცხლო მნიშვნელობისაა გლუკოზის ჰომეოსტაზისთვის და ამგვარად, სხეულის უჯრედების მიერ სანვავის, როგორც შენახვის, ასევე მისი მოხმარების ნატიფი მართვისთვის. ღვიძლის სასიცოცხლო მნიშვნელობის როლი გლუკოზის ჰომეოსტაზში მისი უჯრედების მეტაბოლური მრავალმხრივობისა და ღვიძლის კარის ვენის (რომელსაც სისხლი მიაქვს წერილი ნაწლავებიდან პირდაპირ ღვიძლისაკენ) საშუალებით შეწოვილი საყუათო ნივთიერებების ხელმისაწვდომობის შედეგია.

## შაქრიანი დიაბეტი

როდესაც გლუკოზის მეტაბოლიზმი არასწორად მიმდინარეობს, ამას სერიოზული შედეგები მოჰყვება. **შაქრიანი დიაბეტი**, შესაძლოა, ყველაზე უფრო კარგად ცნობილი ენდოკრინული დარღვევაა და გამოწვეულია ინსულინის ნაკლებობით ან სამიზნე ქსოვილების ინსულინისადმი შემცირებული პასუხით. არსებობს შაქრიანი დიაბეტის ორი ძირითადი ფორმა, ძალიან განსხვავებული გამომწვევი მიზეზებით, მაგრამ ორივესთვის დამახასიათებელია სისხლში გლუკოზის მაღალი შემცველობა.

დიაბეტით დაავადებულ ადამიანებში, სისხლში მომატებული გლუკოზა აჭარბებს თირკმლების მიერ მისი რეაბსორბციის უნარს, რაც იწვევს მათ მიერ გლუკოზის გამოყოფას. ამით აიხსნება, რატომ არის შარდში შაქრის არსებობა დიაბეტის ერთ-ერთი ტესტი. რადგანაც გლუკოზა არის კონცენტრირებული შარდში, უფრო მეტი წყლის გამოყოფა ხდება მასთან ერთად, რასაც შედეგად მოჰყვება შარდის ჭარბი მოცულობა და წყურვილის მუდმივი შეგრძნება. თუ გლუკოზის საკმარისი რაოდენობა სხეულის უმეტესი უჯრედების მოთხოვნილების შესაბამისად არ იქნება ხელმისაწვდომი, ცხიმები უჯრედული

სუნთქვისთვის მთავარი სუბსტრატი ხდება. რიგ შემთხვევებში, მჟავური მეტაბოლიტები, რომლებიც წარმოიქმნება ცხიმების დაშლის დროს, გროვდება სისხლში, რაც სისხლის პ-ის დანევით სიცოცხლეს საფრთხეს უქმნის.

I ტიპის შაქრიანი დიაბეტი (ინსულინ-დამოკიდებული დიაბეტი) აუტოიმუნური დარღვევაა, რომლის დროსაც იმუნური სისტემა პანკრეასის ბეტა უჯრედებს აზიანებს. I ტიპის დიაბეტი ჩვეულებრივ ბავშვობაში ვლინდება და ადამიანში ინსულინის წარმოქმნის უნარს არღვევს. მკურნალობა ინსულინის ინექციით ჩვეულებრივ დღეში რამდენიმეჯერ ხდება. წარსულში საინექციო ინსულინის ცხოველის პანკრეასიდან გამოყოფდნენ, მაგრამ ამჟამად ადამიანის ინსულინის მიღება შესაძლებელია გენური ინჟინერიის გზით ბაქტერიებიდან, რაც შედარებით არაძვირადღირებული წყაროა (**იხ. სურათი 20.2**).

II ტიპის შაქრიანი დიაბეტისთვის (არაინსულინ-დამოკიდებული დიაბეტი) დამახასიათებელია ან ინსულინის ხარვეზი, ან უფრო მეტად, სამიზნე უჯრედების მგრძნობელობის უუნარობა, რაც განპირობებულია ზოგიერთი ცვლილებით ინსულინის რეცეპტორებში. მიუხედავად იმისა, რომ მეშვიდრეობითობა II ტიპის დიაბეტში ასრულებს როლს, კვლევები მიუთითებს, რომ სხეულის ჭარბი წონა ფიზიკური ვარჯიშის გარეშე სარწმუნოდ ზრდის დაავადების რისკს.

ამ ფორმის დიაბეტი ძირითადად ვლინდება 40 წლის ასაკის შემდეგ, მაგრამ ახალგაზრდებს, რომლებიც არიან ჭარბწონიანი და ახასიათებთ ცხოვრების მჯდომარე წესი, დაავადება შეიძლება ასევე განუვითარდეთ. დიაბეტით დაავადებული ადამიანების 90%-ზე მეტს აქვს II ტიპის დიაბეტი. ბევრ ადამიანს შეუძლია მართოს გლუკოზის დონე სისხლში რეგულარული ვარჯიშითა და ჯანმრთელი დიეტით, ხოლო ზოგიერთს წამლებით თერაპია ესაჭიროება.

## თირკმელზედა ჯირკვლის ჰორმონები: პასუხი სტრესზე



### თირკმელზედა ჯირკვლები

თირკმელზედა განლაგებული. ძუძუმწოვრებში თირკმელზედა ჯირკვალი სინამდვილეში ორი ჯირკვლისაგან შედგება. ერთი თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქს - გარეთა ნაწილს წარმოადგეს და მეორე თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერებისგან- ცენ-

ტრალური ნაწილისაგან შედგება. მათ განსხვავებული ტიპის უჯრედები, ფუნქციები და ემბრიონული წარმოშობა აქვთ. ჰიპოფიზის მსგავსად თირკმელზედა ჯირკვალი შერეული ენდოკრინული და ნეიროენდოკრინული ჯირკვალაა. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი ნამდვილი ენდოკრინული უჯრედებისგან შედგება. მეორეს მხრივ თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერების სეკრეტორული უჯრედები ჩანასახის ზურგის ტვინის პარალელურად მდებარე ნერვული განგლიური ფირფიტისგან ვითარდება (**იხ. სურათი**

34.7). არაძუღმნოვარ ხერხემლიანებს იგივე ქსოვილების საკმაოდ განსხვავებული განლაგება აქვთ.

### კატექოლამინები თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნაწილიდან გამოიყოფა

წარმოიდგინეთ, რომ გრძნობთ საფრთხეს ან სტრესული ვითარების მოახლოებას, როგორიცაა ხალხის წინ სიტყვით გამოსვლა. თქვენი გული უფრო ჩქარა იწყებს ცემას და თქვენს კანზე ხორკლები ჩნდება. რა იწვევს ამ რეაქციებს? მათ მიეკუთვნება ე.წ. თავდასხმა-თავდაცვის პასუხი, რომლის გამოწვევაც თირკმელზედა ჯირკვლის ორი ჰორმონით, **ეპინეფრინით** (ადრენალინი) და **ნორეპინეფრინით** (ნორადრენალინი) ხდება. ეს ჰორმონები **კატექოლამინების** ნაერთა კლასის წარმომადგენლებია, რომლებიც ამინომჟავა თიროზინისგან სინთეზდება. ამავე დროს, როგორც ეპინეფრინი, ისევე ნორეპინეფრინი ნერვულ სისტემაში ნეიროტრანსმიტერების სახით ფუნქციონირებენ.

როგორც პოზიტიური, ასევე ნეგატიური სტრესი - დანყებული უკიდურესი სიამოვნებიდან, დამთავრებული სიცოცხლისთვის სახიფათო ტემპერატურის დაცემამდე - განაპირობებს თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერებიდან ეპინეფრინისა და ნორეპინეფრინის სეკრეციას.

ეს ჰორმონები რიგ სამიზნე ქსოვილებზე პირდაპირ მოქმედებს და ორგანიზმს სწრაფ ბიოენერგეტიკულ მხარდაჭერას უზრუნველყოფს. მათი მოქმედებით იზრდება გლიკოგენის დაშლა ღვიძლსა და ჩონჩხის კუნთებში, ხდება ღვიძლის უჯრედების მიერ გლუკოზის გამოთავისუფლების სტიმულაცია. გამოთავისუფლებული გლუკოზა და ცხიმოვანი მჟავები ცირკულირებენ სისხლში და სხეულის უჯრედების მიერ სანვავად გამოიყენება.

გარდა გაზრდისა ხელმისაწვდომი ენერგიის, ეპინეფრინი და ნორეპინეფრინი გულისსხლძარღვთა და რესპირატორულ სისტემებზე ძლიერ გავლენას ახდენს. მაგალითად, ისინი ზრდიან გულისცემის სიხშირესა და სიძლიერეს და ფილტვებში ბრონქოლების დილატაციას იწვევენ, რაც ორგანიზმის უჯრედებისთვის ჟანგბადის მიწოდებას ზრდის (სწორედ ამის გამო ექიმები ნიშნავენ ეპინეფრინს გულის სტიმულანტად და ასთმური შეტევების დროს სასუნთქი გზების გასასხნელად).

კატექოლამინები აგრეთვე ზოგიერთი სისხლძარღვის გლუვი კუნთების შეკუმშვას იწვევს, ხოლო სხვა სისხლძარღვების კუნთების მოდუნებას, რაც მთლიანობაში, კანში, საჭმლის მომნელებელი ორგანოებში და თირკმლებში სისხლის მიწოდებას ამცირებს, როდესაც სისხლის მიწოდებას გულისაკენ, ჩონჩხის კუნთებისაკენ და ტვინისაკენ ზრდის (**იხ. სურათი 45.6**). ეპინეფრინს ზოგადად აქვს უფრო მძლავრი ეფექტი გულსა და მეტაბოლიზმის ინტენსივობაზე, ხოლო ნორეპინეფრინის ძირითადი ფუნქცია სისხლის წნევის შენარჩუნებაა. როგორც ნაჩვენებია **სურათ 45.13 ა-ზე**, თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერებიდან სეკრეციის სტიმულაცია იმ ნერვული სიგნალებით ხდება, რომლებიც ტვინიდან ავტონომიური ნერვული სისტემის სიმპათიკური განყოფილების საშუალებით მიეწოდება (განხილულია 48-ე თავში). სტრესულ სტიმულზე საპასუხოდ, ნერვული იმ-

პულსები ჰიპოთალამუსიდან გზას თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვან ნივთიერებამდე გაივლის, სადაც ისინი ეპინეფრინის გამონთავისუფლებას განაპირობებს.

ნორეპინეფრინი ეპინეფრინისგან დამოუკიდებლად გამოთავისუფლდება. თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერების ჰორმონები მარტივი ნეიროჰორმონული გზის მაგალითს წარმოადგენს (**იხ. სურათი 45.2 ბ**). ამ შემთხვევაში ნეიროსეკრეტორული უჯრედები მოდიფიცირებული პერიფერიული ნერვული უჯრედებია.

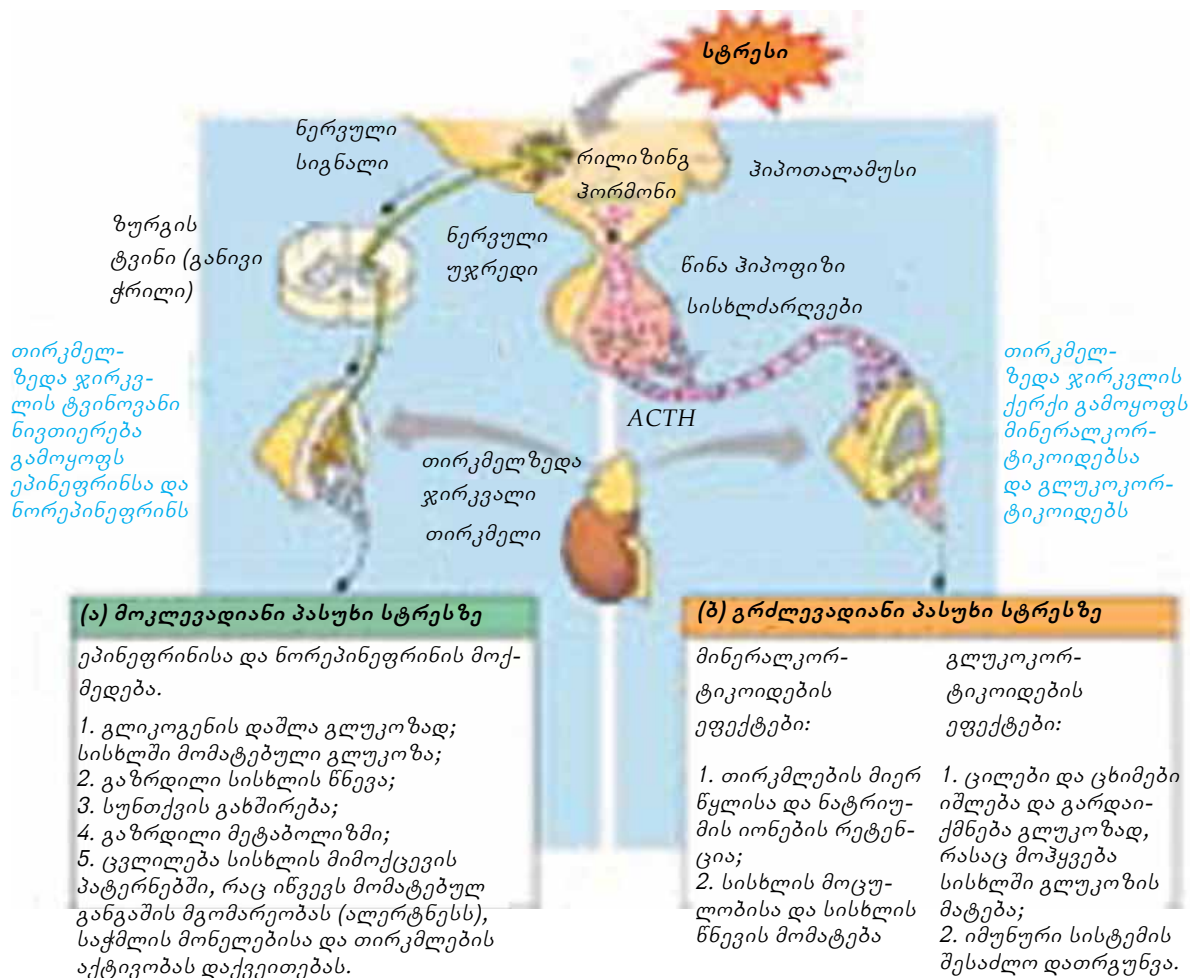
### თირკმლისზედა ჯირკვლის ქერქის სტეროიდული ჰორმონები

თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქის ჰორმონებიც აგრეთვე მონაწილეობენ ორგანიზმის სტრესზე პასუხში. მაგრამ თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერებისგან განსხვავებით, რომელიც ნერვულ შესავალზე რეაგირებს, თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი ენდოკრინულ სიგნალებს პასუხობს. სტრესული სტიმული ჰიპოთალამუსიდან გამშვებ ჰორმონის გამონთავისუფლებას იწვევს, რაც წინა ჰიპოფიზიდან ტროფული ჰორმონის — ACTH-ის გამოთავისუფლებას ასტიმულირებს. როდესაც ჩთ სისხლის მიმოქცევის სისტემით თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქამდე მიაღწევს, ის ენდოკრინული უჯრედების მიერ სტეროიდული ნაერთების, კორტიკოსტეროიდების სინთეზისა და გამოყოფის სტიმულაციას ახდენს. სისხლში კორტიკოსტეროიდების გაზრდილი დონე ACTH-ის სეკრეციას თრგუნავს რაც წარმოადგენს უარყოფითი უკუკავშირის მაგალითს.

აღამიანებში კორტიკოსტეროიდების ორი ძირითადი ტიპია, გლუკოკორტიკოიდები, როგორიცაა კორტიზოლი და მინერალკორტიკოიდები — ალდოსტერონი. მონაცემები მიუთითებენ, რომ როგორც გლუკოკორტიკოიდები, ასევე მინერალკორტიკოიდები ორგანიზმს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებაში ეხმარება ხანგრძლივი სტრესის პირობებში. (**სურათი 45.13 ბ**). გლუკოკორტიკოიდებს გავლენა ძირითადად ბიოენერგეტიკაზე აქვთ, კერძოდ გლუკოზის მეტაბოლიზმზე. იგი გლუკაგონის სანვავის მამობილიზებელ ეფექტებს აძლიერებს და ხელს უწყობს გლუკოზის სინთეზს ისეთი არანახშირ-წყლოვანი წყაროებიდან, როგორიც არის ცილები.

გლუკოკორტიკოიდები ჩონჩხის კუნთებზე მოქმედებენ და კუნთის ცილებს შლიან. ამის შედეგად მიღებული ნახშირბადის ჩონჩხები ტრანსპორტირდება ღვიძლსა და თირკმლებში, სადაც ისინი გარდაიქმნება გლუკოზად და გამოთავისუფლდება სისხლში. კუნთის ცილებიდან გლუკოზის სინთეზი ჰომეოსტაზური მექანიზმია რომელიც ხელს უწყობს სანვავის ცირკულაციას, მაშინ როდესაც ორგანიზმის აქტივობას ესაჭიროება უფრო მეტი, ვიდრე ეს ღვიძლს შეუძლია უზრუნველყოს, გლიკოგენის საცავებიდან მობილიზებით. შესაძლებელია რომ გლუკოკორტიკოიდები უფრო ფართო როლს თამაშობდნენ, რომელიც ეხმარება ორგანიზმს გარემოს გრძელვადიან სტრესულ ცვლილებებს გაუძლოს.

კორტიზოლი და სხვა გლუკოკორტიკოიდები ორგანიზმის იმუნური სისტემის გარკვეულ კომპონენტებს თრგუნავენ. მათი ანთების საწინააღმდეგო ეფექტის გამო, გლუკოკორ-



▲ **სურათი 45.13 სტრესი და თირკმელზედა ჯირკვლი.** სტრესული სტიმულით ჰიპოთალამუსი ააქტივებს თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვან შრეს ნერვული იმპულსების საშუალებით (ა) და თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქის ჰორმონალური სიგნალებით (ბ). თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერება განაპირობებს მოკლევადიან პასუხებს სტრესზე კატექოლამინური ჰორმონების ეპინეფრინისა და ნორეპინეფრინის გამოყოფით. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი აკონტროლებს უფრო პროლონგირებულ პასუხებს კორტიკოსტეროიდების გამოყოფით.

ტიკოიდები გამოიყენებოდა ისეთი ანთებითი დაავადებების სამკურნალოდ, როგორიცაა ართრიტი. თუმცა, გლუკოკორტიკოიდების ხანგრძლივ გამოყენებას შესაძლოა ჰქონდეს სერიოზული გვერდითი ეფექტები. ასევე შეიძლება გაიზარდოს ინფექციებისადმი მგრძნობელობა, რომელიც მათი იმუნიტეტის დამთრგუნავ ეფექტითაა გამოწვეული. ამიტომ, არასტეროიდულ ანთების საწინააღმდეგო ნაწილებს ძირითადად უპირატესობა ენიჭება ქრონიკული ანთებითი მდგომარეობების სამკურნალოდ.

მინერალკორტიკოიდები მოქმედებენ უპირატესად მარილებისა და წყლის ბალანსზე. მაგალითად, ალდოსტერონი ასტიმულირებს თირკმლის უჯრედებს, რათა მოახდინოს ნატრიუმის იონებისა და წყლის რეაბსორბცია ფილტრატადან, ზრდის სისხლის წნევასა და მოცულობას. ალდოსტერონის სეკრეციის სტიმულაცია ხდება თავდაპირველად ანგიოტენზინ II-ით, როგორც ნაწილი რეგულატორული გზისა, რომელიც აკონტროლებს თირკმლების უნარს შეინარჩუნოს სისხლში იონთა და წყლის ჰომოეოსტაზი (იხ. სურათი 44.16). მიუხე-

დავად ამისა, როდესაც ინდივიდი განიცდის მძიმე სტრესს, სისხლში გაზრდილმა ACT-ის დონემ შესაძლოა გაზარდოს

თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქის მოქმედების ინტენსივობა იმ მაჩვენებელამდე, რომლის დროსაც გამოყოფა როგორც გლუკოკორტიკოიდები, ასევე ალდოსტერონი. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი წარმოქმნის კორტიკოსტეროიდების მესამე ჯგუფს, რომლებიც ფუნქციონირებენ როგორც სასქესო ჰორმონები. ყველა სტეროიდული ჰორმონი სინთეზდება ქოლესტეროლიდან (იხ. სურათი 5.5) და მათი სტრუქტურები მხოლოდ უმნიშვნელოდ განსხვავდება.

თუმცა ეს განსხვავებები დაკავშირებულია მათი ეფექტების ძირითად განსხვავებებთან. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქის მიერ წარმოქმნილი სასქესო ჰორმონები ძირითადად მამრობითი ჰორმონებია (ანდროგენები). მცირე რაოდენობით მდედრობითი ჰორმონებიც (ესტროგენები და პროგესტინები) გამოიყოფა. მონაცემების თანახმად, თირკმელზედა ჯირკვლის ანდროგენები ზრდასრულ ქალებში სქესობრივ მოტივაციაზე პასუხისმგებელი. მაგრამ მეორე მხრივ,



თირკმელზედა ჯირკვლის სასქესო ჰორმონების ფიზიოლოგიური როლი არ არის ბოლომდე ნათელი.

## გონადური სასქესო ჰორმონები

მიუხედავად იმისა, რომ თირკმელზედა ჯირკვლები გამოყოფს მცირე რაოდენობით სასქესო ჰორმონებს, გონადები ამ ჰორმონების ძირითადი წყაროა. გონადები სტეროიდული ჰორმონების სამ ძირითად კლასს წარმოქმნის და გამოყოფს: ანდროგენებს, ესტროგენებს და პროგესტინებს. სამივე ტიპის ჰორმონი ნანახია როგორც მამრებში ასევე მდედრებში, მაგრამ განსხვავებული პროპორციებით. მამრის სათესლეებსა და მდედრის საკვერცხეებში წარმოქმნილი ეს სტეროიდები ზრდასა და განვითარებაზე მოქმედებენ. აგრეთვე რეპროდუქციულ ციკლებსა და სქესობრივ ქცევას არეგულირებენ.

სათესლეები ძირითადად ასინთეზებს ანდროგენებს, რომელთაგან უმთავრესი ტესტოსტერონია. ზოგადად, ანდროგენები მამრის რეპროდუქციული სისტემის განვითარებისა და შენარჩუნების სტიმულაციას ახდენს. ადრეულ ემბრიონულ სტადიაზე წარმოქმნილი ანდროგენები ჩანასახიდან მამრის განვითარებას განსაზღვრავს.

სქესობრივი მომწიფების (პუბერტულ) პერიოდში ანდროგენების მაღალი კონცენტრაცია პასუხისმგებელია მამაკაცის მეორადი სასქესო ნიშნების განვითარებაზე, როგორიცაა თმის ზრდის ტიპი და დაბალი ხმა. ასევე, მამრებისთვის დამახასიათებელი ჩონჩხისა კუნთების და ძვლის მასის მომატება. ტესტოსტერონისა და სხვა ანაბოლური სტეროიდების კუნთის-საამჟენებლო მოქმედება აცდუნებს ზოგიერთ ათლეტს მიიღოს ისინი დანამატების სახით, თუმცა ეს წამლები მცირე უპირატესობას იძლევა სპორტის იმ სახეობებში, რომლებსაც კუნთების ნატიფი კოორდინაცია და გამძლეობა ესაჭიროება. უფრო მეტიც, ანაბოლური სტეროიდების ბოროტად გამოყენება ჯანმრთელობისთვის მრავალი რისკის მატარებელია (სურათი 45.14) და მათი გამოყენება აკრძალულია უმეტეს სპორტულ შეჯიბრებებში.

**ესტროგენები**, რომელთაგანაც ყველაზე მნიშვნელოვანია ესტრადიოლი, პასუხისმგებელია მდედრის რეპროდუქციული სისტემის შენარჩუნებასა და მდედრის მეორადი სასქესო ნიშნების განვითარებაზე.

ძუძუმწოვრებში **პროგესტინები**, რომელთა რიცხვში შედის პროგესტერონი, უპირველეს ყოვლისა ჩართულია საშვილოსნოს მომზადებასა და მის ნორმალურ მდგომარეობის შენარჩუნებაში, რაც უზრუნველყოფს ემბრიონის ნორმალურ ზრდასა და განვითარებას.

როგორც ესტროგენები, ასევე ანდროგენები კომპლექსური ნეიროენდოკრინული გზების კომპონენტებია. მათი სინთეზი კონტროლდება წინა ჰიპოფიზის გონადოტროპინებით (FSH და ) (იხ. სურათი 45.8). FSH-ის და LH-ის სეკრეცია თავისმხრივ კონტროლდება ჰიპოთალამუსის რილიზინგ ჰორმონით, GnR-ით. 46-ე თავში ჩვენ დეტალურად განვიხილავთ



▲ **სურათი 45.14 ანაბოლური სტეროიდებით გამოწვეული მამაკაცის მკერდის გაზრდა.** სტეროიდების ბოროტად გამოყენება არღვევს ორგანიზმის მიერ ჰორმონების ნორმალურ პროდუქციას, რაც იწვევს როგორც ხანმოკლე, ისევე გრძელვადიან ჯანმრთელობის რისკებს. მამრებში შესაძლოა მოხდეს აგრეთვე უნაყოფოობა და სათესლის ატროფია. მდედრები განიცდიან მასკულანიზებულ ეფექტებს როგორც არის მკერდის დაპატარავება, ხმის დადაბლება და სხეულზე თმის მოჭარბებული ზრდა. ორივე სქესს შესაძლოა განუვითარდეთ აკნე — ცხიმოვანი ჯირკვლების ანთება (ფერისმჭამელები) და მამაკაცისათვის დამახასიათებელი სიმელოტე. ჯანმრთელობისათვის პოტენციურ გრძელვადიან რისკებში შედის გულისა და ღვიძლის დაზიანება.



უკუკავშირების ურთიერთქმედებებს, რომლებიც არეგულირებს გონადური სტეროიდების სეკრეციას.

## მელატონინი და ბიოთიმები

ხერხემლიანების ენდოკრინული სისტემის განხილვას ჩვენ ვასრულებთ **ეპიფიზით** (ჯალღუხისებური სხეული), მცირე ზომის ქსოვილის შეჯგუფებით ძუძუმწოვრების ტვინის ცენტრთან ახლოს. ეპიფიზი ასინთეზირებს და გამოყოფს მოდიფიცირებულ ამინომჟავას — ჰორმონ **მელატონინს**. სახეობაზე დამოკიდებულებით, ეპიფიზი შეიცავს სინათლისადმი მგრძნობიარე უჯრედებს, ან აქვს თვალთან ნერვული კავშირები, რაც აკონტროლებს მის სეკრეტორულ აქტივობას.

მელატონინი არეგულირებს ფუნქციებს, რომლებიც დაკავშირებულია სინათლესთან და წლის დროებთან, რომლებიც სთვლისაც დამახასიათებელია გარკვეული დღის ხანგრძლივობა. თუმცა მელატონინი მრავალ ხერხემლიანში მოქმედებს კანის პიგმენტაციაზე, მისი უმთავრესი ფუნქციები დაკავშირებულია გამრავლებასთან ასოცირებულ ბიოლოგიურ რიტმებთან. მელატონინის სეკრეცია ღამით მიმდინარეობს, ხოლო სეკრეტის

რაოდენობა ღამის ხანგრძლივობაზეა დამოკიდებული. მაგალითად, ზამთარში დღე მოკლეა ღამე კი — გრძელი, ამიტომ, მეტი მელატონინის გამოყოფა ხდება. ამგვარად, მელატონინის წარმოქმნა დამაკავშირებელი რგოლია ბიოლოგიურ საათსა და დღე-ღამურ ან სეზონურ აქტივობებს შორის, როგორიც არის გამრავლება. ბოლო დროის მონაცემები მიუთითებს, რომ მელატონინის მთავარი სამიზნე უჯრედები ტვინის შეწყვილებული სტრუქტურაა, რომელსაც სუპრაქიაზმურ ბირთვს (SCN) უწოდებენ და, რომელიც ფუნქციონირებს, როგორც ბიოლოგიური საათი. საგარაუდოდ, მელატონინი ამცირებს SCN-ის ნეირონების აქტივობას. ეს შესაძლოა დაკავშირებული იყოს მის რიტმების განმაპირობებელ როლთან. თუმცა, მელატონინის ზუსტი როლი და ზოგადად ბიოლოგიური საათები ჯერ კიდევ შესასწავლი რჩება.

## კანცელაცია ცისცი 45.4

1. როგორ აკონტროლებს თიროქსინი (T4) მის საკუთარ წარმოქმნასა და სეკრეციას?
2. როგორ ახდენენ კალციტონინი და პარათიროიდული ჰორმონი (PTH) სისხლში  $Ca^{2+}$ -ის დონის შენარჩუნებას ნორმასთან ახლოს?
3. გლუკოზის ტოლერანტობის ტესტში, ინდივიდის სისხლში გლუკოზის დონე პერიოდულად გლუკოზის შემცველი ხსნარის მიღების შემდეგ იზომება. ჯანმრთელ ინდივიდებში თავიდან სისხლში გლუკოზის დონე იზრდება ზომიერად, მაგრამ შემდგომ 2-3 საათში ეცემა ნორმასთან ახლოს. წინასწარ განსაზღვრეთ შაქრიანი დიაბეტის მქონე ინდივიდში ამ ტესტის შედეგები. ახსენით თქვენი პასუხი.
4. როგორ იმოქმედებდა ჰიპოთალამუსში კორტიკოსტეროიდების რეცეპტორების რაოდენობის შემცირება სისხლში კორტიკოსტეროიდების დონეზე?

## კანცელაცია 45.5

### უხერხემლოთა მატერიალური სისტემები მთავარ ენდოკრინულ და ნერვული სისტემების ურთიერთქმედებას

უხერხემლო ცხოველებში სხვადასხვა ჰორმონი ტიპიურ ენდოკრინულ და ნეიროსეკრეტორულ უჯრედებში წარმოიქმნება. უხერხემლოთა ზოგიერთ ჰორმონს ჰომეოსტაზური ფუნქციები აქვს, როგორიცაა წყლის

ბალანსის რეგულაცია. მიუხედავად ამისა, ჩვენ უფრო მეტი ვიცით იმ ჰორმონების შესახებ, რომლებიც ფუნქციონირებენ გამრავლებასა და განვითარებაში. მაგალითად, ჰიდრას ერთი ჰორმონი ასტიმულირებს ზრდასა და დაკვირვებას, მაგრამ ხელს უშლის სქესობრივ გამრავლებას. უფრო რთულ უხერხემლოებში ენდოკრინული და ნერვული სისტემები ზოგადად ინტეგრირებულია გამრავლებისა და განვითარების კონტროლისთვის. მაგალითად, მოლუსკ აპლიზიაში სპეციალიზებული ნერვული უჯრედები გამოყოფენ ნეიროჰორმონს, რომელიც ასტიმულირებს ათასობით კვერცხის დადებას და ამავე დროს აკავებს კვებასა და ლოკომოციას - აქტივობებს, რომლებიც ხელს უშლის გამრავლებას.

ფეხსახსრიანების ყველა ჯგუფს აქვს კარგად განვითარებული ენდოკრინული სისტემა. კიბოსნაირებს აქვთ ჰორმონები, რომლებიც ფუნქციონირებენ ზრდისა და გამრავლების დროს. აგრეთვე მონაწილეობენ წყლის ბალანსის, ჯავშნისა და მეტაბოლიზმის რეგულაციაში. აქვთ ეგზოსკელეტონი (გარეგანი ჩონჩხი), რომელსაც არ შეუძლია გაჭიმვა, ამიტომ კიბოსნაირები და მწერები ნახტომისებურად იზრდებიან, ეგზოსკელეტონის ცვლისას როდესაც იწყებენ ახლის სეკრეციას. შემდგომში მწერების უმეტესობა საბოლოო, ზრდასრულ ნიშან-თვისებებს ეგზოსკელეტონის ბოლო ცვლის დროს შეიძენს. მწერებსა და კიბოსნაირებში (და როგორც ჩანს, ეგზოსკელეტონის მქონე ყველა ფეხსახსრიანში), ეგზოსკელეტონის ცვლის ჩართვა ჰორმონით ხდება.

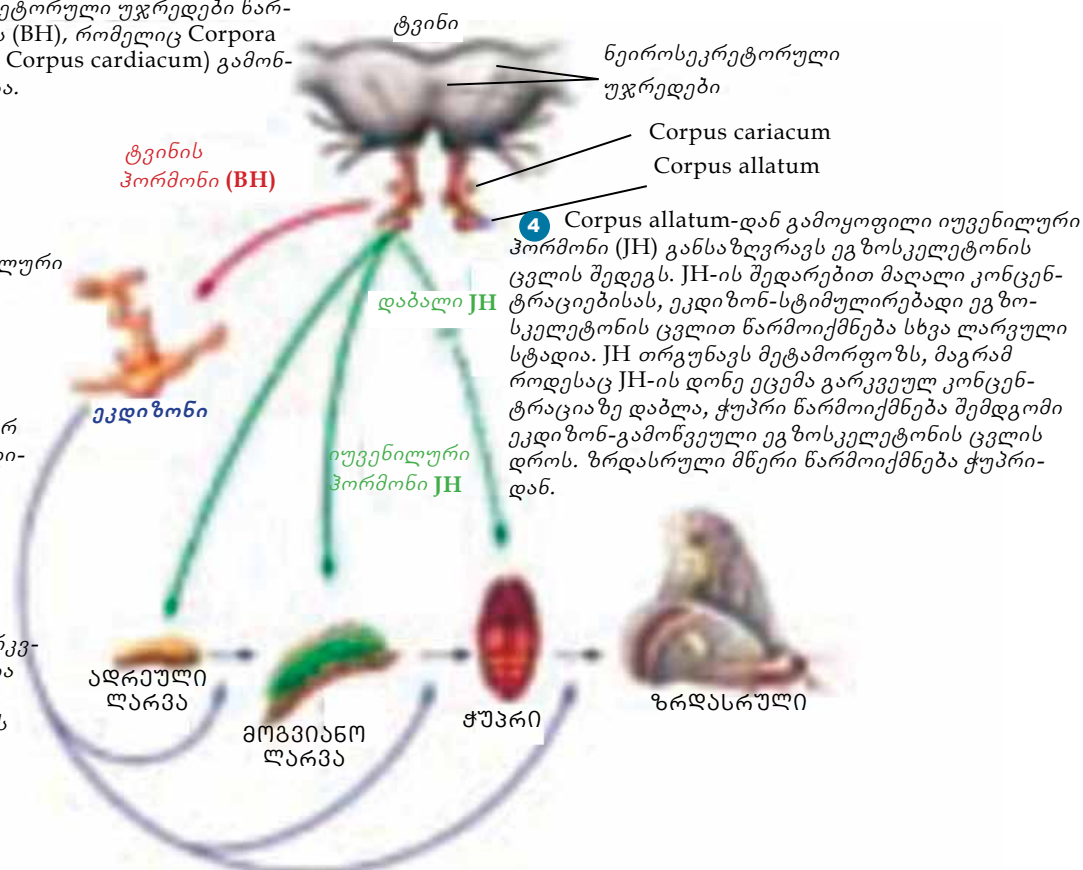
მწერების განვითარების ჰორმონული რეგულაცია საკმაოდ და შესწავლილი. ეგზოსკელეტონის ცვლასა და ზრდასრულ ფორმად მეტამორფოზში სამი ჰორმონი ასრულებს ძირითად როლს (**სურათი 45.15**).

მწერების ტვინის ნეიროსეკრეტორული უჯრედების მიერ წარმოქმნილი **ტვინის ჰორმონი** ასტიმულირებს პროთორაკალური (პროტჰორაციც) ჯირკვლიდან (უშუალოდ ტვინის შემდეგ მდებარე შეწყვილებულ ენდოკრინული ჯირკვალი) ეკდიზონის გამონთავისუფლებას. **ეკდიზონი** ხელს უწყობს ეგზოსკელეტონის ცვლასა და ზრდასრულობის ნიშან-თვისებების განვითარებას მუხლუხოდან პეპლამდე. ტვინის ჰორმონის და ეკდიზონის ბალანსირება ხდება ამ სისტემის ჰორმონის — იუვენილური ჰორმონის მოქმედებით. **იუვენილური ჰორმონი** გამოიყოფა უშუალოდ ტვინის შემდეგ მდებარე წყვილი

1 ტვინის ნეიროსეკრეტორული უჯრედები წარმოქმნიან ტვინის ჰორმონს (BH), რომელიც Corpora cardiaca-ში (მხოლოდობით, Corpus cardiacum) გამოწვევს თავისუფლებამდე ინახება.

2 BH გადასცემს სიგნალს მის მთავარ სამიზნე ორგანოს, პროთორაკალურ ჯირკვალს, ჰორმონის ეკდიზონი წარმოქმნის.

3 პროთორაკალური ჯირკვლიდან ეკდიზონის სეკრეცია არის ეპიზოდური, ყოველი გამონთავისუფლება ახდენს ეგზოსკელეტონის ცვლის სტიმულაციას.



▲ სურათი 45.15 მწერის განვითარების ჰორმონული რეგულაცია. მწერების უმეტესობა გაივლის ლარვული სტადიების რიგს, ეგზოსკელეტონის ყოველი ცვლა (ძველი ეგზოსკელეტონის მოშორებით) განაპირობებს უფრო დიდი ლარვის წარმოქმნას. საბოლოო ლარვული სტადიის ეგზოსკელეტონის ცვლა დასაბამს აძლევს ჭუპრს (პუპა), რომლის მეტამორფოზიც წარმოქმნის მწერის ზრდასრულ ფორმას. ჰორმონული კონტროლი და სტადიების განვითარება ხდება როგორც აქ არის ნაჩვენები.

მცირე ზომის ენდოკრინული ჯირკვლებიდან „corpora allata“-დან, რომელიც ხერხემლიანების წინა ჰიპოფიზის ერთგვარ ანალოგს წარმოადგენს. როგორც მისი სახელი მიუთითებს, იუვენილური ჰორმონი ხელს უწყობს ლარვული (იუვენილური) მახასიათებლების შენარჩუნებას.

იუვენილური ჰორმონის შედარებით მაღალი კონცენტრაციისას ეკდიზონს ჯერ კიდევ შეუძლია ეგზოსკელეტონის ცვლის სტიმულაცია, მაგრამ ამის შედეგად წარმოქმნილი ინდივიდი ლარვაზე დიდია. ხოლო მაშინ, როდესაც იუვენილური ჰორმონის დონე იკლებს, ეკდიზონით განპირობებულ ეგზოსკელეტონის ცვლას შეუძლია გადავიდეს ე.წ. ჭუპრის სტადიაზე. იუვენილური ჰორმონის სინთეზური ფორმები ამჟამად გამოიყენება როგორც მწერების სანინაალმდეგო საშუალებები, რომლებიც ხელს უშლის მწერებს რეპროდუქციულ მდგომარეობაში გადასვლას. მომდევნო თავში ჩვენ განვიხილავთ გამრავლებას, როგორც ხერხემლიანებში ასევე უხერხემლოებში.

ბში, სადაც ვნახავთ, რომ ენდოკრინული სისტემა არის ცენტრალური არა მხოლოდ ინდივიდის გადარჩენისთვის, არამედ სახეობის გავრცელებისთვის.

## კონცეფცია ცისტი 45.5

1. როგორ მონაწილეობს მწერებში ეგზოსკელეტონის ცვლაში ნერვული სისტემა?
2. იუვენილური ჰორმონი ზოგჯერ მრეწველობაში გამოიყენება მწერების სანინაალმდეგოდ. როგორი მოქმედებას იქონიებს მწერების პოპულაციაზე? ახსენით.

## ბიბლიური კანცეფციის შემოღება

### კანცეფცია 45.1

**ენდოკრინული სისტემა და ნერვული სისტემა მოქმედებს იდივიდუალურად და ერთდროულად ცხოვლის ფიზიოლოგიური პრინციპების ბაზაზე**

- ▶ **ენდოკრინული და ნერვული რეგულაციის თანხვედრა** ენდოკრინული და ნერვული სისტემები ხშირად ფუნქციონირებს ერთდროულად, ჰომეოსტაზის შესანარჩუნებლად, განვითარებისას და გამრავლებისას. ენდოკრინული ჯირკვლები და სხვადასხვა ორგანოები ძირითადი არაენდოკრინული ფუნქციებით გამოყოფენ ჰორმონებს, ხოლო ნერვული ქსოვილიდან წარმოქმნილი სპეციალიზებული სეკრეტორული უჯრედები გამოყოფენ ნეიროჰორმონებს. ორივე კლასის ჰორმონული სიგნალები ცირკულირებენ ორგანიზმში მათ სამიზნე ქსოვილებამდე. ისინი ფუნქციონირებენ, როგორც შორ მანძილზე მოქმედი რეგულატორები.
- ▶ **კონტროლის გზები და უკუკავშირების რგოლები** არსებობს ჰორმონული კონტროლის სამი ძირითადი ტიპის გზა: ენდოკრინული, ნეიროჰორმონული და ნეიროენდოკრინული. ყველა სახის გზაში წარმოდგენილია ბიოლოგიური რეგულატორული სისტემის ძირითადი კომპონენტები. ჰომეოსტაზში ჩართულ მრავალ ჰორმონულ გზას უარყოფითი უკუკავშირი არეგულირებს.

### კანცეფცია 45.2

**ჰორმონები და სხვა ქიმიური სიგნალები უკავშირდებიან სამიზნე უჯრედის ბირთვებს, დასაბამს აბლუფენ გზებს, რომლებიც ბიოლოგიურ სპეციფიკური უჯრედული პასუხით**

- ▶ **უჯრედის ზედაპირული რეცეპტორები წყალში ხსნადი ჰორმონებისთვის** პეპტიდურ/ცილოვანი და ამინომჟავებისგან წარმოებული ჰორმონების უმეტესობა უკავშირდება პლაზმურ მემბრანაში განთავსებულ რეცეპტორებს. ჰორმონის დაკავშირება განაპირობებს სიგნალის ტრანსდუქციის გარკვეულ გზას, რასაც მოჰყვება სპეციფიკური პასუხი ციტოპლაზმაში ან ცვლილებები გენის ექსპრესიაში. ერთსა და იმავე ჰორმონს შესაძლოა ჰქონდეს განსხ-

ვავებული ეფექტები სამიზნე უჯრედებზე, რომლებსაც გააჩნიათ ჰორმონისთვის განსხვავებული რეცეპტორები, განსხვავებული სიგნალის ტრანსდუქციის გზები, ან განსხვავებული ეფექტორული ცილები.

- ▶ **უჯრედშიდა რეცეპტორები ლიპიდებში ხსნადი ჰორმონებისთვის** სტეროიდული ჰორმონები, თიროიდული ჰორმონები და D ვიტამინის ჰორმონული ფორმა შედის სამიზნე უჯრედში და უკავშირდება სპეციფიკურ რეცეპტორულ ცილას ციტოპლაზმაში ან ბირთვში. ჰორმონი-რეცეპტორის კომპლექსები მოქმედებს როგორც ტრანსკრიფციული ფაქტორები, არეგულირებს სპეციფიკური გენების ტრანსკრიფციას.
- ▶ **პარაკრინული სიგნალის გადაცემა ლოკალური რეგულატორებით** სხვადასხვა ტიპის ქიმიური სიგნალები იწვევს პასუხებს ახლომდებარე სამიზნე უჯრედებში. ლოკალური რეგულატორების რიცხვშია ნეიროტრანსმიტერები, ციტოკინები და ზრდის ფაქტორები (ცილები/პეპტიდები), აზოტის ოქსიდი და პროსტაგლანდინები (მოდიფიცირებული ცხიმოვანი მჟავები).

### კანცეფცია 45.3

**ჰიპოთალამუსი და ჰიპოფიზი აინფორმირებს სტრუქტურულ ნაწილებს ენდოკრინული სისტემის მთავალ ფუნქციას**

- ▶ **კავშირები ჰიპოთალამუსსა და ჰიპოფიზს შორის** ჰიპოთალამუსი, ტვინის ქვედა ნაწილში მდებარე უბანი, შეიცავს ნეიროსეკრეტორული უჯრედების სხვადასხვა ჯგუფებს. ნაწილი წარმოქმნის პირდაპირი მოქმედების ჰორმონებს, რომლებიც ინახება და გამოთავისუფლდება უკანა ჰიპოფიზიდან. სხვა ჰიპოთალამური უჯრედები წარმოქმნის ტროპულ ჰორმონებს, რომლებიც გადაიტანება ჰიპოთალამო-ჰიპოფიზური სისხლძარღვთა კარის სისტემით წინა ჰიპოფიზში — ენდოკრინულ ჯირკვალში. ეს ტროპული ჰორმონები წინა ჰიპოფიზიდან ჰორმონების გამონთავისუფლებას აკონტროლებს.
- ▶ **უკანა ჰიპოფიზის ჰორმონები** უკანა ჰიპოფიზიდან გამონთავისუფლებული ორი ჰორმონი პირდაპირ მოქმედებს არაენდოკრინულ ქსოვილზე. ოქსიტოცინი იწვევს საშვილოსნოს შეკუმშვას და რძის გამოყოფას. ხოლო ანტიდიურეზული ჰორმონი (ADH) ზრდის წყლის რეაბსორბციას თირკმლებში.
- ▶ **წინა ჰიპოფიზის ჰორმონები** წინა ჰიპოფიზის მიერ წარმოიქმნება როგორც ტროფული, ასევე არატროფული ჰორმონები. ოთხი მკაცრად ტროფული ჰორმონია

თიროიდმასტიმულირებელი ჰორმონი (TSH), ფოლიკულ-მასტიმულირებელი ჰორმონი (FSH), მალუთინიზებული ჰორმონი (LH) და ადრენოკორტიკოტროპული ჰორმონი (ACTH). ყოველი მათგანი მოქმედებს მათ სამიზნე ენდოკრინულ ქსოვილზე, რათა მოახდინოს მეტაბოლიზმზე ან განვითარებაზე პირდაპირი ეფექტების მქონე ჰორმონის (ჰორმონების) გამოთავისუფლების სტიმულაცია. პროლაქტინი, მელანოციტმასტიმულირებელი ჰორმონი (MSH) და ბ-ენდორფინი არის წინა ჰიპოფიზის არატროპული ჰორმონები. პროლაქტინი ასტიმულირებს ლაქტაციას ძუძუმწოვრებში, მაგრამ აქვს განსხვავებული ეფექტები სხვადასხვა ხერხემლიანში. MSH ზოგიერთ ხერხემლიანში კანის პიგმენტაციაზე და ძუძუმწოვრებში ცხიმების მეტაბოლიზმზე ახდენს გავლენას.

- ▶ ენდორფინები თრგუნავენ ტკივილის პერცეფციას. ზრდის ჰორმონი (GH) უშუალოდ ხელს უწყობს ზრდას და განსხვავებული მეტაბოლური ეფექტები აქვს ის ასევე ასტიმულირებს სხვა ქსოვილების მიერ ზრდის ფაქტორების წარმოქმნას (ტროფული ეფექტი).

## კონცეფტია **45.4**

### ატაჰიპოფიზური ჰორმონები ხელს უწყობს მეტაბოლიზმის, ჰემოცდაზის, განვითარებასა და ციკლის რეგულაციას

- ▶ **თიროიდული ჰორმონები** თიროიდული ჯირკვალის წარმოქმნის იოდის შემცველ ჰორმონებს (T3-სა და T4-ს), რომლებიც ახდენს მეტაბოლიზმის სტიმულაციას და გავლენა აქვთ განვითარებასა და მომწიფებაზე. T3-სა და T4-ის სეკრეცია კონტროლდება ჰიპოთალამუსითა და ჰიპოფიზით კომპლექსური ნეიროენდოკრინული გზით, რომელშიც ჩართულია უარყოფითი უკუკავშირის ორი მარყუჟი. ფარისებრი ჯირკვალის აგრეთვე გამოყოფს კალციტონინს, რომელიც მონაწილეობს კალციუმის ჰომეოსტაზში.
- ▶ **პარათიროიდული ჰორმონი და კალციტონინი: სისხლში კალციუმის შემცველობის კონტროლი** ორი ანტაგონისტი ჰორმონი კალციტონინი და პარათიროიდული ჰორმონი (PTH) ძუძუმწოვრებში კალციუმის ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ჰომეოსტაზში მთავარ როლს ასრულებს. ფარისებრი ჯირკვლიდან გამოყოფილი კალციტონინი ასტიმულირებს ძვლებში  $\text{Ca}^{2+}$ -ის დალექვას და თირკმლებით გამოყოფას, ამგვარად ამცირებს სისხლში  $\text{Ca}^{2+}$ -ის დონეს. ფარისებრძოლო ჯირკვლების მიერ გამოყოფილ თ-ს აქვს საპირისპირო ეფექტები ძვლებსა და თირკმლებზე, ამგვარად ის ზრდის სისხლში  $\text{Ca}^{2+}$ -ის დონეს. PTH-ს ასევე აქვს არაპირდაპირი ეფექტი, ასტიმულირებს თირკმლებს ვიტამინის გასააქტივებლად, რაც, თავის მხრივ, საკვებიდან  $\text{Ca}^{2+}$ -ის ნაწლავებში შეწოვას უწყობს ხელს.
- ▶ **ინსულინი და გლუკაგონი: სისხლში გლუკოზის შემცველობის კონტროლი** პანკრეასში ორი ტიპის ენდოკრი-

ნული უჯრედები გამოყოფს ინსულინსა და გლუკაგონს, ანტაგონისტურ ჰორმონებს, რომლებიც ხელს უწყობს გლუკოზის ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას. ინსულინი (ბეტა უჯრედებიდან) ამცირებს სისხლში გლუკოზის დონეს, გლუკოზის უჯრედული შეწოვის, ღვიძლში გლიკოგენის წარმოქმნის, ცილების სინთეზისა და ცხიმების შენახვის ხელშეწყობით. გლუკაგონი (ალფა უჯრედებიდან) ზრდის სისხლში გლუკოზის დონეს ღვიძლში გლიკოგენის გლუკოზად გარდაქმნისა და ცხიმებისა და ცილების გლუკოზად დაშლის სტიმულაციით. შაქრიანი დიაბეტი, რომლისთვისაც დამახასიათებელია სისხლში გლუკოზის გაზრდილი დონე, შესაძლოა გამოწვეული იყოს არასაკმარისი რაოდენობით ინსულინის წარმოქმნით (ტიპი I) ან სამიზნე უჯრედების ინსულინისადმი მგრძნობელობის დაკარგვით (ტიპი II).

- ▶ **თირკმელზედა ჯირკვლის ჰორმონები: პასუხი სტრესზე** თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერების ნეიროსეკრეტორული უჯრედები ნერვული სისტემიდან სტრესით გააქტივებული იმპულსების საპასუხოდ გამოთავისუფლებს ეპინეფრინსა და ნორეპინეფრინს. ეს ჰორმონები განაპირობებს სხვადასხვა სახის თავდასხმა/თავდაცვის პასუხებს. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი გამოთავისუფლებს სტეროიდული ჰორმონების სამ ფუნქციურ კლასს. გლუკოკორტიკოიდები, როგორც არის კორტიზოლი, მოქმედებენ გლუკოზის მეტაბოლიზმზე და იმუნურ სისტემაზე; მინერალკორტიკოიდები, უპირველეს ყოვლისა ალდოსტერონი, მოქმედებს მარილებისა და წყლის ბალანსზე. თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი აგრეთვე წარმოქმნის მცირე რაოდენობით სასქესო ჰორმონებს.
- ▶ **გონადური სასქესო ჰორმონები** გონადები — სათესლეები და საკვერცხეები – წარმოქმნიან ორგანიზმის საქესო ჰორმონების უმეტესობას: ანდროგენებს, ესტროგენებსა და პროგესტინებს. სამივე ტიპის ჰორმონი წარმოიქმნება, როგორც მამრებში ისევე მდედრებში, მაგრამ განსხვავებული პროპორციებით.
- ▶ **მელატონინი და ბიორიტმები** ეპიფიზი, რომელიც მდებარეობს ტვინში გამოყოფს მელატონინს. მელატონინის გამოთავისუფლება კონტროლდება სინათლე/სიბნელის ციკლებით. მისი ძირითადი ფუნქციები, როგორც ჩანს, უკავშირდება გამრავლებასთან დაკავშირებულ ბიოლოგიურ რიტმებს.

## კონცეფტია **45.5**

### უხერხემლოთა რეგულატორულ სისტემებში ასევე ჩართულია ენდოკრინული და ნერვული სისტემების ურთიერთმედრობა

- ▶ უხერხემლოების ჰომეოსტაზის განსხვავებულ ასპექტებს არეგულირებს სხვადასხვა ჰორმონი. მწერებში ეგზოსკელეტონის ცვლა და განვითარება კონტროლდება სამი ძირითადი ჰორმონით: ტვინის ჰორმონით — ტროფული

ნეიროჰორმონით; ეკდიზონით, რომლის გამონთავისუფლება დამოკიდებულია ტვინის ჰორმონზე და იუვენილური ჰორმონით.

## შჯამბმეთ საკუთარი ცოდნა

### თვითშეფასება

- ქვემოთ ჩამოთვლილი დებულებებიდან, რომელი არ არის სწორი?
  - ჰორმონები არის ქიმიური მესენჯერები, რომლებიც მოგზაურობენ სამიზნე უჯრედებამდე ცირკულაციური სისტემის საშუალებით.
  - ჰორმონები ხშირად არეგულირებს ჰომეოსტაზს ანტაგონისტური ფუნქციების საშუალებით.
  - ერთი და იგივე ქიმიური კლასის ჰორმონებს ჩვეულებრივ გააჩნიათ ერთნაირი ფუნქცია.
  - ჰორმონების სეკრეცია ხდება სპეციალიზებული უჯრედებით, რომლებიც ჩვეულებრივ მდებარეობს ენდოკრინულ ჯირკვლებში.
  - ჰორმონების რეგულაცია ხშირად ხდება უკუკავშირის მარყუჟების საშუალებით.
- თიროიდული ჰორმონებისა და სტეროიდული ჰორმონების მოქმედების მექანიზმის განმასხვავებელი თავისებურება არის ის, რომ
  - ამ ჰორმონების რეგულაცია უკუკავშირების მარყუჟებით ხდება.
  - სამიზნე უჯრედები რეაგირებს უფრო სწრაფად ამ ჰორმონებზე, ვიდრე ლოკალურ რეგულატორებზე.
  - ეს ჰორმონები უკავშირდება სამიზნე უჯრედების პლაზმური მემბრანის სპეციფიკურ რეცეპტორულ ცილებს.
  - ეს ჰორმონები უჯრედის შიგნით მდებარე რეცეპტორებს უკავშირდება.
  - ამ ჰორმონებს გავლენა აქვს მეტაბოლიზმზე.
- ზრდის ფაქტორები არის ლოკალური რეგულატორები, რომლებიც
  - წარმოიქმნება წინა ჰიპოფიზში.
  - არის მოდიფიცირებული ცხიმოვანი მჟავები, რომლებიც ასტიმულირებენ ძვლისა და ხრტილების ზრდას.
  - ნანახი არის სიმსივნური უჯრედების ზედაპირზე და ასტიმულირებენ უჯრედის არანორმალურ დაყოფას.
  - არის ცილები, რომლებიც უკავშირდება უჯრედის ზედაპირულ რეცეპტორებს და ასტიმულირებენ სამიზნე უჯრედების ზრდასა და განვითარებას.
  - ნერვულ უჯრედებს შორის ინფორმაციას გადასცემენ.
- ქვემოთ ჩამოთვლილი ჰორმონებიდან, რომელი არის არასწორად დაწყვილებული მის მოქმედებასთან?
  - ოქსიტოცინი – ასტიმულირებს საშვილოსნოს შეკუმშვებს მშობიარობის დროს.
  - თიროქსინი – ასტიმულირებს მეტაბოლურ პროცესებს.
  - ინსულინი – ასტიმულირებს ღვიძლში გლიკოგენის დაშლას.
  - ACTH – ასტიმულირებს თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქიდან გლუკოკორტიკოიდების გამონთავისუფლებას.
  - მელატონინი – მოქმედებს ბიოლოგიურ რიტმებზე, სეზონურ გამრავლებაზე.
- ჰომეოსტაზის მაკონტროლებელი ანტაგონისტური ჰორმონების მაგალითი
  - თიროქსინი და პარათირიოდული ჰორმონი კალციუმის ბალანსში.
  - ინსულინი და გლუკაგონი გლუკოზის მეტაბოლიზმში.
  - პროგესტინები და ესტროგენები სქესობრივ დიფერენცირებაში.
  - ეპინეფრინი და ნორეპინეფრინი თავდასხმის-ან-თავდაცვის პასუხებში.
  - ოქსიტოცინი და პროლაქტინი რძის წარმოქმნაში.
- ქვემოთ ჩამოთვლილიდან ნერვულ და ენდოკრინულ სისტემებს შორის, სტრუქტურა-ფუნქციის ურთიერთკავშირის მაგალითი არ არის.
  - ჰორმონების სეკრეცია ნეიროსეკრეტორული უჯრედების მიერ.
  - ნორეპინეფრინის მრავალგვარი ფუნქციები.
  - სტრესზე მოკლევადიან პასუხში თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი ნივთიერების სტიმულაცია.
  - ჰიპოთალამუსიდან უკანა ჰიპოფიზის ემბრიონული განვითარება.
- სტეროიდული ჰორმონებით გენის ექსპრესიის ცვლილება.
  - ჰიპოთალამო-ჰიპოფიზურ სისხლძარღვთა კარის სისტემას მიაქვს სისხლი ჰიპოთალამუსიდან პირდაპირ
  - ფარისებრ ჯირკვალში.
  - ეპიფიზში.
  - წინა ჰიპოფიზში.
  - უკანა ჰიპოფიზში.
  - ღვიძლში.
- ქვემოთ ჩამოთვლილიდან, რომელით აიხსნება ჰიპოთიროიდიზმი პაციენტში, რომლის იოდის დონეც ნორმალურია?
  - T3-ისა და T4-ის არაპროპორციული წარმოქმნა.
  - TSH-ის ჰიპოსეკრეცია.
  - TSH-ის ჰიპერსეკრეცია.
  - MSH-ის ჰიპერსეკრეცია.
- კალციტონინის თიროიდული სეკრეციის შემცირება.
- ტროფული ჰორმონების მთავარი სამიზნე ორგანოებია:
  - კუნთები
  - სისხლძარღვები
  - ენდოკრინული ჯირკვლები

დ. თირკმლები ე. ნერვები

10. მწერების ჰორმონებს ეკდიზონსა და ტვინის ჰორმონს შორის ურთიერთკავშირი

- ა. ენდოკრინულ და ნერვულ სისტემებს შორის ურთიერთქმედების მაგალითია.
- ბ. დადებითი უკუკავშირით მიღწეული ჰომეოსტაზის ილუსტრაციას წარმოადგენს.
- გ. გვიჩვენებს, რომ პეპტიდიდან წარმოებულ ჰორმონებს გააჩნია უფრო ფართო ეფექტები სტეროიდულ ჰორმონებთან შედარებით.
- დ. აილუსტრირებს ანტაგონისტური ჰორმონებით შენარჩუნებულ ჰომეოსტაზს.
- ე. გვიჩვენებს ჰორმონის რეცეპტორის კონკურენტულ ინჰიბიციას.

### უძლესი კავშირი

ყველა სტეროიდული და თიროიდული ჰორმონის მიერ გამოყენებული უჯრედშიდა რეცეპტორები საკმაოდ მსგავსია სტრუქტურით იმისთვის, რომ ყველა მათგანი განიხილულ იქნას ცილების ერთი „სუპერ ოჯახის“ („superfamily“) წევრებად. ჩამოაყალიბეთ ჰიპოთეზა თუ, როგორ განვითარდნენ ამ რეცეპტორების მსგავსი გენები (მინიშნება: იხილეთ სურათი 19.19).

### მეცნიერული კვლევა

ამ გვერდზე კითხვაზე ევოლუციური კავშირის შესახებ თქვენი პასუხით წამოაყენეთ ჰიპოთეზა. როგორ შესძლებთ თქვენი ჰიპოთეზის შემოწმებას დნმ-ის თანმიმდევრობის მონაცემების გამოყენებით?

### მეცნიერება, ფიქსიტიზმი და საზოგადოება

ზრდის ჰორმონით (GH) მკურნალობამ ჰიპოფიზური ჯირკვლით დაავადებულ ასობით ბავშვს სხეულის ზომის ნორმის ფარგლებამდე გაზრდის შესაძლებლობა მისცა. ზოგიერთი ბავშვის მშობლები, რომლებიც არიან უკიდურესად დაბლები, მაგრამ რომლებიც არ განიცდიან რაიმე ენდოკრინულ დარღვევას, ასევე თხოულობენ GH-ით მკურნალობას იმისათვის, რომ მათი შვილები გაიზარდონ უფრო სწრაფად და უფრო მაღლები. ამან შესაძლოა გამოიწვიოს საზიანო ეფექტები, როგორცაა ორგანიზმში ცხიმების შემცირება და კუნთის მასის გაზრდა. დღეისთვის არავინ იცის აქვს თუ არა GH-ის ინექციებს სერიოზული გრძელვადიანი საზიანო ეფექტები ინდივიდებში, რომლებსაც არ აქვთ ჰიპოჰიპოფიზური მდგომარეობა. როგორ მითითებებს შესთავაზებდით ბავშვებში GH-ის გამოსაყენებლად? განმარტეთ თქვენი მოსაზრება.

# 46

## ცხოველთა გამტავლება



▲ სურათი 46.1 ჭიაყელების შენევილება.

### ბიტიტადი კონცეფციები

- 46.1** ცხოველთა სამყაროში გვხვდება ორივე სახის გამრავლება – სქესობრივი და უსქესო.
- 46.2** განაყოფიერება იმ მექანიზმებზეა დამოკიდებული, რომელიც სპერმას იგივე სახეობის კვერცხუჯრედთან შეხვედრაში ეხმარება.
- 46.3** რეპროდუქციული ორგანოები გამეტებს წარმოქმნიან და მათ ტრანსპორტს ახორციელებენ: ადამიანის მაგალითი.
- 46.4** ადამიანებსა და სხვა ძუძუმწოვრებში ჰორმონების კომპლექსური ურთიერთმოქმედება არეგულირებს გამეტოგენეზს.
- 46.5** ადამიანებში და პლაცენტიან ძუძუმწოვრებში ემბრიონი ახალშობილამდე დედის საშვილოსნოში იზრდება.

### შესავალი

### შეწყვილება სქესობრივი გამრავლებისთვის

**ს**ურათ 46.1-ზე ორი ჭიაყელას შეჯვარებაა ილუსტრირებული. თუ მათ ხელი არ ეშლება, ისინი მინის ზედაპირზე ამგვარ მდგომარეობაში რამდენიმე საათის განმავლობაში რჩებიან. თითოეული ჭიაყელა წარმოქმნის როგორც სპერმას, ასევე კვერცხუჯრედებს. თითოეული გასცემს და ლეზულობს სპერმას შერწყმის დროს და თითოეული წარმოქმნის განაყოფიერებულ კვერცხს. რამდენიმე კვირაში, როდესაც მოხდება ახალი ჭიაყელების გამოჩეკვა, სქესობრივი გამრავლება სრულდება.

წინა თავებში შესწავლილი ცხოველების ფორმისა და ფუნქციის მრავალი ასპექტი, უფრო ფართო კონტექსტში, შეიძლება განხილულ იქნას როგორც წარმატებული გამრავლების ხელშემწყობი ადაპტაციები. ინდივიდი დროებითია. პოპულაცია აღემატება ინდივიდის სიცოცხლის შეზღუდულ ხანგრძლივობას მასში მუდმივად მიმდინარე გამრავლების

გზით ახალი ინდივიდების შექმნით. ცხოველების რეპროდუქცია მოცემული თავის მთავარ თემას წარმოადგენს. ჩვენ შევედარებთ გამრავლების განსხვავებული მექანიზმებს, რომელიც მოქმედებს ცხოველთა სამყაროში და შემდეგ დანვრებით შევისწავლით ძუძუმწოვრებს, კერძოდ, ადამიანის გამრავლებას. ემბრიონული განვითარების უჯრედული და მოლეკულური დეტალები შემდეგ თავში განვიხილავთ, ხოლო აქ ყურადღებას უპირატესად მშობლების რეპროდუქციის ფიზიოლოგიაზე გავამახვილებთ.

### კონცეფცია 46.1

### ცხოველთა სამყაროში გვხვდება ორივე სახის გამტავლება – სქესობრივი და უსქესო

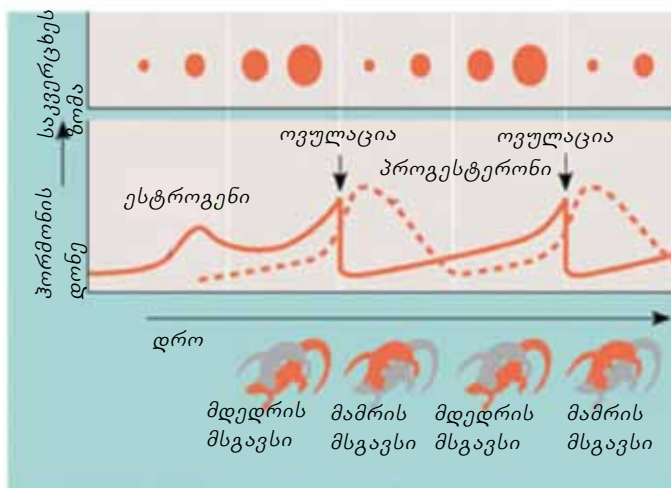
ცხოველთა გამრავლების ორი ძირითადი ხერხი არსებობს: **უსქესო გამრავლება** წარმოადგენს ახალი ინდივიდების შექმნას, რომლის დროსაც ყველა გენი მიღებულია ერთი



▲ სურათი 46.2 უსქესო გამრავლება ზღვის ანემონებში (*Anthopleura elegantissima*). სურათის ცენტრში მოთავსებული ინდივიდი განიცდის გაყოფას – უსქესო გამრავლებით. უფრო მცირე ზომის ინდივიდები, რომლებიც დედისეული ორგანიზმიდან დაახლოებით განახევრებით წარმოიქმნა. შთამომავლობა მშობლის გენეტიკური ასლია.



(ა) ფოტოზე აღბეჭდილი ორივე ხვლიკი სახეობა *C. Uniparens*-ის მდედრებია. ზემოთ მოთავსებული ინდივიდი მამრის როლს ასრულებს. შეჯვარების სეზონის ორი-სამი კვირის განმავლობაში ინდივიდები სასქესო როლებს ცვლიან.



(ბ) *C. Uniparens*-ების სასქესო ქცევა სასქესო ჰორმონების მოქმედებით გამოწვეული ოვულაციური ციკლთან კორელირებს. როდესაც ესტროგენების დონე სისხლში მატულობს, ვითარდება კვერცხი და ხვლიკები მდედრებივით იქცევიან. ოვულაციის შემდეგ, ესტროგენის დონე მკვეთრად ეცემა, ხოლო პროგესტერონის დონე მაღლდება; ამ ჰორმონის დონეები მამრობით ქცევასთან კორელირებს.

#### ▲ სურათი 46.3 პართენოგენეზური ხვლიკების სქესობრივი ქცევა.

მშობლიდან კვერცხუჯრედისა და სპერმის შერწყმის გარეშე. უმრავლეს შემთხვევაში უსქესო გამრავლება მთლიანად უჯრედის მიტოზური დაყოფითაა განპირობებული. **სქესობრივი გამრავლება** წარმოადგენს შთამომავლობის შექმნას ჰაპლოიდური **გამეტების** შერწყმის გზით და დიპლოიდური **ზიგოტის** (განაყოფიერებული კვერცხუჯრედის) ფორმირებით. ცხოველების გამეტები წარმოიქმნება მეიოზით (იხ. სურათი 13.8). **მდედრობითი გამეტა** – გაუნაყოფიერებელი **კვერცხი** (კვერცხუჯრედი), არის შედარებით დიდი და უმოძრაო უჯრედი. **მამრობითი გამეტა** – **სპერმატოზოიდი**, ჩვეულებრივ, ბევრად უფრო პატარა მოძრავი უჯრედი. სქესობრივი გამრავლება ზრდის გენეტიკურ მრავალფეროვნებას შთამომავლობაში მშობლებისგან მიღებული გენების უნიკალური კომბინაციების გზით. შთამომავლობის შექმნით,



▲ სურათი 46.4 სქესის ცვლილება თანმიმდევრულ პერმა-ფროდიტებში. კარიბის ზღვის ლურჯთავა დიდტურა მამრი და ორი უფრო პატარა მდედრი ზღვის ზღარბით იკვებება. ამ სახეობის ყველა დიდტურა მდედრად იბადება, მაგრამ ყველაზე დიდი და ბებერი მამრის როლში ამთავრებს თავის სიცოცხლეს.

რომელსაც ფენოტიპური მრავალფეროვნება ახასიათებს, სქესობრივმა გამრავლებამ შეიძლება გააძლიეროს მშობელთა რეპროდუქციული წარმატება, ვინაიდან გარემო ფაქტორები (პათოგენების ჩათვლით) შედარებით სწრაფად იცვლება (იხ. 23-ე თავი).

## უსქესო გამრავლების მექანიზმები

მრავალ უხერხემლოს შეუძლია უსქესოდ გამრავლდეს დაყოფით, მშობლის დანაწილებით ორ ან მეტ დაახლოებით თანაბარი ზომის ინდივიდად (სურათი 46.2). უხერხემლოთა შორის გავრცელებულია აგრეთვე დაკვირვებით გამრავლება, როდესაც ახალი ინდივიდი მშობლის ორგანიზმიდან გამოიზრდება კვირტის სახით. მაგ., გარკვეულ მსუსხავ ნაწლავურუიანებში (cnidarians) და გარსიანებში (tunicates) (იხ. სურათი 13.2). ახალი ინდივიდი გამოიზრდება მშობლის სხეულიდან. მას შეუძლია მოშორდეს მშობელს ან დარჩეს მასზე მიმაგრებული და საბოლოოდ ჩამოაყალიბოს ფართო კოლონია. ქვის მარჯანი, რომელიც შეიძლება 1 მ-ზე მეტი სიგანის იყოს, წარმოადგენს ნაწლავურუიანების რამდენიმე ათასი ინდივიდის დაკავშირებულ კოლონიას. ზოგიერთ უხერხემლოში, მაგალითად ღრუბელაში, უსქესო გამრავლების სხვა ფორმა გვხვდება — გამოიყოფა უჯრედების სპეციალური ჯგუფები, რომლებსაც შეუძლიათ ახალ ინდივიდებად ჩამოაყალიბება.

უსქესო გამრავლების კიდევ ერთი ტიპი იწყება **ფრაგმენტაციის პროცესით** სხეულის **დანაწევრებით** რამდენიმე ნაწილად, რომელთაგან ზოგიერთი ან ყველა ზრდასრულ ინდივიდად ვითარდება. ამ გზით გამრავლებულ ცხოველებში ფრაგმენტაციას თან უნდა ახლდეს **რეგენერაცია** — სხეულის დაკარგული ნაწილების აღდგენა. ფრაგმენტაციით და რეგენერაციით გამრავლება მრავალ ღრუბელაში, ნაწლავურუიანში, მრავალჯაგრიან რგოლოვან ჭიაში (Polychaeta) და გარსიანში (Tunicata) გვხვდება. ბევრ ცხოველს შეუძლია აგრეთვე რე-

გენერაციით აღიდგინოს დაკარგული დანამატები. მაგალითად, ზღვის ვარსკვლავების უმეტესობას დაზიანების შემდეგ შეიძლება გამოეზარდოს ახალი სხივები – მაგრამ ეს გამრავლება არ არის, რადგან არ ხდება ახალი ინდივიდის შექმნა. ზღვის ვარსკვლავებში იზოლირებული სხივიდან შეიძლება მთლიანად ახალი ინდივიდიც განვითარდეს. ამგვარად, ერთმა ხუთსხივიანმა ცხოველმა, თუ იგი ნაწილებად დაიშალა, შესაძლებელია უსქესო გზით ხუთი შთამომავალი მოგვცეს.

უსქესო გამრავლებას რამდენიმე პოტენციური უპირატესობა აქვს. მაგალითად, იზოლაციაში მოზინადრე ცხოველებს შეუძლიათ შთამომავლობის მოცემა პარტნიორის გარეშე. მათ შეუძლიათ აგრეთვე მოკლე დროში წარმოქმნან მრავალრიცხოვანი შთამომავლობა, რაც იდეალურია საარსებო გარემოს (ჰაბიტატის) სწრაფი დაპყრობისთვის. თეორიულად, უსქესო გამრავლება არის ძალიან სასარგებლო მდგრად, ხელსაყრელ გარემოში, ვინაიდან ის ამ გარემოსადმი საუკეთესოდ შეგუებულ გენოტიპებს ამკვიდრებს.

## გამრავლების ციკლები და პაციონები

მრავალი ცხოველის რეპროდუქციულ აქტივობაში ციკლების გამოვლენა ხშირად სეზონურ ცვლილებებთანაა დაკავშირებული. გამრავლების პერიოდული ბუნება ცხოველებს საშუალებას აძლევს, შეინახონ რესურსები და გამრავლდნენ, როდესაც იმაზე მეტი ენერგია იქნება ხელმისაწვდომი, ვიდრე საჭიროა სიცოცხლის შენარჩუნებისთვის და როდესაც გარემო პირობები ხელსაყრელი იქნება შთამომავლობის გადარჩენისთვის. მაგალითად, მდედრ ცხვარს აქვს 15-დღიანი რეპროდუქციული ციკლი, რომელიც ჩვეულებრივ შემოდგომაზე ან ზამთრის დასაწყისში დგება და უზრუნველყოფს ბატკნების უმეტესობის გაჩენას ზამთარის ბოლოს, ან გაზაფხულზე. ის ცხოველებიც კი, რომლებიც ბინადრობენ შედარებით უცვლელ გარემო პირობებში, მაგალითად, ტროპიკებში ან ოკეანეში, ჩვეულებრივ მრავლდებიან წელიწადის მხოლოდ გარკვეულ დროს. რეპროდუქციული ციკლების კონტროლი ხდება ჰორმონებისა და გარემო სიგნალების კომბინაციით, უკანასკნელში შედის სეზონური ტემპერატურა, ნალექი, დღის ხანგრძლივობა და მთვარის ციკლები.

ცხოველებს შეუძლიათ გამრავლება ან მხოლოდ უსქესოდ ან სქესობრივად, ან ამ ორი ხერხის მორიგეობით. მტკნარი წყლის კიბოსნაირებში (dafnia) მდედრებს გარემო პირობებზე დამოკიდებულებით შეუძლიათ ორი ტიპის კვერცხის წარმოქმნა. კვერცხის ერთი ტიპი არის განაყოფიერებული, ხოლო მეორე ტიპი ვითარდება **პარტენოგენეზით** ანუ პროცესით, რომლის დროს კვერცხი ვითარდება განაყოფიერების გარეშე. პარტენოგენეზით წარმოიქმნილი ზრდასრული ჰაპლოიდები პროდუცირებენ კვერცხებს მეიოზის გარეშე. დაფინიაში სქესობრივიდან უსქესო გამრავლებაზე გადართვა ხშირად სეზონთანაა დაკავშირებული. უსქესო გამრავლება ხდება ხელსაყრელ პირობებში, სქესობრივი გამრავლება კი – გარემოს სტრესული პირობების დროს.

პარტენოგენეზი გარკვეულ როლს თამაშობს ფუტკრების, კრაზანების და ჭიანჭველების სოციალურ ორგანიზაციაში. მამრი ფუტკრები ან „მუქთახორები“ წარმოქმნილია პარტენო-

გენეზურად, მაშინ როდესაც მდედრები, მათ შორის უნაყოფო მდედრი მუშები და რეპროდუქციული მდედრები (დედა), ვითარდებიან განაყოფიერებული კვერცხებიდან.

ხერხემლიანებს შორის თევზების, ამფიბიებისა და ხელიკების რამდენიმე გვარი მრავლდება მხოლოდ პარტენოგენეზის რთული ფორმით, რომელიც იწვევს ქრომოსომების გაორმაგებას მეიოზის შემდეგ და დიპლოიდური ზიგოტის შექმნას. მაგალითად, მათრახკუდიანი ხელიკის (*Cnemidophorus*) 15 სახეობა მხოლოდ პარტენოგენეზურად მრავლდება. ამ სახეობებში მამრები არ გვხვდება, მაგრამ ხელიკები ბაძავენ იგივე გვარის სხვა სახეობის მამრების ტიპურ საარსიკო და შეჯვარების ქცევას. შესაჯვარებელი სეზონის პერიოდში თითოეული შესაჯვარებელი წყვილიდან ერთი მდედრი ბაძავს მამრს (**სურათი 46.3 ა**).

სეზონის განმავლობაში როლები ორჯერ ან სამჯერ იცვლება. მდედრის ქცევა თავს იჩენს ოვულაციამდე (კვერცხების გამოყოფამდე), როდესაც მდედრის სასქესო ჰორმონის ესტროგენის დონე არის მაღალი, ხოლო მამრობითი ქცევა დგება ოვულაციის შემდეგ, როდესაც ესტროგენის დონე იკლებს (**სურათი 46.3 ბ**). ოვულაცია უფრო მოსალოდნელია თუ ერთ ინდივიდი ამხედრებულია მეორეზე ჰორმონული ციკლის კრიტიკულ პერიოდში; ცალკეული ხელიკები დებენ უფრო ნაკლებ კვერცხს, ვიდრე ისინი, რომლებიც განიცდიან სასქესო მოძრაობებს. აშკარაა, რომ ეს პარტენოგენეზური ხელიკები, რომლებიც განვითარდნენ ორი სქესის მქონე სახეობისგან, ჯერ კიდევ საჭიროებენ გარკვეულ სქესობრივ სტიმულს მაქსიმალური რეპროდუქციული წარმატებისთვის.

სქესობრივი გამრავლება წარმოადგენს განსკუთრებულ პრობლემას მჯდომარე ცხოველებისთვის და ისეთი პარაზიტებისთვის, როგორცაა სოლიტერი, რომლებიც შეიძლება იშვიათად შეხვდეს საპირისპირო სქესის წარმომადგენელს. ერთი გადაწყვეტა ამ პრობლემისა არის **ჰერმაფროდიტიზმი**, როდესაც ყოველ ინდივიდს აქვს როგორც მდედრობითი, ასევე მამრობითი გამრავლების სისტემა (ტერმინი მოდის ჰერმესისა და აფროდიტისგან, ძველი ბერძნული ღმერთებისგან).

თუმცა ზოგიერთი ჰერმაფროდიტი თავის თავს ანაყოფიერებს, უმეტესობა მაინც უნდა შეენწყვილოს იგივე სახეობის სხვა ინდივიდს. ამ შემთხვევაში, ყოველი ცხოველი არის როგორც მამრი, ასევე მდედრი, გასცემს და ღებულობს სპერმას, ისე, როგორც ეს აღვწერეთ ჭიანჭველაში. ინდივიდების ყოველი წყვილი პოტენციური პარტნიორებია. ყოველი ჰერმაფროდიტული შერწყმით ორჯერ მეტი შთამომავლობა მიიღება, ვიდრე მდედრისა და მამრის შერწყმით, სადაც მხოლოდ ერთი პარტნიორის კვერცხუჯრედები ნაყოფიერდება.

რეპროდუქციული გამრავლების სხვა მნიშვნელოვანი მაგალითია **თანმომდევრული ჰერმაფროდიტიზმი**, რომელშიც ინდივიდი იცვლის სქესს თავისი სიცოცხლის მანძილზე. ზოგიერთ სახეობაში, თანმომდევრული ჰერმაფროდიტი ჯერ მდედრია, ხოლო სხვა სახეობაში — მამრი.

სხვადასხვა სახეობის რიფის თევზებში სქესობრივი რევერსია დაკავშირებულია ასაკთან და ზომებთან. მაგალითად, კარიბის ზღვის ლურჯთავა დიდტუჩა დასაწყისში ინდივიდი ჯერ მდედრია. მათ შორის მხოლოდ დიდი ზომის ან დაბერებულ თევზებში ხდება სასქესო ნიშნების შეცვლა (**სურათი**



▲ სურათი 46.5 გარეგანი განაყოფიერება. მრავალი ამფიბია გამეტებს ყრის იმ გარემოში, სადაც განაყოფიერება მიმდინარეობს. სახეობათა უმეტესობაში, მამრის იმ მიდამოში ყოფნა ადაპტაციითაა უზრუნველყოფილი, სადაც მდედრი კვერცხის მასას გამოყოფს. მამრი იმავდროულად გამოყოფს სპერმას (არ ჩანს) და განაყოფიერებას უკვე წყალში აქვს ადგილი.

46.4). ეს თევზები ბინადრობენ ჰარამხანაში, რომელიც ერთი მამრისა და რამდენიმე მდედრისგან შედგება. თუ მამრი მოკვდა ან ექსპერიმენტშია წაყვანილი, ჰარამხანის ყველაზე დიდი მდედრი ახალი მამრი ხდება. ერთი კვირის ფარგლებში ტრანსფორმირებული ინდივიდი წარმოქმნის სპერმას კვერცხის მაგივრად.

ამ სახეობაში, მამრი იცავს ჰარამხანას თავდამსხმელებისგან და, ამგვარად, სხეულის უფრო დიდი ზომა მდედრებთან შედარებით უფრო დიდ რეპროდუქციულ უპირატესობას მამრებს ანიჭებს. პირიქით, თუ დასაწყისში ცხოველები მამრები არიან, ისინი მდედრებად გადაიქცევიან სხეულის ზომის ზრდასთან ერთად. ასეთ შემთხვევებში, მამრებთან შედარებით, მდედრის რეპროდუქციული წარმატება დიდი ზომის გამო შეიძლება უფრო გაიზარდოს. განსხვავებული გამრავლების ციკლები და პატერნები ბუნებრივი გადარჩევით განვითარებულ ადაპტაციებს წარმოადგენს. ჩვენ ბევრ სხვა მაგალითსაც ვნახავთ, როდესაც სქესობრივი გამრავლების სხვადასხვა მექანიზმებს განვიხილავთ.

## კონცეფტია ცუსტი 46.1

1. რა არის ყველაზე მნიშვნელოვანი განსხვავება სქესობრივი და უსქესო გამრავლების შედეგებს შორის?
2. რამდენად გასაგებია ტერმინი თანმიმდევრული ჰერმაფროდიტიზმი?

## კონცეფტია 46.2

### განაცოფიერება იმ მექანიზმზეა დამოკიდებული, რომელიც სპერმას იგივე სახეობის კვერცხთან შეხვედრაში ეხმარება

განაყოფიერების მექანიზმები, სპერმისა და კვერცხის კავშირი, მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ სქესობრივ გამრავლებაში. ზოგიერთ სახეობას აქვს გარეგანი განაყოფიერება: მდედრის მიერ კვერცხი გამოიყოფა ნოტიო გარემოში, სადაც მათი განაყოფიერება მამრის მიერ ხდება (სურათი 46.5). ზოგიერთ სახეობას შინაგანი განაყოფიერება ახასიათებს. ამ დროს სპერმა გამრავლების ტრაქტში ან მის მახლობლად თავსდება და განაყოფიერება საკუთრივ ტრაქტში მიმდინარეობს (განაყოფიერების უჯრედული და მოლეკულური დეტალები 47-ე თავში განიხილება).

გარეგანი განაყოფიერება თითქმის ყოველთვის საჭიროებს ნოტიო გარემოს. ის იცავს გამეტებს გამოშრობისაგან და განაპირობებს სპერმის გადაადგილებას კვერცხებისკენ. წყალში მობინადრე ბევრი უხერხემლო უზრალოდ გამოყოფს თავის კვერცხს და სპერმას გარემოში და განაყოფიერება ფაქტიურად მშობლების ფიზიკური კონტაქტის გარეშე ხდება. თუმცა, დროის ამორჩევა არის მთავარი გარანტი, იმისთვის, რათა მომნიშვნელოვანი სპერმა შეხვედეს მომნიშვნელოვან კვერცხს.

სახეობებში, რომლებსაც გარეგანი განაყოფიერება ახასიათებს, ისეთმა გარემომ ფაქტორებმა, როგორიცაა ტემპერატურა, დღის ხანგრძლივობა, შეიძლება ერთ ჯერზე მთელ პოპულაციაში გამეტების გამოყოფა გამოიწვიოს. ქიმიურმა სიგნალებმაც, რომლებიც ერთ ინდივიდში იწვევს გამეტების გამოყოფას, ეს პროცესი სხვებშიც შეიძლება განაპირობოს. მეორეს მხრივ, ინდივიდებს შეუძლიათ გამოავლინონ სპეციფიკური შესაწყვილებელი ქცევა, რომელიც გამოიწვევს ერთი მამრის მიერ ერთი მდედრის კვერცხის განაყოფიერებას. ასეთ „არშეყოფას“ აქვს ორი მნიშვნელოვანი სარგებელი: მენჯილის შერჩევა, და სპერმისა და კვერცხის გამოყოფის სტიმულაცია. ყოველივე ეს წარმატებული განაყოფიერების შესაძლებლობის გაზრდას უზრუნველყოფს.

შინაგანი განაყოფიერება არის ხმელეთის ცხოველების ადაპტაცია, რომელიც სპერმას აძლევს საშუალებას მიადნის კვერცხს მშრალ გარემო პირობებში. ის საჭიროებს კოპულაციულ ქცევას, რომელიც მიმართულია კოპულაციისკენ. ზოგიერთ შემთხვევაში, არადაამახასიათებელი სქესობრივი ქცევის აცილება ბუნებრივი გადარჩევით პირდაპირი ხერხით ხდება; მაგალითად, მდედრ ობობებს შეუძლიათ შეჭამონ მამრები, რომლებმაც შეწყვილების დროს დაკარგეს სპეციფიკური სიგნალების წარმოქმნის ან მათზე პასუხის გაცემის უნარი. შინაგანი განაყოფიერება საჭიროებს სტრუქტურულად ადაპტირებულ გამრავლების სისტემებს, რომელიც შეიცავს კოპულატორულ ორგანოებს, რომლებიც გამოყოფს სპერმას და იღებს მას, და განაპირობებს სპერმის შენახვასა და გადაადგილებას მომნიშვნელოვანი კვერცხისკენ.



▲ **სურათი 46.6** მშობლიური ზრუნვა უხერხემლოებში. სხვა მრავალ სახეობასთან შედარებით, წყლის გიგანტური ბალინჯოები გვარიდან *Elostoma* საკმარისად მცირერიცხოვან შთამომავლობას იძლევიან, სამაგიეროდ მშობლიური მზრუნველობა ზრდის გადარჩენის შესაძლებლობას.

განაყოფიერებისათვის, შესაწყვილებელ ცხოველებს შეუძლიათ გამოიყენონ **ფერომონები** – ერთი ორგანიზმის მიერ გამოყოფილი ქიმიური სიგნალები, რომელიც გავლენას ახდენს იგივე სახეობის მეორე ინდივიდის ფიზიოლოგიაზე და/ან ქცევაზე. ფერომონები პატარა, აქროლადი ან წყალში ხსნადი მოლეკულებია, რომელიც იფანტება გარემოში და, მსგავსად ჰორმონებისა, აქტიურია რამდენიმე წუთის განმავლობაში. ბევრი ფერომონის ფუნქცია მენსეილეს მოზიდვაა. ზოგი მდედრი მწერის მიერ გამოყოფილი მიმზიდველი ნივთიერება მამრმა შეიძლება კილომეტრზე მეტ მანძილზეც იგრძნოს (ჩვენ დაუზრუნდებით პარტნიორულ ქცევას და ფერომონებს 51-ე თავში).

## შთამომავლობის გადაჩენის უზრუნველყოფა

ყველა სახეობა წარმოქმნის იმაზე მეტ შთამომავლობას, ვიდრე შეიძლება გადარჩეს და მიაღწიოს გამრავლების ასაკს. სახეობები გარეგანი განაყოფიერებით ჩვეულებრივ წარმოქმნიან ზიგოტის უამრავ რაოდენობას, მაგრამ მათი წილი რომელიც გადარჩება და შემდგომ განვითარდება, ხშირად საკმაოდ პატარაა. შინაგანი განაყოფიერება ჩვეულებრივ წარმოქმნის რამდენიმე ზიგოტას, მაგრამ ეს შეიძლება იყოს ანაზ-

გენიტალიის ფორა (მომწელებელი ტრაქტი)

მამრის ორგანოები:

მდედრის ორგანოები:

4. სათესლე ბუშტუკი

3. საშვილოსნო

3. სპერმის სადინარი (*Vas deferens* - შესაღვრის სადინარი)

ყვითრის ჯირკვავი

ყვითრის სადინარი

2. კვერცხსავალი

1. საკვერცხე

2. *Vas efferens* (გამოსასვლელი სადინარი)

სპერმის მიმღები

1. სათესლეები

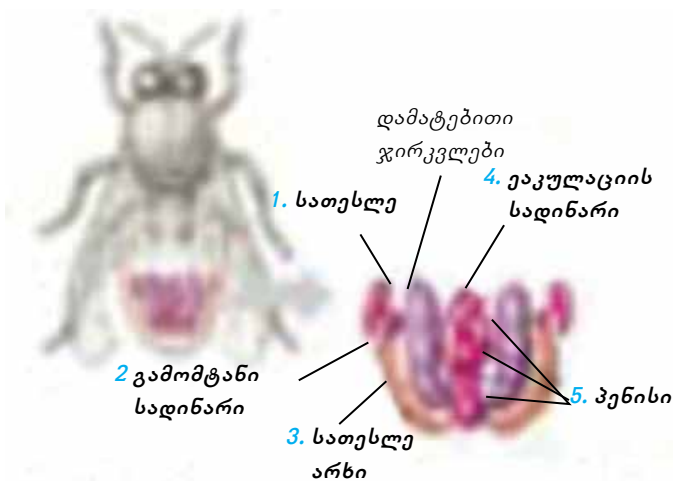
(გასასვლელი ფორა)

▲ **სურათი 46.7** პარაზიტული ბრტყელი ჭიის რეპროდუქციული ანატომია. ბრტყელი ჭიების (ტიპი - *Platyhelminthes*) უმეტესობა პერმაფროდიტია. ორივე, მამრობითი და მდედრობითი რეპროდუქციული სისტემა გარემოში გენიტალური ფორის საშუალებით იხსნება. სათესლეში წარმოქმნილი სპერმა თანმიმდევრულად მიემართება სათესლე მილისაკენ, რომელიც ინახავს მას. კოპულაციის დროს, სპერმა გადმოიღვრება მდედრობითი სისტემაში (ჩვეულებრივ, სხვა ბრტყელ ჭიაში) და საშვილოსნოს გავლით თესლის მიმღებისკენ მოძრაობს. კვერცხები, საკვერცხიდან კვერცხსავალისაკენ მიემართება, სადაც თესლის მიმღებში არსებული სპერმით განაყოფიერდება და იფარება ყვითრის გარსით, რომელიც დედისეული ყვითრის ჯირკვლებიდან გამოიყოფა. კვერცხსავალიდან, განაყოფიერებული კვერცხები გაივლის საშვილოსნოს და შემდეგ სხეულიდან, გარემოში გამოდის.

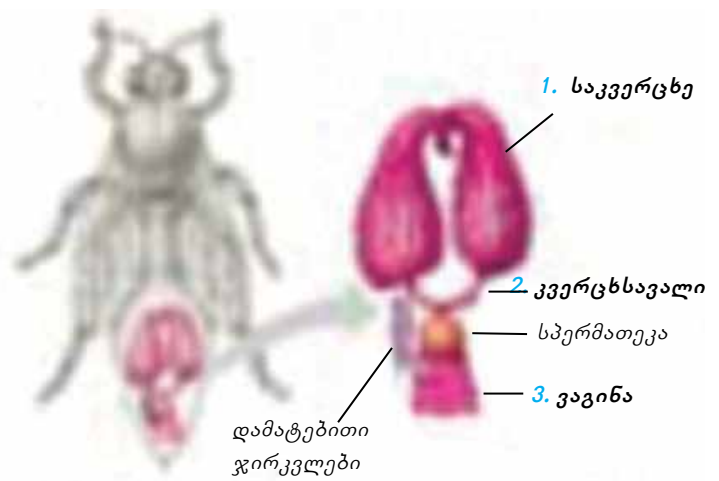
ლაურებული ემბრიონის დიდი დაცვით და ახალგაზრდებზე ზრუნვით. დაცვის მთავარი ტიპებია კვერცხის ხისტი ნაჭუჭი, ემბრიონის განვითარება დედის გამრავლების ტრაქტში და მშობლების ზრუნვა კვერცხზე და შთამომავლობაზე.

ხმელეთზე მობინადრე ცხოველების მრავალი სახეობის ემბრიონები კვერცხებში ვითარდება, რაც მათ ცუდი გარემო პირობებისგან იცავს. ქვეწარმავლებს აქვთ ამნიოტური კვერცხები კალციუმისა და ცილის გარსით, რაც იცავს მათ წყლის დაკარგვისა და ფიზიკური დაზიანებისგან (პირიქით, თევზებისა და ამფიბიების კვერცხს მხოლოდ ჟელატინური გარსი აქვთ).

კვერცხის გარშემო დამცველი გარსის გამოყოფის ნაცვლად, მრავალი ცხოველი ინახავს ემბრიონს, რომელიც ვითარდება მდედრის რეპროდუქციულ ტრაქტში. ჩანთოსანი ძუძუმწოვრები, როგორცაა კენგურუ და ოპოსუმი, თავიანთ ემბრიონებს მოკლე პერიოდით საშვილოსნოში ინახავენ; ამ ხნის განმავლობაში ემბრიონები იკვებებიან დედის სისხლით მომამარაგებელი ორგანოთი, რომელსაც პლაცენტას უწოდებენ. შემდეგ ემბრიონი გამოდის და ემბრიონულ განვითა-



(ა) მამრი ფუტკარი. სპერმა სათესლეში წარმოიქმნება, გაივლის სპერმის არხს (vas deferens) და სათესლე არხში ინახება. მამრი სპერმას გადმოღვრის დამატებითი ჯირკვლების მიერ გამოშვებულ სითხესთან ერთად (მწერებისა და ფეხსახსრიანთა ზოგიერთი სხვა სახეობის მამრებს დანამატები გააჩნიათ, რომლებსაც კლასპერი ეწოდებათ და რომელთა საშუალებითაც ისინი კოპულაციის დროს მდედრებს იჭერენ).



(ბ) მდედრი ფუტკარი (დედოფალი). კვერცხი წარმოიქმნება საკვერცხეში, გაივლის კვერცხსავალს და საშოში ხვდება. დამატებითი ჯირკვლების ერთი წყვილი (მხოლოდ ერთი მათგანია ნაჩვენები) საშოში კვერცხის დამცავ სეკრეტს გამოყოფს. შეწყვილების შემდეგ სპერმა სპერმათეკაში (ჩანთა, რომელიც პატარა სადინარით საშოს უკავშირდება) ინახება.

▲ **სურათი 46.8 მწერების რეპროდუქციული ანატომია.** წრეში ჩასმული რიცხვები სპერმისა და კვერცხის მოძრაობის თანმიმდევრობას აღნიშნავს.

რებას დედის ჩანთაში სარძევე ჯირკვალთან მიმაგრებული ასრულებს. თუმცა, პლაცენტარული ძუძუმწოვრების ემბრიონები (მაგალიტად, ადამიანის) მთლიანად საშვილოსნოში ვითარდებიან. მათი პლაცენტაც უფრო რთულადაა აგებული. ახლადდაბადებულ ადამიანს ან კენგურუს ჩანთიდან გამოსვლის შემდეგ, პირველ პერიოდში, არ შეუძლია დამოუკიდებლად არსებობა. ჩვენ ვიცით ზრდასრული ფრინველები, რომლებიც კვებავენ თავიანთ ახალგაზრდებს და ძუძუმწოვრები, რომლებიც უვლიან თავიანთ შთამომავლებს. მშობლიური მზრუნველობა ბევრად უფრო ფართო ცნებაა, ვიდრე ჩვენ შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ და სხვადასხვა უჩვეულო ფორმით ვლინდება (სურათი 46.6).

## გამეცების წარმოქმნა და მიწოდება

სქესობრივი გამრავლებისთვის, ცხოველებს უნდა ჰქონდეთ სისტემები, რომლებიც წარმოქმნის გამეტებს და შემდგომში გახდის მათ მისაწვდომს სანინალმდეგო სქესის გამეტებისთვის. რეპროდუქციული სისტემები განსხვავებულია. ყველაზე მარტივი სისტემა არ შეიცავს — გონადებს, რომლებიც მრავალ ცხოველში გამეტებს წარმოქმნის. მრავალჯაგრიანი ჭიები (Annelida), მათ შორის არიან. მათ უმარტივესი გამრავლების სისტემები აქვთ.

მრავალჯაგრიანების უმრავლესობა ცალსქესიანია, მაგრამ არ აქვთ გონადები. უფრო მეტიც, კვერცხი და სპერმა ცელომის ამოფენი არადიფერენცირებული უჯრედებიდან ვითარდება. გამეტების მომწიფებისთანავე ხდება მათი გამოყოფა სხეულის კედლიდან და ცელომის ავსება. მრავალ-

ჯაგრიანების სხვადასხვა სახეობაში, მომწიფებული გამეტები შესაძლებელია გადმოიღვაროს ექსკრეტორული ხვრელიდან, ან კვერცხის გაბერილმა მასამ შეიძლება გამოიწვიოს მშობლის სხეულის გახსნა გახლეჩივით და მისი დაღუპვა. ამ გზით ხდება კვერცხის გარემოში გადმოღვრა.

რთული რეპროდუქციული სისტემები შეიცავს მრავალ მილსა და ჯირკვლებს, რომლებიც ატარებენ, კვებავენ, იცავენ გამეტებს და ქმნიან გარემოს ემბრიონების განვითარებისათვის. მრავალ ცხოველს, რომლის სხეულის ორგანიზაცია სხვა მხრივ შედარებით მარტივია, აქვს განსაკუთრებულად რთული რეპროდუქციული სისტემა. მაგალიტად, პარაზიტულ ბრტყელ ჭიებს, რომლებიც ჰერმაფროდიტები არიან, რეპროდუქციული სისტემა ცხოველთა სამყაროში ურთულესთა შორისაა (სურათი 46.7).

მწერების უმრავლესობა ცალსქესიანია. მათ აქვთ რთული რეპროდუქციული სისტემა (სურათი 46.8). მამრებში სპერმა ვითარდება წყვილ სათესლეში, გადაადგილდება დახვეული სადინრით და ინახება ორ სათესლე პარკუჭში. შერწყმის პროცესში სპერმა ამოიფრქვევა მდედრის რეპროდუქციულ სისტემაში. მდედრში, კვერცხი ვითარდება წყვილ საკვერცხეში და გადაადგილდება სადინრების მეშვეობით ვაგინაში, სადაც ხდება განაყოფიერება.

ყველა ხერხემლიანის რეპროდუქციული სისტემის ძირითადი გეგმა საკმაოდ მსგავსია, მაგრამ აქვს ზოგიერთი მნიშვნელოვანი განსხვავება. მრავალ არაძუძუმწოვარ ხერხემლიანში საჭმლის მომნელებელ, ექსკრეტორულ და რეპროდუქციულ სისტემებს აქვთ საერთო გასასვლელი გარეთ — კლოაკა, რომელიც სავარაუდოდ ჰქონდა ხერხემლიანების

წინაპარს. ძუძუმწოვრების უმრავლესობა, პირიქით, მოკლებულია კლოაკას და აქვს ცალკე ხერელი საჭმლის მომნელებელი ტრაქტისთვის, ხოლო მდებარე ძუძუმწოვრებს ცალკე ცალკე ხერელი აქვთ ექსკრეტორული და რეპროდუქციული სისტემებისთვის. მრავალი ხერხემლიანის საშვილოსნო ნაწილობრივ ან მთლიანად ორ კამერად არის გაყოფილი. მეორეს მხრივ, ადამიანებში და სხვა ძუძუმწოვრებში, რომლებიც ერთდროულად ზოგჯერ ან ყოველთვის რამდენიმე ნაშიერს წარმოქმნიან, საშვილოსნო ერთიან სტრუქტურას წარმოადგენს. მამრების რეპროდუქციული სისტემები ძირითადად განსხვავდება კოპულატორული ორგანოებით. ბევრ არაძუძუმწოვარ ხერხემლიანს კარგად განვითარებული პენისი არ აქვს და ეაკულაციის დროს კლოაკას უბრალოდ შიგნით აბრუნებს.

**▶ კონცეფცია ცესტი 46.2**

1. რა გზით აადვილებს შინაგანი განაყოფიერება ხმელეთზე მოპინადრების სიცოცხლეს?
2. რა „სტრატეგიებით“ უზრუნველყოფენ ცხოველები (ა) გარეგანი განაყოფიერებით და (ბ) შინაგანი განაყოფიერებით მათი შთამომავლობის მიღწევას ზრდასრულობამდე?

**▶ კონცეფცია 46.3**

## ბიპტოდუქციული ორგანოები გამეცემს წაბმოდმნიან და მათ ცტანსპორტს ახორციელებენ: ადამიანის მაგალითი

### მდედრის ბიპტოდუქციული სისტემის ანაცდმია

მდედრის გარეგანი რეპროდუქციული სტრუქტურებია კლიტორი და ორი წყვილი ბაგე, რომელიც კლიტორის და ვაგინალური ხერელის გარშემო მდებარეობს. შინაგან ორგანოებს წარმოადგენს წყვილი გონადა და სადინრებისა და კომპარტმენტების სისტემა, რომელთა საშუალებით ხდება როგორც გამეტების გადაადგილება, ასევე ემბრიონისა და ნაყოფის განთავსება (სურათი 46.9).

### საკვერცხეები

მდედრის გონადები — საკვერცხეები, მუცლის ღრუში მდებარეობს. ისინი საშვილოსნოს გვერდებზე არიან განლაგებულნი და ემაგრებიან მას მეზენტერიუმით. თითოეული საკვერცხე ჩასმულია მკვრივ დამცველ კაფსულაში და ბევრ ფოლიკულას შეიცავს. ფოლიკულას შემადგენლობაში შე-

დის ერთი კვერცხუჯრედი გარშემორტყმული ფოლიკულური უჯრედების ერთი ან მეტი შრით, რომლებიც კვებავენ კვერცხუჯრედს და უზრუნველყოფენ მის განვითარებას. 400,000 ან მეტი ფოლიკულა სავარაუდოდ ფორმირდება ქალის დაბადებამდე (მაგრამ შეხედეთ **სურათი 46.11** ბოლო პარაგრაფს). მხოლოდ რამდენიმე ასეული ფოლიკულა გამოყოფს კვერცხუჯრედებს ქალის რეპროდუქციულ ასაკში. დაწყებული სქესობრივი მომწიფებიდან და გაგრძელებული მენოპაუზამდე, ყოველი მენსტრუალური ციკლის პერიოდში, ჩვეულებრივ ერთი ფოლიკულა მწიფდება და თავის კვერცხუჯრედს გამოყოფს. ფოლიკულის უჯრედები ასევე პროდუცირებენ ესტროგენებს, მნიშვნელოვან მდედრობით სასქესო ჰორმონს.

კვერცხუჯრედი ფოლიკულიდან გამოიდევენება **ოვეულაციის** პროცესში. დარჩენილი ფოლიკულური ქსოვილი შემდგომ იზრდება საკვერცხეში და ქმნის მკვრივ მასას, რომელსაც „ყვითელ სხეულს“ უწოდებენ. ყვითელი სხეული დამატებით გამოყოფს ესტროგენებს და პროგესტერონს, ჰორმონს, რომელიც ხელს უწყობს ორსულობის დროს საშვილოსნოს ამომფენი შრის შენარჩუნებას. თუ კვერცხუჯრედი არ განაყოფიერდა, ყვითელი სხეული იშლება და მომდევნო ციკლის დროს ხდება ახალი ფოლიკულის მომწიფება.

### კვერცხსავალი და საშვილოსნო

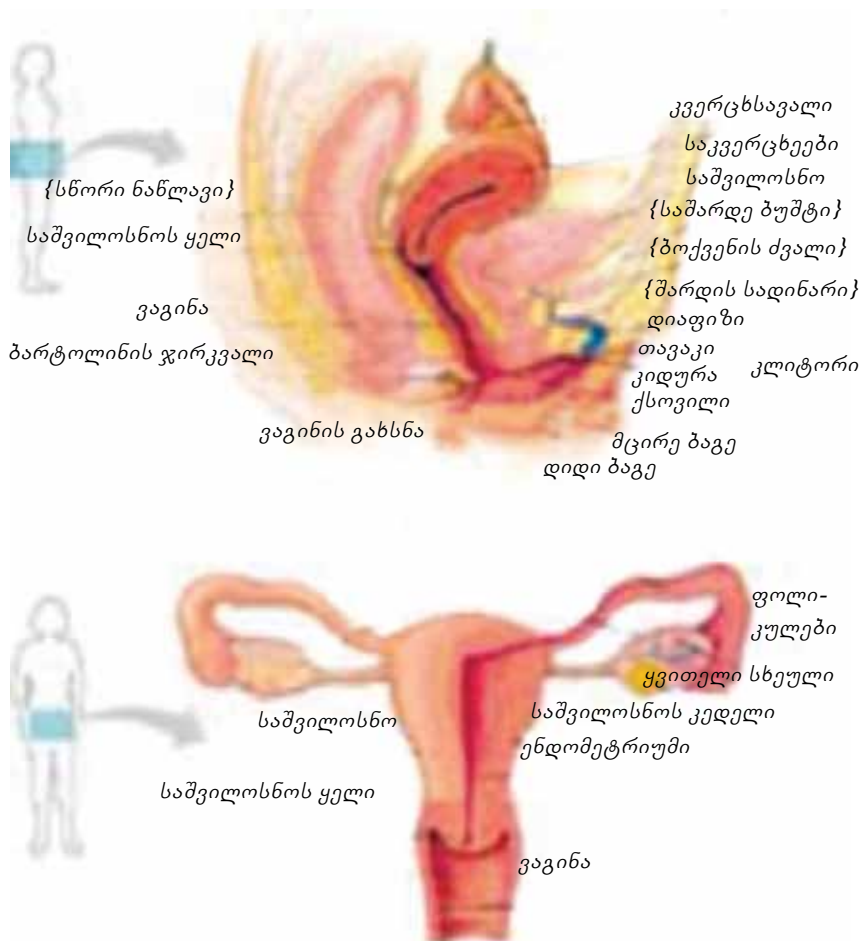
მდედრების რეპროდუქციული სისტემა მთლიანად ჩაკეტილი არ არის და კვერცხუჯრედი გამოიყოფა მუცლის ღრუში **კვერცხსავალის** ანუ ფალოპის ლულის ახლოს. კვერცხსავალს აქვს ძაბრისმაგვარი ხერელი და სადინრის ამომფენი წამწამიანი ეპითელიუმი ხელს უწყობს კვერცხუჯრედის მიღებას სითხის მოზიდვით სხეულის ღრუდან **სადინარში**. საშვილოსნო არის სქელი, კუნთოვანი ორგანო, რომელსაც შეუძლია ორსულობის დროს გაიჭიმოს და 4კგ-მდე ნაყოფს თავშესაფარი მისცეს. საშვილოსნოს შიდა შრე **ენდომეტრიუმი**ა, რომელიც სისხლძარღვებითა უზვადაა მომარაგებული. **საშვილოსნოს ყელი**, ვაგინაში იხსნება.

### ვაგინა და ვულვა

**ვაგინა (საშო)** არის თხელკედლიანი განყოფილება, სადაც გროვდება სპერმა კოპულაციის დროს. ამავე დროს იგი სამშობიარო არხის ფუნქციას ასრულებს, რომლითაც ბავშვის დაბადება ხდება. ის იხსნება გარეთ **ვულვაში** – მდედრის გენიტალიების (სასქესო ორგანოების) ზოგადი სახელი.

ადამიანებში ვაგინალურ ხერელს დაბადებიდან ნაწილობრივ ფარავს ქსოვილის თხელი ნაჭერი – **საქალწულე აპკი** რომელიც ჩვეულებრივ ზიანდება სქესობრივი ურთიერთობით ან ძლიერი ფიზიკური მოქმედებით. ვაგინალური და იზოლირებული საშარდე ხერელები მოთავსებულია ღრმულში – **კარიბჭეში**, რომელსაც საზღვრავს კანის ვიწრო ნაკეცის წყვილი, **მცირე ბაგე**.

სქელი, ცხიმოვანი ნაოჭის წყვილი – **დიდი ბაგე** ფარავს და იცავს მცირე ბაგეს და კარიბჭეს. კარიბჭის წინა კიდეში



▲ **სურათი 46.9 ქალის რეპროდუქციული ანატომია.** ორიენტაციისთვის – ზოგერთი ორგანო, რომელიც რეპროდუქციულ სისტემას არ მიეკუთვნება ფიგურულ ფრჩხილებშია ჩასმული.

მოთავსებული კლიტორი, რომელიც შედგება მოკლე ღერძისაგან. ის მრგვალი თავაკის საყრდენს წარმოადგენს, რომელიც დაფარულია კანის პატარა ჩაჩით. სექსუალური აგზნების პერიოდში, კლიტორი, ვაგინა და მცირე ბაგე ივსება სისხლით და დიდდება. კლიტორი თითქმის მთლიანად ერექტულ ქსოვილს შეიცავს. მდიდარი ნერვული დაბოლოებებით, ის სექსუალური სტიმულაციის ერთ-ერთი ყველაზე უფრო მგრძნობიარე წერტილების მატარებელია. სქესობრივი აგზნების დროს, ბარტოლინის ჯირკვლები, მოთავსებული ვაგინალური ხვრელის ახლოს, კარიბჭეში ლორწოს გამოყოფს, იწვევს მათ გატენიანებას (გაპოხვას) და აადვილებს სქესობრივ ურთიერთობას.

## სარძევე ჯირკვლები

სარძევე ჯირკვლები ორივე სქესისთვისაა დამახასიათებელი, მაგრამ ჩვეულებრივ ფუნქციონირებს მხოლოდ მდედრებში. ისინი რეპროდუქციული სისტემის ნაწილს არ წარმოადგენს, მაგრამ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ძუძუმწოვრების რეპროდუქციაში. ჯირკვლების შიგნით ეპითელიური ქსოვილის მცირე პარკები გამოყოფენ რძეს, რომელიც

ჩაედინება მრავალ სადინარში და მათი საშუალებით ხვდება დერილში. ცხიმოვანი (ადიპოზური) ქსოვილი ქმნის სარძევე ჯირკვლების მთავარ მასას მაშინ, როდესაც არაა ძუძუთი კვების პერიოდი. მამრებში ესტროგენის დაბალი დონე ხელს უშლის როგორც სეკრეტორული აპარატის, ასევე ცხიმოვანი მარაგის განვითარებას, ამიტომ, მამრის სარძევე ჯირკვალი რჩება პატარა და დერილები არ არის დაკავშირებული სადინართან.

## მამრობითი ბუჭბოქციული ანატომია

ძუძუმწოვრების მრავალ სახეობაში, ადამიანის ჩათვლით, მამრების გარეგან რეპროდუქციულ ორგანოებს სათესლე პარკი და პენისი წარმოადგენს. შინაგან რეპროდუქციულ ორგანოებს მიეკუთვნება გონადები, რომლებიც გამეტებსა (სპერმის უჯრედებს) და ჰორმონებს გამოიმუშავენ და დამატებითი ჯირკვლები, რომელთა გამონაყოფი ხელსუწყობენ სპერმას მოძრაობაში. აქვეა სადინრები, რომლებსაც სპერმა და ჯირკვლების გამონაყოფი გამოაქვს (**სურათი 46.10**).

## სათესლეები

მამრობითი გონადები – სათესლეები წარმოადგენს ბევრ დახვეულ მილაკებს, რომლებიც გარშემოხვეულია შემაერთებელი ქსოვილის რამდენიმე შრით. ეს **სპერმის წარმომქმნელი მილაკებია. ლეიდიგის უჯრედები**, რომლებიც ამ მილაკებს შორისაა განლაგებული ტესტოსტერონსა და სხვა ანდროგენებს წარმოქმნის.

ძუძუმწოვრების უმრავლესობაში ნორმალური სპერმა სხეულის ტემპერატურაზე არ წარმოიქმნება. ადამიანისა და სხვა ძუძუმწოვრების სათესლეები მუცლის ღრუს გარეთ, სათესლე პარკშია მოთავსებული. ტემპერატურა სათესლე პარკში მუცლის ღრუსთან შედარებით 2 გრადუსით დაბალია. სათესლეები მუცლის ღრუში, ზემოთ ვითარდება და სათესლე პარკში დაბადების წინ ჩამოდის. მრავალ მღრღნელში სათესლეები გამრავლების პერიოდამდე მუცლის ღრუში ბრუნდება, რათა არ მოხდეს სპერმის ადრეული მომწიფება. ზოგიერთ ძუძუმწოვარს, მათ შორის, ვეშაპებს, დელფინებსა და სპილოებს სხეულის ტემპერატურა საკმარისად დაბალი აქვთ და ეს სპერმის მომწიფებისთვის საკმარისია. მათი სათესლეები მუცლის ღრუში მუდმივადაა მოთავსებული.

## სავალი გზები

სათესლეების სპერმის წარმომქმნელი მილაკები ეპიდიდიმის დაკლანკილ მილაკებში შედის. იმისთვის, რომ ადამიანის სპერმამ ეპიდიდიმის 6 მ სიგრძის მილაკი გაიაროს, დაახ-

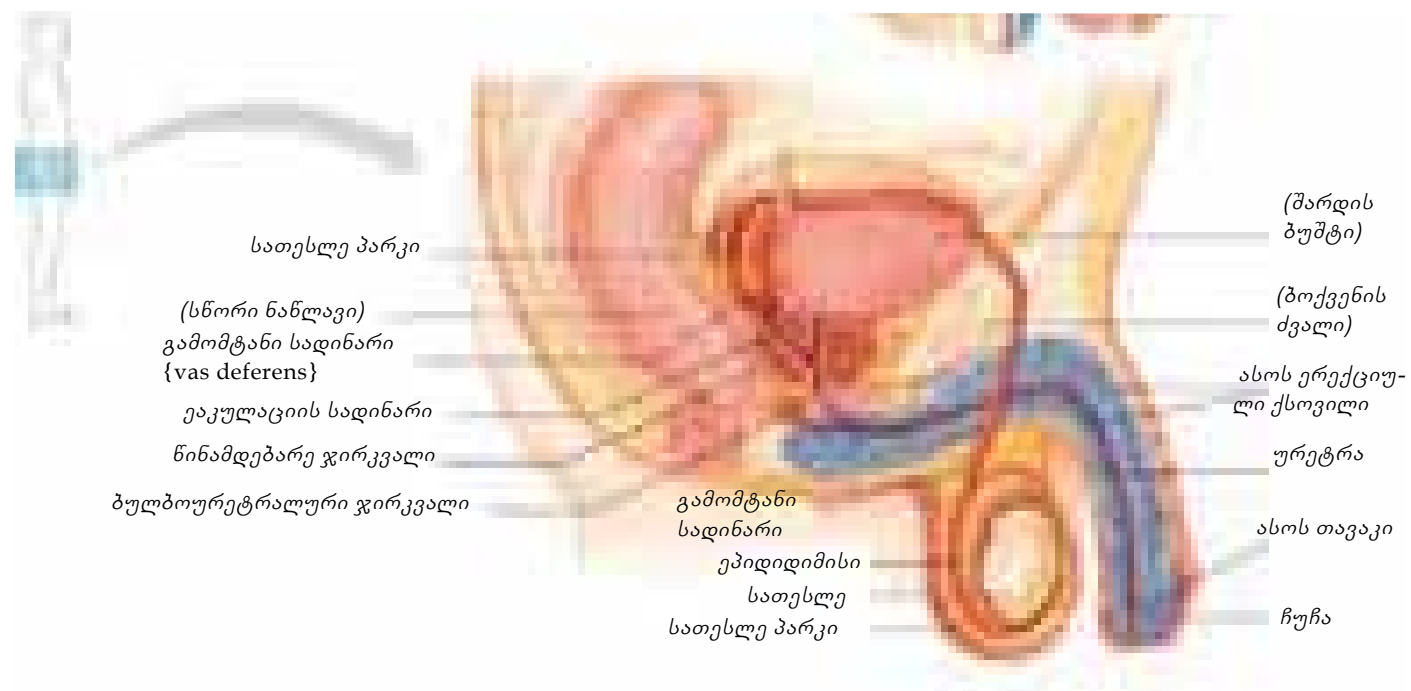
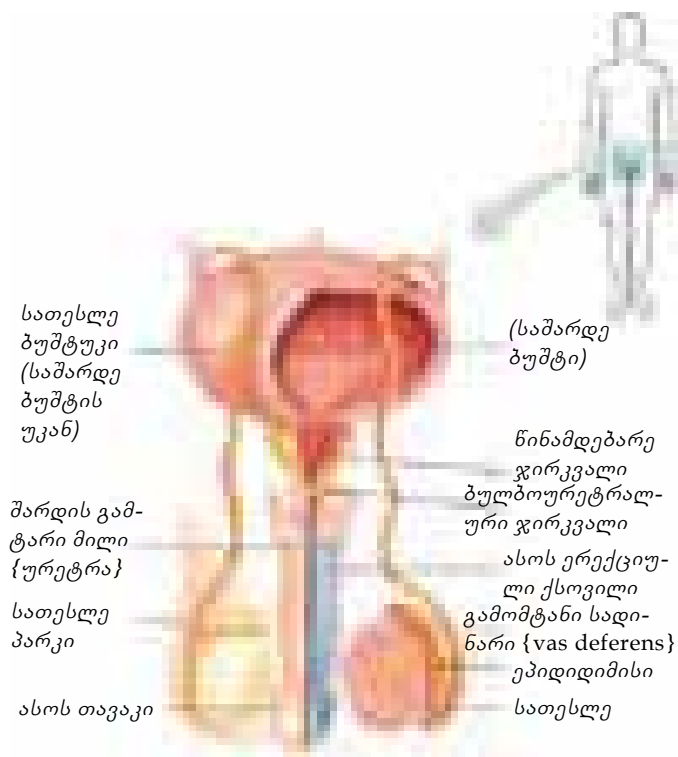
ლოებით 20 დღეა საჭირო. ამ დროში, სპერმა ხდება მოძრავი და მას განაყოფიერების უნარი ენიჭება. **ეაკულაციის** დროს სპერმა ეპიდიდმიდან კუნთოვანი **გამომტანი სადინარით** წინ გამოდის. ეს ორი სავალი გზა (ერთი, თითოეული ეპიდიდმიდან) მიისწრაფვის შარდის ბუშტის წინ მდებარე სათესლე პარკისკენ, რომელთაგან თითოეული უკავშირდება სათესლე ბუშტუკს. იგი, თავის მხრივ, **ეაკულაციურ სადინარს** ქმნის. ეაკულაციური სადინარი ჩვეულებრივ იხსნება **ურეტრაში** – მილში, რომელიც აკავშირებს გამომყვან და რეპროდუქციულ სისტემებს. ურეტრა პენისის გავლით მოემართება და პენისის წვერში იხსნება.

## ჯირკვლები

დამატებითი ჯირკვლების სამი ტიპი – **სათესლე ვეზიკულები** (ბუშტუკები), პროსტატის და ბულბოურეტრული ჯირკვლები – სეკრეტს ამატებენ **სათესლე** სითხეს, რომლის ეაკულაციაც ხდება. **სათესლე ვეზიკულების** ერთი წყვილი მთელი სათესლე სითხის 60%-ის გამოყოფას უზრუნველყოფს. აქედან ბლანტი, მოყვითალო, ტუტე რეაქციის სითხე გამოიყოფა. იგი შეიცავს ლორწოს, შაქარს – ფრუქტოზას (რომელიც სპერმას ენერგიით უზრუნველყოფს), კოაგულაციურ ფერმენტებს, ასკორბინის მჟავას და პროსტაგლანდინებს, ლოკალურ რეგულატორებს, რომელთა შესახებაც 45-ე თავში გვექნება საუბარი.

**წინამდებარე ჯირკვალი** (პროსტატა) სათესლე სითხის გამომყოფ უფრედთა შორის ყველზე დიდი ზომისაა. მისი სეკრეტი, მცირე ზომის სადინრებით, პირდაპირ ურეტრაში გამოიყოფა. პროსტატის სითხე თხელი და რძისმაგვარია, შეიცავს ანტიკოაგულაციურ ფერმენტებსა და ციტრატს (სპერმის საკვებს). წინამდებარე ჯირკვალი 40 წელს გადაცილებულ

მამაკაცთა უმრავლესობას მრავალ სამედიცინო პრობლემას უქმნის. ამ ჯირკვლის კეთილთვისებიანი გადიდება გვხვდება 40-50 წელს გადაცილებულთა შორის თითქმის ყველა მამაკაცში. პროსტატის კიბო მამაკაცებში ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული დაავადებაა. მისი მკურნალობა ოპერაციულად ხდება ან ავადმყოფებს ენიშნებათ ისეთი პრეპარატები,



▲ **სურათი 46.10** მამაკაცის რეპროდუქციული ანატომია. არარეპროდუქციული სტრუქტურები მრავალ ფრჩხილებშია მოცემული.

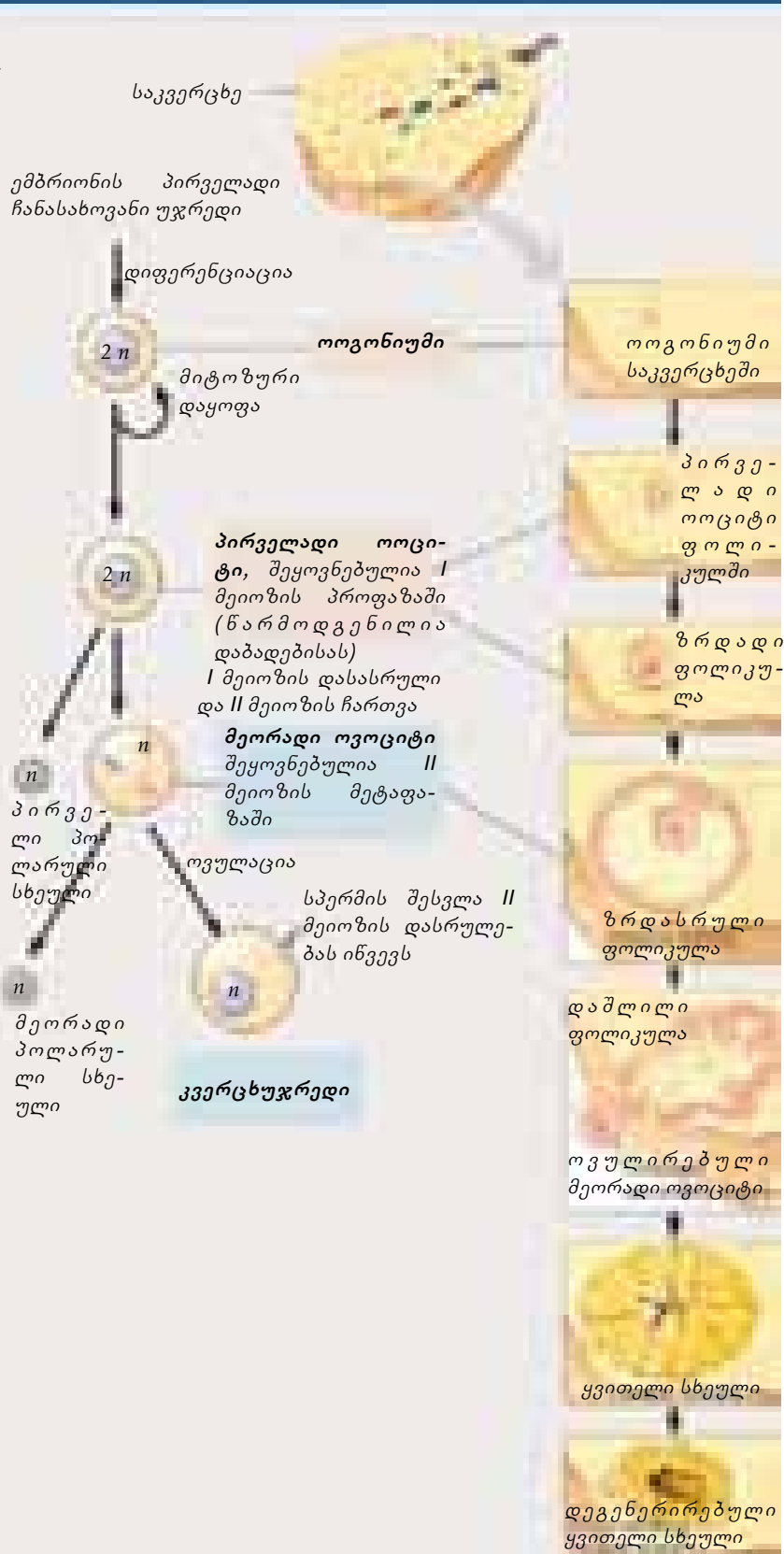
## სურათი 46.11 კვლევა: ადამიანის ოვოგენეზი

ოვოგენეზი იწყება მდებარე ემბრიონში პრიმორ-  
დიალური შრის უჯრედების დიფერენციაციით  
– **ოვოგონიუმში**, კვერცხ-სპეციფიკურ ლეროვან  
უჯრედებად. ოვოგონიუმში მრავალჯერად მიტოზს  
განიცდის და მეიოზის I პროფაზაში ჩერდება.  
უჯრედებს ამ სტადიაზე **პირველადი ოვოციტები**  
ენოდება. ისინი რჩებიან მოსვენების მდგომარეობა-  
ში მცირე ზომის ფოლიკულების შიგნით (სილრუეში,  
რომელიც დაფარულია დამცავი უჯრედებით) პუ-  
ბერტულ პერიოდამდე, ვიდრე ჰორმონები გააქ-  
ტივებდნენ მათ. პუბერტულობიდან დაწყებული,  
ფოლიკულომასტიმულირებელი ჰორმონი (FSH)  
პერიოდულად ატიმულირებს ფოლიკულის ზრდას,  
ინვევს მისი პირველადი ოვოციტის სრულ I მეიოზს  
და იწყებს II მეიოზს. მეიოზი შემდეგ ისევ ჩერდე-  
ბა. შეჩერებულ II მეტაფაზაში **მეორადი ოვოციტი**  
ოვულაციისას გამოიყოფა, როდესაც მისი ფოლი-  
კულა იხსნება. ჩვეულებრივ, ერთ თვეში მხოლოდ  
ერთი ოვოციტი მწიფდება და გამოიყოფა. მეიოზი  
არ გრძელდება, სანამ სპერმა არ შეაღწევს ოვოციტ-  
ში. მხოლოდ მაშინ სრულდება ბოლომდე ოვოგენეზი  
და კვერცხუჯრედი წარმოიქმნება (სხვა ცხოველურ  
სახეობებში სპერმა შედის ოვოციტში იგივე სტადი-  
აზე, უფრო ადრე, ან გვიან).

მეიოზური დაყოფები ოვოგენეზის დროს მოიცავს  
არაერთგვაროვან ციტოკინეზს, უფრო მცირე ზო-  
მის უჯრედები პოლარულ უჯრედებად გადაიქცე-  
ვა (პირველი პოლარული სხეული შეიძლება გან-  
იცდიდეს ან არ განიცდიდეს შემდგომ დაყოფას).  
მეიოზის დამთავრების შემდეგ სპერმისა და ახ-  
ლადმომწიფებული კვერცხუჯრედის ჰაპლოიდური  
ბირთვები ერთმანეთს ერწყმიან. ამ მოვლენას გა-  
ნაყოფიერება ეწოდება.

გახეთქილი ფოლიკულა ოვულაციის შემდეგ მალუ-  
თეინიზირებულ სხეულად ვითარდება. თუ გამო-  
ყოფილი ოვოციტი არ ნაყოფიერდება, ჩვეულებრივ  
მალუთეინიზირებული სხეული დეგენერაციას გან-  
იცდის.

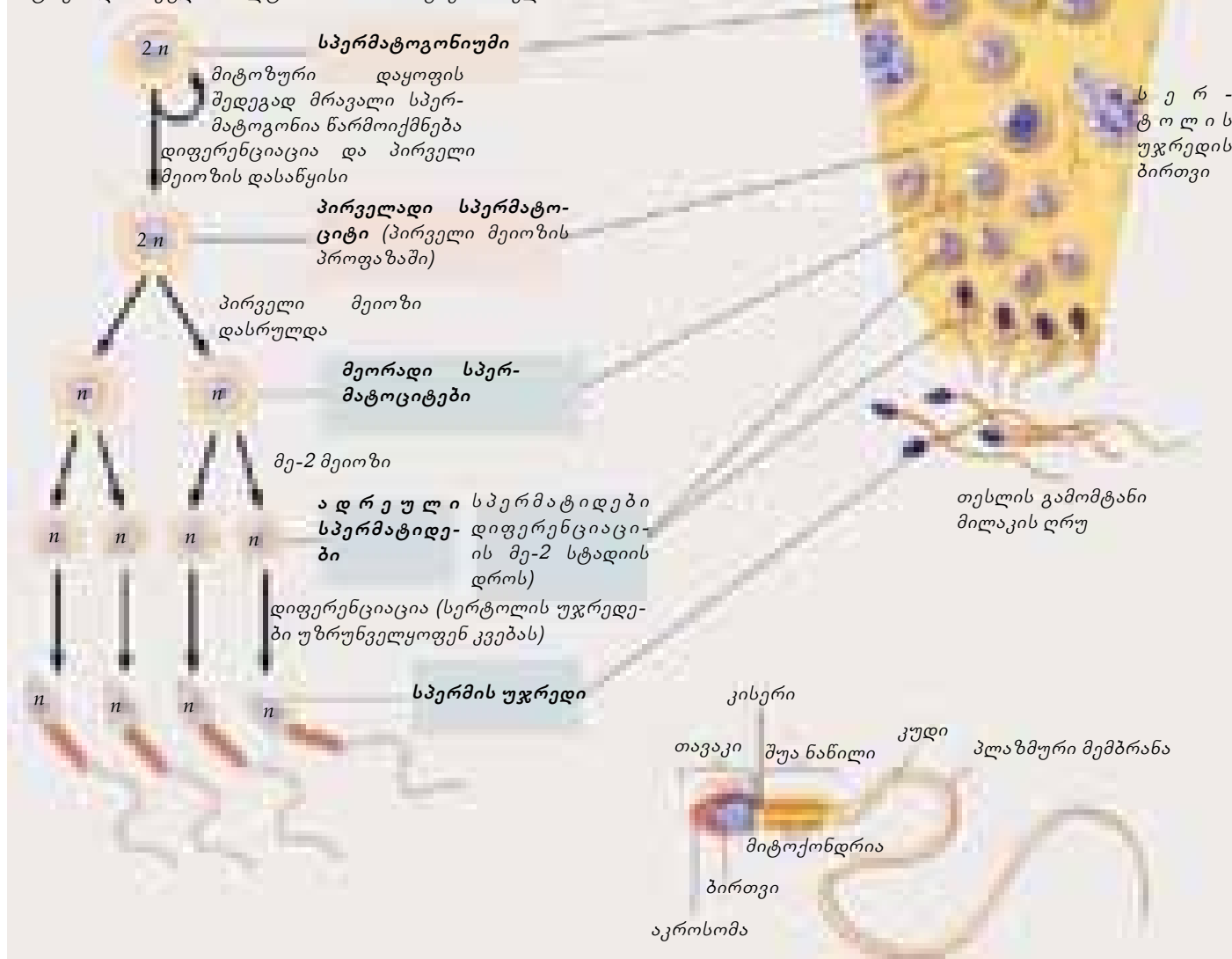
მრავალი წლის განმავლობაში მეცნიერებს სჯერო-  
დათ, რომ ქალები, ძუძუმწოვართა უმრავლესობის  
მსგავსად, იბადებიან ყველა პირველადი ოვოც-  
იტი, რომელიც კი მათ ოდესმე უნდა ჰქონოდათ  
– მათგან არც ერთი ახალი დაბადების შემდეგ არ  
ვითარდებოდა. 2004 წლის მარტში მკვლევარებმა  
აჩვენეს, რომ მრავლობითი ოვოგონია ზრდასრული  
თავგების საკვერცხეში მიმდინარეობს და ოვოც-  
იტების განვითარებაც ხდება. ახლა მკვლევარები  
ეძებენ მსგავს უჯრედებს ადამიანში. ეს შესაძლე-  
ბელია, რადგან ასაკთან დაკავშირებული ფერტი-  
ლურობის შემცირება მხოლოდ ოვოგონიის გრადუ-  
ალური განლევა კი არა, არამედ ხანდაზმული  
ოვოციტების დეგენერაციას უკავშირდება.



## სურათი 46.11 კვლევა: ადამიანის სპერმატოგენეზი

ეს სურათები აჩვენებს კორელაციას სპერმის განვითარების მეიოზურ სტადიებსა (მარცხნივ) და თესლგამტარი მილაკების მიკროსკოპულ სტრუქტურას შორის. ემბრიონული სათესლის ჩანასახოვანი შრის პრიმორდიული უჯრედები სპერმატოგონიუმში ვითარდება. ეს ის უჯრედებია, რომლებიც დასაბამს აძლევს სპერმას, სპერმატოგონიუმის სპერმაციდებში დიფერენცირებისას, მეიოზს ქრომოსომების დიპლოიდური რაოდენობა ( $2n=46$  ადამიანში) ჰაპლოიდურში ( $n=23$ ) გადაჰყავს. განვითარებადი უჯრედები გამოიყოფიან მათი ლოკალიზაციის ადგილიდან თესლის გამომტანი ტუბულების გარეთა კედლის სიახლოვეს სანათურის მიმართულებით (გახსნილი ცენტრალური კარიბჭე) და შემდეგ ეპიდიდისისკენ, სადაც ისინი მოძრაობის უნარს იძენენ.

სპერმის სტრუქტურა მის ფუნქციას განაპირობებს. ადამიანებში, ისევე როგორც სხვა სახეობებში, თავი, რომელიც ჰაპლოიდურ ბირთვს შეიცავს, სპეციალურ სხეულში – აკროსომაში თავსდება. აკროსომა შეიცავს ფერმენტებს, რომლებიც სპერმას კვერცხში შეღწევაში ეხმარება. თავის უკან, სპერმის უჯრედი მიტოქონდრიების (ან ძალიან დიდი ზომის ერთ ზოგიერთ სახეობაში) დიდ რაოდენობას შეიცავს. მიტოქონდრია კუდის შოლტის მოძრაობას უწყობს ხელს.



რომელთა მოქმედებითაც ხდება გონადოტროპინების გამოყოფის დათრგუნვა, რის გამოც, პროსტატის ზომის შემცირება და მისი აქტივობის დაქვეითება აღინიშნება.

**ბულბოურეტრული** ჯირკვლები პროსტატის ქვემოთ მდებარე პატარა ზომის ერთი წყვილი ჯირკვლებია. ეაკულაციის წინ ისინი გამჭირვალე ლორწოს გამოყოფენ, რომელიც ანეიტრალურ შარდის მჟავას, რომელიც ურეტრაში შეიძლება იყოს. ბულბოურეტრული სითხე სპერმის გარკვეულ რაოდენობასაც შეიცავს, ამიტომ ამ ეტაპზე შეწყვეტილი სქესობრივი აქტის მეთოდი შობადობის საკონტროლოდაც გამოიყენება.

## სათესლე სითხე მდედრობით რეპროდუქციულ ტრაქტში

მამაკაცი ჩვეულებრივ 2-5 მლ სათესლე სითხეს გამოყოფს და მისი ყოველი მილილიტრი 50-130 მლნ სპერმატოზოიდს შეიცავს. მდედრობით რეპროდუქციულ ტრაქტში მოხვედრისთანავე, სპერმის პროსტაგლანდინები იწვევენ ლორწოს გათხელებას საშოს შესასვლელთან. აგრეთვე იწვევენ საშვილოსნოს კუნთების შეკუმშვის სტიმულაციას, რაც ხელს უწყობს სპერმას იმოძრაოს ზემოთ, საშვილოსნოსკენ. სპერმის ტუტეები ვაგინის მჟავე არეს ანეიტრალურს და მისი მოძრაობის უნარს ზრდის. ეაკულაციის დასაწყისშივე სათესლე სითხე კოაგულაციას განიცდის, რითაც, საშვილოსნოს შეკუმშვის გამო, სპერმის გადაადგილება ადვილდება. შემდეგ სათესლე სითხეს ანტიკოაგულანტები ათხიერებენ და სპერმა იწყებს ცურვას მდედრობით ტრაქტში.

## პენისი

ადამიანის **პენისი (ასო)** სამი, ერექციის უნარის მქონე, ღრუბლისმაგვარი ქსოვილოვანი ცილინდრისგან შედგება. ისინი ვენებისა და კაპილარების დერივატია. სექსუალური აგზნების დროს, ერექციის უნარის მქონე ქსოვილი არტერიებით შემოსული სისხლით ივსება. როგორც კი მთელი ქსოვილი სისხლით აივსება, მომატებული წნევა პენისის სადრენაჟო ვენებს კეტავს, რის გამოც იგი სისხლით უხვად მარაგდება. ერექციის საბოლოო ეტაპი ვაგინაში პენისის შესვლაა. დროებითი იმპოტენცია, ერექციის უნარის შექცევადად დაკარგვა შეიძლება გამონვებული იქნას ალკოჰოლის, ნარკოტიკების მოხმარებით ან ემოციური პრობლემებით.

სხვადასხვა პრეპარატი და პენისის იმპლანტანტი წარმატებით გამოიყენება შეუქცევადი იმპოტენციის დროს, რის მიზნითაც ნერვული ან სისხლძარღვოვანი სისტემის პრობლემები შეიძლება იყოს. დასაღვევი პრეპარატი ვიაგრა ხელს უწყობს ლოკალური რეგულატორის აზოტის ოქსიდის (NO) მოქმედებას, აძლიერებს პენისის სისხლძარღვების გლუვი კუნთების მოდუნებას, რის გამოც ერექციის უნარის მქონე ქსოვილი სისხლით უხვად მარაგდება და ერექციაც ადვილდება.

პენისი თხელი კანითაა დაფარული. თავაკი სტიმულების მიმართ მგრძნობიარე კანის ძალიან თხელი შრითაა დაფარული. წინდაცვეთის შემთხვევაში, ამ ნაწილს კვეთენ. წინ-

დაცვეთა ზოგიერთი რელიგიის ტრადიციას, თუმცა არანაირი სამედიცინო ან ჰიგიენური დანიშნულება არ აქვს.

## ადამიანის სქესობრივი პასუხი

როგორც უკვე აღინიშნა მრავალი ცხოველი შეწყვილების ქცევას ავლენს. ადამიანებში სექსუალური ინტერესის ჩამოყალიბება კომპლექსურად ხდება. მას მრავალი ფსიქოფიზიოლოგიური ფაქტორი განპირობებს.

ორივე სქესისთვის ფიზიოლოგიური რეაქციების ორი ტიპის გამოყოფაა შესაძლებელი: **ქსოვილების სისხლით ავსება**, რაც არტერიების მეშვეობით ხორციელდება, და კუნთების დაძაბულობა. განივზოლიანი, ასევე გლუვი კუნთები იძაბება და/ან რიტმულად იკუმშება იმ კუნთების ჩათვლით, რომლებიც ორგანოებში მონაწილეობენ.

ადამიანის სექსუალური რეაქციის ციკლი ოთხ ფაზად იყოფა: აგზნება, პლატო, ორგაზმი და რეზოლუცია. პირველი ფაზის ფუნქციაა პენისის და ვაგინის მომზადება **კოიტუსისთვის** (სექსუალური შერწყმა). ამ ფაზის დროს აღინიშნება პენისისა და კლიტორის ერექცია, სათესლეების, ბაგეების და სარძევე ჯირკვლების გადიდება, ვაგინის ლუბრიკაცია (გაპოხვა). მიოტონია შეიძლება კიდურების კუნთების შეკუმშვაშიც გამოვლინდეს. პლატოს ფაზაში, ეს რეაქციები გრძელდება. ამ დროს ვაგინის ერთი მესამედი სისხლის მოწოლას განიცდის, ხოლო დანარჩენი ორი მესამედი მსუბუქადაა გაჭიმული. ეს ცვლილებები საშვილოსნოს შეკუმშვასთან ერთად ამ ორგანოს დეპრესიას განაპირობებს, რაც აიძულებს სპერმას ვაგინის უკანა კედელზე მოექცეს. იზრდება სუთქებისა და გულისცემის სიხშირე, ხანდახან 150/წთ, რაც იმდენად სექსუალური აგზნებით კი არა, არამედ ავტონომიური ნერვული სისტემის აქტივაციითაა განპირობებული (**სურათი 48.21** და **48.22**).

**ორგაზმი** ორივე სქესში რეპროდუქციული ორგანოების რიტმული, უნებლიე შეკუმშვებით ხასითდება. მამრს ორგაზმის ორი სტადია აქვს. ემისიის დროს რეპროდუქციული ტრაქტისა და ჯირკვლების შეკუმშვა აჩქარებს სპერმის მოძრაობას ურეტრაში. გამოძევება ან ეაკულაცია მიმდინარეობს მაშინ, როდესაც საშვილოსნო იკუმშება და სათესლე სითხე გადმოდის. მდედრის ორგაზმის დროს საშვილოსნო და გარეთა ვაგინა იკუმშება, მაგრამ ვაგინის შიგნითა ორი მესამედი არა. ორგაზმი სექსუალური რეაქციის ყველაზე მოკლე სტადიაა. იგი, ჩვეულებრივ, მხოლოდ რამდენიმე წამის განმავლობაში მიმდინარეობს. ორივე სქესისათვის შეკუმშვა 0.8 წამის ინტერვალით მიმდინარეობს და ამ პროცესში შესაძლოა ანალური სფინქტერის და მუცლის კუნთების მონაწილეობდნენ.

რეზოლუციის ფაზა ამთავრებს ციკლს და აბრუნებს რეაქციას საწყის სტადიამდე. სისხლით ავსებული ორგანოები იბრუნებენ თავის ფერსა და ზომას და კუნთები დუნდება. ცვლილებათა უმეტესობა რეზოლუციის ფაზის 5 წუთში მთავრდება. თუმცა, პენისისა და კლიტორის ერექცია შეიძლება კიდევ გაგრძელდეს. ორგანოების საწყის მდგომარეობამდე დაბრუნებას ერექციის საბოლოო შეწყვეტიდან ერთი საათი მაინც ესაჭიროება.

## კონცეფცია 46.3

1. დაალაგეთ მამრობითი სასქესო სადინრები სპერმის მოძრაობის შესაბამისი თანმიმდევრობით: ეპიდდიმისი, თესლგამომტანი მილაკი, ურეტრა, გამომტანი სადინარი.
2. როგორ განაპირობებს მამრობითი დანამატი ჯირკვლები სპერმის მოძრაობასა და განაყოფიერებას?
3. ადამიანის სექსუალური რეაქციის დროს, რომელი ორგანოები ექცევა სისხლძარღვთა დაძაბულობის გავლენის ქვეშ?

## კონცეფცია 46.4

### ადამიანებსა და სხვა ბუბოქოჯრებში ჰორმონების კომპლექსური ურთიერთმომდებლობა ატოგოლიტებს გამოცოგნებს

როგორ წარმოიქმნება გამეტები ძუძუმწოვართა ორგანიზმში? **გამეტოგენეზის** პროცესს საფუძვლად მელიოზი უდევს, მაგრამ მდედრებსა და მამრებში ამ პროცესის დეტალები განსხვავებულია. **ოვოგენეზი** – ზრდასრული კვერცხის (კვერცხუჯრედის) განვითარება აღწერილია შემდეგ გვერდზე **სურათი 46.11**-ზე. სპერმატოგენეზი – ზრდასრულ მამრებში მომნიშვნელოვანი **სპერმატოზოიდების** წარმოქმნა, დროში გახანგრძლივებული და „უხვმოსავლიანი“ პროცესია. ყოველი ეაკულაციის დროს მამაკაცი, ჯამში, სპერმის 100-650 მლნ უჯრედს გამოყოფს, რომლებიც (მცირე გამონაკლისის გარდა) არ კარგავენ განაყოფიერების უნარს. სპერმატოგენეზი სათესლის თესლის გამტარ მილაკებში მიმდინარეობს. **სურათი 46.12**-ში ამ პროცესის დეტალებია აღწერილი.

ოვოგენეზი სპერმატოგენეზისგან სამი ძირითადი ნიშნით განსხვავდება. პირველი: მიტოზური გაყოფისას ოვოგენეზის დროს ციტოკინეზი არ არის ერთგვაროვანი, ვინაიდან ციტოპლაზმა მთლიანად განთავსდება ერთ-ერთ შვილეულ უჯრედში – მეორად ოვოციტში. ეს დიდი ზომის უჯრედი შეიძლება კვერცხად გადაიქცეს. მეიოზის დროს წარმოიქმნილ პატარა უჯრედებს პოლარული სხეულები ეწოდება. ისინი შემდგომში დეგენერაციას განიცდიან. ამის საწინააღმდეგოდ, სპერმატოგენეზი მეიოზის დროს წარმოქმნილი ოთხივე უჯრედი ზრდასრულ სპერმად ვითარდება (იხ. შედარებისათვის **სურათი 46.11** და **46.12**). მეორე: ქალის რეპროდუქციული ტრაქტისგან განსხვავებით, მამაკაცის სიცოცხლის განმავლობაში განვითარებადი სპერმული უჯრედები აგრძელებენ მიტოზურ დაყოფას (იხ. ტექსტი **სურათი 46.11**).

მესამე: ოვოგენეზს ხანგრძლივი „სვენების“ პერიოდები აქვს, განსხვავებით სპერმატოგენეზისგან, რომლის დროსაც წინამორბედი უჯრედებისგან მომნიშვნელოვანი სპერმა უწყვეტად წარმოიქმნება

### ბუბოქოჯრული ციკლი მდედრებში

მდედრებში ჰორმონების გამოყოფასა და რეპროდუქციულ პროცესებს ციკლური ხასიათი აქვს. მაშინ, როდესაც მამრები მრავალ სპერმას განუწყვეტლივ გამოიმუშავენ, მდედრებში მხოლოდ ერთი ან რამდენიმე კვერცხუჯრედი შეიძლება მომნიშვნელოვან და ისიც ციკლის განსაზღვრულ პერიოდში. მდედრის ციკლზე ჰორმონების კონტროლი კომპლექსურად ხორციელდება, რასაც მოგვიანებით ვნახავთ.

### განსხვავება მენსტრუალურ და ესტრალურ ციკლებს შორის

მდედრ ძუძუმწოვრებში ერთმანეთისგან განსხვავებული ორი ციკლი გვხვდება. ადამიანებსა და ზოგიერთ სხვა პრიმატს **მენსტრუალური ციკლი** ახასიათებთ, მაშინ როდესაც სხვა ძუძუმწოვრებს **ესტრალური ციკლი** აქვთ. ორივე შემთხვევაში ოვულაცია ხდება ენდომეტრიუმის (საშვილოსნოს ამოფენი) გასქელების შემდეგ. ამ დროს ვითარება ძლიერი სისხლმარაგება საშვილოსნოს რაც ამზადებს მას შესაძლებელ ემბრიონს იმპლანტაციისათვის. ერთი განსხვავება ორ ციკლს შორის არის მოვლენათა განვითარება თუ დაორსულება არ მოხდება. **მენსტრუალური ციკლის** დროს ადგილი აქვს საშვილოსნოს კედლის სისხლდენით ჩამოშლას ვაგინის გზით და რასაც მენსტრუაცია ეწოდება. ესტრალური ციკლის დროს ენდომეტრიუმი საშვილოსნოს მიერ ადსორბირდება და ძლიერი სისხლდენა არ აღინიშნება.

მეორე მნიშვნელოვანი განსხვავება არის უფრო ძლიერი ქვევითი ცვლილებები ესტრალური ვიდრე მენსტრუალური ციკლის დროს. აგრეთვე, განსხვავებით მენსტრუალური ციკლისა, კლიმატს და სეზონს აქვს დიდი ზეგავლენა ესტრალურ ციკლზე. ქალებს სექსუალური აქტივობა შენარჩუნებული აქვთ მთელი მენსტრუალური ციკლის განმავლობაში, მაგრამ ძუძუმწოვართა უმრავლესობას კოპულაციის უნარი მხოლოდ ოვულაციის დროს აქვთ. სექსუალური აქტივობის ამ პერიოდს ესტრუსი ეწოდება. ეს არის პერიოდი, როცა ვაგინას შეწყვილება შეუძლია. ესტრუსს ზოგჯერ ცხელებას უწოდებენ, ვინაიდან ამ დროს მდედრების სხეულის ტემპერატურა მომატებულია. ძუძუმწოვართა შორის რეპროდუქციული ციკლის სიხშირე და ხანგრძლივობა ძლიერ განსხვავებულია. ქალების მენსტრუალური ციკლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 28 დღეა (თუმცა ციკლის ხანგრძლივობა შეიძლება ვარიირებდეს 20-40 დღიან პერიოდში). ამისგან განსხვავებით, ვირთაგვების ესტრალური ციკლის ხანგრძლივობა 5 დღეა. დათვებასა და ძალებს წელიწადში მხოლოდ ერთი ციკლი აქვთ, სპილოებს – რამდენიმე.

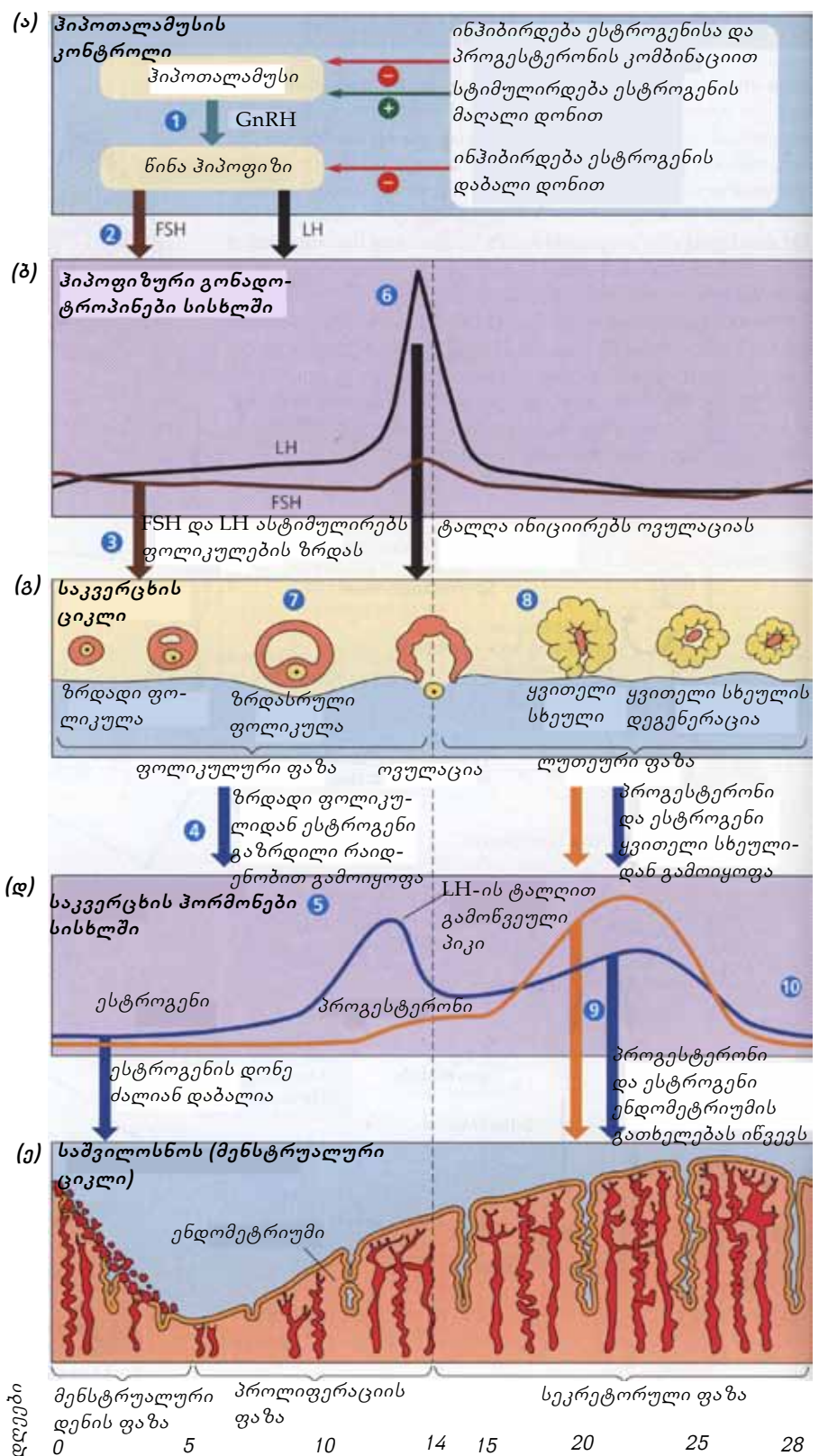
## ქალების რეპროდუქციული ციკლი: დეტალური აღწერა

განვიხილოთ ქალების რეპროდუქციული ციკლი უფრო დეტალურად როგორც მაგალითი იმისა თუ როგორ ახდენენ ჰორმონები კომპლექსური ფუნქციის კოორდინაციას. ტერმინი მენსტრუალური ციკლი გულისხმობს საშვილოსნოს სპეციფიკურ ცვლილებებს და ამიტომ ამ ციკლს **საშვილოსნოს ციკლს** უწოდებენ. მეორეს მხრივ, იგი გამოიწვევა ციკლური ცვლილებებით რომელიც საკვერცხეებში მიმდინარეობს, ამიტომ აღნიშნულ ციკლს **საკვერცხის ციკლს** უწოდებენ. ამგვარად, მდებარეობითი რეპროდუქციული ციკლი ერთი ინტეგრაციული ციკლია, რომელიც ორ ორგანოს – საშვილოსნოს და საკვერცხეს მოიცავს.

უმაღლეს დონეზე მაკონტროლებელი ჰორმონები იგივე ჰორმონებია, რომელნიც აკონტროლებენ მამრობით რეპროდუქციულ სისტემას. ეს ჰორმონებია: გონადოტროპინის გამომყოფი ჰორმონი (GnRH) – გამოიყოფა ჰიპოთალამუსიდან, ფოლიკულო-მასტიმულირებელი ჰორმონი (FSH) და მალუთეინიზირებელი ჰორმონი (LH) – გამოიყოფა წინა ჰიპოფიზიდან. FS-ისა და LH-ის კონცენტრაციები სისხლში აკონტროლებენ ორი ტიპის სტეროიდულ ჰორმონების, ესტროგენის და პროგესტერონის, წარმოქმნას საკვერცხეებში. საკვერცხეებში ჰორმონების წარმოქმნის ციკლი აკონტროლებს საშვილოსნოს ციკლს, რომელიც ენდომეტრიუმის ზრდასა და შემცირებაში გამოიხატება. ამის შედეგი კი ის არის, რომ საკვერცხის ფოლიკულის გაზრდა და ოვულაცია საშვილოსნოს კედელზე ემბრიონის იმპლანტაციისთვის მომზადების სინქრონულად მიმდინარეობს. შემდეგი განხილვა და სურათი 46.13 დაგეხმარებათ იმის გარკვევაში, როგორ არეგულირებს ეს ხუთი სახეობის ჰორმონი ამ სისტემას. თქვენ დაინახავთ, თუ როგორ ამ ჰორმონების მონაწილეობით იქმნება სქემა, რომელიც ორივე – დადებით და უარყოფით უკუკავშირს შეიცავს.

**საკვერცხის ციკლი: (1)** ციკლი იწყება ჰიპოთალამუსიდან GnRH-ის გამოყოფით, რომელიც (2) ასტიმულირებს ჰიპოფიზიდან FSH-ისა და LH-ის მცირე ულუფების გამოყოფას.

(3) FSH-ი LH-ის დახმარებით ასტიმულირებს ფოლიკულის ზრდას (4), ფოლიკულის ზრდისას უჯრედები იწყებენ ესტრო-



▲ **სურათი 46.13 ქალის რეპროდუქციული ციკლი.** სურათი უჩვენებს როგორ რეგულირდება საკვერცხის ციკლი (გ) და საშვილოსნოს (მენსტრუალური) ციკლი (ე) სისხლში ჰორმონების დონის ცვლილებები, რაც ნაჩვენებია სურათის ნაწილებში (ა), (ბ) და (დ). დროის შკალა მოცემულია სურათის ბოლოს და შეესაბამება სურათის (ბ) – (ე) ნაწილებს.

გენის წარმოქმნას. მიაქციეთ ყურადღება იმას, რომ **სურათი 46.13**-ზე ნაჩვენებია, რომ ესტროგენის გამოყოფილი რაოდენობის ნელი მომატება ძირითადად **ფოლიკულურ ფაზაში** მიმდინარეობს. ეს საკვერცხის ციკლის ის ფაზაა, რომლის დროსაც ფოლიკულები იზრდება და ოვოციტები მწიფდება (რამდენიმე ფოლიკული იწყებს ზრდას და მხოლოდ ერთი მათგანი მომწიფდება, დანარჩენი იშლება). ესტროგენის დაბალი დონე აკავებს ჰიპოფიზური ჰორმონების გამოყოფას, ინარჩუნებს FSH-ისა და LH-ის შესაბამის დაბალ დონეებს.

თუმცა, FSH-ისა და LH-ის დონეები სწრაფად იზრდება, როდესაც **(5)** ესტროგენის გამოყოფა მოზარდი ფოლიკულიდან იზრდება. მაშინ, როცა ესტროგენის დაბალი დონე ჰიპოფიზური გონადოტროპინების გამოყოფას აკავებს, მაღალ კონცენტრაციას საწინააღმდეგო ეფექტი აქვს. ესტროგენი გონადოტროპინების სეკრეციას ჰიპოთალამუსზე ზემოქმედებით ასტიმულირებს; იგი ზრდის GnRH-ის გამოყოფას.

**(6)** თქვენ შეგიძლიათ **სურათი 46.13 (ბ)** ნახოთ FSH-ისა და LH-ის დონეების მკვეთრი მომატების პასუხი, რომელიც მალევე ვლინდება, როგორც კი მატულობს ესტროგენის კონცენტრაცია, რაც სურათ 46.13დ-ზეა ნაჩვენები. ეფექტი უფრო ძლიერია LH-ის მიმართ, ვინაიდან ესტროგენის მაღალი კონცენტრაცია ზრდის LH-ის გამომყოფი უჯრედების მგრძნობელობას ჰიპოფიზარული GnRH-ის მიმართ. ამჟამად ცნობილია, რომ ფოლიკულებს LH-ზე შეუძლიათ უფრო მძლავრად უპასუხონ, ვინაიდან მათი უჯრედების უმეტესობას ამ ჰორმონის მიმართ მგრძნობიარე რეცეპტორები აქვთ. LH-ის კონცენტრაციის გაზრდა, რაც გაზრდილი ფოლიკულების მიერ ესტროგენის მომატებული სეკრეციით გამოიწვევა, არის დადებითი ბიოლოგიური უკუკავშირის მაგალითი. თავის მხრივ, ფოლიკულის მომწიფებას უზრუნველყოფს. **(7)** მომწიფებული ფოლიკული ვითარდება სითხით სავსე ღრუში, იგი ძალიან დიდი ხდება, იღებს ამობურცულ ფორმას საკვერცხის ზედაპირის ახლოს. ფოლიკულური ფაზა სრულდება **ოვულაციით**, LH-ის მომატებიდან დაახლოებით 1 დღის შემდეგ: ფოლიკული და საკვერცხის მიმდებარე კედელი ირღვევა და ადგილი აქვს მეორადი ოოციტის გამოყოფას.

**(8)** ოვულაციის თანმდევი, საკვერცხის ციკლის **ლუთეინური ფაზის** დროს, ასტიმულირებს საკვერცხის ფოლიკულური ქსოვილის ტრანსფორმაციას ყვითელი სხეულის ჯირკვლოვან სტრუქტურად (**იხ. სურათი 46.13 გ**) LH-ის მასტიმულირებელი მოქმედების გაგრძელების გამო, ყვითელი სხეული გამოყოფს პროგესტერონს და ესტროგენს (**იხ. სურათი 46.13 დ**).

როგორც კი პროგესტერონისა და ესტროგენის კონცენტრაციის დონე მალღდება, ამ ჰორმონების კომბინაცია წარმოქმნის უარყოფით კავშირს ჰიპოთალამუსისა და ჰიპოფიზის მიმართ, LH-ისა და FSH-ის გამოყოფა კავდება. ლუთეინური ფაზის ბოლოსკენ, ყვითელი სხეული იშლება და იწვევს ესტროგენისა და პროგესტერონის სწრაფ შემცირებას. საკვერცხის ჰორმონების კონცენტრაციის დონის დაგარდნა ათავისუფლებს ჰიპოთალამუსსა და ჰიპოფიზს ამ ჰორმონების შემაკავებელი მოქმედებისგან. ამის შემდეგ ჰიპოფიზს შეუძლია FSH-ის საკმარისი რაოდენობის სეკრეცია, რათა საკვერცხეში დაიწყოს ახალი ფოლიკულის ზრდის სტიმულაცია, რომელიც საკვერცხის შემდეგი ციკლის ინიციაციას უზრუნველყოფს.

**საშვილოსნოს (მენსტრუალური) ციკლი.** საკვერცხის მიერ გამოყოფილ ჰორმონებს – ესტროგენს და პროგესტერონს – ძირითადი ეფექტი საშვილოსნოზე აქვთ. ზრდად ფოლიკულას მიერ გამოყოფილი ესტროგენის ზრდადი რაოდენობა ენდომეტრიუმის გასქელების სტიმულს იძლევა. ამ გზით საკვერცხის ციკლის ფოლიკულური ფაზა კოორდინაციაშია საშვილოსნოს ციკლის **პროლიფერაციის ფაზასთან (იხ. სურათი 46.13 ე)**. ოვულაციის წინ საშვილოსნო ემზადება ემბრიონის შესაძლო მიღებისთვის. ოვულაციის შემდეგ **(9)** ესტროგენი და პროგესტერონი, რომელიც ყვითელი სხეულიდან გამოიყოფა, ასტიმულირებს ენდომეტრიუმის შემდგომ განვითარებას და შენარჩუნებას, არტერიებისა და ენდომეტრიუმის ჯირკვლების გადიდებათ. ეს ჯირკვლები საკვებ ნივთიერებებს გამოყოფენ, რომელიც შეიძლება გამოიყენოს ადრეულმა ემბრიონმა, სანამ ის ბოლომე ჩაიზრდებოდეს საშვილოსნის შრეში. ამგვარად, საკვერცხის ციკლის ლუთეინური ფაზა კოორდინაციაშია საშვილოსნოს ციკლის **სეკრეტორულ ფაზასთან**.

**(10)** საკვერცხის ჰორმონების კონცენტრაციის სწრაფი დაქვეითება, როცა ყვითელი სხეულის დეზინტეგრაცია ხდება, იწვევს საშვილოსნოს არტერიების სპაზმს, საშვილოსნოს შრის სისხლით მომარაგებას წყვეტს. ენდომეტრიუმის ზედა ორი მესამედის დაშლა მენსტრუაციაში ვლინდება. ეს არის **საშვილოსნოს ციკლის მენსტრუალური დენის ფაზა** და ახალი ციკლის დასაწყისი. შესაბამისად, მენსტრუაციის პირველი დღე საშვილოსნოს (და საკვერცხის) ციკლის პირველ დღესაც აღნიშნავს. მენსტრუალური სისხლის დენა რამდენიმე დღეს გრძელდება. ჩვეულებრივ, მენსტრუაციის განმავლობაში საკვერცხეში ახალი ფოლიკულების ზრდა იწყება.

ციკლს ციკლი მოჰყვება, საკვერცხეში კვერცხუჯრედის მომწიფება და შემდეგ მისი გამოყოფა ინტეგრირებულია საშვილოსნოს ცვლილებებთან, იმ ორგანოსთან, რომელმაც ემბრიონი უნდა მიიღოს, თუ კვერცხის განაყოფიერება მოხდება. თუ საშვილოსნოს ციკლის სეკრეტორული ფაზის ბოლოს ენდომეტრიუმში ემბრიონის იმპლანტაცია არ მოხდება, იწყება მენსტრუალური დენის ახალი ფაზა, რომელიც ამავე დროს შემდგომი ციკლის პირველი დღეა. მოგვიანებით, ამავე თავში თქვენ გაეცნობით იმ ძირითად მექანიზმებს, რომლებიც ორსულობის დროს ენდომეტრიუმის დეზინტეგრაციას უშლის ხელს. მდებარეობით რეპროდუქციულ ციკლში ესტროგენის მაკოორდინირებელი როლის გარდა, ჰორმონების ამ ოჯახის სხვა ჰორმონებთან ერთად მეორადი მდებარეობითი სქესობრივი ნიშნების ჩამოყალიბებაშიც ენიჭება მნიშვნელობა. ესტროგენი იწვევს ცხიმის დაგროვებას მკერდსა და თეძოებზე, ზრდის წყლის დაგროვებას, მოქმედებს კალციუმის მეტაბოლიზმზე, იწვევს მკერდის განვითარებას და მოქმედებს მდედრების სექსუალურ ქცევაზე.

**მენოპაუზა.** დაახლოებით 450 ციკლის შემდეგ, ქალებს **მენოპაუზა** ეწყებათ. ამ დროს წყდება ოვულაცია და მენსტრუაცია. მენოპაუზა ჩვეულებრივ 46-54 წლის ასაკში აღინიშნება. დაახლოებით ამ წლების განმავლობაში საკვერცხე კარგავს უნარს, უპასუხოს ჰიპოფიზის (FSH და LH) გონადოტროპინების მოქმედებას. მენოპაუზა საკვერცხის მიერ ესტროგენის გამომუშავების დაქვეითების შედეგია. მენოპაუზა

ჩვეულებრივი მოვლენა არ არის. სხვა ძუძუმწოვრებში, როგორც მდებარეობს, ისე მამრებში, რეპროდუქციული უნარი სიცოცხლის ბოლომდე შენარჩუნებული. აქვს მენოპაუზას რაიმე ევოლუციური მნიშვნელობა? გამორჩეულ მდებარეობაში ბუნებრივ გადარჩევას რატომ უნდა შეეჩერებინა რეპროდუქცია? ერთი საინტერესო ჰიპოთეზა ამასთან დაკავშირებით ასე გამოიყურება – ადამიანის ადრეული ევოლუციის პერიოდში, მენოპაუზის განვითარება, შვილების გაჩენის შემდეგ, ზრდიდა ქალების შეგუებულობას. რეპროდუქციის უნარის დაკარგვა ხელს უწყობდა ზრუნვას თავის შთამომავლობაზე – შვილებსა და შვილიშვილებზე. ამის შედეგად ზრდიდა იმ ინდივიდების გადარჩენას რომელთაც ჰქონდად მენოპაუზიანი ქალების გენები.

## მამრებით რეპროდუქციულ სისტემის ჰომოლოგიური კონტოლი

მამრებში, ძირითად სასქესო ჰორმონებს ანდროგენები წარმოადგენენ, რომელთაგან ტესტოსტერონი ყველაზე მნიშვნელოვანია. ანდროგენები სტეროიდულ ჰორმონებს მიეკუთვნება და, ძირითადად, სათესლის ლეიდიგის უჯრედების მიერ გამოიყოფა. ეს არის ინტერსტიციალური უჯრედები, რომლებიც თესლის გამომყოფი მილაკების მახლობლად არის მოთავსებული.

ტესტოსტერონი და სხვა ანდროგენები პირდაპირ პასუხისმგებელი არიან პირველადი და მეორადი სასქესო ნიშნების ჩამოყალიბებაზე. პირველადი სასქესო ნიშნები გულისხმობს რეპროდუქციულ სისტემას: გამომყვან სადინრებს, რეპროდუქციული სტრუქტურების განვითარებას, სპერმის წარმოქმნას.

მეორადი სასქესო ნიშნების მახასიათებლები პირდაპირ არ უკავშირდება რეპროდუქციულ სისტემას. ამ ნიშნებს ეკუთვნის ხმის დაბოხება, სახისა და ბოქვენის თმის საფარის განვითარება და კუნთების ზრდა (ანდროგენები ასტიმულირებენ ცილის სინთეზს). ამასთანავე, ძუძუმწოვრებსა და სხვა ხერხემლიანებში ანდროგენებს ძლიერი ზეგავლენა აქვთ ქცევაზეც. სექსუალურ დრავთან ერთად, ანდროგენები ჩვეულებრივ ზრდის აგრესიულობას და პასუხისმგებელია ვოკალურ ქცევაზე, როგორიცაა ფრინველების გალობა და ბაყაყების ყიყინი.

ნინა ჰიპოფიზიდან და ჰიპოთალამუსიდან გამოყოფილი ჰორმონები სათესლეში ანდროგენების სეკრეციასა და სპერმის წარმოქმნას აკონტროლებს. როგორც თქვენ იხილეთ **სურათი 46.14** ყოველი ჰორმონი მხოლოდ იმ უჯრედზე მოქმედებს, რომელსაც გარკვეული ჰორმონისადმი მგრძნობიარე რეცეპტორი აქვს. დაიმახსოვრეთ: თითოეულ ჰორმონს საკუთარი რეცეპტორი აქვს (იხ. თავი 45).

## კონცეფცია 46.4

1. FSH და LH თავის სახელწოდებას მდებარეობით რეპროდუქციული ციკლიდან იღებენ, მაგრამ ისინი მამრობით ორგანიზმშიც მოქმედებენ. მსგავსია მათი ფუნქციები მდებარეობით და მამრობით ინდივიდებში?
2. რით განსხვავდება ესტრალური ციკლი მენსტრუალურისგან და ცხოველების რომელ ტიპშია ნანახი ეს ორი ტიპის ციკლი?
3. რატომ განვიხილავთ საკვერცხის ციკლს და საშვილოსნოს (მენსტრუალურ) როგორც ერთიანი ციკლის ნაწილებს?
4. რომელი სპეციფიკური ჰორმონის ცვლილებას მოჰყავს ოვულაცია მოქმედებაში?

## კონცეფცია 46.5

### ადამიანებში და პლაცენტაან ბიბრეზებში ემბრიონი ახალშობილამდე დედის საშვილოსნოში იზრდება

ადამიანებსა და სხვა პლაცენტარულ ძუძუმწოვრებში **ორსულობა** (მაკეობა) არის მდგომარეობა, რომლის დროსაც საშვილოსნოში ერთი ან რამდენიმე ემბრიონი ვითარდება. ადამიანის ორსულობა განაყოფიერებიდან 266 დღეს (38 კვირას) ან ბოლო მენსტრუაციიდან 40 კვირას გრძელდება. სხვა სახეობაში მაკეობის პერიოდი ცხოველის ზომაზე და ახალშობილის მომწიფებაზეა დამოკიდებული. მრავალი მღრღნელის მაკეობა 21 დღის განმავლობაში, ხოლო ძაღლებში კი დაახლოებით 60 დღის მანძილზე გრძელდება. ძროხების მაკეობის პერიოდი დაახლოებით 270 დღეა, თითქმის იმავე ხანგრძლივობის, რაც ადამიანებში.

### ჩასახვა, ემბრიონული განვითარება და მშობიარობა

სპერმით კვერცხის განაყოფიერებას **ჩასახვასაც** უწოდებენ. ეს პროცესი ადამიანებში კვერცხსავალში (ფალოპის მილებში) მიმდინარეობს (**სურათი 46.15**). დაახლოებით 24 საათის შემდეგ მიღებული ზიგოტა იწყებს დაყოფას ან **დანანევრებას**. ემბრიონი წარმოადგენს უჯრედების სფეროს როდესაც მიაღწევს საშვილოსნოს, განაყოფიერებიდან 3-4 დღის მოგვიანებით. განაყოფიერებიდან დაახლოებით 1 კვირის შემდეგ დანანევრების გზით მიიღება ემბრიონული სტადია, რომელსაც ბლასტოციტი ეწოდება. ეს არის უჯრედების სფ-

ერული ფორმის ნარმონაქმნი, რომელსაც ღრუ აქვს. ბლასტოციტი ენდომეტრიუმში იმპლანტირდება, რასაც სჭირდება რამდენიმე დღე.

ემბრიონი გამოყოფს ჰორმონებს, რომელთა საშუალებითაც ჩანასახი თავის არსებობას დედის რეპროდუქციულ სისტემას ატყობინებს. ერთ-ერთი ასეთი ჰორმონი **ადამიანის ქორიონის გონადოტროპული ჰორმონია (HCG)**. იგი მოქმედებს როგორც ჰიპოფიზური LH, რომელიც ინარჩუნებს პროგესტერონის და ესტროგენის სეკრეციას ყვითელი სხეულიდან ორსულობის პირველ რამდენიმე თვეში. ჰორმონული ზემოქმედების არ არსებობის შემთხვევაში დედის ჰორმონის LH-ის შემცირებას მენსტრუაცია და ემბრიონის დაკარგვა მოსდევს. HCG-ის დონე დედის სისხლში ისეთი მაღალია, რომ ის შარდში გადადის და შარდის ანალიზით ორსულობის ტესტირება შესაძლებელია.

## პირველი ტრიმესტრი

ადამიანის ორსულობა შეიძლება **სამ ტრიმესტრად** დაიყოს – სამი თვე თითოეულში. პირველი ტრიმესტრი არის დრო, როცა დედასა და ემბრიონში ყველაზე რადიკალური ცვლილება მიმდინარეობს. გავაგრძელოთ თხრობა იქიდან, სადაც შევჩერდით – იმპლანტაციიდან. ენდომეტრიუმში იმპლანტაციას ბლასტოციტის ირგვლივ ზრდით პასუხობს. სწორედ ამ დროს ემბრიონის სხეულის სტრუქტურების დიფერენციაცია იწყება (ემბრიონის განვითარების შესახებ თქვენ მეტს გაიგებთ 47-ე თავში).

განვითარების პირველი 2-4 კვირის განმავლობაში ემბრიონი საკვებს პირდაპირ ენდომეტრიუმიდან იღებს. ამავე დროს, ბლასტოციტის გარეთა შრე, რომელსაც **ტროპობლასტი** ეწოდება, იწყებს ზრდას. იგი ენდომეტრიუმს შეერევა და საბოლოოდ **პლაცენტა** წარმოიქმნება. დისკის ფორმის ეს ორგანო, შეიცავს როგორც ემბრიონის, ისე დედის სისხლ-ძარღვებს. მისი ზომა დაახლოებით სადილის თევზის ზომას აღწევს, ხოლო წონა 1 კგ-მდეა. დედისა და ემბრიონის სისხლძარღვთა შორის დიფუზია ემბრიონის საკვებით მომარაგებას განაპირობებს. აგრეთვე დიფუზია გაზთა ცვლასა და მეტაბოლური ნარჩენებისგან გათავისუფლებას უზრუნველყოფს. სისხლი ემბრიონიდან მიედინება პლაცენტისკენ ჭიპლარის არტერიებით და ასევე ჭიპლარის ვენებით ბრუნდება (**სურათი 46.16** შემდეგ გვერდზე).

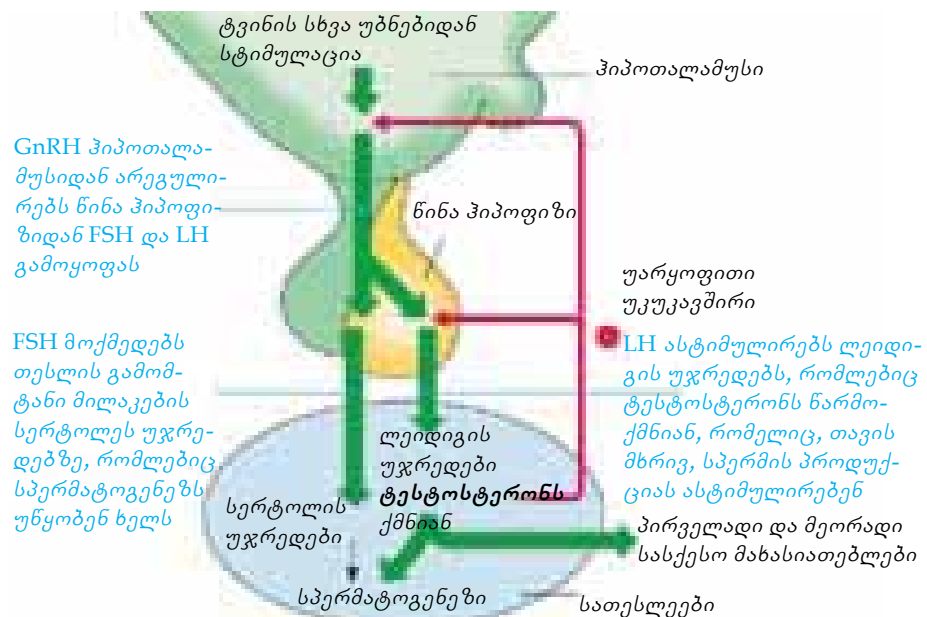
პირველი ტრიმესტრი **ორგანოგენეზის** – ორგანიზმის ორგანოთა წარმოქმნის ძირითადი პერიოდია. გული მეოთხე კვირიდან იწყებს პულსაციას და მისი მოსმენა ექოსკოპით პირველი ტრიმესტრის ბოლოსაა შესაძლებელი. მერვე კვირის ბოლოს მოზრდილი ორგანიზმის ყველა ძირითადი ორგანო რუდიმენტუ-

ლი ფორმით უკვე ჩამოყალიბებულია (ეს ის პერიოდია, როცა ემბრიონი ყველაზე მგრძნობიარეა ისეთი ზემოქმედების მიმართ, როგორიცაა რადიაცია და ნაწილები, რამაც შეიძლება თანდაყოლილი ნაკლი გამოიწვიოს). 8 კვირისთვის ემბრიონს **ნაყოფი** ეწოდება. პირველი ტრიმესტრის ბოლოს კარგად განვითარებული ნაყოფის სიგრძე მხოლოდ 5 სმ-ია.

ამასთანავე, დედის ორგანიზმში სწრაფი ცვლილებები მიმდინარეობს. პროგესტერონის მაღალი დონე რეპროდუქციული სისტემის ცვლილებებს იწვევს. ეს ცვლილებები მოიცავს ლორწოს რაოდენობის მომატებას საშვილოსნოს ყელში, რაც ქმნის დამცავ საცობს. იზრდება დედის პლაცენტის ნაწილი, ზომაში იმატებს საშვილოსნო და ჩერდება ოვულაცია და მენსტრუალური ციკლი. სარძევე ჯირკვლები სწრაფად იზრდება და საკმაოდ შესამჩნევი ხდება.

## მეორე ტრიმესტრი

მეორე ტრიმესტრის განმავლობაში ნაყოფი 30 სმ-მდე იზრდება და ძალიან აქტიური ხდება. დედამ შეიძლება იგრძნოს ნაყოფის მოძრაობა მეორე ტრიმესტრის ადრეულ პერიოდში. ნაყოფის აქტივობა შესამჩნევი ხდება მუცლის კედელზე მეორე ტრიმესტრის შუა პერიოდში. ჰორმონების დონე სტაბილიზირდება. HCG კონცენტრაციის იკლებს, ყვითელი სხეული იშლება, პროგესტერონის გამოყოფას პლაცენტა მთლიანად თავის თავზე იღებს, რაც ორსულობის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. მეორე ტრიმესტრის განმავლობაში საშვილოსნო



▲ **სურათი 46.14 სათესლეების ჰორმონული კონტროლი.** გონადოტროპინის გამომყოფი ჰორმონი (GnRH) ჰიპოთალამუსიდან ასტიმულირებს წინა ჰიპოფიზის ორი გონადოტროპული ჰორმონის მალუტიინიზირებელი (LH) და ფოლიკულომასტიმულირებელი (FSH) ჰორმონების გამოყოფას. FSH სერტოლეს უჯრედებზე მოქმედებს, რომლებიც განვითარებად სპერმას კვებავს (იხ. სურათი 46.12). ლეიდიგის უჯრედებზე მოქმედებს. ისინი ანდროგენებს, ძირითადად, ტესტოსტერონს გამოყოფენ. ტესტოსტერონის ჰიპოთალამუსზე და წინა ჰიპოფიზზე უარყოფითი უკუკავშირის მოქმედება არის ძირითადი მექანიზმი, რომლის საშუალებითაც LH, FSH და GnRH-ის სისხლში დონის რეგულირება ხდება.

იზრდება ისე, რომ ორსულობა შესამჩნევი ხდება.

### მესამე ტრიმესტრი

ბოლო ტრიმესტრის განმავლობაში ნაყოფი 3-4 კგ წონისა და 50 სმ სიგრძის ხდება. ნაყოფის აქტივობა შეიძლება შემცირდეს, ვინაიდან ნაყოფი ავსებს ემბრიონული მემბრანების ხელმისაწვდომ სივრცეს. ნაყოფის ზრდა და საშვილოსნოს დაჭიმვა დედის მუცლის ორგანოებზე დაწოლას და ადგილის შეცვლას იწვევს. ამას კი ხშირი შარდვა, საჭმლის მონელების ბლოკირება და ზურგის კუნთების დაძაბულობა მოყვება. ლოკალური რეგულატორების (პროსტაგლანდინები) და ჰორმონების (ძირითადად, ესტროგენი და ოქსიტოცინი) კომპლექსური ურთიერთქმედება მშობიარობას იწვევს და არეგულირებს მას. **მშობიარობა** პროცესია, რომლის დროსაც ბავშვი ჩნდება. მშობიარობის გამშვები მექანიზმი მთლიანობაში ნათელი არ არის, მაგრამ **სურათი 46.18** ერთერთ მოდელს ასახავს.

ესტროგენი, რომელიც დედის სისხლში უმაღლეს დონეს ორსულობის ბოლო კვირებში აღწევს, საშვილოსნოში ოქსიტოცინის რეცეპტორების წარმოქმნას იწვევს. ოქსიტოცინი, რომელიც წარმოიქმნება ნაყოფის მიერ და დედის უკანა ჰიპოფიზში, საშვილოსნოს გლუვი კუნთების მძლავრ შეკუმშვებს ასტიმულირებს. ოქსიტოცინი ასევე ასტიმულირებს პლაცენტიდან პროსტაგლანდინების სეკრეციას, რაც, თავის მხრივ, შეკუმშვებს აძლიერებს. ხოლო, ფიზიკური და ემოციური სტრესი, რომელიც ასოცირებულია შეკუმშვებთან, მეტი ოქსიტოცინისა და პროსტაგლანდინების გამოყოფას ასტიმუ-

ლირებს, რაც მშობიარობის პროცესის დადებითი უკუკავშირის სისტემის მოქმედებას უდევს საფუძვლად.

დაბადება ანუ მშობიარობა საშვილოსნოს მძლავრი რიტმული შეკუმშვების სერიით მიმდინარეობს. მშობიარობის პროცესი სამ სტადიას შეიცავს (**სურათი 46.19**). პირველ სტადია მენჯის გახსნითა და შევიწროვებით იწყება, რაც სრული გახსნით მთავრდება. მეორე სტადია არის გამოძევება ან ბავშვისგან გათავისუფლება. მძლავრი შეკუმშვები ნაყოფის საშვილოსნოდან და საშოდან ქვემოთ და გარეთ უბიძგებს. ამ დროს ჭიპლარი იკვეთება და იკვანძება. მშობიარობის ბოლო სტადიაზე პლაცენტის გამოძევება ხდება, რომელიც ნორმალურ პირობებში ნაყოფს თან მოჰყვება.

**ლაქტაცია** პოსტნატალური ასპექტია, რომელიც ძუძუმწოვრებისთვისაა დამახასიათებელი. მშობიარობის შემდეგ პროგესტერონის შემცირებული დონე ათავისუფლებს წინა ჰიპოფიზს უარყოფითი უკუკავშირისგან და პროლაქტინის გამოყოფის შესაძლებლობას იძლევა. პროლაქტინი რძის პროდუქციას ასტიმულირებს 2-3 დღის შემდეგ. რძის გამოყოფას სარძევე ჯირკვლებიდან ოქსიტოცინი აკონტროლებს (**იხ. სურათი 45.7**).

### ღეღის იმუნური ცვლილებისა და ნაყოფის მიმატი

ორსულობა იმუნოლოგიური გამოცანაა. ემბრიონის გენების ნახევარი მამისგან არის. ამგვარად, ემბრიონის ზედა-

3 დანაწევრება (უჯრედების დაყოფა) იწყება კვერცხსავალში, როგორც კი ემბრიონი პერისტალტიკით და შოლტის მოძრაობით იწყებს სვლას საშვილოსნოს მიმართულებით.

2 განაყოფიერება განხორციელდა. სპერმა შედის ოვოციტში; ოვოციტის მეიოზი დასრულდა და კვერცხუჯრედისა და სპერმის ბირთვები შეერწყა და ზიგოტა წარმოიქმნა.

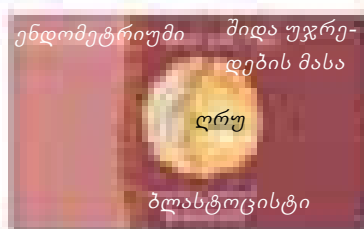
1 ოვულაცია გამოყოფს მეორად ოციტს, რომელიც გადადის კვერცხსავალში.



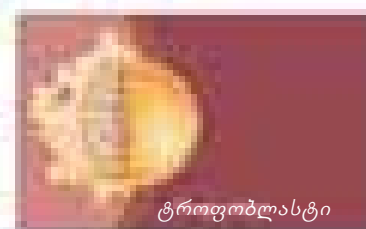
4 დანაწევრება გრძელდება. იმ დროისთვის, როცა ემბრიონი აღწევს საშვილოსნოს, ეს არის უჯრედების ბურთი. ის ცურავს საშვილოსნოში რამდენიმე დღის განმავლობაში, იკვებება ენდომეტრიუმის სეკრეტებით. ის ბლასტოციტად გადაიქცევა.

5 ბლასტოციტი ჩასახვიდან 7 დღეში ენდომეტრიუმში ინპლანტირდება.

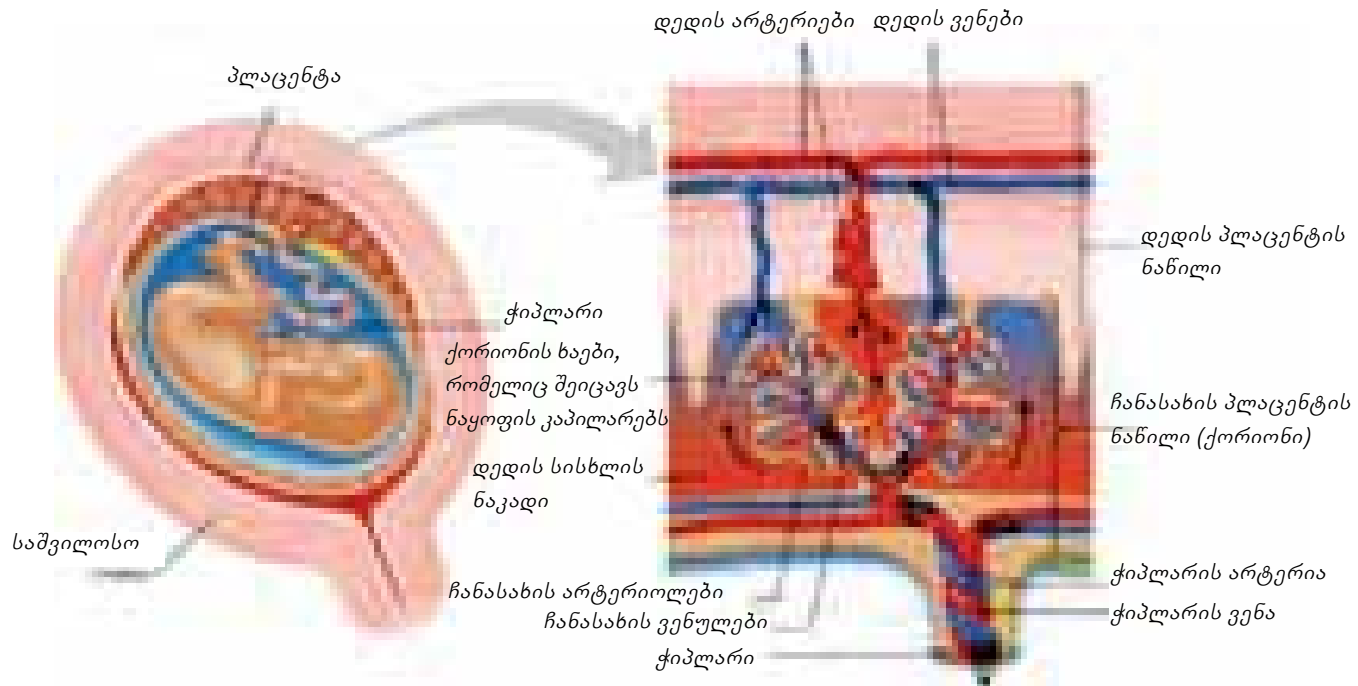
(ა) ოვულაციიდან — ჩანერგვამდე



(ბ) ბლასტოციტის ჩანერგვა.



▲ **სურათი 46.15** ზიგოტის წარმოქმნა და განაყოფიერების შემდგომი ადრეული პერიოდი. განაყოფიერებისა და დაყოფის შესახებ მეტს გაიგებთ 47-ე თავში.



▲ **სურათი 46.16 პლაცენტის ცირკულაცია.** განვითარების მეოთხე კვირიდან დაბადებამდე, პლაცენტა — დედისული და ემბრიონული ქსოვილების კომბინაცია — ნაყოფისა და დედის ორგანიზმებს შორის ახორციელებს საკვების ტრანსპორტს, აირთა ცვლას და ნარჩენების გამოყოფას. დედის სისხლი არტერიებით შედის პლაცენტაში, სისხლის

ნაკადით მიემართება ენდომეტრიუმისკენ და გამოედინება ვენებით. ემბრიონული ან ნაყოფის სისხლი, რომელიც სისხლძარღვებში რჩება შედის პლაცენტაში არტერიებით და გაივლის კაპილარულ ბადეს ქორიონის თითისმაგვარ ხაოებში, სადაც ხდება ჟანგბადისა და საკვების მოხმარება. როგორც ნახატზეა ნაჩვენები ნაყოფის (ან ემბრიონის)

კაპილარები და ხაოები უკავშირდება დედის პლაცენტის ნაწილს. ნაყოფის სისხლი ტოვებს პლაცენტას ვენების საშუალებით, რომლებიც მიემართებიან უკან, ნაყოფში. ნივთიერებები სახეს იცვლიან დიფუზიით, აქტიური ტრანსპორტით და შერჩევითი ადსორბციით ნაყოფის კაპილარულ ბადესა და დედის სისხლის ნაკადს შორის.

პირზე მრავალი ქიმიური მარკერია, რაც დედისთვის უცხოა. მაშ, რატომ არ გამოაძევენ დედის ორგანიზმი ემბრიონს, როგორც უცხო სხეულს, რასაც ის გააკეთებდა ანტიგენების პასუხად, სხვა ადამიანისგან რომელიმე ქსოვილის ან ორგანოს გადანერგვის შემთხვევაში? რეპროდუქციული იმუნოლოგები ამ გამოცანის გასარკვევად მუშაობენ.

ამ გამოცანის ძირითადი გასაღები შეიძლება იყოს ქსოვილი, რომელსაც ტროფობლასტი ეწოდება (იხ. **სურათი 46.15 და 47.18**). ბლასტოციტისაგან წარმოქმნილი გარეთა შრე, ტროფობლასტი იმპლანტაციით ჩაიზრდება ენდომეტრიუმში და მოგვიანებით პლაცენტის ნაყოფის ნაწილად ვითარდება (იხ. **სურათი 46.15 და 46.16**). როგორ ახერხებს ტროფობლასტი და შემდგომ პლაცენტა დაიცვას ემბრიონი გამოძევებისგან? განვიხილოთ რამდენიმე შესაძლებლობა.

ადრეული ორსულობის პერიოდში, ტროფობლასტი, როგორც ჩანს, დედის იმუნური სისტემის მოქმედებით ბლასტოციტის გამოძევების პრევენციას უზრუნველყოფს. ეს ხორციელდება ბლასტოციტის მიერ სასიგნალო მოლეკულების გამოყოფით, რაც იმუნური სისტემის მოქმედებას თრგუნავს. ამ მოლეკულებს მიეკუთვნება HCG, სხვადასხვა ცილოვანი ფაქტორი, პროსტაგლანდინი, სხვადასხვა ინტერლეიკინი და ინტერფერონი. რამდენიმე კვლევის საფუძველზე ვარაუდობენ, რომ ამ ნივთიერებათა გარკვეული კომბინაცია ხელს უშლის იმუნურ გამოძევებას, ვინაიდან მოქმედებს დედის T-ლიმფოციტებზე — იმუნური სისტემის მნიშვნელოვან

მონაწილეზე (იხ. 43-ე თავი).

განსხვავებული ჰიპოთეზა შემდეგში მდგომარეობს: ტროფობლასტი და შემდგომში პლაცენტა გამოყოფს ფერმენტს, რომელიც ტრიფტოფანის ლოკალურ მარაგს მკვეთრად ამცირებს. ტრიფტოფანი ამინომჟავაა, რომელიც T-ლიმფოციტების წარმოქმნისა და ფუნქციონირების აუცილებელია. ყოველ შემთხვევაში, თავველებში ეს ფერმენტი აუცილებელია მაკროფაგების შენარჩუნებისთვის.

კიდევ ერთი შესაძლებლობა იმაში მდგომარეობს, რომ არ არსებობს გარკვეული ჰისტოლოგიურად შეთავსებადი ანტიგენები პლაცენტის უჯრედებზე და მიმდინარეობს ჰორმონის გამოყოფა, რომელიც პლაცენტას უჯრედების მემბრანაზე „სიკვდილის აქტივატორის“ ცილის (FasL) სინთეზს უნდა იწვევდეს. აქტივირებულ T-ლიმფოციტებს კომპლემენტარული „სიკვდილის რეცეპტორები“ (Fas) აქვს. FasL-ის Fas-ზე დაკავშირება აპოპტოზით T-უჯრედების თვითდესტრუქციის მიზეზია.

## კონტრაცეფცია და აბორტი

**კონტრაცეფცია**, ორსულობის წინასწარგანზრახული პრევენცია, მრავალი გზით შეიძლება განხორციელდეს. ზოგიერთი კონტრაცეპტიული მეთოდი მომწიფებული კვერცხუჯრედისა (მეორადი ოვოციტის) და გონადებიდან სპერმის გამოყოფის პრევენციაში მდგომარეობს. სხვები



**(ა) 5 კვირის ნაყოფი.** კიდურების კვირტები, თვალეები, გული, ღვიძლი და ყველა სხვა ორგანოს რუდიმენტი იწყებს განვითარებას ემბრიონში, რომლის სიგრძე 1სმ-ია.



**(ბ) 14 კვირის ნაყოფი.** შთამომავალის ზრდა-განვითარება, რომელსაც ახლა ნაყოფი ეწოდება, გრძელდება მეორე ტრიმესტრის განმავლობაში. ეს ნაყოფი დაახლოებით 6 სმ სიგრძისაა.



**(გ) 20 კვირის ნაყოფი.** მეორე ტრიმესტრის ბოლოს (24 კვირა) ნაყოფი 30 სმ-მდე იზრდება.

▲ **სურათი 46.17 ადამიანის ჩანასახის განვითარება.**

განაყოფიერებას აფერხებენ, განაცალკევებენ რა კვერცხუჯრედსა და სპერმას. გარდა ამისა, ზოგიერთი მეთოდით ემბრიონის იმპლანტაციის პრევენციას აქვს ადგილი. აქ მოცემულ ინფორმაციას კონტრაცეპტიული მეთოდების შესახებ სახელმძღვანელოს პრეტენზია არ აქვს. უფრო სრული ინფორმაციის მიღება ექიმთან პირადი კონსულტაციით ან შესაბამისი ჯანმრთელობის ცენტრში მიმართვით არის შესაძლებელი.

განაყოფიერება შეიძლება თავიდან იქნას აცილებული სექსუალური კავშირისგან თავშეკავებით (აბსტინენციით) ან სხვადასხვა ბარიერის გამოყენებით, რომელიც კვერცხუჯრედს ცოცხალი სპერმის მოქმედებისგან დაიცავს. დროებითი თავშეკავება (აბსტინენცია), რომელსაც ხშირად შობადობის კონტროლის რიტმული მეთოდი ან ოჯახის ბუნებრივი დაგეგმვა ეწოდება, ემყარება ურთიერთკავშირისგან თავშეკავებას იმ პერიოდში, როდესაც ჩასახვა ყველაზე მეტად არის შესაძლებელი. ვინაიდან კვერცხუჯრედი კვერცხსავალში 24-48 საათი ჩერდება, ხოლო სპერმა 72 საათის განმავლობაში, წყვილმა, რომელიც დროებით თავშეკავების მეთოდს იყენებს, ოვულაციის წინ და შემდეგ რამდენიმე დღის განმავლობაში შეწყვილებას თავი უნდა მოარიდოს. ერთ-ერთი ეფექტური მეთოდი, რომლის მიხედვითაც შესაძლებელია ოვულაციის განსაზღვრა რამდენიმე ინდიკატორს შეიცავს: საშვილოსნოს ყელის ლორწოვანებისა და სხეულის ტემპერატურის განსაზღვრა მენსტრუაციული ციკლის განმავლობაში. ამგვარად, ოჯახის ბუნებრივი დაგეგმვა მოითხოვს წყვილისგან ამ ფიზიოლოგიური ნიშნების ცოდნას. დაორსულების კოეფიციენტი 10-20%-ია იმ წყვილებისთვის, ვინც ოჯახის ბუნებრივი დაგეგმვის მეთოდს მიმართავს (ორსულობის კოეფიციენტი გამომდინარეობს იმ დაორსულებული ქალების პროცენტულობისგან, რომლებიც ერთი წლის მანძილზე მიმართავდნენ ოჯახის ბუნებრივი დაგეგმვის მეთოდს). ზოგიერთი წყვილი ოჯახის დაგეგმვის ბუნებრივ მეთოდს, პირიქით, დაორ-

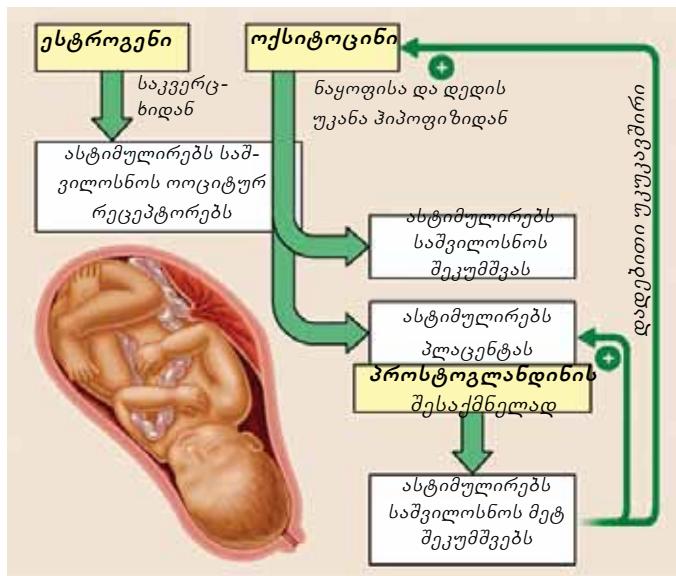
სულების შესაძლებლობის გაზრდის მიზნით იყენებს.

განაყოფიერების პრევენციის მიზნით, მიმართავენ კოიტუსის შეწყვეტასაც (ეაკულაციაზე პენისის ვაგინიდან გამოღება), რაც საკმარისად არაეფექტურია. სპერმა სეკრეტში შეიძლება არსებობდეს ეაკულაციაზე. ამის გარდა, დროში შეცდომა ან ნებისყოფის შესუსტებამ შეიძლება გვიანი აღკვეთის დროს ორსულობის პრევენცია ვერ მოახდინოს.

კონტრაცეპციის რამდენიმე **ბარიერული მეთოდი** სპერმისა და კვერცხუჯრედის შეხვედრას აბლოკირებს. ამ მეთოდების გამოყენებით დაორსულების კოეფიციენტი 10%- მდეა. **პრეზერვატივი** რომელიც მამაკაცების მიერ გამოიყენება, წარმოადგენს თხელ, ლატექსის რეზინის (კაუჩუკის წვენისგან დამზადებულ) ან ბუნებრივი მემბრანების შალითას, რომელშიც თავსდება პენისის თესლის მოსაგროვებლად. სექსუალურად აქტიური ინდივიდებისთვის ლატექსის ქონდომი არის ერთადერთი კონტრაცეპტიული მეთოდი, რომელიც მათ სქესობრივი გზით გადამდები დაავადებებისგან, შიდსის ჩათვლით იცავს (რა თქმა უნდა, ეს დაცვა აბსოლუტური არ არის).

ქალების მიერ უფრო ხშირად **დიაფრაგმა** გამოიყენება. ეს არის თალის ფორმის რეზინის ჯამი, რომელიც ვაგინის ზედა ნაწილში კავშირის წინ თავსდება. ორივე ეს მეთოდი უფრო ეფექტურია, თუ სპერმოციდულ (სპერმის მკვლელი) საცხთან ან გელთან ერთად გამოიყენება.

სექსუალური ურთიერთკავშირისგან სრული თავშეკავების გარდა, შობადობის კონტროლის ყველაზე ეფექტური მეთოდი გამეტების გამოყოფის პრევენციაა. სტერილიზაცია (განვიხილავთ მოგვიანებით) 100%-იანი ეფექტურობით გამოირჩევა. ქიმიურ კონტრაცეპტივებს, რომლებსაც ხშირად **შობადობის კონტროლის აბების** ფორმით იყენებენ, ორსულობის 1%-ზე ნაკლები კოეფიციენტით გამოირჩევა. შობადობის კონტროლის ყველაზე ხშირად გამოყენებული აბები სინთეზური ესტროგენისა და ასევე სინთეზური პროგესტინის (პროგესტერონის მსგავსი ჰორმონი) კომბინაციას შეიცავს.



▲ სურათი 46.18 მშობიარობის გამოწვევის მოდელი.

ეს კომბინაცია მოქმედებს, როგორც უარყოფითი უკუკავშირი და აჩერებს ჰიპოთალამუსიდან GnRH-ის გამოყოფას, რაც, თავის მხრივ, მოქმედებს ჰიპოფიზულ FSH-სა და LH-ზე. LH-ის გამოყოფის შეჩერება ოვულაციის პრევენციას იწვევს. როგორც უკუკავშირის მექანიზმი, FSH-ის სეკრეციის პრევენცია აბეჭდვით არსებული ესტროგენის მცირე დოზის მოქმედებით ფოლიკულების განვითარების შეჩერებას იწვევს. შობადობის კონტროლის აბები მაღალი დოზით შეიძლება გამოყენებულ იქნას დილით, როგორც დილის შემდგომი აბები (MAP). დაუცველი კავშირის 3 დღის განმავლობაში მათი მიღება 75%-იანი ეფექტურობით განაყოფიერებისა და იმპლანტაციისგან იცავს. შობადობის კონტროლის მეორე ტიპის აბები, რომლებსაც მინი აბები ეწოდება, მხოლოდ პროგესტინს შეიცავს. ისინი ისე ეფექტურად ვერ აბლოკირებს ოვულაციას, როგორც ჰორმონთა კომბინაციით შექმნილი კონტრაცეპტივი. მინი აბები განაყოფიერებისგან იცავს საშვილოსნოს ყელის ლორწოს გათხიერების გზით, რის გამოც, ბლოკირებულია სპერმის საშვილოსნოში შეღწევა. პროგესტინი ენდომეტრიუმის ცვლილებებსაც იწვევს, რის გამოც, განაყოფიერების შემთხვევაში იმპლანტაცია ფერხდება.

პროგესტინის ხანგრძლივი ადმისტრაცია შესაძლებელია (5 წლის განმავლობაში), თუ იგი გამოიყენება ასანთის ფორმის კაპსულის კანში იმპლანტაციის გზით, ან სამთვიანი მოქმედების ინექციით, ან აბების (მინი აბების) ფორმით.

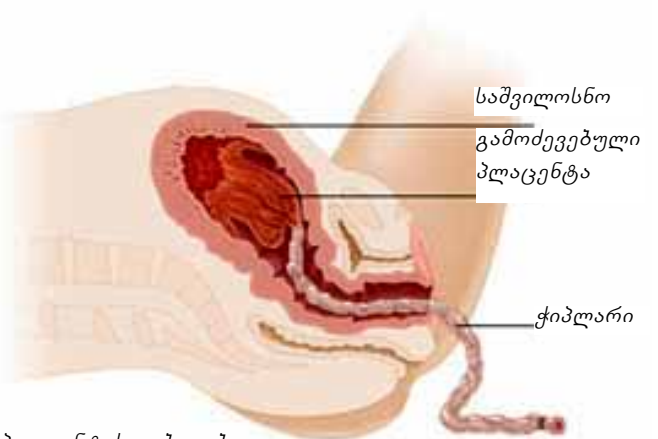
აქვს თუ არა ჰორმონულ კონტრაცეპტივებს ხანგრძლივი გვერდითი მოქმედება? ქალებისთვის, რომლებიც კომბინაციურ ვერსიას მიმართავენ, საშიშროება კარდიოვასკულურ დარღვევებში ვლინდება. შობადობის კონტროლის აბები ზრდის სისხლის შედედების მომატების რისკს, შეიძლება მოიმატოს სისხლის წნევამ, არის გულის შეტევებისა და ტვინში სისხლჩაქცევების საშიშროება. მოწვევა ქიმიური კონტრაცეპტივების მოხმარების დროს 10-ჯერ და მეტად ზრდის სიკვდილის რისკს. თუმცა, აბები კარდიოვასკულური დაავადებების რისკს ზრდის, ისინი დაორსულებას გამოიწვევს.



1. მენჯის გაფართოება



2. გამოძევება: ბავშვის დაბადება



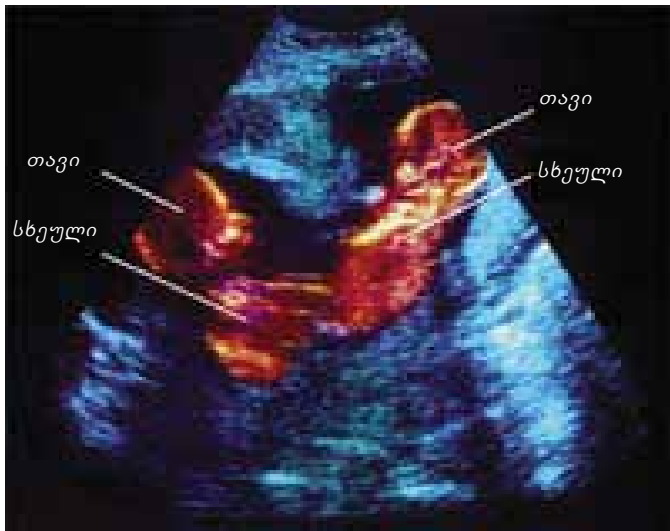
3. პლაცენტის დაბადება

▲ სურათი 46.19 მშობიარობის სამი სტადია.

ქალებში, რომლებიც იღებენ შობადობის კონტროლის აბებს, 1,5-ჯერ მეტია სიკვდილის რისკი, ვიდრე ორსულებში. ამავე დროს, აბები საკვერცხისა და ენდომეტრიუმის კიბოს და მკერდის კეთილთვისებიანი სიმსივნის რისკს ამცირებს.

ძნელად მისაღწევი მიზანი არის ქიმიური კონტრაცეპტიული საშუალებები მამაკაცებისათვის. ქიმიური ნაერთი,





▲ **სურათი 46.21** ულტრასონოგრაფიული გამოსახულება. ფერადი მაღალკონტრასტული გამოსახულება აჩვენებს ტყუპებს საშვილოსნოში. ეს სურათი მიღებულია კომპიუტერული სკრინინგით. ულტრაბგერითი სკანერის ორსულის მუცელზე მოძრაობისას ნაყოფიდან მაღალსიხშიროვანი ბგერა აირეკლება.

ძლება. მშობლები პირისპირ დგებიან ძნელი გადანწყვეტილების წინაშე – შეწყვიტონ ორსულობა, თუ შეინარჩუნონ ბავშვი, რომელსაც გამოხატული დეფექტებით სიცოცხლის მხოლოდ მცირე იმედი შეიძლება ჰქონდეს. ამ საკითხების შესახებ ინფორმაცია მზრუნველმა და კომპეტენტურმა სპეციალისტმა უნდა მისცეს.

რეპროდუქციული ტექნოლოგია ეხმარება იმ შემთხვევებში, თუ განაყოფიერების პრობლემებია. ჰორმონული თერაპია ზოგჯერ ზრდის სპერმისა და კვერცხუჯრედის წარმოქმნას, ხოლო ქირურგიული ჩარევით დახშული კვერცხსავალების კორექცია შესაძლებელია. მრავალი უშვილო წყვილი მიმართავს პროცედურას, რომელსაც დამხმარე რეპროდუქციული ტექნოლოგია (ART) ეწოდება. ამ პროცედურით ქირურგიულად ხდება კვერცხის ამოღება ქალის საკვერცხიდან, ჰორმონული სტიმულაციის შემდეგ კვერცხუჯრედს ანაყოფიერებენ, შემდეგ კვერცხუჯრედს ქალის სხეულში აბრუნებენ. გამოუყენებელ კვერცხუჯრედებს, სპერმას და ემბრიონსაც კი ყინავენ და შემდგომი ორსულობისთვის ინახავენ.

*In vitro* განაყოფიერებისას (IV) ყველაზე მისაღები ART პროცედურაა – ოვოციტები და სპერმა ერთმანეთს კულ-

ტურის ჭურჭელში ერევა და ინკუბირდება რამდენიმე დღის განმავლობაში, რათა განაყოფიერებულ კვერცხუჯრედებს განვითარების შესაძლებლობა მიეცეს. როდესაც ისინი ემბრიონებად ყალიბდებიან, თითოეული მათგანი 8 უჯრედად მაინც, ემბრიონი ფრთხილად თავსდება ქალის საშვილოსნოში და ეძლევა იმპლანტაციის საშუალება. ZIFT-ის დროს (ზიგოტის ინტრაფალოპური გადატანა) კვერცხუჯრედები ასევე *In vitro* ნაყოფიერდება, მაგრამ ზიგოტები მაშინვე თავსდება ქალის კვერცხსავალში (ფალოპის მილებში). GIFT-ის დროს (გამეტების ინტრაფალოპური ტრანსფერი) კვერცხუჯრედები *In vitro* არ ნაყოფიერდება. ამის ნაცვლად, კვერცხუჯრედები და სპერმა თავსდება ქალის კვერცხსავალში იმის იმედით, რომ იქ მოხდება განაყოფიერება. ყველა ამ პროცედურის დროს სპერმისა და კვერცხუჯრედის აღება დონორებისგანაა შესაძლებელი.

ეს ტექნიკა ამჟამად მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში გამოიყენება, მიუხედავად იმისა, რომ ამ პროცედურებში ათასობით დოლარი უნდა გადაიხადონ. სამაგიეროდ, შედეგად ათასობით ბავშვი ჩნდება. სადღეისოდ, ამ პროცედურების გამოყენებისას, შთამომავლობაში არანორმალურების პროცენტი დაბალია.

როგორც კი განაყოფიერება და იმპლანტაცია წარმატებით მოხდება, განვითარების პროგრამა ზიგოტას ბავშვად გარდაქმნის. ამ განვითარების მექანიზმების გარკვევას ადამიანსა და სხვა ცხოველებში ეძღვნება თავი 47.

## კონკლუზია ციხდი 46.5

1. აღწერეთ ემბრიონის მდგომარეობა ზუსტად მისი საშვილოსნოს კედელში ჩაზრდამდე.
2. რატომ მუშაობს HCG (ადამიანის ქორიონის გონადოტროპინი) ტესტირება ორსულობის ადრეული ვადების დასადგენად და არა უფრო გვიანი ორსულობისათვის? რა არის HCG-ის ფუნქცია ორსულობაში?
3. \_\_\_\_\_ არის მამაკაცისთვის როგორც მიღების გადაკვანძვა \_\_\_\_\_
4. ტერმინი, სინჯარის ბავშვის ტესტი, რატომ არის არასწორი *in vitro* განაყოფიერებით მიღებული პროდუქტის მიმართ?

## ბიბლიური კანონების შიგთავსი

### კანონი 46.1

#### თავის სახის გამაჯობა – სიყვარული და უსიყვარულო, ცხოველთა სამყაროში გვხვდება

- ▶ უსიყვარულო გამაჯობების დროს მიღებულ შთამომავლობაში მხოლოდ ერთი მშობლის გენები ხვდება. სქესობრივი გამაჯობება მოითხოვს მდედრობითი და მამრობითი გამაჯობების შერწყმას, რის ხარჯზეც დიპლოიდური ზიგოტა წარმოიქმნება.
- ▶ უსიყვარულო გამაჯობების მექანიზმი. გაყოფა, დაკვირვება და ფრაგმენტაცია რეგენერაციით მრავალ უხერხემლოში უსიყვარულო გამაჯობების მექანიზმებია.
- ▶ რეპროდუქციული ციკლები და პატერნები. ცხოველები შეიძლება გამაჯობდნენ მხოლოდ სქესობრივი ან მხოლოდ უსიყვარულო გზით, ან ალტერნატიულად ამ ორ გზას შორის. გამაჯობების ამ საშუალებას შორის ვარიაციები პარტენოგენეზის, ჰერმაფროდიტიზმის და ნაწილობრივი ჰერმაფროდიტიზმით მიმდინარეობს. რეპროდუქციული ციკლების კონტროლი ჰორმონებითა და გარემოს სიგნალებით ხორციელდება.

### კანონი 46.2

#### განაცხადი იმ მიმართულებით, რომელიც სპერმის იგივე სახელის კვანძოვითაა შეხვედრაში ეხმარება

- ▶ გარეგანი განაყოფიერების დროს, მდედრის მიერ დადებული კვერცხი გარემოში არსებული სპერმით ნაყოფიერდება. შინაგანი განაყოფიერების დროს კვერცხი და სპერმა მდედრის სხეულშია მოთავსებული. ნებისმიერ შემთხვევაში, განაყოფიერება საჭიროებს კრიტიკულ დროს, რომელიც ხშირად განპირობებულია გარემოს ცვლილებებით, ფერომონებით და/ან შესაწყვილებელი ქცევით. ყველა შემთხვევაში შინაგანი განაყოფიერებას მამრსა და მდედრს შორის მნიშვნელოვანი ქცევითი ურთიერთობის განხორციელება და შესაბამისი კომპლატორული ორგანოები ესაჭიროება.
- ▶ შთამომავლობაზე ზრუნვის უზრუნველყოფა. შინაგანი განაყოფიერების შედეგად მიღებულ შედარებით მცირერიცხოვან შთამომავლობას თან სდევს ემბრიონების დაცვისა და მშობლიური მზრუნველობის გაძლიერება.

- ▶ გამეტების წარმოქმნა და გამოყოფა. რეპროდუქციული სისტემა სხეულის დრუში არსებული გამეტების წარმოქმნელი არადიფერენცირებულ უჯრედებითაა წარმოადგენილი. ისინი წარმოქმნიან მდედრობითი და მამრობითი გონადების კომპლექსურ ერთობლიობას თანამდევ მილაკებითა და ჯირკვლებით, რომლებიც ატარებენ და იცავენ გამეტებს და ემბრიონის განვითარებას უზრუნველყოფენ.

### კანონი 46.3

#### ბიბლიური კანონი იმ მიმართულებით, რომელიც განაწესებს და მათ ციხისპირა ახორციელებს: ადამიანზე ფიქსირება

- ▶ მდედრობითი რეპროდუქციული ანატომია. გარეგანი მდედრობითი სასქესო ორგანოებს მიეკუთვნება სასირცხო ბაგე (ვულვა), რომელიც შეიცავს კარიბჭეს (საშოსა და საშარდე ბუშტის ცალ-ცალკე გამოსავლით), მცირე და დიდ ბაგეს და კლიტორს. შინაგანი ორგანოებია: ვაგინა (საშო), რომელიც საშვილოსნოს უკავშირდება და, რომელიც თავის მხრივ 2 კვერცხსავალთანაა დაკავშირებული. ორი საკვერცხე (მდედრობითი გონადები) განვითარებადი კვერცხუჯრედების (ოვოციტების) ფოლიკულებითაა შევსებული. ოვულაციის შემდეგ ფოლიკულების ნარჩენები ყვითელ სხეულს ქმნიან. ეს წარმონაქმნი სხვადასხვა ხანგრძლივობის მოქმედების ჰორმონებს გამოყოფს, რომლებზეც დამოკიდებულია ორსულობის განვითარება, თუ მისი შეწყვეტა. მიუხედავად იმისა, რომ სარძევე ჯირკვლები ან მკერდი განცალკევებულია რეპროდუქციული სისტემისგან, ისინი მშობლიური ზრუნვისთვისაა მონაწილეები.
- ▶ მამრობითი რეპროდუქციული ანატომია. მამრობითი რეპროდუქციული სისტემის გარეგანი ორგანოებია სათესლე პარკი და პენისი. მამრობითი გონადები – სათესლეები, სათესლე პარკის უშუალო გარემოში არიან განლაგებული. მათ ჰორმონების წარმოქმნელი უჯრედები და სპერმის წარმოქმნელი თესლის გამომტანი მილაკები აქვთ, რომლებიც ეპიდიდისისკენ გამომტანი მილაკისგან (vas deferens), ეაკულაციური მილისკენ და ურეტრისკენ (შარდის გამომყოფი არხი) მიემართება. უკანასკნელი პენისის თავში იხსნება.
- ▶ სქესუალური რეაქცია ადამიანში. როგორც მამაკაცი, ასევე ქალი განიცდის სხეულის გარკვეული ქსოვილების ერექციას, სისხლძარღვების სისხლით გადავსებისა და მიოტონიის გამო, კულმინაციით ორგანიზმის დროს.

## კონცეფცია 46.4

### ადამიანსა და სხვა ბუბუმწოვრებში ჰორმონების კომპლექსური ურთიერთქმედება გამეცოგენჯს აბგულისებს

- ▶ ოვოგენეზი არის მდედრობითი გამეტოგენეზი – გამეტების წარმოქმნა, ხოლო სპერმატოგენეზი მამრობითი გამეტების წარმოქმნა. სპერმა განუწყვეტლივ წარმოიქმნება, მაშინ, როდესაც კვერცხუჯრედის მომწიფება წყვეტილი და ციკლურია. მეიოზი ორივე პროცესისთვის ძირითადია, მაგრამ ოვოგენეზის დროს ციტოკინეზი ერთგვაროვანი არ არის და მხოლოდ ერთი დიდი ზომის კვერცხი წარმოიქმნება. სპერმატოგენეზში, თითოეული სანჯისი უჯრედი 4 სპერმად გადაიქცევა.
- ▶ მდედრობითი რეპროდუქციული ციკლი მდედრობითი ჰორმონები გამოიყოფა რიტმულად და მენსტრუალურ ან ესტრალურ ციკლში აისახება. ორივე ციკლის მიმდინარეობისას ენდომეტრიუმი თხელდება და შესაძლებელი იმპლანტაციისთვის ემზადება. მენსტრუალური ციკლი, თუმცა მოიცავს ენდომეტრიულ სისხლდენას, მაგრამ ესტრალური ციკლისგან განსხვავებით, ამ დროს ცხელება არ აღინიშნება. მდედრობითი რეპროდუქციული ციკლი მიმდინარეობს ჰიპოთალამუსიდან GnRH-ის და წინა ჰიპოფიზიდან FSH-ისა და LH-ის გამოყოფის თანხლებით. FSH და LH საკვერცხეში კომპლექსურ ცვლილებებს იწვევს და ესტროგენისა და პროგესტერონის გზით საშვილოსნოზე მოქმედებს. განვითარებული ფოლიკულა ესტროგენს გამოყოფს, ხოლო ყვითელი სხეული პროგესტერონსა და ესტროგენებს. დადებითი და უარყოფითი უკუკავშირი არეგულირებს ამ 5 ჰორმონის დონეს, ხოლო ისინი ციკლის კოორდინაციას უზრუნველყოფენ.
- ▶ ჰორმონული კონტროლი მამრობით რეპროდუქციულ სისტემაზე. სათესლის ანდროგენები (ძირითადად ტესტოსტერონი) იწვევს პირველადი და მეორადი მამრობითი სასქესო ნიშნების განვითარებას. ანდროგენის სეკრეცია და სპერმის პროდუქცია ჰიპოთალამუსისა და ჰიპოფიზის ჰორმონების კონტროლით ხორციელდება.

## კონცეფცია 46.5

### ადამიანებში და სხვა პლაცენტიან ბუბუმწოვრებში ემბრიონი ახალშობილად დედის საშვილოსნოში იზრდება

- ▶ ჩასახვა, ემბრიონის განვითარება და დაბადება. კვერცხის განაყოფიერებისა და კვერცხსავალი მეიოზის დასრულების შემდეგ, ზიგოტა, ენდომეტრიუმში ჩაზრდამდე, განიცდის დაყოფას და ბლასტოციტად ვითარდება. ადამიანის ორსულობა 3 ტრიმესტრად შეიძლება დაიყოს.

ყველა ძირითადი ორგანოს განვითარება დაახლოებით 8 კვირიდან იწყება. დაბადება, ანუ მშობიარობა საშვილოსნოს მძლავრი რიტმული შეკუმშვების შედეგია. დადებითი უკუკავშირი, შეიცავს პროსტაგლანდინებს და ჰორმონებს, ესტროგენსა და ოქსიტოცინს, რომლებიც მშობიარობას არეგულირებს.

- ▶ დედის იმუნური ტოლერანტობა ემბრიონისა და ნაყოფის მიმართ. ორსული ქალის მიერ მისი „უცხო“ ნაშვილის შეთავსება ჯერ კიდევ გაუგებარია, მაგრამ სავარაუდოდ ეს საშვილოსნოში იმუნური პასუხის დათრგუნვასთან უნდა იყოს დაკავშირებული.
- ▶ კონტრაცეპცია და აბორტი. ჩასახვის სანინალმდეგო მეთოდები გონადებიდან მომწიფებული გამეტების, განაყოფიერების ან ემბრიონის იმპლანტაციის პრევენციისკენ არის მიმართული.
- ▶ თანამედროვე რეპროდუქციული ტექნოლოგიები. დაბადებამდე პრობლემების აღმოჩენასთან ერთად, თანამედროვე ტექნოლოგიები უშვილო წყვილებს ინ ვიტრო განაყოფიერების გზით ეხმარებიან.

## შეამწმეთ საკუთარი ცოდნა

### თვითშეფასება

1. ჩამოთვლილიდან, რომელი ახასიათებს პარტენოგენეზს?
  - ა. ინდივიდს სიცოცხლის მანძილზე სქესის შეცვლა შეუძლია.
  - ბ. უჯრედების სპეციალიზებული ჯგუფი ახალ ინდივიდად ჩამოყალიბდება.
  - გ. ორგანიზმი ჯერ მამრია, ხოლო შემდეგ მდედრი.
  - დ. კვერცხი განაყოფიერების გარეშე ვითარდება.
  - ე. ორივე მშობელს მდედრობითი და მამრობითი რეპროდუქციული ორგანო აქვს.
2. რომელი სტრუქტურა არ შეესაბამება ფუნქციას
  - ა. გონადები – წარმოქმნიან გამეტებს;
  - ბ. სპერმატოცე – სპერმის „სანჯობი“ მამრ ფუტკრებში;
  - გ. კლოაკა – რეპროდუქციულ, გამოყოფისა და საჭმლის მომნელებელ სისტემებს გაღებით ემსახურება;
  - დ. ბაკულუმი – ზოგიერთი ძუძუმწოვრის პენისის საყრდენი;
  - ე. ენდომეტრიუმი – პლაცენტის დედისეულ ნაწილს ქმნის.
3. ჩამოთვლილი მდედრობითი და მამრობითი სტრუქტურებიდან, რომელს აქვს თითქმის ერთნაირი ფუნქცია?
  - ა. თესლის გამომტანი მილაკები – ვაგინა;
  - ბ. სერტოლის უჯრედები – ფოლიკულის უჯრედები;
  - გ. სპერმატოგონია – ოოგონია;
  - დ. სათესლეები – საკვერცხეები;
  - ე. vas deferens – კვერცხსავალი.

4. ესტრალურ და მენსტრუალურ ციკლებს შორის განსხვავება შემდეგია:
  - ა. არაძუძუმწოვარ ხერხემლიანებს ესტრუსული ციკლები აქვთ, მაშინ, როდესაც ძუძუმწოვრები მენსტრუალური ციკლით ხასიათდებიან;
  - ბ. ენდომეტრიუმის გარსი შრევდება მენსტრუალურ ციკლში, ხოლო ესტრალურში რეაბსორბციას განიცადის;
  - გ. ესტრალური ციკლი უფრო ხშირად გვხვდება, ვიდრე მენსტრუალური;
  - დ. ესტრალური ციკლი ჰორმონების კონტროლს არ ექვემდებარება;
  - ე. ესტრალურ ციკლში ოვულაცია ენდომეტრიუმის გათხელებაზე მიმდინარეობს.
5. LH-ისა და FSH-ის წარმოქმნის პიკებს ადგილი აქვს:
  - ა. მენსტრუალური (საშვილოსნოს) ციკლის სისხლდენის ფაზაში;
  - ბ. საკვერცხის ციკლის ფოლიკულური ფაზის დასაწყისში;
  - გ. ზუსტად ოვულაციის წინა პერიოდში;
  - დ. საკვერცხის ციკლის ლუთეინური ფაზის დასასრულს;
  - ე. მენსტრუალური ციკლის სეკრეტორულ ფაზაში.
6. თანამიმდევრული ჰერმაფროდიტიზმის დროს:
  - ა. ზოგიერთ ინდივიდს შეუძლია მამრიდან მდედრად გადაქცევა;
  - ბ. ინდივიდები ერთმანეთს ანაყოფიერებენ;
  - გ. მამრები მდედრებზე ნაკლებ ფერომონებს გამოყოფენ;
  - დ. წარმოიქმნება დიპლოიდური კვერცხი;
  - ე. ზრდასრული გონადები არადიფერენცირებულია.
7. ქალის ორსულობის განმავლობაში რუდიმენტული ორგანოები ვითარდება:
  - ა. პირველ ტრიმესტრში;
  - ბ. მეორე ტრიმესტრში;
  - გ. მესამე ტრიმესტრში;
  - დ. მაშინ, როდესაც ემბრიონი კვერცხსავალშია;
  - ე. ბლასტოციტის სტადიის განმავლობაში.
8. რომელი ფარმაკოლოგიური სტრატეგიაა შედეგიანი მამაკაცის წარმატებულ კონტრაცეპტივებს შორის?
  - ა. ფუნქციურად ნორმალური სპერმის წარმოქმნის პრევენცია;
  - ბ. ანდროგენების მაღალი ცირკულაციური კონცენტრაციის შენარჩუნება;
  - გ. ლეიდიგის უჯრედების ტესტოსტერონის რეცეპტორების ბლოკირება;
  - დ. ანდროგენების რეცეპტორების ბლოკირება ჰიპოთალამუსში;
  - ე. FSH-ის მაღალი ცირკულაციური კონცენტრაციის შენარჩუნება.
9. ადამიანის კვერცხუჯრედის განაყოფიერება ძირითადად ხდება
  - ა. ვაგინაში;
  - ბ. საკვერცხეში;
  - გ. საშვილოსნოში;
  - დ. კვერცხსავალში;
  - ე. vas deferens;

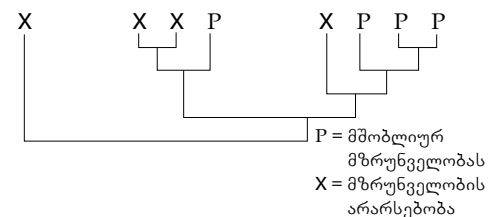
10. ძუძუმწოვარ მამრებში გამომყოფი და რეპროდუქციული სისტემები შეიცავს:
  - ა. სათესლეებს;
  - ბ. ურეტრას (შარდის გამომყოფ მილს);
  - გ. შარდსანვეთს;
  - დ. vas deferens;
  - ე. პროსტატას (წინამდებარე ჯირკვალს).

## უძლუცითი კაჟიტი

ცხოველებში ჰერმაფროდიტიზმი ხშირად არის იმ სახეობებში, რომლებიც ფიქსირებულ გარემოში სახლობენ. მოძრავ სახეობებში ნაკლები სიხშირით გვხვდება ჰერმაფროდიტიზმი, რატომ?

## მეცნიერული კვლევა

ცხოველების გარკვეულ ჯგუფში მშობლიური ზრუნვის ევოლუცია გამოსახულების შესწავლით წარმოიდგინეთ. თქვენ აღნიშნავთ ზრუნვის ქცევის განაწილებას ქვემოთ ნაჩვენებ ფილოგენეზურ რუკაზე (იხ. 25-ე თავი). რა არის უმარტივესი ინტერპრეტაცია იმის თაობაზე, როგორ მოხდა ამ ქცევის განვითარება? თუ მშობლიური მზრუნველობა ჯგუფის გარეშე წარმოიქმნება, როგორ ინტერპრეტაციას მისცემთ ცვლილებას?



## მეცნიერება, ტექნოლოგია და საზოგადოება

სპერმის შერჩევის ტექნიკის და *in vitro* განაყოფიერებასთან კომბინირებით შესაძლებელია ბავშვის სქესის შესაძლო არჩევანი. რა პოტენციური პრობლემები შეიძლება წარმოდგეს, თუ ეს პროცედურა ფართოდ ხელმისაწვდომი იქნება?

# 47

## ცხოველთა განვითარება



▲ სურათი 47.1 ადამიანის ჩანასახი ჩასახვიდან 6-8 კვირაში.

### ბიტიტადი კონცეფციები

- 47.1** განაყოფიერების შემდეგ ემბრიონული განვითარება მიმდინარეობს დაყოფის, გასტრულაციისა და ორგანოგენეზის გზით
- 47.2** ცხოველებში მორფოგენები მოიცავს უჯრედების ფორმის, მდებარეობისა და აღქმის სპეციფიკურ ცვლილებებს
- 47.3** უჯრედების განვითარების გზა დამოკიდებულია მათ ისტორიაზე და ინდუქციურ სიგნალებზე

### შესავალი

### ცხოველების განვითარების გეგმა

ბნელი იმის წარმოდგენა, რომ თითოეული ჩვენთაგანი სიცოცხლეს ერთი უჯრედიდან იწყებს, რომლის ზომა დაახლოებით წინადადების ბოლოს დასმული წერტილის ხელაა. სურ. 47.1-ზე ნაჩვენებია ადამიანის ემბრიონი ჩანასახიდან 6-8 კვირის ასაკში, ტვინი ვითარდება თავში (მარცხნივ ზემოთ), ხოლო განვითარებადი გული (წითელი ლაქა ცენტრში) უკვე იწყებს პულსირებას. 9 თვემდე საჭირო, რათა ერთუჯრედიანი ზიგოტა ანუ განაყოფიერებული კვერცხუჯრედი ახალშობილ ადამიანად ჩამოყალიბდეს, რომელიც ტრილიონობით დიფერენცირებული უჯრედებისაგანაა აგებული, და ეს უჯრედები ქსოვილებად და ორგანოებად არიან ორგანიზებული.

კითხვა - როგორ გადაიტევს ზიგოტა ცხოველად, საუკუნეების მანძილზე არსებობს. მე-18 საუკუნემდე პრეფორმაცია რჩებოდა წამყვან მოსაზრებად, რომლის თანახმად კვერცხი ან სპერმა სახეშეცვლილ მინიატურულ ინფანტს ან „ჰომუნკულუსს“ შეიცავდა, რომელიც განვითარების დროს უფრო დიდი ხდებოდა (სურ. 47.2). განვითარების განსხვავებული ახსნა იყო ეპიგენეზი, და ეს ახსნა 2000 წლით ადრე არისტოტელეს მიერ იყო წამოყენებული. ეპიგენეზის თანახმად ცხოველის ფორმის მიღება საწყისი უფორმო კვერცხიდან თანდათანობით ხდებოდა. მიკროსკოპის გამოყენებით მე-19 საუკუნეში ბიოლოგებმა შესძლეს, დაენახათ ემბრი-

ოგენეზის მიმდინარეობა პროგრესირებადი ნაბიჯების სახით და პრეფორმაცია ეპიგენეზისმა შეცვალა, როგორც უფრო მისაღები თეორია ემბრიოლოგებისთვის. მიუხედავად ამისა, პრეფორმაციის კონცეფციას აქვს დადებითი მხარეები: თუმცა, ემბრიონები თანდათანობით ვითარდებიან, ორგანიზმის განვითარების გეგმა უკვე კვერცხში უნდა იყოს მოთავსებული

ორგანიზმების განვითარება დამოკიდებულია მათი ზიგოტის გენომზე და აგრეთვე იმ განსხვავებებზე, რაც ადრეულ ემბრიონულ უჯრედში წარმოიქმნება. ეს განსხვავებები, თავის მხრივ, სხვადასხვა უჯრედების განსხვავებული გენების ექსპრესიით არის განპირობებული. ზოგიერთ სახეობაში ადრეული ემბრიონული უჯრედები თავიდანვე განსხვავებულია, დედის კვერცხუჯრედში არსებული სუბსტანციების არაჰომოგენურ გადანაწილების გამო, რომელთაც ციტოპლაზმური დეტერმინანტები ეწოდება. ეს ნივთიერებები იმ უჯრედების განვითარებაზე მოქმედებენ, რომლებიც მეშვიდედროებით იღებენ მათ ზიგოტის დაყოფის ადრეულ სტადიებზე (იხ. სურ. 21. 11ა). სხვა სახეობებში უჯრედების საწყისი განსხვავება დამოკიდებულია აღნიშნული დეტერმინანტების სხვადასხვა მდებარეობაზე ემბრიონულ უჯრედებში. სახეობათა უმეტესობაში ამ ორი მექანიზმის კომბინაცია ადრეული, ემბრიონული უჯრედების განსხვავებას განაპირობებს.

მაშინ როდესაც უჯრედები დაყოფას აგრძელებენ და ემბრიონი განვითარებას განაგრძობს, მექანიზმები რომლებიც აკონტროლებენ სელექციურ გენურ ექსპრესიას უჯრედების დიფერენციაციას იწვევენ. ამის შედეგად უჯრედების სტრუქტურული და ფუნქციური სპეციალიზაცია ყალიბდება. კომუნიკაცია რომელიც ატყობინებს რა და როდის გააუქონონ ხდება სიგნალების გაცვლით ემბრიონულ უჯრედებს შორის. განვითარება უჯრედების დაყოფასა და დიფერენციაციასთან ერთად შეიცავს მორფოგენებსაც – პროცესს, რომლის საშუალებითაც ცხოველთა ფორმირება ხდება და დიფერენცირებული უჯრედები თავის შესაბამის ადგილს იკავებენ.

მოლეკულური გენეტიკისა და ემბრი-



▲ სურათი 47.2 ადამიანის სპერმის თავში მოთავსებული „ჰომონკულუსი“. გრავიურა გაკეთებულია 1694 წ.

ოლოგიის კლასიკური მიდგომების კომბინაციით, განვითარების საკითხებზე მომუშავე ბიოლოგებს უკვე ეძლევათ შესაძლებლობა, უპასუხონ მრავალ კითხვას იმის თაობაზე, თუ როგორ აძლევს დასაბამს განაყოფიერებული კვერცხუჯრედი ცალკეულ ცხოველს. ამ თავში ჩვენ ძირითადად განვიხილავთ ორგანიზმებს, როგორცაა ზღვის ზღარბი, ბაყაყები და წიწილები, რომლებიც კლასიკური ემბრიოლოგიის კვლევის საგანს წარმოადგენენ. თუმცა ამ ცხოველების განვითარების დაკვირვება ლაბორატორულ პირობებში ადვილია, მათი გენეტიკური შესწავლა 21-ე თავში აღწერილი ცხოველების კვლევაზე უფრო ძნელია. თუმცა, მოლეკულური ტექნიკის განვითარებამ ამჟამად შესაძლებელი გახადა განვითარების მოლეკულური მექანიზმების შესწავლა სხვადასხვა სახეობის ცხოველებში.

კლასიკური დაკვირვების ცხოველებთან ერთად, ჩვენი საკუთარისაზე განვითარების პროცესი ძალიან საინტერესოა და ამავე თავში განიხილება. ეთიკური მოთხოვნების შესაბამისად, ადამიანის ემბრიონების კვლევა მიუღებელია და ჩვენი ცოდნა ნაწილობრივ სხვა ძუძუმწოვრების, კერძოდ, თაგვებზე ჩატარებულ კვლევებზე და ნაწილობრივ ადამიანის *in vitro* განაყოფიერების შედეგად ჩასახული ემბრიონის განვითარების ადრეულ სტადიებზე დაკვირვებით მიღებულ მონაცემებზეა დაფუძნებული.

ჩვენ დავიწყებთ ემბრიონული განვითარების ძირითადი სტადიების აღწერით, რაც ცხოველების უმეტესობისთვისაა დამახასიათებელი. შემდეგ, განვიხილავთ იმ უჯრედულ და მოლეკულურ მექანიზმებს, რომელთა შედეგადაც ყალიბდება სხეული. ბოლოს ყურადღებას გავამახვილებთ იმ პროცესებზე, რომელთა საშუალებითაც უჯრედები განიცდის დიფერენციაციას, რაც საბოლოო ჯამში მათ საშუალებას აძლევს შეასრულონ თავისი როლი ცხოველის სხვადასხვა აქტივობაში.

## კონცეფცია **47.1**

## განაცოფიერების შემდეგ ემბრიონული განვითარების პრტცესი მიმდინარეობს დაცოფის, გასტრულაციისა და ორგანოგენეზის გზით

მნიშვნელოვანი მოვლენებს განვითარებისათვის ადგილი აქვს განაყოფიერებისას და მომყოლი სამი განვითარების სტადიისას მიმდინარე პროცესები. ზიგოტიდან, პირველი სტადიის დროს, რომელსაც დანაწევრება ეწოდება, უჯრედები ისე გადანაწილდება, რომ იქმნება ღრუიანი სფერო, რომლის ზედაპირი უჯრედების ერთი შრისგან შედგება - ბლასტულა. მეორე სტადიაზე - გასტრულაციის დროს წარმოიქმნება სამშრიათი ემბრიონი - გასტრულა. მესამე სტადიის - ორგანოგენეზის დროს წარმოიქმნება რუდიმენტული ორგანოები, რომელთაგან ზრდასრული ორგანიზმის სტრუქტურები ვითარდება.

ჩვენს განხილვაში ყურადღებას გავამახვილებთ მხოლოდ რამდენიმე სახეობაზე, რომლებიც აღნიშნული პროცესების შესასწავლად მოდელებად გამოიყენება. მკვლევრები რაც უფრო მეტ სა-

ხეობების განვითარებას სწავლობენ, აღმოაჩენენ განსხვავებებს, თუმცა მრავალ მსგავსებასაც პოულობენ. განვითარების ყოველი სტადიის განხილვისას ჩვენ ჯერ იმ სახეობებს შევხებით, რომელთა შესახებ მეტია ცნობილი და შემდეგ შევადარებთ იგივე პროცესებს სხვა სახეობებში. დავიწყებთ სპერმით კვერცხუჯრედის განაყოფიერების პროცესის განხილვით.

## განაცოფიერება

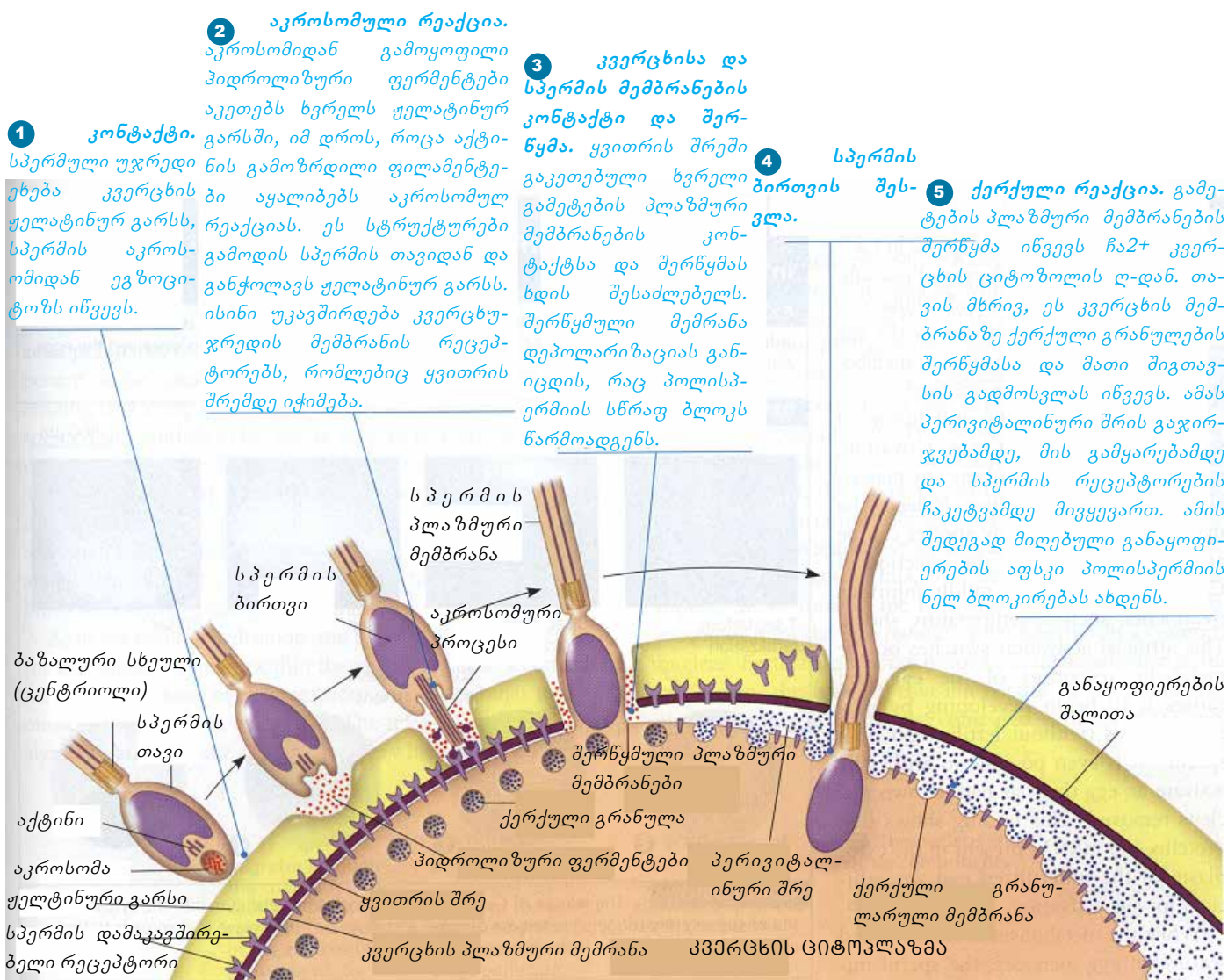
სპერმა და კვერცხი (გამეტები), რომლებიც ერთიანდებიან განაყოფიერებისას, წარმოადგენენ მაღალსპეციალიზირებულ უჯრედებს რომელთაც ყალიბდებიან რთული განვითარების პროცესის შედეგად მშობლების სათესლესა და საკვერცხეში (**იხ. სურ. 46.11 და 46.12**). განაყოფიერების ძირითად არსს წარმოადგენს ორი უჯრედის ჰაპლოიდური რაოდენობის ქრომოსომების დაწყვილება ერთ დიპლოიდურ უჯრედად. მეორე, მნიშვნელოვანი ფუნქცია კვერცხის აქტივაციაა: სპერმასთან კონტაქტის დროს კვერცხის ზედაპირზე მიმდინარე მეტაბოლური რეაქციები ემბრიონულ განვითარებას აძლევს საწყისს.

განაყოფიერება ძირითადად ზღვის ზღარბებშია შესწავლილი. მათი გამეტების კომბინირება ზღვის წყალში ადვილად მისაღწევია ლაბორატორულ პირობებში და შემდგომ მოვლენებზე დაკვირვებაც ადვილია. მიუხედავად იმისა, რომ ზღვის ზღარბები ხერხემლიანებსა და ქორდიანებსაც კი არ მიეკუთვნებიან, ისინი ამ ცხოველებს მეორადპირიანობის მახასიათებლებით ემსგავსებიან (**იხ. სურ. 32.9**). დეტალების გამორიცხვით, ზღვის ზღარბის განაყოფიერება და ადრეული განვითარება კარგ, ზოგად მოდელს წარმოადგენს აღნიშნული პროცესების შესასწავლად ხერხემლიანებში.

## აკროსომული რეაქციები

ზღვის ზღარბს გარეგანი განაყოფიერება ახასიათებს. ეს პროცესი მიმდინარეობს მაშინვე, როგორც კი მათი გამეტები ზღვის წყლის გარემოში ხვდება. ჟელატინური გარსი, რომელიც კვერცხს გარედან ფარავს, ხსნადი მოლეკულების წყაროს წარმოადგენს. ისინი ზღვის წყალში კვერცხის მიმართულებით მოცურავე სპერმატოზოიდებს იზიდავს. როგორც კი ზღვის ზღარბის სპერმული უჯრედის თავი ეხება კვერცხის ჟელატინურ გარსს, მასში არსებული მოლეკულები აკროსომულ რეაქციას ჩართავენ (**სურ. 47.3**). ეს პროცესი იწყება მაშინვე, როგორც კი სპერმის წვერზე არსებული ვეზიკულა - აკროსომა ჰიდროლიზურ ფერმენტებს გამოყოფს. ეს ფერმენტები მოინელებენ ჟელატინურ გარსს, რაც საშუალებას აძლევს სპერმატოზოიდის წაგრძელებულ სტრუქტურას, აკროსომულ მორჩს, შეაღწიოს ჟელატინურ გარსში. აკროსომული მორჩის წვერის ცილოვანი მოლეკულები კვერცხის წადაპირზე არსებულ სპეციფიკურ რეცეპტორებს ეწებება. ზღვის ზღარბის, ისევე, როგორც სხვა ცხოველების კვერცხი "კლიტე-გასადების" შეცნობის პრინციპით მხოლოდ იგივე სახეობის სპერმით ნაყოფიერდება. ამგვარი სახეობრივი სპეციალიზაცია ძალიან მნიშვნელოვანია წყლის გარემოში, სადაც სხვა სახეობის გამეტებიც არსებობენ.

აკროსომის წვერის შეხება კვერცხის მემბრანაზე სპერმისა და კვერცხის მემბრანების შერწყმას და სპერმის ბირთვის კვერცხის ციტოპლაზმაში შეღწევას იწვევს. როგორც შეხება, ისე მემბრანების შერწყმა კვერცხუჯრედის პლაზმური მემბრანის იონური არხე-



▲ **სურათი 47.3 ზღვის ზღარბის განაყოფიერების დროს მიმდინარე აკროსომული და ქერქული რეაქციები.** მოვლენები, რომლებსაც ადგილი აქვს ერთი სპერმის და ერთი კვერცხის შერწყმისას, როცა მხოლოდ ერთი სპერმის ბირთვი აღწევს კვერცხის ციტოპლაზმაში.

ბის გახსნას იწვევს. ამას კვერცხუჯრედში ნატრიუმის იონების შესვლა და მემბრანული პოტენციალის ცვლილება მოჰყვება (იხ. თავი 7). მემბრანული პოტენციალის ამგვარ ცვლილებას დეპოლარიზაცია ეწოდება და ეს პროცესი საერთოა ცხოველის ყველა სახეობისთვის. 1-3 წამის განმავლობაში, როდესაც სპერმა კვერცხს მიუერთდება, დეპოლარიზაცია ხელს უშლის სხვა სპერმატოზოიდებს დამატებით შეერწყან კვერცხის პლაზმურ მემბრანას. პოლისპერმიის ამ **სწრაფი ბლოკირების** გარეშე კვერცხს მრავალი სპერმატოზოიდი განაყოფიერებდა, რაც ზიგოტაში ქრომოსომების ნორმიდან გადახრილი (აბერაციული) რაოდენობის დაგროვებას გამოიწვევდა.

## ქერქული რეაქცია

მემბრანის დეპოლარიზაცია ერთ წუთამდე გრძელდება და ამგვარად ხდება პოლისპერმიის ხანმოკლე ბლოკირება. ამასთანავე,

კვერცხისა და სპერმის პლაზმური მემბრანების შერწყმა ცვლილებების სერიას იწვევს, რაც პოლისპერმიის ხანგრძლივ ბლოკირებას განაპირობებს. სპერმის დაკავშირება იწვევს, სხვასთან ერთად, ორი მეორადი მესენჯერის წარმოქმნას – IP3 და DAG რომელებიც იწვევენ კალციუმის იონების ( $Ca^{2+}$ ) ენდოპლაზმური რეტიკულუმიდან ციტოზოლში გამოიყოფას (**იხ. სურ. 11.12**).  $Ca^{2+}$  გამოიყოფა სპერმის შესვლის ადგილზე იწყება და ტალღისებურად ვრცელდება განაყოფიერებული კვერცხის გასწვრივ (**სურ. 47.4**).

წამების განმავლობაში  $Ca^{2+}$ -ის მაღალი კონცენტრაცია ქერქულ რეაქციას აძლევს საწყისს. ამ დროს მემბრანის ქვეშ, კვერცხის ქერქზე მოთავსებული მრავალი ვეზიკულა კვერცხის პლაზმურ მემბრანას ერწყმის. ქერქული გრანულები, რომლებიც ოვოგენეზის დროს წარმოიქმნება ახლა თავის შიგთავსს პერივიტალინურ სივრცეში გამოიყოფს. ეს არის პლაზმურ მემბრანასა და ყვითრის შრეს შორის არსებული სივრცე (**იხ. სურ. 47.3**, საფეხური 5). ქერქული

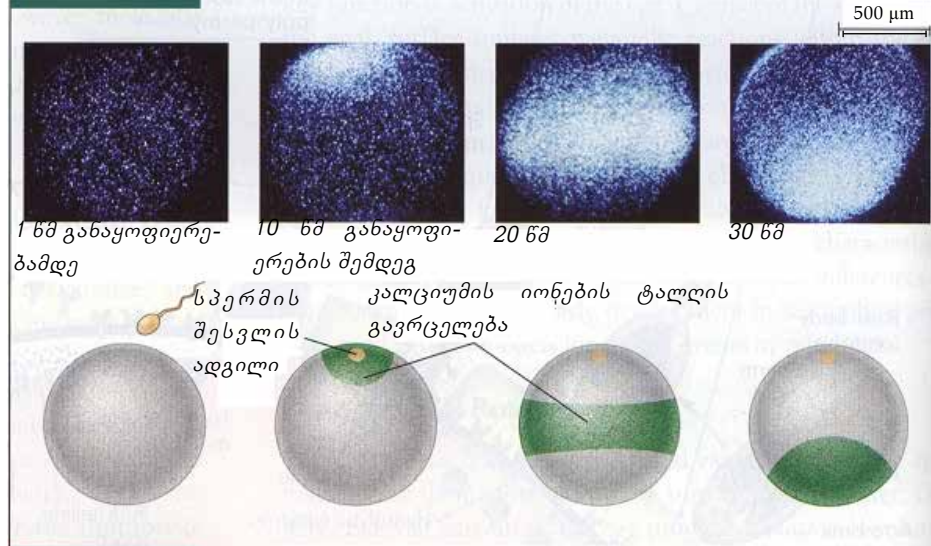
## სურათი 47.4

**კვლევა:** ტა მთვლენას იწვევს  $Ca_2^+$  და სპერმის კავშირი კვრცხუ-ჯრდში სპერმის მთვლენის შიშლივ

### მსსპერიმენტი

ფლუორესცენციული საღებავი, რომელიც ანათებს, როდესაც თავისუფალი  $Ca_2^+$  შეყვანილია ზღვის ზღარბის გაუნაყოფიერებელ კვერცხში. ზღვის ზღარბის სპერმის დამატებისას მკვლევარებს ფლუორესცენტულ მიკროსკოპში დაკვირვება შეუძლიათ.

### შედეგები



### დასკვნა

$Ca^{2+}$  გამოყოფა ენდოპლაზმური რეტიკულუმიდან ციტიზოლში იმ მიდამოში, სადაც სპერმის შესვლა იწვევს  $Ca^{2+}$  გამოყოფას ენდოპლაზმური რეტიკულუმიდან და გამ-ოყოფის გაძლიერებას ტალღისებური გავრცელებით უჯრედის მეორე ზედაპირზე შესვლის პროცესი დაახლოებით 30 წმ გრძელდება.

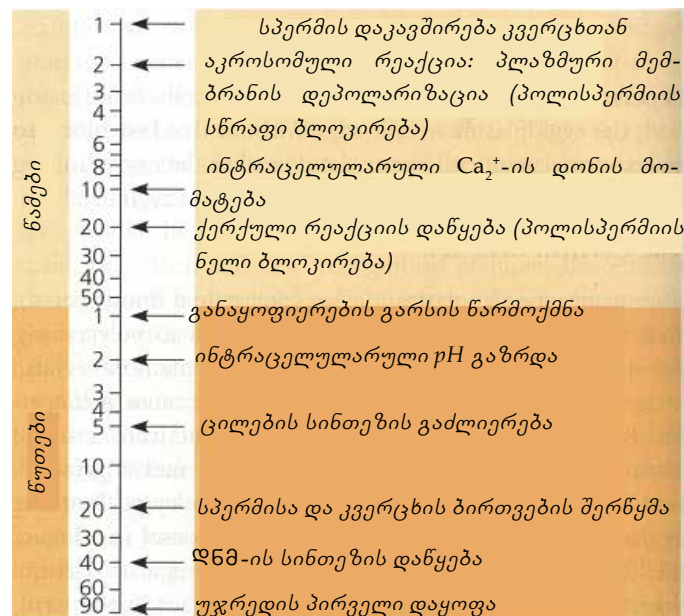
გრანულებიდან გამოყოფილი ფერმენტები ამცირებენ ყვითრის შრის პლაზმურ მემბრანაზე შეჭიდულობას. ამავე დროს, მუკო-პოლისაქარიდები ოსმოსურ გრადიენტს წარმოქმნის, რის გამოც წყალი აღწევს პერივიტალინურ სივრცეში და მის გაჯირჯვებას იწვევს. ეს მოვლენა, თავის მხრივ, ყვითრის შრეს პლაზმური მემბ-რანისაგან გასწევს და სხვა ფერმენტები ყვითრის შრის გამყარებას უწყობს ხელს. სხვადასხვა ფერმენტები გამოშვავდება, რომლებიც ყვითრის შრის რეცეპტორული ცილების დეგრადაციას იწვევენ. ეს ცვლილებები ყვითრის შრეს განაყოფიერების ავკად დადაქცევს, რაც კვერცხს დამატებითი სპერმატოზოიდების შესვლისგან იცავს. აღნიშნული განაყოფიერების ავკი და სხვა ცვლილებები, რომ-ლებიც კვერცხის ზედაპირზე მიმდინარეობს, პოლისპერმიის ნელ ბლოკს წარმოადგენს. აღნიშნული პროცესები ხანგრძლივი მოქმე-დებისაა. მიუხედავად იმისა, რომ ქერქული რეაქცია ძირითადად ზღვის ზღარბზეა შესწავლილი, ეს მოვლენები ასევე მიმდინარეობს ხერხემლიანებში – თევზებში და ძუძუმწოვრებში.

## კვერცხის აქტივაცია

მეორე შედეგი, რომელიც კვერცხის ციტიზოლში  $Ca^{2+}$ -ის კონცენტრაციის სწრაფი მატებით მიიღება, კვერცხის სუნთქვის დონის და ცილების სინთეზის მნიშვნელოვანი ზრდაა. მეტაბოლიზ-მის ამგვარ სწრაფ გაძლიერებას კვერცხის აქტივაციას უწოდებენ.

მიუხედავად იმისა, რომ სპერმატოზო-იდის შეღწევა კვერცხუჯრედში კვერცხის აქტივაციის გამომწვევია, თავად სპერმის უჯრედები არ იძლევიან რაიმე საჭირო მასალას აქტივაციისათვის. მრავალი სახეობის გაუნაყოფიერებელი კვერცხი აქტიურდება  $Ca^{2+}$ -ის ინექციით ან მსუ-ბუქად დამაზიანებელი ზემოქმედებით, მაგალითად, ტემპერატურული შოკით. ამგვარმა ხელოვნურმა ზემოქმედებამ გა-უნაყოფიერებელ კვერცხუჯრედში ისეთი მეტაბოლური ცვლილებები შეიძლება გა-მოიწვიოს, რომ პარტენოგენეზის (სპერ-მით განაყოფიერების გარეშე) პროცესიც კი ჩაითროს. კვერცხის ხელოვნური აქტი-ვაცია მაშინაც კი არის შესაძლებელი, თუ ხდება კვერცხის ბირთვის მოცილება. ეს მონაცემები ადასტურებს, რომ გაუნაყო-ფიერებელ კვერცხში არსებული ცილები და მესენჯერული რწმ (მრწმ) საკმარისია კვერცხის აქტივაციისათვის.

იმ დროს, როდესაც ზღვის ზღარბის აქტივირებული კვერცხის მეტაბოლიზმი ძლიერდება, სპერმის ბირთვი გაჯირჯე-ბას იწყებს. დაახლოებით 20 წუთის შემ-დეგ სპერმის ბირთვი ერწყმის კვერცხის ბირთვს და იქმნება ზიგოტის დიპლოიდუ-რი ბირთვი. ამას მოყვება დწმ-ის სინთეზის დაწყება, და ზღვის ზღარბში და ზოგიერთ ბაყაყში უჯრედების პირველი დაყოფა 90



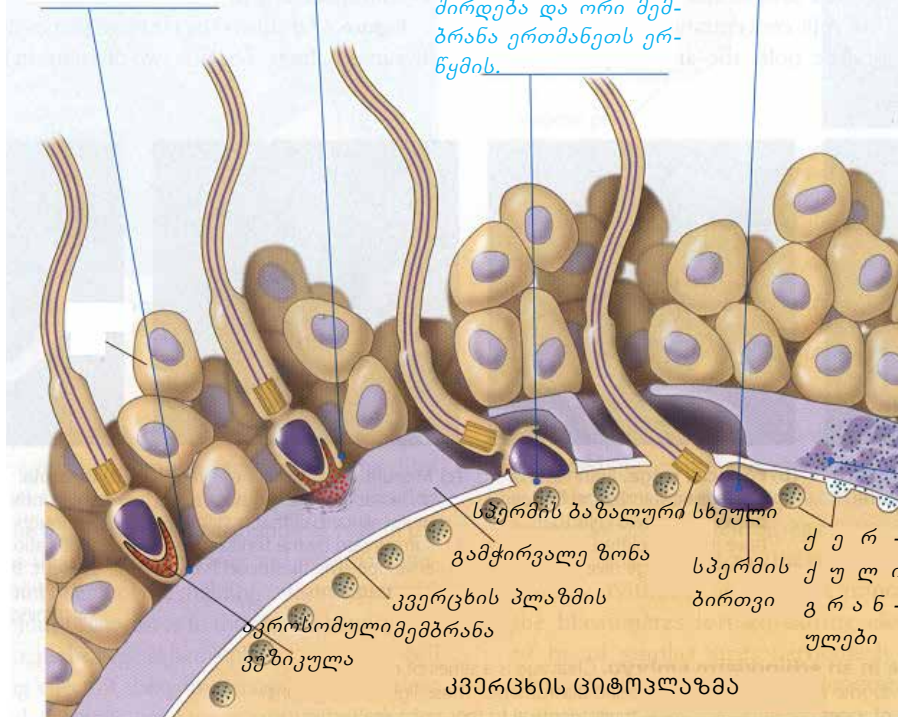
▲ **სურათი 47.5 ზღვის ზღარბის განაყოფიერების დროის გრაფიკი.** პროცესი იწყება, როდესაც სპერმის უჯრედი ეხება კვერცხის ჟელატინურ გარსს (ტაბულის თავზე). მიაქცეით ყურადღება, რომ შკალა ლოგარითმულია.

1 სპერმა მიგრირებს ფოლიკულური უჯრედების გარსში და კვერცხის გამჭვირვალე ზონის რეცეპტორულ მოლეკულებს უკავშირდება (რეცეპტორული მოლეკულები არ არის აქ ნაჩვენები).

2 ეს დაკავშირება იწვევს აკროსომულ რეაქციას, რომელშიც გამჭვირვალე ზონა იშლება და სპერმა გამყოფი სპერმატიდისად გადაიქცევა. 3 ამ ფერმენტების დახმარებით სპერმატიდის კვერცხის გარსში გამჭვირვალე ზონა იშლება და სპერმატიდის კვერცხის გარსში გამჭვირვალე ზონა იშლება და სპერმატიდის კვერცხის გარსში გამჭვირვალე ზონა იშლება.

4 სპერმის უჯრედის ბირთვი და სხვა კომპონენტები შედიან კვერცხში.

5 ქერქული რეაქციის დროს გამყოფი ფერმენტები გამჭვირვალე ზონას ამყარებს, რომელიც შემდეგ მოქმედებს, როგორც პოლისპერმიის ბლოკატორი.



▲ სურათი 47.6 განაყოფიერების ადრეული მოვლენები ძუძუმწოვრებში. როგორც ზღვის ზღარბებში, ძუძუმწოვრებშიც განაყოფიერების პროცესის დროს მხოლოდ ერთი სპერმა აღწევს კვერცხის ციტოპლაზმაში

წუთში შეინიშნება. ზღვის ზღარბის განაყოფიერების პროცესი და დროში მისი მიმდინარეობა სურ. 47.5-ზეა შეჯამებული.

სხვა სახეობებში განაყოფიერება მრავალი ნიშნით ემსგავსება ზღვის ზღარბში მიმდინარე პროცესებს. თუმცა განაყოფიერების დროში არის განსხვავება. აგრეთვე, სხვადასხვა სახეობაში განსხვავებულია კვერცხის მეიოზის სტადიები, რომლითაც კვერცხუჯრედი აღწევს განაყოფიერებამდე. როცა ზღვის ზღარბის კვერცხი იწყებს განაყოფიერებას, მასში მეიოზი დამთავრებულია. სხვა სახეობებში კვერცხი განაყოფიერებამდე მეიოზის სხვადასხვა სტადიაზეა შეჩერებული; განაყოფიერების შემდეგ ასეთ კვერცხებში მეიოზი სწრაფად მიმდინარეობს უკვე აღწერილი სტადიებისა გზით. ადამიანის კვერცხი, მაგალითად, შეჩერებულია II მეოზის მეტაფაზაში (იხ. სურ. 46.11) მანამ, სანამ ის არ განაყოფიერდება მდედრის რეპროდუქციულ ტრაქტში.

## ძუძუმწოვრების განაყოფიერება

ზღვის ზღარბის და ზღვის სხვა უხერხემლოების გარეგანი განაყოფიერების განსხვავებით, ხმელეთის ცხოველებში, ძუძუმწოვრების ჩათვლით, განაყოფიერება ძირითადად შინაგანია. ძუძუმწოვარი მდედრების რეპროდუქციული ტრაქტების გამოწვევით ცვლის განსაზღვრულ მოლეკულებს სპერმატოზოიდის ზედაპირზე და აგრეთვე აძლიერებს სპერმის მოძრაობის უნარს. ადამიანებში სპერმის ფუნქციის გაძლიერებას დაახლოებით 6 საათი ესაჭიროება მას შემდეგ, რაც ის მდედრის რეპროდუქციულ ტრაქტში მოხვდება.

ძუძუმწოვრების კვერცხუჯრედი დაფარულია ფოლიკულური უჯრედებით, რომლებიც კვერცხუჯრედთან ერთად ოვულაციის პერიოდში გამოიყოფა. სპერმატოზოიდმა მიგრაცია უნდა მოახდინოს ფოლიკულური შრის

უჯრედებში, ვიდრე ის კვერცხუჯრედის ექსტრაცელულარულ გარსს - გამჭვირვალე ზონას მიაღწევს. ამ გამჭვირვალე ზონის ფუნქციის ერთ-ერთ კომპონენტს წარმოადგენს სპერმის რეცეპცია, რომლის დროსაც იგი სპერმის თავზე არსებულ კომპლემენტარულ მოლეკულებს უმაგრდება. სპერმის მიმაგრება იწვევს აკროსომულ რეაქციას (სურ. 47.6). აკროსომიდან გადმოღვრილი ჰიდროლიზური ფერმენტები ხელს უწყობენ სპერმის უჯრედს გაარღვიოს გამჭვირვალე ზონა და შეაღწიოს კვერცხის პლაზმურ მემბრანაში. აკროსომული რეაქცია იწვევს სპერმის მემბრანის იმ ცილების გამოჩენას, რომლებიც უკავშირდებიან კვერცხის პლაზმურ მემბრანას. ისევე, როგორც ზღვის ზღარბის განაყოფიერებისას, სპერმის უჯრედის დაკავშირება კვერცხუჯრედთან იწვევს კვერცხში ისეთ ცვლილებებს, რასაც მოჰყვება ქერქული რეაქცია - ქერქული გრანულებიდან ფერმენტების გამოყოფა, რომლებიც უჯრედიდან ეგზოციტოზის გზით გამოდიან. ფერმენტების გამოყოფა გამჭვირვა-

ლე ზონის ცვლილებებს იწვევს, რომელიც მოქმედებს როგორც პოლისპერმიის ნელი ბლოკატორი (ძუძუმწოვრების პოლისპერმიის სწრაფი ბლოკატორის მექანიზმი ცნობილი არ არის). კვერცხისა და სპერმის მემბრანების შერწყმის შემდეგ სპერმა მთლიანად, კუდიანად შედის კვერცხში, რომელსაც დაკარგული აქვს ცენტროსომა. ცენტროსომა ფორმირდება ცენტრიოლოს ირგვლივ, რომელიც ისე მოქმედებს, როგორც სპერმის შოლტის ბაზალური სხეული. ეს ცენტროსომა ზიგოტაში ორ ცენტროსომას გაორმაგებით წარმოქმნის. ეს კი უჯრედების პირველი გაყოფისთვის აუცილებელი მიტოზური თითისტარის გენერაციას იწვევს. ძუძუმწოვრების სპერმისა და კვერცხის ჰაპლოიდური ბირთვები მაშინვე არ ერწყმის ერთმანეთს, როგორც ეს ზღვის ზღარბის განაყოფიერების დროს ხდება. სამაგიეროდ, ორივე უჯრედის ბირთვის გარსი იშლება და ქრომოსომების ორი ნაკრები (თითო თითოეული გამეტიდან) ქმნის ქრომოსომების საერთო თითისტარას ზიგოტის პირველი გაყოფისთვის. ამგვარად, პირველი გაყოფის შემდეგ დიპლოიდური ბირთვი ორ შვილეულ უჯრედში ყალიბდება და ქრომოსომები, რომელიც ორივე მშობლისაგან მოდის, ერთ ბირთვში თავსდება. განაყოფიერება ძუძუმწოვრებში უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე ზღვის ზღარბში: უჯრედების პირველი დაყოფა სპერმის დაკავშირებიდან 12-36 საათის შემდეგ ხდება, განსხვავებით ზღვის ზღარბების 90 წუთიანი პერიოდისგან.

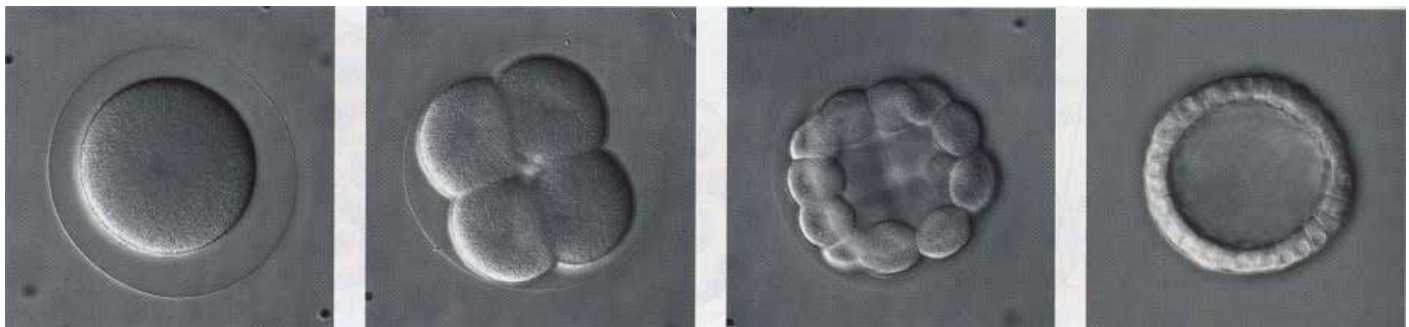
## დანაწევრება

განაყოფიერების დამთავრებისთანავე უჯრედების სწრაფი გაყოფის სერია იწყება. ამ პერიოდის განმავლობაში, რომელსაც დანაწევრება ეწოდება, უჯრედები გაივლიან უჯრედული ციკლის S (დნმ-ის სინთეზის) და M (მიტოზის) ფაზებს. ხშირად G1 და G2 ფაზები გამოტოვებულია და, შესაბამისად, ცილა ან ძალიან ცოტა რაოდენობით, ან სულ არ სინთეზირდება (იხ. სურ.12.5). ემბრიონი, განვითარების ამ პერიოდში, ზომაში არ იმატებს. დანაწევრების დროს

უბრალოდ ერთი დიდი უჯრედის – ზიგოტის ციტოპლაზმა ნაწევრდება მრავალ პატარა ზომის უჯრედად, რომელსაც ბლასტომერები ეწოდება. თითოეულ ამ უჯრედს საკუთარი ბირთვი აქვს (სურ. 47.7).

პირველი ხუთი შვიდი დანაწევრება ქმნის უჯრედების ნაკრებს, რომელსაც მორულა ეწოდება. სითხით სავსე სიღრუე, რომელსაც ბლასტოცელი ეწოდება, მორულას შიგნით იწყებს ფორმირებას და ვითარდება სრულყოფილ ბლასტულად, რომელიც ღრუან სფეროს წარმოადგენს. დაყოფის განმავლობაში კვერცხში არსებული საწყისი ციტოპლაზმის სხვადასხვა უბანი სხვადასხვა ბლასტომერში ნაწილდება. ვინაიდან ეს უბნები ციტოპლაზმის სხვადასხვა დეტერმინანტს შეიცავს, მრავალ სახეობაში ეს დანაწევრება განაპირობებს შემდგომი განვითარების მოვლენებს. ზღვის ზღარბისა და სხვა ცხოველების კვერცხებსა და ზიგოტებს, ძუძუმწოვრების შესაძლო გამორიცხვით, განსაზღვრული პოლარობა აქვთ. ასეთ ორგანიზმებში დაყოფის სიბრტყეები ხასიათდება გარკვეული მდგომარეობით ზიგოტის პოლუსების მიმართებით. პოლარობა განპირობებულია ციტოპლაზმაში არსებული ნივთიერებების ( მრნმ, ცილები და ყვითი – საკვების მარაგი) არათანაბარი განაწილებით. მრავალ ბაყაყში და სხვა ცხოველებში ყვითლის გადანაწილება არის გამშვები ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს დანაწევრების პატერნზე. ყვითრი კვერცხის ერთ-ერთი პოლუსისკენაა კონცენტრირებული, რასაც ზრდის პოლუსი (ვეგეტატიური, მცენარეული) ეწოდება. ყვითრის კონცენტრაცია მცირდება საწინააღმდეგო პოლუსის მიმართულებით, რასაც ცხოველური პოლუსი ეწოდება.

სხეულის სამი ღერძი ყალიბდება განვითარების ადრეულ ეტაპზე (სურ. 47.8). ეს პროცესი ადვილად შეისწავლება ბაყაყში ვინაიდან კვერცხში და ადრეულ ემბრიონში სხვადასხვა ნაწილები ფერით განსხვავდება და მათზე ადვილად შეიძლება დაკვირვება. ზიგოტის ვეგეტატიური და ცხოველური პოლუსები სხვადასხვა ფერისაა. ცხოველური ჰემისფერო მუქი რუხია, ვინაიდან მელანინის გრანულები განლაგებულია უჯრედის გარეთა შრეში (ქერქში). მელანინის გრა-



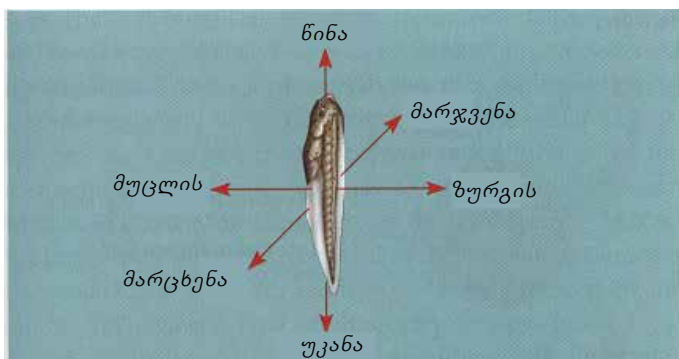
(ა) კვერცხის განაყოფიერება. აქ ნაჩვენებია ზიგოტა პირველი დაყოფა-დანაწევრების წინ, რომელიც გარშემორტყმულია განაყოფიერების შალითით. ბირთვი ცენტრში მოჩანს.

(ბ) ოთხ-უჯრედიანი სტადია. მიტოზური თითისტარის ნარჩენები მოჩანს ორ უჯრედს შორის. აქ მეორე დაყოფა ეს-ეს არის დასრულებული.

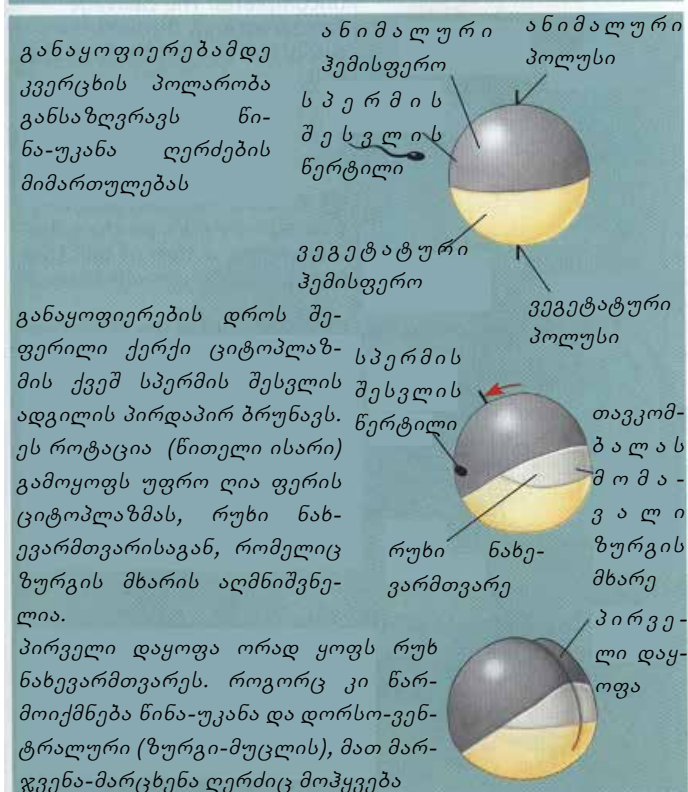
(გ) მორულა. შემდეგი დაყოფით ემბრიონი მრავალუჯრედიან სფეროს სახითაა, რომელიც კვლავ შეხვეულია განაყოფიერების შალითაში. ბლასტოცელი იწყებს ჩამოყალიბებას.

(დ) ბლასტულა. დიდ ბლასტოცელს ერთი შრე ფარავს. ემბრიონს მოშორდა განაყოფიერების შალითა, იგი გამოეყო მას და იწყებს ცურვას.

▲ **სურათი 47.7 დაყოფა კანეკლიანებში.** კანეკლიანებში დაყოფა მიმდინარეობს მიტოზური დანაწევრებით სერიებად, რაც ზიგოტას გადააქცევს უჯრედების – ბლასტომერებით შექმნილ სფეროდ. ეს სინათლის მიკროგრაფიები აჩვენებს ზღვის ზღარბის ბრტყელ ემბრიოლოგიურ სტადიებს, რაც ვირტუალურად ზღვის ზღარბის იდენტურია.



(ა) სხეულის ღერძები. სრულად განვითარებულ ემბრიონში. თავკომბალა ზემოთ არის ნაჩვენები.

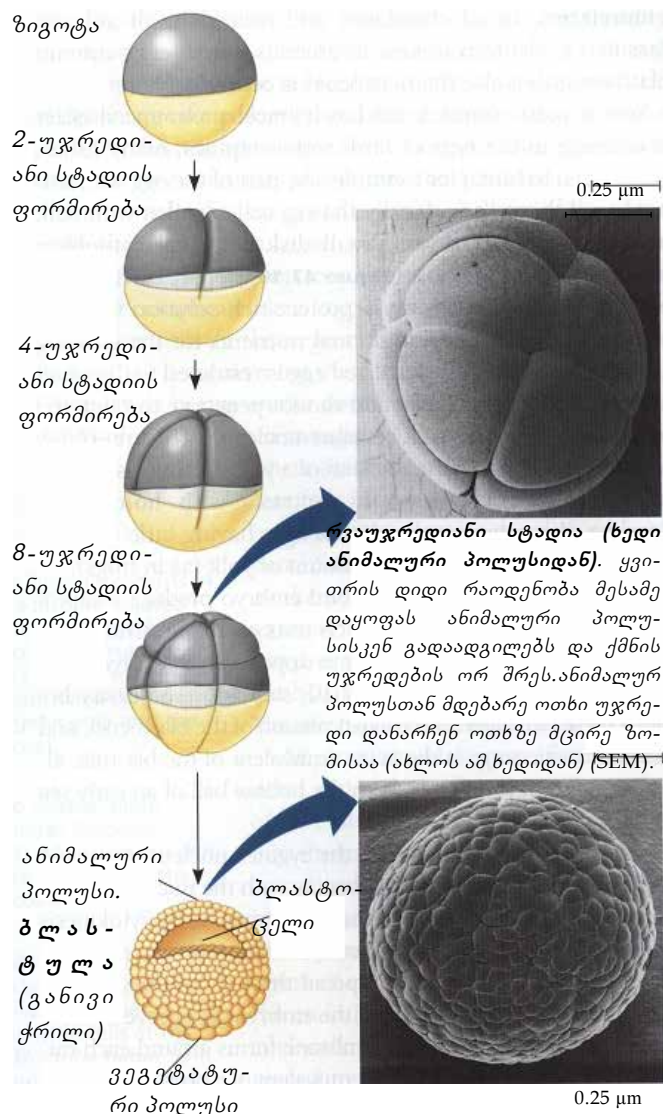


(ბ) ღერძების წარმოქმნა. კვერცხის პოლარობა და ქერქული როტაცია კრიტიკულია სხეულის ღერძების დაწყობაში

▲ **სურათი 47.8** სხეულის ღერძები და მათი წარმოქმნა ამფიბიებში. სამივე ღერძი ზიგოტის დაყოფამდე წარმოიქმნება.

ნულების ნაკლებობა ვეგეტატიურ პემისფეროზე დამკვირვებელს აძლევს საშუალებას, შეამჩნიოს ყვითლის ყვითელი ფერი.

კვერცხისა და სპერმის შერწყმის შემდეგ ამფიბიის კვერცხში გარდაქმნები ერთ სხეულის ღერძს წარმოქმნის (სურ. 47.8 ბ). პლაზმური მემბრანა და მასთან ასოცირებული ციტოპლაზმა ბრუნავს ციტოპლაზმის შიგნითა შრის მიმართ. ცხოველური პოლუსის ქერქი მოძრაობს სპერმის შესვლის მიმართულებით, ხოლო მცენარეული პემისფეროს ქერქი სპერმის შესვლის გასწვრივ ადგილიდან ცხოველური პემისფეროსაკენ გადაადგილდება. ვეგეტატიური ქერქის მოლეკულებს ახლა უკვე შეუძლიათ ციტოპლაზმის შიგნითა შრის



**ბლასტულა (სულ მცირე 128 უჯრედი).** რამდენადაც დაყოფა გრძელდება ემბრიონი სითხით სავსე ღრუს – ბლასტოცელის სახით წარმოადგება. ვინაიდან არათანაბარი უჯრედების დაყოფა ყვითლის დიდ რაოდენობას ვეგეტატიურ პემისფეროსკენ გადასწევს, ბლასტოცელი ანიმალურ პემისფეროში თავსდება (როგორც ეს ჯვარედინ ჭრილზეა ნაჩვენები). SEM აჩვენებს დაახლოებით 4 000 უჯრედს ანიმალური პოლუსის ხედიდან.

▲ **სურათი 47.9** ბაყაყის ემბრიონის დაყოფა. პირველი და მეორე დაყოფის შემდეგ ანიმალური და ვეგეტატიური პოლუსები წარმოიქმნება, მესამე დაყოფა პოლარული ღერძების პერპენდიკულარულია.

მოლეკულებთან - ცხოველურ პოლუსთან ურთიერთქმედება, რასაც მოჰყვება ციტოპლაზმის იმ უბნის წარმოქმნა, რომელიც შემდგომში სხეულის დორსალურ მხარეს შეესაბამება. ამგვარად, ქერქული როტაცია ზიგოტის დორსო-ვენტრალურ ღერძებს ქმნის. ზოგიერთ სახეობაში ეს მოვლენა აძლევს ციტოპლაზმას ღია ნაცრისფერ შეფერილობას – იქმნება რუხი ნახევარმთვარე, რაც როტაციის დაწყებამდე ცხოველური ქერქის პიგმენტით იყო დაფარული. სპერმის

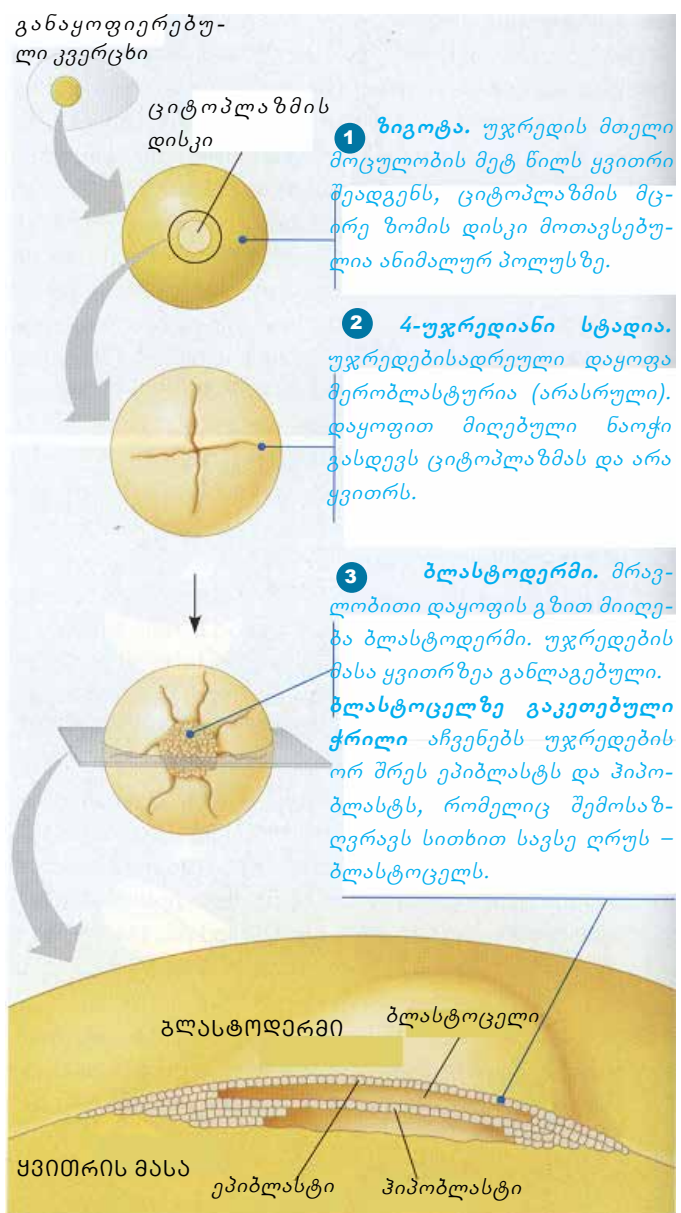
შესასვლელის საწინააღმდეგო მხარეს არსებული რუხი ნახევარმთვარე შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც ემბრიონის მომავალი დორსალური (ზურგის) მხარის აღმნიშვნელი. რუხი ნახევარმთვარის უფრო ღია პიგმენტი შენარჩუნებულია უჯრედის გაყოფის მრავალ რაუნდში.

**სურ. 47.9** აჩვენებს დანაწევრების მიმართულებას ბაყაყებში საწყისი გაყოფის დროს. ბაყაყის პირველი ორი სიგარძივი (ვერტიკალური) გაყოფის შედეგად მიიღება თანაბარი ზომის 4 ბლასტომერი, თითოეული მიმართულია ცხოველური პოლუსიდან ვეგეტატიურისკენ, მესამე დანაწევრება ეკვატორულია (ჰორიზონტალური) და იძლევა 8-უჯრედიან ემბრიონს. თუმცა, უჯრედების დანაწევრების დროს ეკვატორული უბნებში, ყვითრის ძალიან არათანაბარი დანაწილება ბაყაყის ზიგოტაში გადაადგილებს მიტოზურ აპარატს და საბოლოო ციტოკინეზს ცხოველური ბოლოსკენ. ამგვარად 8-უჯრედიან სტადიაში ცხოველური ჰემისფეროს 4 ბლასტომერი უფრო პატარა ზომისაა, ვიდრე ვეგეტატიურისა. ყვითრის გადანაწილების ეფექტი შეიმჩნევა მომდევნო დანაწევრებებზეც. დანაწევრების შედეგად მიიღება ჯერ მორუღა და შემდგომ ბლასტულა. ბაყაყებში უჯრედების ზომაში განსხვავებული დანაწევრება იწვევს იმას, რომ ბლასტოცელი თავსდება ცხოველურ ჰემისფეროში (**იხ. სურ. 47.9**).

მიუხედავად იმისა, რომ ზღვის ზღარბისა და ზოგიერთი სხვა ცხოველის კვერცხი ბაყაყის კვერცხთან შედარებით ნაკლებ ყვითრს შეიცავს, მათ აქვთ ცხოველურ/მცენარეული ღერძი, რაც განპირობებულია სხვა ნივთიერებების არათანაბარი განაწილებით. თუმცა, ყვითრით გამოწვეული შეზღუდვის გარეშე მიმდინარე დაყოფის დროს წარმოქმნილი ბლასტომერები მეტნაკლებად ერთი ზომისაა, განსაკუთრებით პირველ დანაწევრებათა დროს (**იხ. სურ. 47.7**). მიუხედავად ამისა, ბაყაყებში დაყოფის ძირითადი სქემა ისევე გამოიყურება, როგორც ზღვის ზღარბში და სხვა ეკალკანიაებში, ყველა ქორდიანში და, საერთოდ, ყველა ცხოველში, რომელიც მეორადპირიანებს მიეკუთვნება. ამ ცხოველებში, რომელთა კვერცხი შესაბამისად ყვითრის მცირე რაოდენობას შეიცავს, ბლასტოცელი ცენტრში თავსდება.

ფრინველების, ქვეწარმავლების, ბევრი თევზის და მწერის კვერცხში ყვითრი განსაკუთრებით ბევრია და თვალსაჩინო გავლენას ახდენს დაყოფაზე. ფრინველებში, მაგალითად, კვერცხის ის ნაწილი, რომელსაც ჩვენ ყვითრს (გულს) ვუწოდებთ, სინამდვილეში ყვითრის საკვებით ამოვსებული კვერცხუჯრედი. ცხოველურ პოლუსზე აქტიური ციტოპლაზმის მცირე ზომის დისკია მოთავსებული (**სურ. 47.10, I საფეხური**). ეს უზარმაზარი უჯრედი გარშემორტყმულია ცილებით სავსე ხსნარით (კვერცხის ცილა), რომელიც დამატებით საკვებით უზრუნველყოფს მოზარდ ემბრიონს. განაყოფიერებული კვერცხის დაყოფა შეზღუდულია უყვითრო ციტოპლაზმის მცირე დისკით და მას არ შეუძლია შეადგინოს ყვითრის სისქეში; ამგვარად, ყვითრი რჩება დაუნაწევრებელი (**სურ. 47.10, II საფეხური**). ყვითრით მდიდარი კვერცხის ეს არასრული დაყოფა ცნობილია, როგორც მეროლობლასტური დაყოფა. ის განსხვავდება ჰოლობლასტური დაყოფისგან, რაც კვერცხის სრული დანაწევრებით მიმდინარეობს იმ ორგანიზმებში, რომლებსაც ცოტა (როგორც ზღვის ზღარბს) და საშუალო რაოდენობის (როგორც ბაყაყს) ყვითრი აქვთ.

აღრეული დაყოფა ფრინველის ემბრიონში წარმოქმნის უჯრედების ნაკრებს, რომელსაც ბლასტოდერმა ეწოდება. იგი განლაგებულია კვერცხის დაუყოფელ ყვითრზე. ბლასტომერები ზედა და ქვედა შრეებად ეპიბლასტად და ჰიპობლასტად გამოიყოფა (**სურ.**



**▲ სურათი 47.10 დაყოფა წინილის ემბრიონში.** ხედი ზემოთ მოტანილ სამ ნახატზე აღებულია ანიმალური პოლუსიდან. ქვემოთ მოტანილ ნახატზე ნაჩვენებია ემბრიონის ჭრილი, ზუსტად იმ დროს, როცა ყვითრის მასა ჩანს. ფრინველებში წარმოქმნილი ბლასტოდერმი ბაყაყების ბლასტულის ექვივალენტურია.

**47.10, III საფეხური.** ფრინველებში ამ ორ შრეს შორის არსებული სიღრუე ბლასტოცელია, რომელიც ბლასტულის ეკვივალენტურია, თუმცა მისი ფორმა განსხვავდება ზღვის ზღარბისა და ბაყაყის აღრეული ემბრიონების ღრუან სფეროსგან.

მწერებში, მაგალითად, დროზოფილაში, ზიგოტის ბირთვი ყვითრის მასის შიგნითაა მოთავსებული. დანაწევრება ბირთვის მიტოზური დაყოფით იწყება, რასაც თან არ სდევს ციტოკინეზი (**იხ. სურ. 21.12**). ასეთი მიტოზური დაყოფა მრავალ ასეულ ბირთვს იძლევა, რომელიც ჯერ მთელ ყვითრში ვრცელდება და მოგვიან-

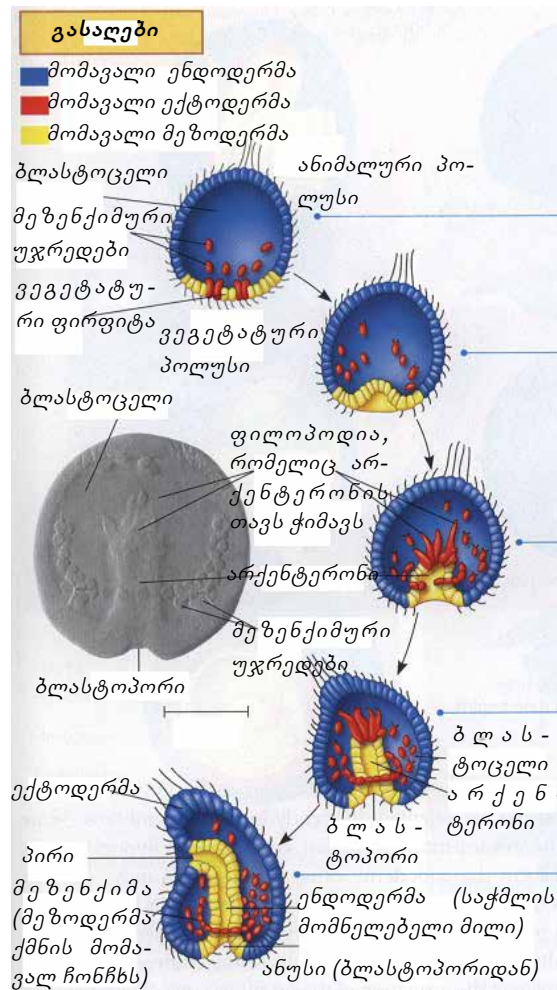
ბით მიგრირებს ემბრიონის გარეთა უბნებისკენ. მიტოზის სხვა მრავალი რაუნდის შემდეგ, პლაზმის მემბრანა შემოსაზღვრავს თითოეულ ბირთვს და ემბრიონი, რომელიც ახლა ბლასტულის ეკვივალენტურია, შეიცავს დაახლოებით 6.000 უჯრედის ერთ შრეს, რომელიც გარს ერტყმის ყვითრის მასას.

## გასტრულაცია

მორფოგენების პროცესი, რომელსაც გასტრულაცია ეწოდება, წარმოადგენს ბლასტულის უჯრედების გადანაწილებას რაც ქმნის სამშრიან ემბრიონს, რომელსაც პრიმიტიული ნაწლავი აქვს. მიუხედავად იმისა, რომ გასტრულაციის მსვლელობის დეტალები განსხვავებულია ცხოველთა სხვადასხვა ჯგუფში, იგი განპირობებულია ზოგადად ერთი და იგივე მექანიზმებით: ცვლილებებით უჯრედების ფორმაში, ცვლილებებით უჯრედის მოძრაობაში და ცვლილებებით უჯრედების ადგილის უნარში სხვა უჯრედებთან და ექსტრაცელულარული მატრიქსის მოლეკულებთან. გასტრულაციის შედეგად ბლასტულას ზედაპირზე მდებარე ზოგი უჯრედი გადაადგილება შიგნით და უჯრედების სამშრიანი წარმონაქმნი მიიღება. სამშრიან ემბრიონს **გასტრულა** ეწოდება. უჯრედების ახალი მდებარეობა გასტრულას შრეებში მათ ურთიერთობის ახალი გზების საშუალებას აძლევს.

გასტრულაციის შედეგად მიღებული სამი შრე ემბრიონული ქსოვილებია, რომლებსაც აქვთ საერთო სახელწოდება **ჩანასახოვანი შრეები**. **ექტოდერმა** წარმოიქმნება გასტრულის გარეთა შრის უჯრედებისგან, ენტოდერმა შიგნითა შრის უჯრედებისგან, **მეზოდერმა** აესებს სივრცეს ექტოდერმასა და ენდოდერმას შორის. უჯრედების ამ სამი შრისგან ვითარდება მოზრდილი ცხოველის ყველა ქსოვილი და ორგანო. ჩვენ აქ თვალყურს გაავადევნებთ იმ მოვლენებს, რომელთაც ადგილი აქვს გასტრულაციის დროს ზღვის ზღარბში, ზაყაყსა და წიწილაში.

**სურ. 47.11.** აჩვენებს ზღვის ზღარბის ემბრიონის განვი თარების სტადიებს (გასტრულაციას). ამ ცხოველის ბლასტულა შეიცავს უჯრედების ერთ შრეს ცენტრალურად განლაგებული ბლასტოცელით. გასტრულაცია ვეგეტატიურ პოლუსზე იწყება, სადაც ინდივიდუალური უჯრედები გამოიყოფა ბლასტულიდან და შედიან ბლასტოცელში, როგორც მიგრაციული უჯრედები, რომელთაც მეზენქიმური უჯრედები ეწოდებათ. ვეგეტატიური პოლუსის დარჩენილი



**▲ სურათი 47.11 გასტრულაცია ზღვის ზღარბში.** უჯრედების მოძრაობა გასტრულაციის დროს აყალიბებს ემბრიონის პრიმიტიულ ნაწლავს სამი ჩანასახოვანი შრით. მეზენქიმის (მეზოდერმის) ზოგიერთი უჯრედი, რომელიც შიგნით მიგრირებს (საფეხური 1) გამოყოფს კალციუმის კარბონატს და ქმნის მარტივ შინაგან ჩონჩხს. ემბრიონები განვითარების 1-3 საფეხურებზე ნაჩვენებია წინხედით, ხოლო 4 და 5 საფეხურებზე – გვერდხედით.

უჯრედები ნელ-ნელა იზნიქება და ქმნის ვეგეტატიურ ფირფიტას. ამ პროცესს **ინვაგინაცია** ეწოდება. ვეგეტატიური ფირფიტა განიცდის ტრანსფორმაციას, რომლის დროსაც ინვაგინაცია გრძელდება მანამ, სანამ არ წარმოიქმნება პრიმიტიული მილი – არქენტერონი. არქენტერონის გახსნილ ბოლოს, რომელიც ანუსად გარდაიქმნება, ბლასტოპორი ეწოდება. არქენტერონის მეორე გახსნილი ბოლო იქმნება, როდესაც არქენტერონი ესება ექტოდერმის შიგნითა შრეს და ეს ორი შრეს შეერწყმის, რაც ქმნის რუდიმენტული მომწლებელი მილის პირს.

ზღვის ზღარბის ემბრიონში გასტრულაციით პრიმიტიული ნაწლავი და ჩანასახის ფურცლები იქმნება. ისინი, ჩვეულებრივ, სხვადასხვა ფერით არის აღნიშნული, ლურჯით – ექტოდერმა, წითლით – მეზოდერმა და ყვითლით – ენტოდერმა (**იხ. სურ. 47.11, საფეხური 5**). სხეულის ამგვარი სამშრიანი გეგმა დამახასიათებელია მრავალი ცხოველის ტიპისთვის და განვითარების ძალიან ადრეულ ეტაპებზეა წარმოდგენილი. ზღვის ზღარბში გასტრულა,

1 ბლასტულა შეიცავს წამწამოვანი უჯრედების ერთ შრეს, რომელიც ფარავს ბლასტოცელს. გასტრულაცია იწყება მეზენქიმური უჯრედების მიგრაციით ვეგეტატიური პოლუსიდან ბლასტოცელის შიგნით.

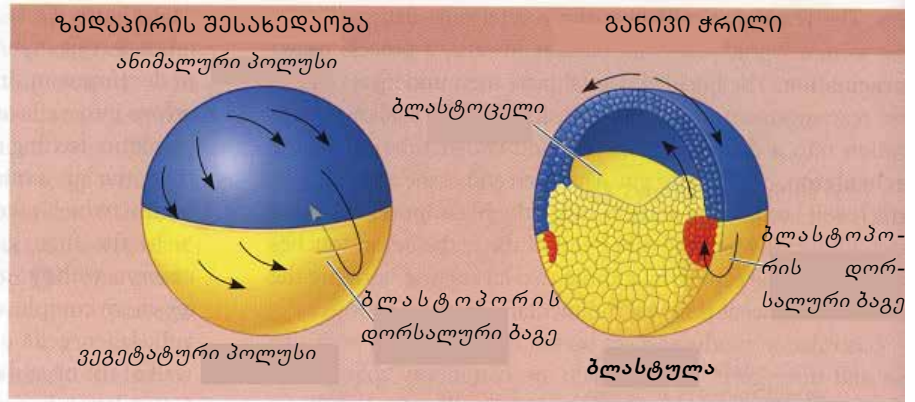
2 ვეგეტატიური ფირფიტა ინვაგინირდება (ჩაიზნიქება შიგნით). მეზენქიმის უჯრედები მიგრირებენ ბლასტოცელის გავლით.

3 ენდოდერმის უჯრედები ქმნიან არქენტერონს (მომწვალ საჭმლის მომწლებელი მილი). მეზენქიმის ახალი უჯრედები მილის ბოლოზე გამოყოფენ წვრილ გამოწარდებს (ფილოპოდებს) ექტოდერმის უჯრედების მიმართულებით ბლასტოცელის კედლისკენ (inset, LM).

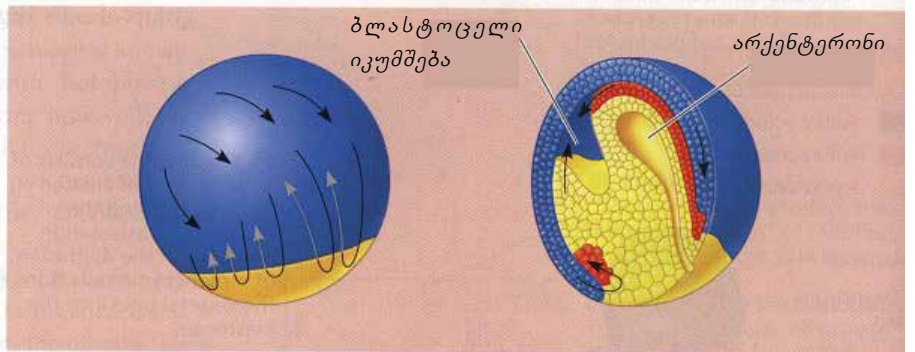
4 ამ ფილოპოდების შეკუმშვა შემდგომში ჭიმავს არქენტერონს ბლასტოცელის გასწვრივ.

5 ბლასტოცელის კედლის გახვრეტა არქენტერონის მეშვეობით ამთავრებს საჭმლის მომწლებელი მილის ფორმირებას პირითა და ანუსით. გასტრულას აქვს სამი ჩანასახოვანი შრე; იგი დაფარულია წამწამებით, რომლებიც ხელს უწყობენ მას ცურვასა და კვებაში

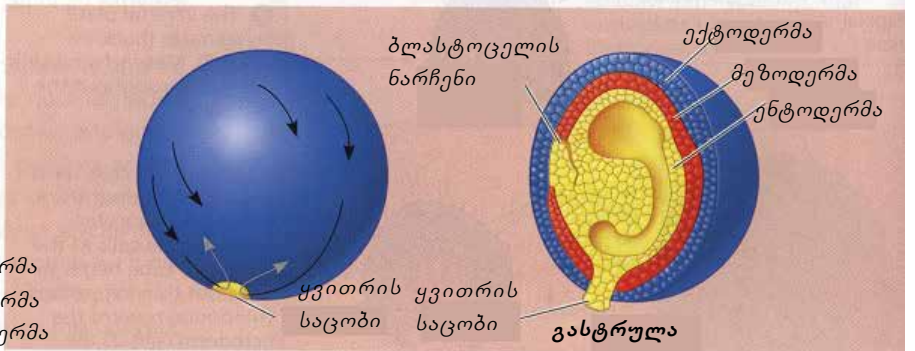
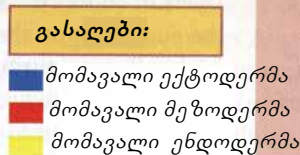
1 გასტრულაცია მცირე ზომის ნაჭდევით იწყება, ბლასტოპორის დორსალური ბაგე ბლასტულის ერთ მხარეს გამოვლინდება. ნაკეცი უჯრედების ფორმის ცვლილებით წარმოიქმნება და შიგნით ჩაიზნეება (ინვაგინაცია). დამატებითი უჯრედები შემდეგ ჩაიხვევა დორსალური ბაგისაკენ (ინვოლუცია) და შიგნით მოძრაობენ, სადაც ისინი ენდოდერმასა და მეზოდერმას ქმნიან. ამასთან ერთად, ცხოველური პოლუსის უჯრედები, მომავალი ექტოდერმა, ცვლიან თავის ფორმას და გარეთა ზედაპირზე იწყებენ გავრცელებას.



2 რაც უფრო მეტად ხდება უჯრედების ინვაგინაცია, ბლასტოპორის ბაგე მეტად იზრდება ემბრიონის ორივე მხარეს. როდესაც ბაგის ორივე მხარე ერთმანეთს ხვდება, ბლასტოპორი წრეს წარმოქმის, რომელიც ექტოდერმის მთელ ზედაპირზე გავრცელების შესაბამისად მცრდება. გრძელდება რა შიგნით ინვოლუცია, ენდოდერმა და მეზოდერმა იჭიმება და არქენტერონი იწყებს ფორმირებას. ამის შედეგად ბლასტოცელი პატარავდება.



3 გვიანი გასტრულაციის დროს ენდერმის გასწვრივი არქენტერონი მთლიანად გადაადგილებს ბლასტოცელს და სახეზეა სამი ჩანასახოვანი შრე. წრიული ბლასტოპორი გარს ეხვევა ყვითრით საესე უჯრედების საცობს.



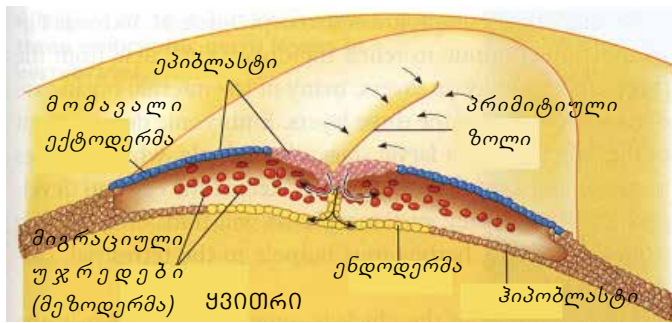
▲ **სურათი 47.10** ბაყაყის ემბრიონის გასტრულაცია. ბაყაყის გასტრულაში, ბლასტოცელი გადაადგილებულია ანიმალური პოლუსისაკენ და გარშემორტყმულია რამდენიმე სქელი უჯრედის კედლით. უჯრედების მოძრაობა, რომლითაც გასტრულაცია იწყება მიმდინარეობს ბლასტულის დორსალურ მხარეს, სადაც ზიგოტაში რუხი ნახევარმთვარე იყო ლოკალიზებული (იხ. სურ. 47.8 ბ). რუხი ნახევარმთვარე აქ არ ჩანს, მიუხედავად იმისა, რომ აქ გასტრულაციის დასაწყისია გამოსახული.

ჩვეულებრივ, წამწამებიან ლარვად გადაიქცევა, რომელიც ცურავს, როგორც პლანქტონი ოკეანის ზედაპირზე და ბაქტერიებითა და ერთუჯრედიანი წყალმცენარეებით იკვებება. მცირე ხნის შემდეგ ლარვა მეტამორფოზს განიცდის ზღვის ზღარბის ზრდასრულ ფორმად და ზღვის ფსკერზე ბინადრობას იწყებს.

ბაყაყებში გასტრულაციით ასევე მიიღება სამშრიანი ემბრიონი არქენტერონით. თუმცა, გასტრულაციის მექანიზმი ბაყაყებში უფრო გართულებულია, ვინაიდან მათ ვეგეტატიურ ჰემისფეროში ყვითრით საესე დიდი უჯრედები აქვთ. ამასთანავე, სახეობათა უმრავლესობაში ბლასტულას კედელი ცალკეულ უჯრედზე უფრო სქელია. გასტრულაცია იწყება ბლასტულას დორსალურ მხარეს, როცა უჯრედების ჯგუფი იწყებს ინვაგინაციას იმ რეგიონის გას-

წვრივ, სადაც ზიგოტაში რუხი ნახევარმთვარე წარმოიქმნება (იხ. სურ. 47.8). ეს ინვაგინაცია იწყება ბლასტოპორის დორსალურ მხარეს, რომელსაც დორსალური ბაგე ეწოდება (სურ. 47.12). ბლასტოპორის ბაგე იწელება, ვინაიდან თითოეულ ბოლოში დაწყებული ინვაგინაცია გრძელდება, ვიდრე ორივე ბოლო ერთმანეთს ვენტრალურ მხარეს არ შეხვდება. ბლასტოპორი წრის ფორმას იღებს.

მთელი ბლასტოპორის გასწვრივ, ემბრიონის ზედაპირზე მოთავსებული მომავალი ენტოდერმისა და მეზოდერმის უჯრედები ბაგის კიდეზე ემბრიონის შიგნით გადაინაცვლებენ რასაც ინვოლუცია ეწოდება. ემბრიონის შიგნით მოხვედრისთანავე, ეს უჯრედები ბლასტოპორს შორდებიან და ენტოდერმისა და მეზოდერმის შრეებად ორგანიზებას იწყებენ. ამ პროცესის დროს ბლასტოცე-



**▲ სურათი 47.10 გასტრულაცია ნინილის ემბრიონში.** გასტრულაციის დროს ნინილის ეპიბლასტის ზოგიერთი უჯრედები მიგრირებს ემბრიონის შიგნით პრიმიტიული ზოლით აქ ნაჩვენებ განივ ჭრილზე. ამ უჯრედთაგან ზოგიერთი მოძრაობს ქვემოთ და ენდოდერმას ქმნის, მაშინ როდესაც ზოგიერთი მოძრაობს ლატერალურად და მეზოდერმას ქმნის. გასტრულაციის ბოლოს ექტოდერმად ის უჯრედები გადაიქცევა, რომლებიც ემბრიონის ზედაპირზე მარცხნივ-უკან მდებარეობენ

ლი იშლება, ჩაენაცვლება არქენტერონის სიღრუით, რაც, თავის მხრივ, ენტოდერმის მილს წარმოადგენს. როგორც კი გასტრულაცია მთავრდება, ბლასტოპორის ბაგე წრიულად, ირგვლივ ერტყმის ყვითრის საცობს, რომელიც საკვებით დატვირთული გარეთა უჯრედებისაგან შედგება. ეს გამჭოლი უჯრედები შიგნითა მიმართულებით ექტოდერმიდან მოძრაობენ, რაც შემდგომში ბლასტოპორის შეკუმშვას იწვევს. ამ თვალთახედვით უჯრედები, რომლებიც რჩებიან ზედაპირზე, ქმნიან ექტოდერმას და გარს ერტყმიან მეზოდერმის და ენტოდერმის შრეებს. როგორც ზღვის ზღარბის შემთხვევაში, ამფიბიების ანუსი ბლასტოპორისგან ვითარდება, ხოლო პირი, არქენტერონის საწინააღმდეგო ბოლოზე წარმოიქმნება, არქენტერონის ვენტრალურ მხარეზე, ცხოველურ პოლუსთან გაფართოების შემდეგ.

ქათმებში გასტრულაცია ბაყაყების გასტრულაციას ემსგავსება იმ თვალსაზრისით, რომ უჯრედები ორივე შემთხვევაში მოძრაობენ ემბრიონის ზედაპირიდან შიგნითა მიმართულებით. ფრინველებში გასტრულაციის დროს უჯრედების შიგნითა მიმართულებით მოძრაობაზე ზეგავლენა აქვს ყვითრის დიდ რაოდენობას, რომელიც ემბრიონს ფსკერიდან აწევს. გაიხსენეთ რომ დანაწევრება ქათმებთან ქმნის ბლასტოდერმს რომელიც შეიცავს ორ – ზედა და ქვედა შრეს – ეპიბლასტს და ჰიპობლასტს, რომელებიც ყვითრის თავზეა მოთავსებული (სურ.47.10). ყველა უჯრედი, რომელთაგან შემდგომში ემბრიონი ვითარდება, ეპიბლასტისგან მომდინარეობს. გასტრულაციის პროცესში ეპიბლასტის უჯრედები მიემართება ბლასტოდერმის შუა ხაზისკენ, შემდეგ სცილდება მას და მოძრაობს შიგნით ყვითრის მიმართულებით (სურ. 47.13). ბლასტოდერმის შიგნით შუა ხაზისკენ მოძრაობს უჯრედების გროვა ქმნის შესქელებას, რომელსაც **პრიმიტიული ღერო** ეწოდება; იგი მიემართება მიმართულებით, რომელიც ფრინველებში წინა-უკანა ღერძს ქმნის. პრიმიტიული ღერო ფუნქციურად ბაყაყების ბლასტოპორის ბაგის ეკვივალენტურია, მაგრამ ეს ორი სტრუქტურა ორ ემბრიონში განსხვავებულად არის ორიენტირებული. ეპიბლასტის შიგნით მოძრაობის უჯრედები ჰიპობლასტის უჯრედების ადგილს იღებენ და ქმნიან ენტოდერმას. ეპიბლასტის სხვა უჯრედები ბლასტოცელში ლატე-

რალურად მოძრაობენ და მეზოდერმას ქმნიან. ეპიბლასტის უჯრედები, რომლებიც ზედაპირზე რჩებიან, ექტოდერმას აძლევენ საწყისს. მიუხედავად იმისა, რომ ჰიპობლასტი არ იძლევა უჯრედებს ემბრიონისთვის, ის ეხმარება პრიმიტიული ღეროს სწორ ფორმირებაში გასტრულაციის დაწყებამდე და საჭიროა ნორმალური განვითარებისათვის. ჰიპობლასტის უჯრედები შემდეგ გამოიყოფიან ენტოდერმიდან. აღნიშნული უჯრედები ქმნიან გარსს, რომელიც გარშემო ერტყმის ყვითრს და ღეროს, რომელიც ყვითრის მასას ემბრიონთან აკავშირებს.

მიუხედავად იმისა, რომ სხვადასხვა სახეობაში სამი ჩანასახოვანი შრე განსხვავებულად წარმოიქმნება, როგორც კი ისინი თავის ადგილზე ლაგდება, გასტრულაცია დასრულებულია. დგება დრო, როცა ემბრიონის ორგანოთა ფორმირება იწყება.

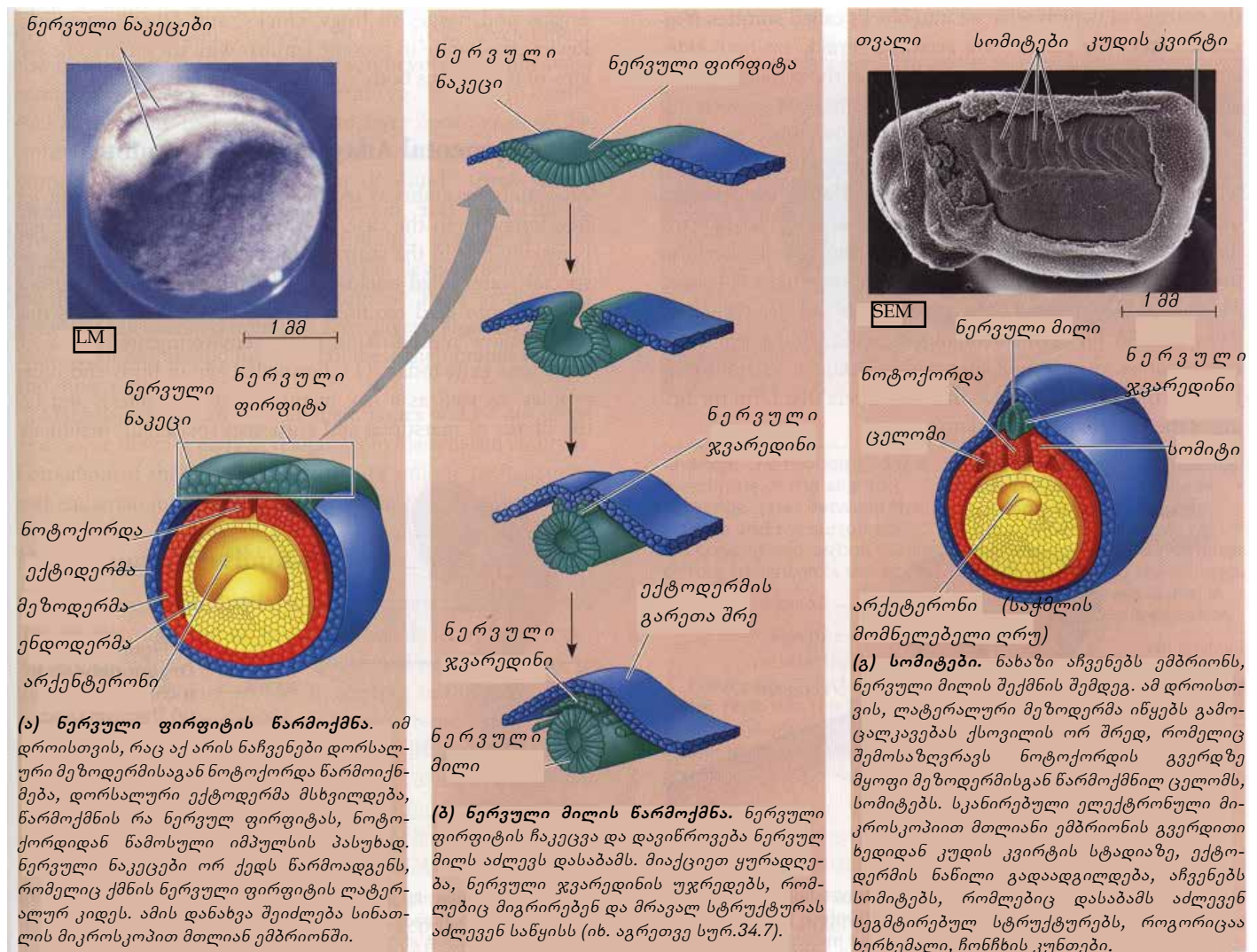
## ორგანოგენეზი

ემბრიონის სამი ჩანასახოვანი შრის სხვადასხვა რეგიონი ორგანოგენეზის პროცესში ჩანასახოვან ორგანოებად ვითარდება. მაშინ, როცა, გასტრულაცია გულისხმობს მოძრავი უჯრედების მასას, ორგანოგენეზი შეიცავს მორფოგენეტიკურად ლოკალიზებულ ცვლილებებს ქსოვილში და უჯრედების ფორმაში. ორგანოთა შენების პირველი ნიშანი არის ნაკეცების, ხვრელების და უჯრედების მყარი გროვების წარმოქმნა.

**სურ. 47.14.** ასახულია ბაყაყების ადრეული ორგანოგენეზის დროს მიმდინარე ზოგიერთ მოვლენა. ბაყაყების და სხვა ქორდიანების ემბრიონებში თავდაპირველად წარმოიქმნება ნერვული მილი და ნოტოქორდი, ჩონჩხის ღერძი, რაც დამახასიათებელია ყველა ქორდიანის ემბრიონისთვის. ნოტოქორდა ვითარდება დორსალური მეზოდერმისგან, რომელიც ზუსტაა არქენტერონის თავზე თავსდება (სურ. 47.14ა). ნოტოქორდიდან ზემოთ გაგზავნილი სიგნალები იწვევს ექტოდერმის ამ უბანში ნერვული ფირფიტის წარმოქმნას. ნერვული ფირფიტა მალე შიგნით ბრუნდება და **ნერვულ მილად** ეხვევა და თავსდება ემბრიონის წინა-უკანა მიმართულების ღერძის გასწვრივ. (სურ. 47.14ბ). ნერვული მილი გადაიქცევა ცენტრალურ ნერვულ სისტემად – თავის ტვინად თავში და ზურგის ტვინად. მეზოდერმალური ნოტოქორდიდან სიგნალების გაგზავნა ექტოდერმაში არის კარგი მაგალითი იმ პროცესებისა, რომლებიც ორგანოგენეზის დროს შეიძინება: ერთი ჩანასახოვანი შრე აძლევს მეორეს სიგნალს და განაპირობებს მის განვითარების გზას.

უჯრედების ნაკრები, რომელსაც **ნერვული თხემი** ეწოდება, ვითარდება იმ საზღვრის გასწვრივ, საიდანაც ნერვული მილი წარმომდგება ექტოდერმისგან. ნერვული თხემის უჯრედები შემდგომში მიგრირებენ ემბრიონის სხვადასხვა ნაწილში და ქმნიან პერიფერიულ ნერვებს, კბილებს, თავის ქალას ძვლებს და მრავალი უჯრედის სხვადასხვა ტიპს, რის გამოც ზოგიერთი ემბრიოლოგი ნერვულ ჯვარედინს „მეოთხე ჩანასახოვან შრედ“ მიიჩნევს.

სხვა შესქელება წარმოიქმნება მეზოდერმის ზოლში ნოტოქორდის ლატერალურად და განცალკევებული უჯრედების ბლოკებად იყოფა, რომლებსაც **სომიტები** ეწოდება (სურ. 47.14, ც). სომიტები სერიულად ლაგდება ნოტოქორდის სიგრძეზე ორივე მხარეს. სომიტების ნაწილები დისოცირდება ინდივიდუალურ მეზენქიმურ უჯრედებად, რომლებიც ახალი ლოკალიზაციის მიმართულებით მიგრირებენ. ნოტოქორდის ღეროს ფუნქცია აკისრია, რომლის გარშემო თავს იყრის მეზოდერმული უჯრედები, რომელთაგანაც



▲ **სურათი 47.14** ბაყაყის ემბრიონის ადრეული ემბრიოგენეზი.

ხერხემალი წარმოიქმნება. მალევე შორის ნოტოქორდის ნაწილები ზრდასრული ორგანიზმის მალევე დისკებს შეესაბამება (ეს ის დისკებია, რომელთა ადგილის შენაცვლება ზურგის ტკივილს იწვევს). სომიტების უჯრედები კუნთებსაც აძლევენ დასაბამს, რომლებიც ჩონჩხის ღერძებს უკავშირდება. ღერძული ჩონჩხის და კუნთების სერიული წარმოქმნა მიუთითებს იმაზე, რომ ქორდიანებს აგებულების სეგმენტური საფუძველი აქვს; ეს სეგმენტაცია ნაკლებად გამოხატული განვითარების მომდევნო ეტაპებზე. სომიტების ლატერალურად მეზოდერმა იშლება ორ შრედ და იქმნება სხეულის ღრუ ანუ ცელომი.

ორგანოგენეზის პროგრესის შესაბამისად, მორფოგენები და უჯრედების დიფერენციაცია გრძელდება ორგანოთა სრულ ჩამოყალიბებამდე, რომელიც ემბრიონის სამი შრიდან ვითარდება. შინაგანი ორგანოების უმეტესობა კი ორი შრიდან გამოიყოფა. ემბრიონული განვითარება ბაყაყებში ლარვულ სტადიის შეიცავს. კერძოდ, თავკომბალა ირეკება ჟელატინური გარსიდან. მოგვიანებით, მეტამორფოზი გარდაქმნის წყლის ბინადარ თავკომბალას ხმელეთზე მობინადრე ბაყაყად.

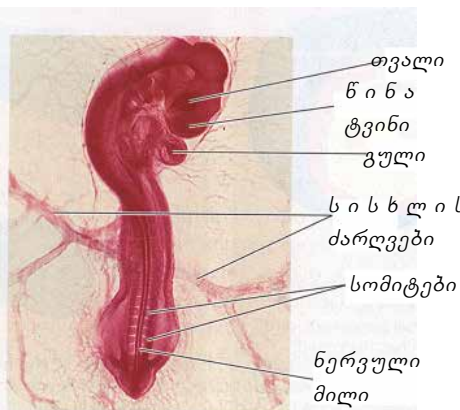
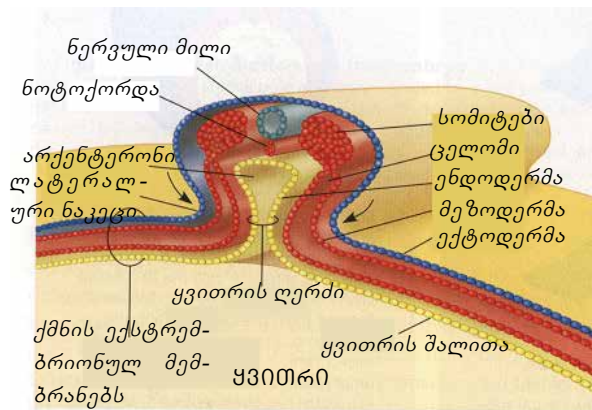
ორგანოგენეზი ქათმებში ბაყაყების მსგავსად მიმდინარეობს.

მას შემდეგ, რაც ჩანასახის სამივე შრე წარმოიქმნება, ზღასტოდერმის კიდეები ქვემოთ მიემართება, ერთმანეთს უერთდება და ათავსებს ემბრიონს სამშრიან მილში, რომელიც სხეულს შუა ნაწილს ყვითრთან ქვემოთ აკავშირებს (**სურ. 47.15ა**). ნერვული მილის ჩამოყალიბება, ნოტოქორდისა და სომიტების განვითარება, ორგანოგენეზის სხვა მოვლენები ძალიან მსგავსია ბაყაყის ემბრიონში მიმდინარე პროცესების. ძირითადი ორგანოების რუდიმენტები შეიმჩნევა წიწილის 2-3 დღის ემბრიონში (**სურ. 47.15ბ**).

**სურ.47.16.** იძლევა სიას ძირითადი ორგანოების, რომლებიც სამი განსხვავებული ჩანასხოვანი შრისაგან წარმოიქმნება ბაყაყებში, წიწილებში და სხვა ხერხემალიანებში.

## ამნიოციტის ფოლუციური ადაპტაციები

ყველა ხერხემალიანის ემბრიონი განვითარებისთვის წყლის გარემოს მოითხოვს. თევზებისა და ამფიბიების შემთხვევაში ეს ჩვეულებრივ ზღვა ან ტბორია, ანუ ისინი სპეციალურ, შემოზღუდულ წყლის შემცველ სტრუქტურას არ საჭიროებენ. ხერხემალიანების გა-



### ▲ სურათი 47.15

#### წინილის ემბრიონის ორგანოგენეზი (ა)

ემბრიონის ლატერალური ჩანასახოვანი შრიდან წარმოიქმნება ექსტრემობრიონული მემბრანები (განვიხილავთ მოგვიანებით). (ბ) ეს მემბრანები საბოლოოდ ემბრიონიდან გამო-სული სისხლძარღვებით მარაგდება. მოჩანს სისხლძარღვი.

(ა) **ადრეული ემბრიოგენეზი.** არქენტერონი წარმოიქმნება, როდესაც ლატერალური ნაკეცი ემბრიონს ყვითრიდან გამოაძევებს. ემბრიონი რჩება გახსნილი ყვითრის მიმართ, ეხება ყვითრის საყრდენს მისი სიგრძის ნახევრით, როგორც ეს განიცხრილზეა ნაჩვენები. ნოტოქორდა, ნერვული მილი, სომიტები თანმიმდევრობით ისევე წარმოიქმნება როგორც ბაყაყებში.

(ბ) **გვიანი ორგანოგენეზი.** ამ წინილის ემბრიონში, რომელიც ასაკით 56 საათისაა და სიგრძით 2-3მმ, ძირითადი რუდიმენტული ორგანოები უკვე წარმოქმნილია.

| ექტოდერმა                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>*კანის ეპიდერმისი და მისი დერივატები (ოფლის ჯირკვლებისა და თმის *ფოლიკულების ჩათვლით);</li> <li>*პირისა და უკანა გასავლის ეპითელიალური ამომფენი;</li> <li>*ეპიდერმისის სენსორული რეცეპტორები;</li> <li>*თვალის რქოვანი და ბროლი;</li> <li>*ნერვული სისტემა;</li> <li>*თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი შრე;</li> <li>*კბილების ემალი;</li> <li>*ეპიფიზისა და ჰიპოფიზის ეპითელიუმი (ჯალღუხისებრი და გირჩისებრი ჯირკვლები);</li> </ul> |

| მეზოდერმა                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>*ნოტოქორდა;</li> <li>*ჩონჩხის სისტემა;</li> <li>*კუნთოვანი სისტემა;</li> <li>*მუცლისა და შინაგანი ორგანოების კუნთოვანი ამომფენი;</li> <li>*გამომყოფი სისტემა;</li> <li>*ცირკულაციური და ლიმფური სისტემები;</li> <li>*რეპროდუქციული სისტემა (ჩანასახის შრეების უჯრედების გარდა);</li> <li>*კანის დერმა;</li> <li>*სხეული ღრუების ამომფენი;</li> <li>*თირკმელზედა ჯირკვლის ქერქი.</li> </ul> |

| ენდოდერმა                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>*საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის ამომფენი;</li> <li>*სასუნთქი სისტემის ეპითელიალური ამომფენი;</li> <li>*საშარდე მილის (ურეტრის), შარდის ბუშტის, რეპროდუქციული სისტემის ამომფენი;</li> <li>*ღვიძლი;</li> <li>*პანკრეასი;</li> <li>*თიმუსი;</li> <li>*თირიდი და პარათირიდი-ლი ჯირკვლები.</li> </ul> |

### ▲ სურათი 47.16 ხერხემალიანების ემბრიონების სამი ჩანასახოვანი შრიდან მიღებული ზრდასრული დერივატები

დასვლამ ხმელეთზე ისეთი სტრუქტურების ჩამოყალიბება მოითხოვა, რომლებიც ორგანიზმებს გამრავლების საშუალებას მისცემდა მშრალ გარემოში. ორი ასეთი სტრუქტურაა სადღეისოდ წარმოდგენილი: (1) ფრინველებისა და ქვეწარმავლების ნაჭუჭიანი კვერცხი, და (2) საშვილოსნო ძუძუმწოვრებში. საშვილოსნო და კვერცხი შეიცავს სითხიან ჩანთას, სადაც ემბრიონი არის მოთავსებული. ეს ჩანთა წარმოიქმნება მემბრანისგან, რომელსაც ამნიონი ეწოდება. ამის გამო ქვეწარმავლებს, ფრინველებსა და ძუძუმწოვრებს **ამნიოტებს** უწოდებენ (იხ. თავი 34).

ჩვენ უკვე ვიცით, რომ წიწილის – ამნიოტის ემბრიონული განვითარება ძალიან ჰგავს ბაყაყის განვითარებას, იმ ხერხემალიანების განვითარებას, რომლებსაც ამნიონის გარსი არ აქვს. თუმცა, წიწილებში განვითარება, აგრეთვე, მოიცავს ექსტრემობრიონული მემბრანის ფორმირებას, რომელიც ემბრიონის გარეთ მდებარეობს. მიაქციეთ ყურადღება (სურ. 47.15), რომ თავად ემბრიონში თითოეული ჩანასახოვანი შრის მხოლოდ ნაწილს შეაქვს წვლილი. ჩანასახოვანი

შრეები, რომელიც მოთავსებულია ემბრიონის გარეთ, ვითარდება ამნიონად და სხვა სამ მემბრანად – ყვითრის ჩანთად, ქორიონად და ალანტოისად. ეს ოთხი ექსტრემობრიონული მემბრანა საწყისს აძლევს „სიცოცხლის დამხმარე სისტემას“, რომელიც ემბრიონის შემდგომი განვითარებისთვისაა აუცილებელი, ნაჭუჭიანი კვერცხში ან ამნიოტის საშვილოსნოში. თითოეული მემბრანა იქმნება ჩანასახის ორი შრიდან გამოსული უჯრედებიდან. სურ. 47.17-ზე განხილულია ფრინველებისა და რეპტილიების ამ მემბრანათა ლოკალიზაცია და ფუნქციები.

ძუძუმწოვრების ექსტრემობრიონული მემბრანები განხილულ იქნება შემდგომში, როცა ჩვენ აღვწერთ ძუძუმწოვართა ემბრიონების ადრეულ განვითარებას. პლაცენტის ფორმირება, რომელიც უნიკალურია ჩანთოსან და საშვილოსნოს მქონე ძუძუმწოვრებში, ამ პროცესების მნიშვნელოვანი ნაწილია.

## ბუბოქმწოვრების განვითარება

ძუძუმწოვართა უმრავლეს სახეობაში განაყოფიერება ხდება კვერცხსავალში და განვითარების ადრეული სტადიები მიმდინარეობს მაშინ, როცა ემბრიონი ამთავრებს თავის მოგზაურობას საშვილოსნოსკენ (იხ. სურ. 46.15). ფრინველების და ქვეწარმავლების დიდი, ყვითრის კვერცხებისგან განსხვავებით, ძუძუმწოვართა უმრავლესობის კვერცხუჯრედი საკმაოდ მცირე ზომისაა და საკვების მარაგიც მცირე აქვს. როგორც უკვე აღინიშნა, ძუძუმწოვრების

კვერცხუჯრედი და ზიგოტა არ ავლენენ პოლარობას, რაც ციტოპლაზმის შემადგენლობითაა განპირობებული. ზიგოტის დანაწევრება, რომელსაც ცოტა ყვითრი აქვს, ჰოლობლასტურია. თუმცა ძუძუმწოვრების გასტრულაცია და ადრეული ორგანოგენეზი ფრინველებისა და რეპტილიების პატერნების მსგავსია (გაიხსენეთ 34-ე თავიდან, რომ ძუძუმწოვრებისა და რეპტილიების დივერგენცია მეზოზოურ ერაში მოხდა). ძუძუმწოვრებში ადრეული დაყოფა ნელა მიმდინარეობს. ადამიანის შემთხვევაში პირველი დაყოფა მთავრდება განაყოფიერებიდან 36 საათის შემდეგ, მეორე დაყოფა – 60 საათში და მესამე დაყოფა 72 საათში სრულდება. ბლასტომერები ერთი ზომისაა. 8-უჯრედიან სტადიაზე ბლასტომერები ერთმანეთს მჭიდროდ ეწყებება, ქმნის ემბრიონის გარეთა გლუვ ზედაპირს. **სურ. 47.18-ზე** ნაჩვენებია ადამიანის ემბრიონის განვითარება განაყოფიერების მეშვიდე დღიდან (იხ. საჩვენებელი ციფრები სურათზე):

1. დანაწევრების დასრულების შემდეგ ემბრიონს ცენტრალური ღრუს გარშემო განლაგებული 100-ზე მეტი უჯრედი აქვს. ემბრიონი მოთავსებულია საშვილოსნოში. ეს ემბრიონული სტადია- ბლასტოცისტი, ძუძუმწოვრების ბლასტულას წარმოადგენს. ბლასტოცისტის ღრუს ერთ ბოლოში დაგროვილი უჯრედების ჯგუფს შიდა უჯრედულ მასას უწოდებენ. იგი შემდგომ, თანდათანობით საკუთრე ემბრიონად ვითარდება და ყველა ექსტრაემბრიონული მემბრანის შექმნაში მონაწილეობს.

2. ტროფობლასტი – ბლასტოცისტის გარეთა ეპითელიუმი. იგი იმპლანტაციას ფერმენტების გამოყოფით იწყებს. ეს ფერმენტები საშვილოსნოს ამომფენი ენდომეტრიუმის მოლეკულებს შლის, რაც ხელს უწყობს ბლასტოციტების შეღწევას ენდომეტრიუმში. რადგან ტროფობლასტი უჯრედების დაყოფით სქელდება, ის თითების მსგავს პროექციებს გარემომცველ დედისეულ ქსოვილში ავრცელებს, რომელიც სისხლძარღვებითაა მდიდარი. ტროფობლასტის ინვაზია ენდომეტრიუმში კაპილარების ეროზიას იწვევს, რასაც თან სდევს სისხლის გადმოსვლა და ტროფობლასტების ქსოვილის მოთავსება სისხლში. იმპლანტაციის პერიოდში ბლასტოციტის შიდაუჯრედული მასიდან ბრტყელი დისკი იქმნება, რომლის ზედა უჯრედების შრე ეპიბლასტია, ხოლო ქვედა – ჰიპობლასტი, რაც ფრინველების ეპიბლასტისა და ჰიპობლასტის ჰომოლოგია. **(იხ. სურ. 47.10, საფუძვრი 3).** ფრინველების მსგავსად, ადამიანის ემბრიონიც თითქმის მთლიანად ეპიბლასტების უჯრედებისგან ვითარდება.

3. იმპლანტაციის დამთავრების შემდეგ გასტრულაცია იწყება. უჯრედები ეპიბლასტის მარტივი ლარიდან შიგნით მოძრაობენ და მეზოდერმის ფორმირებას იწყებენ, ისე, როგორც ეს წიწილებში ხდება. ამავე დროს, ექსტრაემბრიონული მემბრანები იწყებს წარმოქმნას. ტროფობლასტი ენდომეტრიუმში გავრცელებას აგრძელებს. შეჭრილი ტროფობლასტი, ეპიბლასტისგან გამოსული მეზოდერმული უჯრედები და ენდომეტრიუმის უჯრედები ერთად პლაცენტის შექმნას განაპირობებენ **(სურ. 46.16).**

4. ემბრიონული ჩანასახის შრეების ფორმირება გასტრულაციის დასასრულს მიმდინარეობს. საშრიაინი ემბრიონი უკვე გარემოცულია პროლიფერირებული ექსტრაემბრიონული მეზოდერმითა და ოთხი ექსტრაემბრიონული მემბრანით.

ექსტრაემბრიონული მემბრანები ძუძუმწოვრებში ფრინველებისა და რეპტილიების შესაბამისი წარმონაქმნების ჰომოლოგურია და მსგავსადაც ვითარდება. ქორიონი, რომელიც მთლიანად ფარავს ემბრიონს და სხვა ექსტრაემბრიონულ მემბრანებს, აირთა ცვლის ფუნქციის მატარებელია. ამნიონი საბოლოოდ შემოხვევა

ემბრიონს და ქმნის დამცველი სითხით სავსე ამნიოტურ ღრუს (ამ ღრუს სითხე, „წყლები“ გადმოდის ვაგინიდან ამნიონის დაზიანების დროს მშობიარობის დაწყებამდე). განვითარებადი ემბრიონის ქვემოთ ყვითრის ჩანთა შეიცავს სითხით სავსე ღრუს. მიუხედავად იმისა, რომ ღრუში ყვითრი არ არის, მემბრანა, რომლითაც ის დაფარულია, იგივე სახელწოდებისაა, რაც ფრინველებისა და ქვეწარმავლების ჰომოლოგიური მემბრანა. ყვითრის ჩანთის მემბრანა ძუძუმწოვრებში არის ის ადგილი, სადაც სისხლის უჯრედები განვითარების ადრეულ სტადიაზე წარმოქმნება, რომელიც შემდეგ საკუთრივ ემბრიონში მიგრირებს. მეოთხე ექსტრაემბრიონული მემბრანა – ალანტოისი ჭიპლარის ნაწილად გარდაიქმნება. აქ ის სისხლძარღვებს ქმნის, რომლებიც ემბრიონს პლაცენტიდან ჟანგბადს და საკვებს აწვდის, ხოლო ემბრიონიდან ნახშირორჟანგი და ნივთიერებათა ცვლის ნარჩენები გამოაქვს. ამგვარად, ნაჭუჭიანი კვერცხის ექსტრაემბრიონული მემბრანები, საიდანაც ემბრიონი ყვითრით იკვებება, შენარჩუნებულია ძუძუმწოვრებში, ვინაიდან ისინი ევოლუციის პროცესში ქვეწარმავლებისაგან დივერგენციის გზით წარმოიშვნენ. მეორეს მხრივ, მოდიფიკაციებსაც აქვს ადგილი, რომლებიც დედის რეპროდუქციულ ტრაქტში განვითარებასთან შეგუებას წარმოადგენს.

გასტრულაციის დასრულებას თან მოსდევს ნოტოქორდის, ნერვული მილის და სომიტების ფორმირება – ორგანოგენეზის პირველი მოვლენები. ადამიანის განვითარების პირველი ტრიმესტრის ბოლოს ძირითადი ორგანოების რუდიმენტები ჩანასახის სამი შრიდანაა წარმოქმნილი **(სურ. 47.16).**

## ▶ **ჯანსაღი ციფრები 47.1**

1. რა მოხდება, თუ თქვენ ზღვის ზღარბის განაყოფიერებულ კვერცხში  $Ca^{2+}$ -ს შეიყვანთ?
2. ბაყაყის ზიგოტა და ბლასტულა თითქმის ერთი ზომისაა. ახსენით.
3. მიუხედავად იმისა, რომ გასტრულაცია განსხვავებულად გამოიყურება ზღვის ზღარბის, ბაყაყისა და წიწილის ემბრიონებში, რა არის ამ ცხოველების საერთო შედეგი?
4. შეადარეთ ცხოველებში უჯრედების მოძრაობა გასტრულაციის და ორგანოგენეზის მიმდინარეობისას.

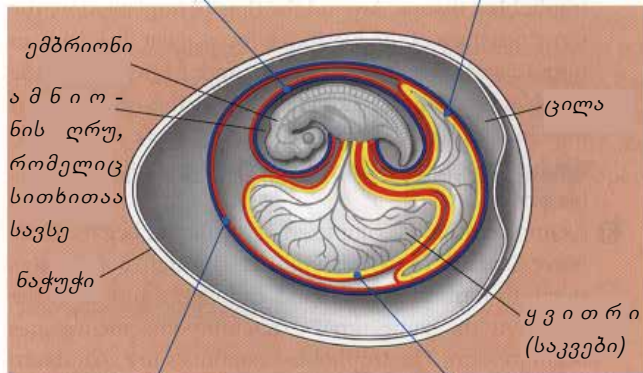
## ▶ **ჯანსაღი ციფრები 47.2**

### **ცხოველებში მატარებელი მოიცავს უჯრედების ფორმის მდებარეობისა და ადჰეზიის სპეციფიკურ ცვლილებებს**

თქვენ უკვე გაეცანით ცხოველებში ემბრიონის განვითარების ძირითად მოვლენებს. ახლა განვიხილოთ ის უჯრედოვანი და მოლეკულური მექანიზმები, რომელთა მეშვეობითაც ისინი წარმარება. მიუხედავად იმისა, რომ ბიოლოგები ჯერ ბოლომდე ვერ ერკ-

**ამნიონი** იცავს ემბრიონს სითხით სავსე ღრუში, რომელიც ხელს უშლის დეჰიდრატაციას და ასუსტებს მექანიკურ შოკს

**ალანტოისი** ფუნქციობს როგორც ემბრიონის ცხოველქმედების პროდუქტების შეშენება ჩანთა. ალანტოისის მემბრანა, ქორიონთან ერთად მოქმედებს აგრეთვე როგორც რესპირატორული ორგანო.



**ქორიონისა და ალანტოისის** მემბრანის მეშვეობით ხორციელდება გაზთა ცვლა ემბრიონსა და გარემოცველ სითხეში. ჟანგბადი და ნახშირორჟანგი თავისუფლად დიფუნდირებენ კვერცხის ნაჭუჭში.

**ყვითრის ჩანთა** ყვითრის ზემოთ ვითარდება, წარმოადგენს საკვების მარაგის ადგილს კვერცხში. ყვითრის ჩანთაში არსებული სისხლძარღვებით ემბრიონი საკვებით მარაგდება. სხვა საკვებით კვერცხის ცილაში ინახება.

**▲ სურათი 47.17 ექსტრაემბრიონული მემბრანები ფრინველებსა და რეპტილიებში.** აქ მოცემულია ექსტრაემბრიონული ოთხი მემბრანა: ამნიონი, ალანტოისი, ქორიონი, და ყვითრის ჩანთა. თითოეული მემბრანა უჯრედებითაა დაფარული, რომლებიც წარმოიქმნიან ემბრიონის საკუთრივ გარეთა სამი ჩანასახოვანი შრის ორი მათგანისაგან (იხ. სურ. 47.15.ა).

ვევიან ამ მექანიზმებში, რამდენიმე საკვანძო პრინციპი ცხოველთა განვითარებაში მაინც წარმოგვიდგება, როგორც ფუნდამენტური. მორფოგენები არის ცხოველთა და მცენარეთა განვითარების ერთერთი მთავარი ასპექტი, მაგრამ უჯრედების მოძრაობა მხოლოდ ცხოველებისთვისაა დამახასიათებელი. უჯრედის მოძრაობა იწვევს უჯრედის ფორმის შეცვლას და მის გადაადგილებას ემბრიონის შიგნით. უჯრედის ფორმისა და მდებარეობის შეცვლას ადგილი აქვს დანაწევრების, გასტრულაციისა და ორგანოგენეზის დროს. აქ ჩვენ განვიხილავთ უჯრედულ პროცესებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ აღნიშნულ მოვლენებს.

## უჯრედის ჩონჩხი, უჯრედების მოძრაობა და კონფერენციული გაფართოება

უჯრედის ფორმის შეცვლა ჩვეულებრივ უჯრედის ჩონჩხის

რეორგანიზაციას გულისხმობს (იხ. ტაბულა 6.1). მაგალითისთვის განვიხილოთ, როგორ წარმოიქმნება ნერვული ფირფიტის უჯრედებიდან ნერვული მილი (სურ. 47.19). პირველად მიკროტუბულები ემბრიონის დორსო-ვენტრალური ღერძის პარალელურად არიან განლაგებული, რაც ეხმარება უჯრედს, დაგრძელდეს ამ მიმართულებით. ყოველი უჯრედის დორსალურ ბოლოზე არის ჯვარედინი ორიენტაციის აქტინის ფილამენტები. მათი შეკუმშვა უჯრედს სოლის ფორმას აძლევს, რომელიც აჩქარებს ექტოდერმის შიგნით ჩაზნექას. განვითარებისას, უჯრედის ფორმის იგივე ცვლილებები აღინიშნება სხვა შრეებთან ქსოვილებში ინვაგინაციის (შიგნით ჩაზნექა) და ევაგინაციის (გამოზნექა).

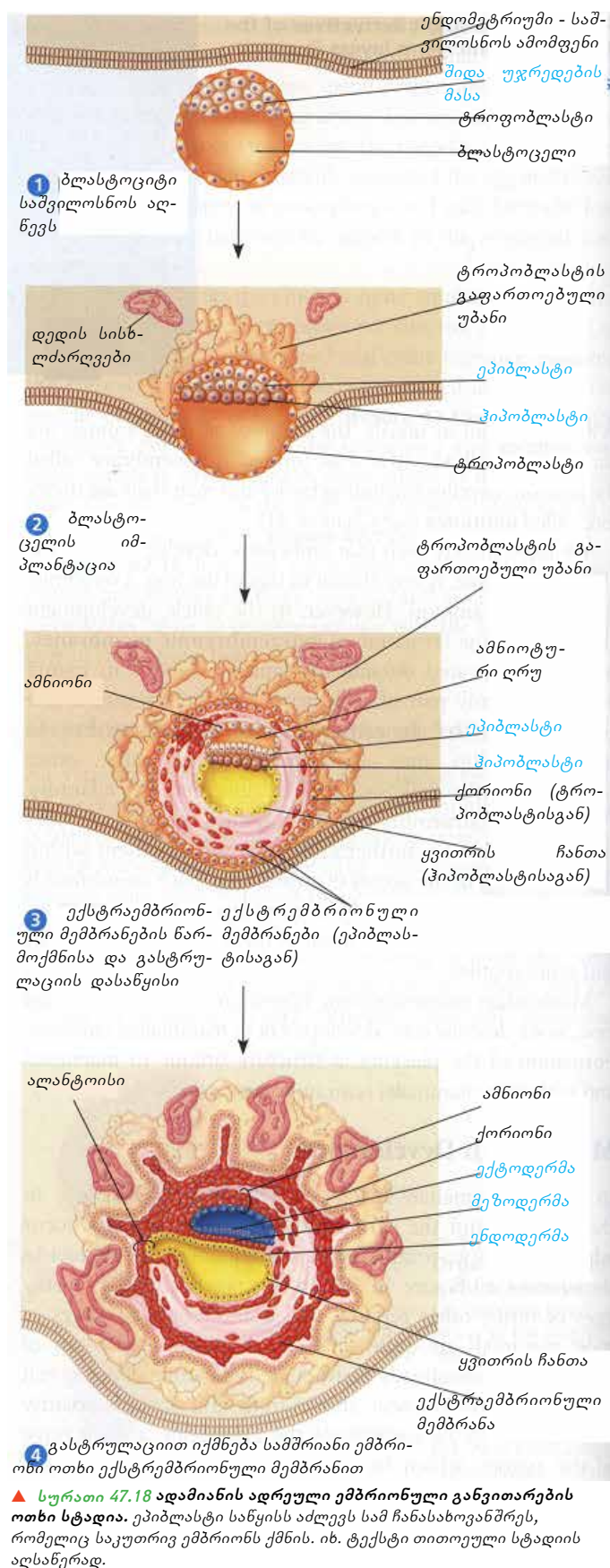
განვითარებად ცხოველებში უჯრედის ჩონჩხი ასევე აიძულებს უჯრედებს, განიცადონ მიგრაცია, გადაადგილდნენ ერთი ადგილიდან მეორე ადგილას. უჯრედები „ცოცავენ“ ემბრიონის შიგნით უჯრედის ჩონჩხის ბოჭკოების საშუალებით რომელიც იწვევს უჯრედოვანი გამონაზარდების გაწელვასა და შეკუმშვას. მოძრაობის ამგვარი უნარი ამეზობილურს ემსგავსება (სურ. 6.28), მაგრამ ამეზობილური უჯრედის სქელი ფსევდოპოდიებისგან განსხვავებით, ემბრიონის მიგრაციულ უჯრედებს ბრტყელი (ლამელიპოდი) ან მახვილი (ფილოპოდი) ფორმის უჯრედული გამონაზარდები აქვთ.

გასტრულაციის დროს ზოგიერთ ორგანიზმში ინვაგინაცია იწყება ბლასტულის ზედაპირზე უჯრედების სოლისებური ჩანერგვით, მაგრამ უჯრედების შესვლა ემბრიონის სიღრმეში განპირობებულია ფილოპოდის გაჭიმვით მიგრაციული ქსოვილის წინა, წამყვან პირზე. უჯრედები, რომლებიც პირველად მოძრაობენ ბლასტოპორის გავლით და ბლასტოციელის კედლის შიგნითა ზედაპირზე, თან სხვებსაც წაიყოლებენ და ამგვარად ეხმარებიან უჯრედების მთელ შრეს, სწორი მდგომარეობა დაიკავონ ბლასტოციელში. ჩახვეული ფორმა უჯრედთა ფენისა შემდეგ ქმნის ემბრიონის ენტოდერმასა და მეზოდერმას (იხ. სურ. 47.12). ამასთანავე, არის მრავალი ვითარება, როცა უჯრედები ინდივიდუალურად მიგრირებენ. მაგალითად, როცა ნერვული თხემი ან სომიტების უჯრედები იფანტებიან ემბრიონის სხვადასხვა ნაწილში.

უჯრედების ცოცვა აგრეთვე ჩართულია კონვერგენციულ გაფართოებაში, რაც მორფოგენეტიკური მოძრაობის ერთერთი ტიპია. ამ დროს ქსოვილის უჯრედები ისე გადაეწყობიან, რომ ქსოვილი ვიწრო ზოლის (კონვერგენციულ) ფორმას იღებს. ამავე დროს იგი ფართოვდება და გრძელდება (სურ. 47.20). როდესაც მრავალი უჯრედი სოლისებურად იჭრება ერთმანეთში, ქსოვილი შეიძლება მნიშვნელოვნად გაფართოვდეს. კონვერგენციული გაფართოება მნიშვნელოვანია ადრეული ემბრიონული განვითარებისთვის. ამ მოვლენას ადგილი აქვს, მაგალითად, ზღვის ზღარბში არქენტერონის დაგრძელებისას და ბაყაყის გასტრულის სპირალურად ჩახვევისას. უფრო გვიან, კონვერგენციული გაფართოება ხელს უწყობს ბაყაყის გასტრულის სფერული ფორმის შეცვლას მოგრძო ემბრიონად სურ. 47.14.

## ექსტრაცელულარული მატრიქსისა და უჯრედების ადჰეზიური მოლეკულების ბოლო

მეცნიერებმა ახლა მეტი იციან იმის შესახებ, რა გზებით ხდება უჯრედების მოძრაობის ჩართვა და მისი მიმდინარეობა. ეს პროცესი, როგორც ჩანს, მოიცავს უჯრედგარე (ექსტრაცელულარული) მატრიქს (ECM), რომელიც წარმოადგენს უჯრედების პლაზმური



მემბრანის მიერ გამოყოფილი გლიკოპროტეინების ნარევს (იხ. სურ. 6.29). ცნობილია, რომ ECM უჯრედების მრავალ ტიპის მორფოგენეტიკური მოძრაობის წარმართვას ეხმარება. სავარაუდოდ, ECM ბოჭკოები გზის როლს ასრულებენ, რომლებიც მიმართავენ მიგრაციულ უჯრედებს შესაბამისი უბნებისკენ. ზოგიერთი ექსტრაცელულარული გლიკოპროტეინი, ფიბრონექტინის ჩათვლით, მოძრავ უჯრედს უზრუნველყოფს სპეციალური მოლეკულური სამაგრით მიგრაციისათვის. ექსპერიმენტი, რომელიც 47.21-ე სურათზეა წარმოდგენილი, ფიბრონექტინის უჯრედის მიგრაციის წარმართვის ფუნქციას წარმოაჩენს.

ნაჩვენებია აგრეთვე, რომ ბაყაყის გასტრულაციის პერიოდში, ფიბრონექტინი ქსოვილის ჩაბრუნებაში წინა წამყვან პირზე იგივე როლს ასრულებს. ფიბრონექტინის ბოჭკოები ხაზობრივად ბლასტოციტის თაღზე და როდესაც მომავალი მეზოდერმა მოძრაობს ემბრიონის შიგნითა მიმართულებით, ჩაბრუნებული შრის თავისუფალ კიდეზე უჯრედები ბოჭკოს გასწვრივ მოძრაობენ (იხ. სურ. 47.12). მკვლევრებს ემბრიონში ფიბრონექტინის საწინააღმდეგო ანტისხეულის შეყვანით შეუძლიათ შეწყვიტონ უჯრედების მიმგრება ფიბრონექტინზე. ასეთი ზემოქმედებით ხდება მეზოდერმის შიგნითა მიმართულებით მოძრაობის შეწყვეტა.

ECM -ის სხვა ნივთიერებები უნარჩუნებენ უჯრედებს სწორ მიმართულებას მიგრაციას არასწორი მიმართულებით გადაადგილების შეკავებით. ამგვარად, არამიგრაციულ უჯრედებს, რომლებიც მიგრაციულ გზაზე არიან მოთავსებული, ნივთიერებების გამოყოფის გზით, შეუძლიათ ხელი შეუწყონ ან შეაკავონ სხვა უჯრედების მოძრაობა.

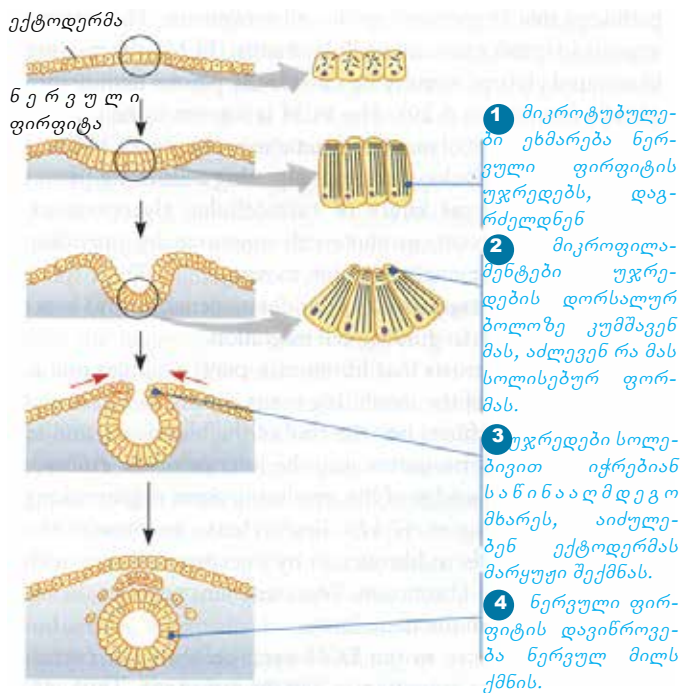
როდესაც მიგრაციული უჯრედები მოძრაობენ სპეციფიკური გზებით ემბრიონში, მათ ზედაპირზე მოთავსებული რეცეპტორული ცილები იღებენ სიგნალებს მათი უშუალო გარემოსგან. ECM-ს გარემოდან წამოსულ სიგნალებს შეუძლიათ განაპირობონ ციტოჩონჩხის ელემენტების გარკვეული ორიენტაცია, რაც იწვევს მათ გადაადგილებას სწორი მიმართულებით.

უჯრედების მიგრაციას ეხმარება და ქსოვილის სტაბილურობას განაპირობებს გლიკოპროტეინები,

რომლებსაც უჯრედის ადჰეზიური მოლეკულები (CAM) ეწოდება; ისინი განლაგებული არიან უჯრედის ზედაპირზე და სხვა უჯრედის CAM-ს უკავშირდება. CAM-ის რაოდენობა და ქიმიური შემადგენლობა ცვალებადია. უჯრედებს შორის აღნიშნული ცვალებადობა ეხმარება მორფოგენეტიკური მოძრაობის და ქსოვილის შენების რეგულაციას.

უჯრედების ადჰეზიის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კლასის მოლეკულები არიან კადჰერინები. ისინი საჭიროებენ კალციუმის იონებს სათანადოდ ფუნქციონირებისათვის. მრავალი სხვადასხვა კადჰერინი არსებობს. თითოეული მათგანის გენი ექსპრესირებს სპეციფიკურ ადგილზე და ემბრიონის განვითარების შესაბამის დროს. მკვლევრებმა ნათლად აჩვენეს ერთი კონკრეტული კადჰერინის მნიშვნელობა ბაყაყის ბლასტულის წარმოქმნისას (სურ. 47.22). კადჰერინები აგრეთვე მონაწილეობენ ძუძუმწოვრების ემბრიონის უჯრედების მჭიდროდ შეკავშირებაში რაც პირველად 8-უჯრედიან სტადიაზე გვხვდება, როცა კადჰერინის წარმოქმნა იწყება.

როგორც უკვე ვნახეთ, უჯრედების ქცევასა და მოლეკულურ მექანიზმებს ემბრიონის მორფოგენეზში თავის წვლილი შეაქვს. ძირითადად, იგივე უჯრედული და გენეტიკური პროცესები უზრუნველყოფენ რომ სხვადასხვა ტიპის უჯრედები საბოლოოდ სწორ

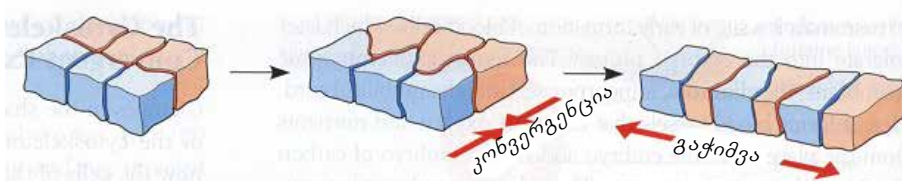


**▲ სურათი 47.19 უჯრედების ფორმის შეცვლა მორფოგენეზის დროს.** ციტოქინეზის რეორგანიზაცია ემბრიონული ქსოვილის მორფოგენეზურ ცვლილებებს უკავშირდება. სურათზე ნაჩვენებია ხერხემლიანთა ნერვული მილის წარმოქმნის პროცესი.

ადგილზე განლაგდებიან.

## ▶ ჯანჯიუცია 47.2

1. ნერვული მილის განვითარებისას კუბური ფორმის უჯრედები სოლისებურ უჯრედებით იცვლება. აღწერეთ, ამ პროცესებში მიკროტუბულებისა და მიკროფილამენტების როლი.
2. ბაყაყის ემბრიონში კონვერგენციული გაჭიმვა მიმდინარეობს ნოტოქონდრის დაგრძელებით ანტერიო-პოსტერიული ღერძის გასწვრივ. როგორ მუშაობს ეს მორფოგენეზური პროცესი?



**▲ სურათი 47.17 უჯრედების კონვერგენციული გაჭიმვა.** ამ გამარტივებულ დიაგრამაზე ნაჩვენებია უჯრედების ფორმის ისეთი ცვლილებები, რომლებიც განაპირობებს უჯრედების დაგრძელებას და დავინრობას. მოლეკულური სიგნალები აიძულებს უჯრედებს დაგრძელდნენ მესატყვისი მიმართულებით და შეცოცდნენ ერთმანეთში (კონვერგენცია), წარმართავენ მათ გაჭიმვას პერპენდიკულარული მიმართულებით.

## ▶ ჯანჯიუცია 47.3

### უჯრედების განვითარების გზა დამოკიდებულია მათ ისტორიაზე და ინდუქციურ სიგნალებზე

მორფოგენეზურ ცვლილებებთან ერთად, რომლებიც ცხოველსა და მის ნაწილებს დამახასიათებელ ფორმას ანიჭებს, განვითარება აგრეთვე საჭიროებს უჯრედების დროულ დიფერენცირებას მათი ადგილმდებარეობის მიხედვით. ორი ძირითადი პრინციპი აერთიანებს თანამედროვე ცოდნას გენეტიკური და უჯრედული მექანიზმების, რომლებიც საფუძვლად უდევს დიფერენცირებას ემბრიონული განვითარების დროს.

პირველი, ადრეული დანაწევრების დროს ემბრიონული უჯრედები როგორღაც ერთმანეთისგან განსხვავებულ ნიშნებს იძენენ. ცხოველთა მრავალ სახეობაში, უჯრედებს შორის ადრეულ განსხვავებას გაუწყობენ კვერცხის ციტოპლაზმური დეტერმინანტების არათანაბარი განაწილება განაპირობებს. პოლარიზებული კვერცხის ჰეტეროგენური ციტოპლაზმის გადანაწილებით დანაწევრება აჯგუფებს სხვადასხვა მრნმს, ცილებსა და სხვა მოლეკულებს ბლასტომერებში ასიმეტრიული უჯრედული დაყოფის ტიპით (სურ. 21.11ა). მიღებული განსხვავებები უჯრედის ციტოპლაზმის შემადგენლობაში ეხმარება სხეულის ღერძების განსაზღვრაში და გავლენას ახდენს იმ გენების ექსპრესიაზე, რომლებიც უჯრედების განვითარების ბედზე მოქმედებენ. ამნიოტებში, გარემოს ლოკალური განსხვავებები მთავარ როლს ასრულებენ ემბრიონული უჯრედების ადრეული განსხვავებების წარმოქმნაში. მაგალითად, უჯრედები შინაგან უჯრედთა მასაში მოთავსებულია ადამიანის ადრეული ემბრიონის შიგნით, მაშინ, როდესაც ტროფობლასტების უჯრედები ბლასტოციტის გარეთა ზედაპირზეა განლაგებული. უჯრედების ამ ორი ჯგუფის განსხვავებული გარემო, როგორც ჩანს, მათ ძალიან განსხვავებულ ბედს განაპირობებს.

მეორე, როგორც კი საწყისი უჯრედების ასიმეტრულობა გამოვლინდება, ემბრიონული უჯრედების შემდგომი ურთიერთქმედება გავლენას ახდენს მათ ბედზე, რაც ჩვეულებრივ გენების ექსპრესიის ცვლილებით არის განპირობებული. ამ მექანიზმს, რომელსაც ინდუქციის სახელწოდებით არის ცნობილი, საბოლოოდ მიყვავართ მრავალი სპეციალიზებული უჯრედის ტიპის ჩამოყალიბებად, რომელიც ცხოველის სხეულს ქმნის. ინდუქცია მრავალი ქიმიური სიგნალით შეიძლება იქნას გამოწვეული, ან უჯრედებს შორის უშუალო კონტაქტის გზით.

ამ ორი პრინციპის გათვალისწინება დაგვეხმარება გავერკვეთ დიფერენცირების და პატერნების ჩამოყალიბების მოლეკულურ და უჯრედულ მექანიზმებში სახეობათა ემბრიონული განვითარების დროს. იმისთვის, რომ გავცეთ პასუხი კითხვაზე – როგორ განისაზღვრება ადრეული ემბრიონული უჯრედების ბედი, ჩვენ უნდა გავერკვეთ, რა არის ბედი. ამდენად, ჯერ განვიხილოთ რამდენიმე ისტორიული ექსპერიმენტი, რომლებმაც ადრეულ

## სურათი 47.21

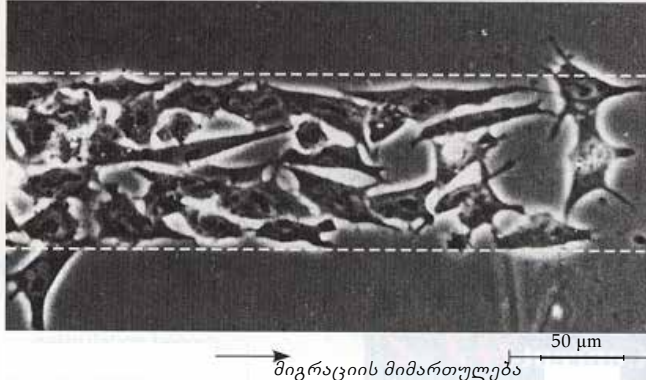
**კვლევა:** უწყდამს თუ ატა ფიბრონექტინი უჯრედების მიგრაციას?

### ექსპერიმენტი

მკვლევრებმა ფიბრონექტინის ზოლი მოათავსეს ხელოვნურ არეზე. შემდეგ ამ ზოლზე ნერვული ჯვარედინის მიგრაციული უჯრედები მოათავსეს და მკვლევარები უჯრედების მოძრაობას სინათლის მიკროსკოპით აკვირდებოდნენ.

### შედეგები

ამ მიკროფოტოზე ნაჩვენებია წვეტილი ხაზი მიუთითებს ფიბრონექტინის საზღვრებს. მიაქცევით ყურადღება, რომ უჯრედები ზოლის გასწვრივ მოძრაობენ და არ გადადიან საზღვრებზე.



მიგრაციის მიმართულება

### დასკვნა

ფიბრონექტინი ეხმარება უჯრედებს მიგრაციაში მოძრავი უჯრედებისათვის საყრდენი ფუნქციის შესრულებით.

მკვლევრებს უჯრედის ბედის შესახებ ინფორმაციის მოგროვებაში ხელი შეუწყო.

## ბუდის რუკების შექმნა

როგორც 21-ე თავში განვიხილეთ, მკვლევრებისათვის ცნობილია ნემატოდა *Caenorhabditis elegans*-ის ყველა უჯრედის ბედი, ზიგოტის პირველი დაყოფა-დანაწევრიანების დასაწყისიდანვე (იხ. სურ. 21.15). მიუხედავად იმისა, რომ უჯრედების ასეთი სრული შთამომავლობითი (წარმოშობის) რუკები სხვა ცხოველებისთვის არ არის განსაზღვრული, ბიოლოგები წლების მანძილზე მაინც ქმნიან ემბრიონული განვითარების ზოგად ტერიტორიულ დიაგრამებს, რომლებსაც ბუდის რუკები ეწოდება. კლასიკურ კვლევებში, რომლებიც 1920-იან წლებში ტარდებოდა, გერმანელმა ემბრიოლოგმა ვოგტმა ამფიბიების ადრეული ემბრიონის სხვადასხვა უბნის ბუდის რუკა შექმნა. ვოგტის მონაცემები პირველი იყო მათ შორის, ვინც აჩვენა, წარმოშობის ხაზი ბლასტულის გარკვეული უჯრედებიდან გასტრულაციის შედეგად შექმნილი ჩანასახის სამ შრეებამდე (სურ. 47.23ა). უფრო გვიანდელი მკვლევრები ავითარებდნენ უფრო დახვეწილ ტექნიკას, რომელიც მათ საშუალებას აძლევდა, მოენიშნათ ცალკეული ბლასტომერი გაყოფის დროს და გაჰყოლოდნენ მარკერს ამ უჯრედის ყოველი მიტოზური დაყოფის განმავლობაში (სურ. 47.23ბ).

განვითარების ბიოლოგები აკომბინირებენ ემბრიონის სხვადასხვა ნაწილის ბუდის რუკების შესწავლას იმ ექსპერიმენტულ

## სურათი 47.22

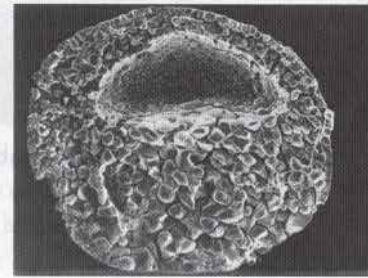
**კვლევა:** აუცილებელია თუ ატა კადჰერინი ბლასტულის განვითარებისთვის?

### ექსპერიმენტი

მკვლევრებმა ბაყაყის კვერცხში შეიყვანეს ნუკლეინის მჟავა, რომელიც კომპლემენტარული იყო EP კადჰერინის მაკოდირებული საინფორმაციო რნმ-ის მიმართ. ეს „არამგრძნობიარე“ ნუკლეინის მჟავა იწვევს ნორმალური EP კადჰერინის ირნმ-ის დესტრუქციას და ამგვარად EP კადჰერინის ცილა არ წარმოიქმნება ბაყაყის სპერმაში, როდესაც იგი შემდგომში ემატება საკონტროლო (არაინექტირებულ) და ექსპერიმენტულ (ინექტირებულ) კვერცხს. საკონტროლო და ინექტირებული ემბრიონები შეისწავლებოდა სკანირებით ელექტრონულ მიკროსკოპში.

### შედეგები

როგორც ნაჩვენებია ამ მიკროგრაფებზე, განაყოფიერებული საკონტროლო და ექსპერიმენტული კვერცხი ნორმალურ ბლასტოცელად იყოფა. EP კადჰერინის არარსებობისას ბლასტოცელი ნორმალურად არ ვითარდება და უჯრედები არაორგანიზაციულად განლაგდება.



საკონტროლო ემბრიონი



ექსპერიმენტული ემბრიონი

### დასკვნა

ბაყაყის ბლასტულის სწორი ჩამოყალიბებისთვის საჭიროა ED კადჰერინი.

სამუშაოსთან, სადაც ისინი იკვლევდნენ, იცვლება თუ არა უჯრედების განვითარება მათი ემბრიონში გადაადგილებით. მიღებულ იქნა ორი მნიშვნელოვანი დასკვნა. პირველი, ძუძუმწოვართა უმრავლესობაში, მოზრდილი ემბრიონის სპეციფიკური ქსოვილისათვის შეიძლება შთამომავლობითი კავშირი დადგინდეს ადრეული „დაზარალებულ უჯრედებთან“ მეორე, განვითარებასთან ერთად, უჯრედების განვითარების პოტენციალი – სტრუქტურების რიგი, რომელსაც ის აძლევს დასაბამს, ხდება შეზღუდული (მიმოხილვისთვის იხ. უჯრედების განვითარების განსაზღვრა 21-ე თავში). ნორმალური ემბრიონის განვითარების რუკაზე დაყრდნობით, მკვლევრებს შეუძლიათ გამოიკვლიონ, როგორ იცვლება უჯრედების დიფერენცირება ექსპერიმენტულ ვითარებაში ან მუტანტ ემბრიონებში.

## უჯრედული ასიმეტრიის წარმოქმნა

იმისათვის, რომ გავიგოთ, მოლეკულურ დონეზე როგორ იძენენ თავის განვითარების გზას ემბრიონის უჯრედები, ჯერ გავერკვეთ, როგორ წარმოიქმნება ემბრიონის ძირითადი ღერძები. ისინი ხშირად დაკავშირებულია გარკვეულ ადრეული განვითარების მოვლენასთან, რაც უჯრედული ასიმეტრიის საწყისს წარმოადგენს. ამის საფუძველზე იქმნება სხეულის გეგმა.

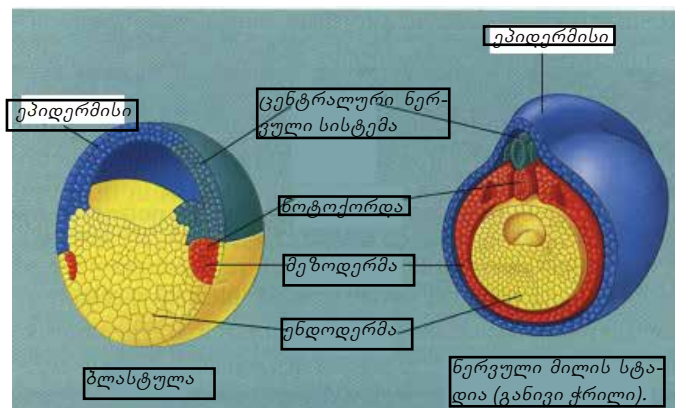
## სხეულის ძირითადი გეგმის ღერძები

როგორც უკვე იცით, ბილატერალური სიმეტრიის მქონე ცხოველებს ანტერიორ-პოსტერიული ღერძი, დორსო-ვენტრალური და მარჯვენა და მარცხენა მხარე აქვთ (იხ. სურ. 47.8ა). სხეულის ძირითადი გეგმის წარმოქმნა არის მორფოგენების პირველი ნაბიჯი და აუცილებელია ქსოვილებისა და ორგანოების განვითარებისათვის. არაამნიოტურ სერხემლიანებში, სხეულის ღერძების შექმნის ინსტრუქცია ადრეულ პერიოდში ოოგენეზისა და განაყოფიერების დროს იქმნება. მაგალითად, ბევრ ბაყაყში მელანიზისა და ყვითრის ლოკალიზაციას გაუნაყოფიერებელ კვერცხში ცხოველური და ვეგეტატური ჰემისფეროები განსაზღვრავს. შესაბამისად, ცხოველურ-ვეგეტატური ღერძი პირდაპირ განსაზღვრავს სხეულის წინა-უკანა ღერძს. განაყოფიერება ჩართავს ქერქულ როტაციას, რომელიც წარმოქმნის დორსო-ვენტრალურ ღერძს და იმავდროულად რუხი ნახევარმთვარის წარმოქმნას განაპირობებს, რომლის პოზიცია დორსალური მხარის ნიშნულია (იხ. სურ. 47.8ბ). როგორც კი ორი ღერძი წარმოიქმნება მესამე (ამ შემთხვევაში მარჯვენა-მარცხენა) ღერძის განსაზღვრა თავისთავად ხდება (რა თქმა უნდა, სპეციფიკურმა მოლეკულურმა მექანიზმებმა უნდა წარმართონ ამ ღერძებთან ასოცირებული პატერნები).

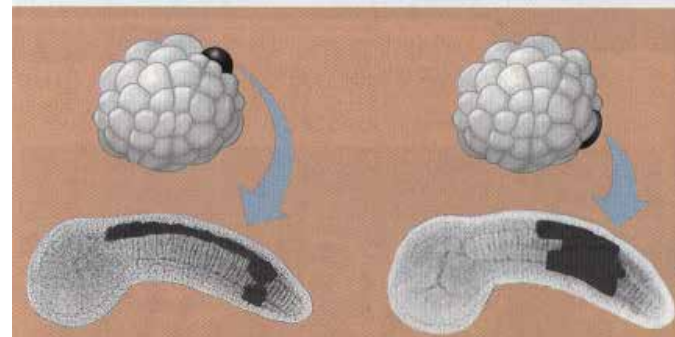
ამნიოტებში სხეულის ღერძები მოგვიანებით ყალიბდება. ქათმებში მიზიდულობის ძალა სავარაუდოდ მონაწილეობს წინა-უკანა ღერძის წარმოქმნაში, როგორც კი კვერცხი იწყებს კვერცხსავალში მოძრაობას. მოგვიანებით, ბლასტოდერმის უჯრედების ორ მხარეს შორის pH განსხვავება დორსო-ვენტრალურ ღერძს წარმოქმნის (იხ. სურ. 47.10). თუ pH ხელოვნურად შეიცვლება, ბლასტოდერმის ზემოთ და ქვემოთ, ნაწილი რომელიც მიმართულია კვერცხის ცილისკენ გარდაიქმნება მუცლათ (ვენტრალურად), ხოლო ყვითრისკენ მიმართული მხარე გარდაიქმნება ზურგათ (დორსალური მხარე), მათი ნორმალური განვითარების საწინააღმდეგოდ. ძუძუმწოვრებში პოლარობა არ ვლინდება დაყოფამდე, თუმცა ბოლო დროის გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ კვერცხისა და სპერმის ბირთვების ორიენტაცია მათ შერწყმამდე ღერძების დეტერმინირებაში თამაშობს როლს.

## უჯრედული პოტენციის შეზღუდვა

მრავალ სახეობაში, რომელსაც ციტოპლაზმის დეტერმინატორები აქვთ, მხოლოდ ზიგოტა არის ტოტიპოტენტური, რაც იმას ნიშნავს რომ ზრდასრულებში აღმოჩენილ ყველა ტიპის უჯრედების განვითარების შესაძლებლობას იძლევა. ამ ორგანიზმებში პირველი დაყოფა ასიმეტრიულია. წარმოიქმნება ორი ბლასტომერი, რომლებიც ციტოპლაზმის სხვადასხვა დეტერმინატორებს იღებენ. თუმცა, იმ სახეობებში კი, რომლებსაც ციტოპლაზმური დეტერმინანტები აქვთ, პირველი დაყოფა შეიძლება მოხდეს იმ ღერძის გასწვრივ, რომელიც ორ იდენტურ ბლასტომერს ქმნის. ამ ბლასტომე-



(ა) ბაყაყის ემბრიონული განვითარების სქემა. უჯრედების ჯგუფების განვითარება ბაყაყის ბლასტულაში (მარცხნივ) ნაწილობრივ განსაზღვრულია ბლასტულას ზედაპირზე სხვადასხვა უბნის არატოქსიკური სხვადასხვა ფერის საღებავებით მონიშვნით. ემბრიონი გაკვეთილ იქნა განვითარების უფრო გვიან სტადიაზე, რაც სურათის მარჯვენა მხარესაა განლაგებული და შედეგად უჯრედები ნაჩვენებია.



(ბ) უჯრედების შთამომავლობის ანალიზი გარსიანებში. შთამომავლობის ანალიზისთვის დაყოფისას ინდივიდუალურ უჯრედში შეყვანილ იქნა საღებავი, როგორც ეს ნაჩვენებია ტუნიკატების 64 უჯრედიან ემბრიონში სინათლის მიკროგრაფიებზე. მუქი უბნები შეესაბამება ლარვის სტადიას, რომლის უჯრედები სხვადასხვაგვარად განვითარდნენ ორი განსხვავებული ბლასტომერისაგან, როგორც ეს სურათზეა ნაჩვენები.

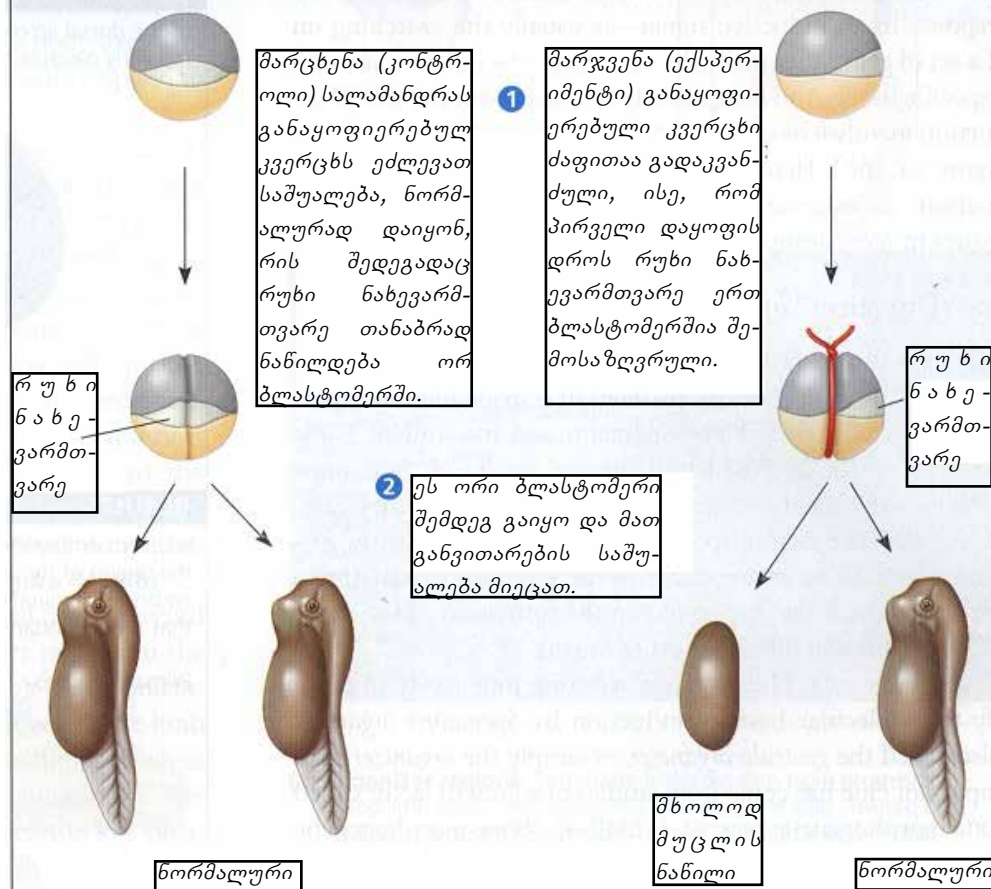
▲ სურათი 47.23 ორი ქორდიანის ჩანასახოვანი განვითარების სქემა.

რებს განვითარების ერთნაირი პოტენციალი აქვთ. ეს ამფიბიებში ხდება და პირველად ექსპერიმენტში აღწერილი იყო გერმანელი ზოოლოგის ჰანს შპემანის მიერ 1938 წ. (სურ. 47.24).

ამგვარად, ემბრიონის განვითარების ბედს შეიძლება ეხებოდეს არა მარტო ციტოპლაზმის დეტერმინანტების განაწილება, არამედ ისიც, როგორ მოქმედებს ეს განაწილება ზიგოტის დაყოფის პატერნებზე. ამის საწინააღმდეგოდ, მრავალი სხვა ცხოველისგან განსხვავებით, ძუძუმწოვრების უჯრედები ტოტიპოტენტური რჩება 16-უჯრედიან სტადიამდე, როცა ისინი გროვებიან ტროპობლასტის პრეკურსორებში და ბლასტოცისტის შიგნითა უჯრედების მასაში. ამავე დროს, მათი განსხვავებული ლოკალიზაცია განაპირობებს მათი განვითარების ბედს. ძუძუმწოვრების ადრეული ბლასტომერები, როგორც ჩანს, კვერცხის ციტოპლაზმის კომპონენტების ეკვივალენტურ რაოდენობას იღებენ. მართლაც,

**კვლევა:** ბიგდარ მიქმდელს პირველი დაყოფისას მიმდინარე ტიპი ნახევარბო-გარის განაწილება იმ შვილოელი უჯრედის პოტენციალზე?

### მსპერიმენტი



### შედეგები

ბლასტოპორი, რომელმაც მიიღო რუხი ნახევარბოგარე მთლიანად ან მისი ნახევარი, მაგრამ ბლასტოპორი, რომელშიც რუხი ნახევარბოგარე არ მოხვდა, განვითარდა დორსალური სტრუქტურების არმოქმე ანომალურ ემბრიონად. სპემანმა მას მუცლის ნაწილი დაარქვა.

### დასკვნა

ორი ბლასტოპორის ტოტიპოტენტობა, რომელიც ნორმაში ყალიბდება პირველი დაყოფისას, დამოკიდებულია რუხ ნახევარბოგარეში მდებარე ციტოპლაზმურ დეტერმინანტზე.

8-უჯრედიან სტადიამდე, ძუძუმწოვრების ემბრიოგენეზის ბლასტომერები ყველა ერთმანეთს ჰგავს და თითოეულს ცალკე-ცალკე სრული ემბრიონის ფორმირება შეუძლია. მიუხედავად იმისა, ადრეული ემბრიონალური უჯრედები განსხვავებული ან მსგავსი არიან ცალკეულ სახეობაში, პოტენციის პროგრესული რესტრიქცია (შეზღუდვა) არის ყველა ცხოველისთვის ზოგადი ნიშან-თვისება. ზოგიერთ სახეობაში, ადრეული გასტრულის უჯრედებს შენარჩუნებული აქვთ უნარი ერთი სახის უჯრედებზე მეტ უჯრედს მისცეს დასაბამი, თუმცა მათ დაკარგული აქვთ ტოტიპოტენტურობა. დორსალური ექტოდერმა ამფიბიების ადრეულ გასტრულაში ნოტოქორდის ზემოთ ნერვულ ფირფიტად ვითარდება. თუ დორსა-

ლური ექტოდერმა ექსპერიმენტულად შეიცვლება იგივე გასტრულას სხვა უბნის ექტოდერმით, ტრანსპლანტირებული ქსოვილი ნერვულ ფირფიტად გადაიქცევა. თუ იგივე ექსპერიმენტი გასტრულას უფრო გვიან სტადიაზე ხორციელდება, ტრანსპლანტირებული ექტოდერმა აღარ პასუხობს მის ახალ მდებარეობაზე და ნერვული ფირფიტა აღარ წარმოიქმნება. ზოგადად, გვიანი გასტრულის უჯრედების ქსოვილის სპეციფიკური ბედი ფიქსირებულია მაშინაც კი, როცა მანიპულაცია ექსპერიმენტულად ხორციელდება. ეს უჯრედები ჩვეულებრივ დასაბამს აძლევენ იგივე ტიპის უჯრედებს, როგორც ეს ნორმალურ ემბრიონებში ხდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ მათი განვითარების ბედი უკვე განსაზღვრულია.

### უჯრედების ბედის განსაზღვრა და ინდუქციური სიგნალების ფიქსირება

როგორც კი ემბრიონული უჯრედების დანაწევრება ხდება, უჯრედები, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდება, ინდუქციის გზით მოლეკულურ დონეზე ერთმანეთის განვითარების ბედზე ზემოქმედებას იწყებენ. ინდუქციის ეფექტი, პასუხი ინდუქციურ სიგნალებზე, ჩვეულებრივ, არის გენების იმ ნაწილის ჩართვა, რომელიც იწვევს უჯრედების დიფერენცირებას სპეციფიკურ ქსოვილად. თქვენ უკვე გაცანით ინდუქციის როლს ნემატოდა *C. elegans*-ის კვერცხსავალის განვითარებაში (იხ. სურ. 21.16b). აქ ჩვენ განვიხილავთ ინ-

დუქციის ორ სხვა მაგალითს.

### შპემანისა და მანგოლდის „ორგანიზერი“

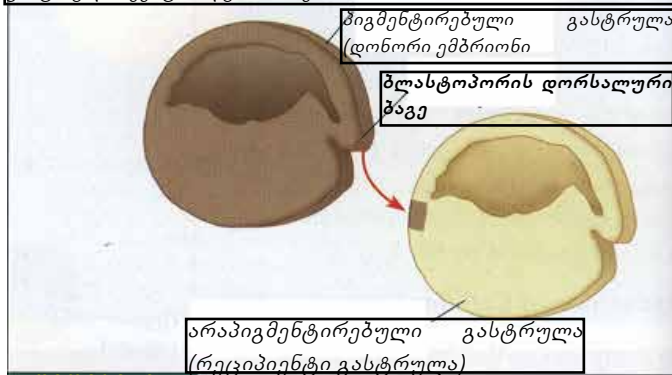
ინდუქციის მნიშვნელობა ამფიბიების განვითარების განმავლობაში თვალსაჩინოდ იქნა დემონსტრირებული ტრანსპლანტაციურ ექსპერიმენტებში, რომლებიც 1920-იან წლებში ჩატარდა ჰანს შპემანისა და მისი სტუდენტის ჰილდა მანგოლდის მიერ. 47.25-ე სურათზე თავმოყრილია მათი ყველაზე ცნობილი ექსპერიმენტის დასკვნები. ისინი ადასტურებენ, რომ ადრეული გასტრუ-

## სურათი 47.25

**კვლევა:** შიბლენა თუ აბა მლასცფაშის დორსალ-  
ჰერმა ზაგმ ამფიბიის ემბრიონის მცირე მსაჩის  
უჯრედების განვითარება შეცვალის?

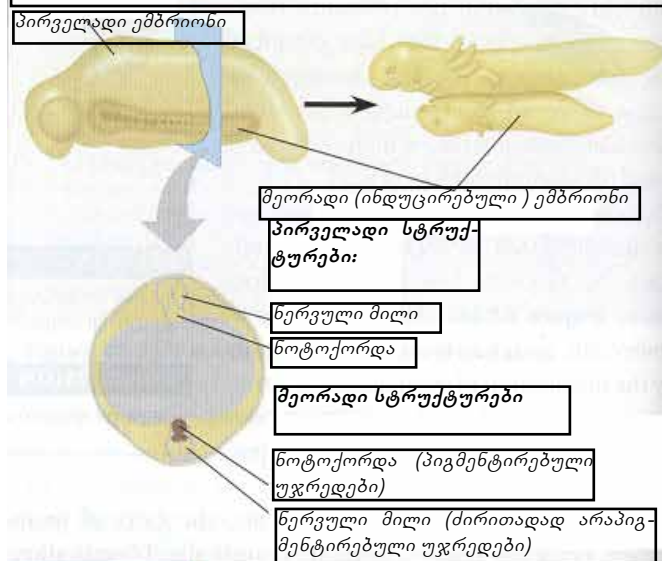
## მასპერმენტი

სპიშანმა და მანგოლდმა გადანერგეს პიგმენტირებული ტრიტონის  
დორსალური ბაგის ნაწილი არპიგმენტირებული ტრიტონის ადრეული  
გასტრულის ვენტრალურ მხარეს.



## შედეგები

თანმიმდევრული განვითარების განმავლობაში, რეციპიენტი ემბრიონში ტრანსპლანტანტის უბანში მეორე ნოტოქორდა და ნერვული მილი ყალიბდება და საბოლოოდ თითქმის მთელი მეორე ემბრიონი. შინაგანმა გამოკვლევამ აჩვენა, რომ დუბლირებული ემბრიონის მეორადი სტრუქტურები მასპინძლის ქსოვილებისგან წარმოიქმნა.



## დასკვნა

ტრანსპლანტირებულ დორსალურ ბაგეს რეციპიონტის სხვადასხვა უბნის უჯრედების სტიმულირების საშუალებას  
ჭკონდა — მათი ნორმალური შთამომავლობისაგან განსხვავებული  
სტრუქტურები უნდა შექმნილიყო. შედეგად, დორსალურ ბაგე „ორ-  
განიზებას“ უკეთებს მთლიანი ემბრიონის განვითარებას უფრო გვიან  
სტადიაზე.

ლის ბლასტოპორის დორსალური ბაგე ფუნქციონირებს, როგორც  
ემბრიონის ორგანიზერი რომელიც იწვევს ინდუქციის მთელ სე-  
რიას, რის შედეგად წარმოიშობა ნოტოქორდი, ნერვული მილი და  
სხვა ორგანოები.

განვითარების ბიოლოგები ინტენსიურად მუშაობენ ინდუქ-  
ციის მოლეკულურ საფუძვლებზე, რომელიც შპემანის ორგანი-  
ზერით (გასტრულას ორგანიზერი, ან უბრალოდ ორგანიზერი)  
ხდება. მნიშვნელოვანი გასაღები ზრდის ფაქტორის შესწავლითაა  
მიღებული. მას ძვლის მორფოგენეტიკური ცილა 4(BMP-4) ეწოდე-  
ბა (ძვლის მორფოგენეტიკური ცილები მსგავსი ცილების ოჯახს  
მიეკუთვნება, რომლებსაც განვითარების პროცესში სხვადასხვა  
როლი გააჩნიათ; თავისი სახელწოდება მიიღეს იმ ოჯახის ცილე-  
ბიდან, რომლებიც ძვლის შექმნაში მონაწილეობენ). ამფიბიების  
BMP-4 გამორჩეულად აქტიურია გასტრულას ვენტრალური კიდე-  
ს უჯრედებში, იწვევს ამ უჯრედების მოგზაურობას ქვემოთ, ვენტ-  
რალური სტრუქტურების შექმნის მიმართულებით. ორგანიზე-  
რის უჯრედების ერთი ძირითადი ფუნქცია, როგორც ჩანს, არის  
BMP-4-ის ინაქტივაცია ემბრიონის დორსალურ კიდეზე იმ ცილის  
პროდუცირებით, რომელიც უკავშირდება BMP-4-ს და სიგნალის  
წარმოშობის უნარს აკარგვინებს. ეს, თავის მხრივ, დორსალური  
სტრუქტურების, როგორცაა ნოტოქორდა და ნერვული მილი,  
ფორმირების ნებას აძლევს. BMP-4 მონათესავე პროტეინები და  
მათი ინჰიბიტორები სხვა ცხოველებშიცაა ნაწილი, მათ შორის  
უხერხემლოებში, როგორცაა, მაგალითად, ხილის ბუზი დროზო-  
ფილა. ამ მოლეკულების ყველაზე არსებობა იმაზე მიუთითებს,  
რომ ისინი ძალიან დიდი ხნის წინ წარმოიშვნენ და მრავალი განსხ-  
ვავებული ორგანიზმის განვითარებაში იღებდნენ მონაწილეობას.

ინდუქცია, რომელიც განაპირობებს დორსალური ექტოდერ-  
მის ნერვულ მილად განვითარებას, უჯრედის უჯრედთან ურთიერ-  
ობის მხოლოდ ერთ-ერთი მაგალითია, რაც ჩანასახის სამი შრი-  
დან ორგანოთა სისტემების წარმოქმნას განაპირობებს. მრავალი  
სახის ინდუქცია, როგორც ჩანს, ჩართულია ინდუქციური ნაბიჯე-  
ბის თანმიმდევრობაში, რომელიც პროგრესულად განაპირობებს  
უჯრედების ბედს. მაგალითად, ბაყაყის გვიანდელ გასტრულაში,  
ექტოდერმის უჯრედები, რომლებიც გადაიქცევიან თვალების  
ლინზებად, იღებენ ინდუქციურ სიგნალებს ექტოდერმის უჯრე-  
დებიდან, რომლებიც ნერვულ ფირფიტად გადაიქცევა. ამასთან  
ერთად, შესაძლებელია, რომ ინდუქციური სიგნალები ენტოდერ-  
მალური და მეზოდერმალური უჯრედებიდანაც მომდინარეობდეს.  
და ბოლოს, ინდუქციური სიგნალები ოპტიკური ფიალიდან, რაც  
ტვინის გამომზარდია, ასრულებენ ემბრიონის ლინზის უჯრედების  
დეტერმინაციის პროცესს.

## ხერხემლიანთა კიდურების წარმოქმნა

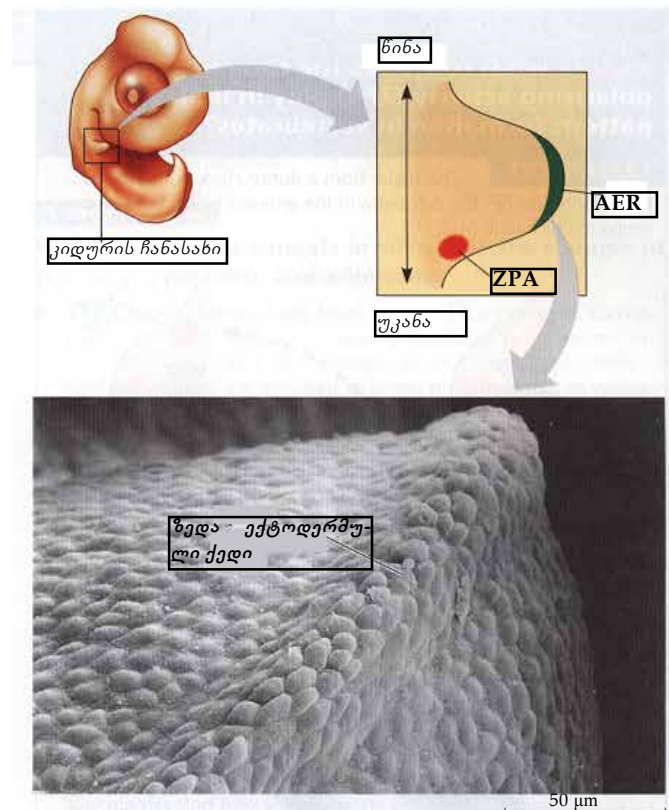
გასტრულის ორგანიზერის მოქმედება არის ინდუქციის კლა-  
სიკური მაგალითი. ჩვენ შეგვიძლია დავინახოთ, რომ ორგანიზე-  
რიდან მომდინარეობს უჯრედების განვითარების ბედი, რომელიც  
შესაბამისობაშია მათ მდებარეობასთან. ამგვარად, ინდუქციური  
სიგნალები ძირითად როლს თამაშობენ პატერნის ფორმირებაში —  
ცხოველის სივრცული განვითარების ორგანიზაციაში, ორგანოები-  
სა და ქსოვილების განლაგებაში მათთვის დამახასიათებელ ადგი-  
ლებზე სამგანზომილებიან სივრცეში. მოლეკულურ კარნახს, რომე-  
ლიც აკონტროლებს პატერნების შექმნას, პოზიციური ინფორმაცია  
ეწოდება. იგი ეუბნება უჯრედს, სად არის მისი შესაბამისი ადგილი  
ცხოველის სხეულის ღერძის მიმართ და ეხმარება განსაზღვროს,  
როგორ უნდა უპასუხოს უჯრედმა და მისმა წარმოებულებმა მომა-  
ვალ მოლეკულურ სიგნალს. 21-ე თავში ჩვენ განვიხილეთ პატერ-

ნების ფორმირება სხეულის სეგმენტების განვითარებისას დროზოფილებში. ძუძუმწოვრებში პატერნების ფორმირების გასაგებად, მივმართოთ წიწილის კიდურების განვითარების კლასიკური მოდელის სისტემას. წიწილის ფრთები და ფეხები, ყველა ხერხემლიანის კიდურის მსგავსად, იწყება კვირტის მსგავსი გამონაზარდით (სურ. 47.26ა). წიწილის კიდურის ყოველი კომპონენტი, როგორცაა სპეციფიკური ძვალი ან კუნთი, ვითარდება ზუსტი ლოკალიზაციით სამი ღერძის მიმართულების შესაბამისად: პროქსიმალურ-დისტალური ღერძი (მხარი – თითის ღერძი), ანტერიორ-პოსტერიული ღერძი (ცერი – ნეკის ღერძი) და დორსო-ვენტრალური ღერძი (თითის სახსარი – ხელისგული). ემბრიონალური კიდურის კვირტის უჯრედები პასუხობენ პოზიციურ ინფორმაციაზე, რომელიც განსაზღვრავს მდებარეობას ამ სამი ღერძის მიმართულებით (სურ. 47.26ბ). კიდურების კვირტი შედგება მეზოდერული ქსოვილის გულარისგან, რომელიც ექტოდერმის შრითაა დაფარული. ორ კრიტიკულ მარგანიზირებელ უბანს კიდურების კვირტში ძლიერი ეფექტი აქვს კიდურების განვითარებაში. ეს ორი მარგანიზირებელი უბანი წარმოდგენილია ყველა ხერხემლიანში იმის ჩათვლით, რომლებიც წინა კიდურების (ფრთები ან მკლავები) განვითარებას უზრუნველყოფენ და რომლებიც უკანა კიდურების წარმოშობასაც განაპირობებენ. ამ უბნების უჯრედები გამოყოფენ ცილებს, რომლებსაც გადაწყვეტი მიწვევლობა ენიჭებათ პოზიციური ინფორმაციის გადაცემაში კვირტის სხვა უჯრედებისათვის.

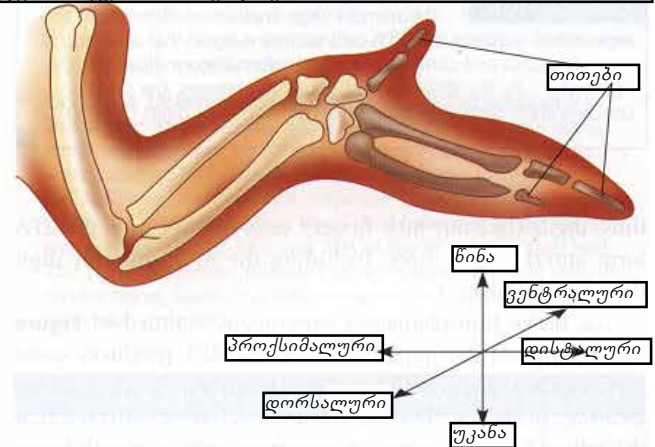
კიდურების კვირტის ერთი ორგანიზერი მოთავსებულია აპიკალური ექტოდერმის ქიშხე (AER), კვირტის წვერზე ექტოდერმის გაწვრილებულ უბანში (სურ. 47.26გ). AER აუცილებელია კიდურის გაზრდისათვის პროქსიმალურ-დისტალური ღერძის მიმართულებით და ამ ღერძის პატერნების შექმნისთვის. AER უჯრედები გამოყოფენ ცილების სიგნალებს რომლებიც მიეკუთვნება ფიბრობლასტის ზრდის ფაქტორის (FGF) ოჯახს. თუ AER ოპერციულად გადაადგილდება და FGF-ით გაჟღენთილი მარცვალი მის ადგილზე თავსდება, ნორმალური კიდური განვითარდება. AER და კვირტის სხვა ექტოდერმა, როგორც ჩანს, კიდურის დორსო-ვენტრალური ღერძის შესაბამის პატერნს ქმნის. ექსპერიმენტში, სადაც კიდურის კვირტის ექტოდერმა AER-თან ერთად ჩამოშორდება მეზოდერმას და შემდეგ ადგილი შეეცვალემა თავისი საწყისი ორიენტაციიდან 180° უკნიდან-წინ დატრიალებით, კიდურის ჩამოყალიბებული ელემენტი დორსო-ვენტრალური მიმართულებით გადაადგილდება (ეს თქვენი ხელის გულისა და ხელის ზურგის მობრუნების ეკვივალენტურია).

კიდურის კვირტის მეორე ძირითადი უბანი არის პოლარიზებული აქტივობის ზონა (ZPA), მეზოდერმის ქსოვილის ბლოკი, რომელიც ექტოდერმის ქვეშ მდებარეობს, სადაც კვირტის უკანა მხარე სხეულს ეხება (იხ. სურ. 47. 26ა). ZPA აუცილებელია კიდურის ანტერო-პოსტერიული ღერძის შესაბამისი პატერნის ჩამოყალიბებისთვის. ZPA უახლოესი უჯრედები დასაბამს აძლევს უკანა სტრუქტურებს, მაგალითად უშორეს თითებს (ჩვენი ნეკის მსგავსად). უჯრედები ZPA-ს მოშორებით ქმნიან წინა სტრუქტურებს, რომლებიც წინა თითების უმეტესობას შეიცავს.

ქსოვილების ტრანსპლანტაციის ექსპერიმენტებში, რაც 47. 27-ე სურათზეა ნაჩვენები, შემოთავაზებულია ჰიპოთეზა იმის თაობაზე, რომ ZPA ქმნის ინდუქციურ სიგნალს, რომელიც აწვდის „უკან მდგომარეობის“ ინფორმაციას. მკვლევრებმა აღმოაჩინეს, რომ ZPA უჯრედები გამოყოფენ ზრდის ფაქტორის ცილებს, რომლებსაც სმენითი ეკლები ეწოდება. თუ უჯრედები, რომლებიც



(ა) ორგანიზერის უბნები. ხერხემლიანთა კიდურები ვითარდება გამონაზარდებიდან, რომლებსაც კიდურის კვირტებს უწოდებენ. თითოეული შეიცავს მეზოდერმის უჯრედებს, რომლებიც ექტოდერმის შრითაა დაფარული. ორი უბანი, რომლითაც მთავრდება აპიკალური ექტოდერმალური კიდე (დ, ნაჩვენებია SEM) და პოლარიზებული აქტივობის ზონა (ZPA) თამაშობენ მთავარი ორგანიზერის როლს კიდურის პატერნის ჩამოყალიბებაში.



(ბ) ნიხლის ემბრიონის ფრთები. როგორც კი კვირტი კიდურად ვითარდება, ქსოვილების სპეციფიკური პატერნი წარმოიქმნება. ნიხლის ფრთაში, მაგალითად, სამი თითი წარმოდგენილია აქ მოყვანილ გეგმაზე. პატერნის ფორმირებას ესაჩიროება, რომ თითოეულმა ემბრიონულმა უჯრედმა მიიღოს გარკვეული პოზიციური ინფორმაცია, რომლითაც განისაზღვრება მისი პოზიცია კიდურის სამი ღერძის მიმართ. AER და ZPA გამოყოფენ მოლეკულებს, რომლებიც ამ ინფორმაციის გატარებას ეხმარებიან.

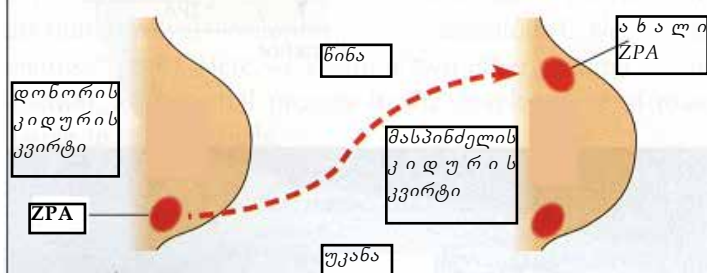
▲ სურათი 47.23 ხერხემლიანთა კიდურების განვითარება.

## სურათი 47.27

**კვლევა:** რა ბოლს თამაშობს პლატაზმული აქტი-  
ვობის ზონა (ZPA) ჰეტეროტოპიის კიდურების სიღრმის  
ფორმირებაში?

## მისპერიმენტი

ქსოვილის ZPA დონორი წინილის ემბრიონიდან წინა საზღვარზე ექტო-  
დერმის ქვეშ ტრანსპლანტირებულ იქნა რეციპიენტი წინილის კიდურის  
კვირტზე.



## შედეგები

მასპინძლის დაწყვილი კიდურის კვირტში ზედმეტი თითები ჩნდება. ჩრდილოეთი  
თითების სარკისებური გამოსახულებით ვითარდება. ჩრდილოეთი თით-  
ებიც ვითარდება.



## დასკვნა

სარკისებური გამოსახულების გაორმაგება, რაც ნანახი იქნა ამ ექსპერი-  
მენტში, იძლევა ვარაუდის გაკეთების საშუალებას იმის თაობაზე, რომ ZPA  
უჯრედები გამოყოფენ სიგნალს, რომელიც დიფუნდირებს მათი წყაროდან  
და მოაქვს ინფორმაცია პოზიციის შესახებ, რაც აღნიშნავს „უკან“. ZPA-  
სგან დაშორებისას სიგნალის კონცენტრაცია მცირდება და შესაბამისად  
წინა თითები უფრო ვითარდება.

უზრუნველყოფენ სმენითი ეკლების დიდი რაოდენობით სინთეზს,  
იმპლანტირების ჩრდილოეთი კიდურის კვირტში, წარმოიქმ-  
ნება სარკისებური გამოსახულების კიდური – თუ იქ დამატებით  
ZPA-ცაა გადანერგილი. თავის ვერსიის სმენითი ეკლების შესწავ-  
ლით ნანახია, რომ წარმოიქმნება თათის წვერი და შესაძლებელია,  
რომ ამ ცილის პროდუქციის ნაკლებობა იწვევს შეცდომებს კიდუ-  
რის კვირტის განვითარებისას.

ამგვარი ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზით შეგვიძლია  
დავასკვნათ, პატერნის წარმოქმნა საჭიროებს, რომ უჯრედებმა  
მიიღონ და ინტერპრეტაცია მოახდინონ სიგნალების, რომლებიც

ლოკალიზაციის მიხედვით განსხვავებულია. ეს სიგნალები სამი  
ღერძის მიმართულებით მოქმედებენ და ატყობინებენ უჯრედებს  
ადგილმდებარეობას განვითარებადი ორგანოს სამგანზომილე-  
ბიან არეში. მაგალითად, ჩვენთვის ცნობილია რომ გარკვეული  
ცილები წარმოადგენენ აღნიშნულ სიგნალებს. სხვა სიტყვებით,  
საორგანიზაციო უბნები AER და ZPA წარმოადგენენ სასიგნალო  
ცენტრებს. მკვლევარებმა აჩვენეს რომ აღნიშნული ორი რეგიონი  
ერთმანეთთანაც ურთიერთობენ სიგნალების საშუალებით და ამ  
სასიგნალო გზების მეშვეობით გავლენას ახდენენ ერთმანეთის  
განვითარების ბედზე. აღნიშნული სიგნალებით ურთიერთობა  
მეზოდერმასა და ექტოდერმას შორის ადგილი აქვს ნერვულ  
მილს წარმოშობისას და განვითარების სხვა პროცესში მრავალი  
ქსოვილისა და უჯრედების წარმოქმნის დროს. რა განსაზღვრავს  
კიდურის კვირტიდან წინა და უკანა კიდურების განვითარებას?  
უჯრედები, რომლებიც სიგნალებს AER-დან და ZPA-დან იღებენ,  
თავიანთი განვითარების ისტორიის შესაბამისად პასუხობენ. სა-  
ნამ AER ან ZPA გამოუშვებს თავის სიგნალებს, ადრეული გან-  
ვითარების სიგნალებმა ჩამოაყალიბეს გენების ექსპრესიის პა-  
ტერნი, რომლის მეშვეობით გაირჩევა მომავალი წინა და უკანა  
კიდური. ეს განსხვავება იმის მიზეზია, რომ წინა და უკანა კი-  
დურების კვირტების უჯრედები სხვადასხვანაირად პასუხობენ  
ერთსა და იმავე პოზიციურ სიგნალს.

ამგვარად, სხეულის სრული ფორმირების პროცესი შეიცავს  
თანმიმდევრულ მოვლენებს, რომელიც მოიცავს სიგნალების მრავალ  
სერიას და ქსოვილის დიფერენციაციას. უჯრედების საწყისი  
ასიმეტრია აძლევს უჯრედების სხვადასხვა ტიპს უნარს, გავლენა  
მოახდინონ ერთმანეთზე, შესაბამისი გენების ექსპრესიით. ამ გე-  
ნების ზემოქმედებით ხდება უჯრედების სხვადასხვა ტიპის ჩამო-  
ყალიბება. მორფოგენების შესაბამისად, სხვადასხვა პატერნების  
შექმნას აქვს ადგილი განვითარებადი ემბრიონის განსხვავებულ  
უბნებში. ეს პროცესი, საბოლოოდ, მრავალნაირი ქსოვილისა და  
ორგანოს კომპლექსურ წესრიგს აყალიბებს, რომელიც ფუნქ-  
ციონირებს შესაბამის ადგილას და ქმნის ერთ კოორდინირებულ  
ორგანიზმს.

## კანცელტია ცისტი 47.3

1. მიუხედავად იმისა, რომ არსებობს სხეულის სამი ღე-  
რძი, ადრეული განვითარების პროცესში მხოლოდ  
ორი მათგანია განმსაზღვრელი. რატომ?
2. იწინასწარმეტყველეთ, რა მოხდება თუ ორგანიზმ-  
ის უბნიდან (დორსალური ნაკეცის ზემოთ) მოახ-  
დენთ ქსოვილის ტრანსპლანტაციას ბაყაყის ემბრიო-  
ნის განვითარების მიგვიანო სტადიის გასტრულის  
ვენტრალურ უბანში.
3. თუ ბაყაყის ადრეული გასტრულის ვენტრალური უჯ-  
რედები ექსპერიმენტულად BMP-4 შემოკავებული ცი-  
ლის ექსპრესიას იწვევს, მაშინ შეიძლება მეორე ემ-  
ბრიონის განვითარება? ახსენით.

## მედიკალინური პათოლოგიის შებენი

### პათოლოგია 47.1

#### განაცხადის შებენი ემბრიონული განვითარება მიმდინარეობს დაყოფის, გასტრულაციისა და ატანაგენეზის გზით

▶ **განაცხადი.** განაცხადის დროს სპერმისა და კვერცხის ბირთვების შერწყმით დიპლოიდური ზიგოტა წარმოიქმნება და ხდება კვერცხის გააქტივება, რაც ემბრიონის განვითარებისკენ უბიძგებს. სპერმისა და კვერცხის შეხვედრისთანავე ჩაირთვება აკროსომული რეაქცია, გამოიყოფა პიდროლოზური ენზიმები, რომლებიც კვერცხის გარემოცველ მყარ მასალას შლის. გამეტები ურთიერთქმედებენ და ერთმანეთს ერწყმიან. ამის შედეგად კვერცხის მემბრანა განიცდის დეპოლარიზაციას და ამგვარად მრავალ ცხოველში პოლისპერმიის სწრაფ ბლოკირებას ხდება. სპერმისა და კვერცხის შერწყმით ასევე იწყება ქერქული რეაქცია, რომელშიც  $Ca^{2+}$ -ის კონცენტრაციის გაზრდა ქერქულ გრანულებს ასტიმულირებს. ამის შედეგად, მათი შემადგენელი ნივთიერებები კვერცხის გარეთ გამოიყოფა. ეს ქმნის განაცხადის შალითას, რომელიც მოქმედებს როგორც პოლისპერმიის ნელი ბლოკატორი. ძუძუმწოვრების განაცხადის ქერქული რეაქცია გამჭვირვალე ზონის მოდიფიცირებას ახდენს და ამგვარად ხორციელდება პოლისპერმიის ნელი ბლოკირება.

▶ **დაყოფა.** განაცხადისგან თან სდევს დაყოფა, უჯრედების სწრაფი დანაწევრების პერიოდი მათი ზრდის გარეშე. ამის შედეგად მიიღება მრავალი უჯრედი, რომლებსაც ბლასტომერები ეწოდება. პოლბლასტური დაყოფა ან მთელი კვერცხის დანაწევრება გვხვდება ისეთ სახეობებში, რომელთა კვერცხი ყვითრის მცირე, ან ზომიერ რაოდენობას შეიცავს. მათ რიცხვს მიეკუთვნება ზღვის ზღარბები, ბაყაყები და ძუძუმწოვრები. მერობლასტური დაყოფა – კვერცხის არასრული დანაწევრება ყვითრით მდიდარი კვერცხის მქონე სახეობებში – ფრინველებსა და რეპტილიებში გვხვდება. დაყოფის გეგმა ჩვეულებრივ სპეციფიკური პატერნების მიმართულებას მიჰყვება, რაც ზიგოტის ანიმალური (ცხოველური) და ვეგეტატური (მცენარეული) პოლუსების წარმოქმნას უკავშირდება.

მრავალ სახეობაში, დაყოფისას მრავალუჯრედიან ბურთი – ბლასტულა წარმოიქმნება. მისი ღრუ – ბლასტოცელი სითხითაა ამოვსებული.

▶ **გასტრულაცია.** გასტრულაციის დროს ბლასტულა გასტრულად გადაიქცევა, რომელსაც აქვს პრიმიტიული საჭმლის მომნელებელი ღრუ (არქენტერონი) და სამი ემბრიონული ჩანასახოვანი შრე: ექტოდერმა, მეზოდერმა და ენტოდერმა.

▶ **ორგანოგენეზი.** ცხოველის სხეულის ორგანოები ემბრიონული სამი ჩანასახოვანი შრის სხვადასხვა ნაწილიდან წარმოიქმნება. ხერხემლიანთა ადრეული ორგანოგენეზი მოიცავს ნოტოქორდის შექმნას, რომელიც დორსალური მეზოდერმის კონდენსაციის შედეგად წარმოიქმნება. ამავე დროს ექტოდერმის ნერვული ფირფიტის ჩადრეკით ნერვული მილი, ხოლო ლატერალური მეზოდერმის დანაწევრებით ცელომი ვითარდება.

▶ **ამნიოტების ადაპტაციების განვითარება.** ფრინველების, რეპტილიების და ძუძუმწოვრების ემბრიონები სითხით სავსე ჩანთაში ვითარდებიან. ეს ჩანთა ან ნაჭუჭში ან საშვილისნოშია მოთავსებული. ამ ორგანიზმებს სამი ჩანასახოვანი შრე დასაბამს აძლევს არა მარტო ემბრიონულ ქსოვილს, არამედ 4 ექსტრაემბრიონულ მემბრანას – ამნიონს, ქორიონს, ყვითრის ჩანთას და ალანტოისს.

▶ **ძუძუმწოვრების განვითარება.** ჩანთოსნებისა და საშვილოსნოს მქონე ძუძუმწოვრების კვერცხუჯრედი ძალიან მცირე რაოდენობის საკვებ-სამარაგო ნივთიერებებს შეიცავს. ამ ორგანიზმებს ახასიათებს პოლბლასტური დაყოფა და პოლარობას არ ავლენენ. ფრინველებსა და რეპტილიებში, მიუხედავად ამისა, გასტრულაცია და ორგანოგენეზი მსგავსი სქემით მიმდინარეობს. ხოლო ძუძუმწოვრებში განაცხადისგან და კვერცხსაველში ადრეული დაყოფის შემდეგ ბლასტოცელი საშვილოსნოში იმპლანტირდება. ტროფობლასტი ჩართავს ჩანასახის პლაცენტის წარმოქმნის პროცესს და ემბრიონი განვითარებას იწყებს ერთი შრიდან – ბლასტოცელში მოთავსებული ეპიბლასტიდან. საშვილოსნოში განვითარებული ემბრიონის ექსტრაემბრიონული მემბრანების ფუნქციები ფრინველებისა და რეპტილიების მსგავსი წარმონაქმნების პომოლოგიურია.

### პათოლოგია 47.2

#### მედიკალინური ცხოველში სპეციფიკური ცვლილებების მოცავს, უჯრედების ფორმის, მდებარეობისა და ადგილის თვალსაზრისით

▶ **უჯრედის ჩონჩხი, უჯრედების მოძრაობა და კონვერგენციული დაქიმვა.** უჯრედის ჩონჩხის შემადგენელი ნაწილები პასუხისმგებელია უჯრედის ფორმისა და მდებარეობის

შეცვლაზე. ორივე სახის ცვლილება ქსოვილების ინვაგინაციითაა გამოწვეული, როგორც ეს, მაგალითად, გასტრულაციის დროს გვხვდება. კონვერგენციული დაჭიმვის დროს უჯრედების მოძრაობა ინვესს მათი ფორმის ცვლილებას – ისინი ღებულობენ დანვრილებულ და წაგრძელებულ ფორმას.

- **ექსტრაცელულარული მატრიქსისა და უჯრედების ადჰეზიური მოლეკულების როლი.** ექსტრაცელულარული მატრიქსის ბოჭკოებისაგან წამოსული მორჩები უჯრედებს მათი ლოკალიზაციის სწორი მიმართულებით წარმართვაში ეხმარება. ფიბრონექტინი და სხვა გლიკოპროტეინები უჯრედის ზედაპირზეა მოთავსებული და მნიშვნელოვანია უჯრედების მიგრაციისა და მათი დაკავშირებისთვის.

## ▶ **ჰანციფცია 47.3**

### **უჯრედების განვითარების ბედისწერა დამოკიდებულია მათ ისტოტიასა და ინდივიდუალურ სიგნალებზე**

- **ბედისწერის რუკების შედგენა.** ექსპერიმენტულად მიღებული ემბრიონის ბედისწერის რუკებში ნაჩვენებია, რომ ზიგოტის ან ბლასტულის სპეციფიკური უბნები მოზრდილი ემბრიონების სპეციფიკურ ნაწილებად ვითარდება.
- **უჯრედული ასიმეტრიის დადგენა.** არაამნიოტურ სახეობებში უნივერსალურად გამოყოფილი ციტოპლაზმური დეტერმინანტები კვერცხუჯრედში მნიშვნელოვანია სხეულის ღერძების დადგენისთვის და განსხვავებების წარმოქმნაში ზიგოტის ბლასტომერებად დანაწევრების პროცესში. უჯრედები, რომლებიც ციტოპლაზმის სხვადასხვა დეტერმინანტს იღებენ სხვადასხვაგვარად ვითარდებიან. ამნიოტებში ლოკალური გარემოს სხვაობა მთავარ როლს თამაშობს უჯრედის საწყისი განსხვავებისა და შემდგომ სხეულის ღერძების წარმოქმნაში. ყველა სახეობის ემბრიონული განვითარების შესაბამისად, უჯრედების პოტენცია უფრო პროგრესულად იზღუდება.
- **უჯრედების ბედისწერის განსაზღვრა და ინდუქციური სიგნალების ფორმირების პატერნები.** განვითარებადი ემბრიონის უჯრედები იღებენ და ინტერპრეტაციას აძლევენ პოზიციურ ინფორმაციას, რაც განსხვავებულია მათი მდებარეობის მიხედვით. ეს ინფორმაცია ხშირად იმ სიგნალური მოლეკულების სახითაა, რომლებიც ემბრიონის სპეციალური „ორგანიზერული“ უჯრედების მიერ გამოიყოფა. მათ მიეკუთვნება ამფიბიების გასტრულაში ბლასტოპორის უკანა ბაგე და ხერხემლიანთა კიდურების კვრტის AER და ZPA. სიგნალური მოლეკულები გენების ექსპრესიაზე მოქმედებენ და მათ განსაზღვრულ მიმართულებასა და კონკრეტული სტრუქტურის განვითარების შესაძლებლობის უნარს ანიჭებს.

## **შეამოწმეთ საკუთარი ცოდნა**

### **თვითშეფასება**

1. ზღვის ზღარბის კვერცხის ქერქული რეაქცია ფუნქციობს პირდაპირ
  - ა. განაყოფიერების შალითის შექმნაში,
  - ბ. პოლისპერმიის სწრაფი ბლოკის წარმოქმნაში,
  - გ. სპერმის უჯრედიდან ჰიდროლიზური ფერმენტების წარმოქმნაში,
  - დ. კვერცხის უჯრედზე ელექტრული იმპულსის გენერაციაში,
  - ე. კვერცხისა და სპერმის ბირთვების შერწყმაში.
2. ქვემოჩამოთვლილთაგან, რომელია ფრინველებისა და ძუძუმწოვრებისათვის საერთო?
  - ა. ჰოლობლასტური დაყოფა,
  - ბ. ეპიბლასტი და ჰიპობლასტი,
  - გ. ტროფობლასტი,
  - დ. ყვითრის საცობი,
  - ე. რუხი ნახევარმთვარე.
3. არქენტერონი იყოფა
  - ა. მეზოდერმად,
  - ბ. ბლასტოცელად,
  - გ. ენდოდერმად,
  - დ. პლაცენტად,
  - ე. საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის სანათურად.
4. ბაყაყის ემბრიონში ბლასტოცელი არის
  - ა. სრულიად გამქრალი ყვითრის ფირფიტით;
  - ბ. გასტრულაციის დროს ენდოდერმის გასწვრივი მდებარეობით,
  - გ. პირდაპირ ცხოველურ ჰემისფეროში მდებარეობით,
  - დ. ღრუ, რომელიც ცელომად იქცევა,
  - ე. ღრუ, რომელიც მოგვიანებით არქენტერონად იქცევა.
5. რა სტრუქტურული ადაპტაცია განაპირობებს ქათმის კვერცხის დებას ხმელეთზე და არა წყალში?
  - ა. ექსტრაემბრიონული მემბრანები,
  - ბ. ყვითრი,
  - გ. დაყოფა,
  - ე. გასტრულაცია.
  - დ. ტვინის განვითარება ექტოდერმისგან.
6. ამფიბიების ემბრიონში უჯრედების კონა, რომელსაც ნერვული ჯვარედინი ეწოდება
  - ა. ბრუნავს ნერვული მილის შესაქმნელად,
  - ბ. ტვინის ძირითად ნაწილიად ვითარდება,
  - გ. წარმოქმნის უჯრედებს, რომლებიც მიგრირებენ კბი-

- ლების, ჩონჩხის ძვლებისა და ემბრიონის სხვა სტრუქტურების წარმოსაქმნელად,
- დ. ექსპერიმენტულად ნაჩვენებია, რომ ის არის განვითარებადი ემბრიონის ორგანოზერი,
  - ე. ნოტოქონდრის წარმოქმნას განაპირობებს.
7. ბაყაყის ადრეული ემბრიონის ზიგოტაში ან ბლასტულაში უჯრედების განსხვავების წარმოქმნა განპირობებულია
- ა. მერობლასტური და ჰოლობლასტური დაყოფის განსხვავებულობით,
  - ბ. ციტოპლაზმის დეტერმინანტების, როგორცაა ცილები და რნმ ჰეტეროგენური განაწილებით,
  - გ. ინდუქციური ურთიერთქმედებით, რაც განვითარებად უჯრედებში გვხვდება.
  - დ. რეგულატორული მოლეკულების, როგორცაა BMP-4 კონცენტრაციული გრადიენტით,
  - ე. უჯრედების პოზიციით პოლარიზაციული აქტივობის ზონის (ZPA) მიმართებაში.
8. კონვერგენციული გაჭიმვის დროს
- ა. ემბრიონის სანინალმდეგო მხარის უჯრედები მისდევნენ კონვერგენციული დაყოფის მიმართულებას, რასაც ბილატერალური სიმეტრიისკენ მივყევართ,
  - ბ. ნერვული ნაკეცის უჯრედები ერთმანეთს ენებებიან ნერვული მილის შესაქმნელად,
  - გ. შრეების ქსოვილის უჯრედები რეორგანიზაციის განიცდის და წანვეტებულ-წაგრძელებულ ფორმა ეძლევა,
  - დ. წარმოიქმნება დორსო-ვენტრალური ღერძი,
  - ე. უჯრედის ადჰეზიის გამომწვევი მოლეკულები ექსპრესირებენ, აიძულებენ 8 ბლასტომერს მჭიდროდ შეენწყოს ერთმანეთს.
9. ამფიბიების ემბრიონების ადრეული განვითარების დროს მნშვნელოვანი „ორგანოზერი“ მოთავსებულია
- ა. ნერვულ მილში, დ. დორსალურ ექტოდერმაში,
  - ბ. ნოტოქორდაში, ე. ბლასტოპორის დორსალურ ნაკეცზე.
  - გ. არქენტერონის სახურავში,
10. ძუძუმწოვრების 8-უჯრედიანი ემბრიონის ნებისმიერი ბლასტომერის ადგილის შეცვლით, ემბრიონი გვიან სტადიებზეც შეიძლება ნორმალურად განვითარდეს. ამ აღმოჩენის აზრი შემდეგშია
- ა. მხოლოდ ზიგოტაა ტოტიპოტენტური,
  - ბ. განიხილება პოტენციის პროგრესული რესტრიქციის ჰიპოთეზა,
  - გ. დაყოფის პირველი მოვლენები ზიგოტის ანიმალურ-ვეგეტეტური (ცხოველურ-მცენარეული) ღერძის გადაკვეთით უნდა წარიმართოს,
  - დ. ადრეული ბლასტომერების უჯრედული დანაწევრება არ ხდება ციტოპლაზმური დეტერმინანტების ასიმეტრიული განაწილების გავლენის ქვეშ,
  - ე. ძუძუმწოვრებში არ არსებობს ორგანოზერი.

## უძლუცითი კავშირი

მწერებისა და ხერხემლიანების ევოლუცია სხეულის სეგმენტური განლაგების განმეორებად სქემას შეიცავს. ეს გამოწვეულია ზოგიერთი სეგმენტის შერწყმით ან ზოგიერთი სეგმენტისა და სტრუქტურის ფუნქციის სპეციალიზაციით.

ხერხემლიანების ანატომიური აგებულების რომელი ნაწილი ასახავს სეგმენტაციის პატერნს და ხერხემლიანთა სხეულის რომელი ნაწილია სეგმენტაციისა და სპეციალიზაციის პროდუქტი?

## მეცნიერული კვლევა

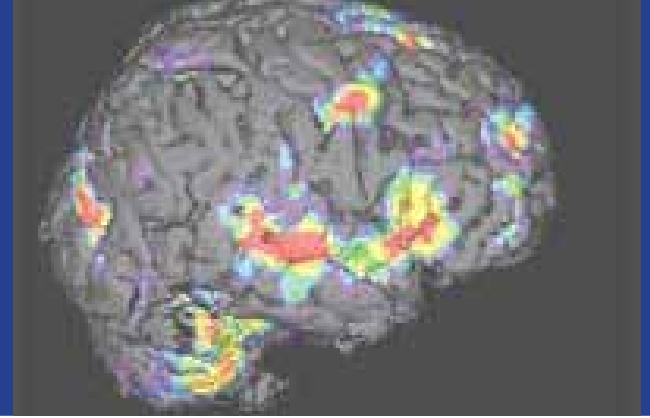
ბაყაყის თავკომბალის „სახე“ მისაწოვრებითაა აღჭურვილი. სალამანდრას ნაშიერის ემბრიონს იგივე ადგილას აქვს ულვაშების მსგავსი სტრუქტურა, რომელსაც ბალანსირი ეწოდება. თქვენ უნდა ჩაატაროთ ექსპერიმენტი, რომელშიც სალამანდრას ნორჩი ემბრიონის ექტოდერმის ამ ნაწილს გადაიტანთ ბაყაყის ემბრიონის სახეზე. თქვენ ნახავთ, რომ განვითარებულ ემბრიონის ბალანსერს მისაწოვარიც ექნება. როდესაც თქვენ გადანერგავთ სალამანდრას უფრო მეტი ასაკის ემბრიონის ექტოდერმას ბაყაყის ემბრიონის სახეზე, ბაყაყის მისაწოვარს ექნება სალამანდრას კანის ლაქა. წამოაყენეთ ჰიპოთეზა თქვენი შედეგების ასხსნელად განვითარების მექანიზმების ტერმინებში. როგორ უნდა შეამოწმოთ თქვენი ჰიპოთეზა?

## მეცნიერება, ფიქცნაღმცია და საზმგაცდამა

მრავალ მეცნიერს სჯერა, რომ ჩანასახოვანი ქსოვილის გადანერგვა პარკინსონის დაავადების, ეპილეფსიის, დიაბეტის, ალცჰაიმერის დაავადების და ზურგის ტვინის დაზიანების მკურნალობის საშუალებას იძლევა. როგორ შეიძლება, რომ ასეთ ვითარებაში ჩანასახის ქსოვილები სასარგებლო გამოდგეს დაზიანებული უჯრედების აღსადგენად ან დაავადების სამკურნალოდ? ზოგიერთი ადამიანი მხოლოდ სპონტანური აბორტის შემდეგ მიღებული ქსოვილების ტრანსპლანტაციის მომხრეა, მაშინ როდესაც მკვლევარების უმეტესობა ოპერაციული აბორტის შემდეგ მიღებულ ჩანასახოვან ქსოვილებს ანიჭებს უპირატესობას. რატომ? როგორია თქვენი შეხედულება ამ ორი სანინალმდეგო მოსაზრების თაობაზე?

# 48

## ნერვული სისტემა



▲ სურათი 48.1 მეტყველების პერიოდში თავის ტვინის ზონების გააქტიურების ფუნქციური მაგნიტო-რეზონანსული ტომოგრაფია.

### ბიბლიოთეკა

- 48.1** ნერვული სისტემა ნეირონების წრეებისა და დამხმარე უჯრედებისგან შედგება
- 48.2** იონური ტუმბოები და იონური არხები ნეირონის მოსვენების პოტენციალს ინარჩუნებენ
- 48.3** მოქმედების პოტენციალები აქსონებით გატარებული სიგნალებია
- 48.4** ნეირონები სხვა უჯრედებთან სინაფსების მეშვეობით ურთიერთობენ
- 48.5** ხერხემალიანთა ნერვული სისტემა ზონებად არის სპეციალიზებული
- 48.6** დიდი ტვინის ქერქი ნებით მოძრაობასა და კოგნიტურ ფუნქციებს აკონტროლებს
- 48.7** ცნს-ის დაზიანებები და დაავადებები ინტენსიური კვლევის საგანია

### შესავალი

## მატვისა და კონტროლის ცენტრი

რა ხდება თქვენს თავის ტვინში, როდესაც „გონების თვალით“ რაღაცას წარმოიდგენთ? მეცნიერებს ბოლო დრომდე ამ კითხვაზე პასუხის გაცემის მცირე იმედი ჰქონდათ. ადამიანის თავის ტვინი შეიცავს დაახლოებით 1011 (100 მილიარდი) ნერვულ უჯრედს, ანუ ნეირონს. თითოეულ ნეირონს შეუძლია ურთიერთობა ათასობით სხვა ნეირონთან ინფორმაციის დამამუშავებელ რთულ წრეებში, რომლის ფონზეც ყველაზე ძლიერი ელექტრონული კომპიუტერი პრიმიტიულად გამოიყურება. ინჟინერს, რომელსაც სურს ისწავლოს კომპიუტერის მოქმედება, შეუძლია პირდაპირ გახსნას მისი კორპუსი და დააკვირდეს სქემებს. მაგრამ იშვიათი გამონაკლისების გარდა (მაგალითად, ტვინზე ოპერაციის მიმდინარეობისას), ცოცხალი ადამიანის ტვინი დათვალიერებისთვის მიუწვდომელია.

თუმცა, ამ პრობლემის გადაჭრა შესაძლებელია უახლესი მე-

ტვინის აქტივობის ჩაწერა მიმდინარეობს. ერთი მათგანი არის ფუნქციური მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფიის (fMRI) მეთოდი. fMRI-ის მეთოდის გამოყენებისას, ადამიანის თავი თავსდება დიდ, ბლითის ფორმის მქონე მაგნიტურ სივრცეში, სადაც თავის ტვინის უბნებში გააქტივებული ნეირონები აღირიცხება სისხლის ნაკადის ცვლილებით. მიღებული მონაცემების საფუძველზე კომპიუტერი აგებს ადამიანის თავის ტვინის აქტივობის სამგანზომილებიან რუკას, რაც ნაჩვენებია სურათი 48 1-ზე. ასეთი რეგისტრაცია შეიძლება სუბიექტის მიერ სხვადასხვა ამოცანის შესრულების პერიოდში ჩატარდეს, მაგალითად ლაპარაკის, კიდურების მოძრაობის, სურათის ყურების, საგნის ან ადამიანის სახის გონებაში ასახვის დროს. თავის ტვინის აქტივობის ჩანაწერების შესწავლამ და კვლევის სხვა მეთოდების გამოყენებამ, რომლებიც აღწერილია ერიხ იარვის ინტერვიუში, აჩვენა, რომ ნეირონთა ჯგუფები ფუნქციონირებენ სხვადასხვა ამოცანის შესრულებისთვის განკუთვნილ სპეციალურ წრეებში. ეს წრეები პასუხისმგებელია შეგრძნების, მოძრაობის (იხ. თავი 49) და ცხოველთა მრავალი ტიპის ქცევის შესრულებაზე (იხ. თავი 51).

შეგრძნებისა და რეაგირების უნარი წარმოიშვა მილიარდი წლის წინ პროკარიოტებში, რითაც მათ შეუძლიათ გარემოში ცვლილებები განსაზღვრონ და ამ ცვლილებებს ისე უპასუხონ, რომ ამ პასუხმა მათი გადარჩენის შესაძლებლობა და რეპროდუქციული წარმატება გაზარდოს. მაგალითად, ქემოტაქსისის გზით საკვების წყაროს ადგილმდებარეობის განსაზღვრა შესაძლებელია (იხ. თავი 27). მოგვიანებით, ამ მარტივი პროცესის მოდიფიკაციამ მრავალუჯრედიანი ორგანიზმების სხეულის უჯრედების ურთიერთობის მექანიზმით უზრუნველყო. კემბრიული აფეთქების დროისთვის, 500 მილიონ წელზე მეტი ხნის უკან (იხ. თავი 32), ნეირონთა სისტემები, რომლებიც განაპირობებენ ცხოველთა შეგრძნებებსა და მოძრაობას, სწრაფად განვითარდნენ და მიიღეს თანამედროვე სახე.

ამ თავში განვიხილავთ ცხოველების ნერვული სისტემის ორგანიზაციასა და მექანიზმებს, რომელთა საშუალებითაც ნეირონები ინფორმაციას გადასცემენ. აღწერილი იქნება ხერხემალიანების თავის ტვინის გარკვეული ნაწილებით შესრულებული ზოგიერთი ფუნქცია. ბოლოს, განვიხილავთ იქნება რიგი ფსიქიკური დაავადება და ნევროლოგიური აშლილობა, რომელიც დღეს ინტენსიური კვლევის საგანია.

## ნეტჯული სისცემა ნეიტონების წტოდებისა და დამსმარტ ოჯტოდებისგან შედგება

ყველა ცხოველს, გარდა ღრუბელებისა, აქვს გარკვეული ტიპის ნერვული სისტემა. სხვადასხვა ჯგუფის ცხოველის ნერვული სისტემის განსხვავება იმდენად არ არის დამოკიდებული მის ძირითად საშენ ბლოკებზე - ნეირონებზე, რამდენადაც ნეირონების წრედების ორგანიზაციაზე.

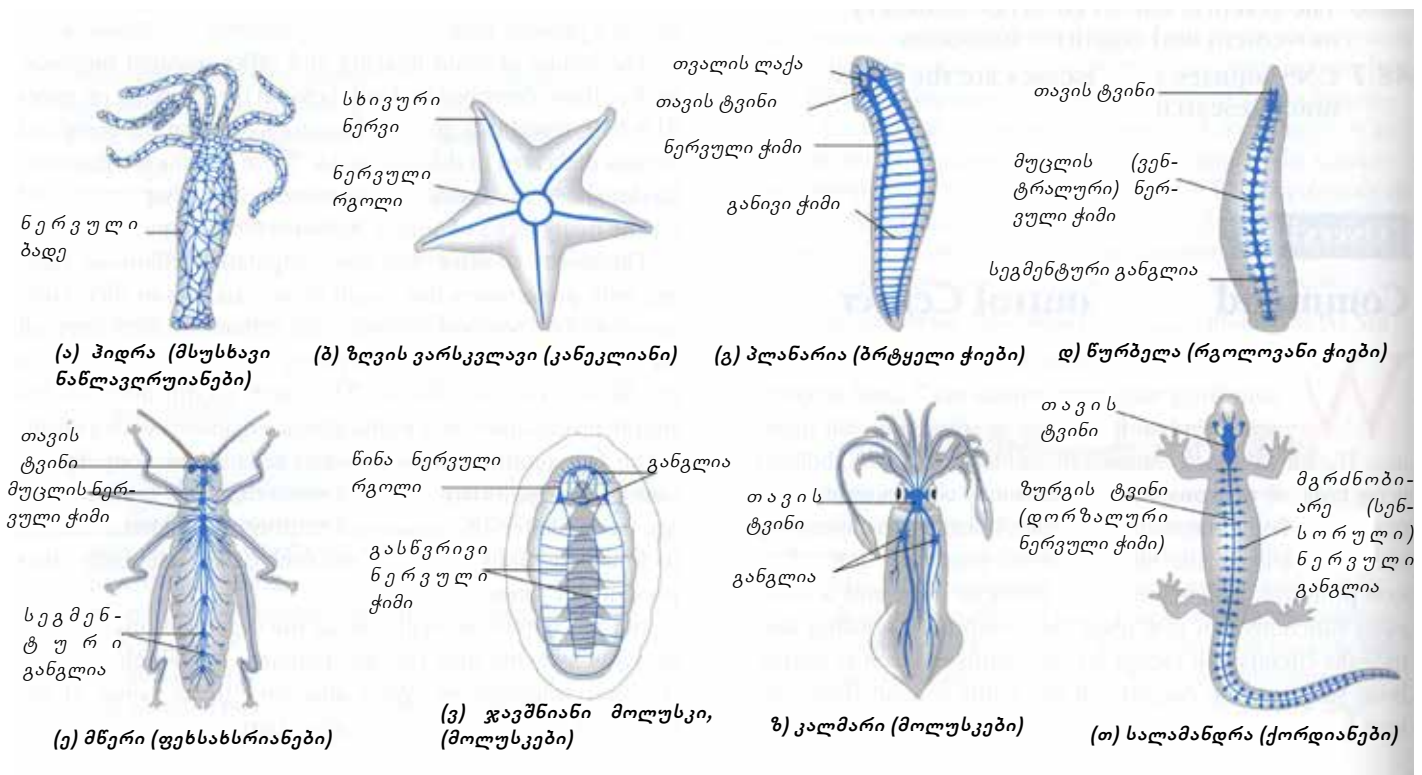
### ნეტჯული სისცემების ორგანიზაცია

ნერვული სისტემის მქონე მარტივ ცხოველებს, ნაწლავღრუიანებს ახასიათებთ გასტროვასკულარული ღრუს გარშემო რადიალურად და სიმეტრიულად ორგანიზებული სხეული (იხ.სურათი 33.5). ზოგიერთ ნაწლავღრუიანში, როგორც არის სურათი 48.2 ა-ზე ნაჩვენები ჰიდრა, გასტროვასკულარული ღრუს შეკუმშვა-მოდუნების მაკონტროლებელი ნეირონები ქმნიან დიფუზურ ნერვულ ბადეს. უფრო რთული ორგანიზაციის მქონე ცხოველების ნერვული სისტემა, გარდა ნერვული ბადისა, შეიცავს ნერვებსაც, რომლებიც წარმოადგენენ ნეირონების აქსონების კონებს. მაგალითად, ზღვის ვარსკვლავების ყოველი ქიმი შეიცავს ნერვულ ბადეს, რომელიც რადიალური ნერვებით დაკავშირებულია ცენტრალურ ნერვულ რგოლთან (სურათი 48.2 ბ); ასეთი ორგანიზაცია დიფუზურ ნერ-

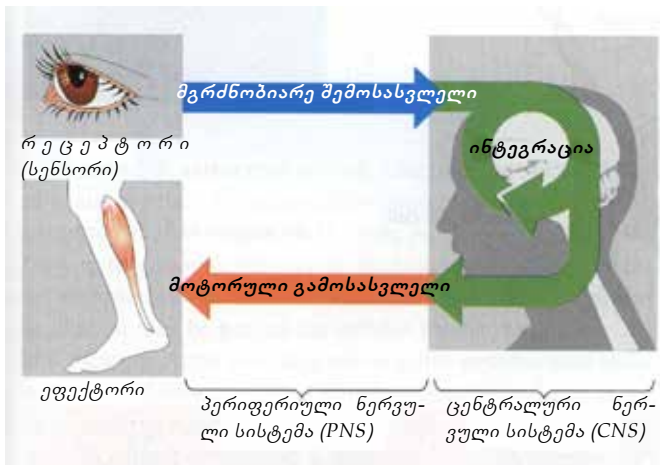
ვულ ბადესთან შედარებით უფრო ხელსაყრელია რთული მოძრაობის კონტროლისთვის.

წაგრძელებული, ორმხრივად სიმეტრიული სხეულის მქონე ცხოველებში, ცეფალიზაციასთან დაკავშირებით გართულდა ნერვული სისტემა და განვითარდა უფრო რთული ქცევა, რაც გამოწვეულია ნეირონების თავმოყრით (კლასტერიზაციით) სხეულის წინა ნაწილში თავის ტვინის სახით. ბრტყელ ჭიებში, როგორიცაა პლანარია (სურათი 48.2 გ), პატარა თავის ტვინი და სიგრძეზე წაყოფილებული ნერვული კონა მარტივ, მკაფიოდ გამოკვეთილ ცენტრალურ ნერვულ სისტემას (ცნს) ქმნის. უფრო რთულ უხერხემლოებში, როგორიცაა რგოლოვანი ჭიები (სურათი 48.2,დ) და ფეხსახსრიანები (სურათი 48.2,ე), ქცევის რეგულაცია ხდება შედარებით გართულებული თავის ტვინით და ვენტრალური ნერვული ძეგვით, რომელიც შედგება სეგმენტურად განლაგებული ნეირონების ჯგუფებისაგან (განგლიებისგან). ნერვები, რომლებიც აკავშირებენ ცნს-ს ცხოველის დანარჩენ სხეულთან, ქმნიან პერიფერიულ ნერვულ სისტემას (პნს).

მოლუსკები კარგი მაგალითია იმისა, როგორ კორელირებს ნერვული სისტემის ორგანიზაცია ცხოველის ცხოვრების ნირთან. მიმაგრებულ ან ნელა მოძრავ მოლუსკებს, როგორიცაა ორსაგდულიანი და მუცელფეხიანი მოლუსკები, სუსტად განვითარებული ცეფალიზაცია (ან ცეფალიზაციის არქონა) და შედარებით მარტივი სენსორული ორგანოების არსებობა ახასიათებთ (სურათი 48.2ფ). პირიქით, თავფეხიან მოლუსკებს (კალმარსა და რვაფეხას) აქვს ნებისმიერ უხერხემლოზე უფრო რთული ნერვული სისტემა, რომელიც კონკურენტულად კი უწევს ზოგიერთი ხერხემლიანის ნერვულ სისტემას. თავფეხიანებს მასიურ თავის ტვინთან ერთად დიდი, გა-



▲ სურათი 48.2 ზოგიერთი ნერვული სისტემის ორგანიზაცია.



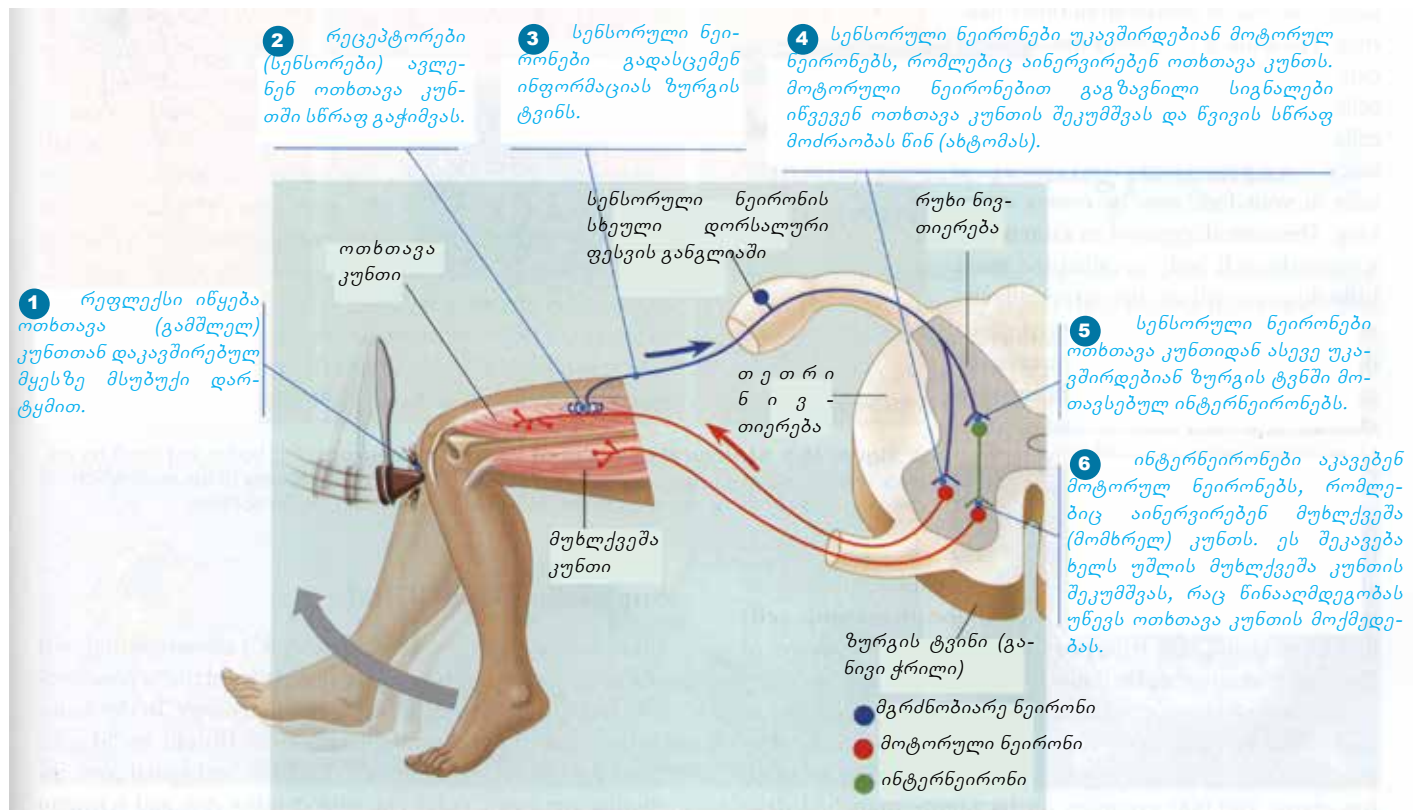
▲ **სურათი 48.3** ნერვული სისტემით ინფორმაციის დამუშავების ზოგადი განხილვა.

მოსახულების შემქმნელი თვალეები და ნერვების მეშვეობით სიგნალის სწრაფი გადაცემის უნარი ახასიათებთ, რაც განაპირობებს ამ ცხოველების აქტიურ, მტაცებლური ცხოვრების ნირს (**სურათი 48.2გ**). მკვლევრებმა აჩვენეს, რომ რვაფეხას შეუძლია მხედველობითი პატერნების დისკრიმინაციის დასწავლა და რთული ამოცანების შესრულება. ხერხემლიანებში, ცნს შედგება თავისა და ზურგის ტვინისგან, რომელიც სხეულის დორსალურ მხარეზეა მოთავსებული.

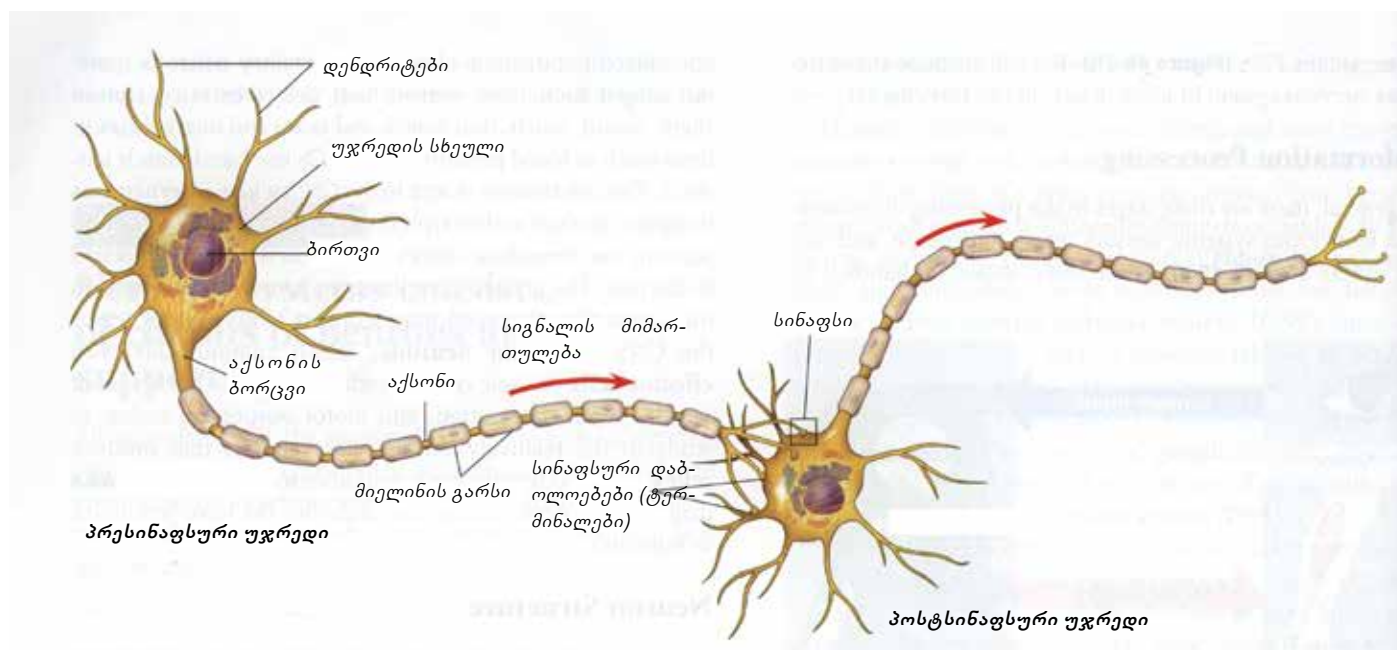
ლი; ნერვები და განგლიები შეადგენენ ს-ს (სურათი 48.23). ხერხემლიანების ნერვულ სისტემას უფრო დეტალურად მოგვიანებით განვიხილავთ.

## ინფორმაციის დამუშავება

ნერვული სისტემით ინფორმაციის დამუშავება ჩვეულებრივ სამ ეტაპს მოიცავს: სენსორული შესავალი, ინტეგრაცია და მოტორული გამოსავალი (**სურათი 48.3**). სამივე ეტაპი სრულდება ნეირონების სპეციალიზებული ჯგუფით. სენსორული ნეირონები ინფორმაციას რეცეპტორებიდან ატარებენ, რომლებიც ამოიცნობენ გარეგან (სინათლეს, ზედას, შეხებას, სითბოს, სუნსა და გემოს) და შინაგან სტიმულებს (როგორცაა სისხლის წნევა, სისხლში CO<sub>2</sub>-ის დონე და კუნთების დაძაბულობა). ეს ინფორმაცია იგზავნება ცნსში, სადაც ინტერნეირონები აინტეგრირებენ (ანალიზს და ინტერპრეტაციას ახდენენ) სენსორულ შესავალს და უკავშირებენ წარსულში მომხდარ მოვლენების კონტექსტს. ნეირონული წრედები მნიშვნელოვნად რთულდება ინტერნეირონებს შორის კავშირების დამყარებით. ცნს-დან გამოსული იმპულსი მოტორული ნერვებით გადაეცემა ეფექტორულ უჯრედებს (კუნთოვან ან ენდოკრინულს). სენსორული შესავლის, ინტეგრაციისა და მოტორული გამოსავლის ეტაპები უფრო ადვილი შესასწავლია შედარებით მარტივ ნერვულ წრედებში, რომლებიც ქმნიან რეფლექსებს, და ეს რეფლექსები წარმოადგენენ ორგანიზმის ავტომატურ პასუხებს სტიმულზე. **სურათი 48.4-ის** დიაგრამებზე ნაჩვენებია ნეირონული წრედი, რომელიც საფუძვლად უდევს ადამიანის მუხლის რეფლექსს.



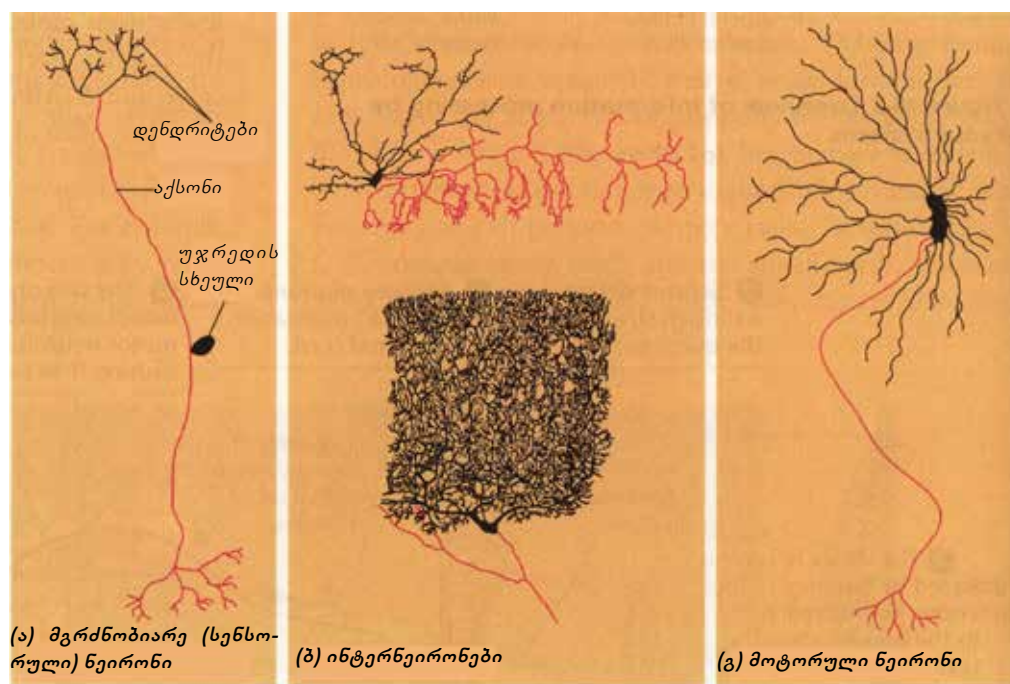
▲ **სურათი 48.4** მუხლის რეფლექსი. რეფლექსში ბევრი ნეირონია ჩართული, მაგრამ გამარტივებისთვის თითოეული ტიპის მხოლოდ ერთი ნეირონი არის ნაჩვენები.



▲ სურათი 48.5 ხერხემლიანთა ნეირონის სტრუქტურა.

## ნეიტონის სტოქტოტა

როგორც I თავში განვიხილეთ, ბიოლოგიის ერთ-ერთი მთავარი დებულება არის ის, რომ ფორმა უნდა შეესაბამებოდეს ფუნქციას. ეს ვლინდება ყველა დონეზე მოლეკულურიდან ორგანიზმულამდე, მათ შორის ნათლად არის ილუსტრირებული უჯრედულ დონეზე ნეირონებით. ნეირონების მიერ ინფორმაციის მიღებისა და გადაცემის უნარი დამოკიდებულია მათი სტრუქტურის სირთულეზე. ნეირონის ორგანოების უმეტესობა, ბირთვის ჩათვლით, უჯრედის სხეულში მდებარეობს (სურათი 48.5). უჯრედის სხეულიდან ორი ტიპის მორჩი გამოდის: მრავალი დენდრიტი და ერთი აქსონი. დენდრიტები ძლიერ დატოტვილი მორჩებია, რომლებიც სიგნალებს სხვა ნეირონებიდან იღებენ. აქსონი ბევრად უფრო გრძელი მორჩია, რომელიც ატარებს სიგნალს სხვა უჯრედისკენ – ნეირონისკენ ან ეფექტორული უჯრედისკენ. ზოგიერთი აქსონი მეტრზე უფრო გრძელიც შეიძლება იყოს, მაგალითად აქსონი, რომელიც ზურგის ტვინიდან ტერფის კუნთთან უჯრედებამდე აღწევს. აქსონის კონუსისებრ ზონას, რომლითაც ის უჯრედის სხეულს უკავშირდება, აქსონის ბორცვი ეწოდება. ეს ის ზონაა, სადაც გენერირდება აქსონში გავრცელებადი სიგნალები. ბევრი აქსონი დაფარულია მიელინის გარსით, რომელიც მოგვიან-



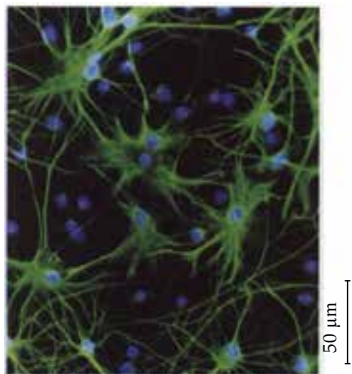
▲ სურათი 48.6 ხერხემლიანთა ნეირონების სტრუქტურული მრავალფეროვნება.

ბით იქნება აღწერილი. დაბოლოებასთან ახლოს აქსონი ჩვეულებრივ იყოფა რამდენიმე ტოტად, რომლებიც მთავრდება სინაფსური დაბოლოებებით. კომუნიკაციის ადგილს სინაფსურ დაბოლოებებსა და სხვა უჯრედებს შორის ეწოდება სინაფსი. სინაფსების უმრავლესობაში, ინფორმაციის გატარება ხდება გადამცემი ნეირონიდან (პრესინაფსური უჯრედი) მიმდებ უჯრედზე (პოსტინაფსური უჯრედი) ნეიროტრანსმიტერად წოდებული ქიმიური გადამცემების საშუალებით.

ნეირონის ფორმის სირთულე დამოკიდებულია სინაფსების რაოდენობაზე, რომლებითაც ის დაკავშირებულია სხვა ნეირონებთან (**სურათი 48.6**). მაგალითად, **სურათი 48.6 ბ.გ** ქვედა ნაწილში ნაჩვენებ ინტერნეირონს აქვს დაახლოებით 100.000 სინაფსი თავის ძალიან დატოტვილ დენდრიტებზე, მაშინ, როდესაც ნეირონებს მარტივი დენდრიტებით საკმაოდ მცირერიცხოვანი სინაფსები აქვთ.

## გლიოტი უჯრედები

**გლია** აერთიანებს დამხმარე უჯრედებს, რომლებიც მნიშვნელოვანია ნერვული სისტემის სტრუქტურული მთლიანობისა და ნეირონების ნორმალური ფუნქციონირებისთვის. ძუძუმწოვრების თავის ტვინში, გლია ნეირონებს რიცხობრივად 10-50-ჯერ სჭარბობს. თავისა და ზურგის ტვინში არის გლიის რამდენიმე ტიპი: ასტროციტები, რადიალური გლია, ოლიგოდენდროციტები და შვანის უჯრედები. ჯგუფურად, ეს უჯრედები აკეთებენ გაცილებით მეტს, ვიდრე უზრალოდ ნეირონების ერთად დაჭერაა. ცნს-ში ასტროციტები წარმოადგენენ ნეირონების სტრუქტურულ საყრდენს და არეგულირებენ იონებისა და ნეიროტრანსმიტერების უჯრედგარე კონცენტრაციას (**სურათი 48.7**). ზოგიერთი ასტროციტი მოსაზღვრე ნეირონების აქტივობას პასუხობს ამ ნეირონების სინაფსებში ინფორმაციის გადაცემის გაადვილებით. მეცნიერების ვარაუდით, ეს გაადვილება დასწავლისა და მეხსიერების უჯრედული მექანიზმის შემადგენელი ნაწილი შეიძლება იყოს. აქტიურ ნეირონებთან მდებარე ასტროციტები ასევე იწვევენ ახლომდებარე სისხლძარღვების გაფართოებას, რაც ზრდის სისხლის ნაკადს ამ ზონისკენ და ნეირონების მიერ ჟანგბადისა და გლუკოზის უფრო სწრაფ შეთვისებას უზრუნველყოფს. განვითარების პერიოდში, ასტროციტები ქმნიან მჭიდრო კავშირებს იმ უჯრედებს შორის, რომლებიც თავისა და ზურგის ტვინის კაპილარებს ქმნიან (**იხ.სურათი**



▲ **სურათი 48.7 ასტროციტები.** ძუძუმწოვრების თავის ტვინის ქერქის მოცემულ ჭრილში, ასტროციტები გამოვლენილია მწვანედ ფლუორესცენტული ანტისხეულებით (LM) მონიშვნის შემდეგ. ლურჯი ნერტილები უჯრედის ბირთვებია, მონიშნული სხვადასხვა ანტისხეულით. ტერმინი „ასტრიციტი“ აღნიშნავს უჯრედების ვარსკვლავის მსგავს ფორმას.

**6.31).** ამის შედეგად წარმოიქმნება ჰემატო-ენცეფალური ბარიერი, რომელიც ცნს-ში მრავალი ნივთიერების გატარებას ზღუდავს და ცნს-ის უჯრედგარე ქიმიური გარემოს ნატიფ კონტროლს ახდენს. ემბრიონში, რადიალური გლია ქმნის გზებს, რომელთა გასწვრივაც მიგრირებენ ახლად ფორმირებული ნეირონები ნერვული მილიდან, იმ სტრუქტურიდან, რომელიც დასაბამს აძლევს ცნს-ს (**იხ. სურათი 47.14 და 47.15**). რადიალურ გლიასა და ასტროციტებს შეუძლიათ აგრეთვე იმოქმედონ ლეროვანი უჯრედების მსგავსად და წარმოქმნან ნეირონები და სხვა ტიპის გლიური უჯრედები. მკვლევრები

განიხილავენ ამ მულტიპოტენციურ პრეკურსორებს, როგორც დაზიანების ან დაავადებების დროს დაკარგული ნეირონებისა და გლიის ჩანაცვლების პოტენციურ საშუალებას, რაც განიხილება კონცეფცია 48.7-ში.

ოლიგოდენდროციტები (ცნს-ში) და შვანის უჯრედები (პნს-ში) წარმოადგენენ გლიას, რომელიც მრავალი ხერხემლიანის ნეირონის აქსონების ირგვლივ ქმნის მიელინის გარსს. პნს-ის მიელინიზებული აქსონის სტრუქტურა ნაჩვენებია **სურათი 48.8-ზე**. ნეირონები იწყებენ მიელინიზაციას განვითარების დროს, როდესაც შვანის უჯრედები ან ოლიგოდენდროციტები იზრდება აქსონების ირგვლივ, და რულების მსგავსად ფუთავს აქსონის მემბრანას მრავალ ფენაში. ეს მემბრანები ძირითადად შეიცავენ ლიპიდებს, რომლებიც ელექტრულ დენს ცუდად ატარებენ. ამგვარად, მიელინის გარსი განაპირობებს აქსონის ელექტრულ იზოლაციას, ანალოგიურად პლასტიკური იზოლაციისა, რომელიც ფარავს ბევრ ელექტრულ სადენს. გაფანტული სკლეროზის დროს, მიელინის გარსი თანდათანობით ზიანდება, რაც იწვევს ორგანიზმის ფუნქციების პროგრესირებად დაკარგვას ნერვული სიგნალების გადაცემის დარღვევის გამო.

## კონცეფცია 48.1

1. ა. მუხლის რეფლექსში ინფორმაციის მსვლელობის შესაბამისად, სწორი თანმიმდევრობით განალაგეთ შემდეგი ნეირონები: ინტერნეირონი, სენსორული ნეირონი, მოტორული ნეირონი.  
ბ. ნეირონის რომელი ტიპი მდებარეობს მთლიანად ცნს-ში?
2. ნეირონის აქსონის გადაჭრა გააჩერებს ნეირონს ინფორმაციის მიღებისა ან გადაცემისგან? ახსენით.
3. რა იქნება ყველაზე გამოხატული სტრუქტურული დარღვევა თავის ნერვულ სისტემაში, რომელიც მოკლებულია ოლიგოდენდროციტებს?

## კონცეფცია 48.2

### იონური ცუმბოები და იონური ატმოსფეროს მისჯინების პოტენციალს ინაბჩუნებენ

მე-7 თავში აღინიშნა, რომ ყველა უჯრედს აქვს ელექტრული პოტენციალის სხვაობა (ვოლტაჟი) პლაზმური მემბრანის უჯრედშიდა და უჯრედგარე უბნებს შორის და მას **მემბრანული პოტენციალი** ეწოდება. თუ ნეირონი სიგნალს არ გადასცემს, მემბრანული პოტენციალი ჩვეულებრივ -60 და -80 მვ-ს (მილივოლტს) შორის ვარირებს. მინუს ნიშანი აჩვენებს, რომ უჯრედშიდა მხარეს უარყოფითი მუხტის სიჭარბეა უჯრედგარე მხარესთან შედარებით. **სურათი 48.9** გვიჩვენებს, როგორ ზომავენ ელექტროფიზიოლოგები უჯრედის მემბრანულ პოტენციალს.

## მოსვენების პოტენციალი

მოსვენების პოტენციალს უწოდებენ ნეირონის ისეთ მემბრანულ პოტენციალს, რომლის დროსაც არ ხდება სიგნალის გადაცემა. ყველა ნეირონში მოსვენების პოტენციალი დამოკიდებულია იონურ გრადიენტებზე, რომლებიც არსებობენ პლაზმური მემბრანის უჯრედშიდა და უჯრედგარე უბნებს შორის (**სურათი 48.10**). მაგალითად, ძუძუმწოვრებში უჯრედგარე სითხეში ნატრიუმის იონების ( $\text{Na}^+$ ) კონცენტრაცია შეადგენს 150 მილიმოლს (mM) და კალიუმის იონების ( $\text{K}^+$ ) კონცენტრაცია 5 mM-ს (1 მილიმოლი = 1 მილიმოლი/ლიტრი = 10<sup>-3</sup> მოლ/ლ). ციტოზოლში  $\text{Na}^+$  კონცენტრაცია შეადგენს 15 mM და  $\text{K}^+$ -ის კონცენტრაცია არის 150 mM. ამგვარად,  $\text{Na}^+$  კონცენტრაციის გრადიენტი, რომელიც გამოიხატება გარე კონცენტრაციის/შიდა კონცენტრაციასთან თანაფარდობის სახით, უდრის 150/15, ანუ 10.  $\text{K}^+$ -ის კონცენტრაციის გრადიენტი არის 5/150, ანუ 1/30 (აქ არის აგრეთვე ანიონური გრადიენტები, მაგრამ ამ მომენტში ჩვენ უგულველყოფთ მათ).  $\text{Na}^+$  და  $\text{K}^+$ -ის გრადიენტები შენარჩუნებულია ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოთი (**იხ.სურათი 7.16**). ის ფაქტი, რომ გრადიენტები პასუხისმგებელნი არიან მოსვენების პოტენციალზე, ნაჩვენებია მარტივი ექსპერიმენტით: თუ ტუმბო გამოთიშულია სპეციფიკური ტოქსინის დამატებით, გრადიენტები თანდათან ქრება. მოსვენების პოტენციალს იგივე ემართება. განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს იმის გაგება, როგორ ქმნიან მოსვენების პოტენციალს იონური გრადიენტები. ეს მნიშვნელოვანი ეტაპია იმის შესწავლაში, როგორ მუშაობენ ნეირონები, ჩვენი საკუთარი ნეირონების ჩათვლით. თავდაპირველად განვიხილოთ ძუძუმწოვრების ნეირონის მოდელი, რომელიც შედგება ხელოვნური მემბრანით გაცალკევებული ორი ნაწილისგან (**სურათი 48.11ა**). მემბრანა შეიცავს მრავალ იონურ არხს (იხ. თავი 7), რომლებიც მხოლოდ  $\text{K}^+$ -ს აძლევენ მემბრანაში დიფუზიის საშუალებას. ძუძუმწოვრების ნეირონის მსგავსი  $\text{K}^+$ -ის კონცენტრაციული გრადიენტის მისაღებად უნდა დავუმატოთ 150mM კალიუმის ქლორიდი (KCL) შიდა განყოფილებას და 5mM KCL გარეთა ნაწილს. მსგავსად ნებისმიერი ხსნარისა,  $\text{K}^+$  გადაადგილება დიფუზიით თავისი კონცენტრაციული გრადიენტის შესაბამისად, მაღალი კონცენტრაციის არედან (შიდა განყოფილება) დაბალი კონცენტრაციის არესაკენ (გარე განყოფილება). მაგრამ, ვინაიდან არხები სელექციურია  $\text{K}^+$ -სთვის, ქლორის იონები ( $\text{Cl}^-$ ) ვერ გადაიან

მემბრანას. ამის შედეგად, მემბრანის შიდა და გარე არეებს შორის მუხტის (ვოლტაჟის) სხვაობა განპირობებულია უარყოფითი მუხტის გაზრდით მემბრანის შიდა ზედაპირზე და დადებითი მუხტის მემბრანის გარეთა ზედაპირზე. მემბრანული მუხტის განვითარება ხელს უშლის  $\text{K}^+$ -ს გამოსვლას, ვინაიდან წარმოქმნილი ელექტრული ძალა მიმართულია დიფუზიის ძალის საწინააღმდეგოდ. ამგვარად, იქმნება ელექტრული გრადიენტი, რომელიც მიმართულია კონცენტრაციული გრადიენტის საპირისპიროდ. როდესაც ელექტრული გრადიენტი საბოლოოდ გაუთანაბრდება კონცენტრაციულ გრადიენტს, მყარდება წონასწორობა. წონასწორობის დროს  $\text{K}^+$ -ის გადაადგილება აღარ ხდება მემბრანის ორ მხარეს შორის\*. \* [მუხტის სხვაობა, რომელიც საჭიროა მოსვენების პოტენციალის გენერირებისთვის არის უკიდურესად მცირე: დაახლოებით 10-12 მოლ/სმ<sup>2</sup>. ამგვარად, იონების

დიფუზია, რომელიც განაპირობებს მოსვენების პოტენციალს, არ იწვევს მნიშვნელოვან ცვლილებას იონთა კონცენტრაციაში] მემბრანული პოტენციალის სიდიდეს წონასწორობისას უწოდებენ წონასწორობის პოტენციალს (E<sub>იონი</sub>), რაც გამოსახულია ფორმულით, რომელსაც უწოდებენ ნერნსტის განტოლებას. ისეთი იონისთვის, როგორიც არის  $\text{K}^+$ , რომლის მუხტი არის +1, 37°C-ზე, ნერნსტის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

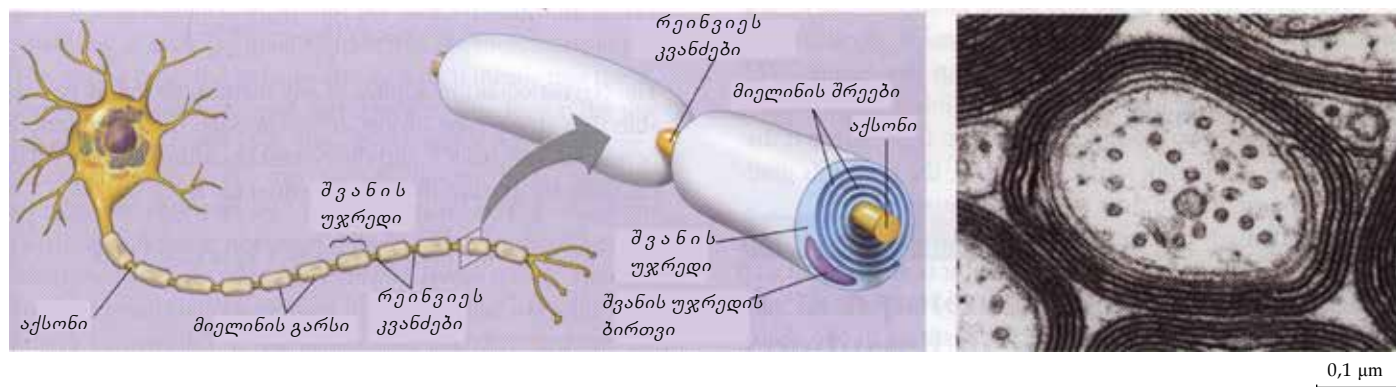
$$E_{\text{იონი}} = 62 \text{ mV} (\log [\text{იონი}]_{\text{გარეთ}} - [\text{იონი}]_{\text{შიგნით}})$$

ნერნსტის განტოლება გამოიყენება ნებისმიერი მემბრანისთვის, რომელიც ერთი ტიპის იონისთვის არის განვლადი. ჩვენს მოდელში მემბრანა განვლადია მხოლოდ  $\text{K}^+$ -სთვის და ნერნსტის განტოლება შეიძლება გამოყენებულ იქნას E<sub>K</sub>-ს ( $\text{K}^+$ -სთვის წონასწორობის პოტენციალი) გამოსათვლელად:

$$E_K = 62 \text{ mV} [\log 5 \text{ mM} / 150 \text{ mM}] = -92 \text{ mV} (37^\circ \text{C-ზე})$$

$\text{K}^+$ -ის კონცენტრაციული გრადიენტის მიწუს ნიშანი მიუთითებს, რომ  $\text{K}^+$ -სთვის წონასწორობა დამყარებულია, როდესაც მემბრანის შიდა არე არის 92 mV-ით უფრო დაბალ პოტენციალზე, ვიდრე გარეთა გარემო.

ახლა წარმოვიდგინოთ, რომ ჩვენი ნეირონის მოდელში შევცვალოთ მემბრანა, რომელიც შეიცავს  $\text{Na}^+$ -ის მიმართ სელექციურ



▲ **სურათი 48.8 შვანის უჯრედები და მიელინის გარსი.** PSN-ში, გლია, რომელსაც უწოდებენ შვანის უჯრედებს, გარშემორტყმულია აქსონებზე და ქმნის მიელინის გარსებს. ნაპრალებს მოსაზღვრე შვანის უჯრედებს შორის უწოდებენ რანვიეს შევიწროვებას. ტრანსმისიური ელექტრონული მიკროსკოპია (TEM) გვიჩვენებს მიელინისგან შემდგომ აქსონის განივ ჭრილს.

## სურათი 48.9

ველეს მეთოდი: უჯრედშიდა პოტენციალი

გამოყენება

ელექტროფიზიოლოგები იყენებენ უჯრედშიდა რეგისტრაციის ნეირონებისა და სხვა უჯრედების მემბრანული პოტენციალების გასაზომად.

მეთოდი

მიკროელექტროდი მომზადებული შუშის წვრილი მილისგან, ივსება ელექტროგამტარი მარილის ხსნარით. მილაკის ერთი ბოლო კონუსისებურად ვიწროვდება უწვრილეს წვეტამდე (დიამეტრი  $< 1$  მიკრომეტრი). ექსპერიმენტატორს მიკროსკოპის ქვეშ მიკრო-პოზიციონერის (ლოკალიზატორის) გამოყენებით შეჰყავს მიკრო-ელექტროდის ბოლო უჯრედში. ელექტრული ძაბვის (ვოლტაჟის) ჩამწერი (ჩვეულებრივ ოსცილოსკოპი ან კომპიუტერიზებული სისტემა) ზომავს ვოლტაჟს უჯრედის შიგნით მიკროელექტროდულ ბოლოსა და უჯრედის გარეთ ხსნარში მოთავსებულ რეფერენტულ ელექტროდს შორის.



არხებს (სურათი 48.11b). ასევე შევცვალეთ განყოფილებების შემადგენლობა, რათა შეგვექმნა ძუძუმწოვრების ნეირონის მსგავსად  $\text{Na}^+$ -ის დამახასიათებელი კონცენტრაციული გრადიენტი: 15mM ნატრიუმის ქლორიდი ( $\text{NaCl}$ ) შიდა ნაწილში და 150mM  $\text{NaCl}$  გარე ნაწილში. ასეთ პირობებში, ნერვსტის განტოლება შეიძლება გამოყენებული იყოს  $\text{ENa}$ -ის ( $\text{Na}^+$ -სათვის წონასწორობის პოტენციალის) გამოსათვლელად:

$$\text{ENa} = 62 \text{ mV} [\log 150\text{mM}/15\text{mM}] = + 62\text{mV} (37^\circ\text{C-ზე})$$

$\text{Na}^+$ -ის კონცენტრაციული გრადიენტის პლიუს ნიშანი გვიჩვენებს, რომ  $\text{Na}^+$ -სათვის წონასწორობა დამყარებულია, როდესაც მემბრანის შიდა მხარე არის 62mV-ით უფრო დადებითა, ვიდრე გარეთა.

რითი განსხვავდება ძუძუმწოვრების რეალური ნეირონი ზემოთ აღწერილი ნეირონის მოდელისგან? ძუძუმწოვრების რეალური ნეირონის პლაზმურ მემბრანას მოსვენების პერიოდში აქვს კალიუმის მრავალი ღია არხი და შედარებით მცირე რაოდენობით ნატრიუმის ღია არხი. შესაბამისად, მოსვენების პოტენციალი არის დაახლოებით -60-დან -80mV-მდე,  $\text{EK}$ -სა და  $\text{ENa}$ -ს შორის. ვინაიდან, მოსვენების მდგომარეობაში არც  $\text{K}^+$ -სა და არც  $\text{Na}^+$ -სათვის არ არის წონასწორობა დამყარებული, მემბრანაში გადის თითოეული იონის სრული ნაკადი (დენი). მოსვენების პოტენციალის სტაბილურად შენარჩუნება ნიშნავს, რომ  $\text{K}^+$ -ის და  $\text{Na}^+$ -ის დენი თანაბარია, მაგრამ ურთიერთსაპირისპირო. იმის მიზეზი, რომ მოსვენების პოტენციალი უფრო ახლოს არის  $\text{EK}$ -თან, ვიდრე  $\text{ENa}$ -თან არის ის, რომ მემბრანა უფრო განვლადია  $\text{K}^+$ -სათვის,  $\text{Na}^+$ -თან შედარებით. თუ რაიმე მიზეზით მოხდა მემბრანის განვლადობის გაზ-

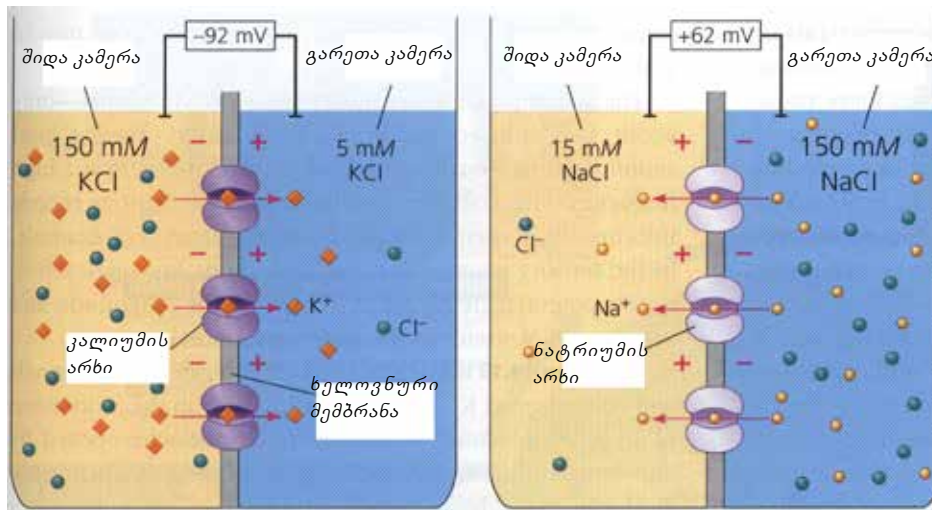
| ციტოზოლი        |   | უჯრედგარეთა სითხე |
|-----------------|---|-------------------|
| $[\text{Na}^+]$ | - | + $[\text{Na}^+]$ |
| 15 mM           |   | 150 mM            |
| $[\text{K}^+]$  | - | + $[\text{K}^+]$  |
| 150 mM          |   | 5 mM              |
| $[\text{Cl}^-]$ | - | + $[\text{Cl}^-]$ |
| 10 mM           |   | 120 mM            |
| $[\text{A}^-]$  | - | + $[\text{A}^-]$  |
| 100 mM          |   | მეზობრივი         |

▲ სურათი 48.10 იონური გრადიენტები ძუძუმწოვართა ნეირონის პლაზმურ მემბრანაზე.  $\text{Na}^+$ -ისა და  $\text{Cl}^-$ -ის კონცენტრაციები არის უფრო მაღალი უჯრედგარეთა (ექსტრაცელულარულ) ხსნარში, ვიდრე ციტოზოლში.  $\text{K}^+$ -სთვის არის საინააღმდეგო წესები. ციტოზოლი ასევე შეიცავს სხვადასხვა ორგანულ ანიონს  $[\text{A}^-]$  დამუხტული ამინომჟავების ჩათვლით.

რდა  $\text{Na}^+$ -ის მიმართ, მემბრანული პოტენციალი  $\text{EK}$ -დან  $\text{ENa}$ -კენ გადაინაცვლებს. ეს არის ნერვულ სისტემაში თითქმის ყველა ელექტრული სიგნალის საფუძველი: მემბრანული პოტენციალის სიდიდე შეიძლება შეიცვალოს, როდესაც მემბრანის განვლადობა იცვლება გარკვეული იონების მიმართ. ნატრიუმისა და კალიუმის იონები ასრულებს მთავარ როლს, მაგრამ ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ქლორისა ( $\text{Cl}^-$ ) და კალციუმის ( $\text{Ca}^{2+}$ ) იონები; ისინი ექვემდებარებიან იგივე წესებს (რაც აღწერილია ნერვსტის განტოლებაში).

## დაჭიშკრული იონური არხები

მოსვენების პოტენციალი წარმოიქმნება  $\text{K}^+$ -ისა და  $\text{Na}^+$ -ის დიფუზიის შედეგად იონურ არხებში, რომლებიც ყოველთვის გახსნილია; ამ არხებს უწოდებენ არადაჭიშკრულ არხებს. ნეირონებს აქვთ აგრეთვე დაჭიშკრული იონური არხები, რომლებიც იხსნება და იკეტება სამი სახეობის სტიმულიდან ერთ-ერთის საპასუხოდ. დაჭიმვისადმი მგრძნობიარე დაჭიშკრული იონური არხები ნანახია უჯრედებში (იხ. სურათი 48.4), რომლებიც შეიგრძნობენ დაჭიმვას და იხსნებიან მემბრანის მექანიკური დეფორმაციის შემთხვევაში. ლიგანდდაჭიშკრული იონური არხები ნანახია სინაფსებში და იხსნება ან იხურება, როდესაც სპეციფიკური ქიმიური ნივთიერება, როგორცაა ნეიროტრანსმიტერი, უკავშირდება არხს. პოტენციალ-მგრძნობიარე დაჭიშკრული იონური არხები ნანახია აქსონებში (და ზოგიერთი ნეირონის დენდრიტებსა და სხეულში, აგრეთვე რიგ სხვა ტიპის უჯრედებში), მათი გახსნა ან დახურვა დამოკიდებულია მემბრანული პოტენციალის ცვლილებაზე. მომდევნო სექციაში ნაჩვენებია იქნება, რომ დაჭიშკრული იონური არხები პასუხისმგებელი არიან ნერვულ სისტემაში სიგნალების გენერაციაზე.



◀ **სურათი 48.11 ძუძუმწოვართა ნეირონის მოდელირება.** თითოეული ქიმიური ჭურჭელი დაყოფილია ორ კამერად ხელოვნური მემბრანით. (ა) მემბრანა შერჩევითად გამტარია  $K^+$ , შიგნითა განყოფილება შეიცავს  $K^+$ -ის 30-ჯერ უფრო მაღალ კონცენტრაციას, ვიდრე გარეთა განყოფილება; ნონას-ნორობისას, მემბრანის შიდა არე არის  $-92 \text{ mV}$  გარეთა მხრის მიმართ. (ბ) მემბრანა შერჩევითად გამტარია  $Na^+$ , და შიდა განყოფილება შეიცავს  $Na^+$ -ის 10-ჯერ უფრო მაღალ კონცენტრაციას, ვიდრე გარეთა განყოფილება; ნონას-ნორობისას, მემბრანის შიდა არე არის  $+60 \text{ mV}$  გარეთა მხრის მიმართ.

## ▶ კანცეფცია ცისდი 48.2

- როგორია ნონასნორობის პოტენციალი (Ex)  $37^\circ\text{C}$ -ზე  $X^+$  იონისათვის, თუ  $[X^+]_{\text{გარე}} = 10 \text{ mM}$  და  $[X^+]_{\text{შიდა}} = 1000$ ?
- ვივარაუდოთ უჯრედის მემბრანული პოტენციალის ცვლილება  $-70 \text{ mV}$ -დან  $-50 \text{ mV}$ -ზე. უჯრედის  $K^+$ -სადმი თუ  $Na^+$ -სადმი განვლადობის რომელმა ცვლილებამ შეიძლება განაპირობოს ასეთი გადართვა?
- შეადარეთ ლიგანდ-დაჭიშკრული და ვოლტაჟ-დაჭიშკრული იონური არხები იმ სტიმულის მიხედვით, რომლებიც განაპირობებენ მათ გახსნას.

## ▶ კანცეფცია 48.3

### მოძმედების პოტენციალები აქსონით გაცარბეული სიგნალებია

თუ უჯრედს აქვს დაჭიშკრული იონური არხები, მისი მემბრანული პოტენციალი შეიძლება შეიცვალოს ისეთი სტიმულის საპასუხოდ, რომელიც გახსნის ან დახურავს ამ არხებს. ზოგიერთი ასეთი სტიმული განაპირობებს **ჰიპერპოლარიზაციას** (**სურათი 48.12 ა**), მემბრანული პოტენციალის სიდიდის შემცირებას. ჰიპერპოლარიზაცია შეიძლება გამოწვეული იყოს  $K^+$ -ის დაჭიშკრული არხების გახსნით, რომლებიც ზრდიან მემბრანების განვლადობას  $K^+$ -ის მიმართ და უახლოვდება  $E_K$  ( $-92 \text{ mV}$   $37^\circ\text{C}$ -ზე). სხვა სტიმული განაპირობებს **დეპოლარიზაციას** (**სურათი 48.12 ბ**), მემბრანული პოტენციალის სიდიდის გაზრდას. დეპოლარიზაციამ შეიძლება განაპირობოს  $Na^+$ -ის დაჭიშკრული არხების გახსნა, რაც ზრდის მემბრანის განვლადობას  $Na^+$  მიმართ და პოტენციალი უახლოვდება  $E_{Na}$  ( $+62 \text{ mV}$ ,  $37^\circ\text{C}$ -ზე). მემბრანული პოტენციალის ამ ცვლილებებს უწოდებენ **გრაფირებულ პოტენციალებს**, რადგან ჰიპერპოლარიზაციის ან დეპოლარიზაციის სიდიდე იცვლება

სტიმულის ძალასთან დაკავშირებით: უფრო მძლავრი სტიმულები იწვევენ უფრო დიდ ცვლილებებს განვლადობაში და შესაბამისად, მემბრანული პოტენციალის უფრო დიდ ცვლილებებს.

### მოძმედების პოტენციალის წაბმოქმნა

ნეირონების უმრავლესობაში, დეპოლარიზაცია თანდათანობით იცვლება მემბრანის გარკვეულ პოტენციალამდე, რომელსაც ზღურბლი ეწოდება. ზღურბლოვანი დეპოლარიზაციის გამოსაწვევად საკმარისად მძლავრი სტიმული ჩართავს განსხვავებული ტიპის პასუხს, რომელსაც უწოდებენ მოქმედების პოტენციალს (**სურათი 48.12 ც**). მოქმედების პოტენციალი ექვემდებარება “სულ ან არაფრის” კანონს: ერთხელ აღმოცენებულს, მას ახასიათებს სიდიდე, რომელიც არ არის დამოკიდებული გამომიზიანებლის ძალაზე. მოქმედების პოტენციალი არის სიგნალი, რომელსაც გადააქვს ინფორმაცია აქსონის გასწვრივ, ზოგჯერ ძალიან დიდ მანძილზე, მაგალითად, თქვენი ფეხის თითიდან ზურგის ტვინამდე.

ნეირონების უმეტესობის მოქმედების პოტენციალი არის ძალიან ხანმოკლე - დაახლოებით 1-2 მილისეკუნდის (მს) ხანგრძლივობის. მოქმედების პოტენციალების მოკლე ხანგრძლივობა საშუალებას აძლევს ნეირონს, წარმოქმნას ისინი მაღალი სიხშირით. ეს თვისება მნიშვნელოვანია, ვინაიდან ნეირონებში კოდირებულია ინფორმაცია მოქმედების პოტენციალის განმუხტვის სიხშირით. მაგალითად, სენსორულ ნეირონებში, რომლებიც ფუნქციონირებენ მუხლის რეფლექსში, მოქმედების პოტენციალის სიხშირე დამოკიდებულია ოთხ-თავა კუნთის გაჭიმვის ინტენსივობაზე.

როგორც ნაჩვენებია **სურათი 48.13-ზე**, პოტენციალმგრძნობიარე  $Na^+$ -ისა და  $K^+$ -ის არხები ჩართულია მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნაში. ორივე ტიპის არხი იხსნება მემბრანის დეპოლარიზაციით, მაგრამ ისინი პასუხობენ დამოუკიდებლად და შემდეგი თანამიმდევრობით: ჯერ  $Na^+$ -ის არხები იხსნება, ხოლო შემდეგ კი  $K^+$ -ის არხები.

ყოველ პოტენციალ-მგრძნობიარე  $Na^+$ -ის არხს აქვს ორი კარი - აქტივაციური და ინაქტივაციური, და ორივე უნდა იყოს გახსნილი არხში  $Na^+$ -ის გადაადგილებისათვის. (1) მოსვენების პოტენციალის დროს,  $Na^+$  არხების უმეტესობის აქტივაციური კარი არის

დახურული და ინაქტივაციური კარი კი ღიაა. მემბრანის დეპოლარიზაცია სწრაფად აღებს აქტივაციურ კარს და ნელა ხურავს ინაქტივაციურ კარს.

ყოველ პოტენციალ-მგრძნობიარე  $K^+$ -ის არხს აქვს მხოლოდ ერთი აქტივაციური კარი. მოსვენების პოტენციალის დროს,  $K^+$  არხების უმეტესობის აქტივაციური კარი დახურულია. მემბრანის დეპოლარიზაცია ნელა ხსნის  $K^+$ -ის არხების აქტივაციურ კარს.

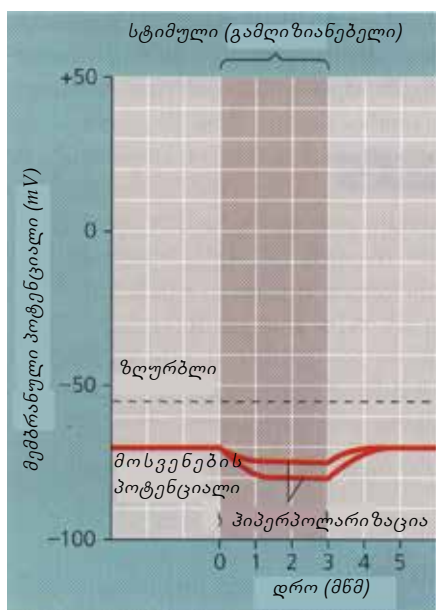
როგორ მონაწილეობენ არხების აღწერილი თავისებურებები მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნაში? (2) როდესაც სტიმული იწვევს მემბრანის დეპოლარიზაციას,  $Na^+$ -ის ზოგიერთი არხის აქტივაციური კარი იხსნება, რაც განაპირობებს მეტი  $Na^+$ -ის შესვლას უჯრედში.  $Na^+$ -ის ნაკადის შესვლა იწვევს შემდგომ დეპოლარიზაციას, რომელიც  $Na^+$ -ის მეტ არხში ხსნის აქტივაციურ კარს, რაც განაპირობებს კიდევ უფრო მეტი  $Na^+$ -ის შესვლას უჯრედში და ა.შ. (3) თუ ზღურბლი მიღწეულ იქნა ერთხელ, დადებითი უკუკავშირით ის სწრაფად იწვევს მემბრანული პოტენციალის მიახლოებას  $ENa$ -თან აღმავალი ფაზის დროს. (4) თუმცა, მემბრანული პოტენციალის  $ENa$ -თან მიახლოებას ორი მოვლენა ეწინააღმდეგება: (ა)  $Na^+$ -ის არხების უმეტესობის ინაქტივაციური კარები იხურება,

$EK$ -თან, ვიდრე მოსვენების პოტენციალი.  $K^+$ -ის არხების აქტივაციური კარები საბოლოოდ იხურება და მემბრანული პოტენციალი უბრუნდება მოსვენების პოტენციალს.

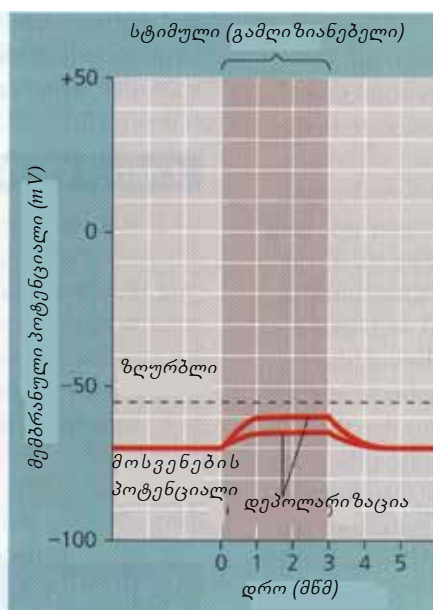
$Na^+$ -ის არხების ინაქტივაციური კარები რჩება დახურული დაღმავალი ფაზის დროს და ანდერშუტის დასაწყისში ამის შედეგად, მეორე დეპოლარიზაციული სტიმული ამ პერიოდში, ვერ შესძლებს მოქმედების პოტენციალის გამოწვევას. მოქმედების პოტენციალის შემდეგ „იძულებითი უმოქმედობის“ პერიოდს, როდესაც მეორე მოქმედების პოტენციალი ვერ აღიძვრება, უწოდებენ **რეფრაქტორულ პერიოდს**. ეს ინტერვალები ზღუდავენ მოქმედების პოტენციალების განმუხტვის მაქსიმალურ სიხშირეს.

## მოქმედების პოტენციალების გაცატება

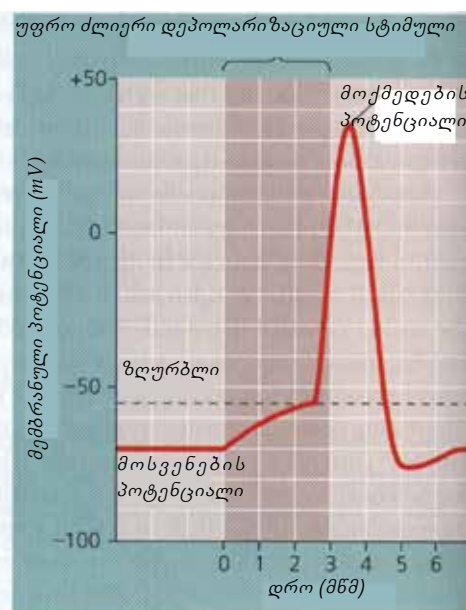
იმისათვის, რომ მოქმედების პოტენციალმა იმოქმედოს, როგორც შორ მანძილზე მოქმედმა სიგნალმა, ის უნდა გატარდეს შესუსტების გარეშე უჯრედის სხეულიდან სინაფსურ ტერმინალამდე. ეს ხორციელდება აქსონის გასწვრივ თვითრეგენერაციით. იმ უბანში, სადაც აღიძვრება მოქმედების პოტენციალი (ჩვეულებრივ აქსონის ბორცვში),  $Na^+$ -ის შესვლა აღმავალი ფაზის დროს ქმნის



(ა) გრადუირებული ჰიპერპოლარიზაცია წარმოქმნილი ორი სტიმულით, რომელიც ზრდის მემბრანის გამტარებლობას  $K^+$ -ის მიმართ. უფრო დიდი სტიმული წარმოქმნის უფრო დიდ ჰიპერპოლარიზაციას.



(ბ) გრადუირებული დეპოლარიზაცია წარმოქმნილი ორი სტიმულით, რომელიც ზრდის მემბრანის გამტარებლობას  $Na^+$ -ის მიმართ. უფრო დიდი სტიმული წარმოქმნის უფრო დიდ დეპოლარიზაციას.

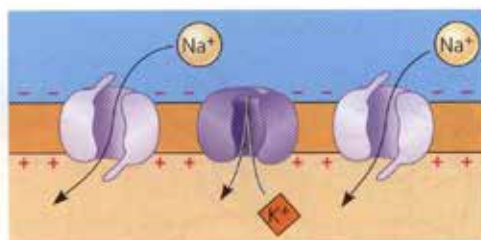


(გ) მოქმედების პოტენციალი, წარმოქმნილი დეპოლარიზაციით, რომელმაც მიაღწია ზღურბლს.

▲ **სურათი 48.12** გრადუირებული პოტენციალები და მოქმედების პოტენციალი ნეირონში.

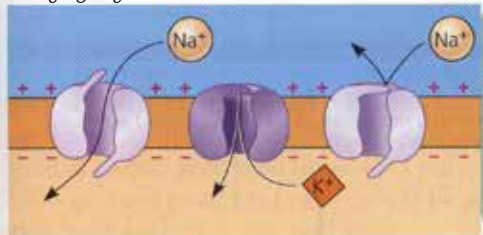
რაც აფერხებს  $Na^+$ -ის ჩადენას; და (ბ)  $K^+$  არხების უმრავლესობის აქტივაციური კარები გახსნილია, რაც იწვევს  $K^+$ -ის სწრაფ გამოდენას. ორივე პროცესს სწრაფად მიჰყავს დაღმავალ ფაზაში მემბრანული პოტენციალი უკან  $EK$ -კენ. (5) მოქმედების პოტენციალის ბოლო ფაზაში, რომელსაც უწოდებენ ანდერშუტს, მემბრანის განვლადობა  $K^+$ -ის მიმართ უფრო მაღალია, ვიდრე მოსვენების დროს, ამიტომაც მემბრანული პოტენციალი ამ დროს უფრო ახლოსაა

ელექტრულ დენს, რომელიც ახდენს აქსონის მემბრანის მეზობელი უბნის დეპოლარიზაციას (**სურათი 48.14**). მოსაზღვრე უბნის დეპოლარიზაცია საკმარისია ზღურბლის მისაღწევად, რომელიც იწვევს მოქმედების პოტენციალის კვლავ აღძვრას ამ უბანზე. ეს პროცესი მეორდება მრავალჯერ, სანამ მოქმედების პოტენციალი გაივლის აქსონის მთელ სიგრძეს.  $Na^+$ -ის შესვლით გამოწვეული დეპოლარიზაციის უბნის უკან არის რეპოლარიზაციის ზონა,



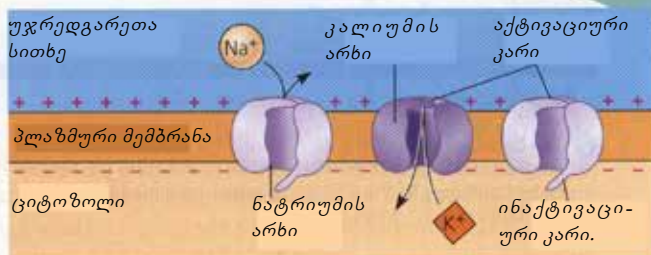
3 მოქმედების პოტენციალის აღმავალი ფაზა

დეპოლარიზაცია ხსნის აქტივაციურ კარებს ბევრ  $\text{Na}^+$ -ის არხზე, ხოლო  $+$ -ის არხების აქტივაციური კარები რჩება დახურული.  $\text{Na}^+$ -ის ნაკადი პოზიტიურს ხდის მემბრანის შიდა მხარეს გარეთა მხრის მიმართ.



2 დეპოლარიზაცია

სტიმული ხსნის აქტივაციურ კარებს ზოგიერთ  $\text{Na}^+$ -ის არხზე.  $\text{Na}^+$ -ის შესვლა ამ არხებით იწვევს მემბრანის დეპოლარიზაციას. თუ დეპოლარიზაცია მიაღწევს ზღურბლს, წარმოიქმნება მოქმედების პოტენციალი.

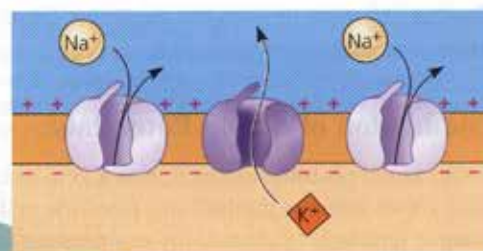


1 მოსვენების მდგომარეობა

აქტივაციური კარი  $\text{Na}^+$ -ისა და  $\text{K}^+$ -ის არხებზე დახურულია და მემბრანის მოსვენების პოტენციალი შენარჩუნებულია.

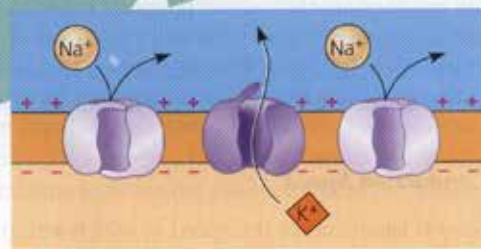
▲ **სურათი 48.13 ვოლტაჟ-დაჟიშკრული იონური არხების როლი მოქმედების პოტენციალის გენერაციაში.** გრაფიკის ცენტრში შემოხაზული ციფრები და მოქმედების პოტენციალის შეფერილი ფაზები წარმოდგენილი ხუთ დიაგრამაზე გვიჩვენებენ ვოლტაჟ-დაჟიშკრული  $\text{Na}^+$ -ისა და  $\text{K}^+$ -ის არხებს ნეირონის პლაზმურ მემბრანაში. (არადაჟიშკრული არხები ილუსტრირებული არ არის).

რაც განპირობებულია  $\text{K}^+$ -ის გამოსვლით. რეპოლარიზებულ ზონაში,  $\text{Na}^+$ -ის არხების ინაქტივაციური კარი ჯერ კიდევ დახურულია. შესაბამისად, დენს, რომლითაც მოქმედების პოტენციალი აქსონის მემბრანის დეპოლარიზაციას იწვევს მომდევნო უბანში, არ შეუძლია წარმოქმნას სხვა მოქმედების პოტენციალი მის უკან მდებარე უბანში. ეს ეწინააღმდეგება მოქმედების პოტენციალის გავრცელებას უკან, უჯრედის სხეულისკენ. ამგვარად, ერთხელ აღმოცენებული მოქმედების პოტენციალი, ჩვეულებრივ გადაადგილდება მხოლოდ ერთი მიმართულებით – სინაფსური დაბოლოებისკენ.



4 მოქმედების პოტენციალის დაღმავალი ფაზა

ინაქტივაციური კარები უმრავლეს  $\text{Na}^+$ -ის არხზე დახურულია, რაც იწვევს  $\text{Na}^+$ -ის ნაკადის ბლოკირებას. აქტივაციური კარი ბევრ  $\text{K}^+$ -ის არხზე გახსნილია და ატარებს  $\text{K}^+$ -ის ნაკადს, რომელიც კვლავ ნეგატიურს ქმნის უჯრედის შიდა მხარეს.



5 ანდერშუტი

$\text{Na}^+$ -ის არხის ორივე კარი დახურულია, მაგრამ  $\text{K}^+$ -ის ზოგიერთი არხის აქტივაციური კარი ჯერ კიდევ გახსნილია. თუ კარი დაიხურა  $\text{K}^+$ -ის ბევრ არხზე და ინაქტივაციური კარები  $\text{Na}^+$ -ის არხებზე გაიხსნა, მემბრანა დაუბრუნდება მოსვენების მდგომარეობას.

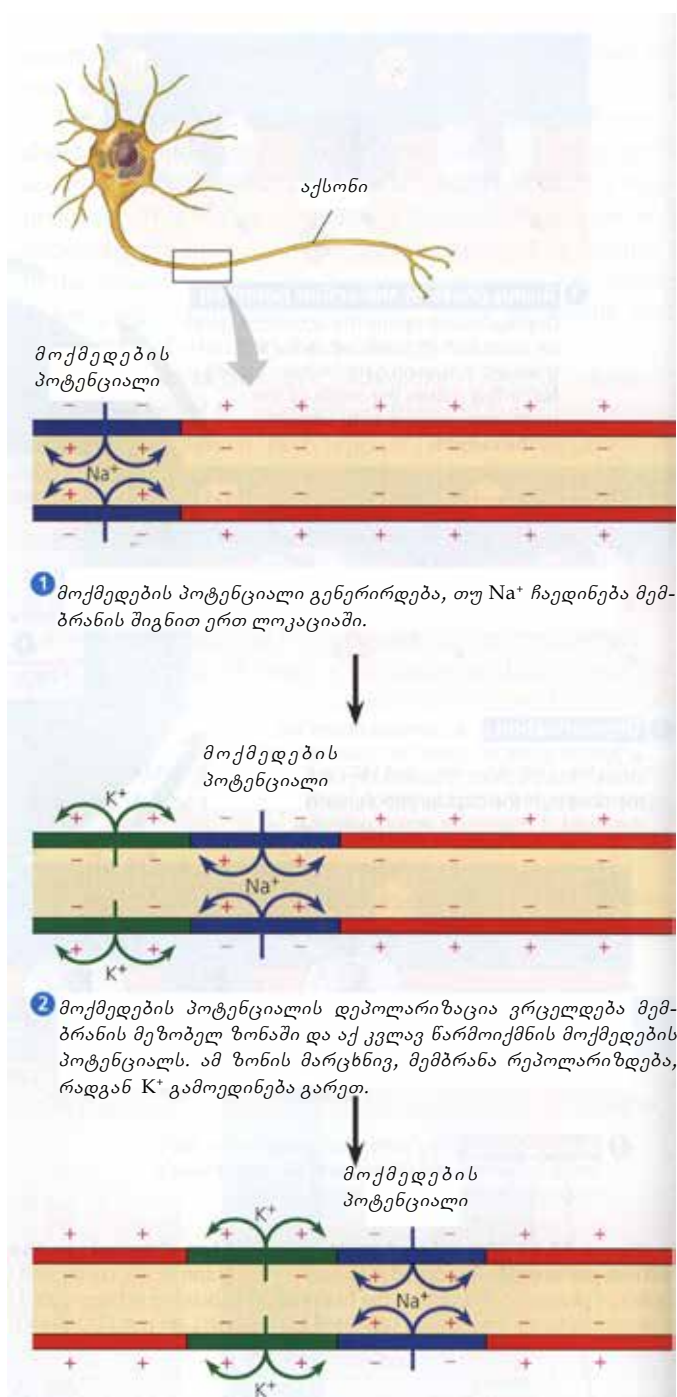
## გატარების სიჩქარე

მოქმედების პოტენციალის გატარების სიჩქარეზე რიგი ფაქტორები ახდენს გავლენას. ერთი ფაქტორია აქსონის დიამეტრი: რაც უფრო დიდია აქსონის დიამეტრი, მით უფრო სწრაფია გატარება. ეს ხდება იმიტომ, რომ ელექტრული დენის ნაკადის მიმართ გამტარის (როგორიცაა მავთული ან აქსონი) წინააღობა (რეზისტენტულობა) განიცდის უკუპროპორციულობას. ანალოგიის თვალსაზრისით განვიხილოთ განიერი შლანგი, რომელიც უფრო ნაკლებად რეზისტენტულია წყლის ნაკადისადმი, ვიდრე ვიწრო.

ამის მსგავსად, განიერი აქსონი მოქმედების პოტენციალით გამოწვეული დეპოლარიზაციული დენისადმი ნაკლებ რეზისტენტულია ვიწროსთან შედარებით. ამგვარად, დეპოლარიზაცია შეიძლება გავრცელდეს უფრო შორს განიერი აქსონის გასწვრივ და ამით შედარებით სწრაფად მიუახლოვოს მემბრანის უფრო მოცილებული უბნები ზღურბლს. უხერხემლოებში გატარების სიჩქარე ძალიან ვიწრო აქსონებში არის რამდენიმე სმ/წმ-ში, ხოლო კალმარებისა და ზოგიერთი ფესხასსრიანის გიგანტურ აქსონში დაახლოებით 100 მ/წმ-ში. ეს გიგანტური აქსონები მოქმედებენ ისეთ ქცევით პასუხებში, რომლებიც მოითხოვენ დიდ სისწრაფეს, როგორიც არის კუდის უკუკერა, რომელიც საშუალებას აძლევს მდინარის კიბოს გაექცენ მტაცებელს.

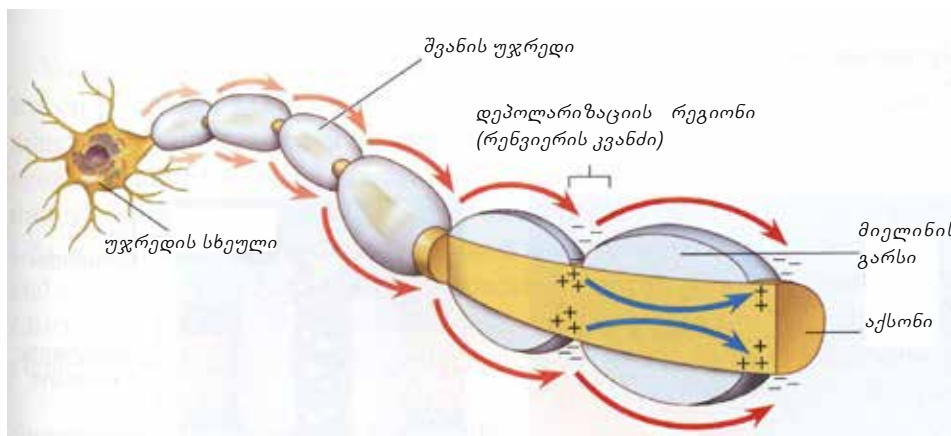
ხერხემლიანებში განვითარებულია მოქმედების პოტენციალის გატარების სიჩქარის გაზრდის სხვა საშუალება. გავიხსენოთ, რომ მრავალი ხერხემლიანის აქსონი დაფარულია მიელინის გარსით (იხ. სურათი 48.8). მიელინი ზრდის მოქმედების პოტენციალის გატარების სიჩქარეს აქსონის მემბრანის იზოლაციით. იზოლაციას აქვს იგივე ეფექტი, რაც აქსონის დიამეტრის გაზრდას. ის იწვევს მოქმედების პოტენციალთან დაკავშირებული დეპოლარიზაციული დენის შორს გავრცელებას აქსონის გასწვრივ, რაც გაცილებით სწრაფად აახლოვებს მემბრანის უფრო მოცილებულ უბნებს ზღურბლთან. მიელინიზაციის დიდი უპირატესობაა მისი სივრცითი ეფექტურობა. მიელინიზებულ აქსონს 20  $\mu\text{m}$  დიამეტრით ახასიათებს დაახლოებით იგივე გატარების სიჩქარე, რაც კალმარის გიგანტურ აქსონს (1 მმ დიამეტრით), მაგრამ 2,000-ზე მეტი ასეთი მიელინიზებული აქსონი, შესაძლებელია მოთავსდეს იმ სივრცეში, რომელიც უკავია მხოლოდ ერთ გიგანტურ აქსონს.

მიელინიზებულ აქსონში, პოტენციალ-მგრძნობიარე  $\text{Na}^+$ -ისა და  $\text{K}^+$ -ის არხები კონცენტრირებულია მიელინის გარსის ნაპრალებში, რომლებსაც უწოდებენ რანვიეს შევიწროვებას (იხ. სურათი 48.8). უჯრეთგარე სითხე კონტაქტს ამყარებს აქსონის მემბრანასთან მხოლოდ რანვიეს შევიწროვებაში. ამის შედეგად მოქმედების პოტენციალი არ წარმოიქმნება შევიწროვებას შორის არსებულ უბნებში. უფრო სწორედ, დენი, რომელიც წარმოიქმნება რანვიეს სივიწროვებაში, მოქმედების პოტენციალის აღმავალ ფაზაში, გაივლის მთელ გზას შემდგომ შევიწროვებამდე, სადაც ის ახდენს მემბრანის დეპოლარიზაციას და გენერირებს ახალ მოქმედების პოტენციალს (სურათი 48.15). ამ მექანიზმს უწოდებენ **სალტატორულ გავრცელებას**, რადგანაც შთაბეჭდილება იქმნება, რომ მოქმედების პოტენციალი ხტუნავს აქსონის გასწვრივ შევიწროვებიდან შევიწროვებამდე. სალტატორული გატარებით მოქმედების პოტენციალის სიჩქარე მიელინიზებულ აქსონში არის 120მ/წმ.



**3** მემბრანის შემდეგ ზონაში მეორდება დეპოლარიზაცია-რეპოლარიზაციის პროცესი. ამ გზით, იონების პლაზმურ მემბრანაზე განივად აღძრული ლოკალური დენები, ინვევენ მოქმედების პოტენციალის გავრცელებას აქსონის გასწვრივ.

**▲ სურათი 48.14 მოქმედების პოტენციალის გატარება.** სურათი გვიჩვენებს მოვლენებს, რომლებიც აღიძვრება აქსონში სამ ერთ-მანეთის მომდევნო პერიოდში, როდესაც მოქმედების პოტენციალი გადაინაცვლებს მარცხნიდან მარჯვნივ. აქსონის გასწვრივ თითოეულ ნერტილში, ვოლტაჟ-დაჭიშკრული იონური არხები გადიან 48.13-ე სურათზე აღწერილი ცვლილებების თანმიმდევრობას. მემბრანის ზონების ფერი აქ შეესაბამება სურათ 48.13-ზე მოტანილ აქტიური პოტენციალის ფაზებს.



◀ **სურათი 48.15 სალტატორული გატარება.** მიელინიზებულ აქსონში, დეპოლარიზაციული დენი მოქმედების პოტენციალის გენერაციის პერიოდში, რანვიეს ერთი შევინროვებიდან ვრცელდება აქსონის გასწვრივ შიდა მხარეს შემდეგი შევინროვებისკენ (ლურჯი ისრები), სადაც კვლავ წარმოიქმნება. ამგვარად, მოქმედების პოტენციალი ხტუნაობს ერთი სივინროვიდან მეორეზე, როდესაც მოძრაობს აქსონის გასწვრივ (წითელი ისრები).

## ჯანცუცია ცესცი **48.3**

1. რითი განსხვავდება მოქმედების პოტენციალი გრადუალური პოტენციალისგან?
2. ივარაუდეთ, რომ მუტაციის შედეგად,  $\text{Na}^+$ -ის არხების ინაქტივაციური კარი რჩება დახურული უფრო ხანგრძლივად მოქმედების პოტენციალის შემდეგ. რა გავლენას მოახდენს ეს მოქმედების პოტენციალების აღმოცენების მაქსიმალურ სიხშირეზე?
3. დაალაგეთ გატარების სისწრაფის მიხედვით დაბლიდან მაღლისაკენ: (ა) მიელინიზებული, მცირე-დიამეტრის აქსონი, (ბ) მიელინიზებული, დიდი-დიამეტრის აქსონი, (ც) უმიელინო, მცირე-დიამეტრის აქსონი.

## ჯანცუცია **48.4**

### ნეიტონები სინაფსების მუშაობით უტითიტობენ

როდესაც მოქმედების პოტენციალი აღწევს აქსონის დაბოლებას, ის ჩვეულებრივ იქ ჩერდება. უმეტეს შემთხვევაში, მოქმედების პოტენციალი არ გადაეცემა ნეირონიდან სხვა უჯრედებს. მიუხედავად ამისა, ინფორმაცია გადაეცემა და ეს სინაფსებში ხდება. ზოგიერთი სინაფსი, რომლებსაც ელექტრულ სინაფსებს უწოდებენ, შეიცავენ ნაპარალოვან კონტაქტებს (**იხ. სურათი 6.31**), რომლებიც განაპირობებენ ელექტრული დენის გატარებას პირდაპირ უჯრედიდან უჯრედზე. როგორც ხერხემლიანებში, ასევე უხერხემლოებში, ელექტრული სინაფსები ახდენენ იმ ნეირონების აქტივობის სინქრონიზაციას, რომლებიც პასუხისმგებელი არიან გარკვეულ სწრაფ, სტერეოტიპულ ქცევაზე. მაგალითად, კიბოსნაირების გიგანტური აქსონები დაკავშირებული არიან ელექტრული სინაფსებით, რომლებიც აადვილებენ გაქცევის პასუხის სწრაფ შესრულებას. სინაფსის დიდი უმრავლესობა ქიმიური სინაფსია, სადაც ხდება ნეიროტრანსმიტერის გამოყოფა პრესინაფსური ნეირო-

ნიდან. პრესინაფსური ნეირონი ასინთეზებს ნეიროტრანსმიტერს და ფუთავს მას სინაფსურ ვეზიკულებში, რომლებიც გროვდება სინაფსურ დაბოლოებებში. ასობით სინაფსური ტერმინალი ურთიერთქმედებს პოსტსინაფსური ნეირონის უჯრედის სხეულთან და დენდრიტებთან (**სურათი 48.16**). როდესაც მოქმედების პოტენციალი მიაღწევს სინაფსურ ტერმინალს, ის ახდენს მემბრანის დეპოლარიზაციას. ამის შედეგად მემბრანაში პოტენციალ-მგრძნობიარე კალციუმის არხები იხსნება (**სურათი 48.17**). შესული კალციუმის იონები ( $\text{Ca}^{2+}$ ) დიფუნდირებენ ტერმინალში, მათი კონცენტრაციის გაზრდა იწვევს ზოგიერთი სინაფსური ვეზიკულის შერწყმას ტერმინალურ მემბრანასთან და ნეიროტრანსმიტერის გამოყოფას ეგზოციტოზის გზით (იხ. თავი 7). ნეიროტრანსმიტერი დიფუნდირებს სინაფსურ ნაპარალში \_ ვიწრო უბანში, რომლითაც პრესინაფსური ნეირონი განცალკევებულია პოსტსინაფსური უჯრედისგან. ნეიროტრანსმიტერის ეფექტი პოსტსინაფსურ უჯრედზე შეიძლება იყოს პირდაპირი ან არაპირდაპირი (შემდეგში იქნება აღწერილი). ინფორმაციის გადაცემა უფრო მეტად ექვემდებარება ცვლილებებს ქიმიურ სინაფსებში, ვიდრე ელექტრულ სინაფსებში. მთელ რიგ ფაქტორებს შეუძლია იმოქმედონ გამოყოფილი ნეიროტრანსმიტერის რაოდენობაზე, ან პოსტსინაფსური უჯრედის რეაქტიულობაზე. ასეთი მოდიფიკაციები საფუძვლად უდევს ცხოველების დასწავლისა და მესხიერების უნარს.

### პირდაპირი სინაფსური გადაცემა

ბევრ ქიმიურ სინაფსში, ნეიროტრანსმიტერებთან დაკავშირების უნარიანი ლიგანდ-დაჭიშკრული იონური არხები, კლასტრების სახით მჭიდროდაა წარმოდგენილი პოსტსინაფსური უჯრედის მემბრანაში - უშუალოდ სინაფსური ტერმინალის პირდაპირ (**სურათი 48.17**). ნეიროტრანსმიტერის დაკავშირება არხის გარკვეულ ნაწილთან \_ რეცეპტორთან, ხსნის არხს და განაპირობებს იონების გადაადგილებას პოსტსინაფსურ მემბრანაში. ინფორმაციის გადაცემის ამ მექანიზმს უწოდებენ პირდაპირ სინაფსურ ტრანსმისიას. ამის შედეგად მიიღება პოსტსინაფსური პოტენციალი - ცვლილება პოსტსინაფსური უჯრედის მემბრანულ პოტენციალში. ზოგიერთ სინაფსში, ნეიროტრანსმიტერი უკავშირდება ისეთ არხს, რომელიც განვლადია როგორც  $\text{Na}^+$ -ს, ასევე  $\text{K}^+$ -ის იონებისათვის. თუ ასეთი არხები გახსნილია, პოსტსინაფსური მემბრანა დეპოლარიზდება. რევერსიის პოტენციალი სინაფსური დენის არის დაახლოებით



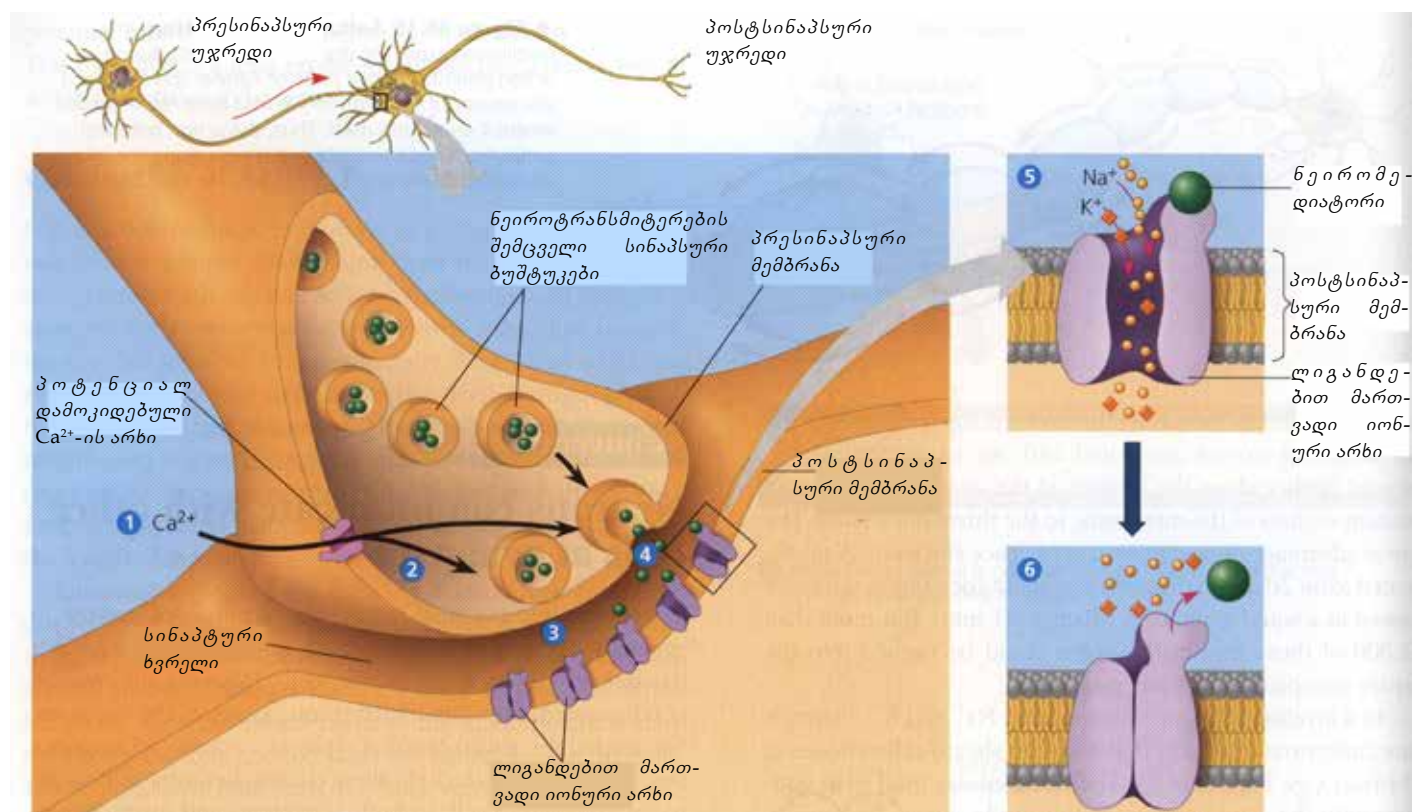
▲ **სურათი 48.16** სინაფსური ტერმინალები პოსტსინაფსური ნეირონის უჯრედის სხეულზე (შეფერილია SEM — მასკანირებული ელექტრონული მიკროსკოპით).

საშუალო სიდიდე EK და  $E_{Na}$  შორის. ვინაიდან, ასეთ დეპოლარიზაციებს მემბრანული პოტენციალი მიჰყავს მოქმედების პოტენციალის ზღურბლამდე, მათ უწოდებენ ამაგზნებელ პოსტსინაფსურ პოტენციალებს (აპსპ). განსხვავებულ სინაფსში ნეიროტრანსმიტერი უკავშირდება არხებს, რომლებიც სელექტიურები არიან მხოლოდ  $K^+$ -სთვის. როდესაც ეს არხები გახსნილია, პოსტსინაფსური

მემბრანა განიცდის ჰიპერპოლარიზაციას. ამ გზით გამოწვეულ ჰიპერპოლარიზაციას უწოდებენ შემაკავებელ პოსტსინაფსურ პოტენციალს (შპსპ-ს), რადგანაც ისინი მემბრანულ პოტენციალს აშორებენ მოქმედების პოტენციალის ზღურბლს. ნეიროტრანსმიტერების ეფექტი პოსტსინაფსურ უჯრედებზე სხვადასხვა მექანიზმებით მთავრდება. ბევრ სინაფსში, ნეიროტრანსმიტერი უბრალოდ დიფუნდირებს სინაფსური ნაპრალის გარეთ. სხვებში, ნეიროტრანსმიტერი აქტიური ტრანსპორტის გზით შთაინთქმება პრესინაფსური ნეირონი და კვლავ მოთავსდება სინაფსურ ვეზიკულებში. ზოგიერთ სინაფსში ნეიროტრანსმიტერს აქტიურად შთანთქავს გლია და გარდაქმნის მას, როგორც საწვავს. ნეიროტრანსმიტერი აცეტილქოლინი იშლება ფერმენტით, აცეტილქოლინესთერაზით, რომელიც განთავსებულია სინაფსურ ნაპრალში.

## პოსტსინაფსური პოტენციალების შეჯამება

მოქმედების პოტენციალებისგან განსხვავებით, რომლებიც ექვემდებარებიან სულ ან არაფრის კანონს, პოსტსინაფსური პოტენციალები გრადუირებულია; მათი სიდიდე რიგი ფაქტორების ზემოქმედებით იცვლება, მათ შორის პრესინაფსური ნეირონის მიერ გამოყოფილი ნეიროტრანსმიტერის რაოდენობით. მეორე განსხვავება არის ის, რომ პოსტსინაფსურ პოტენციალებს ჩვე-



▲ **სურათი 48.17 ქიმიური სინაფსი.** ① როდესაც სინაფსური ტერმინალის პლაზმური მემბრანა, მოქმედების პოტენციალით დეპოლარიზებულია, ② მემბრანაში იხსნება ვოლტაჟ-დაჭიშკრული  $Ca^{2+}$ -ის არხები და ხდება  $Ca^{2+}$ -ის ჩადენა. ③ ტერმინალში  $Ca^{2+}$ -ის გაზრდილი კონცენტრაცია იწვევს სინაფსური ბუშტუკების მიმაგრებას პრესინაფსურ მემბრანასთან. ④ ბუშტუკები სინაფსურ ნაპრალში ნეიროტრანსმიტერს გამოყოფენ. ⑤ არხები იხსნება ნეიროტრანსმიტერის დაკავშირებით პოსტსინაფსურ მემბრანაში ლიგანდ-დაჭიშკრული იონური არხების რეცეპტორების ნაწილთან. სურათზე ილუსტრირებული სინაფსით როგორც  $Na^+$ -ს, ასევე  $K^+$ -ს შეუძლია არხებში დიფუზია. ⑥ რეცეპტორებიდან გამოიყოფა ნეიროტრანსმიტერი და არხები იხურება. სინაფსური გადაცემა მაშინ მთავრდება, როდესაც სინაფსური ხვრელიდან გარეთ დიფუნდირებული ნეიროტრანსმიტერი შთაინთქმება სინაფსური ტერმინალით ან სხვა უჯრედით, ან დაიშლება ფერმენტით.

ულეზრე არ აქვს თვითრეგენერაციის უნარი უჯრედის მემბრანის გასწვრივ გავრცელებისას; ისინი სინაფსიდან მცირე მანძილზე ვრცელდებიან. გავისხენოთ, რომ ნეირონზე სინაფსების უმრავლესობა მდებარეობს მის დენდრიტებზე და უჯრედის სხეულზე, მაშინ როდესაც მოქმედების პოტენციალები ჩვეულებრივ აღმოცენდება აქსონის ბორცვში. ამიტომ, ცალკეული აქსპ-ი პოსტსინაფსურ ნეირონში მოქმედების პოტენციალის გამოსაწვევად ჩვეულებრივ ძალიან ცოტაა (**სურათი 48.18 ა**). თუმცა, თუ ორი აქსპ-ი შეიძლება წარმოიქმნას ერთ სინაფსში სწრაფი თანმიმდევრობით. მეორე აქსპ შეიძლება დაიწყოს მანამ, სანამ პოსტსინაფსური ნეირონის პირველი აქსპ-ის მემბრანული პოტენციალი დაუბრუნდება მოსვენების პოტენციალს. ასეთ შემთხვევაში, აქსპ ემატება ერთმანეთს და ამას ეწოდება შეჯამება დროში (**სურათი 48.18 ბ**).

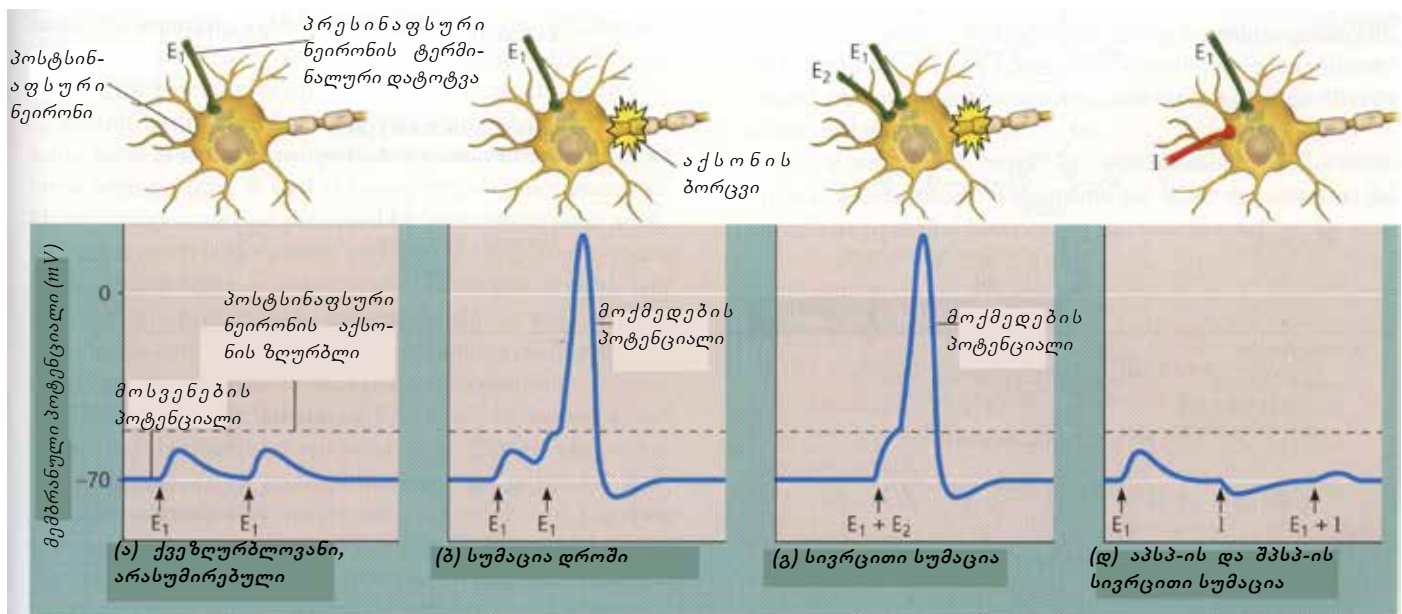
უფრო მეტიც, ერთ პოსტსინაფსურ ნეირონში სხვადასხვა სინაფსით თითქმის ერთდროულად გამოწვეული აქსპ-ები შეიძლება ასევე დაემატოს ერთმანეთს და ამას ეწოდება სივრცითი შეჯამება (**სურათი 48.18 გ**). სივრცეში და დროში შეჯამების საშუალებით, რამდენიმე აქსპ-ს შეუძლია აქსონური ბორცვის მემბრანის ზღურბლოვანი დეპოლარიზაცია, რაც იწვევს პოსტსინაფსურ ნეირონში მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნას. შეჯამება ასევე ეხება შპსპ-ს: ორ ან მეტ შპსპ-ს, რომლებიც აღმოცენდება თითქმის ერთდროულად ან სწრაფი თანმიმდევრობით, აქვს უფრო დიდი ჰიპერპოლარიზაციული ეფექტი, ვიდრე მხოლოდ ერთ შპსპ-ს. შეჯამების გზით შპსპ-მ შეიძლება ასევე გააბათილოს აქსპ-ის ეფექტი (**სურ, 48.18 დ**). ასეთი ურთიერთქმედება მრავალ ამაგზნებელ და შემაკავებელ შესავლებს შორის არსებითაა ნერვულ სისტემაში ინტეგრაციული მოქმედებისთვის. აქსონური ბორცვი არის ნეირონის ინტეგრაციული ცენტრი – უბანი, სადაც მემბრანული პოტენციალის ცვლილებები ნებისმიერ მომენტში წარმოდგენილია აქსპ-ისა და შპსპ-ის ჯამის სახით. როდესაც მემბრანული პოტენციალი აქსონ-

ურ ბორცვში მიაღწევს ზღურბლს, მოხდება მოქმედების პოტენციალის გენერირება, რომელიც გაივლის აქსონის გასწვრივ მის სინაფსურ ტერმინალამდე. რეფრაქტორული პერიოდის შემდეგ, ნეირონს შეუძლია მეორე მოქმედების პოტენციალის გენერაცია, თუ აქსონურ ბორცვში კვლავ იქნა მიღწეული ზღურბლი. მეორე მხრივ, აქსპ-ისა და შპსპ-ის შეჯამების ეფექტს შეუძლია მემბრანული პოტენციალის შენარჩუნება ქვეზღურბლოვან დონეზე, რითაც ეწინააღმდეგება მოქმედების პოტენციალის გენერაციას.

## არაპირდაპირი სინაფსური გადაცემა

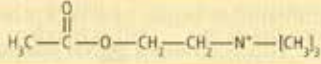
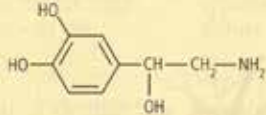
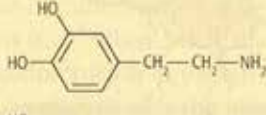
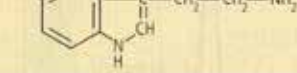
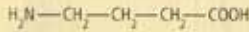
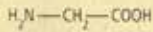
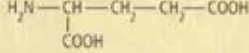
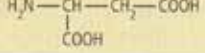
აქამდე ჩვენ განვიხილავდით პირდაპირ სინაფსურ გადაცემას, სადაც ნეიროტრანსმიტერი პირდაპირ უკავშირდება იონურ არხს, რაც იწვევს არხის გახსნას. არაპირდაპირი სინაფსური ტრანსმისიის შემთხვევაში ნეიროტრანსმიტერი უკავშირდება რეცეპტორს, რომელიც არ არის იონური არხის ნაწილი. ეს ააქტიურებს სიგნალის ტრანსდუქციის გზას, რომელიც მოითხოვს პოსტსინაფსურ უჯრედში მეორად მესენჯერს (იხ. თავი 11). პირდაპირი სინაფსური გადაცემით გამოწვეულ პოსტსინაფსურ პოტენციალებთან შედარებით, არაპირდაპირი სინაფსური გადაცემით გამოწვეული პასუხები უფრო ნელი და ხანგრძლივია (რამდენიმე წთ-მდე).

არაპირდაპირ სინაფსურ გადაცემაში სიგნალის ტრანსდუქციის სხვადასხვა გზები მონაწილეობენ. ერთ-ერთ ყველაზე კარგად შესწავლილ გზაში მეორადი მესენჯერი, ციკლური ამფ მონაწილეობს. მაგალითად, როდესაც ნეიროტრანსმიტერი ნორეპინეფრინი უკავშირდება თავის რეცეპტორს, ნეიროტრანსმიტერ-რეცეპტორის კომპლექსი ააქტიურებს G-ცილას. ის, თავის მხრივ, ააქტიურებს ადენილიკლაზას, ფერმენტს, რომელიც გარდაქმნის ატფ-ს ციკლურ ამფ-ად (იხ. თავი 11). ციკლური ამფ ააქტივებს პროტეინკინაზა A-ს, რომელიც იწვევს პოსტსინაფსური მემბრანის გარკვეული არხის



**▲ სურათი 48.18 პოსტსინაფსური პოტენციალების სუმირება.** გრაფიკები აღნიშნავენ მემბრანული პოტენციალის ცვლილებებს პოსტსინაფსურ ნეირონის აქსონის ბორცვში. ისრები აჩვენებენ დროს, როდესაც აღმოცენდება პოსტსინაფსური პოტენციალი ორ ამაგზნებელ ( $E_1$  და  $E_2$  მწვანე დიაგრამებში გრაფიკების ზემოთ) და ერთ შემაკავებელ ( $I$ , წითელი) სინაფსში. მრავალი აქსპ-ის მსგავსად,  $E_1$  და  $E_2$ -თი მათი წარმოქმნა ვერ აღწევს აქსონის ბორცვის ზღურბლს სუმაციის გარეშე.

## ცხრილი 48.1 ბიოთიადი ნეიტრატანსმიტები

| ნეიროტრანსმიტერი                                            | სტრუქტურა                                                                         | ფუნქციური კლასი                                                                       | სეკრეციის ადგილები                             |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| აცეტილქოლინი                                                |  | ხერხემლიანთა ჩონჩხის კუნთების ამაგზნებელი; სხვა ადგილების ამაგზნებელი ან შემაკავებელი | ცნს, პნს, ხერხემლიანთა ნერვ-კუნთოვანი შეერთება |
| ბიოგენური ამინები<br>ნორეპინეფრინი                          |  | ამაგზნებელი ან შემაკავებელი                                                           | ცნს, პნს.                                      |
| დოფამინი                                                    |  | ძირითადად ამაგზნებელი; შეიძლება იყოს ზოგიერთ უბანის შემაკავებელი                      | ცნს, პნს                                       |
| სეროტონინი                                                  |  | ძირითადად შემაკავებელი                                                                | ცნს                                            |
| <b>ამინომჟავები</b>                                         |                                                                                   |                                                                                       |                                                |
| გამა- (გამა-ამინოჰერბოს მჟავა)                              |  | შემაკავებელი                                                                          | ცნს, უხერხემლოების ნერვ-კუნთოვანი შეერთება     |
| გლიცინი                                                     |  | შემაკავებელი                                                                          | ცნს                                            |
| გლუტამატი                                                   |  | ამაგზნებელი                                                                           | ცნს, უხერხემლოების ნერვ-კუნთოვანი შეერთება     |
| ასპარტატი                                                   |  | ამაგზნებელი                                                                           | ცნს                                            |
| ნეიროპეპტიდები (ძალიან განსხვავებული ნაწვენებია მხოლოდ ორი) | არგ-პრო-ლიზ-პრო-გლნ-გლნ-ფე-ფე-გლი-ლეუ-მეტ                                         | ამაგზნებელი                                                                           | ცნს, პნს                                       |
| მეტ-ენკეფალინი (ენდორფინი)                                  | ტირ-გლი-გლი-ფე-მეტ                                                                | ძირითადად შემაკავებელი                                                                | ცნს                                            |

ფოსფორილირებას, რაც განაპირობებს მათ გახსნას ან, ზოგ შემთხვევაში, დახურვას. სიგნალის ტრანსდუქციის გამაძლიერებელი ეფექტის გამო, ნეიროტრანსმიტერის მოლეკულის ერთ რეცეპტორთან დაკავშირება შეიძლება გახსნას ან დახუროს მრავალი არხი.

## ნეიტრატანსმიტები

**ცხრილში 48.1** ჩამოთვლილია ზოგიერთი ძირითადი ნეიროტრანსმიტერი. თითოეული ნეიროტრანსმიტერი უკავშირდება რეცეპტორების ჯგუფს; ზოგიერთ ნეიროტრანსმიტერს აქვს ათეულობით ან მეტი სხვადასხვა რეცეპტორი, რომლებსაც შეუძლიათ განაპირობონ ძალიან განსხვავებული ეფექტები პოსტსინაფსურ უჯრედებში. წამლები, რომელთა სამიზნეები არის სპეციფიკური რეცეპტორები, მძლავრი იარაღია ნერვული სისტემის დაავადებების სამკურნალოდ.

## აცეტილქოლინი

აცეტილქოლინი ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული ნეიროტრანსმიტერია, როგორც უხერხემლო, ასევე ხერხემლიან ცხოველებში. ხერხემლიანების ცნს-ში ის შეიძლება იყოს შემაკავებელი ან ამაგზნებელი, რაც დამოკიდებულია რეცეპტორის ტიპზე.

ხერხემლიანების ნერვ-კუნთოვან შეერთებაში (სინაფსი მოტორულ ნეირონსა და ჩონჩხის კუნთოვან უჯრედს შორის), აცეტილქოლინი გამოთავისუფლდება მოტორული ნეირონიდან და უკავშირდება ლიგანდდაჭიმურულ რეცეპტორებს კუნთოვან უჯრედზე. იგი პიდაპირი სინაფსური ტრანსმისიით აპსპ-ს განაპირობებს. ნიკოტინი უკავშირდება იგივე რეცეპტორებს, რომლებიც ასევე ნანახია პნს-ში და ცნს-ის სხვადასხვა უბანში. ნიკოტინის ფიზიოლოგიური და ფსიქოლოგიური ეფექტები ამ ტიპის აცეტილქოლინის რეცეპტორის მიმართ მისი აფინურობის შედეგია. ხერხემლიანების გულის კუნთში, პარასიმპათიკური ნეირონებით (მოგვიანებით იქნება განხილული) გამოყოფილი აცეტილქოლინი ააქტივებს სასიგნალო ტრანსდუქციულ გზას, რომლის G-ცილას აქვს ორი ეფექტი: ადენილილ ციკლაზას ინჰიბირება და კუნთოვანი უჯრედის მემბრანაში K<sup>+</sup>-ის არხების გახსნა. ორივე ეფექტი ამცირებს გულის კუნთის უჯრედების შეკუმშვის ძალასა და სიხშირეს.

## ბიოგენური ამინები

ბიოგენური ამინები ამინომჟავებიდან მიღებული ნეიროტრანსმიტერებია. ერთი ჯგუფი, ცნობილი როგორც კატექოლამინები – შეიცავს ამინომჟავა თიროზინიდან მიღებულ ნეიროტრანსმიტერებს. ამ ჯგუფში შედის ეპინეფრინი და ნორეპინეფრინი,

რომლებიც ფუნქციონირებენ, როგორც ჰორმონები (იხ. თავი 45). ისინი მსგავსია ნივთიერების, რომელსაც დოფამინს უწოდებენ. სხვა ბიოგენური ამინი, სეროტონინი, სინთეზდება ამინომჟავა ტრიფტოფანიდან. ბიოგენური ამინები ხშირად ჩართული არიან არაპირდაპირ სინაფსურ ტრანსმისიაში, ძირითადად ცნს-ში. თუმცა ნორეპინეფრინი ასევე ფუნქციონირებს პნს-ის განყოფილებაში – ავტონომურ ნერვულ სისტემაში, რომელიც განხილული იქნება კონცეფცია 48.5-ში. დოფამინი და სეროტონინი გამოიყოფა თავის ტვინის მრავალ უბანში და მოქმედებს ძილზე, გუნება-განწყობაზე, ყურადღებაზე და დასწავლაზე. ამ ნეიროტრანსმიტერების დისბალანსი სხვადასხვა დარღვევასთანაა დაკავშირებული. მაგალითად, პარკინსონის დაავადება დაკავშირებულია დოფამინის დეფიციტთან თავის ტვინში (იხ. კონცეფცია 48.7). ზოგიერთი ფსიქოპათიური ნივთიერება, მათ შორის LCD და მესკალინი, აშკარად იწვევენ ჰალუცინაციურ ეფექტებს თავის ტვინში სეროტონინისა და დოფამინის რეცეპტორებთან დაკავშირების გზით. დეპრესიის სამკურნალოდ ხშირად გამოიყენება წამლები, რომლებიც ზრდიან თავის ტვინში ისეთი ბიოგენური ამინების კონცენტრაციას, როგორიცაა ნორეპინეფრინი ან სეროტონინი. მაგალითად, პროზაკი აძლიერებს სეროტონინის ეფექტს მისი უკუშთანთქმის შეკავების გზით.

## ამინომჟავები და პეპტიდები

ცნს-ში ცნობილია ოთხი ამინომჟავა, რომელიც ფუნქციონირებს როგორც ნეიროტრანსმიტერი: გამა-ამინო-ერბოს მჟავა (გაემ), გლიცინი, გლუტამატი და ასპარტატი. გაემ წარმოადგენს უმეტესი შემთავებით სინაფსების ნეიროტრანსმიტერს თავის ტვინში. ის Cl-ის მიმართ პოსტსინაფსური მემბრანის განვლადობის გაზრდით ქმნის შსპს-ს.

რამდენიმე ნეიროპეპტიდი ამინომჟავების შედარებით მოკლე ჯაჭვით მოქმედებს ისე, როგორც ნეიროტრანსმიტერი. ნეირონების უმეტესობა გამოყოფს როგორც ერთ ან რამდენიმე ნეიროპეპტიდს, ასევე არაპეპტიდურ ნეიროტრანსმიტერს. მრავალი ნეიროპეპტიდი წარმოქმნილია გაცილებით უფრო გრძელჯაჭვიანი ცილოვანი პრეკურსორების პოსტ-ტრანსლაციური მოდიფიკაციით. მაგალითად, 267-ამინომჟავას პრეკურსორის პროენკეფალინის დანაწევრება გვაძლევს პენტაპეპტიდ მეტ-ენკეფალინის ოთხ ასლს და სხვა პეპტიდებსაც. ნეიროპეპტიდები ბიოგენურ ამინებთან ერთად ხშირად მოქმედებენ სიგნალის ტრანსდუქციული გზების მეშვეობით.

ნეიროპეპტიდი სუბსტანცია P არის ძირითადი ამაგზნებელი ნეიროტრანსმიტერი, რომელიც მონაწილეობს ტკივილის აღქმაში, მაშინ, როდესაც სხვა ნეიროპეპტიდი, მაგალითად ენდორფინები, ფუნქციონირებენ როგორც ბუნებრივი ანალგეტიკები, ამცირებენ რა ტკივილის შეგრძნებას. ნეიროქიმიკოსებმა კენდეს პერტმა და სოლომონ სნაიდერმა (ჯონ ჰოპკინსის უნივერსიტეტი) 1970-იან წლებში აღწერეს ენდორფინები, როდესაც თავის ტვინის ნეირონებზე აღმოაჩინეს ოპიატების - მორფინისა და ჰეროინის სპეციფიკური რეცეპტორები. შემდგომმა კვლევამ აჩვენა, რომ ოპიატები უკავშირდებიან ამ რეცეპტორებს ენდორფინებთან მსგავსების გამო (იხ. სურათი 2.17), რომლებიც გამოიყოფა თავის ტვინში ისეთი ფიზიკური ან ემოციური სტრესის დროს, როგორიცაა შშობიარობა.

გარდა ტკივილის შესაზუშუქებისა, ენდორფინები აგრეთვე იწვევენ შარდის გამოყოფის შემცირებას ანტიდიურეზული ჰორმონის (ADH) სეკრეციის სტიმულაციის გზით (იხ. თავი 44), სუნთქვის დეპრესიას, ეიფორიას და სხვა ემოციურ ეფექტებს. წინა ჰიპოფიზის ჯირკვლიდან გამოთავისუფლებული ენდორფინი, როგორც

ჰორმონი, მოქმედებს თავის ტვინის სპეციფიკურ უბნებზე, რაც ენდოკრინულ და ნერვულ სისტემებს შორის კონტროლის ურთიერთგადაფარვის მაგალითს წარმოადგენს.

## აირები

ხერხემლიანთა პნს-ისა და ცნს-ის ზოგიერთი ნეირონი გამოყოფს ხსნად აირებს, რომელთაგან აღსანიშნავია აზოტის ოქსიდი (NO, იხ. თავი 45) და ნახშირბადის მონოოქსიდი (CO), როგორც ლოკალური რეგულატორები. მაგალითად, მამაკაცების სექსუალური აგზნების დროს, გარკვეული ნეირონები გამოყოფენ NO-ს პენილის ერექტულ ქსოვილში. საპასუხოდ, ერექტული ქსოვილის სისხლძარღვების კედლების გლუვი კუნთების მოდუნება (რელაქსაცია) ხდება. ეს იწვევს სისხლძარღვების კედლების გაფართოებას და ღრუბლისებრი ერექტული ქსოვილის ავსებას სისხლით, რაც ერექციას განაპირობებს. როგორც წაკითხული გაქვთ 45-ე თავში, მამაკაცების იმპოტენციის წამალი ვიაგრა ზრდის ერექციის მიღწევისა და შენარჩუნების უნარს იმ ფერმენტების შეკავებით, რომელიც ანელებს NO-თი გამოწვეულ კუნთის მოდუნების ეფექტებს.

ნახშირბადის მონოოქსიდი სინთეზდება ფერმენტ ჰემის ოქსიგენაზით, რომლის ერთ-ერთი ფორმა ლოკალიზებულია თავის ტვინის ნეირონების გარკვეულ პოპულაციებში და პნს-ში. თავის ტვინში CO არეგულირებს ჰიპოთალამუსის ჰორმონების გამოყოფას. პნს-ში ის მოქმედებს როგორც შემთავებელი ნეიროტრანსმიტერი, რაც იწვევს წვრილი ნაწლავების გლუვი კუნთების უჯრედების ჰიპერპოლარიზაციას. ტიპური ნეიროტრანსმიტერებისგან განსხვავებით, NO და CO არ ინახება ციტოპლაზმურ ვეზიკულებში, უჯრედები ასინთეზებენ მათ საჭიროების მიხედვით. ეს ნივთიერებები დიფუნდირებენ მეზობელ სამიზნე უჯრედებში, იწვევენ ცვლილებას და მათი დაშლა რამდენიმე წამში ხდება. NO მოქმედებს მრავალი ჰორმონის მსგავსად. ის ასტიმულირებს მემბრანასთან დაკავშირებულ ფერმენტს მეორადი მესენჯერის სინთეზისთვის, რომელიც პირდაპირ მოქმედებს უჯრედის მეტაბოლიზმზე.

ამ თავის ბოლო ნაწილში განვიხილავთ, როგორ მონაწილეობენ ჩვენს მიერ უკვე აღწერილი უჯრედული და ბიოქიმიური მექანიზმები ნერვულ ფუნქციებში სისტემურ დონეზე.

## კანცელცია ცქსცი 48.4

1. კონუსისებური ლოკოკინები (cone snail) გამოყოფენ ტოქსინს, რომელიც აბლოკირებს პოტენციალ-მგრძნობიარე კალციუმის არხებს. სინაფსების ორი მთავარი ტიპიდან რომელი განიცდის ტოქსინის უფრო მეტ გავლენას? რატომ?
2. ორგანოფოსფატური პესტიციდები ახდენენ ფერმენტ აცეტილქოლინესტერაზას შეკავებას, რომელიც შლის ნეიროტრანსმიტერ აცეტიქოლინს. ახსენით, როგორ იმოქმედებენ ეს ტოქსინები აცეტილქოლინით გამოწვეულ აპსპ-ებზე.
3. როგორ არის შესაძლებელი, რომ მოცემულმა ნეიროტრანსმიტერმა წარმოქმნას ურთიერთსაპირისპირო ეფექტი სხვადასხვა ქსოვილში?

## სერხელმლიანთა ნერვული სისტემა ზონებად ატის სპეციალიზირებული

ყველა სერხელმლიანის ნერვული სისტემისთვის დამახასიათებელია ცეფალიზაცია და ცნს-ისა და პნს-ის განსხვავებული კომპონენტები (**სურათი 48.19**). თავის ტვინი უზრუნველყოფს ინტეგრაციულ მოქმედებას, რომელიც საფუძვლად უდევს სერხელმლიანების რთულ ქცევას. ზურგის ტვინი, რომელიც სერხელმლიანების შიგნით არის მოთავსებული, აინტეგრირებს მარტივ პასუხებს გარკვეული სახის გამღიზიანებლებზე (მაგ., მუხლის რეფლექსი) და ინფორმაციას თავის ტვინისკენ და პირიქით ატარებს. სერხელმლიანების ზურგის ტვინი განლაგებულია სხეულის დორსალური მხრის გასწვრივ, განსხვავებით მრავალი უხერხემლოს ცენტრალური ნერვული ჭიმისგან და არ შეიცავს სეგმენტურ განგლიებს. თუმცა, სეგმენტური განგლიები ზურგის ტვინის გარეთ, მასთან ახლოს არიან განლაგებული (**იხ. სურათი 48.2 3 და 48.19**). ნეირონების განლაგება ზურგის ტვინში ნათლად ასახავს, რომ მას საფუძველად სეგმენტური ორგანიზაცია უდევს.

სერხელმლიანების ცნს ვითარდება ემბრიონული დორსალური ნერვული ჭიმიდან, რომელიც არის ღრუიანი – ქორდიანების ერთ-ერთი ფილოგენეზური დამახასიათებელი ნიშანი (**იხ. თავი 34**). ზრდასრულებში ეს ნიშანი შენარჩუნებულია, როგორც ზურგის ტვინის ვიწრო **ცენტრალური არხი** და თავის ტვინის **ოთხი პარაკუჭი** (**სურათი 48.20**). ცენტრალური არხი და პარაკუჭები სასევა ცერებროსპინალური (საზურგტვინო) სითხით, რომელიც ფორმირდება თავის ტვინში სისხლის ფილტრაციით. ცერებროსპინალური სითხე ნელა ცირკულირებს ცენტრალურ არხში და პარაკუჭებში და შემდეგ ჩადინება ვენებში, ამარაგებს თავის ტვინის სხვადასხვა ნაწილს საკვებითა და გამოდენის ცხოველქმედების პროდუქტებს. ძუძუმწოვრებში ცერებროსპინალური სითხე ცირკულირებს თავისა და ზურგის ტვინის გარსებს შორის (შემაერთებელი ქსოვილის შრეები, რომლებიც გარს ერტყმიან ცნს-ს), ასევე ასრულებს ამორტიზატორის ფუნქციას. აქსონები ცნს-ში ხშირად გვხვდება კარგად განსაზღვრული კონების ან ტრაქტების სახით, რომელთა მიეილინის გარსი ანიჭებს მათ მოთეთრო შეფერილობას. თავისა და ზურგის ტვინის განივჭრილში თეთრი ნივთიერება ნათლად გამოირჩევა რუხი ნივთიერებისგან, რომელიც შედგება ძირითადად დენდრიტებისგან, უმიეილინო აქსონებისა და ნეირონული უჯრედების სხეულებისგან (**იხ. სურათი 48.4 და 48.20**).

## პეტიფიტილი ნერვული სისტემა

პნს ატარებს ინფორმაციას ცნს-კენ და ინფორმაციას ცნს-დან იღებს. ის მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სერხელმლიანების მოძრაობასა და შინაგანი გარემოს რეგულაციაში. სტრუქტურულად, სერხელმლიანების პნს შედგება ქალა-ტვინის და ზურგის ტვინის ნერვების მარჯვენა და მარცხენა წყვილებისაგან და მათთან დაკავშირებული განგლიებისგან (**იხ. სურათი 48.19**).

ქალა-ტვინის (კრანიალური) ნერვები გამოდის თავის ტვინიდან და ბოლოვდება ძირითადად თავის ორგანოებსა და სხეულის ზედა ნაწილებში. ზურგის ტვინის (სპინალური) ნერვები იწყება ზურგის ტვინში და მიემართება თავის ქვემოთ მდებარე სხეულის

ნაწილებში. ძუძუმწოვრებს აქვთ 12 წყვილი ქალა-ტვინის და 30 წყვილი ზურგის ტვინის ნერვი. ქალის ტვინის ნერვების უმეტესობა და ზურგის ტვინის ყველა ნერვი შეიცავს, როგორც სენსორული, ასევე მოტორული ნეირონების აქსონებს; ქალა-ტვინის რამდენიმე ნერვი (მაგალითად, საყნოსავი და მხედველობის ნერვები) მხოლოდ სენსორულია.

პნს შეიძლება დაიყოს ორ ფუნქციურ განყოფილებად: სომატურ და ავტონომურ ნერვულ სისტემად (**სურათი 48.21**). სომატური ნერვული სისტემა ატარებს სიგნალებს ჩონჩხის კუნთებისკენ და პირიქით. მას ხშირად განიხილავენ, როგორც ნების, რადგან ექვემდებარება ცნობიერების კონტროლს, მაგრამ ჩონჩხის კუნთის აქტიურობა კონტროლირდება რეფლექსებით, რომლებიც განპირობებულია ზურგის ტვინის ან თავის ტვინის ნაწილით, რომელსაც ტვინის ღეროს უწოდებენ. **ავტონომური ნერვული სისტემა** არეგულირებს შინაგან გარემოს გლუვი და გულის კუნთების კონტროლის საშუალებით, აგრეთვე საჭმლის მომნელებელი, კარდიოვასკულარული, ექსკრეტორული და ენდოკრინული სისტემის ორგანოების კონტროლის გზით. ეს კონტროლი ჩვეულებრივ უნებლიეა. ავტონომური ნერვული სისტემა სამი განყოფილებისგან შედგება – სიმპატიკური, პარასიმპატიკური და ენტერული.

**48.22-ე სურათზე** შედარებულია სიმპატიკური და პარასიმპატიკური განყოფილებების ორგანიზაცია და მოქმედება. სიმპატიკური ნაწილის აქტივაცია შეესაბამება ორგანიზმის აგზნებას და ენერგიის გენერაციას (თავდასხმა-თავდაცვის პასუხში). ამ დროს ადგილი აქვს: გულისცემის გაზრდას; ღვიძლში გლიკოგენის გლუკოზად გარდაქმნის აჩქარებას; ფილტვების ბრონქების გაფართოებას, რაც ზრდის გაზთა ცვლას; საჭმლის მომნელების შეკავებას; თირკმელზედა ჯირკვლის ტვინოვანი (მედულას) ნაწილიდან ეპინეფრინის (ადრენალინის) სეკრეციის სტიმულირებას. პარასიმპატიკური

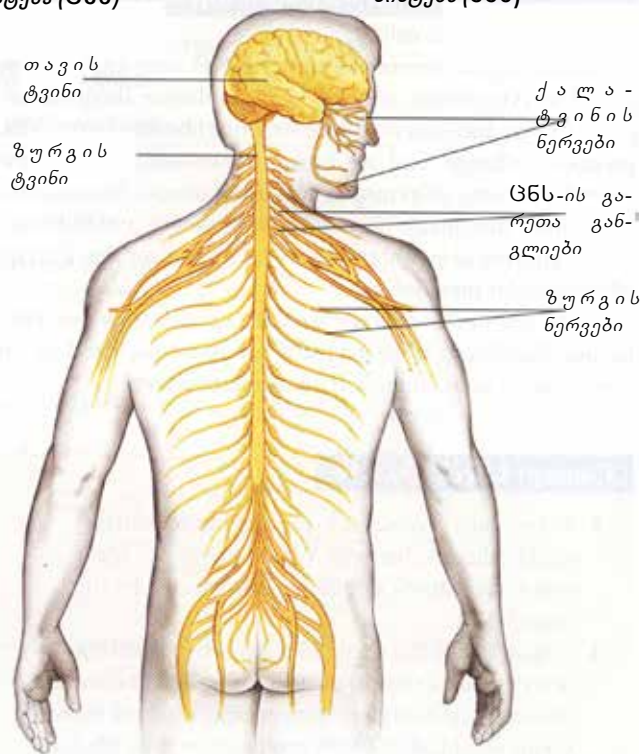
ნაწილის აქტივაცია ჩვეულებრივ საპირისპირო პასუხებს იწვევს, რომლებიც განაპირობებენ დაწყნარებას და თვით-შენარჩუნების ფუნქციების აღდგენას („მოსვენებისა და მომენტების“). მაგალითად, პარასიმპატიკური განყოფილების აქტიურობის გაზრდა ამცირებს გულის რიტმს, ზრდის გლიკოგენის პროდუქციას და ამცირებს მონელებას. როდესაც სიმპატიკური და პარასიმპატიკური ნეირონები აინერვირებენ ერთსა და იმავე ორგანოს, მათ ხშირად (მაგრამ არა ყოველთვის) აქვთ ანტაგონისტური (საპირისპირო) ეფექტები.

ენტერული ნაწილი მოიცავს ნეირონების ქსელს საჭმლის მომნელებელ ტრაქტში; ეს ნეირონები აკონტროლებენ ამ ორგანოების სეკრეტორულ ფუნქციებს და გლუვი კუნთების აქტიურობას, რაც იწვევს პერისტალტიკას (**იხ. თავი 41**). მიუხედავად იმისა, რომ ენტერულ ნაწილს შეუძლია დამოუკიდებელი ფუნქციონირება, ის ჩვეულებრივ რეგულირდება სიმპატიკური და პარასიმპატიკური ნაწილებით.

სომატური და ავტონომური ნერვული სისტემები ხშირად ურთიერთქმედებენ ჰომეოსტაზის შესანარჩუნებლად. მაგალითად, სხეულის ტემპერატურის დაცემის საპასუხოდ, ჰიპოთალამუსი გადასცემს ინფორმაციას ავტონომურ ნერვულ სისტემას, რათა შეავიწროვოს სხეულის ზედაპირული სისხლძარღვები, რაც სითბოს დაკარგვას ამცირებს. ამავე დროს, ჰიპოთალამუსი გადასცემს ინფორმაციას სომატურ ნერვულ სისტემას, რათა გამოიწვიოს კანკალი, რომელიც ზრდის სითბოს პროდუქციას.

## ცენტრალური ნერვული სისტემა (ცნს)

## პერიფერიული ნერვული სისტემა (პნს)



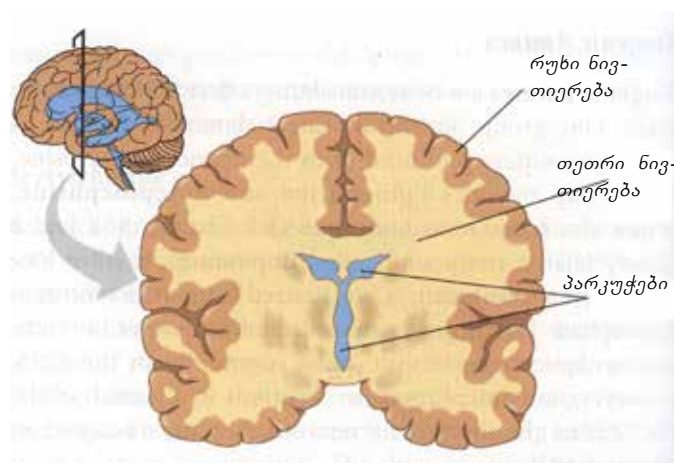
▲ **სურათი 48.19** ხერხემალიანთა ნერვული სისტემა. ცენტრალური ნერვული სისტემა შედგება თავისა და ზურგის ტვინისაგან. ქალა-ტვინის ნერვები, ზურგის ტვინის ნერვები და განგლიები ცენტრალური ნერვული სისტემის გარეთ ქმნიან პერიფერიულ ნერვულ სისტემას.

## თავის ტვინის ემბრიონული განვითარება

ყველა ხერხემალიანში ემბრიონული განვითარების დროს ნერვული მილის წინა ნაწილში სამი ბუშტუკი იკვეთება – წინა ტვინი, შუა ტვინი და უკანა ტვინი (**სურათი 48.23ა**). ხერხემალიანების ევოლუცია თავის ტვინის სტრუქტურული და ფუნქციური დაყოფით ხასიათდება. რეგიონალიზაცია ზრდის კომპლექსური ინტეგრაციის უნარს. სხვა ხერხემალიანებთან შედარებით, ფრინველები და ძუძუმწოვრები ბევრად უფრო დიდი წინა ტვინის განვითარებით ხასიათდება.

ადამიანის ემბრიონული განვითარების მეხუთე კვირას სამი პირველადი ბუშტუკიდან ყალიბდება თავის ტვინის ხუთი განყოფილება (**სურ, 48.3ბ**): წინა ტვინიდან ვითარდება საბოლოო ტვინი და შუამდებარე ტვინი; შუა ტვინიდან ვითარდება მეზენცეფალონი; უკანა ტვინიდან ვითარდება მოგრძო ტვინი და ხიდი და ნათხემი.

ადამიანის თავის ტვინის შემდგომ განვითარებასთან ერთად, ძალიან მნიშვნელოვანი ცვლილებები ვლინდება ტელენცეფალონში – წინა ტვინის ზონაში, რომლიდანაც წარმოიქმნება დიდი ტვინი-ცერებრუმი (**სურათი 48.23 გ**). ტელენცეფალონის სწრაფი ინტენსიური ზრდა მეორე და მესამე თვეებში იწვევს ცერებრუმის გარეთა ნაწილის, წოდებული ცერებრულ ქერქად (დიდი ტვინის ქერქი), გაფართოვებას თავის ტვინის დანარჩენი ნაწილის ზემოთ და გარშემო. ხერხემალიანთა ისტორიის ადრეულ პერიოდში ჩამოყალიბებულ



▲ **სურათი 48.20** პარაკუჭები, რუხი ნივთიერება და თეთრი ნივთიერება. თავის ტვინის შიგნით ღრმად მოთავსებული პარაკუ-ჭები შეიცავენ საზურგტვინე (ცერებროსპინალურ) სითხეს. რუხი ნივთიერების დიდი ნაწილი მოთავსებულია თავის ტვინის ზედაპირზე თეთრი ნივთიერების გარშემო.

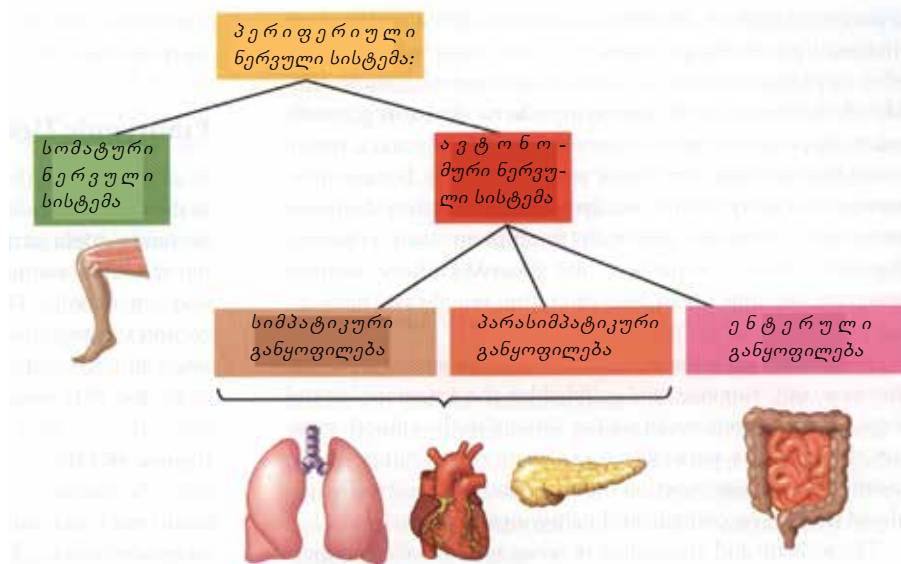
წინა ტვინის ნაწილიდან – დიენცეფალონიდან ვითარდება მთავარი ცენტრები: თალამუსი, ჰიპოთალამუსი და ეპითალამუსი.

შუა და უკანა ტვინიდან წარმოქმნილი სამი რეგიონი დასაბამს აძლევს თავის ტვინის ღეროს – სტრუქტურების კრებულს თავის ტვინის სიღრმეში. ზრდასრულების თავის ტვინის ღერო შედგება შუა ტვინის, ხიდისა და მოგრძო ტვინისგან. უკანა ტვინიდან ასევე წარმოიქმნება თავის ტვინის სხვა მნიშვნელოვანი ცენტრი - ნათხემი, რომელიც თავის ტვინის ღეროს შემადგენლობაში არ შედის.

## თავის ტვინის ღრთ

ხერხემალიანებში თავის ტვინის ღერო ევოლუციურად ერთ-ერთი უძველესი ნაწილია. მას ზოგჯერ „უმდაბლეს ტვინს“ უწოდებენ, ის წარმოადგენს მილას ჩაჩისმაგვარი გაფართოებით ზურგის ტვინის წინა დაბოლოებაში. თავის ტვინის ღეროს სამი უბანი – მოგრძო ტვინი, ხიდი და შუა ტვინი – მონაწილეობს ჰომეოსტაზის რეგულაციაში, მოძრაობის კოორდინაციაში და ტვინის უფრო მაღალი ცენტრებისკენ ინფორმაციის გატარებაში. ტვინის ღეროს რამდენიმე ცენტრი შეიცავს ნეირონთა სხეულებს, რომლებიც აქსონებს თავის ტვინის ქერქის მრავალ ზონაში და ნათხემში აგზავნიან. ისინი გამოყოფენ ისეთ ნეიროტრანსმიტერებს, როგორიცაა ნორეპინეფრინი, დოფამინი, სეროტონინი და აცეტილქოლინი. ამ გზებით მოსული სიგნალები ცვლილებებს იწვევენ ყურადღებაში, მადსა და მოტივაციაში. მოგრძო ტვინი შეიცავს ცენტრებს, რომლებიც აკონტროლებენ რამდენიმე ვისცერალურ (ავტომატურ, ჰომეოსტაზურ) ფუნქციას – სუნთქვის, გულ-სისხლძარღვთა მოქმედების, ყლაპვის, ღებინებისა და მონელების ჩათვლით. ზოგიერთ ამ მოქმედებაში ხიდიც მონაწილეობს. მაგალითად, ის არეგულირებს სუნთქვის ცენტრებს მოგრძო ტვინში.

ყველა აქსონი, რომელსაც მიაქვს სენსორული ინფორმაცია თავის ტვინის უფრო მაღალ ზონებთან და გამოაქვს იქედან მოტორული ინსტრუქციები ტვინის ღეროს გავლით, ასრულებს მოგრძო ტვინისა და ხიდის ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან ფუნქციას - ინფორმაციის გადაცემის. ეს ორი ზონა ასევე ეხმარება სხეულის დიდმასშტაბური მოძრაობის კოორდინაციას, მაგალითად, სი-



▲ სურათი 48.21 ხერხემლიანთა პერიფერიული ნერვული სისტემის ფუნქციური იერარქია.

არულს. აქსონების უმეტესობას გადააქვს ინსტრუქციები მოძრაობების შესახებ შუა და წინა ტვინიდან ზურგის ტვინისკენ, ცნს-ის ერთი მხრიდან მეორე მხარეს მოგრძო ტვინში გადაკვეთის გზით. ამის შედეგად, თავის ტვინის მარჯვენა მხარე აკონტროლებს სხეულის მარცხენა მხრის მოძრაობებს და პირიქით.

შუა ტვინი სხვადასხვა ტიპის სენსორული ინფორმაციის მიღებისა და ინტეგრაციის ცენტრებს შეიცავს. ის აგრეთვე კოდირებულ სენსორულ ინფორმაციას ნეირონებით წინა ტვინის სპეციფიკურ ზონებში აგზავნის. შუა ტვინის ამოზურცული ცენტრებია ქვედა და ზედა გორაკები, რომლებიც შესაბამისად სმენის და მხედველობის სისტემების ნაწილებია. სმენაში ჩართული ყველა სენსორული აქსონი მთავრდება ან გაივლის ქვედა გორაკებს დიდი ტვინისკენ მიმავალ გზაზე. არაძუძუმწოვარ ხერხემლიანებში, ზედა გორაკები იღებენ ამოზურცული ოპტიკური წილების ფორმას, რომლებიც შეიძლება ერთადერთი მხედველობის ცენტრები იყვნენ. ძუძუმწოვრებში მხედველობა ინტეგრირდება დიდ ტვინში - უტოვებს ზედა გორაკებს ისეთი მხედველობის რეფლექსების კოორდინაციას, როგორიცაა ავტომატური თავის მოზრუნება, როდესაც თქვენი პერიფერიული მხედველობა გვერდიდან თქვენი მიმართულებით რაღაც მოძრავს აღიქვამს.

## გამოღვიძება და ძილი

თბილი გაზაფხულის შუადღეს, თუ ვინმე ბოლომდე დასწრებია ლექციას, იცის, რომ ყურადღება და გონების დაძაბვა ყოველ მომენტში იცვლება. გამოღვიძება გარე სამყაროს შეცნობის მდგომარეობაა. მისი საწინააღმდეგოა ძილის მდგომარეობა, როდესაც ინდივიდი აგრძელებს გარეგანი სტიმულების მიღებას, მაგრამ ვერ აცნობიერებს მათ. გამოღვიძება და ძილი თავის ტვინის ღეროში და ქერქში რამდენიმე ცენტრით კონტროლდება.

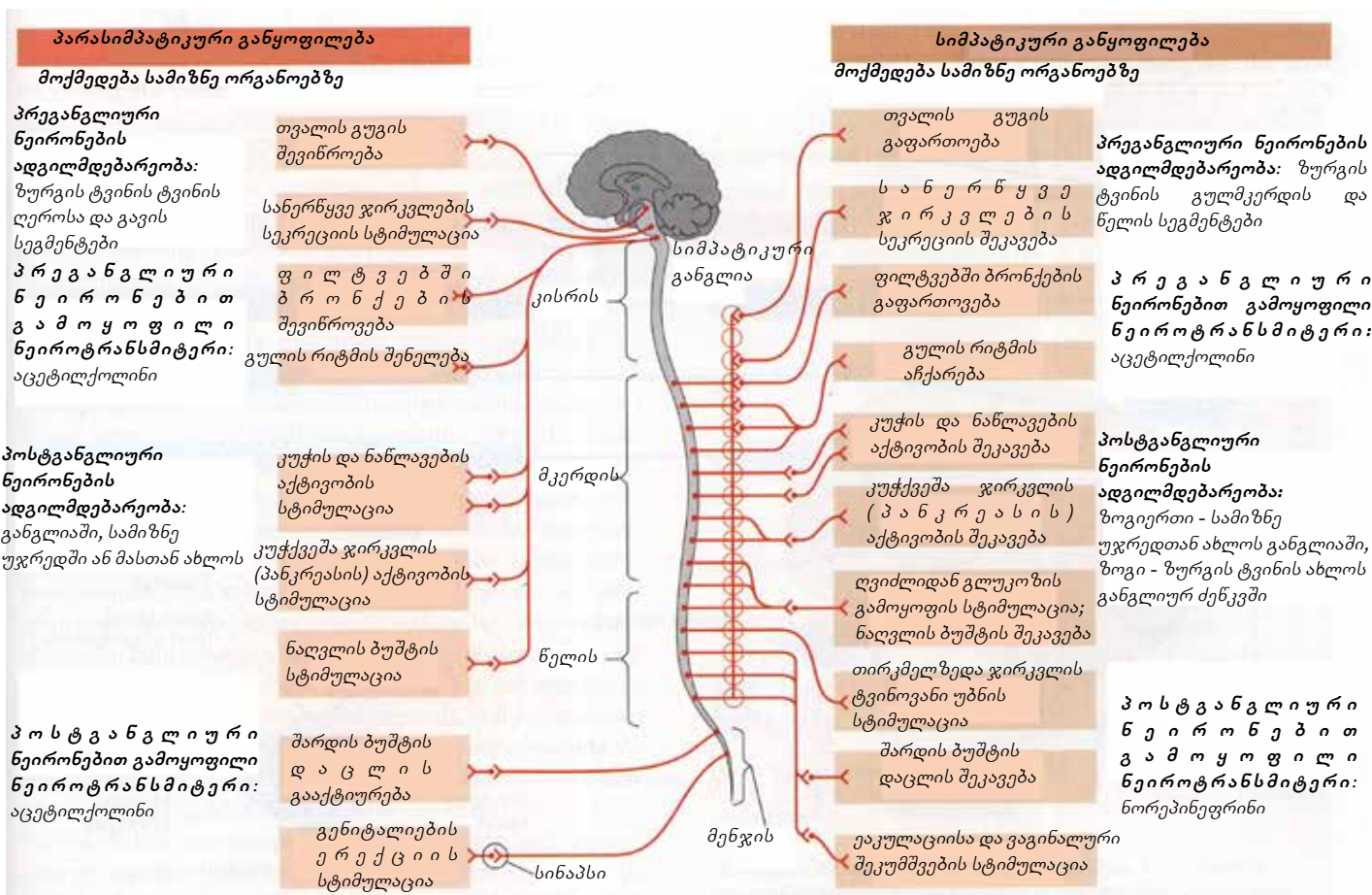
ნეირონების დიფუზურ ბადეს, რომელიც უჯრედის სხეულების 90-ზე მეტ ცალკეულ ჯგუფს (კლასტერს) შეიცავს და მოთავსებულია ტვინის ღეროს შუაგულში, ეწოდება ბადებრივი ფორმაცია

(სურათი 48.24). ბადებრივი ფორმაციის ნაწილი - გამააქტივებელი ბადებრივი ფორმაცია (RAS), ძილსა და ღვიძილს არეგულირებს. RAS მოქმედებს როგორც სენსორული ფილტრი და არჩევს ინფორმაციას, რომელიც აღწევს დიდი ტვინის ქერქს. რაც უფრო მეტ ინფორმაციას იღებს ქერქი, მით უფრო დაყურადებული და გაცნობიერებული ხდება სუბიექტი. მაგრამ გამოღვიძება მხოლოდ გენერალიზებული ფენომენი არ არის, სანამ ტვინი აქტიურად ამუშავებს ერთ სტიმულს, ზოგიერთი სხვა სტიმული შეიძლება იგნორირებული იყოს. გარდა ამისა, ძილი და ღვიძილი რეგულირდება ტვინის ღეროს სპეციფიკური ნაწილებით: ხიდი და მოგრძო ტვინი შეიცავს ცენტრებს, რომელთა გალიზიანება იწვევს ძილს, ხოლო შუა ტვინში არის ცენტრი, რომლის სტიმულირება იწვევს გამოღვიძებას. სეროტონინი შეიძლება ძილის გამომწვევი ცენტრების ნეიროტრანსმიტერი იყოს.

ყველა ფრინველსა და ძუძუმწოვარს მათთვის დამახასიათებელი ძილ-ღვიძილის ციკლები აქვს. მელატონინი, გირჩისებრი ჯირკვლის მიერ გამოყოფილი ჰორმონი, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ამ ციკლებში. როგორც ახსნილი იყო 45-ე თავში, მელატონინის სეკრეციის პიკი ღამე დგება. მელატონინი იყო შემოთავაზებული, როგორც დიეტური დამატება ძილის ისეთი დარღვევების სამკურნალოდ, რომლებიც დაკავშირებულია ინსომნიასთან, სეზონურ ემოციურ აშლილობებთან და დეპრესიასთან. ძილის ფუნქციის გაგება კვლევის დაუძლეველ ობიექტად რჩება. ერთ-ერთი ვარაუდია, რომ ძილი დასწავლისა და მეხსიერების კონსოლიდაციაში არის ჩართული. ექსპერიმენტები გვიჩვენებს, რომ თავის ტვინის ზონები, რომლებიც გააქტივებულია ამოცანის დასწავლის დროს, შეიძლება ძილის დროს კვლავ გააქტივდეს.

## ნათხემი

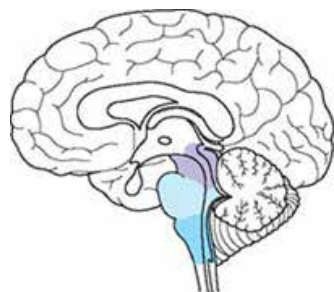
ნათხემი უკანა ტვინის ღეროსალური ნაწილიდან ვითარდება (იხ. სურათი 48.23). ის მოძრაობის კოორდინაციისთვის და დასწავლისთვის არის მნიშვნელოვანი. ნათხემი სავარაუდოდ ჩართულია მოძრაობითი ჩვევების დასწავლასა და დამახსოვრებაში. ამის მაჩვენებელია ის, რომ, მოტორული დასწავლა მისი ერთ-ერთი მთავარი ქვედანაყოფის დაზიანებით შეიძლება დაიბლოკოს. ნათხემში მოდის სენსორული ინფორმაცია სახსრების მდგომარეობისა და კუნთების დაგრძელების შესახებ, ასევე სმენითი და მხედველობითი სისტემებიდან. ის აგრეთვე იღებს ინფორმაციას, რომელიც ტვინის ქერქის მოტორულ კონტრლს ეხება. ნათხემი აინტეგრირებს ამ სენსორულ და მოტორულ ინფორმაციებს, რადგან მოძრაობებისა და წონასწორობის კოორდინაციას ახორციელებს. ნათხემის კონტროლის მაგალითია ხელისა და თვალის კოორდინაცია. თუ ნათხემი დაზიანდა, თვალეები შეიძლება მიჰყვეს მოძრავ ობიექტს, მაგრამ გაჩერებულ ობიექტზე ვერ ფიქსირდება.



▲ **სურათი 48.22** ავტონომური ნერვული სისტემის პარასიმპატიკური და სიმპატიკური განყოფილებები. ყოველი განყოფილების გადაცემის გზების უმეტესი ნაწილი შედგება პრეგანგლიური ნეირონისგან (უჯრედის სხეულები განლაგებულია **ცნს-ში**) და პოსტგანგლიური ნეირონებისგან (უჯრედის სხეული განლაგებულია **ცნს-ში**)

## შუამდგომარეო ცვინი

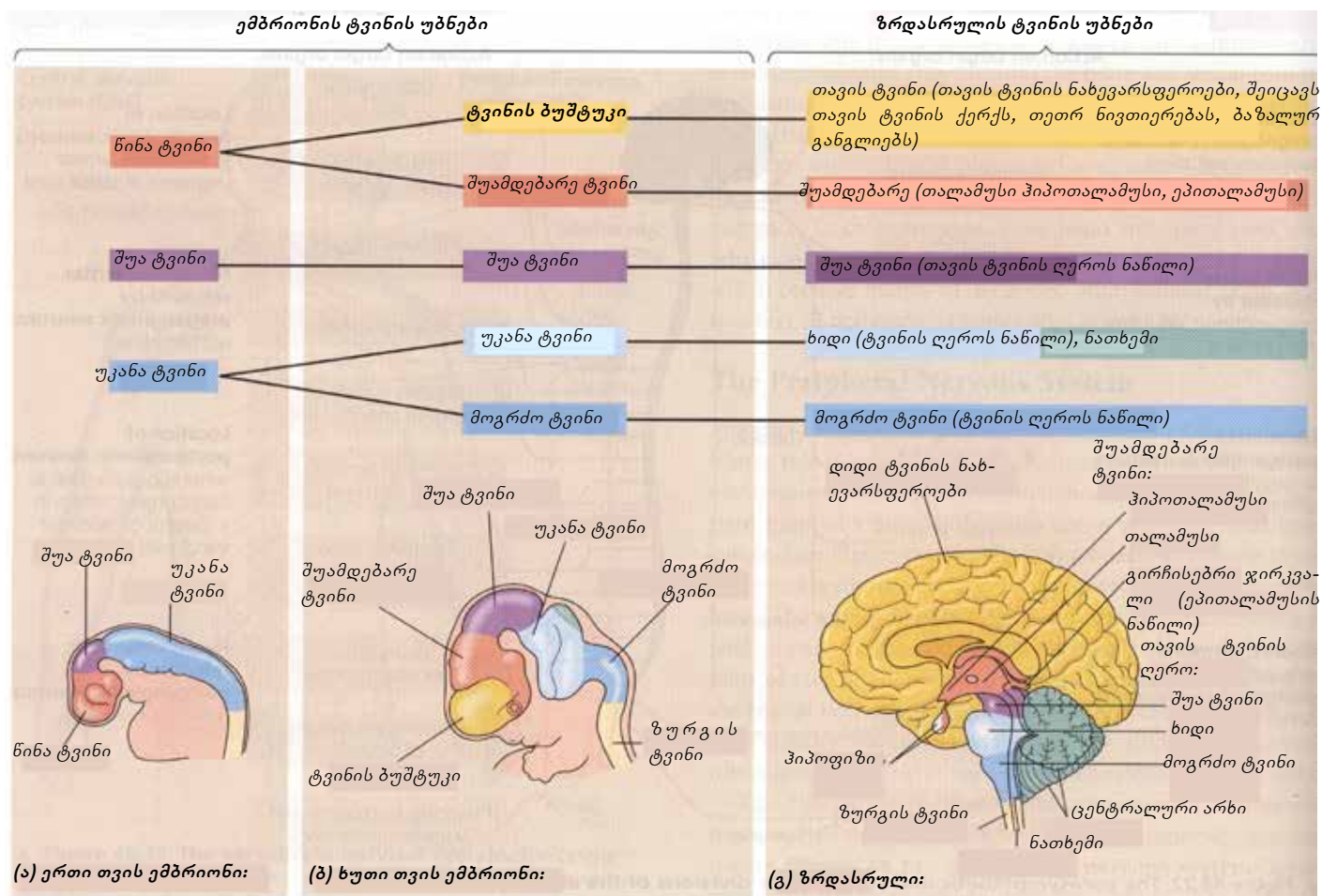
შუამდგომარეო ცვინი ზრდასრულ თავის ტვინში სამ უზნად არის ჩამოყალიბებული: ეპითალამუსი, თალამუსი და ჰიპოთალამუსი (**იხ.სურათი 48.23**). ეპითალამუსი შეიცავს გირჩისებრ ჯირკვალს და ქოროიდულ წნულს რომელიც წარმოადგენს სისხლიდან ცერებროსპინალური სითხის წარმოქმნელი კაპილარების ერთ-ერთ კლასტერს. თალამუსი და ჰიპოთალამუსი მთავარი მაინტეგრირებული ცენტრები არიან.



თალამუსი წარმოადგენს დიდი ტვინისკენ მიმართულ სენსორული ინფორმაციის მთავარ შესასვლელს და მისგან გამოსული მოტორული ინფორმაციის მთავარ გამოსასვლელს. ყველა სენსორიდან მოსული ინფორმაცია თალამუსში ხარისხდება და შემდგომი დამუშავებისთვის

აქვს შესავალი ქერქიდან და თავის ტვინის სხვა ნაწილებიდან, რომლებიც არეგულირებენ ემოციებს და ძილ-ღვიძილს.

მიუხედავად იმისა, რომ ჰიპოთალამუსი მხოლოდ რამდენიმე გრამს იწონის, ის ჰომეოსტაზის რეგულაციაში თავის ტვინის ყველაზე მნიშვნელოვანი ზონებიდან ერთ-ერთია. 45-ე თავში ნათქვამია, რომ ჰიპოთალამუსი წარმოადგენს ორი რიგი ჰორმონების წყაროს - უკანა ჰიპოფიზის ჰორმონების და გამწვები ჰორმონების, რომლებიც წინა ჰიპოფიზზე მოქმედებენ (**იხ. სურათი 45.8**). ჰიპოთალამუსი აგრეთვე ორგანიზმის თერმოსტატს, შიმშილის, წყურვილის და ბევრ სხვა ძირითად სასიცოცხლო ცენტრებს შეიცავს. იგი მონაწილეობს სქესობრივ და შეჯვარების ქცევებში, შიშისა და თავდასხმის პასუხებში და „სიამოვნების“ რეაქციაში. სპეციფიკური ცენტრების სტიმულაციამ შესაძლებელია გამოიწვიოს პასუხები, რომლებიც ცნობილია, როგორც „სუფთა“ ქცევები. მაგალითად, ვირთაგვები თავსდებიან საექსპერიმენტო გარემოში, სადაც მათ შეუძლიათ ბერკეტზე დაჭერით „სიამოვნების“ ცენტრის სტიმულაცია კვებისა და სმის ხარჯზე. წინა ჰიპოთალამუსის სტიმულაციამ შეიძლება გააფთრება გამოიწვიოს.



▲ სურათი 48.23 ადამიანის თავის ტვინის განვითარება.

## ცირკადული რიტმები

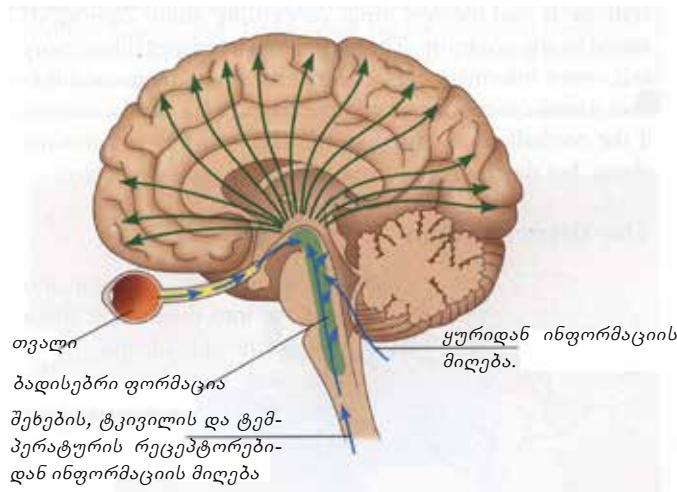
ცირკადული რიტმები მცენარეებში იყო განხილული (იხ. თავი 39). მათ ცხოველებიც ავლენენ, ამის ერთ-ერთი მაგალითია ძილ-ღვიძილის ციკლი. რიგი გამოკვლევებით ნაჩვენებია, რომ ცხოველებს ჩვეულებრივ შინაგანი ქრონომეტრი აქვთ, რომელიც ცნობილია, როგორც **ბიოლოგიური საათი**. იგი ჩართულია ცირკადული რიტმების შენარჩუნებაში. ბიოლოგიური საათი არეგულირებს სხვადასხვა ფიზიოლოგიურ ფენომენს, მათ შორის ჰორმონების გამოყოფას, შიმშილს და გარეგანი სტიმულისადმი გაძლიერებულ მგრძნობელობას. ძუძუმწოვრებში ბიოლოგიური საათი არის ჰიპოთალამური სტრუქტურის წყვილი, რომელსაც **სუპრაქიაზმურ ბირთვს (SCN)** უწოდებენ (ზოგიერთი ნეირონის კლასტერებს ცნს-ში მოიხსენიებენ როგორც „ბირთვებს“).

ბიოლოგიურ საათს, როგორც წესი, გარეგანი სტიმულები სჭირდება, რათა შეინარჩუნონ სინქრონულობა გარემოს ციკლურობასთან. მაგალითად, მხედველობითი ინფორმაციის გადაცემა სინათლის ინტენსივობის თაობაზე SCN-ში სინქრონულია დღის ხანგრძლივობისა და სიბნელის ბუნებრივ ციკლებთან (**სურათი 48.25**). მღრღნელებზე ჩატარებული ექსპერიმენტებით SCN-ში აღმოჩნდა უჯრედები, რომლებიც სინათლე/სიბნელის ციკლების მონაცვლეობის საპასუხოდ სპეციფიკურ ცილებს გამოყოფენ.

ადამიანის ცირკადული რიტმები განსაკუთრებული ინტენსივობით შეისწავლება, რადგან მათი მოშლა ძილის დარღვევებს იწვევს. 1970 წლის ცნობილ ექსპერიმენტებში, მკვლევრებმა ადამიანები კომფორტულ ოთახებში ღრმად მიწისქვეშ მოათავსეს, სადაც მოხდა მათი საკუთარი გრაფიკის ჩართვა გარეგანი სტიმულის გარეშე. ამ ექსპერიმენტის შედეგით სავარაუდოა, რომ ადამიანის ბიოლოგიურ საათს აქვს ციკლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 25 საათი ძალიან დიდი ინდივიდუალური ვარიაციებით. 1990 წლის ბოლოს ჰარვარდის უნივერსიტეტის მკვლევართა ჯგუფმა ეს მონაცემები გააპროტესტა. მათ აჩვენეს, რომ ოთახის განათებაზე კი შეიძლება იქონიოს გავლენა ცირკადულ რიტმებზე. უფრო ზუსტი მეთოდების გამოყენებით, ჰარვარდის მეცნიერებმა ნახეს, რომ ადამიანის ბიოლოგიურ საათს აქვს 24 საათისა და 11 წუთის ხანგრძლივობის ციკლი, ძალიან მცირე ინდივიდუალური ვარიაციებით.

## დიდი ტვინი

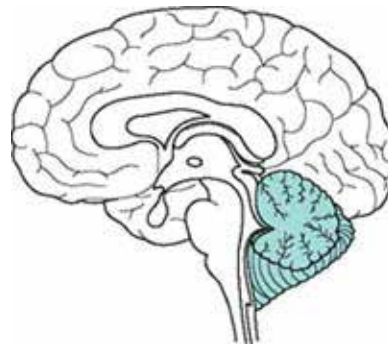
დიდი ტვინი ვითარდება ემბრიონული წინა ტვინის წინა ბუშტუკისგან. იგი ხერხემლიანთა ადრეულ ევოლუციაში წარმოიქმნა, როგორც ყნოსვის, ასევე სმენითი და მხედველობითი ინფორმაციის გადამუშავების უბანი. დიდი ტვინი იყოფა მარჯვენა და მარცხენა დიდი ტვინის ნახევარსფეროებად. თითოეული ნახევარსფერო



▲ **სურათი 48.24 ბადისებრი ფორმაცია.** ნეირონების ეს სისტემა, გავრცელებული თავის ტვინის ღეროში, ფილტრავს სენსორულ შესავალს (ლურჯი ისრები). აბლოკირებს ნაცნობ და გამეორებულ ინფორმაციას, რომელიც მუდმივად შედის ნერვულ სისტემაში. გაფილტრულ შესავალს თავის ტვინის ქერქში აგზავნის (მწვანე ისრები).

შედგება რუხი ნივთიერების გარეთა საფარველისგან - დიდი ტვინის ქერქისგან, შიგნითა თეთრი ნივთიერებისგან და თეთრ ნივთიერებაში ღრმად ლოკალიზებული ნეირონების ჯგუფებისგან, რომლებსაც ერთად უწოდებენ ბაზალურ ბირთვებს (**სურათი 48.26**). ბაზალური ბირთვები მნიშვნელოვანი ცენტრებია მოძრაობის მიმდევრობის დაგეგმვისთვის და დასწავლისთვის. ამ ბირთვების დაზიანებამ შეიძლება შეაფერხოს კუნთებისკენ გაგზავნილი მოტორული ბრძანებები და გახადოს ინდივიდი უმოძრაო და პასიური.

ადამიანებში თავის ტვინის უდიდესი და ურთულესი ნაწილი არის დიდი ტვინის ქერქი. აქ მიმდინარეობს სენსორული ინფორმაციის ანალიზი, მოტორული ბრძანების გამოცემა და მეტყველების გენერირება. დიდი ტვინის ქერქმა განიცადა ძლიერი გაფართოება, როდესაც მოხდა რეპტილიებისგან ძუძუმწოვრების წინაპრების გამოყოფა. უმნიშვნელოვანესია, რომ ძუძუმწოვრებს აქვთ დიდი ტვინის ქერქის უბანი, ცნობილი როგორც ახალი ქერქი (ნეოკორტექსი). ის ფორმირდება ძუძუმწოვრების დიდი ტვინის გარეთა ზედაპირული ნაწილებისგან, შედგება ნეირონთა ექვსი პარალელური შრისგან. მაშინ, როდესაც ვირთვების ნეოკორტექსი არის შედარებით გლუვი, ადამიანების ნეოკორტექსი ძლიერად დანაოჭებულია (**იხ. სურათი 48.26**). ხვეულები განაპირობებენ ნეოკორტექსის ზედაპირის დიდ არეს და საშუალებას იძლევა ქალას შიგნით მოთავსდეს: მიუხედავად იმისა, რომ ადამიანის თავის ტვინის ქერქის სისქე 5მმ-ზე უფრო ნაკლებია, მისი ზედაპირი არის 0.5მ<sup>2</sup>-მდე და შეადგენს ტვინის მთელი მასის დაახლოებით 80%-ს. პრიმატებს და ვეშაპისნაირებს (მაგ., ვეშაპებსა და დელფინებს) ასევე აქვთ განსაკუთრებით დიდი, დანაოჭებული ნეოკორტექსი. დელფინის ნეოკორტექსის ზედაპირული ფართობი (სხეულის ზომებთან შედარებით) არის მეორე ადგილზე ადამიანის შემდეგ. დიდი ტვინის ქერქი, მსგავსად დანარჩენი ტვინისა, იყოფა მარჯვენა და მარცხენა ნაწილებად, და თითოეული, სხეულის საპირისპირო ნახევარზეა პასუხისმგებელი. ქერქის მარცხენა მხარე იღებს ინფორმაციას სხეულის მარჯვენა მხარეზე, აკონტროლებს მის მოძრაობებს და პირიქით. ორი ნახევარსფეროს ქერქს შორის კომუნიკაციას განა-

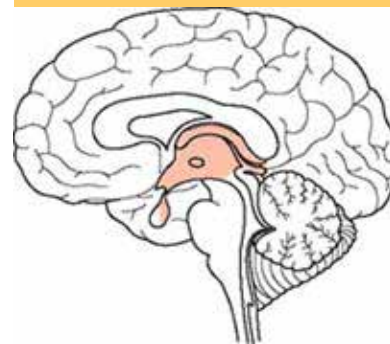


პირობებს აქსონების სქელი კონა, რომელიც ცნობილია, როგორც კორპი-ანი სხეული (**იხ. სურათი 48.26**).

დიდი ტვინის ერთი უბნის დაზიანებამ განვითარების ადრეულ პერიოდში ხშირად შეიძლება გამოიწვიოს მეორე მხრის ნორმალური ფუნქციონირების შეცვლა. ამ

მოვლენის დრამატულ მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ მოზარდებში, მძიმე ეპილეპსიის მკურნალობის მიზნით, დიდი ტვინის ნახევარსფეროს მთლიანი მოცილების შემთხვევა. საოცარია ის ფაქტი, რომ დარჩენილი ნახევარსფერო დროთა განმავლობაში თავის თავზე იღებს ფუნქციების უმეტესობას, რომლებიც ნორმაში ორი ნახევარსფეროთა განაპირობებული. ზრდასრულებშიც კი, დიდი ტვინის ქერქის ნაწილის დაზიანებამ შეიძლება გამოიწვიოს თავის ტვინის ახალი წრეების განვითარება ან გამოყენება, რაც ზოგიერთ შემთხვევაში ფუნქციების აღდგენას იწვევს.

## ▶ კანცეფცია ცისდი 48.5



ისტემის რომელი განთობით გააქტივდება, თუ რომ გამოცდა, რომელიც იმ დღეს? ახსენით. ა სამი ფუნქცია მაინც.

მაციისა და თალამუსის რსფეროებისკენ სენსორიკაში.

## ▶ კანცეფცია 48.6

### დიდი ტვინის ქერქი ნებით მოძრაობასა და კოგნიციურ ფუნქციებს აკონტროლებს

დიდი ტვინის ქერქის თითოეულ მხარეს ჩვეულებრივ ალწერენ როგორც ოთხი წილის შემცველს, რომლებსაც უწოდებენ შუბლის, საფეთქლის, კეფის და თხემის წილებს. თითოეულ წილში მკვლევრების მიერ ფუნქციური ზონების მთელი რიგია აღწერილი (**სურათი 48.27**). აქ ჩართულია პირველადი სენსორული ზონები, რომლებიც იღებენ და ამუშავებენ სპეციფიკური ტიპის სენსორულ ინფორმაციას და ასოციაციური ზონები, რომლებიც თავის ტვინის სხვადასხვა ნაწილიდან წამოსულ ინფორმაციას აინტეგრირებენ.

ევოლუციის დროს ნეოკორტექსის მნიშვნელოვანი გაზრდა ზომებში ხდება ასოციაციური ზონების ძლიერი გაფართოების

ხარჯზე. აღნიშნული ზონები ახორციელებენ უმაღლეს კოგნიტურ ფუნქციებს, რთულ ქცევას და დასწავლას. თუ ვირთაგვების ნეოკორტექსი ძირითადად დაკავებულია პირველადი სენსორული ზონებით, ადამიანის ნეოკორტექსი დიდი რაოდენობით ასოციაციურ ზონებს შეიცავს.

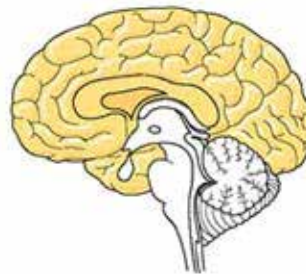
## ინფორმაციის დამუშავება დიდი ცვინის ქიქქში

ქერქში მიმავალი სენსორული ინფორმაციის უმეტესობა თალამუსიდან მიემართება წილებში მოთავსებულ პირველად სენსორულ ზონებთან: მხედველობითი ინფორმაცია კეფის წილში; სმენითი - საფეთქლის წილში; სომატოსენსორული ინფორმაცია შეხებაზე, ტკივილზე, დაწოლაზე, ტემპერატურაზე, კუნთებისა და კიდურების პოზიციაზე თხემის წილში; ინფორმაცია გემოზე - თხემის წილის განსაზღვრულ სენსორულ ზონაში; ყნოსვითი ინფორმაცია - ჯერ ქერქის პირველად ზონებში (ეს ზონები მსგავსია ძუძუმწოვრებში და რეპტილიებში) და შემდეგ თალამუსის გავლით შუბლის წილის ქვედა ნაწილში (იხ. სურათი 48.27).

პირველადი სენსორული ზონები აგზავნიან ინფორმაციას ახლომდებარე ასოციაციური ზონებისკენ, სადაც მუშავდება განსაკუთრებული ნიშნები სენსორულ ინფორმაციის. მაგალითად, პირველად მხედველობით ქერქში ზოგიერთი ნეირონი არის მგრძნობიარე სინათლის ხაზების მიმართ, რომელთაც აქვთ გარკვეული სიგანე და ორიენტაცია. ინფორმაცია დაკავშირებული ასეთ ნიშნებთან არის გაერთიანებული ასოცირებულ ზონებში, რომელთა დანიშნულებაა სახეების რთული გამოსახულებების გამოცნობა. ინტეგრირებულ სენსორულ ინფორმაციაზე დაფუძნებით, დიდი ტვინის ქერქს შეუძლია მოტორული ბრძანებების გაცემა, რომლებიც იწვევენ სპეციფიკურ ქცევებს, მაგალითად, კიდურის მოძრაობას ან მისაღმებას. ეს ბრძანებები შეიცავს მოქმედების პოტენციალებს, რომლებიც წარმოიქმნება შუბლის წილის უკან პირველადი სომატოსენსორული ქერქის მიჯნაზე მდებარე პირველადი მოტორული ქერქის ნეირონებით (იხ. სურათი 48.27). მოქმედების პოტენციალები აქსონებით მიემართებიან თავის ტვინის ღეროსა და ზურგის ტვინის მიმართულებით, სადაც იწვევენ მოტორული ნეირონების აგზნებას, რომლებიც, თავის მხრივ, ააქტივებენ ჩონჩხის კუნთების უჯრედებს.

როგორც სომატოსენსორულ, ასევე მოტორულ ქერქში ნეირონები ორგანიზებულია არიან განლაგებული სხეულის იმ ნაწილის შესაბამისად, რომელიც გენერირებს სენსორულ შემოსავალს ან იღებს მოტო-

რულ ბრძანებას (იხ. სურათი 46.28). მაგალითად, ნეირონები, რომლებიც ამუშავებენ სენსორულ ინფორმაციას ქვედა კიდურებიდან და თითებიდან, ლოკალიზებულია შუა ხაზთან მჭიდროდ მდებარე სომატოსენსორული ქერქის უბანში. ნეირონები, რომლებიც აკონ-



ტროლებენ წვივებისა და ტერფების კუნთებს, ლოკალიზებულია მოტორული ქერქის შესაბამის ზონაში. 48.28-ე სურათზე აღნიშნულია, რომ ქერქის ზედაპირული ზონა განკუთვნილია სხეულის ყოველი ნაწილისთვის, არ არის დაკავშირებული მის ზომებთან. ის უფრო

დაკავშირებულია სენსორული ნეირონების რიცხვთან, რომელიც

### სურათი 48.25

**კვლევა:** განიცდის თუ ატა ბუბქმწაფრბის ბიფლფგიუტი საათი გატრგანი სიგნალების გაფლნას?

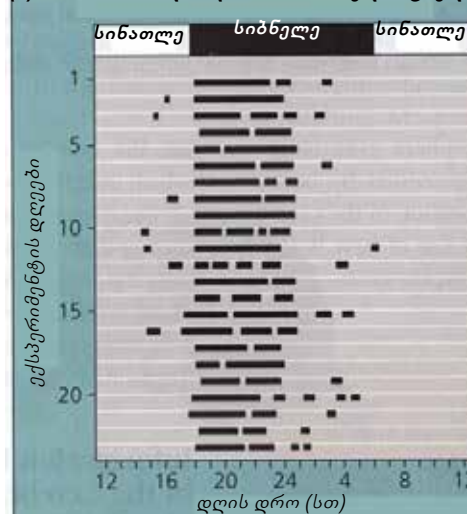
#### მქსპერიმენტი

ჩრდილოეთის მფრინავ ციყვში (*Glaucomys sabrinus*), აქტიურობა ჩვეულებრივ იწყება სიბნელის დაწყებით და მთავრდება გათენებისას. სავარაუდოა, რომ ციყვისთვის სინათლე არის გარემოს მნიშვნელოვანი სიგნალი. ამ აზრის შესამოწმებლად მკვლევრები 23 დღე აკონტროლებდნენ ციყვებს ორნაირ ლაბორატორიულ პირობებში: ა) 12 საათიანი განათების და 12 საათიანი სიბნელის რეგულარული ციკლით და ბ) მუდმივ სიბნელეში. ციყვებისთვის თავისუფლად მისაწვდომი იყო სავარჯიშო ბორბალი და გალია დასვენებისთვის. ავტომატური ჩამწერით აღირიცხებოდა ბორბლის ტრიალის დაწყება და გაჩერება.

#### შედეგები

როდესაც ციყვებზე გამოიყენეს რეგულარული დღე/ღამური ციკლი მათი აქტიურობა მბრუნავ ბორბალში (აღნიშნულია მუქი ხაზებით) ვლინდებოდა დაახლოებით ერთსა და იმავე დროს ყოველ დღე. თუმცა, როდესაც ისინი იმყოფებოდნენ მუდმივ სიბნელეში, მათი აქტიური ფაზა იწყებოდა დაახლოებით 21 წუთის დაგვიანებით ყოველ დღე.

(ა) 12 სთ. სინათლის და 12 სთ. სიბნელის ციკლი

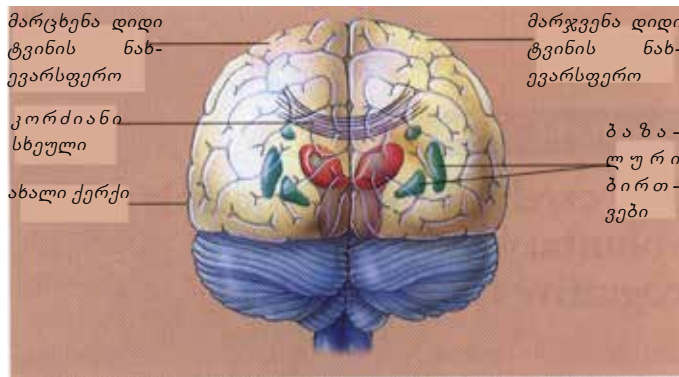


(ბ) მუდმივი სინათლე

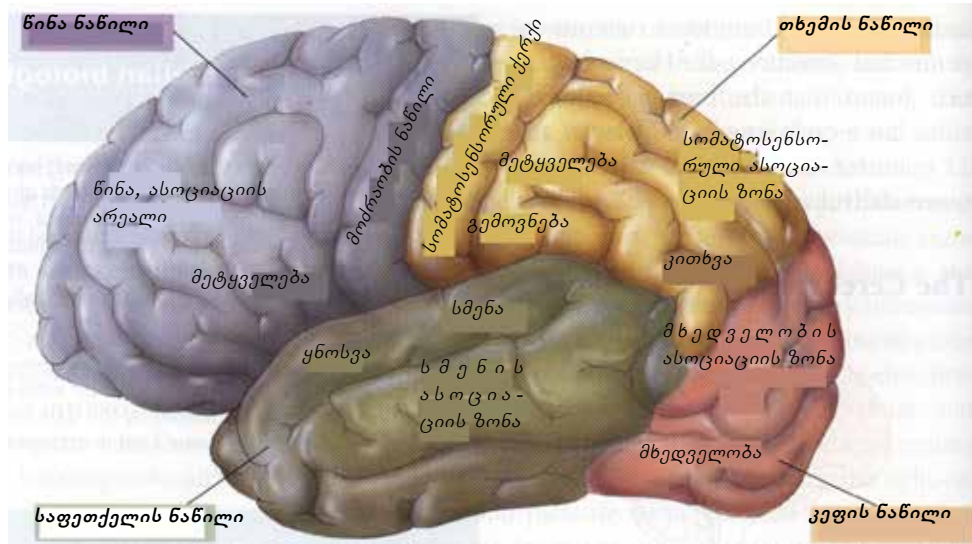


#### დასკვნა

ჩრდილოეთის მფრინავი ციყვის შინაგანი საათი შეიძლება მოქმედებდეს მუდმივი სიბნელის პირობებში, მაგრამ ის ასე მოქმედებს თავისი საკუთარი ციკლით, რომელიც გრძელდება დაახლოებით 24 საათსა და 21 წუთს. გარეთა (სინათლე) სიგნალი ინარჩუნებს საათის მუშაობას 24 საათიან ციკლში.



▲ **სურათი 48.26 ადამიანის დიდი ტვინი.** უკანა ხედიდან კორძიანი სხეული და ბაზალური განგლიები არ ჩანს ზედაპირიდან, რადგან ისინი მთლიანად დაფარულია მარჯვენა და მარცხენა დიდი ტვინის ნახევარსფეროებით.



▲ **სურათი 48.27 ადამიანის დიდი ტვინის ქერქი.** ცერებრული ქერქის თითოეული მხარე იყოფა ოთხ ნილად, და თითოეულ ნილს აქვს განსაკუთრებული ფუნქციები. მარცხენა მხრის ზოგიერთ ასოციაციურ უბანს (ნაჩვენებია სურათზე) აქვს მარჯვენა მხრისგან განსხვავებული ფუნქციები.

აინერვირებს ამ ნაწილს (სომატოსენსორული ქერქისთვის) ან ჩვევების რაოდენობასთან, რომელიც საჭიროებს ამ ნაწილში კუნთების კონტროლს (მოტორული ქერქისთვის). აქედან გამომდინარე, ზედაპირული ზონა, განპირობებული სახის კუნთების კონტროლისთვის, არის ბევრად უფრო დიდი, ვიდრე ის, რომელიც ეკუთვნის სხეულს.

## კოგნიტიული ფუნქციების ლატერალიზაცია

თავის ტვინის განვითარების დაბადების შემდგომ პერიოდში, კონკურენტული ფუნქციები გამოიყოფა და თავსდება ქერქის მარცხენა და მარჯვენა ნახევარსფეროებში: ადგილი აქვს ფუნქციების **ლატერალიზაციას**. მარცხენა ჰემისფერო მიმართულია ენის, მათემატიკის, ლოგიკური მოქმედების და ინფორმაციის თანამიმდევრობის სერიულ დამუშავებისთვის. ის იხრება დეტალური, ჩქარი მოქმედებისკენ, რომელიც საჭიროა ჩონჩხის კუნთების კონტროლისთვის და ნატიფი მხედველობისა და სმენის დეტალების გადა-

მუშავებისთვის. მარჯვენა ჰემისფერო უფრო ძლიერია პატერნის გამოცნობაში, სახის გამოცნობაში, სივრცობრივ ურთიერთობაში, არავერბალურ აზროვნებაში, ზოგად ემოციურ პროცესებში და ინფორმაციის მრავალმხრივ ერთდროულ გადამუშავებაში. მეტყველების გაგებით, მისი ზემოქმედებით და ინტონაციური პატერნებით, რაც გამოხატავს შინაარსის ემოციურობას, აქტივდება მარჯვენა ჰემისფეროს ფუნქცია, ისევე, როგორც ეს ხდება მუსიკის მოსმენისას. მარჯვენა ჰემისფერო ავლენს სპეციალიზაციას წარმოდგენილსა და მთელ კონტექსტს შორის აღქმულ ურთიერთობაში, რომელშიც ისინი აღიძვრება, მაშინ, როდესაც მარცხენა ნახევარსფერო უკეთესია ფოკუსირებულ აღქმაში. მემარჯვენე ადამიანების უმრავლესობა იყენებს თავის მარცხენა ხელს (კონტროლირებულს მარჯვენა ნახევარსფეროთი) დასაკავშირებლად ან დასაჭერად და იყენებს მარჯვენა ხელს (კონტროლირებულს მარცხენა ჰემისფეროთი) ნატიფი დეტალური მოძრაობისთვის.

ორი ნახევარსფერო ჩვეულებრივ მუშაობს ერთად და ჰარმონიულად, ინფორმაციის ურთიერთგადაცემით კორძიანი სხეულის ბოქკოების მეშვეობით. ასეთი გაცვლის მნიშვნელობა ნაჩვენებია პაციენტებში, როლებსაც გადაჭრილი ჰქონდათ კორძიანი სხეული ეპილეპტიური შეტევების რეგულაციის მიზნით. როდესაც ასეთი „ტვინგადაჭრილი“ პაციენტები უყურებდნენ ნაცნობ სიტყვებს თავიანთ მარცხენა მხედველობის ველში, მათ არ შეეძლოთ სიტყვის წაკითხვა, ვინაიდან სენსორული ინფორმაცია, რომელიც გადაეცემა მხედველობის მარცხენა ველიდან მარჯვენა ნახევარსფეროს ვერ აღწევს მეტყველების ცენტრს მარცხენა ჰემისფეროში. ამ პაციენტების თითოეული ნახევარსფერო ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად ფუნქციობს

## ენა და მეცადუნეობა

თავის ტვინის უმაღლესი კოგნიტიური ფუნქციების სისტემატიკური კარტირება მე-19 საუკუნეში დაიწყო, როდესაც ექიმებმა გაიგეს, რომ ქერქის გარკვეული ზონების დაზიანებამ ტრავმით, დარტყმით ან სიმსივნით, შეიძლება წარმოქმნას განსაზღვრული ცვლილებები პიროვნების ქცევაში. ფრანგი ექიმი პიერ ბროკა ატარებდა იმ პაციენტების სიკვდილის შემდგომ კვლევას, რომლებსაც შეეძლოთ გაეგოთ ენა, მაგრამ არ შეეძლოთ მეტყველება. მან აღმოაჩინა, რომ ასეთი პაციენტების უმრავლესობას მარცხენა შუბლის წილის პატარა ველში აქვთ დეფექტები. ეს ველი, დღეს ცნობილი, როგორც ბროკას ველი, მდებარეობს პირველადი მოტორული ქერქის წინა ნაწილში, რომელიც აკონტროლებს სახის კუნთებს. გერმანელი ექიმი კარლ ვერნიკე ასევე ატარებდა გამოკვლევებს და აღმოაჩინა, რომ საფეთქელის წილის უკანა ნაწილის, დღეს ვერნიკეს ველად წოდებულის, დაზიანება აქრობს მეტყველების გაგების უნარს, მაგრამ ტოვებს ინტაქტურს მის გენერაციას. საუკუნეზე მეტი ხნის შემდეგ, თავის ტვინის აქტივობის შესწავლამ ფუნქციურ

მაგნიტო-რეზონანსული ტომოგრაფიის (FMRI) და პოზიტრონულ-ემისიური ტომოგრაფიის (PET; იხ. თავი 2) მეთოდებით, დაამტკიცა, რომ ბროკას ველი არის აქტიური მეტყველების გენერირების დროს (სურათი 48.29, ქვედა მარცხენა გამოსახულება), ხოლო ვერნიკეს ველი აქტიურდება, როდესაც მეტყველება მოისმინება (სურათი 48.29, ზედა მარცხენა გამოსახულება).

ბროკას და ვერნიკეს ველი თავის ტვინის ძალიან დიდი ქსელის ნაწილია, რომელიც ჩართულია მეტყველების განვითარებაში. დაბეჭდილი სიტყვების ჩუმად წაკითხვა, მეტყველების გარეშე, ააქტივებს მხედველობის ქერქს (სურათი 48.29 ზედა მარჯვენა გამოსახულება), მაშინ, როდესაც დაბეჭდილი სიტყვების ხმაიადლი წაკითხვა ააქტივებს ვიზუალურ ქერქს და ბროკას ველს. შუბლის და საფეთქლის ზონების გააქტივება ხდება, თუ სიტყვებს მათი მნიშვნელობა უკავშირდება. მაგალითად, როდესაც ადამიანის მიერ წარმოქმნილ ზმნებს თან ახლავს არსებითი სახელი ან დაკავშირებული სიტყვების ჯგუფი ან კონცეფცია (სურათი 48.29, ქვედა მარჯვენა გამოსახულება).

## ემოციები

ემოციები თავის ტვინის მრავალი რეგიონის კომპლექსური ურთიერთქმედების შედეგია. ამ რეგიონებში გამორჩეულია ლიმბური სისტემა – თავის ტვინის ღეროს გარშემო მდებარე სტრუქტურების წრე (სურათი 48.30). ლიმბური სისტემა შეიცავს დიდი ტვინის სამ ნაწილს – ამიგდალას, ჰიპოკამპს და საყნოსავ ბოლქვებს, აგრეთვე შეიცავს ქერქის წილების ზოგიერთ შინაგან ნაწილებს, თალამუსისა და ჰიპოთალამუსის ნაწილთან ერთად. ეს სტრუქტურები ნეოკორტექსის სენსორულ უბნებთან და თავის ტვინის სხვა უმაღლეს ცენტრებთან ურთიერთქმედებენ და შუამავლობენ პირველადი ემოციების განხორციელებას, რომლებიც ვლინდება ისეთ ქცევებში, როგორიც არის სიცილი და ტირილი. ისინი აგრეთვე უკავშირებენ ემოციურ “შეგრძნებებს” ბაზურ, სასიცოცხლო ფუნქციებს, რომელსაც აკონტროლებს თავის ტვინის ღერო, აგრესიული, კვებითი და სქსობრივი ქცევების ჩათვლით. გარდა ამისა, ლიმბური სისტემა ასრულებს ცენტრალურ როლს ზოგიერთ ისეთ ქცევაში, როგორიცაა ჩვილების გახანგრძლივებული მოვლა და ემოციური კავშირი სხვა ინდივიდებთან, რაც განასხვავებს ძუძუმწოვრებს რეპტილიებისა და ამფიბიების უმრავლესობისგან.

ლიმბური სისტემის სტრუქტურები ფორმირდება განვითარების ადრეულ სტადიებზე და ქმნის საფუძველს უმაღლესი კოგნიტური ფუნქციების, რომლებიც ვლინდება მოგვიანებით, ახალი ქერქის ჩამოყალიბების პერიოდში. ჩვენ ვიზრდებით თავის ტვინის ხვეულებით, რომლებიც მომზადებულია სახეების არანატივი ელემენტების გამოსაცნობად, მომვლელთან კავშირის განსამტკიცებლად, მასთან მხედველობითი და ვოკალური ურთიერთქმედებისთვის, შიშის, შფოთვისა და გაბრაზების გამოსახატავად. დასწავლისა და მეხსიერების პროცესები, შემდგომ იძენენ განსაკუთრებული აღქმისა და მოტორული აქტივობის გამოცდილებას, რომელიც წარმატებით გამოიყენება სიბოხსა და საკვების მოპოვებისას. ჩვენ ასევე ძალიან ადრე ვიწყებთ სწორის არასწორისგან გარჩევას, მაგალითად, მომვლელის ბედნიერი ან გაბრაზებული სახის ან ხმის ჟღერადობის აღქმას. ამიგდალა, საფეთქლის წილში მდებარე სტრუქტურა (იხ. სურათი 48.30), მთავარია სახის გამო-მეტყველების ემოციური შინაარსის ამოცნობაში, რაც საფუძველად

უდევს ემოციურ მეხსიერებას.

ასეთი ემოციური მეხსიერების სისტემა, როგორც ჩანს, წარმოიქმნა განვითარების უფრო ადრეულ სტადიებზე, ვიდრე სისტემა, რომელიც განაპირობებს მოვლენების ზუსტ გახსენებას და რომელიც ჰიპოკამპს საჭიროებს. ზრდასრულები, რომლებიც სწავლობენ უარყოფითი ვითარებისგან გარიდებას, როგორიცაა გარემო, ასოცირებული ელექტრულ დარტყმასთან, იმახსოვრებენ ამ გარემოს („ხატს“) და ავტონომური აგზნების გამოცდილებას. ეს ვლინდება გულის რიტმის მომატებაში ან ოფლიანობაში, თუ გახსენება კვლავ მოხდება. ზოგიერთ ზრდასრულს დაზიანებული ჰიპოკამპით ხატის

ამოცნობა არ შეუძლია, მაგრამ ავტონომიური აქტივაცია შენარჩუნებული აქვს, ვინაიდან ამიგდალით განპირობებული ემოციური მეხსიერება ჯერ კიდევ ნორმაშია. პირიქით, პაციენტები დაზიანებული ამიგდალით ვერ ავლენენ ავტონომიურ აქტივაციას, მაგრამ იხსენებენ ხატს, რადგან ჰიპოკამპით განპირობებული ზუსტი მეხსიერება ინტაქტური აქვთ.

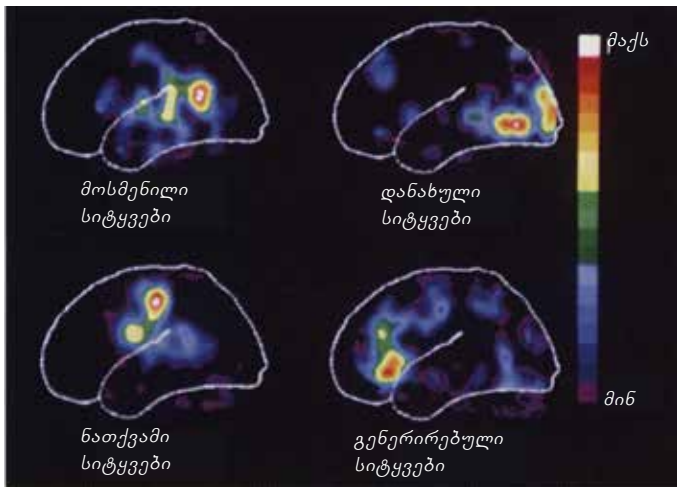
როდესაც ბავშვი ვითარდება, პირველადი ემოცია, როგორიცაა სიამოვნება ან შიში, დაკავშირებული სხვადასხვა შემთხვევასთან, არის პროცესი, რომელსაც სჭირდება ახალი ქერქის ნაწილები, განსაკუთრებით შუბლის წილის ყველაზე წინა უბანი, ანუ პრეფრონტალური ქერქი. ფინეას კეიჯის ცნობილი სამედიცინო შემთხვევა პირდაპირ გვიჩვენებს, რამდენად მნიშვნელოვანია ემოციური დასწავლა. 1848 წელს კეიჯი მუშაობდა რკინიგზის მშენებლობის მონაკვეთზე, როდესაც დინამიტის აფეთქებისას ერთი მეტრი სიგრძის რკინის ღერძი მოხვდა თავში. ღერძი შევიდა ქალაში მარცხენა თვალის ქვემოთ და გამოვიდა თავის ზედა ნაწილიდან. გასაოცარია, კეიჯი გამოჯანმრთელდა, მაგრამ მისი პიროვნება საფუძვლიანად შეიცვალა. ერთ დროს ქმედითუნარიანი, ნიჭიერი ოსტატი გახდა მოუთმენელი, ბილწი და ჭირვეული. 1990 წლის ბოლოს, ნეირომეცნიერებმა შეისწავლეს კეიჯის თავის ქალა და დაადგინეს, რომ ღერძმა დააზიანა შუბლის წილის ზონა, რომელიც განაპირობებს ემოციებს. დღეისთვის, ის პაციენტები, რომლებსაც აქვთ ამ უბანში სიმსივნე ან დაზიანება, ზოგჯერ განიცდიან იგივე სიმპტომების კომბინაციას. მათი ინტელექტი და მეხსიერების სისტემა ინტაქტური ჩანს, მაგრამ მოტივაცია, წინდახედულება, მიზნის დასახვა და გადაწყვეტილების მიღება არის დარღვეული. მათი ემოციები და გრძნობები შესუსტებულია.

შუბლის წილის გადაჭრა (ფრონტალური ლობოტომია) ქირურგიული პროცედურაა, რომლის დროსაც კავშირი პრეფრონტალურ ქერქსა და ლიმბურ სისტემას შორის ირღვევა. ეს მეთოდი ერთ დროს ფართოდ გამოიყენებოდა მძიმე ემოციური დარღვევების სამკურნალოდ. თუმცა, პაციენტებში მიღწეულ მორჩილებას თან ახლდა დასახული მიზნისკენ კონცენტრირების, დაგეგმვისა და მუშაობის უნარის დაკარგვა. ამიტომ, ასეთი მძიმე ავადმყოფების მკურნალობისთვის ფრონტალური ლობოტომია ჩანაცვლებულია წამლებით.

## მეხსიერება და დასწავლა

შესაძლოა ჩვენ ვერ ვაცნობიერებთ, მაგრამ მუდმივად ვამოწმებთ იმას, რა ხდება ახლა და ვადარებთ იმას, რა მოხდა გარკვეული დროის წინ. ჩვენ ვინახავთ რაღაც დროით ინფორმაციას, წინათგრძნობებს ან მიზნებს ხანმოკლე მეხსიერებაში, რომლის მე-





▲ **სურათი 48.29** თავის ტვინის ქერქში მეტყველების უბნების ფუნქციური კარტირება. ერთი ადამიანის თავის ტვინში მეტყველებასთან დაკავშირებული ოთხი სხვადასხვა აქტიურობის დონის ზონების PET გამოსახულებები.

და განვითარებაზე პასუხისმგებელ მექანიზმებს. ასეთ შემთხვევებში ნეირონები ჩვეულებრივ ახალ კავშირებს ქმნიან.

ისეთი მოტორული ჩვევების, როგორიცაა სიარული, ფეხსაცმლის შეკვრა, ველოსიპედით მოძრაობა ან წერა, დასწავლა ჩვეულებრივ გამოვლით ხდება. თქვენ შეგიძლიათ შეასრულოთ აღნიშნული დასწავლილი ქცევები იმ გააზრებული ინდივიდუალური საფეხურების გახსენების გარეშე, რომელიც სჭირდება ასეთი ამოცანების სწორ შესრულებას. ერთხელ დასწავლილი ჩვევის დავიწყება ძნელია. მაგალითად, თვითნასწავლ პიროვნებას, რომელიც თამაშობს ჩოგბურთს წლების განმავლობაში და მოუხერხებლად ურტყამს მარცხნიდან, ბევრად უფრო მეტი დრო დასჭირდება სწორი სვლის დასწავლისთვის, ვიდრე ახალბედას. ჩვევები, კარგი იქნება თუ ცუდი, ძნელი აღმოსაფხვრელია. ჩვენი სიარული, შესტები და გამოთქმა (აქცენტი) ინდივიდუალურია. ჩვენ ვაცნობიერებთ ამ ნიშან-თვისებებს სხვა ადამიანებში, მათთან ურთიერთობის დროს.

## დასწავლის უჩაქდელი მექანიზმები

ნობელის ლაურეატმა ერიკ კენდელმა და მისმა კოლეგებმა კოლუმბიის უნივერსიტეტიდან დასწავლის უჩაქდელი საფუძვლების კვლევისთვის გამოიყენეს მოლუსკი ზღვის კურდღელი (*Aplysia californica*), მცირე ზომის ცხოველი, ექსპერიმენტულად ხელმისაწვდომი ნერვული სისტემით. მკვლევრებმა შესძლეს ამ მოლუსკში მარტივი ფორმის დასწავლის მექანიზმის ახსნა სპეციფიკურ სენსორულ და მოტორულ ნეირონებს შორის სინაფსური ტრანსმისიის ინტენსივობის ცვლილებით. **48.31-ე სურათზე** აღწერილია ერთ-ერთი ექსპერიმენტი.

ხერხემლიანების თავის ტვინში სინაფსური პლასტიურობის ფორმა ხანგრძლივი პოტენციალი (LTP) ზრდის სინაფსური გადაცემის ინტენსიობას, რომელიც აღიძვრება, როდესაც პრესინაფსური ნეირონები უშვებენ აქტიური პოტენციალების მოკლე, მაღალ-

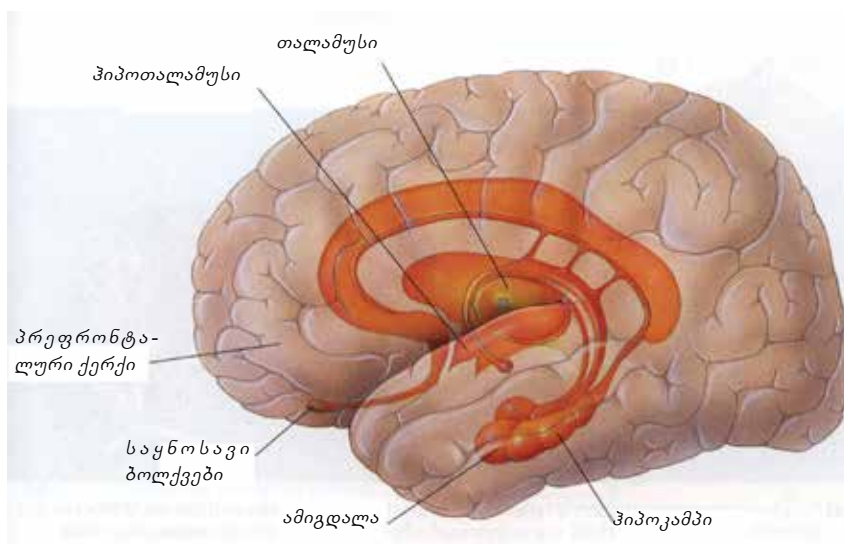
სიხშიროვან სერიას. ვინაიდან LTP შეიძლება გაგრძელდეს დღეები ან კვირები, ეს შეიძლება იყოს ფუნდამენტური პროცესი, რომლითაც ყალიბდება მენსიერება ან დასწავლას აქვს ადგილი. LTP-ის მექანიზმი იყო შესწავლილი უფრო სრულყოფილად ჰიპოკამპის სინაფსებში, სადაც პრესინაფსური ნეირონები გამოყოფენ ამაგზნებელ ნეიროტრანსმიტერს გლუტამატს (**სურათი 48.32**). პოსტსინაფსურ ნეირონებს გააჩნიათ გლუტამატური რეცეპტორების ორი ტიპი: AMPA და NMDA რეცეპტორები. AMPA რეცეპტორები არიან ლიგანდ-დაჭიშკრული იონური არხები; როდესაც გლუტამატი უკავშირდება მათ, Na<sup>+</sup> და K<sup>+</sup> გადაადგილდებიან არხებში და პოსტსინაფსური მემბრანა დეპოლარიზდება. NMDA რეცეპტორები არიან როგორც ლიგანდ-დაჭიშკრული, ასევე ვოლტაჟ-დაჭიშკრული არხები: ისინი იხსნიან თუ გლუტამატი დაკავშირებულია და მემბრანა დეპოლარიზებულია. როგორც არის დეტალურად აღწერილი **48.32 სურათზე**, გლუტამატის დაკავშირებამ ამ ორი ტიპის რეცეპტორებთან შეიძლება გამოიწვიოს LTP პოსტსინაფსური ნეირონების აგზნების გზით.

## ცნობიერება

ადამიანის ცნობიერებას დიდხანს არ მიიჩნევდნენ ზუსტი მეცნიერების კვლევის საგნად და უფრო ფილოსოფიისა ან რელიგიის სფეროს აკუთვნებდნენ. ამ თვალსაზრისის ერთ-ერთი საფუძველი იყო ის გარემოება, რომ ცნობიერება არის ერთდროულად ფართო (ეფუძნება ჩვენი თავის აღქმასა და ჩვენს საკუთარ გამოცდილებას) და სუბიექტურიც.

მიუხედავად ამისა, ამ უკანასკნელი ათწლეულების მანძილზე ნეირომეცნიერებმა დაიწყეს ცნობიერების შესწავლა თავის ტვინის სტრუქტურების ასახვის ისეთი მეთოდის გამოყენებით, როგორიცაა fMRI (**იხ. სურათი 48.1**). ამჟამად, შესაძლებელია ადამიანის თავის ტვინის აქტიურობის შედარება ცნობიერების სხვადასხვა მდგომარეობის დროს – მაგალითად, პიროვნების მიერ დანახული ობიექტის გაცნობიერებამდე და ამის შემდეგ. fMRI მეთოდის გამოყენება შეიძლება აგრეთვე სენსორული ინფორმაციის ცნობიერი და არაცნობიერი დამუშავების შესადარებლად. ასეთი კვლევები „ცნობიერების ცენტრს“ თავის ტვინში ზუსტად ვერ განსაზღვრავენ; ისინი გვთავაზობენ სულ უფრო და უფრო დეტალურ სურათს, თუ როგორ კორელირებს ნეირონული აქტიურობა გაცნობიერებულ განცდებთან. კონსენსუსი ნეირომეცნიერებს შორის სულ უფრო იზრდება იმის თაობაზე, რომ ცნობიერება არის თავის ტვინის კოლექტიური თვისება (**იხ. თავი 1**), რომელიც დიდი ტვინის ქერქის მრავალ უბანს მოიცავს. რამდენიმე მოდელით ითვლება, რომ არსებობს „სკანირების მექანიზმის“ მსგავსი რამ, რომელიც მრავალგზის მოიცავს მთელ თავის ტვინს და ახდენს ფართოდ გავრცელებული აქტივობის ინტეგრაციას ერთიან ცნობიერების მომენტში.

მიუხედავად ამისა, კარგად დამტკიცებულ თეორიას ცნობიერების შესახებ ვერ მივიღებთ მანამ, სანამ უფრო არ დაიხვეწება თავის ტვინის ასახვის მეთოდები. აქტივობის დინამიური პატერნების ანალიზმა, რომელიც მოიცავს მთელ თავის ტვინს, შეიძლება აღმოაჩინოს, რომ ამ პატერნებს არ აქვთ იმაზე მეტი უშუალო ურთიერთობა ინდივიდუალურ ნერვულ უჯრედებთან, ვიდრე ქარიზხალს აქვს თავის შემადგენელ წყლის მოლეკულებთან.



▲ სურათი 48.30 ლიმბური სისტემა.

## კონცეფცია 48.7

### ცნს-ის დაზიანებები და დაავადებები ინცენსიური კვლევის საგანია

განსხვავებით პნს-გან, ძუძუმწოვრების ცნს-ს არ შეუძლია თავისთავის სრული აღდგენა დაზიანების ან ავადმყოფობის უეცარი და ძლიერი შეტევისას. გადარჩენილ ნეირონებს თავის ტვინში შეუძლიათ ახალი კავშირების შექმნა და ამგვარად ზოგჯერ დაზიანების კომპენსაცია. მაგალითად, ზოგიერთი შეტევის მსხვერპლის საოცარი აღდგენა. თუმცა, ზოგადად რომ ვთქვათ, თავისა და ზურგის ტვინის დაზიანებებს, შეტევებს და ისეთ დაავადებებს, რომლებსაც მწყობრიდან გამოყავთ ცნს-ის ნეირონები, მაგალითად, ალცჰეიმერსა და პარკინსონს, გამანადგურებელი ეფექტები აქვს. ნერვული უჯრედის განვითარებაზე მიმდინარე კვლევა და

ნეირონული ღეროვანი უჯრედების აღმოჩენა აძლიერებს ფუნდამენტურ ცოდნას ნერვულ სისტემის შესახებ და მომავალში შესაძლებლობას მისცემს ექიმებს, აღადგინონ და შეცვალონ დაზიანებული ნეირონები.

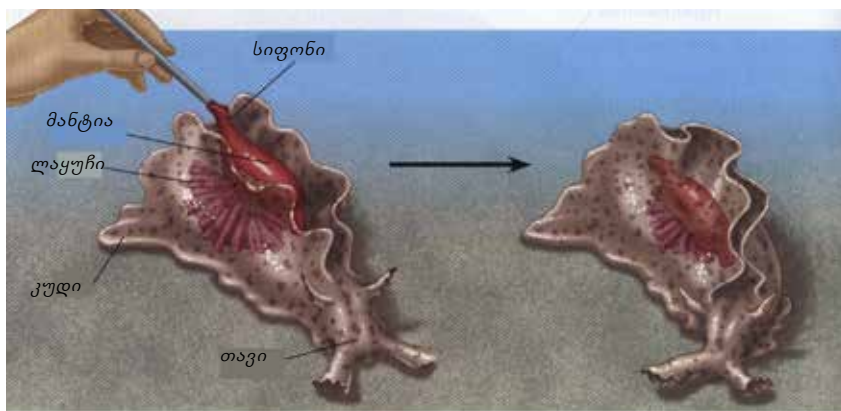
## კონცეფცია 48.6

1. 48. 28-ე სურათზე დაყრდნობით, რა დასკვნის გამოტანა შეგიძლიათ სენსორული ნეირონების შესაბამის რაოდენობაზე, რომლებიც აინერვირებენ ხელს და კისერს? ახსენით.
2. თუ ადამიანს, დაზიანებული კორძიანი სხეულით, სთხოვთ, შეხედოს ნაცნობი სახის ფოტოს ჯერ მისი მხედველობის მარცხენა ველით და შემდეგ მარჯვენით, რატომ იქნება მისთვის რთული დაასახელოს სახე რომელიმე ველში?
3. თავის ტვინის ორი ველი, რომელიც მნიშვნელოვანია მეტყველებაში არის ბროკას და ვერნიკეს. როგორ არის დაკავშირებული თითოეული ველის ფუნქცია მათ მდებარეობასთან თავის ტვინის ქერქში?
4. ახსენით, გლუტამატის კავშირები NMDA რეცეპტორებთან ჰიპოკამპში, როგორ გამოავლენს პირდაპირი და არაპირდაპირი სინაფსური ტრანსმისიის თვისებებს?

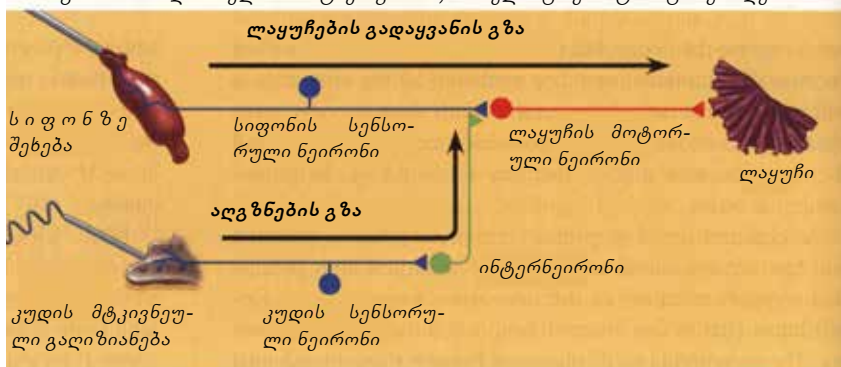
### ნერვული უჯრედის განვითარება

ნეირობიოლოგიაში საკვანძო კითხვებს შორის გვხვდება შემდეგი: როგორ ხდება გარკვეული უჯრედების დიფერენცირება ნეირონებად ცხოველების განვითარების დროს და მათი მიგრაცია სათანადო ლოკაციებში, აქსონების ზრდა სპეციფიკური ადგილებისკენ და სინაფსების შექმნა შესაბამის პოსტსინაფსურ უჯრედებთან (სამიზნე უჯრედებთან). Corey Goodman-ის (კალიფორნიის უნივერსიტეტი, ბერკლი) და Marc Tessier-Lavigne-ს (კალიფორნიის უნივერსიტეტი, სან ფრანცისკო) ლაბორატორიებში შეისწავლება, როგორ „პოულობენ თავის გზას“ ნეირონები ცნს-ის განვითარების პერიოდში. მათი სამუშაო აერთიანებს უჯრედშორის კომუნიკაციის ელემენტებს (იხ. თავი 11), გენის ექსპრესიის კონტროლს (იხ. თავი 19) და განვითარების გენეტიკურ საფუძველს (იხ. თავი 21).

სამიზნე უჯრედებთან მისაღწევად აქსონები უნდა გაგრძელდნენ რამდენიმე მიკრომეტრიდან მეტრამდე და მეტი (მაგალითად, ადამიანის ზურგის ტვინიდან ტერფამდე). აქსონი არ მიდის პირდაპირი გზით თავის სამიზნე უჯრედებისკენ, არამედ მოლეკულური მაჩვენებლები გზის გასწვრივ მიმართავენ და ორიენტაციას უცვლიან აქსონის ზრდას შუაგზის კორექციებით, რაც იწვევს არაშემთხვევით დაკლაკვნილ დაგრძელებას. მოზარდი აქსონის მოპასუხე



(ა) სიფონის ტაქტილური (შეხებით) გაღიზიანება წარმოქმნის რეფლექსს, რომელიც იწვევს ლაყურების გამოყვანას. თუ კუდს სიფონის გაღიზიანებამდე მივაყენებთ მტკიცე ნივთიერებას, გამოყვანის რეფლექსი გაძლიერდება. რეფლექსის გაძლიერება ამ გზით არის დასწავლის მარტივი ფორმა, რომელსაც სენსიტიზაცია ეწოდება.



(ბ) სენსიტიზაციაში მონაწილეობენ ინტერნეირონები, რომლებიც ქმნიან სინაფსებს სიფონის სენსორული ნეირონების სინაფსურ დაბოლოებებზე. კუდის გაღიზიანების დროს ინტერნეირონები გამოყოფენ სეროტონინს, რომელიც სიგნალის ტრანსდუქციურ გზას ააქტიურებს და  $K^+$ -ის არხებს სიფონის სენსორული ნეირონების სინაფსურ ტერმინალებში ხურავს. ამის შედეგად, მოქმედების პოტენციალები სიფონის სენსორულ ნეირონებში ტერმინალის ხანგრძლივ დეპოლარიზაციას წარმოქმნიან. ეს განაპირობებს უფრო მეტი  $Ca^{2+}$ -ის დიფუზიას დაბოლოებებში, რაც თავის მხრივ, იწვევს ტერმინალების მიერ თავისი ამაღლებული ნეიროტრანსმიტერის მეტი რაოდენობით გამოყოფას ლაყურების მოტორულ ნეირონებზე. მოტორული ნეირონების პასუხში ხდება უფრო მაღალი სიხშირის მოქმედების პოტენციალების გენერირება, რაც იწვევს ლაყურების უფრო ძლიერ გამოყვანას.

### ▲ სურათი 48.31 სენსიტიზაცია აპლიზიაში (ზღვის კურდღელში) (*Aplysia californica*).

ზონას წინა კიდებზე უწოდებენ ზრდის კონუსს. სასიგნალო მოლეკულები, გამოთავისუფლებული უჯრედებით ზრდის მარშრუტის გასწვრივ, უკავშირდებიან ზრდის კონუსის პლაზმურ მემბრანაზე მოთავსებულ რეცეპტორებს და ააქტივებენ სიგნალის ტრანსდუქციურ გზებს (სურათი 48.33). აქსონმა შეიძლება უპასუხოს ზრდით, როგორც სასიგნალო მოლეკულების წყაროს მიმართულებით (მიზიდვა), ასევე საპირისპირო მიმართულებით (განზიდვა). უჯრედის ადჰეზიური მოლეკულები აქსონის ზრდის კონუსზე აგრეთვე გარკვეულ როლს ასრულებენ; ისინი ემაგრებიან უჯრედების გარემომცველ კომპლემენტარულ მოლეკულებს, რაც განაპირობებს მზარდი აქსონის მსვლელობის გზას. ასტროციტებით გამოყოფილი ნერვის ზრდის ფაქტორი და თვით ნეირონებით პროდუცირებული ზრდის მასტიმულირებელი ცილები აქსონური დაგრძელების სტიმულაციის გზით მონაწილეობენ პროცესში. მზარდი აქსონი თავისი

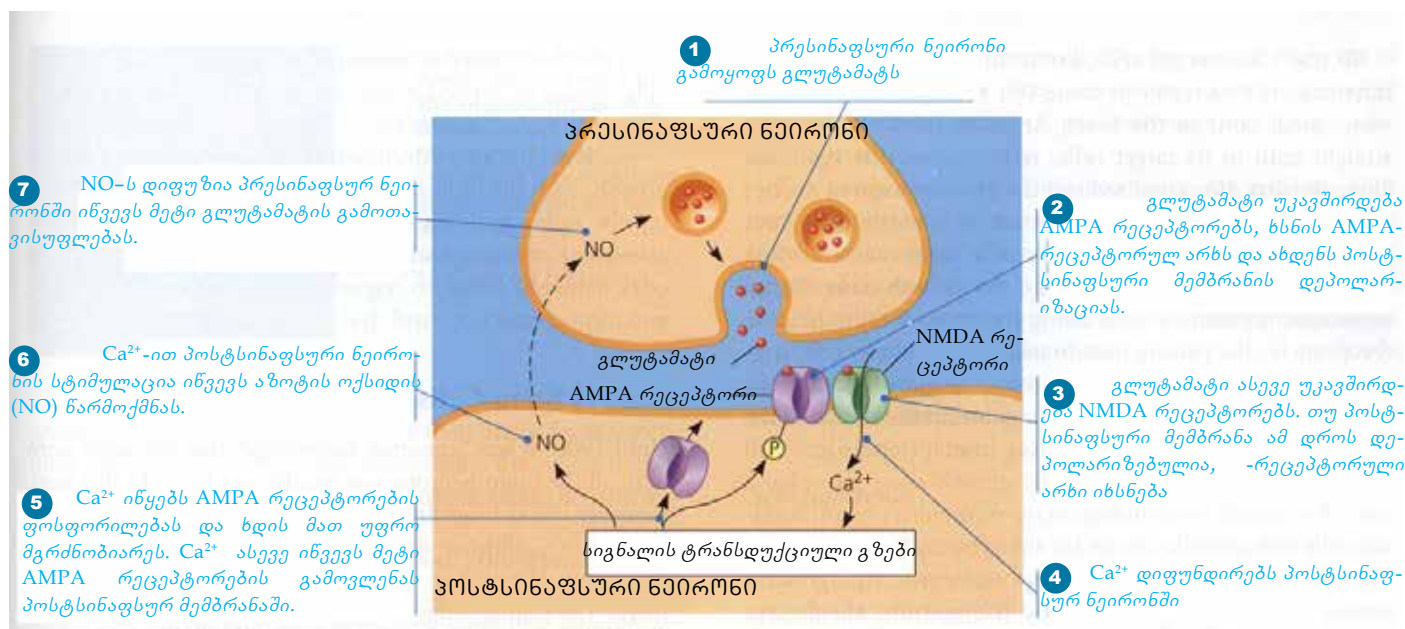
განვითარების სხვადასხვა დროს ავლენს სხვადასხვა გენს. გარემომცველ უჯრედებს გავლენა აქვთ აქსონის გადაადგილებაზე. ეს რთული პროცესი შენარჩუნებული იყო ევოლუციის მილიონი წლის განმავლობაში გენებისთვის, და გენების ნაწარმისთვის. აქსონის მართვის მექანიზმი საოცრად მსგავსია ნემატოდებში, მწერებში და ხერხემლიან ცხოველებში. აქსონური ზრდის მექანიზმის გაშიფრვაზე მუშაობა გრძელდება ცნს-ის დაზიანების აღდგენის საბოლოო მიზნით. მიზიდვის, განზიდვის, ზრდასთან დაკავშირებული ცილების და ზრდის ფაქტორების სწორი კომბინაციების გამოყენებით, მკვლევრები იმედოვნებენ, გამოიწვიონ დაზიანებული აქსონების ზრდა სწორი გზის გაყოლებით და სწორ სამიზნე უჯრედებთან კავშირების დამყარებით.

## ლტფიანი ნტფილი უჯრედები

1998 წლამდე იყო „საყოველთაოდ ცნობილი“, რომ თავის ტვინის თანდაყოლილი ყველა ნეირონი სიცოცხლის ბოლომდე მოგვეცემა. თუმცა, იმ წელს ფრედ გეიჯმა კალიფორნიის ბიოლოგიის შესწავლის სოლკის ინსტიტუტიდან და პიტერ ერიქსონმა შვედეთის შაჰლგრენსკას უნივერსიტეტის ჰოსპიტალიდან გააკეთეს გასაოცარი განცხადება, რომ ადამიანის თავის ტვინი ნეირონებს ზრდასრულ ასაკშიც წარმოქმნის. ერიქსონი მუშაობდა გეიჯის ლაბორატორიაში, სადაც მკვლევრებს თავგებში შეჰყავდათ ბრომოდოქსიურიდინის (BRD) მარკერი დნმ-ის მოსაზიზნად უჯრედების გაყოფის დროს. შვედეთში დაბრუნების შემდეგ ერიქსონმა გაიგო, რომ განუკურნავი კიბოთი დაავადებული პაციენტების ჯგუფი იღებდა BRD-ს, როგორც იმ კვლევის მონაწილე, რომელიც ახდენდა სიმსივნის ზრდის კონტროლს. პაციენტები თანახმა იყვნენ, რათა მათი თავის ტვინი სიკვდილის შემდეგ კვლევისთვის გადაეცათ. ერიქსონმა ყველა გარდაცვლილი პაციენტის თავის ტვინის ჰიპოკამპში ახლად დაყოფილი ნეირონები აღმოაჩინა (სურათი 48.34).

ამ ახალი ნეირონების ფუნქცია ადამიანის თავის ტვინში ნათელი არ იყო. თუმცა თავის, რომელიც ბინადრობდა სტიმულირებად გარემოში და სავარჯიშო ბორბალში დარბოდა, ჰქონდა უფრო მეტი ახალი ნეირონი ჰიპოკამპში და უკეთესად ასრულებდა ამოცანებს, ვიდრე გალიაში მოზინადრე გენეტიკურად იდენტური თავი, რომელიც მცირე სტიმულაციას იღებდა.

მოწიფებულ ნეირონებს, თავისი ინტენსიური გამონაზარდებით და დახლართული კავშირებით სხვა უჯრედებთან, აშკარად დაკარგული ჰქონდათ დაყოფის უნარი. აქედან გამომდინარე, თავის ტვინის ახალი უჯრედები ღეროვანი უჯრედებიდან უნდა წამოსულიყვნენ. გავიხსენოთ 21-ე თავიდან, რომ ღეროვანი უჯრედები შედარებით არასპეციალიზებული უჯრედებია, რომლებიც განუწყვეტილად იყოფიან. თუ ზოგიერთი მათგანის შთამომავლობა რჩება არადიფერენცირებულად, სხვებს სპეციალიზირებულ უჯრედებად



▲ სურათი 48.32 ხერხემლიანთა თავის ტვინში ხანგრძლივი პოტენციაციის მექანიზმი.

შესაფერის პირობებში დიფერენცირება შეუძლიათ.

ადამიანებში ღეროვან უჯრედებზე ჩატარებული კვლევის ერთ-ერთი სიძნელე არის ღეროვანი უჯრედების წყარის პოვნა. ემბრიონული ღეროვანი უჯრედები შეიძლება მოვიპოვოთ ემბრიონის წარმოქმნისას *in vitro* განაყოფიერების გზით (იხ. თავი 46), მაგრამ, ვინაიდან ამ უჯრედების მოპოვება საჭიროებს ემბრიონის დაზიანებას, სხვადასხვა ეთიკური და პოლიტიკური მიდგომა ზღუდავს მათ გამოყენებას. ზრდასულის

გარკვეულ ქსოვილებს, როგორცაა ძვლის ტვინი (იხ. თავი 42.16), აგრეთვე აქვთ ღეროვანი უჯრედები, მაგრამ ეს უჯრედები შეიძლება მრავალმხრივად ნაკლებად იყოს განვი თარებული, ვიდრე ემბრიონული ღეროვანი უჯრედები.

2001 წელს გეიჯიმ და მისმა კოლეგებმა განაცხადეს, რომ მათ ჰქონდათ ნეირონული პროგენიტორული უჯრედების კულტურები ახლად გარდაცვლილი პირების თავის ტვინიდან და ქსოვილების ქირურგიული ნიმუშებიდან. ტერმინი პროგენიტორი გვიჩვენებს, რომ ამ ღეროვანი უჯრედებიდან წარმოიქმნება ნეირონები ან გლია. კულტურაში, უჯრედები იყოფა 30-70-ჯერ და დიფერენცირდება ნეირონებად და ასტროციტებად. შემდგომი კვლევის ერთ-ერთი მიზანია იმ მეთოდის პოვნა, რომელიც გამოიწვევს საკუთარი ორგანიზმის პროგენიტორული უჯრედების დიფერენცირებას სპეციფიკური სახის ნეირონებად ან გლიად, მათი საჭიროების შესაბამისად. მეორე მიზანს წარმოადგენს კულტივირებული ნეირონული პროგენიტორული უჯრედების ტრანსპლანტაცია დაზიანებულ ცნს-ში.

## ნერვული სისტემის დაავადებები და დაზიანებები

ფსიქიკური დაავადებები, შიზოფრენიისა და დეპრესიების

ჩათვლით და ნევროლოგიური დარღვევები, როგორცაა ალცჰაიმერისა და პარკინსონის დაავადებები, საზოგადოებიდან უზარმაზარ ხარკს მოითხოვს, როგორც პაციენტების პროდუქტიული ცხოვრების პოტენციური დანაკარგის, ასევე ხანგრძლივი სამედიცინო მომსახურების თვალსაზრისით. ისინი ასევე მძიმედ არღვევენ პაციენტების ოჯახურ ცხოვრებას. კვლევის პრიორიტეტს შესაბამისი მკურნალობის აღმოჩენა წარმოადგენს.

მრავალი წელი, ფსიქიკურად დაავადებული პაციენტებისთვის ერთადერთი მკურნალობა იყო მათი დაწესებულებებში იზოლირება, სადაც მათი უმეტესობა თავის დარჩენილ ცხოვრებას ატარებდა. დღეს, როდესაც გამოჩნდა მრავალი წამალი ამ დაავადებების სამკურნალოდ (თუმცა მათი სრული განკურნება ჯერ კიდევ შეუძლებელია), ფსიქიატრიულ საავადმყოფოებში ყოფნის საშუალო დრო დაახლოებით ორი-სამი კვირაა. ფსიქიკური დაავადებისადმი დამოკიდებულება ნელ-ნელა შეიცვალა, ვინაიდან ადამიანები მეტად აცნობიერებენ იმას, რომ ფსიქიკური დაავადებები თავის ტვინში ქიმიური ან ანატომიური ცვლილებებითაა გამოწვეული.

## შიზოფრენია

მსოფლიოში მოსახლეობის დაახლოებით 1% დაავადებულია შიზოფრენიით- მძიმე ფსიქიკური აშლილობით, რომელსაც ახასიათებს ფსიქოტური ეპიზოდები, რეალობის გარჩევის უნარის დაკარგვით. შიზოფრენიის სიმპტომები ტიპურად შეიცავენ ჰალუცინაციებს (უფრო ხშირად „ხმებს“ რომლებიც პაციენტს აგონებენ, რომ ის უღირსი და ბოროტია), ილუზიებს (ძირითადად პარანორმალულს), ასევე დაჩაღუნებულ ემოციებს, უყურადღებობას, უინიციატივობას და ღარიბ მეტყველებას. მიუხედავად ზოგადად დამკვიდრებული აზრისა, შიზოფრენიით დაავადებულები ყოველთვის არ ავლენენ პიროვნულ გაორებას. ვარაუდობენ, რომ შიზოფრე-

ნიის რამდენიმე ფორმა არსებობს, მაგრამ გაურკვეველია, ეს სხვადასხვა დარღვევაა თუ ერთი დაავადების ვარიაციები.

შიზოფრენიის მიზეზი უცნობია, თუმცა დაავადებას აქვს ძლიერი გენეტიკური კომპონენტი. იდენტური ტყუპების შესწავლამ გვიჩვენა, რომ თუ ერთ ტყუპის ცალში გამოვლინდა შიზოფრენია, 50%-ით მოსალოდნელია, რომ მეორესაც ექნება. ის ფაქტი, რომ იდენტურ ტყუპებს აქვთ იდენტური გენები, არ გულისხმობს 100%-ით იმის ალბათობას, რომ შიზოფრენიას ექნება ერთნაირი სიძლიერის გამოვლინება. დღეს, როდესაც ადამიანის გენომი გარკვეულია, დიდი ძალისხმევით ხდება იმ მუტაციური გენების აღმოჩენის გზების ძიება, რომლებიც განაპირობებენ ადამიანის მიდრეკილებას დაავადებისადმი. ამ ძალისხმევაში ჩართულია ადამიანების დნმ-ის სიქვენირება ისეთი ოჯახებში, სადაც აღინიშნება შიზოფრენიის ხშირი შემთხვევები. აქ ჩართული უნდა იყოს მრავალბიომი გენები, რადგან მემკვიდრეობითობა არ მისდევს ცალკეული გენის მუტაციისთვის მოსალოდნელ მენდელის მოდელს.

შიზოფრენიის მკურნალობა ძირითადად ფოკუსირებულია თავის ტვინის იმ გზებზე, რომლებიც იყენებენ დოფამინს, როგორც ნეიროტრანსმიტერს. ამას მხარს უჭერს მონაცემების ორი მიმართულება. პირველი, ამფეტამინს ("ამაჩქარებელი"), რომელიც ააქტივებს დოფამინის გამოყოფას, შეუძლია წარმოქმნას შიზოფრენიის მსგავსი სიმპტომები. მეორე, წამლების უმეტესობა, რომელიც ამსუბუქებს სიმპტომებს, ბლოკავს დოფამინის რეცეპტორებს, განსაკუთრებით D2 რეცეპტორად წოდებულ ქვეტიპს. თუმცა, ასევე შესაძლებელია ჩართული იყოს დამატებითი ნეიროტრანსმიტერები. ამაზე მიუთითებს შიზოფრენიის მკურნალობაში წარმატებული სხვა წამლებიც, რომლებსაც ატიპიურ ანტიფსიქოტიკებს უწოდებენ. ისინი ძალიან სუსტად ბლოკავენ მხოლოდ D2 რეცეპტორს, მაგრამ უძლიერესი გავლენა აქვთ სეროტონინისა და/ან ნორეპინეფრინის რეცეპტორებზე. გარდა ამისა, ეს იმის მაჩვენებელია, რომ გლუტამატის რეცეპტორებიც, ალბათ გარკვეულ როლს თამაშობენ შიზოფრენიის განვითარებაში: PCP (ფენციკლიდინები) ანუ ქუჩის წამალი, „ანგელოზის მტკერი“ ბლოკავს გლუტამატის ტიპის NMDA რეცეპტორებს (მაგრამ არა დოფამინის რეცეპტორებს) და იწვევს შიზოფრენიის მსგავს ძლიერ სიმპტომებს.

მრავალ ამავნებელ წამალს, მიუხედავად მათი უნარისა, შეამსუბუქონ ძლიერი სიმპტომები, აქვს ისეთი უარყოფითი თანმდევი ეფექტები, რომ პაციენტები ხშირად წყვეტენ მათ მიღებას. მაგალითად, წამლები ხშირად იწვევენ მოტორულ დეფიციტებს, რომლებიც პარკინსონის დაავადების მსგავსია. შემთხვევების დაახლოებით 25%-ში ქრონიკული ფარმაკოლოგიური თერაპია იწვევს ახალ და ხშირად შეუქცევად მდგომარეობას, რომელსაც შენელებულ დისკინეზიას უწოდებენ. ამ დროს პაციენტს აქვს არაკონტროლირებადი სახის მანჭვითი მოძრაობები. ატიპური ანტიფსიქოტიკების გამოყენებისას ასეთი თანმდევი ეფექტები არ შეინიშნება. მაგრამ ზოგიერთი მათგანი გარკვეულ ინდივიდებში იწვევს დარღვევებს სისხლში. შიზოფრენიაზე პასუხისმგებელი გენეტიკური მუტაციის იდენტიფიცირებამ შეიძლება გაგვარკვიოს დაავადების გამოწვევ მიზეზებში, რამაც თავის მხრივ, შეიძლება ახალ თერაპიამდე მიგვიყვანოს.

## დეპრესია

დეპრესიის ორი ძირითადი ფორმა არის ცნობილი: ბიპოლარუ-

ლი დარღვევა და ღრმა (მაჯორ) დეპრესია. ბიპოლარული დარღვევა ან მანიაკალურ-დეპრესიული აშლილობა, რომელსაც ახასიათებს გუნება-განწყობის ცვლილებები ამაღლებულიდან ძალიან დათრგუნულისკენ, დაავადებულია მსოფლიო მოსახლეობის დაახლოებით 1%. ამის საპირისპიროდ, ღრმა დეპრესიით დაავადებულ ადამიანებს ახასიათებთ დათრგუნული გუნება-განწყობა უმეტეს დროს; ისინი შეადგენენ მოსახლეობის დაახლოებით 5%-ს.

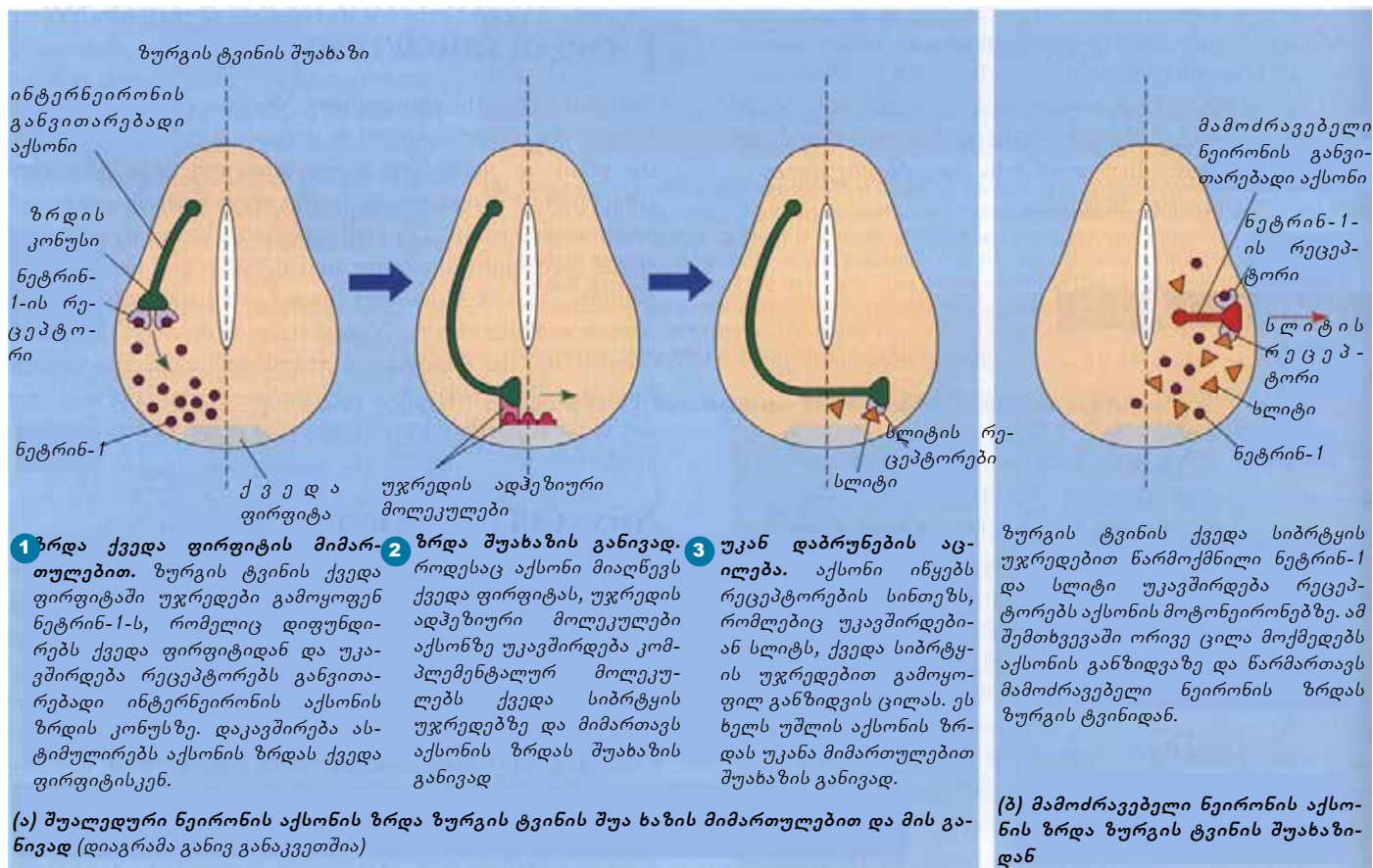
ბიპოლარული დარღვევების დროს, მანიაკალური ფაზისთვის დამახასიათებელია მაღალი თვითშეფასება, მოჭარბებული ენერგია, იდეების ნაკადი და ჭარბი ლაპარაკი, ასევე ქცევების ფორმები, რომლებსაც ხშირად მოაქვთ უბედურება, როგორიცაა ზედმეტი რისკიანობა, ალვირასნილობა და უპასუხისმგებლო ხარჯვა. ზოგიერთ ფორმებში ეს ფაზა ზოგჯერ უკავშირდება მაღალ შემოქმედებას და ზოგ კარგად ცნობილ მხატვარს, მუსიკოსს და მწერალს (მათგან სულ მცირეც რომ დავასახელოთ: კიტსი, ტოლსტოისი, ჰემინგუეისი და შუმანსი) ჰქონდათ ინტენსიურად ნაყოფიერი პერიოდები მანიაკალური ფაზის დროს. დეპრესიული ფაზისას ვლინდება სიამოვნების შეგრძნების დაქვეითებული უნარი, ინტერესის დაკარგვა, ძილის დარღვევები და უღირსობის/უსარგებლობის შეგრძნება. ბიპოლარული დარღვევით დაავადებული ზოგიერთი ადამიანი თვითმკვლელობასაც კი ცდილობს დეპრესიული ფაზის დროს. მიუხედავად ამისა, ზოგიერთი პაციენტი ამჯობინებს აიტანოს დეპრესიული ფაზის დროს ტკივილი, ვიდრე იმკურნალოს და დაკარგვის რისკის ქვეშ დააყენოს თავისი მანიაკალური ფაზისთვის დამახასიათებელი გაზრდილი შემოქმედებითი ნაყოფიერება.

როგორც ბიპოლარულ დარღვევას, ასევე ღრმა დეპრესიას აქვს გენეტიკური კომპონენტი, რადგან იდენტური ტყუპების დაახლოებით 50%-ს აქვთ შანსი, გაიზიარონ ეს მენტალური დაავადება. ისევე, როგორც შიზოფრენიის შემთხვევაში, ეს პროცენტი აჩვენებს, რომ აქაც არის მყარი გარემოს კომპონენტი და აღნიშნულია, რომ სტრესი, განსაკუთრებით მძიმე სტრესი ბავშვობაში, შესაძლოა იყოს მნიშვნელოვანი ფაქტორი.

დეპრესიის სამკურნალოდ გამოიყენება ზოგიერთი საშუალება, რომელიც გუნება-განწყობის გაუმჯობესებას იწვევს, თანმდევი ეფექტის სახით, ისეთი დაავადებების მკურნალობისას, როგორიცაა მაღალი არტერიული წნევა და ტუბერკულოზი. დეპრესიის საწინააღმდეგო ბევრი ეფექტური წამალი, მათ რიცხვში პროზაკი, ზრდის ბიოგენური ამინების აქტიურობას თავის ტვინში. სხვა განსხვავებული მკურნალობის – ელექტროკონვულსიური თერაპიის, ლითიუმის ადმინისტრაციის და საუბრებით თერაპიის მექანიზმები არ არის გასაგები.

## ალცჰაიმერის დაავადება

ალცჰაიმერის დაავადება (ად) არის გონებრივი გაუარესება ან დემენცია, რომელსაც ახასიათებს დაბნეულობა, მეხსიერების დაკარგვა და მთელი რიგი სხვა სიმპტომებისა. მისი გამოვლენა ასაკთან არის დაკავშირებული. – 65 წლის ასაკში დაახლოებით 10%-დან 85 წლის ასაკში 35%-მდე იზრდება. ამგვარად, თანამედროვე მედიცინა სიცოცხლის გახანგრძლივებით ზრდის ად პაციენტების პროპორციას მოსახლეობაში. დაავადება პროგრესირებადია, პაციენტებს თანდათანობით უქვეითდებათ ფუნქციონირების უნარი და საბოლოოდ ესაჭიროებათ სხვების დახმარებით ჩაცმა, დაბანა და კვება. აგრეთვე აღინიშნება პიროვნული ცვლილებები, რომლე-



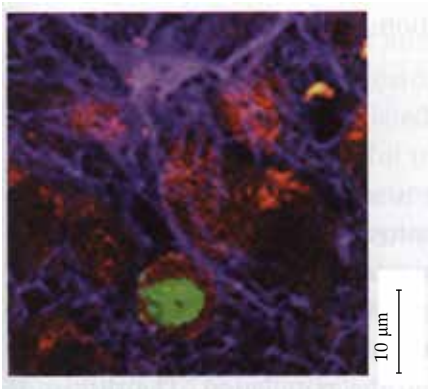
▲ **სურათი 48.33** მოლეკულური სიგნალები მართავენ განვითარებადი აქსონების ზრდას.

ბიც ყოველდღიურად უარესდება. პაციენტები ხშირად კარგავენ ადამიანების ცნობის უნარს, საკუთარი ოჯახის წევრების ჩათვლით, და მათ ეჭვით და მტრულად ექცევიან.

დღეისთვის ად-ის ზუსტი დიაგნოზის დასმა რთულია, სანამ პაციენტი ცოცხალია, რადგანაც ად დემენციის რამდენიმე ფორმიდან ერთ-ერთია. ამავე დროს, ად გამოწვეულია თავის ტვინში დამახასიათებელი პათოლოგიით: ნეირონები კვდება თავის ტვინის დიდ უბნებში, რაც იწვევს ტვინის ქსოვილის მასიურ შემჭიდროვებას. ასეთი შემჭიდროვება შესაძლებელია ნანახი იქნას ტვინის ტომოგრაფიით, მაგრამ ეს საკმარისი არ არის დარწმუნებით ად-ს იდენტიფიცირებისთვის. დიაგნოსტიკა ხდება სიკვდილის შემდეგ ორი თავისებურებით – ნეიროფიბრილების გროვებით და სენილური (ხანდაზმული) ბალთებით – დარჩენილი ტვინის ქსოვილში (სურათი 48.35). ნეიროფიბრილების გროვები დეგენერირებული ნეირონებისა და გლიის გამონაზარდების კონებია. სენილური ბალთა არის უხსნადი ცილის – β-ამილოიდის ერთობლიობა, რომელიც გამოიყოფა ნეირონში ჩვეულებრივ წარმოდგენილი მემბრანული ცილიდან. დაუნაწევრებელი ცილის როლი ცნობილი არ არის. მემბრანული ფერმენტები, რომლებსაც უწოდებენ სეკრეტაზებს, აკატალიზებენ გახლეჩას, რაც იწვევს β-ამილოიდის დაგროვებას ნეირონის გარეთ და მათ ავრგავციას ბალთების სახით. ბალთები,

როგორც ჩანს, განაპირობებენ გარემომცველი ნეირონების სიკვდილს.

უზარმაზარი ძალისხმევა მიეძღვნა ად-ს მკურნალობის განვითარებას. 2004 წელს მკვლევართა გუნდმა ჩრდილოდასავლეთ უნივერსიტეტში გამოიყენა გენური ინჟინერია ერთ-ერთი სეკრეტაზას მოცილებისთვის ად-სადმი მიდრეკილი თავგების საზში. გენეტიკურად შექმნილ თავგების საზში აკუმულირდებოდა გაცილებით ნაკლები β – ამილოიდი. მათ არ ახასიათებდათ ასაკთან დაკავშირებული მეხსიერების დეფიციტი, რაც ტიპური იყო ამ საზის თავგებისთვის. ადამიანებში ად-ის წარმატებული მკურნალობა დაფუძნებულია სენილური ბალთების ადრეულ გამოვლენაზე, რადგან ისინი ყალიბდებიან დაავადების სიმპტომების გამოჩენამდე. ერთი ნაბიჯი ამ მიმართულებით შესაძლოა იყოს ქიმიური ნივთიერება, ე.წ. პიტსტურგის ნაერთი – B (PIB), რომელიც სინთეზირებულ იქნა მეცნიერების მიერ 2004 წელს პიტსტურგის უნივერსიტეტში. მეცნიერებმა დაუკავშირეს PIB ხანმოკლე ნახევარდაშლის პერიოდის მქონე რადიოაქტიური იზოტოპს და იყენებდნენ PET სკანერს, რათა შესწავლათ ად პაციენტების თავის ტვინში PIB-ის გავრცელების კვალი. მათ აღმოაჩინეს, რომ PIB შერჩევითად აკუმულირდება თავის ტვინის იმ უბნებში, სადაც დიდი რაოდენობითაა დაგროვილი β-ამილოიდი. PIB შესაძლოა გამოსადეგი იყოს იმ



▲ სურათი 48.34 ზრდასრული ადამიანის პიპოკამპში ახლად წარმოქმნილი ნეირონი. LM-ში ყველა ნივთიელი უჯრედი ნეირონია. ნივთელ-მწვანე უჯრედი, რომელსაც შეყვანილი აქვს რდ, იმის მაჩვენებელია, რომ ის უჯრედის ახალი დაყოფის შედეგია.

წამლების ეფექტურობის დასადგენად, რომლებიც ამცირებენ  $\beta$ -ამილოიდის წარმოქმნის სიხარეს ან შლიან უკვე ფორმირებულ ბალთებს. რიგი ასეთი წამლებისა გამოიყენება კლინიკურ კვლევებში.

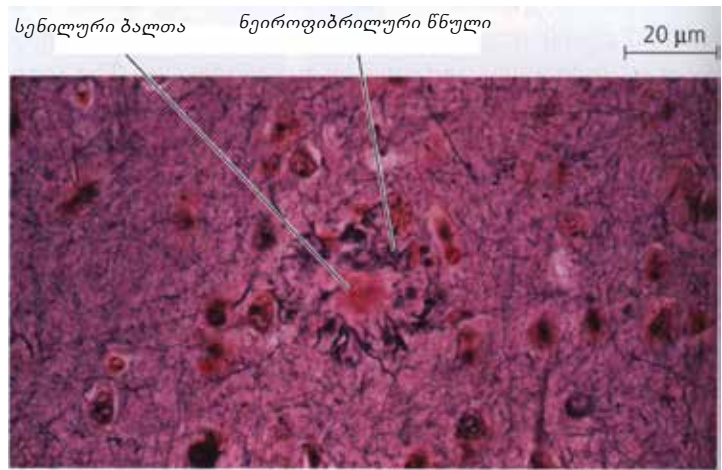
## პარკინსონის დაავადება

შეერთებული შტატებში დაახლოებით 1 მილიონი ადამიანი იტანჯება პარკინსონის დაავადებით, მოტორული დარღვევით, რომელსაც ახასიათებს მოძრაობების დაწყების გაძნელება, შენელებული მოძრაობა და რიგიდობა. პაციენტებს ხშირად თითქოს ნიღაბია აქვთ სახეზე, ახასიათებთ კუნთების ტრემორი, წონასწორობის დარღვევა, პოზის შენარჩუნების გაძნელება და ლასლასით სიარული. ალცჰაიმერის დაავადების მსგავსად, პარკინსონის დაავადებაც არის ტვინის პროგრესირებადი დაავადება, რომლის გამოვლენის რისკიც იზრდება ასაკის მატებასთან ერთად. პარკინსონის დაავადება ვლინდება შემდეგი სიხშირით: დაახლოებით 1% 65 წლის ასაკში და დახლოებით 5% 85 წლის ასაკში.

პარკინსონის დაავადების სიმპტომები გამოწვეულია შუა ტვინის ბირთვის, ე.წ. შავ სუბსტანციის (სუბსტანტია ნიგრა) ნეირონების კვლდომით. ეს ნეირონები ნორმალში გამოანთავისუფლებენ დოფამინს მათი სინაფსური ტერმინალებიდან ბაზალურ განგლიებში. დოფამინური ნეირონების დეგენერაცია დაკავშირებულია დაგროვილი ცილების აგრეგატთან, რომელიც შეიცავს სინუკლეინს, იგი ჩვეულებრივ პრესინაფსურ ნერვულ ტერმინალში გვხვდება.

პარკინსონის დაავადების უმეტეს შემთხვევებში ვერ ხერხდება მიზეზის ზუსტად იდენტიფიცირება. თუმცა ამ დაავადების შემსწავლელი მეცნიერები მივიდნენ კონსენსუსამდე, რომ ის არის გარემო და გენეტიკური ფაქტორების კომბინაციის შედეგი. მაგალითად, ზოგიერთ ოჯახს პარკინსონის დაავადების ხშირი გამოვლენით აქვს  $\alpha$ -სინუკლეინის გენის მუტაცია. ერთ-ერთი პიპოთეზის თანახმად,  $\alpha$ -სინუკლეინის სტრუქტურის ცვლილებები იწვევს შავი სუბსტანციის დოფამინური ნეირონების მგრძნობელობის გაზრდას უჯრედის ოქსიდაციური დაზიანებისადმი.

დღეისთვის არ არსებობს პარკინსონის დაავადების მკურნალობის საშუალება, თუმცა მისი სიმპტომების სამართავად სხვადასხვა მიდგომა გამოიყენება: თავის ტვინში ქირურგიული ჩარე-



▲ სურათი 48.35 ალცჰაიმერის დაავადების მიკროსკოპული ნიშნები. ად-ის ნიშნები თავის ტვინის ქსოვილში გვევლინება  $\beta$ -ამილოიდის (LM) სენილური (ხანდაზმულობის) ბალთებით გარშემორტყმული ნეოფიბრილური წნულების სახით.

ვა, ტვინის ღრმა სტიმულაცია და წამლები, როგორიცაა L-დოფა – დოფამინის პრეკურსორი, რომელიც გადის ჰემატო-ენცეფალურ ბარიერს. მკურნალობის ერთ-ერთი პოტენციური საშუალება არის დოფამინის გამომყოფი ნეირონების გადანერგვა შავ სუბსტანციაში ან ბაზალურ განგლიაში. შესაძლოა ემბრიონული ღეროვანი უჯრედების სტიმულაციით ან გენური ინჟინერიით მათგან დოფამინ-გამომყოფი ნეირონების განვითარება. შემდგომში ამ უჯრედების ტრანსპლანტაცია ისეთ ვირთგავებში, რომლებსაც ექსპერიმენტულად აქვთ გამოწვეული პარკინსონის დაავადების მსგავსი მდგომარეობა, რაც განაპირობებს მოტორული კონტროლის აღდგენას. ტვინის კვლევის თანამედროვე ეტაპზე ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საკითხია, რამდენად იმუშავებს ამ სახის რეგენერაციული მედიცინა ადამიანებზეც.

## შენიშვნები 48.7

1. 48.33-ე სურათის მიხედვით, რა ეფექტი შეიძლება ჰქონდეს ზურგის ტვინის ინტერნეირონებში Netrin-1 რეცეპტორების არსებობის ხელშემშლელ მუტაციას? რა შედეგი შეიძლება მოჰყვეს ინტერნეირონებში Slit რეცეპტორების ნაკლებობას?
2. რა მონაცემი გვიჩვენებს, რომ შიზოფრენიას, ბიპოლარულ დარღვევას და ღრმა დეპრესიას აქვს როგორც გენეტიკური, ისე გარემოს კომპონენტები?
3. რა მსგავსებაა ალცჰაიმერისა და პარკინსონის დაავადებებს შორის?

## ბიბლიური კანონების შემოქმედება

### კანონები 48.1

#### ნაწილი სისტემა ნიჭების წარმოებისა და დამზადების უზრუნველყოფის შესახებ

- ▶ **ნერვული სისტემის ორგანიზაცია.** უზრუნველყოფს ნერვული სისტემის სირთულის მიხედვით იცვლება მარტივი ნერვული ქსელებიდან მაღალ ცენტრალიზებულ ნერვულ სისტემამდე ჩამოყალიბებული თავის ტვინით და ვენტრალური ნერვული ქორდით. ხერხემლიანებში ცენტრალური ნერვული სისტემა (ცნს) შედგება თავისა და ზურგის ტვინისგან, რომელიც მდებარეობს დორსალურად.
- ▶ **ინფორმაციის დამუშავება.** ნერვული სისტემა ინფორმაციას ამუშავებს სამ ეტაპად: სენსორული შესავალი, ინტეგრაცია და მამოძრავებელი გამოსავალი ეფექტორულ უჯრედებთან. ცნს აინტეგრირებს ინფორმაციას, ხოლო პერიფერიული ნერვული სისტემა (პნს) გადასცემს სენსორულ და მოტორულ სიგნალებს ცნს-სა და დანარჩენ სხეულს შორის. მუხლის მოხრის რეფლექსში ილუსტრირებულია სამივე ეტაპი.
- ▶ **ნეირონის სტრუქტურა.** ნეირონების უმრავლესობას აქვს მრავლად დატოტვილი დენდრიტები, რომლებიც იღებენ სიგნალებს სხვა ნეირონებისგან. ასევე მათ ჩვეულებრივ აქვთ ერთი აქსონი, რომელიც სხვა უჯრედებს სიგნალებს სინაფსში გადასცემს. ნეირონებს აქვთ ფორმის ფართო ვარიაციები, რაც არეკლავს მათ შესავალ და გამოსავალ ურთიერთქმედებას.
- ▶ **დამხმარე უჯრედები (გლია).** გლია ასრულებს რიგ ფუნქციას, რომელშიც ჩართულია ნეირონებისთვის სტრუქტურული საყრდენის უზრუნველყოფა, გარკვეული ნივთიერებების უჯრედგარე კონცენტრაციების რეგულაცია, განვითარებადი ნეირონების მიგრაციის მართვა და მიელინის ფორმირება, რომელიც განაპირობებს აქსონების ელექტრულ იზოლაციას.

### კანონები 48.2

#### იონური ცვლადები და იონური ატმოსფეროს მისაღწევის პოტენციალის ინაქტივაცია

- ▶ თითოეულ უჯრედს გააჩნია პოტენციალი სხვაობა (ვოლ-

ტაჟი) თავისი პლაზმური მემბრანის გარეთა და შიგნითა ზედაპირებს შორის და მას მემბრანულ პოტენციალს უწოდებენ. უჯრედის შიგნითა მხარე არის უარყოფითი, გარეთა მხრის მიმართ.

- ▶ **მოსვენების პოტენციალი.** მემბრანული პოტენციალი დამოკიდებულია იონურ გრადიენტებზე პლაზმური მემბრანის განივად:  $\text{Na}^+$ -ის კონცენტრაცია არის უფრო მაღალი უჯრედგარე სითხეში, ვიდრე ციტოზოლში, მაშინ, როდესაც  $\text{K}^+$ -ის იონებისთვის არის დამახასიათებელი სანინალ-მდეგო. ნეირონი, რომელიც არ გადასცემს სიგნალს, თავის მემბრანულ პლაზმაში შეიცავს მრავალ ღია  $\text{K}^+$ -ის არხს, და რამდენიმე ღია  $\text{Na}^+$ -ის არხს.  $\text{K}^+$ -ისა და  $\text{Na}^+$ -ის დიფუზია ამ არხებში იწვევს მუხტის სეპარაციას მემბრანის განივად, მოსვენების პოტენციალის წარმოქმნით.
- ▶ **დაჭიმული იონური არხები.** დაჭიმული იონური არხები იხსნება ან იხურება მემბრანის დაჭიმვის, სპეციფიკური ლიგანდების მიერთების, ან მემბრანული პოტენციალის ცვლილების საპასუხოდ.

### კანონები 48.3

#### მოქმედების პოტენციალები აქსონით გატარებული სიგნალები

- ▶ მემბრანული პოტენციალის ამპლიტუდის გაზრდას უწოდებენ ჰიპერპოლარიზაციას, შემცირებას – დეპოლარიზაციას. მემბრანული პოტენციალის ცვლილება, რომელიც ვარირებს სტიმულის ძალაზე დამოკიდებულებით, ცნობილია როგორც გრადუირებული პოტენციალი.
- ▶ **მოქმედების პოტენციალების წარმოქმნა.** მოქმედების პოტენციალი არის ნეირონის პლაზმური მემბრანის ხანმოკლე, „სულ ან არაფრის კანონი“ დეპოლარიზაცია. როდესაც გრადუირებული დეპოლარიზაცია მიიყვანს მემბრანულ პოტენციალს ზღურბლამდე, მრავალი ვოლტაჟ-დაჭიმული  $\text{Na}^+$ -ის არხი იხსნება, წარმოქმნის  $\text{Na}^+$ -ის ნაკადს, რომელსაც სწრაფად მიჰყავს მემბრანული პოტენციალი პოზიტიურ სიდიდემდე. მემბრანული პოტენციალი აღადგენს თავის ჩვეულ მოსვენებულ სიდიდეს,  $\text{Na}^+$ -ის არხების ინაქტივაციით და მრავალი ვოლტაჟ-დაჭიმული  $\text{K}^+$ -ის არხების გახსნით, რომლებიც ზრდიან  $\text{K}^+$ -ის გამოსვლას. აქტიურ პოტენციალს მოსდევს რეფრაქტორული პერიოდი, რომელიც შეესაბამება  $\text{Na}^+$ -ის არხების ინაქტივაციის ინტერვალს.
- ▶ **მოქმედების პოტენციალების გავრცელება.** მოქმედების პოტენციალი აქსონის ბორცვიდან სინაფსურ ტერმინალისკენ აქსონის გასწვრივ თვითრეგენერაციით გადაადგილ-

დება. მოქმედების პოტენციალის გავრცელების სიჩქარე იზრდება აქსონის დიამეტრის გაზრდასთან ერთად და მრავალი ხერხემლიანის აქსონში — მიელინიზაციით. აქტიური პოტენციალები მიელინიზირებულ აქსონებში ერთი რანვიეს შევიწროვებიდან გადახტებიან მეორე სივიწროვებში და ამ პროცესს სალტატორულ გავრცელებას უწოდებენ.

## ▶ ჯანცოფცია 48.4

### ნეიტონები სხვა უჯრედებთან სინაფსების მოშეყოლბით უბთიუბბთბზ

- ▶ ელექტრულ სინაფსში, ელექტრული დენი პირდაპირ მიედინება ერთი უჯრედიდან მეორეში დამაკავშირებელი ნაპრალბთ. ქიმიურ სინაფსებში სინაფსური ტერმინალის დეპოლარიზაცია იწვევს სინაფსური ვეზიკულების მიმადგრებას ტერმინალურ მემბრანასთან და ნეიროტრანსმიტერის გამოყოფას სინაფსურ ნაპრალბში.
- ▶ პირდაპირი სინაფსური გადაცემა. ნეიროტრანსმიტერის დაკავშირება პოსტსინაფსურ მემბრანაში ლიგანდ-დაჭიშკრულ იონის არხებთან ნარმოქმნის ამაგზნებელ ან შემაკავებელ პოსტსინაფსურ პოტენციალს (აბსპ ან შპსპ). გამოყოფილი ნეიროტრანსმიტერი დიფუნდირებს სინაფსური ნაპრალბის გარეთ, შთაინთქმება გარემომცველი უჯრედებით ან იშლება ფერმენტებით. ცალკეულ ნეირონს აქვს მრავალი სინაფსი თავის დენდრიტებზე და უჯრედის სხეულზე. მოქმედების პოტენციალის გენერაცია დამოკიდებულია აქსონის ბორცვზე აბსპ-სა და შპსპ-ს როგორც დროის, ასევე სივრცით სუმაციაცზე.
- ▶ არაპირდაპირი სინაფსური გადაცემა. ნეიროტრანსმიტერის დაკავშირება ზოგიერთ რეცეპტორთან ააქტივებს სიგნალის გადამცემ გზას, რომელიც პოსტსინაფსურ უჯრედში ნელა განვითარებად, მაგრამ ხანგრძლივ ეფექტს ნარმოქმნის.
- ▶ ნეიროტრანსმიტერები. ერთ ნეიროტრანსმიტერს შეუძლია განსხვავებული ეფექტი მოახდინოს სხვადასხვა ტიპის უჯრედზე. მთავარი ცნობილი ნეიროტრანსმიტერებია: აცეტილქოლინი, ბიოგენური ამინები (ეპინეფრინი, ნორეპინეფრინი, დოფამინი და სეროტონინი), სხვადასხვა ამინომჟავა და პეპტიდი, აზოტის ოქსიდის და ნახშირბადის მონოოქსიდის აირები.

## ▶ ჯანცოფცია 48.5

### სერხემლიანთა ნერვული სისტემა ზონებად აბის სპეციალიზებული

- ▶ პერიფერიული ნერვული სისტემა. პნს შედგება დანეცილებული ქალასა და ზურგის ტვინის ნერვებისგან და ასოცირებული განგლიებისგან. ფუნქციურად, პნს დაყოფილია

ფილია სომატურ ნერვულ სისტემად, რომელიც ატარებს სიგნალებს ჩონჩხის კუნთებთან და ავტონომიურ ნერვულ სისტემად, რომელიც არეგულირებს უმთავრესად გლუვი და კარდიალური კუნთების ავტომატურ, ვისცერალურ ფუნქციებს. ავტონომურ ნერვულ სისტემას აქვს სამი განყოფილება: სიმპატიკური და პარასიმპატიკური განყოფილებები, რომლებიც ჩვეულებრივ ანტაგონისტურ გავლენას ახდენენ სამიზნე ორგანოებზე და ენტერული განყოფილება, რომელიც აკონტროლებს საჭლის მომწელებელი ტრაქტის, პანკრეასის და ნაღვლის ბუშტის აქტივობას.

- ▶ თავის ტვინის ემბრიონული განვითარება. ხერხემლიანების თავის ტვინი ვითარდება სამი ემბრიონული ზონიდან: წინა ტვინის, შუა ტვინის და უკანა ტვინის. ადამიანებში, წინა ტვინის ნაწილი ძალიან ინტენსიურად იზრდება და დასაბამს აძლევს დიდი ტვინს.
- ▶ ტვინის ღერო. მოგრძო ტვინი, ხიდი და შუა ტვინი ქმნიან თავის ტვინის ღეროს, რომელიც აკონტროლებს ისეთ ჰომეოსტაზურ ფუნქციებს, როგორიცაა სუნთქვის სიხშირე, სენსორული და მოტორული სიგნალების გატარება ზურგის ტვინისა და თავის ტვინის უმაღლეს ცენტრებს შორის, და არეგულირებს ერაუზალსა და ძილს.
- ▶ ნათხემი. ნათხემი ხელს უწყობს მოტორული, აღქმის (პერცეპტუალური) და შემეცნებითი (კოგნიტური) ფუნქციების კოორდინირებას. ის აგრეთვე ჩართულია მოტორული ჩვევების დასწავლასა და გახსენებაში.
- ▶ შუამდებარე ტვინი. თალამუსი არის მთავარი ცენტრი, რომლის საშუალებითაც სენსორული და მოტორული ინფორმაცია დიდი ტვინის ნახევარსფეროებში შედის და გამოდის. ჰიპოთალამუსი არეგულირებს ჰომეოსტაზს; ფუნდამენტურ სასიცოცხლო ქცევებს, როგორიცაა კვებითი, თავდასხმის, განრიდების და რეპროდუქციული; და ცირკადულ რიტმებს.
- ▶ დიდი ტვინი. დიდ ტვინს აქვს ორი ნახევარსფერო, თითოეული შეიცავს დიდი ტვინის ქერქს, რომელიც მდებარეობს თეთრი ნივთიერებისა და ბაზალური განგლიების ზემოთ. იგი მნიშვნელოვანია მოძრაობების დაგეგმვაში და დასწავლაში. ძუძუმწოვრებში, დიდი ტვინის ქერქს აქვს დანაოჭებული ზედაპირი, რომელსაც ეწოდება ახალი ქერქი. აქსონების სქელი კონა — კორძიანი სხეული, უზრუნველყოფს ურთიერთკავშირს მარჯვენა და მარცხენა დიდი ტვინის ქერქს შორის.

## ▶ ჯანცოფცია 48.6

### დიდი ტვინის ძირძი ნებბთ მოძბათბებსა და კოგნიტუბ ფუნქციებს აკონტბლოებს

- ▶ ცერებრული ქერქის თითოეულ მხარეს აქვს ოთხი წილი — შუბლის, საფეთქლის, კეფისა და თხემის – თითოეული შეიცავს პირველად სენსორულ და ასოციაციურ ზონებს.
- ▶ ინფორმაციის დამუშავება ცერებრულ ქერქში. სენსო-

რული შესავლის სპეციფიკური ტიპები შედიან პირველად სენსორულ ზონებში. მიმდებარე ასოციაციური ზონები ამუშავებენ განსაკუთრებულ თავისებურებებს სენსორულ შესავალში და ახდენენ სხვადასხვა სენსორული ზონიდან ინფორმაციის ინტეგრაციას. სომატოსენსორულ და მოტორულ ქერქში, ნეირონები გავრცელებულია შესაბამისად სხეულის ნაწილებისა, რომლებიც გენერირებენ სენსორულ შესავალს ან ღებულობენ მოტორულ ბრძანებებს.

- ▶ **ქერქული ფუნქციების ლატერალიზაცია.** მარცხენა ნახევარსფერო სპეციალიზებულია მაღალი სისწრაფის მიმდევრობითი ინფორმაციის დამუშავებაში, განსაკუთრებით მეტყველებისა და ლოგიკურ მოქმედებაში. მარჯვენა ჰემისფერო უფრო ძლიერია პატერნის გაცნობიერებაში, არავერბალურ წარმოსახვაში და ემოციურ პროცესირებაში.
- ▶ **ენა და მეტყველება.** შუბლის და საფეთქლის წილების ნაწილები, ბროკას და ვერნიკეს ველის ჩათვლით, მნიშვნელოვანია მეტყველების გენერაციასა და გაგებაში.
- ▶ **ემოციები.** ლიმბური სისტემა, ქერქული და არაქერქული ცენტრების წრე თავის ტვინის ღეროს გარშემო, შუამავლობს პირველად ემოციებთან და უკავშირებს ემოციურ „შეგრძნებებს“ სასიცოცხლო მნიშვნელობის ფუნქციებს. პირველადი ემოციების ასოცირება სხვადასხვა სიტუაციასთან ადამიანის განვითარების პერიოდში საჭიროებს ახალი ქერქის ნაწილებს, განსაკუთრებით პრეფრონტალურ ქერქს.
- ▶ **მეხსიერება და დასწავლა.** შუბლის წილები ხანმოკლე მეხსიერების ადგილებია და შეუძლიათ ურთიერთქმედება პიპოკამპთან და ამიგდალასთან ხანგრძლივ მეხსიერებად კონსოლიდაციის პროცესში. ექსპერიმენტებმა უხერხემლოებზე და ხერხემლიანებზე აღმოაჩინეს ზოგიერთი მარტივი ფორმის დასწავლის უჯრედული საფუძვლები, სენსიტიზაციისა და ხანგრძლივი პოტენციალის ჩართვით.
- ▶ **ცნობიერება.** თანამედროვე ტვინის ამსახველი მეთოდებით მიღებული შედეგები ვარაუდობენ, რომ ცნობიერება არის თავის ტვინის ემერგენტული თავისებურება, დაფუძნებული ქერქის მრავალი უბნის აქტივობაზე.

## კანცეფცია **48.7**

### ცნს-ის დაზიანებები და დაავადებები ინცენსიუტი კვლევის საგანია

- ▶ **ნერვული უჯრედების განვითარება.** სასიგნალო მოლეკულები მართავენ აქსონის ზრდას, ზრდის კონუსის პლაზმური მემბრანის რეცეპტორებთან დაკავშირებით. უხერხემლოებსა და ხერხემლიანებში აქსონის მართვაში ჩართული გენები და ბაზური მოვლენები მსგავსია. ამ მოვლენების ცოდნა შესაძლებელია მომავალში გამოყენებული იყოს აქსონური ზრდის განახლების სტიმულირებისათვის ცნს-ის დაზიანების შემდეგ.

- ▶ **ღეროს ნეირონული უჯრედები.** ზრდასრული ადამიანის თავის ტვინი შეიცავს ღეროვან უჯრედებს, რომლებიც შეიძლება დიფერენცირდეს მომწიფებულ ნეირონებად. ღეროვანი უჯრედების დიფერენციაციის ინდუქცია და კულტივირებული ღეროვანი უჯრედების ტრანსპლანტაცია პოტენციური მეთოდებია ტრავმით ან დაავადებით გამოწვეული დაკარგული ნეირონების შესაცვლელად.
- ▶ **ნერვული სისტემის დაავადებები და დაზიანებები.** შიზოფრენია ხასიათდება ჰალუცინაციებით, მცდარი ილუზიებით, დაჩლუნგებული ემოციებით და სხვა სიპტომებით. დეპრესია შეიცავს ბიპოლარულ დარღვევას, დამახასიათებელი მანიაკალური (ამაღლებული გუნება-განწყობა) და დეპრესიული (დაბალი გუნება-განწყობა) ფაზებით და ღრმა დეპრესია, როდესაც პაციენტებს მუდმივად დაბალი გუნება-განწყობა აქვთ. ალცჰაიმერის დაავადება არის ასაკთან დაკავშირებული დემენცია, როდესაც თავის ტვინში ფორმირდება ნეიროფიბრილური ხლართები და სენილური (სიბერის) ბალთები. პარკინსონის დაავადება არის მოტორული დარღვევა გამოწვეული დოფამინის გამომყოფი უჯრედების სიკვდილით შავ სუბსტანციაში.

## შეამოწმეთ საკუთარი ცოდნა

### თვითშეფასება

1. რა ხდება, როდესაც ნეირონის მემბრანა დეპოლარიზებულია?
  - ა.  $\text{Na}^+$ -ის დიფუზია უჯრედის გარეთ;
  - ბ. ნონასწორობის პოტენციალი  $\text{K}^+$  ( $\text{E}_\text{K}$ )-სთვის ხდება უფრო პოზიტიური;
  - გ. ნეირონის მემბრანული პოტენციალის ამპლიტუდა არის რედუცირებული;
  - დ. ნაკლებად სავარაუდოა, რომ ნეირონი მოახდენს მოქმედების პოტენციალის გენერირებას;
  - ე. უჯრედშიდა არე ხდება უფრო უარყოფითი უჯრედგარე არის მიმართ.
2. რატომ ვრცელდება მოქმედების პოტენციალი აქსონის გასწვრივ მხოლოდ ერთი მიმართულებით?
  - ა. რანვიეს შევიწროვებას შეუძლია პოტენციალის გავრცელება მხოლოდ ერთი მიმართულებით;
  - ბ. ხანმოკლე რეფრაქტორული პერიოდი ხელს უშლის პოტენციალ-მგრძნობიარე  $\text{Na}^+$ -ის არხების კვლავ გახსნას;
  - გ. აქსონის ბორცვს აქვს უფრო მაღალი მემბრანული პოტენციალი ვიდრე აქსონის დაბოლოებას;
  - დ. იონებს შეუძლიათ იმოძრაონ აქსონის გასწვრივ მხოლოდ ერთი მიმართულებით;
  - ე. როგორც  $\text{Na}^+$ -ის, ასევე  $\text{K}^+$ -ის პოტენციალ-მგრძნობიარე არხები იხსნება მხოლოდ ერთი მიმართულებით.

3. მემბრანული პოტენციალების ზოგად თვისებაა, რომ ისინი:
  - ა. იწვევენ მემბრანის ჰიპერპოლარიზაციას და შემდეგ დეპოლარიზაციას.
  - ბ. შეუძლიათ დაექვემდებარონ დროის და სივრცით სუ-მაციას;
  - გ. გამოიწვევიან დეპოლარიზაციით, რომელიც აღწევს ზღურბლს;
  - დ. ყველა აქსონის გასწვრივ ერთნაირი სიჩქარით მოძრაობენ.
  - ე. ლიგანდ-დაჭიშკრულ არხებში  $\text{Na}^+$ -ისა და  $\text{K}^+$ -ის დიფუზიის შედეგს წარმოადგენენ.
4. ჩამოთვლილიდან, რომელია აქსონური ტერმინალის პრესინაფსური მემბრანის დეპოლარიზაციის პირდაპირი შედეგი?
  - ა. მემბრანაში გახსნილი პოტენციალ-მგრძნობიარე  $\text{Ca}^{+2}$ -ის არხები;
  - ბ. სინაფსური ვეზიკულების შერწყმა მემბრანასთან;
  - გ. პოსტსინაფსური უჯრედი წარმოქმნის მოქმედების პოტენციალს;
  - დ. ლიგანდ-დაჭიშკრული არხების გახსნა განაპირობებს სინაფსურ ნაპრალში ნეიროტრანსმიტერის შესვლას;
  - ე. აპსპ ან შპსპ გენერირდება პოსტსინაფსურ უჯრედში.
5. სად მდებარეობს ნეიროტრანსმიტერის რეცეპტორები?
  - ა. ბირთვის მემბრანაზე;
  - ბ. რანვიეს შევინოვებაში;
  - გ. პოსტსინაფსურ მემბრანაზე;
  - დ. სინაფსური ვეზიკულების მემბრანაზე;
  - ე. მიელების გარსში.
6. ჩამოთვლილი სტრუქტურებიდან ან უბნებიდან, რომელია შეცდომით დაწყვილებული თავის ფუნქციასთან?
  - ა. ლიმბური სისტემა — მეტყველების მამოძრავებელი კონტროლი;
  - ბ. მოგრძო ტვინი — ჰომეოსტაზური კონტროლი;
  - გ. ნათხემი — მოძრაობისა და წონასწორობის კოორდინაცია;
  - დ. კორძიანი სხეული — კავშირი დიდი ტვინის მარცხენა და მარჯვენა ქერქს შორის;
  - ე. ჰიპოთალამუსი — ტემპერატურის, შიმშილისა და წყურვილის რეგულაცია.
7. რა არის ახალი ქერქი (ნეოკორტექსი)
  - ა. თავის ტვინის ჩანასახოვანი უბანი, რომელიც საერთოა რეპტილიებსა და ძუძუმწოვრებში.
  - ბ. უბანი ქერქის სიღრმეში, რომელიც დაკავშირებულია ემოციური მესხიერების ფორმირებასთან;
  - გ. ქერქის ცენტრალური უბანი, რომელიც იღებს ყნოსვით ინფორმაციას;
  - დ. თავის ტვინის ქერქის ნეირონების დამატებითი გარე შრე, რომელიც მხოლოდ ძუძუმწოვრებშია;
  - ე. მუბლის წილის ასოციაციური უბანი, რომელიც ჩართულია უმაღლეს კოგნიტურ ფუნქციებში.
8. ჩამოთვლილიდან, რომელი ადასტურებს იმ ფაქტს, რომ ემოციებში ჩართული თავის ტვინის წრეები ადამიანის განვითარების ადრეულ ეტაპზე ყალიბდება?
  - ა. უფრო სავარაუდოა, რომ ადამიანს შეუძლია ბავშვობის ასაკის ემოციური მესხიერების გამოწვევა, ვიდრე რეალურად არსებული;
  - ბ. ბავშვები (ინფანტები) უფრო ადრე იგებენ ენას, ვიდრე იწყებენ მეტყველებას;
  - ც. ასეთი წრეები მოიცავს თავის ტვინის უბნებს, რომელიც ვითარდება ნეოკორტექსის განვითარებამდე;
  - დ. ჩვილ ბავშვებს შეუძლიათ მიეჯახვიონ მომვლელებს და გამოხატონ შიში, მწუხარება და გაბრაზება;
  - ე. ამიგდალა-დაზიანებულ ინდივიდებს, გახანგრძლივებული ავტონომური პასუხები სტრესულ სტიმულზე არა აქვთ.
9. ქვემოჩამოთვლილიდან, რომელი ასახავს უკეთესად, როგორ იზრდება აქსონი თავის სამიზნე უჯრედის მიმართულებით?
  - ა. აქსონი იზრდება პირდაპირი გზით, სამიზნე უჯრედების მიერ გამოყოფილი სასიგნალო მოლეკულების მიზიდვით;
  - ბ. უჯრედები გამოყოფენ სასიგნალო მოლეკულებს აქსონის ზრდის გზის გასწვრივ, რომლებიც აქსონს ან მიიზიდავენ ან განიზიდავენ და CAM-ის ურთიერთქმედებამ ზრდის კონუსზე და მომიჯნავე უჯრედებთან შეიძლება განაპირობოს ტრეკები, რომლებიც წარმართავენ აქსონის ზრდას;
  - გ. ასტროციტით გამოყოფილი ნერვის ზრდის ფაქტორი ასტიმულირებს ნეირონის პროგენიტორული უჯრედის დიფერენცირებას ნეირონად, რომლის აქსონი შემდგომ იზრდება სასიგნალო მოლეკულების გაზრდილი კონცენტრაციის მიმართულებით.
  - დ. აქსონი წარმოქმნის ზრდის განმაპირობებელ ცილებს მხოლოდ თავის ზრდის კონუსში, რომელიც იწვევს აქსონის ზრდას თავის სამიზნე უჯრედისკენ.
  - ე. გლია პირველად მიემართება სამიზნე უჯრედებისკენ, ტოვებს CAM-ის კვალს გზის გასწვრივ, რაც ზრდის მომდევნო აქსონის კონუსს.
10. რომელი დაავადება ან დარღვევა გამოიწვევა თავის ტვინის დოფამინის გამომყოფი ნეირონების სიკვდილით?
  - ა. შიზოფრენია
  - ბ. ბიპოლარული დარღვევა;
  - გ. დიდი დეპრესია;
  - დ. ალცჰაიმერის დაავადება;
  - ე. პარკინსონის დაავადება.

## უძალუციათი კავშირი

მოქმედების პოტენციალი არის „სულ ან არაფრის კანონის“ მოვლენა. მისი ჩართვა-გამორთვის სიგნალიზაცია არის ცხოველების ევოლუციური ადაპტაცია, რომელიც შეი-

გრძნობს და მოქმედებს რთულ გარემოში. შეგიძლიათ წარმოიდგინოთ ნერვული სისტემა, რომელშიც მოქმედების პოტენციური გრადუირებს, ამპლიტუდის დამოკიდებულებით სტიმულის ზომებზე. რამ შეიძლება შეუწყოს ხელი სიგნალიზაციის ჩართვა/გამორთვას სიგნალიზაციის მუდმივი ცვალეზადობის დროს?

### მეცნიერული კვლევა

იქიდან, რაც იცით მოქმედების პოტენციულებსა და სინაფსების შესახებ, მოგვანოდეთ ორი ან სამი ჰიპოთეზა, როგორ შეუძლია სხვადასხვა ანესთეტიკის ააცილოს ტკივილი.

### მეცნიერება, ფიქნდოღია და საზოგადოება

ალკოჰოლის დეპრესიულმა ეფექტმა ნერვულ სისტემაზე შეიძლება გამოიწვიოს გონების დაბინდება და რეფლექსების შენელება. ალკოჰოლის მოხმარება მრავალი ფატალური საგზაო შემთხვევების ფაქტორია აშშ-ში. რა არის ალკოჰოლის ბოროტად გამოყენების ზოგიერთი სხვა გავლენა საზოგადოებაზე? როგორია ადამიანების ან საზოგადოების ზოგიერთი პასუხი ალკოჰოლის ბოროტად გამოყენებაზე? თქვენი აზრით, ალკოჰოლის ბოროტად გამოყენება არის მთავარი ინდივიდუალური თუ სოციალური პრობლემა? როგორ გგონიათ, საზოგადოების პასუხი ალკოჰოლის ბოროტად გამოყენების მიმართ ადეკვატური და პროპორციულია პრობლემის სერიოზულობის მიმართ? დაიცავით თქვენი პოზიცია.



სურათი 49.1 ღამურა იყენებს სონარს მისი მსხვერპლის ადგილსამოფელის განსაზღვრისთვის.

### ბიოთაღი პონცეფიები

- 49.1** სენსორული რეცეპტორები გარდაქმნიან სტიმულის ენერგიას და აგზავნიან სიგნალებს ცენტრალური ნერვული სისტემაში.
- 49.2** სმენასა და წონასწორობაში მონაწილე მექანორეცეპტორები რეაგირებენ ნაწილაკების წონაზე და სითხის მოძრაობაზე.
- 49.3** ყნოსვისა და გემოვნების შეგრძნებები ცხოველთა უმეტესობაში მჭიდროდაა დაკავშირებული.
- 49.4** ცხოველთა სამყაროში მხედველობას მსგავსი მექანიზმები განსაზღვრავენ.
- 49.5** ცხოველთა ჩონჩხის ასრულებს საყრდენ, დამცველობით და მოძრაობით ფუნქციებს.
- 49.6** კუნთები ჩონჩხის ნაწილებს შეკუმშვის შედეგად ამოძრავებენ.
- 49.7** ლოკომოცია მოითხოვს ენერგიას ხახუნისა და გრავიტაციის დასაძლევად.

### ზოგადი მიმოხილვა

## შეგრძნება და მოქმედება

მ

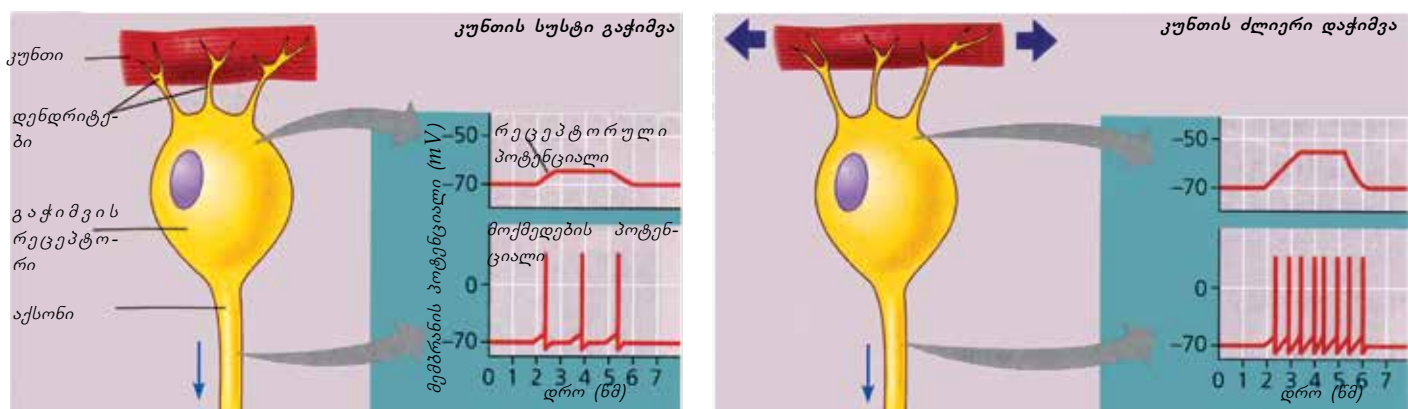
ამრი ჩრჩილის ანტენა ბინდში ქარის საწინააღმდეგოდ ამჩნევს მდედრი პეპლის მიმზიდველ ქიმიურ ნივთიერებას (ქემოატრაქტანტს). მამრი ჰაერში არსებულ სუნს მიყვება მდედრისკენ. მაგრამ, უცებ მამრი ჩრჩილის მუცელზე არსებული ვიბრატორული სენსორები ამჩნევენ მათკენ სწრაფად მომავალი ღამურას მიერ წარმოქმნილ ულტრაბერით შიშინს. ღამურას ლოკატორი (სონარი) საშუალებას აძლევს განსაზღვროს ჩრჩილისა თუ სხვა მისი სამსხვერპლო მწერის მდებარეობა. ამის საპასუხოდ, ჩრჩილის ნერვული სისტემა ჩართავს მისი ფრთების კუნთებისკენ მიმავალ მოტორულ სიგნალებს და მწერი დახრილად და სპირალურად მიწისკენ მიემართება. თუმცა ეს ალბათ სურათი 49.1-ზე ნაჩვენები ჩრჩილისთვის უკვე საკმაოდ გვიანია, ბევრ შემთხვევაში ჩრჩილები გადარჩენას ახერხებენ, რამდენადაც მათ შესწევთ უნარი ღამურას სონარი

30 მ-ის მანძილზე დააფიქსირონ. ღამურამ რომ ჩრჩილი შეამჩნიოს, მისგან 3 მ-ის დაშორებით უნდა იმყოფებოდეს, მაგრამ გამომდინარე იქედან, რომ ღამურა უფრო სწრაფად დაფრინავს, მას შესაძლოა მაინც ჰქონდეს დრო, რათა დააფიქსიროს და დაიჭიროს თავისი მსხვერპლი. ურთიერთობის შედეგი დამოკიდებულია თავდამსხმელისა და მსხვერპლის უნარზე შეიგძნონ გარემო სტიმულები და უზრუნველყონ შესაბამისი კოორდინირებული მოძრაობა. ჩვენ შეგვიძლია შეგრძნებისა და ქცევის წარმოშობას თვალი მივაღწევნოთ რაც მიგვიყვანს პროკარიოტებთან, სადაც განსაკუთრებული უჯრედული სტრუქტურები უზრუნველყოფენ ქიმიურ და წნევის შეგრძნებას და შემდეგ მოძრაობას აძლევენ შესაბამის მიმართულებას. ეს სტრუქტურები ევოლუციის მანძილზე განსხვავებულ მექანიზმებში გარდაიქმნა, რომლებიც შეიგრძნობს სხვადასხვა ტიპის ენერგიებს და საპასუხოდ ბევრ, განსხვავებულ მოძრაობას წარმოქმნის. სენსორული ინფორმაციის დეტექცია, გადამუშავება და შესაბამისი მოტორული პასუხის წარმოქმნა წარმოადგენს ცხოველთა ყველა ქცევის ფიზიოლოგიურ საფუძველს.

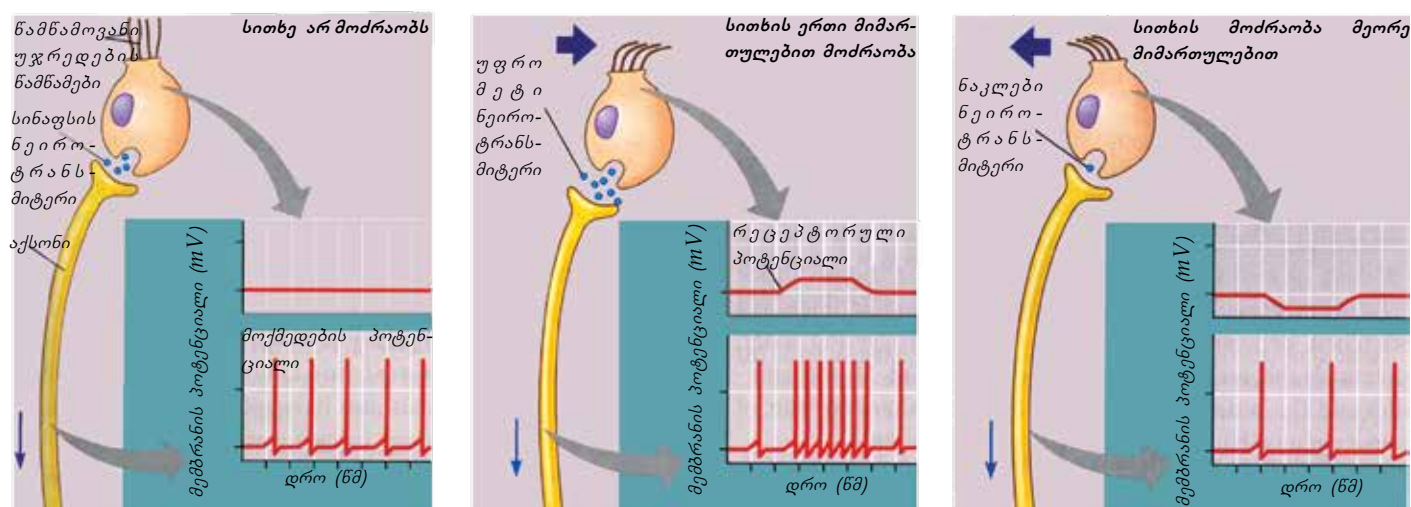
ჩვეულებრივ, ცხოველთა ქცევას განსაზღვრავდნენ, როგორც შეგრძნების, ანალიზის და მოქმედების ხაზობრივ თანმიმდევრობას, მსგავსად კომპიუტერისა, რომელიც სანამ იმოქმედებს, პასიურად ელოდება ინსტრუქციებს.

ამ შემთხვევაში ეს ასე არ არის. როდესაც ცხოველები მოძრაობენ, ისინი ამ მოძრაობით ამოწმებენ გარემოს, შეიგრძნობენ ცვლილებებს, და იყენებენ არსებულ ინფორმაციას შემდგომი მოქმედების წარმოქმნისთვის. ეს განგრძობითი ციკლი უფროა, ვიდრე ხაზობრივი თანმიმდევრობა, რამდენადაც ტვინში მიმდინარეობს ფონური აქტივობა, რომელიც მუდმივად განახლებას განიცდის შეგრძნებისა და მოქმედების მიმდინარეობისას.

48-ე თავში გამოვიკვლიეთ როგორ ატარებს და აერთიანებს ნერვული სისტემა სენსორულ და მოტორულ ინფორმაციას. ამ თავში განვიხილავთ სენსორულ და მოქმედების პროცესებს რამდენიმე უხერხემლო და ხერხემლიანთა ჯგუფში. დავიწყებთ სენსორული პროცესით, რომელსაც გადააქვს ინფორმაცია გარე და შიდა გარემოდან ტვინისკენ. შემდეგ განვიხილავთ ჩონჩხისა და კუნთების სტრუქტურასა და ფუნქციას, რომლებიც ახორციელებენ მოძრაობებს ტვინის ინსტრუქციების შესაბამისად და ბოლოს განვიხილავთ ცხოველთა მოძრაობის სხვადასხვა მექანიზმებს.



(ა) მდინარის კიბოს გაჭიმვის რეცეპტორებს აქვთ მუცლის კუნთში ჩაძირული დენდრიტები. როდესაც მუცელი იხრება, კუნთები და დენდრიტები იჭიმებიან და გაჭიმვის რეცეპტორებში რეცეპტორულ პოტენციალებს წარმოქმნიან. უკანასკნელი გაჭიმვის რეცეპტორის აქსონში მოქმედების პოტენციალებს ჩართავს. ძლიერი გაჭიმვა უფრო დიდ რეცეპტორულ პოტენციალს და მაღალსიხშიროვან მოქმედების პოტენციალებს აღძრავს.



(ბ) ხერხეულიანთა წამწამოვან უჯრედებს აქვთ წამწამები, რომლებიც გარშემომყოფი სითხის მოძრაობისას იხრებიან. წამწამოვანი უჯრედი ამაგზნებელ ნეიროტრანსმიტერს ათავისუფლებს რომელიც იმ სენსორულ ნეირონზე მოქმედებს, რომლის საშუალებითაც მოქმედების პოტენციალები ცნს-ს გადაეცემა. ერთ მხარეს გადახრა უჯრედის დეპოლარიზაციას იწვევს, რაც თავის მხრივ მეტი ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლებასა და მოქმედების პოტენციალების სიხშირის გაზრდას განაპირობებს, ხოლო მეორე მხარეს გადახრა კი, საწინააღმდეგო ეფექტების საფუძველია. ასე რომ, წამწამოვანი უჯრედები პასუხობს მოძრაობის მიმართულებას, სიძლიერესა და სიჩქარეს.

▲ სურათი 49.2 სენსორული რეცეფცია: ორი მექანიზმი.

## სენსორული რეცეპტორები გარდაქმნიან სტიმულის ენერგიას და აგზავნიან სიგნალს ცენტრალური ნერვული სისტემაში

ინფორმაცია ნერვული სისტემაში ნერვული იმპულსების, ანუ მოქმედების პოტენციალების სახით ვრცელდება, რომელიც სულ ან არაფრის კანონს ემორჩილება (იხ. სურათი 48.12 გ). მოქმედების პოტენციალი, რომელიც თვალზე სინათლის დაცემისას აღიქმება ისეთივეა, როგორც მოქმედების პოტენციალი, რომელიც ყურში ჰაერის ვიბრაციით წარმოიქმნება. სტიმულის (როგორცაა სინათლე ან ბგერა) განსხვავების უნარი დამოკიდებულია ტვინის იმ უბანზე, რომელიც იღებს მოქმედების პოტენციალებს. ანუ, მნიშვნელობა აქვს იმას, თუ სად წავა მოქმედების პოტენციალი და არა იმას, თუ რა წარმოქმნის მას.

**შეგრძნებები** არის მოქმედების პოტენციალები, რომლებიც აღწევს ტვინს მგრძნობიარე ნეირონებით. ტვინი შეგრძნების შესახებ ინფორმაციის მიღების შემდეგ ახდენს მათ ინტერპრეტირებას და იძლევა სტიმულის **აღქმას**. აღქმები – როგორცაა ფერი, სუნი და გემო – არის ტვინში ფორმირებული კონსტრუქციები და მის გარეთ არ არსებობს. თუ ხე წაიჭევა და არანაირი ცხოველი არ არის ახლო-მახლო, რომ ეს გაიგონოს, რა არის ხმა? დაცემა ნამდვილად იწვევს წნევით ტალღებს ჰაერში, მაგრამ თუკი ხმას განვსაზღვრავთ როგორც აღქმას, მაშინ იქ არაფერია, თუკი ცხოველი არ შეიგრძნობს ტალღებს და მისი ტვინი არ აღიქვამს მათ.

შეგრძნება და აღქმა იწვევს **სენსორული რეცეფციით**, მგრძნობიარე უჯრედების მიერ სტიმულის გამომუშავებით. ამ უჯრედებს **სენსორულ რეცეპტორებს** უწოდებენ. სენსორული რეცეპტორების უმეტესობა არის განსაკუთრებული ნეირონული ან ეპითელური უჯრედები, რომლებიც, მარტო, ან სხვა ტიპის უჯრედებთან ერთად ჯგუფურად არსებობენ გრძნობათა ორგანოებში, როგორცაა თვალი, ყური და სხვა. **ექსტერორეცეპტორები** ის სენსორული რეცეპტორებია, რომლებიც ახდენენ სხეულის გარედან წამოსული სტიმულების დეტექციას, მათ შორის არის სითბო, სინათლე, წნევა და ქიმიური ნივთიერებები. **ინტერორეცეპტორები** არის სენსორული რეცეპტორები, რომლებიც სხეულის შიგნიდან მომავალი სიგნალს იღებენ, როგორცაა სისხლის წნევა და სხეულის პოზიცია.

## სენსორული რეცეპტორების მიერ შესტოვებული ფუნქციები

ყველა სტიმული ენერგიის ფორმას წარმოადგენს. შეგრძნება მოიცავს ამ ენერგიის გარდაქმნას სენსორული რეცეპტორების მემბრანული პოტენციალის ცვლილებად, რასაც ცენტრალური ნერვული სისტემისკენ (ცნს) გადაცემული მოქმედების პოტენციალების სიხშირის ცვლილებამდე მივყავართ. სენსორული რეცეპტორები ამ პროცესში ოთხ ფუნქციას ასრულებს: სენსორული ტრანსდუქცია, ამპლიფიკაცია, ტრანსმისია და ინტეგრაცია. სენსორულ რეცეპ-

ტორთა ორი ტიპისთვის (დაჭიმვის რეცეპტორებისთვის მდინარის კიბოში და წამწამიანი უჯრედებისთვის, ხერხემლიანთა ყურში და თევზებისა და ამფიბიების ლატერალური ხაზის სისტემაში) ეს ფუნქციები სურათ 49.2 – ზეა ნაჩვენები.

## სენსორული ტრანსდუქცია

სტიმულის ენერგიის გარდაქმნა სენსორული რეცეპტორის მემბრანული პოტენციალის ცვლილებად **სენსორული ტრანსდუქციის** სახელით არის ცნობილი. თვითონ მემბრანის პოტენციალის ცვლილებას კი რეცეპტორული პოტენციალის სახელი ეწოდება. სურათ 49.2 ა-ზე ჩანს, რომ **რეცეპტორული პოტენციალი** საფეხურებრივი პოტენციალია, მისი სიდიდე იცვლება სტიმულის სიძლიერის შესაბამისად. ყველა რეცეპტორული პოტენციალი სენსორული რეცეპტორის პლაზმურ მემბრანაში არსებული იონური არხის გახსნის ან დახურვის შედეგია, რაც ცვლის მემბრანის იონურ გამტარობას. სურათ 49.2-ზე მოცემულ მაგალითებში მემბრანის დაჭიმვა ან მოლუნვა არის ის სტიმული, რომელიც იონთა არხების გახსნას ან დახურვას იწვევს. სხვა სენსორულ რეცეპტორებში, არხები იხსნება ან იხურება, როდესაც უჯრედგარე ნივთიერებები უკავშირდება მემბრანულ ცილებს, ან როდესაც სენსორული რეცეპტორის პიგმენტი სინათლის აბსორბციას ახდენს. აღნიშნული მექანიზმები ამ თავში მოგვიანებით იქნება განხილული.

ბევრი სენსორული რეცეპტორის გასაოცარი თვისებაა, უკიდურესი მგრძნობელობა: მათ უნარი აქვთ სტიმულის უმცირესი ფიზიკური ერთეული დააფიქსირონ. სინათლის რეცეპტორების უმეტესობას შეუძლია დააფიქსიროს სინათლის ერთი ქვანტი (ფოტონი); ქიმიურ რეცეპტორებს უნარი აქვთ ერთი მოლეკულა შეამჩნიონ, ხოლო შიგნითა ყურის წამწამოვან უჯრედებს შეუძლიათ ნანომეტრის მხოლოდ ნაწილის მოძრაობა დააფიქსირონ. რეცეპტორების მგრძნობელობა პირობების მიხედვითაც შეიძლება შეიცვალოს. მაგალითად, ადამიანის პირში გლუკოზის რეცეპტორების მგრძნობელობა შეიძლება შეიცვალოს რამდენიმე ათეულჯერ, საკვების ზოგადი ხასიათისა და მასში შაქრის რაოდენობის ცვლილების მიხედვით.

## ამპლიფიკაცია

სტიმულის ენერგიის გაძლიერება სენსორული უჯრედების მიერ ამპლიფიკაციად არის წოდებული. მაგალითად, თვალიდან ტვინისკენ გატარებულ მოქმედების პოტენციალს 100,000-ჯერ უფრო მეტი ენერგია აქვს, ვიდრე იმ რამდენიმე ფოტონს, რომლებმაც ეს პოტენციალი გამოიწვია. ამპლიფიკაციის ნაწილი სენსორულ რეცეპტორებში მუდავდება და ხშირად ამაში მეორად მესენჯერულ სისტემებს შეაქვს წვლილი. რთული გრძნობათა ორგანოს შემთხვევაში ამპლიფიკაცია შეიძლება დამხმარე სტრუქტურებშიც მოხდეს, ამის მაგალითია ბგერითი ტალღის გაძლიერება შიგნითა ყურთან მიღწევამდე 20-ჯერ მეტი ფაქტორით.

## ტრანსმისია

მას შემდეგ რაც სტიმული გარდაიქმნება რეცეპტორულ პოტენციალად, მოქმედების პოტენციალები გადაიტანება ცნს-ში. ზოგი სენსორული რეცეპტორი, მაგალითად როგორცაა მდინარის კიბოს დაჭიმვის რეცეპტორი, სენსორული ნეირონია, რომელსაც

მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნა შეუძლია და ცენტრალური ნერვული სისტემისკენ მიმავალი აქსონი გააჩნია (იხილეთ სურათი 49.2 ა). სხვებს, მაგალითად, წამწამოვან უჯრედებს, ასეთი აქსონი არ აქვს და არ შეუძლია მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნა; ეს რეცეპტორები მგრძნობიარე ნეირონებთან სინაფსებში ნეიროტრანსმიტერს გამოყოფს (იხილეთ სურათი 49.2ბ). თითქმის ყველა გზაში, სადაც რეცეპტორები სინაფსებით უკავშირდება მგრძნობიარე ნეირონებს, ამავანებელი ნეიროტრანსმიტერის გამოყოფა ხდება. უკანასკნელი მგრძნობიარე ნეირონის მიერ მოქმედების პოტენციალის ცნს-კენ გადაცემას იწვევს (გამონაკლისი არის ხერხემლიანთა მხედველობის სისტემა, რომელიც განხილულია 49.4-საკითხში).

რეცეპტორული პოტენციალის სიდიდე გავლენას ახდენს მოქმედების პოტენციალის სიხშირეზე, რომელიც ცნს-კენ მიდის. თუ რეცეპტორი იმავდროულად მგრძნობიარე ნეირონიც არის, დიდი რეცეპტორული პოტენციალი ზღურბლს უფრო ადრე აღწევს, რაც თავის მხრივ უფრო მაღალსიხშიროვან მოქმედების პოტენციალებს იწვევს (იხილეთ სურათი 49.2 ა). თუ რეცეპტორი სინაფსით უკავშირდება მგრძნობიარე ნეირონს, დიდი რეცეპტორული პოტენციალი იწვევს მეტი ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლებას, მსგავსი შედეგით. ბევრი მგრძნობიარე ნეირონი სპონტანურად წარმოქმნის მოქმედების პოტენციალს დაბალი სიხშირით. ამიტომ, ამ ნეირონებში სტიმული კი არ ჩართავს ან გამორთავს მოქმედების პოტენციალებს, არამედ მათი სიხშირის მოდულაციას ახდენს (იხილეთ სურათი 49.2ბ). ასეთი ნეირონები ინფორმაციას აწვდიან ცნს-ს არა მარტო სტიმულის არსებობის, ან არარსებობისას, არამედ აგრეთვე ინტენსივობისა და მიმართულების ცვლილების შესახებ.

## ინტეგრაცია

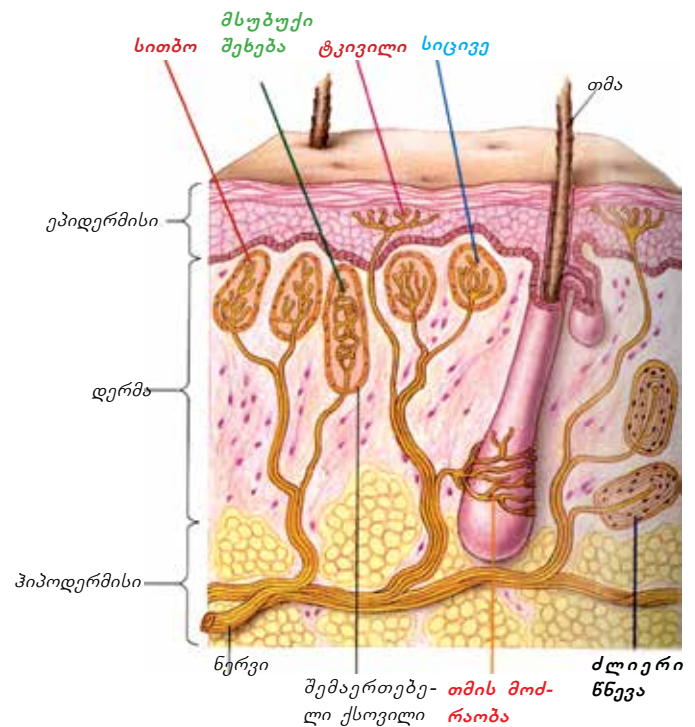
ინტეგრაცია ანუ სენსორული ინფორმაციის გადამუშავება ინფორმაციის მიღებისთანავე იწყება. სენსორული რეცეპტორის განსხვავებულ ნაწილებში სტიმულით გამოწვეული რეცეპტორული პოტენციალების სუმაცია ხდება პოსტსინაპსური პოტენციალების სუმაციის მსგავსად. რეცეპტორებში სხვა ტიპის ინტეგრაცია არის **სენსორული ადაპტაცია** - პასუხის შემცირება ხანგრძლივი სტიმულაციის საპასუხოდ. ზოგი რეცეპტორი, სხვასთან შედარებით, უფრო სწრაფად ადაპტირებადი. სენსორული ადაპტაციის გარეშე ადამიანი იგრძნობდა გულის თითოეულ ცემას და ტანსაცმლის ყველა უმცირეს ნაწილს სხეულზე. რეცეპტორები შერჩევითად ატარებენ ინფორმაციას ცნს-კენ და ადაპტაცია ამცირებს გახანგრძლივებული სტიმულის მიერ ხანგრძლივი მგრძნობელობის წარმოქმნის შესაძლებლობას.

სენსორული ინფორმაციის ინტეგრაცია ნერვული სისტემის ყველა დონეზე ხდება. ზემოთ აღწერილი უჯრედული დონე მხოლოდ პირველი ნაბიჯია. რთულ სენსორულ სტრუქტურებს, ისეთს როგორიცაა თვალი, ინტეგრაციის უფრო მაღალი დონე აქვთ და ცნს დამატებით გადაამუშავებს ყველა შემომავალ სიგნალს.

## სენსორული რეცეპტორების ტიპები

იმ ენერგიის მიხედვით, რომლის ტრანსდუქციაც ხდება სენსორულ რეცეპტორებში, ისინი ხუთ კატეგორიად იყოფა: მექანორე-

ცეპტორები, ქემორეცეპტორები, ელექტრორეცეპტორები, თერმორეცეპტორები და ტკივილის რეცეპტორები.



▲ **სურათი 49.3 ადამიანის კანის სენსორული რეცეპტორები.** ეპიდერმისის რეცეპტორები მიშველი დენდრიტებია, ისევე როგორც თმის მოძრაობის რეცეპტორები, რომლებიც დერმისში თმის ძირის ირგვლივ არის. სხვა რეცეპტორების უმეტესობა შემადგენელი ქსოვილის კაფსულაშია მოთავსებული.

## მექანორეცეპტორები

მექანორეცეპტორები შეიგრძნობენ ფიზიკურ დეფორმაციას, რომელიც ისეთი სტიმულებით არის გამოწვეული როგორც არის წნევა, შეხება, გაჭიმვა, მოძრაობა და ბერა - მექანიკური ენერგიის ყველა ფორმა. მექანორეცეპტორების მემბრანის გაღუნვა ან დაჭიმვა ზრდის მემბრანის განვლადობას ნატრიუმისა და კალიუმის იონების მიმართ. როდესაც ეს ხდება, მემბრანის პოტენციალი იცვლება EK და ENა შორის, რასაც დეპოლარიზაცია წარმოადგენს (იხილეთ თავიB 48). სურათ 49.2-ზე მოცემულია მდინარის კიბოს გაჭიმვის რეცეპტორი და ხერხემლიანთა წამწამოვანი უჯრედების მექანორეცეპტორები. სხვა მაგალითია ხერხემლიანთა გაჭიმვის რეცეპტორები, რომელიც ჩონჩხის კუნთის სიგრძეს აკონტროლებს. ამ შემთხვევაში მექანორეცეპტორები მგრძნობიარე ნეირონების მორჩებია, რომლებიც სპირალურად ეხვევა ჩონჩხის კუნთის პატარა ბოჭკოს შუა უბანს. თითო კუნთოვანი თითისტარა შედგება ორიდან თორმეტამდე ასეთი ბოჭკოსგან, შემოფარგლულია შემადგენელი ქსოვილით. იგი მოთავსებულია სხვა კუნთოვანი ბოჭკოების პარალელურად. როდესაც კუნთი იჭიმება, თითისტარას ბოჭკოებიც იჭიმება. ეს იწვევს მგრძნობიარე ნეირონის დეპოლარიზაციას და



▲ **სურათი 49.4 მწერების ქემორეცეპტორები.** მამრი აბრეშუმის ჭიის პეპლის *omyx mori* ანტენები დაფარულია მგრძნობიარე ნაშენებით, რომელიც შეიმჩნევა სკანერული ელექტრონული მიკროსკოპით გადიდებით. ნაშენებს აქვთ ქემორეცეპტორები, რომლებიც მაღალმგრძნობიარე მდედრის მიერ გამოყოფილი სასქესო ფერომონების მიმართ.

რთავს მოქმედების პოტენციალს, რომელიც ზურგის ტვინისკენ გადაიტანება. კუნთოვანი თითისტარა და მისი მაინერვირებული მგრძნობიარე ნეირონები ნერვული წრედის ნაწილებია, რომლებიც საფუძვლად უდევს რეფლექსებს (**იხილეთ სურათი 48.4**).

ძუძუმწოვრების შეხების შეგრძნება ეფუძნება მექანორეცეპტორებს. ისინი ხშირად შემადგენელი ქსოვილით არიან დაფარულნი. (**სურათი 49.3**). შემადგენელი ქსოვილის სტრუქტურა და რეცეპტორების ადგილმდებარეობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მექანიკური ენერგიის ტიპზე, რომელიც მათთვის საუკეთესო სტიმულს წარმოადგენს (მსუბუქი შეხება, ვიბრაცია, ან ძლიერი წნევა). ის რეცეპტორები, რომლებიც მსუბუქ შეხებას აფიქსირებს კანის ზედაპირთან ახლოს მდებარეობს; ისინი ძალიან მსუბუქი მექანიკური ენერგიის ზემოქმედებას რეცეპტორულ პოტენციალად გარდაქმნიან. ძლიერ წნევასა და ვიბრაციაზე მორეაგირე რეცეპტორები კანის ღრმა შრეებშია მოთავსებული. სხვა რეცეპტორები შეიგრძნობენ თმის რხევას (არ უნდა აგვერიოს სურათ 49.2-ზე მოცემულ წამწამოვან უჯრედებში). ის რეცეპტორები, რომლებიც ძუძუმწოვრების (მაგალითად, როგორიცაა კატა და ბევრი მღრღნელი) მაგარი ულვაშის ძირშია მოთავსებული, უაღრესად მგრძნობიარეა და შესაძლებლობას აძლევს ცხოველს სიბნელეში, ახლოს მყოფი ობიექტი დააფიქსიროს.



(ა) ჩხრიალასა და გველეხლასნაირებს თითო ინფრანითელი რეცეპტორი თვალსა და ნესტოს შორის გააჩნია. ეს ორგანოები საკმარისად მგრძნობიარეა, ერთ მეტრში მყოფი თავის სითბოს გამოსხივების დაფიქსირებისთვის. გველი თავს გვერდებზე ამოძრავებს, სანამ ორივე რეცეპტორით თანაბარ გამოსხივებას არ დააფიქსირებს, რაც თავის პირდაპირ მდებარეობაზე მიუთითებს.



(ბ) ზოგი მიგრირებადი ცხოველი, მაგალითად, როგორც არის თეთრი ვეშაპი, გრძნობს დედამიწის მაგნიტურ ველს და სხვა მინიშნებებთან ერთად იყენებს ინფორმაციას ორიენტაციისთვის.

▲ **სურათი 49.5 სპეციალიზებული ელექტრომაგნიტური რეცეპტორები.**

## ქემორეცეპტორები

ქემორეცეპტორები მოიცავს ძირითად რეცეპტორებს, რომლებიც ატარებს ინფორმაციას ხსნარის მთლიანი კონცენტრაციის შესახებ და სპეციფიკურ რეცეპტორებს რომლებიც სხვადასხვა ტიპის ნივთიერებების მიმართ მგრძნობიარეა. მაგალითად, ძუძუმწოვართა ტვინში ოსმორეცეპტორები, ძირითადი რეცეპტორებია, რომლებიც აფიქსირებენ სისხლის მთლიანი კონცენტრაციის ცვლილებებს და ასტიმულირებენ წყურვილის შეგრძნებას, ოსმოლარულობის გაზრდის შემთხვევაში (იხილეთ თავი 44). ოთახის ბუზის ფეხში არსებული წყლის რეცეპტორები რეაგირებენ სუფთა წყალზე ან რომელიმე ნივთიერების ხსნარზე. უმეტეს ცხოველს ასევე აქვს სპეციფიკური მოლეკულების, მათ შორის გლუკოზის, ჟანგბადის, ნახშირორჟანგის და ამინმჟავების რეცეპტორები. ორი ყველაზე უფრო მგრძნობიარე და სპეციფიკური ქემორეცეპტორი არის მამრ აბრეშუმის ჭიის პეპელაში (**სურათი 49.4**). ისინი აფიქსირებენ მდედრი პეპლის სასქესო ფერომონის ორ ქიმიურ კომპონენტს. ყველა ამ მაგალითში მასტიმულირებული მოლეკულა უკავშირდება რეცეპტორული უჯრედის მემბრანის განსაკუთრებულ უბანს და საწყისს აძლევს მემბრანის განვლადობის ცვლილებას.

## ელექტრომაგნიტური რეცეპტორები

ელექტრომაგნიტური რეცეპტორები ამჩნევენ ელექტრომაგნიტური ენერგიის სხვადასხვა ფორმას, მაგალითად როგორც არის ხილული სხივები, ელექტრობა და მაგნეტიზმი. ფოტორეცეპტორები არის ელექტრომაგნიტური რეცეპტორები, რომლებიც ამჩნევენ ხილული სხივების სახელით ცნობილ გამოსხივებას. ხშირად ეს რეცეპტორები ორგანიზებულია თვალში. ზოგ გველს აქვს ძალიან მგრძნობიარე ინფრაწითელი რეცეპტორები, რომლებიც მსხვერპლის სხეულის სითბოს ცივ ფონთან მიმართებაში ამჩნევენ (**სურათი 49.5 ა**). ზოგი თევზი წარმოქმნის ელექტრულ დენს და იყენებს ელექტრორეცეპტორებს ობიექტის, მაგალითად როგორცაა მსხვერპლი, ადგილმდებარეობის დასადგენად. ეს ობიექტი აღნიშნულ დენს წინაღობას უქმნის. იხვნისკარტას თავის ნისკარტზე ელექტრორეცეპტორი აქვს, რომელიც ამჩნევს კიბოსნაირების, ბაყაყების, პატარა თევზების და სხვა მსხვერპლის ელექტრულ ველს. ბევრი ცხოველი მიგრაციის დროს საორიენტაციოდ დედამიწის მაგნიტური ველის ხაზებს იყენებს (**სურათი 49.5 ბ**). რკინის შემცველი მინერალი მაგნეტიტი ნაპოვნია ბევრი ხერხემლიანის ქალაში (მათ შორის ორაგულში, მტრედ ში, ზღვის კუსა და ადამიანში), ფუტკრების მუცელში, და განსაზღვრულ უმარტივესებსა და პროკარიოტებში, რომლებიც ორიენტაციას დედამიწის მაგნიტური ველით ახდენენ. ოდესღაც მეზღვაურების მიერ კომპასად გამოიყენებული მაგნიტი შესაძლოა ბევრი ცხოველის საორიენტაციო მექანიზმი იყოს.

## თერმორეცეპტორები

თერმორეცეპტორები, რომლებიც სითბოს ან სიცივეს პასუხობენ, ეხმარებიან სხეულს ტემპერატურის რეგულაციაში, აგზავნიან სიგნალს გარემოსა და სხეულის ტემპერატურის შესახებ. ძუძუმწოვართა კანში თერმორეცეპტორების იდენტიფიკაციასთან დაკავშირებით დებატები გრძელდება. შესაძლო კანდიდატი ორი, ინკაფსულირებული დატოტილი დენდრიტებისგან შედგენილი რეცეპტორია (**იხილეთ სურათი 49.3**). ბევრი მკვლევარი ფიქრობს, რომ ეს სტრუქტურები წნევის სახეშეცვლილი რეცეპტორებია და რომ თერმორეცეპტორები განსაზღვრული მგრძნობიარე ნეირონების შიშველი დენდრიტებისგან შედგება. არსებობს საყოველთაო შეთანხმება, რომ კანის და წინა ჰიპოთალამუსის თერმორეცეპტორები აგზავნიან ინფორმაციას სხეულის თერმოსტატიკენ, რომელიც უკანა ჰიპოთალამუსშია მოთავსებული.

## ტკივილის რეცეპტორები

ადამიანებში ტკივილის რეცეპტორები ნოციცეპტორებადაც იწოდება (ლათინურიდან ნოცერე, ტკივილი). ისინი გვხვდება ეპიდერმისში შიშველი დენდრიტების კლასის სახით (**იხილეთ სურათი 49.3**). ცხოველების უმეტესობა სავარაუდოდ განიცდის ტკივილს. თუმცა, ჩვენ არ შეგვიძლია თქმა, თუ რა ასოცირებული აღქმები აღეძვრებათ ცხოველებს ტკივილის რეცეპტორების სტიმულაციის დროს. ტკივილი მნიშვნელოვანი შეგრძნებაა, იმიტომ, რომ ამ სტიმულს ხშირად დაცვითი რეაქციებისკენ მივყავართ. მაგალითად, ისეთისკენ როგორცაა საშიშროებიდან თავის დაღწევა. იშვიათი ინდივიდები, რომლებიც ყოველგვარი ტკივილის შეგრძნების გარეშე იბადებიან, შესაძლოა ისეთი პირობებისგან

დაიღუპონ, როგორცაა გამსკდარი ჭიანჭლა, რამდენადაც არ შეუძლიათ შეიგრძნონ ამ პროცესთან დაკავშირებული ტკივილი და ვერ ხვდებიან საშიშროებას. ტკივილის რეცეპტორების განსხვავებული ჯგუფები პასუხობენ ჭარბ სითბოს, წნევის, ან განსაკუთრებული კლასის ქიმიურ ნივთიერებებს, რომლებიც დაზიანებული ან ანთებითი ქსოვილიდან გამოიყოფა. ზოგი ნივთიერება, რომელიც ტკივილს იწვევს მოიცავს ჰისტამინს და მჟავებს. პროსტაგლანდინები ზრდის ტკივილის რეცეპტორების სენსიტიზაციის გზით - ეს არის მათი ზღურბლის შემცირება (**იხილეთ თავი 45**); ასპირინი და იბუპროფენი ამცირებენ ტკივილს პროსტაგლანდინის სინთეზის შეკავებით, მაშინ, როცა ნოციცეპტორების სიმკვრივე ყველაზე მაღალი კანშია, ზოგი მათგანი დაკავშირებულია სხვა ორგანოებთან.

## კონცეფტია შემოქმედა 49.1

1. რატომ ახდენენ სინაფსურ გადაცემაზე მოქმედი ნამულები ზოგი და, არა ყველა შეგრძნების ბლოკირებას?
2. თუკი თქვენ ანესთეტიკს გაიკეთებდით კანზე, რომელ გრძნობებზე იმოქმედებდა ეს პირველ რიგში? რომელზე იმოქმედებდა ბოლოს და რომელზე არ იმოქმედებდა საერთოდ? ახსენით.  
შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი

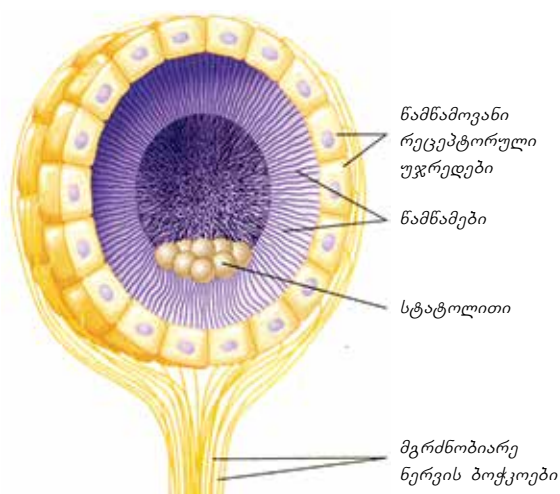
## კონცეფტია 49.2

### სმენასა და წონასწორობაზე მონაწილე ორგანოები ორგანიზმში ნაწილაკების წონაზე და სითხის მოძრაობაზე

სმენა და სხეულის წონასწორობის ან ბალანსის აღქმა, უმეტეს ცხოველში ურთიერთდაკავშირებულია. ორივეში ჩართულია მექანორეცეპტორები, რომლებიც ნაწილაკების წონით და სითხის მოძრაობით მემბრანის დეფორმაციისას რეცეპტორულ პოტენციალებს წარმოქმნიან.

### გრავიტაციისა და ბგერის შეგრძნება უხერხემლოებში

უხერხემლოთა უმეტესობას აქვს ორგანო, რომელსაც სტატოცისტი ჰქვია. იგი შეიცავს მექანორეცეპტორებს და წონასწორობის ფუნქციის ასრულებს (**სურათი 49.6**). სტატოცისტის ძირითადი ტიპი შედგება წამწამოვანი რეცეპტორული უჯრედებისგან. ისინი გარს ერტყმინან ერთი ან მეტი სტატოლიტის შემცველ კამერას. სტატოლიტები ქვიშის ან სხვა მკვრივი მარცვლებია. გრავიტაცია იწვევს სტატოლიტების გადაადგილებას კამერის ყველაზე დაბალ უბანში და ასტიმულირებს იქ არსებულ რეცეპტორებს. სტატოცის-



▲ **სურათი 49.6 უხერხემლოთა სტატოცისტი.** სტატოლიტების დალექვა კამერის დაბალ ნაწილში ღუნავს ამ უბანში მყოფი რეცეპტორული უჯრედის ნაწნამს, უზრუნველყოფს რა ტვინს გრავიტაციასთან მიმართებაში სხეულის ორიენტაციის შესახებ ინფორმაციით.

ტები უხერხემლოების სხეულის სხვადასხვა ნაწილშია მოთავსებული. მაგალითად, ბევრ მედუზას სტატოცისტები მათი „ქუდის“ პერიფერიაზე აქვს და ცხოველს სხეულის პოზიციაზე აძლევს მინიშნებას. კიბორჩხალებსა და მდინარის კიბოებს სტატოცისტი მათი ანტენულების ძირთან ახლოსაა.

ბევრი უხერხემლო ამჟღავნებს ზოგად მგრძნობელობას ბგერის მიმართ, თუმცა სმენისთვის სპეციალიზირებული სტრუქტურა უფრო ნაკლებ გავრცელებულია, ვიდრე გრავიტაციის სენსორები. სმენის სტრუქტურები ყველაზე ინტენსიურად ხმელეთის მწერებშია შესწავლილი.

ბევრ და, ალბათ, უმეტეს მწერს სხეულის ბეწვები აქვს, რომლებიც ვიბრირებს ბგერითი ტალღების საპასუხოდ. სხვადასხვა სიგრძისა და სისქის ბეწვი ვიბრირებს განსხვავებულ სიხშირეებზე. ბეწვები აწყობილია სხვა ორგანიზმების მიერ წარმოქმნილი ბგერების სიხშირის შესაბამისად. მაგალითად, მამრი კოლო მეწყვილის ადგილმდებარეობას საზღვრავს მის ანტენაზე არსებული წვრილი ბეწვის საშუალებით. ეს ბეწვები განსაკუთრებულად იმ ხმაურის საპასუხოდ ვიბრირებს, რომელიც მფრინავი მდედრის ფრთების დარტყმისას წარმოიქმნება. კამერტონი, რომელიც იგივე სიხშირით ვიბრირებს, როგორიცაა მდედრი კოლოს ფრთები ასევე მიიზიდავდა მამრს. ზოგ მუხლუხოს (ლარგული ჩრჩილი და პეპელა) სხეულზე აქვს ვიბრაციული ბეწვი, რომელსაც შეუძლია მტაცებელი შეამჩნიოს. კრაზანას ფრთების ბზუილი აფრთხილებს მუხლუხოებს საშიშროების შესახებ. ბევრ მწერს ასევე აქვს „ყური“, რომელშიც შიდა ყურის საკანზე ტიშპანური მემბრანა (ყურის ბარაბანია) გადაჭიმული (სურათი 49.7). ბგერითი ტალღები იწვევს ტიშპანური მემბრანის ვიბრაციას, ასტიმულირებს რეცეპტორულ უჯრედებს, რომლებიც მემბრანას შიგნიდან ეხება და იწვევს ნერვულ იმპულსებს, რომლებიც ტვინს გადაეცემა.

ზოგ ჩრჩილს შეუძლია გაიგონოს მაღალი ხმა, რომელსაც ლამურას სონარი წარმოქმნის. ამ ბგერების აღქმა რთავს ჩრჩილის გაქცევის რეაქციას, როგორც ამ თავის დასაწყისში იყო მოხსენიებული. ეს ასევე ხსნის, თუ რატომ არის რთული ტარაკანაზე ფე-

ხის დადგმა; მწერი გრძნობს ადამიანის ფეხის დაშვებას და ძალიან სწრაფად მოძრაობს მის ასარიდებლად.

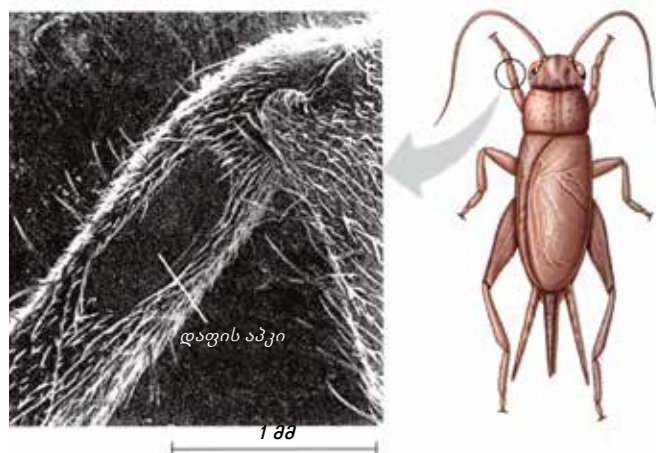
## სმენა და ჭანასწორობა პუბერტატში

ძუძუმწოვრებში, მსგავსად ხმელეთის უმეტესი ცხოველისა, სმენისა და წონასწორობის სენსორული ორგანო ყურში მჭიდროდ არის დაკავშირებული.

### სმენა

როგორ გარდაქმნის ყური წნევის ტალღების ენერგიას ნერვულ იმპულსებად, რომელსაც ტვინი ბგერად აღიქვამს? ვირბირებადი ობიექტი ისეთი, როგორიცაა გიტარის რხევადი სიმი ან მოლაპარაკე ადამიანის სახმო იოგები ქმნის გავრცელებად ტალღებს ირგვლივ მყოფ ჰაერში. ეს ტალღები იწვევს ტიშპანური მემბრანის ვიბრაციას იგივე სიხშირით, რაც ბგერას აქვს. შუა ყურის სამი ძვალი ატარებს ვიბრაციას ოვალური სარკმლისკენ - ლოკოკინას ზედაპირზე არსებული მემბრანისკენ. როდესაც ერთ-ერთი ამ ძვალთაგანი ოვალური სარკმლის საწინააღმდეგოდ ვიბრირებს, ის ქმნის წნევით ტალღებს ლოკოკინას სითხეში. ტალღები მოგზაურობენ ვესტიბულური არხის გავლით, უვლიან ლოკოკინას წვერს და აგრძელებენ ტიშპანურ არხში გაფანტვას და ეჯახებიან მრგვალ სარკმელს (სურათი 49.9).

ვესტიბულური არხის წნევის ტალღები მიემართება ლოკოკინას სანათურისკენ და ბაზილარული მემბრანისკენ. პასუხად, ბაზილარული მემბრანა ვიბრირებს ზევით და ქვევით და იწვევს წამწამოვანი უჯრედების მოძრაობას ტექტორიულ მემბრანასთან მიმართებით. ეს იწვევს ვიბრაციით წამწამების გადახრას ჯერ ერთ და მერე მეორე მიმართულებით. როგორც სურათ 49.2 ბ-ზეა ნაჩვენები, ერთი მიმართულებით გადახრა იწვევს უჯრედის დეპოლარიზაციას, იზრდება ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლება და მოქმედების პოტენციალის სიხშირე იმ მგრძნობიარე ნეირონებში, რომლებზედაც ისინი სინაპსებს წარმოქმნიან. შემდეგ ნეირონები ატარებენ მოქმედების პოტენციალებს ტვინისკენ, სმენის ნერვის

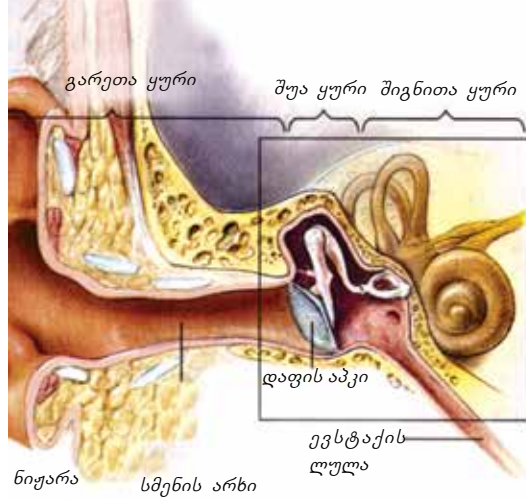


▲ **სურათი 49.7 მწერის ყური.** ტიშპანური მემბრანა, რომელიც ჩანს ჭრიჭინას წინა ფეხში ვიბრირებს ბგერითი ტალღების საპასუხოდ. ვიბრაცია ასტიმულირებს მექანორეცეპტორებს, რომლებიც ტიშპანური მემბრანას შიდა მხარეს ეხება.

## სურათი 49.8

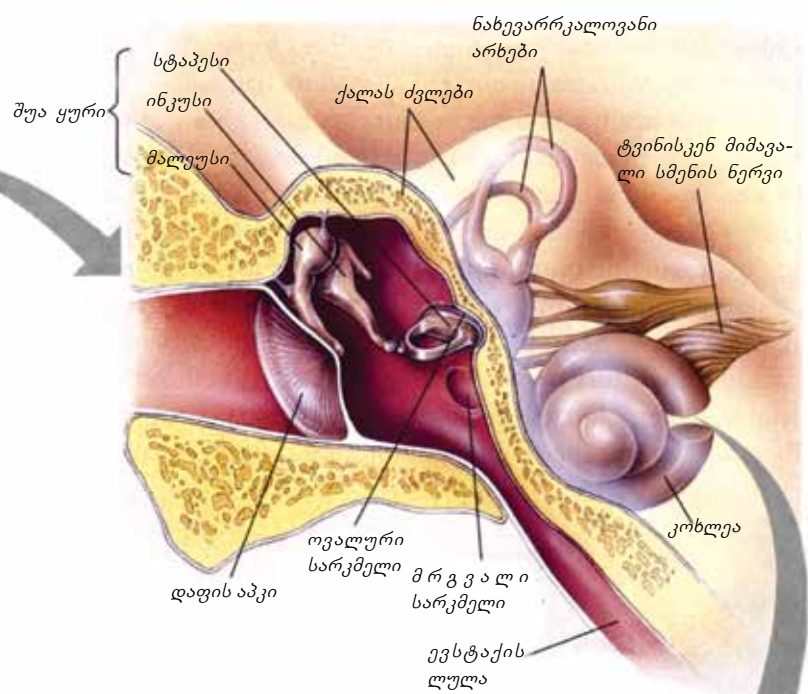
### კვლევა: ადამიანის ყურის სტრუქტურა

**1 ყურის სტრუქტურის მიმოხილვა.** ძუძუმწოვართა ყური მესაძლოა სამ ნაწილად დაიყოს: გარეთა, შუა და შიგნითა ყურად. გარეთა ყური შედგება გარეთა ნიჟარისა და სმენის არხისგან, რომელიც აგროვებს ბგერებს და გადასცემს დაფის აპკს, რომელიც შუა ყურს გარეთა ყურისგან გამოყოფს.

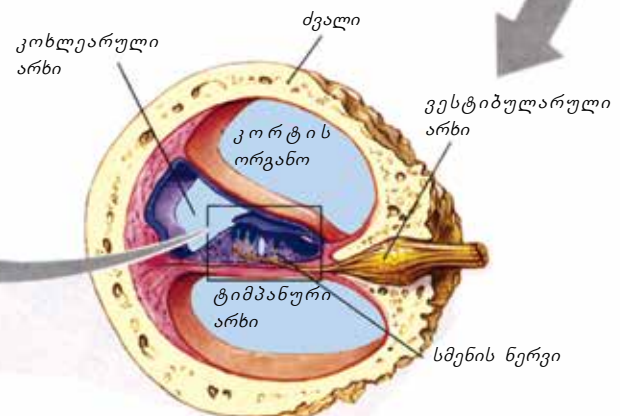
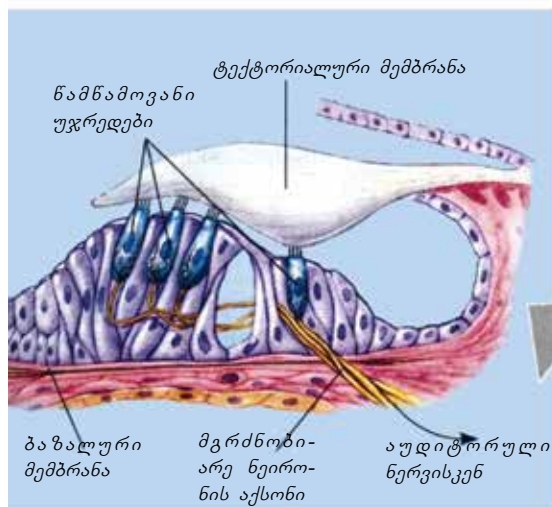


**2 შუა და შიგნითა ყური.** შუა ყურში სამი პატარა ძვალი — მალეუსი (ჩაქუჩი), ინკუსი (გრდემლი) და სტაპესი (უზანგი) არის მოთავსებული. შუა ყური ასევე ევისტაქის ლულაში იხსნება, რომელიც მას ხახასთან აკავშირებს და წნევის განონასწორებას ახდენს შუა ყურსა და ატმოსფეროს შორის.

**შიგნითა ყური** შედგება სითხით სავსე საკნებისგან, რომელიც ქალას საფეთქლის ძვალშია მოთავსებული. ეს საკნები მოიცავს ნონასწორების ორგანოს — ნახევარდრკალოვან არხებს და კობლეს (ლათინურად „ლოკოკინა“), რომელიც სმენაშია ჩართული.



**4 კობლეა.** კობლეს ორი გრძელი არხი აქვს — ზედა ვესტიბულური და ქვედა ტიმპანური, რომლებიც მცირე კობლესარული მილით არის ერთმანეთისგან გამოყოფილი. ვესტიბულური და ტიმპანური არხები პერილიმფას შეიცავენ, ხოლო კობლესარული მილი კი ენდოლიმფას.



**3 კორტის ორგანო.** ლოკოკინას მილის ძირში, ბაზილარულ მემბრანას აქვს კორტის ორგანო, რომელიც ყურის მექანორეცეპტორებს შეიცავს. ესენი წამწამოვანი უჯრედებია, რომელთა წამწამებიც ლოკოკინას მილში პროეცირდება. წამწამების დიდი ნაწილი ტექტორულ მემბრანას ეხება, რომელიც კორტის ორგანოს ზევით, თაროსავით არის ჩამოკიდული. ბგერითი ტალღები ბაზილარული მემბრანის რხევას იწვევს, რაც თავის მხრივ წამწამების მოხრას და უჯრედების დეპოლარიზაციას განაპირობებს.

საშუალებით. წამწამების მეორე მიმართულებით გადახრა, იწვევს უჯრედის ჰიპერპოლარიზაციას და ნეიროტრანსმიტერის გამოყოფის შემცირებას. თუ ბგერა სმენის ნერვში მოქმედების პოტენციალების სიხშირის ცვლილებით არის წარმოდგენილი, როგორღა გადაიცემა ბგერის ხარისხი? ბგერის ორი მნიშვნელოვანი ცვლადია — სიმაღლე და მოცულობა. მოცულობა (ხმამაღლობა) განისაზღვრება ბგერითი ტალღის ამპლიტუდით ანუ სიმაღლით. მაღალი ამპლიტუდის ბგერითი ტალღა იწვევს ბაზილარული მემბრანის უფრო ძლიერ ვიბრაციას, წამწამების უფრო დიდ გადახრას წამწამოვან უჯრედებზე და უფრო მეტ მოქმედების პოტენციალს მგრძნობიარე ნეირონში. სიმაღლე არის ბგერითი ტალღის სიხშირის ფუნქცია, ან ვიბრაციების რაოდენობა ერთ წამში, გამოიხატება ჰერცებში. მაღალსიხშიროვანი ტალღები წარმოქმნიან დიდი სიმაღლის ბგერებს, მაშინ როცა დაბალ-სიხშიროვანი ტალღები დაბალი სიმაღლის ბგერებს განაპირობებს. ჯანმრთელ ახალგაზრდა ადამიანს შეუძლია გაიგონოს 20-20,000 ჰერცის დიაპაზონში; ძაღლებს შეუძლიათ გაიგონოს ისეთი მაღალი ბგერები, როგორიცაა 40,000 ჰერცი; ხოლო ღამურებს შეუძლიათ გამოსცენ და გაიგონონ 100,000 ჰერცი სიხშირეზე მაღალი ბგერები. ისინი ამ უნარს ობიექტის მდებარეობის განსაზღვრისთვის იყენებენ. ლოკოკინას შეუძლია ბგერის სიმაღლის გარჩევა, რამდენადაც ის სიგრძივად ერთი ფორმის არ არის: შედარებით ვიწრო და გახევებულია ფუძესთან, ოვალურ სარკმელთან ახლოს და უფრო ფართო და მოქნილია წვერთან (**იხილეთ სურათი 49.10**).

ბაზილარული მემბრანის ყველა უბანი განსაკუთრებით მგრძნობიარეა ვიბრაციის განსაზღვრული სიხშირის მიმართ. მგრძნობიარე ნეირონები, რომლებიც დაკავშირებულია (რომელიმე მომენტში) ყველაზე მეტად ვიბრირებად უბანთან, მოქმედების პოტენციალების უმაღლეს სიხშირეს აგზავნის სმენის ნერვის ფარგლებში. მაგრამ ხმის სიმაღლის რეალური აღქმა ტვინში ხდება. სმენის ნერვის აქსონები პროეცირდებიან დიდი ნახევარსფეროების განსაკუთრებულ სმენით უბნებზე იმისა და მიხედვით, თუ ბაზილარული მემბრანის რომელ უბანში აღმოცენდა სიგნალი. როდესაც ჩვენი ქერქის განსაზღვრული უბანი სტიმულირდება, ჩვენ აღვიქვამთ განსაზღვრული სიმაღლის ბგერას.

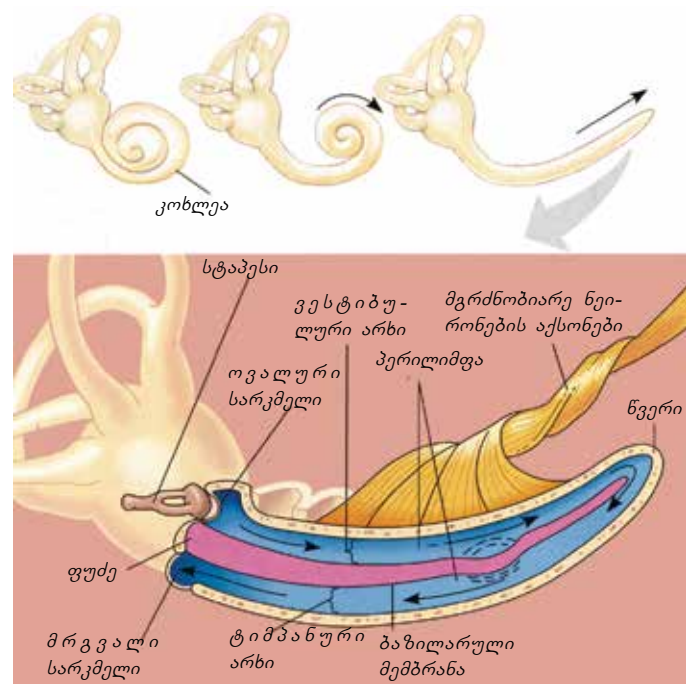
## წონასწორობა

ადამიანისა და უმეტესი სხვა ძუძუმწოვარის შიდა ყურში არსებული ორგანო აფიქსირებს სხეულის პოზიციას და ბალანსს. ოვალური სარკმლის უკან არის ვესტიბულა, რომელიც ორ განყოფილებას მოიცავს საკულას და უტრიკულას. უტრიკულა იხსნება სამ ნახევრადრკალოვან არხში, რომელიც ასრულებს წონასწორობის აპარატის ფუნქციას (**სურათი 49.11**).

უმეტეს ძუძუმწოვარში შეგრძნებები, რომელიც სხეულის მდებარეობასთან არის დაკავშირებული ბგერის შეგრძნების მსგავსად წარმოიქმნება. უტრიკულასა და საკულაში არსებული წამწამოვანი უჯრედები პასუხობენ თავის პოზიციის ცვლილებას გრავიტაციასთან მიმართებაში და ხაზობრივ აჩქარებას. წამწამოვანი უჯრედები კლასტრებად არის განლაგებული, და ყველა წამწამი პროეცირდება ჟელესებური ნივთიერების შემცველ პატარა კალციუმის კარბონატის ნაწილაკებში, რომლებსაც ოტოლიტები (ყურის ქვები) ეწო-

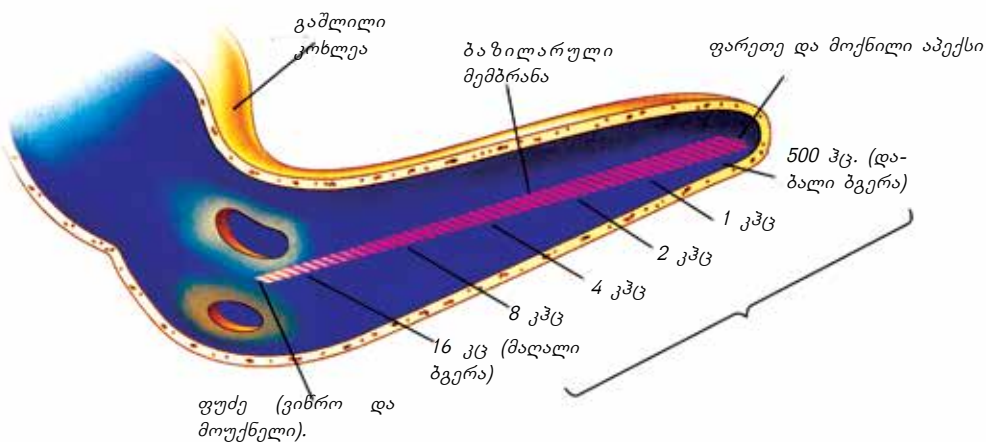
დებათ. რადგანაც ეს ნივთიერება უფრო მძიმეა, ვიდრე უტრიკულაში და საკულაში არსებული ენდოლიმფა, გრავიტაცია მუდმივად ქვემოთ „ეძაჩება“ რეცეპტორული უჯრედების წამწამებს და მე-8 ნერვის ვესტიბულური ტოტის შემადგენლობაში მყოფ მგრძნობიარე ნეირონებში მოქმედების პოტენციალის მუდმივი სერიას აგზავნის. ეს მექანიზმი მსგავსია იმისა, თუ როგორ მუშაობს სტატოცისტები უხერხემლოებში; საკულა და უტრიკულა განიხილება, როგორც სტატოცისტების განსაკუთრებული ტიპები.

სხეულის განსხვავებული კუთხეები იწვევს განსხვავებული წამწამოვანი უჯრედებისა და მათი მგრძნობიარე ნეირონების სტიმულაციას. როდესაც თავის მდებარეობა გრავიტაციის მიმართ იცვლება (ისე, როგორც თავის წინ გადახრისას) წამწამოვანი უჯრედებზე მოქმედი ძალა იცვლება და უჯრედი ზრდის ან ამცირებს ნეირომედიატორის გამოყოფას. ტვინი მგრძნობიარე ნეირონებით მოტანილი იმპულსების წარმოქმნის ცვლილებას აღიქვამს როგორც თავის პოზიციის შეცვლას. მსგავსი მექანიზმით, ნახევრადრკალოვანი არხები, რომლებიც განსხვავებულ სიბრტყეში მდებარეობს ამჩნევს თავის ბრუნვას ან კუთხურ აჩქარებას (**იხილეთ სურათი 49.11**). როდესაც ადამიანი თავს აბრუნებს, ნახევრადრკალოვან არხებში წონასწორობა ირღვევა და იწყება თავბრუსხვევის შეგრძნება.



▲ **სურათი 49.9 გადაცემა ლოკოკინაში.** სიმარტივისთვის, ლოკოკინა გაშლილად არის წარმოდგენილი აქ და სურათ 49.10-ზე, თუმცა ფიზიკურად ის არ იშლება. უზანგის ვიბრაცია ოვალური სარკმლის წინააღმდეგ იწვევს წნევის ტალღებს ლოკოკინას პერილიმფაში. ტალღები (შავი ისრები) მოგზაურობენ ლოკოკინას წვერისკენ ვესტიბულური არხით და უკან ფუძისკენ ტიმპანური არხით. ტალღების ენერგია ბაზილარული მემბრანის ვიბრაციას იწვევს, და ასტიმულირებს ნამწამოვან უჯრედებს.

► **სურათი 49.10 როგორ არჩევს ლოკოკინა ბგერის სიმაღლეს.** ბაზილარული მემბრანის სიფართოვე და მოქნილობა (ვარდისფრად) მის სიგრძეზე „აჟღერებს“ ბაზილარული მემბრანის განსაზღვრულ უბანს ამა თუ იმ სიხშირეზე. წნევის ტალღების სხვადასხვა სიხშირე ლოკოკინაში ბაზილარული მემბრანის განსხვავებულ უბნების ვიბრაციას იწვევს, ასტიმულირებს რა განსაზღვრულ წამწამოვან უჯრედებს და მგრძნობიარე ნეირონებს. წამწამოვანი უჯრედების შერჩევითი გააქტივება ტვინში აღიქმება, როგორც ამათუ იმ სიმაღლის ბგერა.

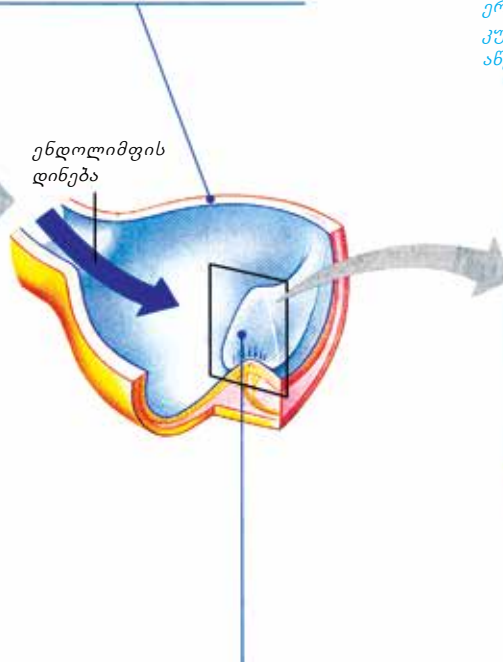


სამ სხვადასხვა სივრცეში მოთავსებული ნახევარკალოვანი არხები თავის კუთხურ მოძრაობას აფიქსირებს.



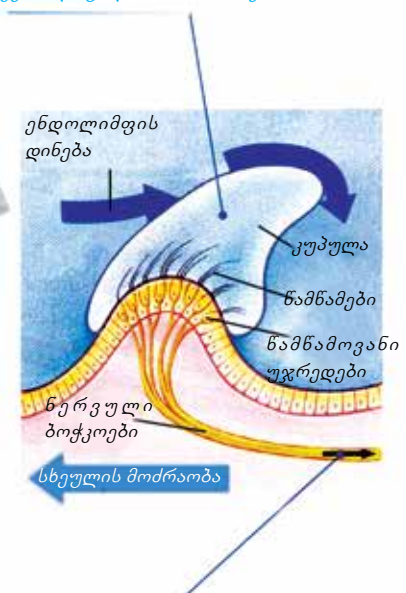
უტრიკულა და საკულა ატყობინებს ტვინს რომელ მხარეს არის ზევითა მიმართულება, ასევე როგორია სხეულის პოზიცია და ხაზოვანი აჩქარება.

თითოეულ არხს აქვს გაფართოებული ფუძე – ამპულა, რომელიც წამწამოვან უჯრედებს შეიცავს.



წამწამოვანი უჯრედების წამწამები ფელატიზოზურ კუპულაში პროეცირდება.

როდესაც თავი ბრუნვის სიჩქარეს ცვლის, ნახევარკალოვან არხებში არსებულ ენდოლიმფას ინერცია ხელს უშლის თავთან ერთად იბრუნოს, რის გამოც ენდოლიმფა კუპულას საწინააღმდეგო მიმართულებით აწევა და გადახრის წამწამებს.



წამწამების გადახრა, მგრძნობიარე ნეირონებში ბრუნვის აჩქარების პროპორციულად მოქმედების პოტენციალების სიხშირეს ზრდის.

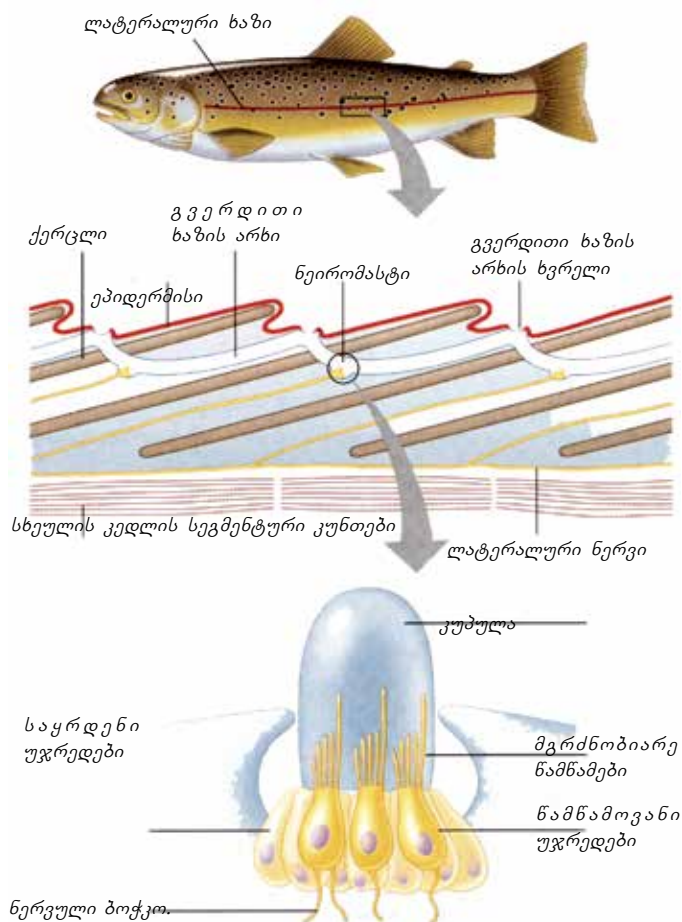
▲ **სურათი 49.11 შიდა ყურში არსებული წონასწორობის ორგანოები.**

## სმენა და წონასწორობა სხვა სქესუმილიანებში

მსგავსად სხვა ხერხემლიანებისა, თევზებსა და წყლის ამფიბიებსაც აქვთ ტვინთან ახლოს მდებარე შიდა ყური. აქ ლოკოკინა არ არის, მაგრამ არსებობს საკულა, უტრიკულა და ნახევრადრკალოვანი არხები - სტრუქტურები, რომლებიც ადამიანის ყურში არსებული წონასწორობის აპარატის ჰომოლოგიურია. თევზის შიდა ყურის ამ კამერებში ოტოლითების მოძრაობა ასტიმულირებს წამწამოვან უჯრედებს. განსხვავებით ძუძუმწოვრების სმენის აპარატისგან, თევზის ყურს არა აქვს ბარაბანი და არ იხსნება სხეულის გარეთ. ბგერითი ტალღებით გამოწვეული წყლის ვიბრაცია ჩონჩხის გავლით გადაეცემა შიდა ყურს, რაც იწვევს ოტოლითების მოძრაობას და წამწამოვანი უჯრედების სტიმულაციას. თევზის ჰაერით საცვ საცურაო ბუშტი (იხილეთ თავი 34) ასევე ვიბრირებს ბგერის საპასუხოდ და შესაძლოა მონაწილეობა მიიღოს ბგერის შიდა ყურისკენ გადაცემაში. ზოგ თევზს, მათ შორის ლოქოს და ციმორს აქვს ძვლების სერია, რომელსაც ვებერის აპარატს უწოდებენ. ის ატარებს ვიბრაციას საცურაო ბუშტიდან შიდა ყურისკენ.

უმეტეს თევზსა და წყლის ამფიბიას სხეულის ორივე მხარეს აქვს ლატერალური ხაზის სისტემა (სურათი 49.12). ეს სისტემა შეიცავს მექანორეცეპტორებს, რომლებიც შიდა ყურის ფუნქციონირების მსგავსი მექანიზმით ამჩნევენ დაბალსიხშიროვან ტალღებს. ცხოველის გარშემო არსებული წყალი მრავალრიცხოვანი ხვრელით შედის ლატერალურ ხაზის სისტემაში, მიედინება მილში და გაივლის მექანორეცეპტორებს. რეცეპტორული ერთეულები, რომლებსაც ნეირომასტებს უწოდებენ, გავს ნახევრადრკალოვან არხებში არსებულ ამპულას. ყველა ნეირომასტს აქვს წამწამოვანი უჯრედების კლასტრები, რომელთა წამწამებიც ჩაძირულია ჟელატინის-მაგვარ ჩაჩში - კუპულაში. წყლის მოძრაობა ღუნავს კუპულას და იწვევს წამწამოვანი უჯრედების დეპოლარიზაციას. ეს თავის მხრივ წარმოქმნის მოქმედების პოტენციალებს, რომლებიც მგრძნობიარე ნეირონების აქსონებით გადაეცემა ტვინს. ეს ინფორმაცია ეხმარება თევზს აღიქვას თავისი მოძრაობა წყალში ან მის სხეულზე შემზები წყლის ტალღების მიმართულება და სიჩქარე. ლატერალური ხაზის სისტემა ასევე ამჩნევს წყლის მოძრაობას ან ვიბრაციას, რომელიც წარმოიქმნება სხვა ობიექტების (მტრის ან მსხვერპლის) მოძრაობით.

ხმელეთის ხერხემლიანებში, შიდა ყური განვითარდა როგორც სმენისა და წონასწორობის მთავარი ორგანო. ამფიბიის ლარვას - თავკომბალას აქვს ლატერალური ხაზის სისტემა, თუმცა, ის არ გააჩნია ზრდასრულს, რომელიც ხმელეთზე ცხოვრობს. ხმელეთის გომბეშოსა ან ბაყაყში ბგერითი ვიბრაცია ჰაერიდან გადაეცემა შიდა ყურს სხეულის ზედაპირზე არსებული ტიმპანური მემბრანის და შუა ყურის ერთი ძვლის საშუალებით. არსებობს ასევე დამამტკიცებელი საბუთები, რომ ბაყაყის ფილტვები ვიბრირებს ბგერის საპასუხოდ და ატარებს ამ ვიბრაციას სმენის მილის გავლით ყურის ბარაბანისკენ. საკულას პატარა გვერდითა ჯიბე ფუნქციონირებს, როგორც ბაყაყის სმენის მთავარი ორგანო და საკულას ამ გამოწარმადმა მისცა დასაბამი ძუძუმწოვართა ევოლუციაში უფრო დახვეწილ ლოკოკინას. ფრინველებს აქვთ ლოკოკინა. ამფიბიების მსგავსად ბგერა ტიმპანური მემბრანისა და ერთი ძვლის გავლით შიდა ყურს გადაეცემა.



▲ **სურათი 49.12 თევზების გვერდითი ხაზის სისტემა.** წყლის დინება სისტემაში იწვევს წამწამოვანი უჯრედების მოხრას. ეს უჯრედები ენერგიას ელექტრულ პოტენციალად გარდაქმნიან. ისინი იწვევენ მოქმედების პოტენციალის გენერაციას, რომელიც ტვინს მიეწოდება. გვერდითი ხაზის სისტემა თევზს აძლევს საშუალებას მოახდინოს წყლის დინების მონიტორინგი. მოძრავი ობიექტით გამოწვეული წნევის ტალღები და დაბალსიხშიროვანი ბგერები წყალში გატარდება.

## ჯინოფცია შიმოჭმება 49.2

1. როგორ არის სტატოცისტები ადაპტირებული მინის მოხრელ და ღრმა ოკეანეებში მცხოვრებ ცხოველებში?
2. ოტოსკლეროზის დროს უზანგი ერწყმის შუა ყურის სხვა ძვლებს, ან ოვალურ სარკმელს. ახსენით, როგორ გავლენას ახდენს ეს მდგომარეობა სმენაზე.
3. წარმოიდგინეთ, რომ წნევის ტალღების სერია თქვენს ლოკოკინაზე იწვევს ბაზილარული მემბრანის ვიბრაციას ნელ-ნელა აპექსიდან ფუძისკენ. როგორ ინტერპრეტაციას გააკეთებდა თქვენი ტვინი აღნიშნულ სტიმულზე?

შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი

## გემოსა და ცნოსვის შეგრძნებები უმეცეს ცხოველში მჭიდროდაა დაკავშირებული

ბევრი ცხოველი ქიმიურ შეგრძნებას იყენებს მეწყვილეს საპოვნელად (ისევე როგორც მამარი აბრეშუმის ჭია რეაგირებს მდედრის მიერ გამოყოფილ ფერომონებზე), ტერიტორიის ცნობისთვის, რომელიც ამა თუ იმ ქიმიური ნივთიერებით არის მონიშნული (როდესაც ძაღლები და კატები მათი მეზობლების მიერ მონიშნულ საზღვრებს ყნოსავენ) და მიგრაციის დროს ნავიგაციაში დასახმარებლად (როგორც ორაგული იყენებს წარმოშობის ნაკადის უნიკალურ სუნს, გასამრავლებლად უკან დაბრუნებისთვის). ქიმიური „საუბარი“ განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ისეთი ცხოველებისთვის, როგორიცაა ჭიანჭველა და ფუტკარი, რომლებიც დიდ სოციალურ ჯგუფებში ცხოვრობენ. ყველა ცხოველში კვების ცეცევაში ქიმიური შეგრძნება ძალიან მნიშვნელოვანია. მაგალითად, ჰიდრა შეიძლება მოძრაობას ნივთიერება გლუტათიონის დეტექციისას ახორციელებს, რომელიც ჰიდრას საცეცევაში მოქცეული მსხვერპლის მიერ გამოიყოფა.

ორივე, გუსტაციის (გემოს) და ოლფაქტორული (სუნის) შეგრძნება იმ ქემორეცეპტორებზეა დამოკიდებული, რომლებიც გარემოში განსაკუთრებულ ნივთიერებებს ამჩნევს. ხმელეთის ცხოველების შემთხვევაში, გემოვნება არის ხსნარში არსებული ნივთიერებების და სუნი ჰაერში არსებული ნივთიერებების დეტექცია. წყლის ცხოველებში გემოვნებასა და ყნოსვაში განსხვავება არ არის.

მწერების გემოს რეცეპტორები განლაგებულია მგრძნობიარე წამწამების შიგნით, რომელთაც სენსილები ჰქვია და პირისა და ფეხის ნაწილებშია მოთავსებული. გემოს შეგრძნების წამწამები რამდენიმე ქემორეცეპტორს შეიცავს. თითოეული ქიმიური ნივთიერების განსაზღვრულ კლასს ეკუთვნის, როგორიცაა შაქარი, ან მარილი (სურათი 49.13). მწერებსაც ოლფაქტორული წამწამების გამოყენებით, შეუძლიათ ჰაერში არსებული ქიმიური ნივთიერებების ყნოსვა. ეს წამწამები, ჩვეულებრივ, ანტენებზეა მოთავსებული (იხილეთ სურათი 49.4).

## გემოვნება ადამიანებში

ადამიანების გემოვნის რეცეპტორები სახეშეცვლილი ეპითელიური უჯრედებია, რომლებიც გემოვნების კვირტებშია მოთავსებული. როგორც 49.14-ე სურათზეა ნაჩვენები, ისინი ენისა და პირის რამდენიმე უბანშია მომოფანტული. გემოვნების უმეტესი კვირტი დაკავშირებულია დვრილის ფორმის პროექციებთან, რომელთაც პაპილები ეწოდებათ. ოთხი ტიპის გემოვნების რეცეპტორია ცნობილი – სიტკბოს, სიმჟავის, მარილიანობის და სიცხარის. ამას გარდა არსებობს მეხუთეც – უმამი (იპოზურად „უგემრიელესი“) რომელიც გამოვლენილია ადინმუჟავა გლუტამინით და საკვარადოდ სხვების მიმართაც მგრძნობიარე უნდა იყოს. გლუტამინი არის არომატის გამაძლიერებელი მონონატრიუმ გლუტამატის

(მნგ) ძირითადი ნაწილი და უხვად არის ისეთ საკვებში, როგორიცაა ხორცი და ძველი ყველი. გემოვნების რეცეპტორის თითოეული ტიპი შეიძლება გააქტიურდეს ნივთიერებათა ფართო სპექტრით, მაგრამ ყველაზე მგრძნობიარეა განსაზღვრული ტიპის ნივთიერების მიმართ. რთული არომატები აღიქმება ტვინში გემოს ბევრი რეცეპტორიდან წამოსული განსხვავებული სიგნალის ინტეგრაციის შედეგად.

იმ ქემორეცეპტორებს, რომლებიც მარილიანობას – ძირითადად ნატრიუმის იონების არსებობას – და სიმჟავეს – წყალბადის იონებს მჟავების მიერ წარმოქმნილს – აფიქსირებენ მემბრანაში აქვთ არხები, რომელთა საშუალებითაც ეს იონები გადაადგილდებიან.  $\text{Na}^+$  ან  $\text{H}^+$  შესვლა უჯრედის დეპოლარიზაციას იწვევს. უმამი რეცეპტორების მექანიზმი შესაძლოა მოიცავდეს გლუტამატის დაკავშირებას  $\text{Na}^+$ -ის რეცეპტორებთან; როდესაც გლუტამატი უკავშირდება არხი იხსნება;  $\text{Na}^+$  შედის უჯრედში და ხდება დეპოლარიზაცია. ზოგ ქემორეცეპტორში, რომელიც ისეთ ცხარე (მწარე) ნივთიერებებს ამჟღავნებს, როგორიც არის ქინაქინი, კალიუმის იონების ( $\text{K}^+$ ) არხის დაკეტვა ხდება; შედეგად კალიუმის მიმართ მემბრანის განვლადობა მცირდება და უჯრედი დეპოლარიზდება. სიტკბო შეიძლება იმ ქემორეცეპტორებით. რომლებსაც შაქრების რეცეპტორული ცილები აქვთ; შაქრის მოლეკულების დაკავშირება რთავს სიგნალის გადაცემის გზას, რის შედეგად დეპოლარიზაცია ყალიბდება (იხილეთ სურათი 49.14). გემოს ყველა რეცეპტორში, უჯრედის დეპოლარიზაცია იწვევს მგრძნობიარე ნეირონზე ნეირომედიატორის გამოთავისუფლებას, რომელიც მოქმედების პოტენციალებს ტვინისკენ გადასცემს.

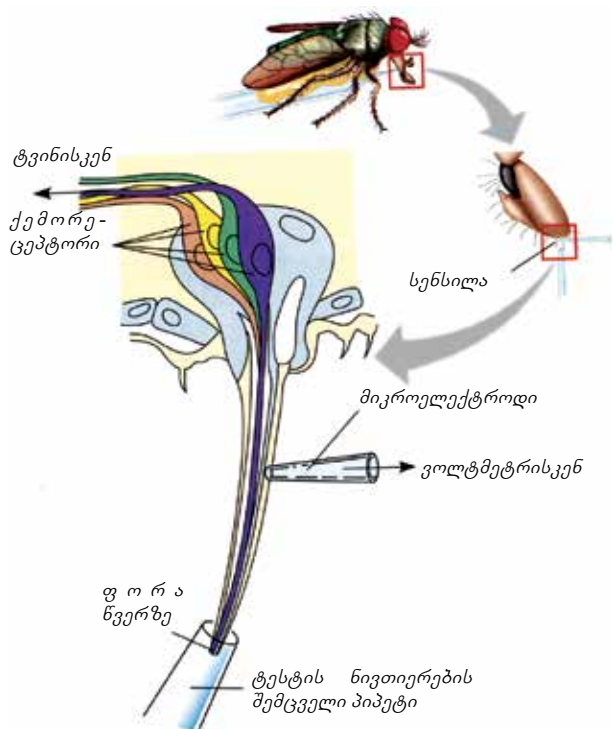
## ყნოსვა ადამიანებში

ოლფაქტორული რეცეპტორები ნეირონებია, რომლებიც ცხვირის ღრუს ზედა ნაწილში მდებარეობს და იმპულსებს უშუალოდ საყნოსავი (ოლფაქტორული) ბოლქვისკენ აგზავნის (სურათი 49.15). მიმღებ ბოლოებს აქვთ წამწამები, რომლებიც იჭრებიან ცხვირის ლორწოვან შრეში. როდესაც სუნიანი ნივთიერება დიფუნდირდება ამ უბანში, ის უკავშირდება ოლფაქტორული წამწამების მემბრანებზე არსებულ განსაკუთრებულ ცილებს, რომელთაც ოდორანტული რეცეპტორები ეწოდებათ. ეს დაკავშირება რთავს სიგნალის გადაცემის გზას, რომელიც G პროტეინებს, ადენილათ ციკლაზს და მეორად მესენჯერს - ციკლურ ამფს მოიცავს. მეორადი მესენჯერი ხსნის არხებს, რომლებიც  $\text{Na}^+$  და  $\text{Ca}^{2+}$ -ის მიმართ არიან გამტარი. ამ იონების შესვლა მემბრანის დეპოლარიზაციას იწვევს. შედეგად, რეცეპტორულ უჯრედში მოქმედების პოტენციალები აღმოცენდება. ადამიანებს შეუძლიათ ათასობით განსხვავებული სუნის შეგრძნება. თითოეული, სტრუქტურულად განსხვავებული სუნიანი ნივთიერებითაა განპირობებული. შეგრძნების მრავალფეროვნების ეს დონე მოითხოვს ყნოსვის უამრავ განსხვავებულ რეცეპტორს. არსებობს 1,000-ზე მეტი ყნოსვის რეცეპტორის გენი - ადამიანთა გენების დაახლოებით 3%. ყველა ყნოსვის რეცეპტორულ უჯრედში ყნოსვის ერთი ან რამდენიმე რეცეპტორის გენი ექსპრესირდება. ყნოსვის განსხვავებული სელექტურობის უჯრედები გაფანტულია ცხვირის ღრუში, მაგრამ მათ აქსონებს მოწესრიგებული პროექცია აქვთ ოლფაქტორულ ბოლქვში. ის უჯრედები, რომლებიც ყნოსვის ერთი და იგივე რეცეპტორის გენს აექსპრესირებენ, მოქმედების პოტენციალებს ყნოსვის ბოლქ-

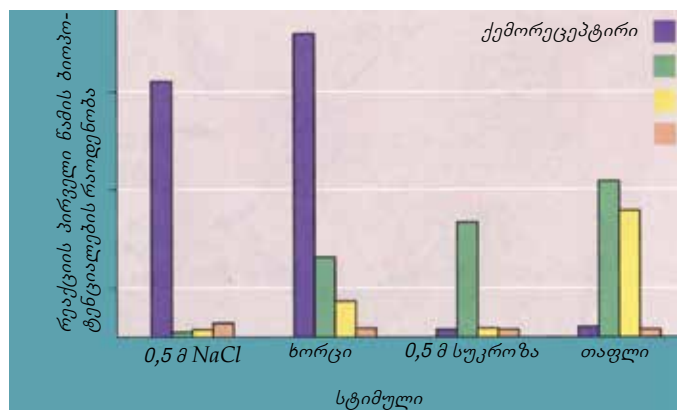
## სურათი 49.13

### კვლევა: როგორ აღგონ მჭრელები გემს?

**ექსპერიმენტი** მწერები იყენებენ მათ პირსა და ფეხში არსებულ გუსტატორულ რეცეპტორებს – სენსილურებს. თითოეული სენსილურა შეიცავს ოთხ ქემორეცეპტორს დენდრიტებით, რომლებიც სენსილურის წვერთან არსებული ფორისკენ მიემართება. თითო ქემორეცეპტორის შეგრძნების შესასწავლად, მკვლევარებმა მოახდინეს ბუზის (*Phormia Regina*) იმობილიზაცია ცვილის ჩხირზე მიკერით. შემდეგ ჩანერგეს მიკროელექტროდის წვერი ერთ სენსილურაში და პიპეტის საშუალებით სხვადასხვა ნივთიერების ფორაზე შეხებისას მოქმედების პოტენციალების აღრიცხავდნენ.



**შედეგი** თითოეული ქემორეცეპტორი ნივთიერებათა გარკვეული კლასის მიმართ არის მგრძნობიარე. მაგრამ ეს სპეციფიურობა, შეფარდებითია. თითოეულ უჯრედს შეუძლია უპასუხოს განსხვავებულ ქიმიურ სტიმულაციას გარკვეულ ფარგლებში.



**დასკვნა** ნებისმიერი ბუნებრივი საკვები ალბათ ასტიმულირებს მრავალ ქემორეცეპტორს. შეგრძნების გაერთიანების გზით, მწერის ტვინს აშკარად შეუძლია განასხვავოს გემოთა მრავალფეროვნება.

ვის ერთსა და იგივე მცირე უბანში აგზავნიან. 2004 წელს რიჩარდ აქსელმა კოლუმბიის უნივერსიტეტიდან და ლინდა ბუკმა სიეტლის ფრედ ჰატიჩინსონის სახელობის კიბოს ცენტრიდან გაიყვეს ნობელის პრემია გენებისა და რეცეპტორების იმ ჯგუფის კვლევებისთვის, რომლებიც ყნოსვის შეგრძნებაში მოქმედებენ.

თუმცა, გემოვნებისა და ყნოსვის რეცეპტორები და შესაბამისი ტვინის გზებიც დამოუკიდებელია, ეს ორი შეგრძნება ურთიერთქმედებს. მართლაც, ხშირად ის, რასაც ჩვენ გემოს ვუწოდებთ, სინამდვილეში სუნია. თუკი ყნოსვის სიტყმა ბლოკირებულია, მაგალითად, გაციებისას, გემოს აღქმა მნიშვნელოვნად არის შემცირებული.

## კონცეფცია შემოწმება 49.3

1. სად მდებარეობს ბუზის გუსტატორული სენსილები და როგორ არის ის ადაპტირებული ბუზის კვების ქცევასთან?
2. შეადარეთ სენსორული ტრანსდუქცია სიტკბოს გუსტატორულ ქემორეცეპტორებსა და ყნოსვის ქემორეცეპტორებში.

შემოთავაზებული პასუხისთვის იხილეთ დანართი.

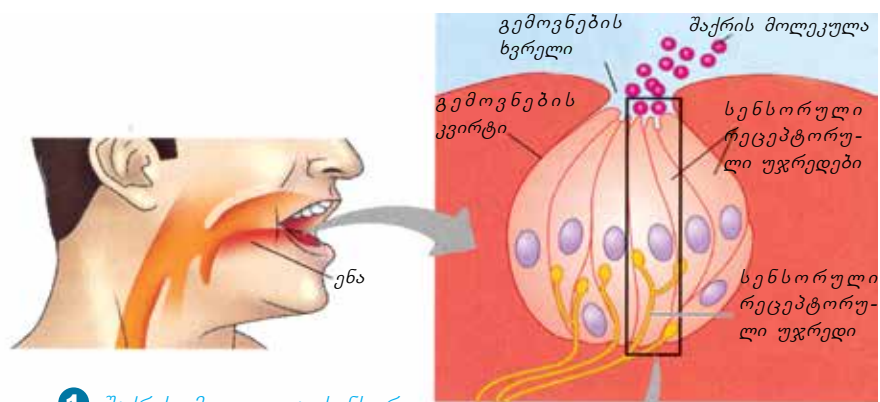
## კონცეფცია 49.4

### ცხოველთა სამყაროში მსჯელობა მსგავსი მქანნიზმები განსაზღვრავს

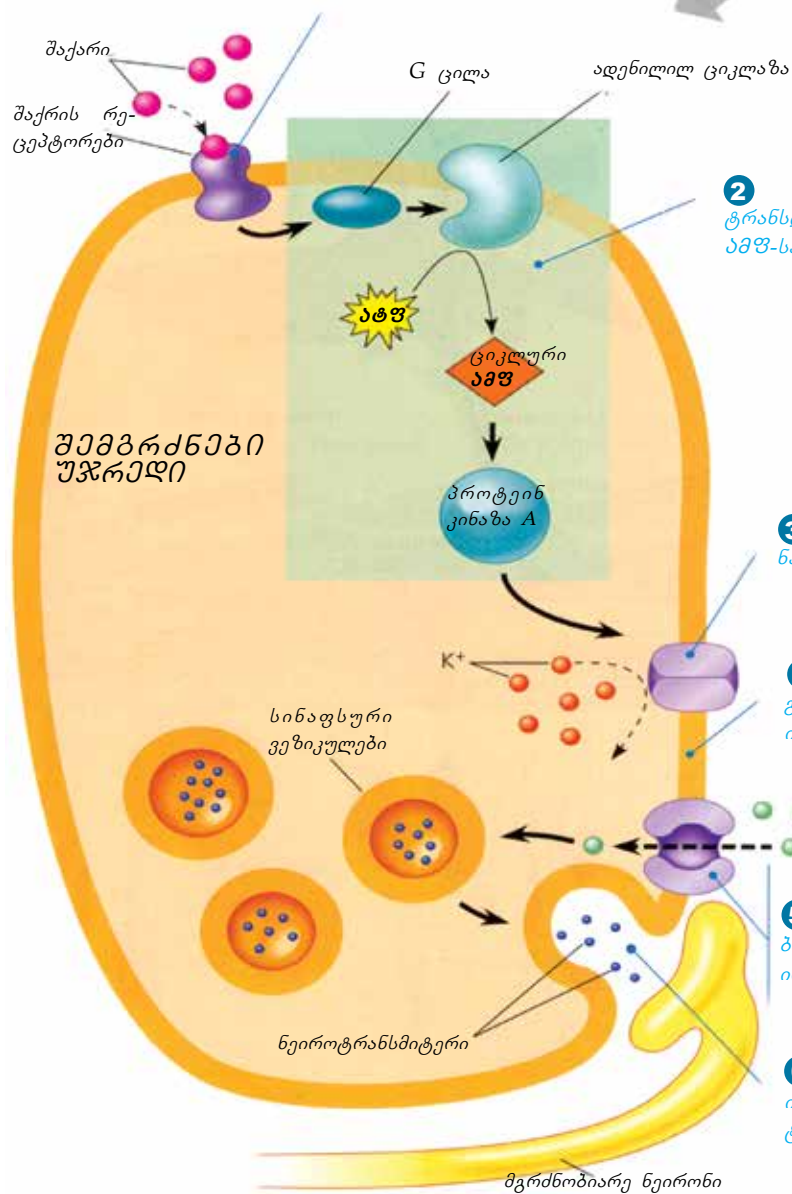
სინათლის დეტექტორების ბევრი ტიპი განვითარდა - დაწყებული უჯრედთა მარტივი კლასტრებით, რომლებიც მხოლოდ სინათლის მიმართულებასა და ინტენსივობას არჩევენ, დამთავრებული რთული ორგანოებით, რომლებიც გამოსახულებებს მთილანობაში აღიქვამენ. მიუხედავად მათი სხვადასხვაობისა, ყველა ფოტორეცეპტორი შეიცავს მსგავს პიგმენტურ მოლეკულებს, რომლებიც სინათლეს აბსორბირებს. უმეტეს, თუ არა ყველა შემთხვევაში, ფოტორეცეპტორები ჰომოლოგიურია. ისეთ განსხვავებულ ცხოველებში, როგორიცაა ბრტყელი ჭიები, ანელიდები, ფესხასსრიანები და ხერხემლიანები, ფოტორეცეპტორების ემბრიონულ განვითარებასთან დაკავშირებული მსგავსი გენები გვხვდება. ასე რომ, ყველა ფოტორეცეპტორის ზოგადი გენეტიკური მექანიზმი შესაძლოა უძველეს ბილატერულ ცხოველებში წარმოქმნილიყო. თვალების განსაკუთრებული ტიპი, რომელიც ცხოველებში ვითარდება, განვითარების ფორმაზეა დამოკიდებული. ის, თავის მხრივ, იმ გენეტიკური მექანიზმებით რეგულირდება, რომლებიც მოგვინებით განვითარდა. ხოლო, ამ მექანიზმების ეფექტები, როგორც ჩანს, საერთო წინაპარში არსებული მექანიზმებიდან მომდინარეობს.

### მსჯელობა სურსათში

უხერხემლოთა უმეტესობას სინათლის შემგრძნები ორგანო აქვს. ერთ-ერთი ყველაზე უმარტივესი არის პლანარიას თვალი,



**1** შაქრის მოლეკულა სენსორულ რეცეპტორულ უჯრედზე რეცეპტორულ ცილას უკავშირდება.



**2** დაკავშირება იწყებს სიგნალის ტრანსდუქციის გზას, რომელიც ციკლურ აფუ-სა და პროტეინკინაზა A-ს მოიცავს.

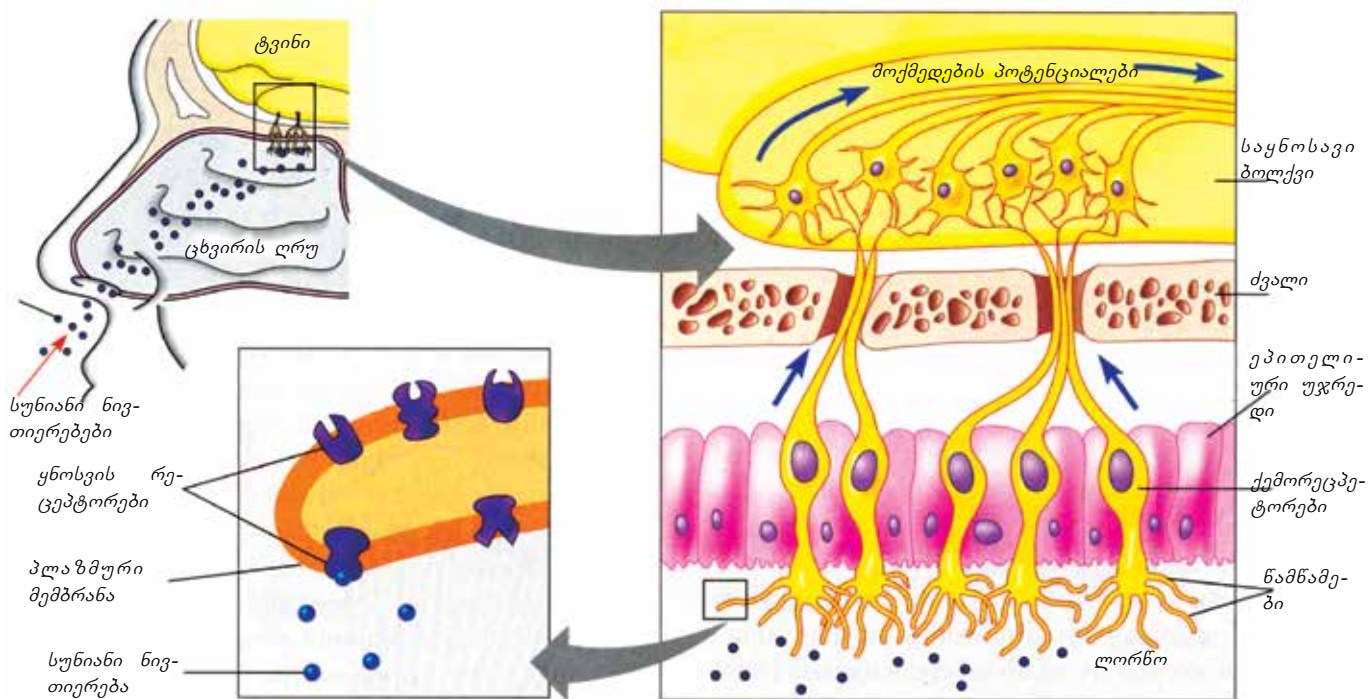
**3** გააქტივებული პროტეინკინაზა მემბრანაში არსებულ კალიუმის არხებს ხურავს.

**4** მემბრანის კალიუმის იონებისადმი განვლადობის შემცირება მის დეპოლარიზაციას იწვევს.

**5** დეპოლარიზაცია ხსნის დაბეჭდვადმოკიდებულ კალციუმის არხებს, და კალციუმის იონები უჯრედში შედის.

**6** კალციუმის გაზრდილი კონცენტრაცია იწვევს სინაფსური ვეზიკულებიდან ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლებას.

▲ სურათი 49.14 სიტკბოს რეცეპტორების მიერ სენსორული ტრანსდუქცია

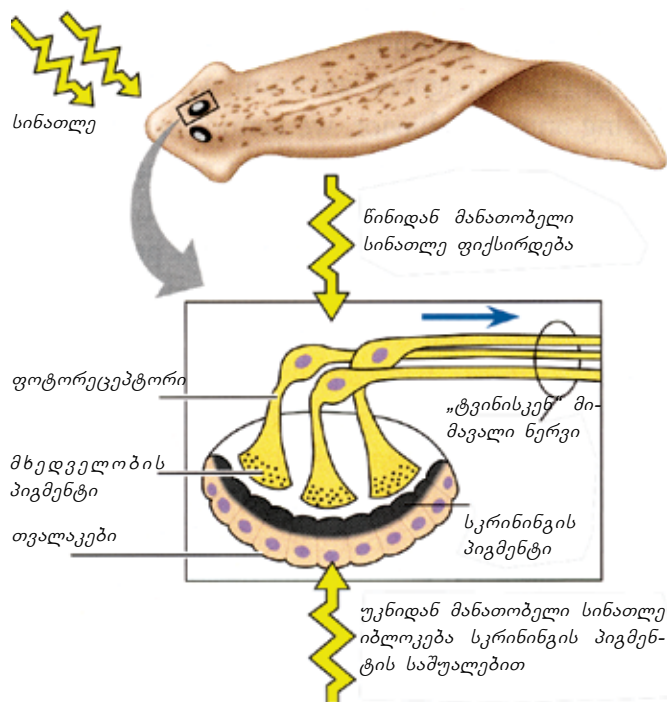


▲ **სურათი 49.15** ცნობა ადამიანებში. სუნიათი მოლეკულები ქემორეცეპტორების პლაზმურ მემბრანაში განსაკუთრებულ რეცეპტორულ ცილებს უკავშირდება და იწვევს მოქმედების პოტენციალების აღმოცენებას.

რომელიც უზრუნველყოფს ინფორმაციას სინათლის ინტენსივობისა და მიმართულების შესახებ, მაგრამ ვერ ახდენს გამოსახულების ფორმირებას (**სურათი 49.16**). მას ზოგჯერ თვალის ლაქას უწოდებენ. ის შემოფარგლავს ფოტორეცეპტორებს და წარმოიქმნება უჯრედების შრით, რომელიც სინათლის მახლოკირებელ პიგმენტს შეიცავს. სინათლე შეიძლება შევიდეს ამ მარტივ თვალში მხოლოდ ერთ მხარეს გახსნილიდან, სადაც პიგმენტი არ არის და ასტიმულიროს ფოტორეცეპტორები. ერთი თვალის ჭრილი მიმართულია მარცხნივ და ოდნავ წინ, ხოლო მეორესი - მარჯვნივ და წინ. ასე რომ, სინათლე, რომელიც ერთი მხრიდან ანათებს პლანარიას შეიძლება შევიდეს მხოლოდ იმ მხარეს არსებულ თვალში. „ტვინი“ ადარებს ორი თვალიდან მომავალი მოქმედების პოტენციალების სიხშირეს და ცხოველი ბრუნავს, სანამ სიხშირეები არ გაუტოლდება ერთმანეთს და განსხვავება მინიმალური არ გახდება. შედეგად, ცხოველი სინათლის წყაროს შორდება მანამ, სანამ მიაღწევს ჩრდილს, ქვის ან რამე სხვა ობიექტის ქვეშ. ეს არის ქცევითი ადაპტაცია, რაც ეხმარება პლანარიას მტაცებლისგან დამალვაში.

უხერხემლოებში გამოსახულების მაფორმირებელი თვალების ორი ძირითადი ტიპია: **შედგენილი თვალი** და **ერთბროლიანი თვალი**. შედგენილი თვალი მწერებს და კიბოსნაირებს გააჩნია. შედგენილი თვალი მოიცავს ათასამდე სინათლის დეტექტორს, რომელთაც **ომატიდუმებს** უწოდებენ. თითოეულს საკუთარი სინათლის მაფოკუსირებელი ლინზა აქვს (**სურათი 49.17**). ყველა ომატიდუმი ამჩნევს მხედველობის ველის უმცირესი უბნიდან წამოსულ სინათლეს. ბევრ ომატიდუმში შემავალი სინათლის ინტენსივობის მრავალფეროვნება მოზაიკურ მხედველობას განაპირობებს. ცხოველის

„ტვინი“ ხევს გამოსახულებას, როდესაც ის მხედველობითი ინფორმაციის ინტეგრაციას ახდენს. შედგენილი თვალი განსაკუთრებით მგრძნობიარეა მოძრაობის მიმართ. ეს მნიშვნელოვანი ადაპტაციაა მფრინავი მწერებისა და მცირე ზომის ცხოველებისთვის, რომლებიც მუდმივად მტაცებლის სამიშროების ქვეშ იმყოფებიან. შედარებისთვის, უნდა აღინიშნოს, რომ ადამიანის თვალს შეუძლია ერთ წამში სინათლის 50-მდე გაღებვა დაინახოს, მაშინ როცა მწერების შედგენილი თვალი წამში 330-მდე გაღებვას ამჩნევს. ასეთი მწერი ფილმის ყურებისას ადვილად გააჩნევდა ფირის ყოველ ჩარჩოს, ისევე როგორც ცალკეულ გამოსახულებას. მწერებს ასევე შესანიშნავი ფერადი მხედველობა აქვთ, და ზოგ მათგანს (მათ შორის ფუტკარს) შეუძლია ელექტრომაგნიტური სპექტრის ულტრაიისფერი სხივების დანახვა, რაც ჩვენთვის შეუძლებელია. ცხოველთა ქცევის შესწავლისას ჩვენ არ შეგვიძლია ჩვენი სენსორული სამყაროს ექსტრაპოლაცია მოვახდინოთ სხვა სახეობაზე; განსხვავებულ ცხოველებს განსხვავებული შეგრძნებები და ტვინი აქვთ. უხერხემლოთა შორის, ერთბროლიანი თვალი ნანახია ბევრ მოლუსკში. ერთლინზიანი თვალი მუშაობს კამერის მსგავსი პრინციპით. მაგალითად, რვაფეხას თვალს პატარა გუგა აქვს, რომლის საშუალებითაც შედის სინათლე. კამერის აპერტურის მსგავსად, ფერადი გარსი ცვლის გუგის დიამეტრს. გუგის უკან, ერთი ბროლი ფოტორეცეპტორების შრეზე სინათლეს აფოკუსირებს. ასევე, კამერის მოქმედების მსგავსად, უხერხემლოთა ერთბროლიანი თვალის კუნთებს გადააქვთ ბროლი წინ ან უკან, რათა სხვადასხვა დისტანციაზე მყოფი ობიექტების ფოკუსირება მოხდეს.



▲ **სურათი 49.16** თვალაკი და პლანარიას ორიენტაციული ქცევა. „ტვინი“ აიძულებს სხეულს იბრუნოს, მანამ სანამ ორი ოცელუსიდან შეგრძნება გატოლდება და მინიმალური ხდება, რაც ცხოველის სინათლისგან დამალვას იწვევს.

## სქრხმლიანთა მხედველობის სისცმა

უხერხემლოთა ერთბროლიანი თვალის მსგავსად, ხერხემლიანთა თვალებიც კამერის მაგვარია, მაგრამ ისინი დამოუკიდებლად განვითარდნენ და რამდენიმე დეტალით განსხვავდებიან უხერხემლოთა თვალებისგან. თუმცა, თვალი მხედველობაში პირველი სტადიაა, უნდა გვახსოვდეს, რომ „ხედავს“ თვალი კი არა, არამედ უშუალოდ ტვინი. ასე, რომ გავიგოთ რა არის მხედველობა ჩვენ უნდა გამოვიკვლიოთ, თუ როგორ წარმოქმნის ხერხემლიანთა თვალი შეგრძნებას (მოქმედების პოტენციალებს). შემდეგ გავყვეთ ამ სიგნალებს ტვინის მხედველობის ცენტრისკენ, სადაც გამოსახულებების აღქმა ხდება.

### თვალის სტრუქტურა

ხერხემლიანთა თვალის კაკალი შედგება მკვრივი თეთრი გარეთა შემაერთებელი ქსოვილის შრისგან, რომელსაც სკლერა ეწოდება და თხელი პიგმენტური შიდა შრისგან, რომელსაც ქოროიდს უწოდებენ (**სურათი 49.18**). ეპითელიური უჯრედების თხელი შრე ქმნის ლორწოვან მემბრანას კონიუქტივას, რომელიც ფარავს სკლერას გარეთა ზედაპირს და უნარჩუნებს თვალს სინოტივს. თვალის წინ სკლერა გამჭვირვალე ხდება და გადადის რქოვანაში. იგი უშვებს სინათლეს თვალში და მოქმედებს როგორც ფიქსირებული ლინზა. წინა ქოროიდი ქმნის ფერად გარსს – ირისს, რომელიც თვალს ფერს ანიჭებს. ზომის შეცვლით ირისი არეგულირებს გუგაში (ირისის ცენტრში არსებულ ხვრელში) შემავალი სინათლის რა-

ოდენობას. ქოროიდის შიგნით, რეტინა ანუ ბადურა ქმნის თვალის კაკლის შიდა შრეს და შეიცავს ფოტორეცეპტორებს. ფოტორეცეპტორებიდან ინფორმაცია თვალს ოპტიკური ნერვის საშუალებით ტოვებს. იგი გამოდის უბნიდან, რომელსაც ოპტიკურ დისკს უწოდებენ. რამდენადაც ოპტიკურ დისკში ფოტორეცეპტორები არ არის, ეს ლაქა რეტინაზე „ბრმა ლაქის“ სახელითაა ცნობილი: სინათლე, რომელიც რეტინას ამ უბანზე ფოკუსირდება, არ ფიქსირდება.

ბროლი და წამწამოვანი სხეული ყოფს თვალს ორ საკნად, წინა მოიცავს რქოვანასა და ბროლს შორის სივრცეს, ხოლო უკანა გაცილებით უფრო დიდია და ბროლის უკან არის მოთავსებული. წამწამოვანი სხეული მუდმივად წარმოქმნის გამჭვირვალე წყლის-მაგვარ სითხეს, რომელიც ავსებს წინა საკანს. იმ არხების ბლოკირება, რომლებიც სითხეს ატარებს, გლაუკომა იწვევს. გლაუკომა არის მდგომარეობა, როდესაც გაზრდილი წნევა აწევა ბადურას და იწვევს სიბრმავეს. უკანა საკანი ჟელესმაგვარი სითხით არის სავსე და შეადგენს თვალის თითქმის მთელ მოცულობას. წყლისა და ჟელესმაგვარი სითხეები ფუნქციონირებს როგორც ლინზები და ეხმარება ბადურაზე სინათლის ფოკუსირებას. ბროლი გამჭვირვალე ცილოვანი დისკია. კალმარისა და რვაფეხების მსგავსად ბევრი თევზი ფოკუსისთვის ბროლს ამოძრავებენ წინ და უკან ისე, როგორც კამერაში. ადამიანებსა და სხვა ძუძუმწოვრებში ფოკუსირებისთვის ბროლის ფორმა იცვლება (**სურათი 49.19**). როდესაც ახლოსმყოფ საგნებზე ხდება ფოკუსირება, ბროლი თითქმის სფერული ხდება. როდესაც შორსმყოფ საგნებზე ხდება ფოკუსირება, ბროლი ბრტყელდება. აღნიშნულ ცვლილებებს აკომოდაციას უწოდებენ.

ადამიანის ბადურა შეიცავს დაახლოებით 125 მილიონ ჩხირს და 6 მილიონ კოლბას, ესენი ფოტორეცეპტორებია და სახელი ფორმიდან გამომდინარე მიიღეს. ეს უჯრედები სხეულში არსებული ყველა სენსორული რეცეპტორის 70%-ს შეადგენს. ეს ფაქტი ხაზს უსვამს თვალისა და ვიზუალური ინფორმაციის როლს ადამიანებისთვის გარე სამყაროს აღქმაში.

ჩხირებსა და კოლბებს მხედველობაში განსხვავებული ფუნქციები აქვთ. ამ ორი ფოტორეცეპტორის შეფარდებითი რაოდენობა შეესაბამება იმას, ცხოველი უფრო მეტად დღისით არის აქტიური თუ ღამით. ჩხირები უფრო მგრძნობიარეა სინათლის მიმართ, მაგრამ ვერ არჩევენ ფერებს; ისინი გვაძლევს შესაძლებლობას დავინახოთ ღამით, მაგრამ მხოლოდ შავ-თეთრად. რამდენადაც კოლბები ნაკლებად მგრძნობიარენი არიან, ისინი ნაკლებ მონაწილეობას იღებენ ღამის მხედველობაში, მაგრამ მათ შეუძლიათ დღის სინათლეზე ფერების გარჩევა. ფერადი მხედველობა ხერხემლიანთა ყველა კლას შიგნით ნაპოვნი, თუმცა არა ყველა სახეობაში. უმეტეს თევზს, ამფიბიას, ქვეწარმავალს და ფრინველს აქვს ძლიერი ფერადი მხედველობა, მაგრამ ადამიანები და სხვა პრიმატები ძუძუმწოვართა კლასიდან ამ თვისებით უმცირესობაშია. ბევრი ძუძუმწოვარი ღამის ცხოველია. მათ ბადურაში ჩხირების მაქსიმალური რაოდენობა აქვთ, რაც ამ ცხოველებს ღამის კარგ მხედველობას ანიჭებს. მაგალითად, კატები განსაკუთრებით აქტიურები ღამით არიან; მათ შეზღუდული ფერადი მხედველობა აქვთ და დღისით სამყაროს პასტელის ფერებში ხედავენ. ადამიანის თვალში ჩხირები უდიდესი სიხშირით პერიფერიულ უბნებში გვხვდება და ფოვიაში საერთოდ არ არის (**იხილეთ სურათი 49.18**).

ადამიანს არ შეუძლია მციმციმე ვარსკვლავის დანახვა თუკი მას პირდაპირ უყურებს, რამდენადაც ვარსკვლავის გამოსახულებ-

ბა ფოვებაში ფოკუსირდება; თუკი ვარსკვლავს გარკვეული კუთხით შევხედავთ, ისე, რომ გამოსახულების ფოკუსირება ბადურას ჩხირებიან ნაწილზე მოხვდეს, მაშინ მას დავინახავთ. დღის სინათლეზე ადამიანი საუკეთესო მხედველობას აღწევს თუკი ობიექტს პირდაპირ უყურებს, რამდენადაც კოლებში ფოვებაშია თავმოყრილი, სადაც დაახლოებით 150,000 კოლბაა ერთ კვადრატულ მილიმეტრზე. ზოგ ფრინველს ერთ კვადრატულ მილიმეტრზე მილიონზე მეტი კოლბა აქვს, რაც ისეთ ფრინველებს, როგორიცაა მაგალითად ძეწა, საშუალებას აძლევს თავგები და სხვა მცირე ზომის მსხერპელი მალეა ციდან დაინახოს. ბადურაში, ისევე როგორც ყველა ბიოლოგიურ სტრუქტურაში, ვარიაციები ევოლუციური ადაპტაციების გამოხატულებაა.

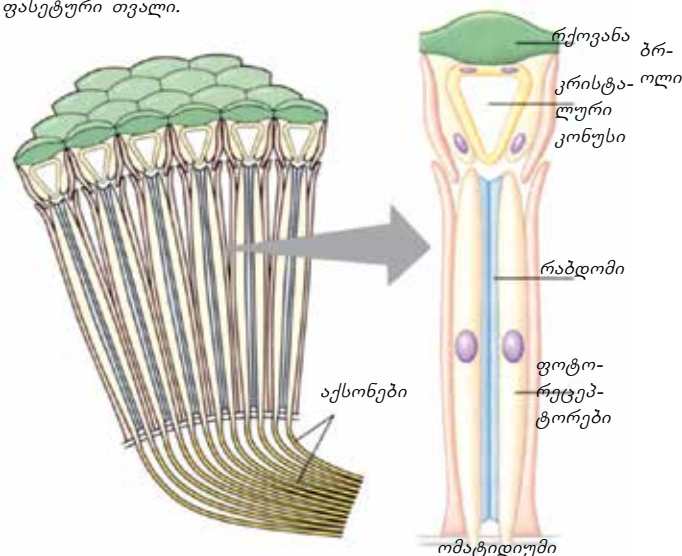
## სენსორული ტრანსდუქცია თვალში

ყოველი ჩხირი თუ კოლბა ხერხემლიანების თვალში შეიცავს მხედველობის პიგმენტს, რომელიც შედგება სინათლის მშთანთქმელი მოლეკულის – რეტინალისგან (ვიტამინ A – ს ნაწარმისგან) და მასთან დაკავშირებული მემბრანულ ცილა – ოპსინისგან. ოპსინის სტრუქტურა იცვლება ერთი ტიპის ფოტორეცეპტორიდან მეორემდე, ხოლო რეტინალის სინათლის შთანთქმის უნარი მნიშვნელოვანი გავლენის ქვეშ იმყოფება მასთან დაკავშირებული ოპსინის იდენტურობით. ჩხირებს ერთი ტიპის ოპსინი აქვთ, რომელიც რეტინალთან კომბინაციაში წარმოქმნის მხედველობის პიგმენტ როდოპსინს. იმისთვის, რომ გავიგოთ ჩხირების სტრუქტურასა და სინათლის აბსორბციას შორის დამოკიდებულება, უნდა განვიხილოთ **სურათი 49.20**.

როგორც **სურათი 49.20** აჩვენებს, როდოპსინი იცვლის ფორმას სინათლის შთანთქმისას, ამ პროცესს „გაუფერულებას“ უწოდებენ. კაშკაშა სინათლე როდოპსინს გაუფერულებულს ინარჩუნებს და ჩხირები აღარ პასუხობენ. როდესაც ადამიანი გადადის განათებული გარემოდან ბნელში, ისევე როგორც მზიან დღეს კინოთეატრში შესვლისას, ის დასაწყისში თითქმის ბრმაა. ძალიან მცირე სინათლეა იქ იმისთვის, რომ კოლებების სტიმულაცია მოხდეს. სულ მცირე, რამდენიმე წუთია საჭირო გაუფერულებული ჩხირებისთვის, რომ ისინი კვლავ სრულიად პასუხისუნარიანი გახდნენ. ფერადი მხედველობა კიდევ უფრო რთულ სასიგნალო პროცესს მოიცავს, ვიდრე როდოპსინის მექანიზმი ჩხირებში. ბადურაში კოლებების სამ კლასს გამოყოფენ – წითელს, მწვანესა და ლურჯს – ყველა მათგანი შეიცავს მისი საკუთარი ტიპის ოპსინს, რომელიც დაკავშირებულია ბადურის მხედველობის პიგმენტთან. კოლებებში მხედველობის სამ პიგმენტს ერთად ფოტოპსინებს უწოდებენ. ყველა კოლბას სახელი შეესაბამება იმ ფერს, რომლის აბსორბციაც საუკეთესოდ ხდება მასში არსებული ფოტოპსინის საშუალებით. მხედველობის ამ პიგმენტებს ურთიერთგადამფარავი აბსორბციის სპექტრები აქვთ. ტვინის მიერ შუალედური ფერების აღქმა დამოკიდებულია კოლებების ორი ან მეტი ჯგუფის განსხვავებულ სტიმულაციაზე. მაგალითად, როდესაც მწვანე და წითელი კოლებები სტიმულირდება, ჩვენ შესაძლოა ყვითელი ან ნარინჯისფერი დავინახოთ, იმაზე დამოკიდებულებით, თუ რომელი კლასის რეცეპტორებია უფრო მეტად სტიმულირებული. ფერების სიბრმავე, რომელიც მამაკაცებში უფრო ხშირია, რამდენადაც სქესთან არის შეჭიდული (**იხილეთ სურათი 15.9**), ერთი ან რამდენიმე ტიპის ფოტოპსინის ნაკლებობის ან არარსებობის შედეგია.



(ა) სტერეომიკროსკოპით გადაღებული ბუზის თავზე არსებული ფასეტური თვალი.

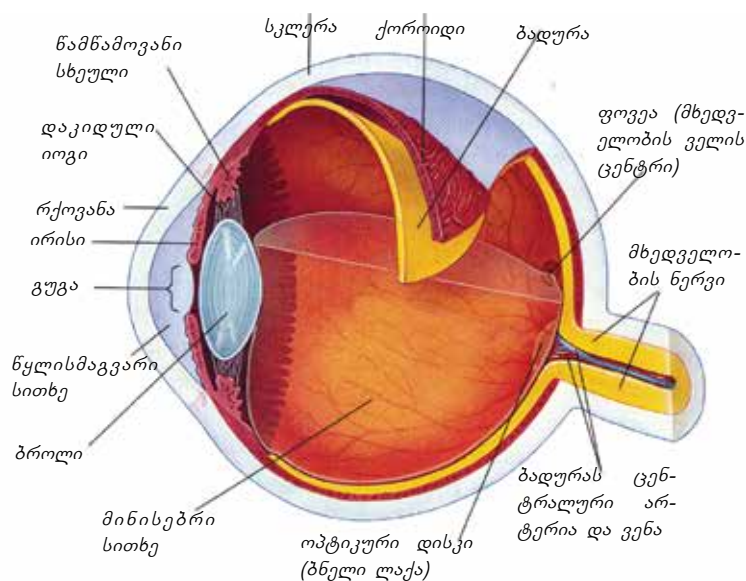


(ბ) თითოეული ომატიდუმის რქოვანა და კრისტალისმაგვარი კონუსი ფუნქციონირებს როგორც ბროლი, რომელიც სინათლეს რაბდომზე აფოკუსირებს. ეს არის მრგვალ ფოტორეცეპტორებში არსებული პიგმენტური ფირფიტა. რაბდომი იჭერს სინათლეს და გზას უჩვენებს ფოტორეცეპტორისკენ. რთული თვალით შექმნილი გამოსახულება არის მოზაიკური და შედგება განსხვავებული ინტენსივობის სინათლის ლაქებისგან, რომელიც სხვადასხვა კუთხით ამა თუ იმ ომატიდუმში შედის.

▲ **სურათი 49.17** რთული თვალი.

## მხედველობითი ინფორმაციის გადამუშავება

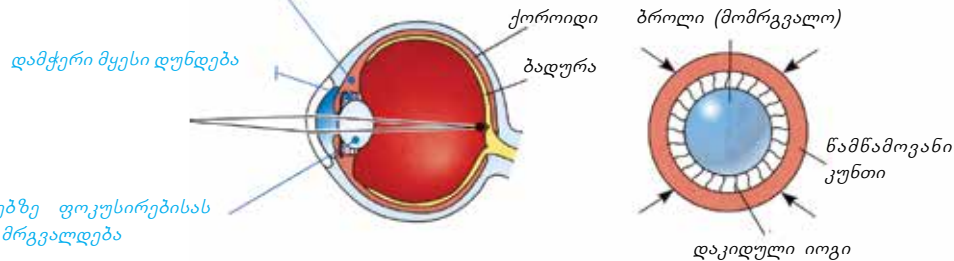
მხედველობითი ინფორმაციის გადამუშავება იწყება საკუთრივ ბადურაში, სადაც ჩხირებს და კოლებს აქვთ სინაპსები ბიპოლარულ უჯრედებზე. სიბნელეში ჩხირები და კოლები დეპოლარიზებულია. ისინი სინაფსებში მუდმივად გამოყოფენ ნეირომედიატორ გლუტამატს (**იხილეთ ცხრილი 48.1**). სიბნელეში გლუტამატის ამგვარი გამოყოფა იწვევს ზოგი ბიპოლარული უჯრედის დეპოლარიზაციას და სხვების ჰიპერპოლარიზაციას იმისდამხედვით, როგორი გლუტამატის რეცეპტორები გააჩნიათ აღნიშნულ ნეირონებს (**სურათი 49.21**). სინათლეში ჩხირები და კოლები ჰიპერპოლარიზდებიან და წყვეტენ გლუტამატის გამოყოფას. ამის პასუხად, ბიპოლარული უჯრედები, რომლებიც დეპოლარიზებული იყვნენ გლუტამატით, ჰიპერპოლარიზდებიან და ისინი, რომლებიც გლუტამატით ჰიპერპოლარიზდებიან იყვნენ,



▲ **სურათი 49.18 ხერხემლიანთა თვალის სტრუქტურა.** თვალის სიგრძე ჭრილში, ჟელესმაგვარი მინისებური სითხე მხოლოდ თვალის კაკლის ქვედა ნახევარშია ილუსტრირებული. ღორწოვანი მემბრანა, რომელიც სკლერას აკრავს გარსს და, რომელსაც კონიუქტივა ეწოდება არ არის ნაჩვენები.

წამწამოვანი კუნთი იკუმშება და თვალის ძარღვოვანი გარსის საზღვარი ბროლს უახლოვდება

**ბროლისა და წამწამოვანი კუნთის წინა ხედი,**



ახლომდებარე საგნებზე ფოკუსირებისას ბროლი სქელდება და მრგვალდება

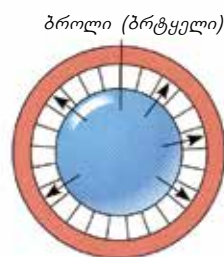
**(ა) ახლოს მხედველობა (აკომოდაცია)**

წამწამოვანი კუნთები ღუნდება და თვალის ძარღვოვანი გარსის საზღვარი ბროლს შორდება.

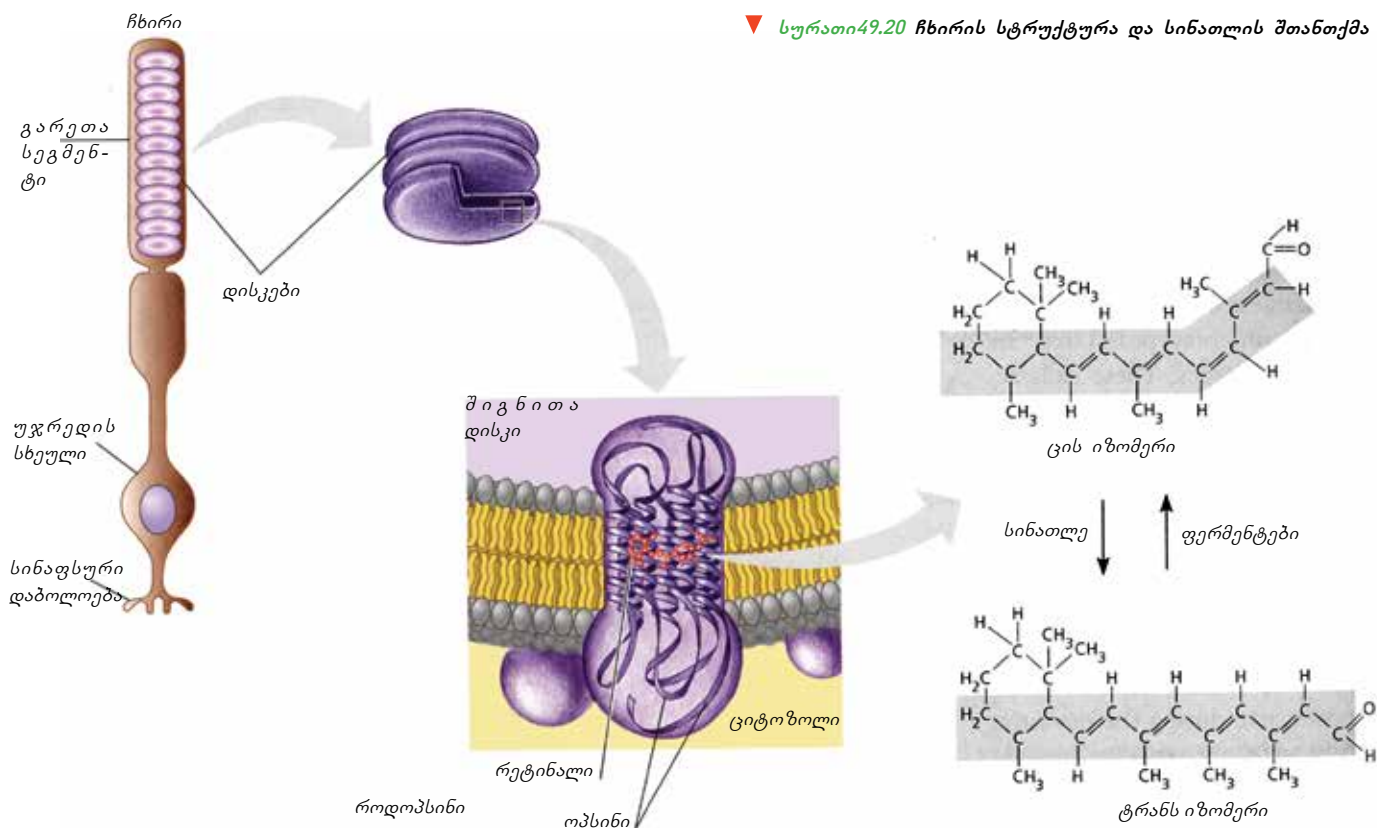
დამჭერი მყესი იჭიმება და ბროლი იკუმშება

ბროლი ბრტყელდება და მოშორებულ ობიექტებზე ფოკუსირდება

**(ბ) შორს მხედველობა**



▲ **სურათი 49.19 ფოკუსირება ძუძუმწოვართა თვალში.** წამწამოვანი კუნთები აკონტროლებენ ბროლის ფორმას, რომელიც გარდატეხს სინათლეს და აფოკუსირებს მას ბადურაზე. რაც უფრო მსხვილია ბროლი მით უფრო მკვეთრად ხდება სინათლის გარდატეხა



(ა) ჩხირები შეიცავენ მხედველობის პიგმენტ როდოპსინს, რომელიც ჩხირის ფარეფა სეგმენტის მემბრანულ დისკშია მოთავსებული. როდოპსინი შედგება სინათლის მშთანთქმელი მოლეკულა რეტინალისა და მასთან დაკავშირებული ოპსინისგან. ოპსინის შვიდი  $\alpha$  ჯაჭვი აქვს, რომელიც დისკის მემბრანას უკავშირდება.

დეპოლარიზდებიან (სურათი 49.22). დამატებით, ნეირონთა სამი სხვადასხვა ტიპი იღებს მონაწილეობას ბადურაში ინფორმაციის გადამუშავებაში. განგლიოზური უჯრედები, ჰორიზონტალური უჯრედები და ამაკრინული უჯრედები (სურათი 49.23).

განგლიოზური უჯრედები სინათლეს წარმოქმნიან ბიპოლარულ უჯრედებზე და გადასცემენ მოქმედების პოტენციალებს ოპტიკური ნერვის აქსონებით ტვინს. ჰორიზონტალური და ამაკრინული უჯრედები ეხმარებიან ინფორმაციის ინტეგრაციას, სანამ ისინი ტვინისკენ გადაიგზავნება.

ჩხირებიდან და კოლბებიდან ბადურაში სიგნალი შეიძლება გაჰყვეს ვერტიკალურ ან ლატერალურ გზას. ვერტიკალურ გზაში ინფორმაცია გადაეცემა უშუალოდ ფოტორეცეპტორებიდან ბიპოლარულ და განგლიოზურ უჯრედებს. ლატერალურ გზაში, ჰორიზონტალურ უჯრედებს მიაქვთ სიგნალი ერთი ჩხირიდან, ან ერთი კოლბიდან სხვა ფოტორეცეპტორებისკენ და რამდენიმე ბიპოლარული უჯრედებისაკენ. ამაკრინული უჯრედები ანაწილებენ ინფორმაციას ერთი ბიპოლარული უჯრედიდან რამდენიმე განგლიოზური უჯრედისკენ. როდესაც განათებული ჩხირი ან კოლბა ასტიმულირებს ჰორიზონტალურ უჯრედს, ჰორიზონტალური უჯრედი აკავებს უფრო შორს მყოფ ფოტორეცეპტორებსა და ბიპო-

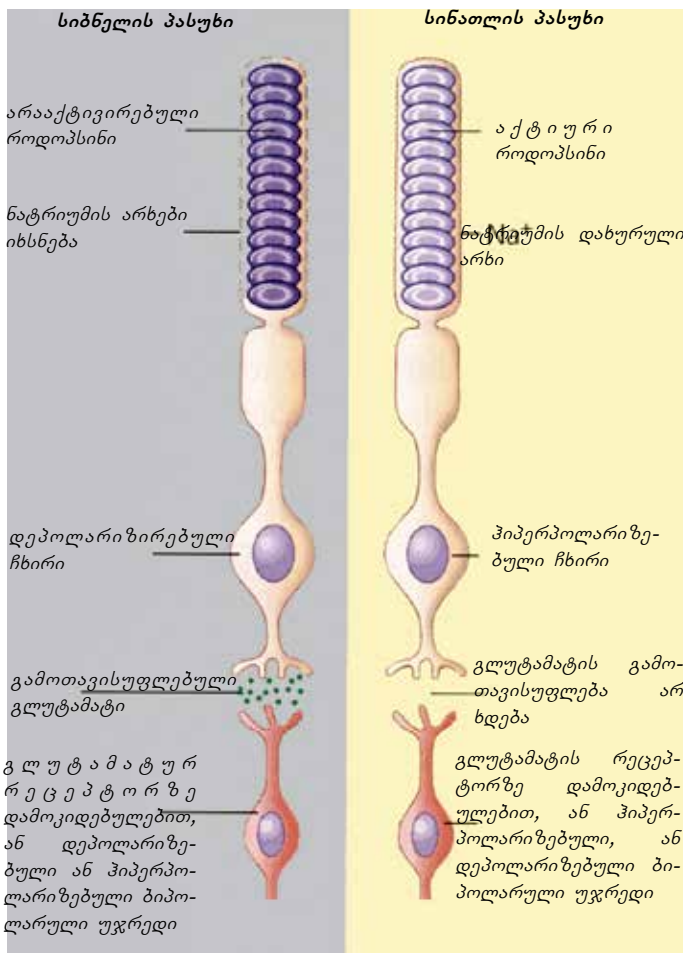
(ბ) რეტინალი ორი იზომერის სახით არსებობს. სინათლის შთანთქმა გარდაქმნის ცის იზომერს ტრანს ფორმად, რაც იწვევს ოპსინის კონფორმაციის შეცვლას. რამდენიმე წუთში, რეტინალი სცილდება ოპსინს. სიბნელეში, ფერმენტები ისევ გარდაქმნიან რეტინალს უკან თავის მდგომარეობაში, რომლის შედეგადაც ხელახლა უკავშირდება ოპსინს და ქმნის როდოპსინს.

ლარულ უჯრედებს, რომლებიც არ არიან განათებული, რაც უზრუნველყოფს იმას, რომ სინათლის ლაქა უფრო მკვეთრი გამოჩნდება, ხოლო ბნელი შემოგარენი კიდევ უფრო ბნელი.

ინტეგრაციის ეს ფორმა ლატერალური შეკავების სახელით არის ცნობილი. ამკვეთრებს რა, კიდევს და აძლიერებს გამოსახულების კონტრასტს. ლატერალური შეკავება მეორდება ამაკრინულ უჯრედებსა და განგლიოზურ უჯრედებს შორის ურთიერთქმედებით და გამოვლინდება ტვინში მხედველობის ინფორმაციის გადამუშავების ყველა საფეხურზე.

ყველა ჩხირი და კოლბა, რომლებიც აწვდის ინფორმაციას ერთ განგლიოზურ უჯრედს ამ უჯრედისთვის მიმღებ ველს ქმნის. უფრო დიდი მიმღები ველი (რომელშიც მეტი ჩხირი და კოლბა ამარაგებს განგლიოზურ უჯრედებს) ნაკლებად მკვეთრ გამოსახულებას აყალიბებს, ვიდრე პატარა მიმღები ველი, რადგანაც დიდი ველი უზრუნველყოფს ნაკლებ ინფორმაციას იმის შესახებ, თუ სად დაეცა ბადურას სინათლე. ფოვეას განგლიოზურ უჯრედებს ძალიან პატარა მიმღები ველები აქვთ, ასე რომ ვიზუალური სიზუსტე ფოვეაში მაღალია.

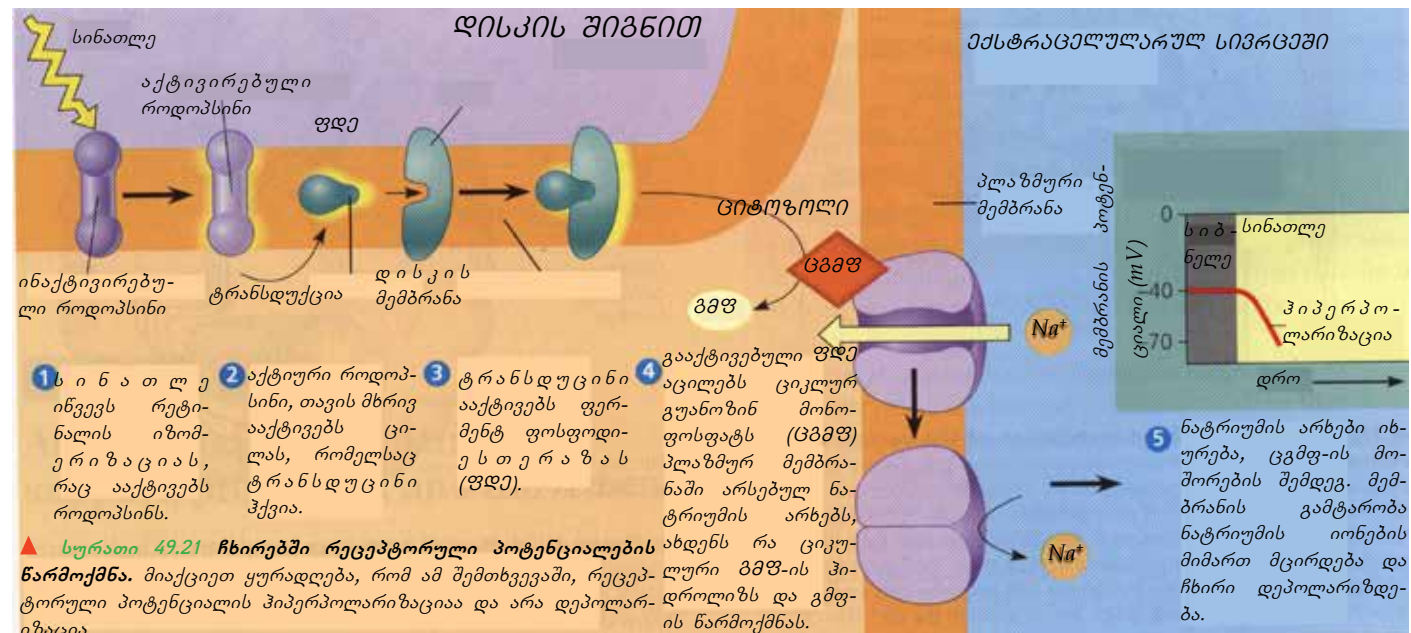
განგლიოზური უჯრედების აქსონები ოპტიკურ ნერვს ქმნის, რომელიც შეგრძნებას თვალელებიდან ტვინისკენ ატარებს (სურა-

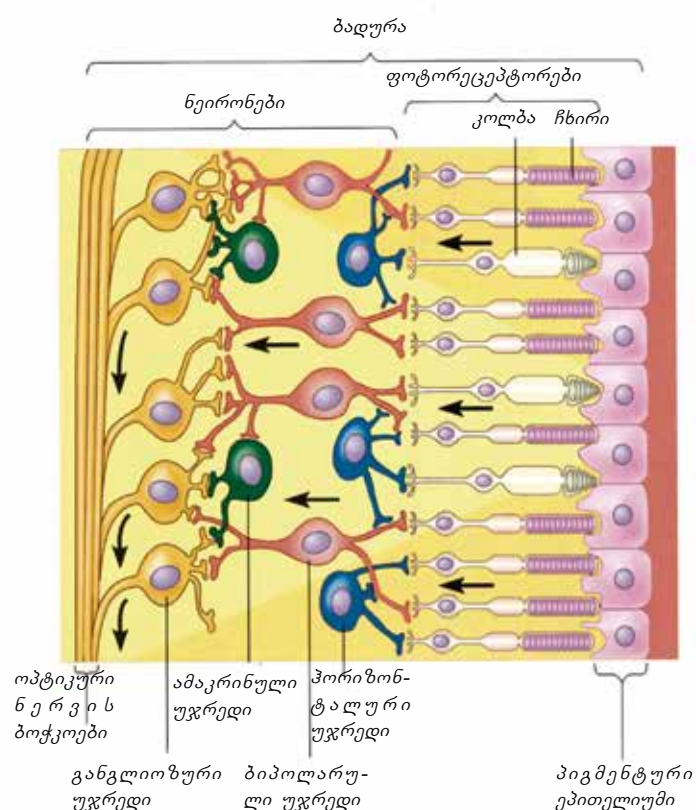
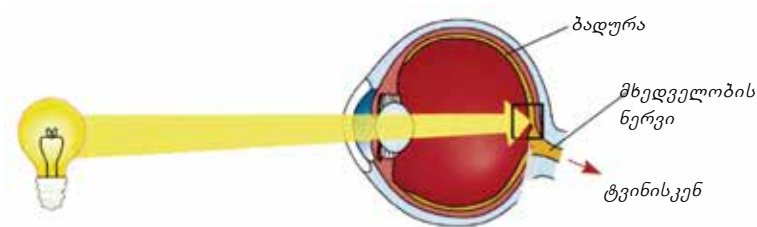


▲ სურათი 49.22 სინაპსის ეფექტი ჩხირებსა და ბიპოლარულ უჯრედებს შორის არსებულ სინაპსებზე.

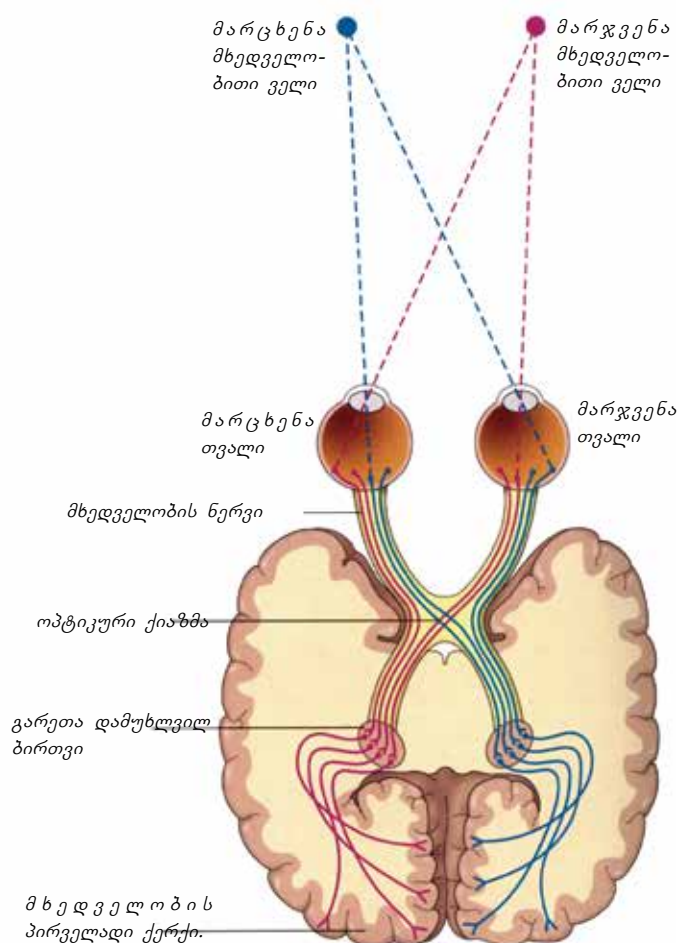
თი 49.24). ორი ოპტიკური ნერვი ხვდება მხედველობის ქიაზმაში დიდი ნახევარსფეროების ქერქის ფუძის ცენტრთან ახლოს. ოპტიკურ ნერვში აქსონები ორიენტირებულია ისე, რომ ორივე თვალის მარცხენა ნაწილიდან წამოსული შეგრძნება გადაეცემა ტვინის მარჯვენა ნაწილს და მარჯვენა ნაწილიდან წამოსული მხედველობითი შეგრძნება გადაეცემა ტვინის მარცხენა ნაწილს. უმეტესი განგლიოზური უჯრედის აქსონი მიდის თალამუსის გარეთა დამუხლავ ბირთვთან (გდმ). ნეირონები გდმ-დან ინფორმაციას აგზავნიან პირველად მხედველობით ქერქში, რომელიც დიდი ნახევარსფეროების კეფის წილში მდებარეობს. ქერქის ინტერნეირონები ატარებს ინფორმაციას ქერქში არსებულ უფრო მაღალი რიგის ვიზუალური ინფორმაციის გადამამუშავებელი და მაინტეგრირებელი ცენტრებისკენ.

მხედველობის ველის ინფორმაცია ნეირონების გავლით მხედველობის ქერქში წერტილ-წერტილ პროეცირდება. ბადურაზე ფოკუსირებული ორგანოზომილებიანი გამოსახულებიდან როგორ გარდაქმნის ქერქი მოქმედების პოტენციალების რთულ ჯგუფს და წარმოქმნის სამგანზომილებიან აღქმას? მკვლევარების შეფასებით დიდი ნახევარსფეროების ქერქის სულ მცირე 30% – ასობით მილიონი ინტერნეირონი უამრავ საინტეგრაციო ცენტრში – იღებს მონაწილეობას იმაში, რასაც ჩვენ რეალურად ვხედავთ. იმის განსაზღვრა, თუ როგორ ახერხებს ეს ცენტრები ისეთი კომპონენტების ინტეგრაციას, როგორიცაა ფერი, მოძრაობა, სიღრმე, ფორმა დეტალები სწრაფადგანვითარებადი და ამაღლებელი კვლევის საგანს წარმოადგენს.





▲ **სურათი 49.23 ხერხემლიანთა ბადურას უჯრედული ორგანიზაცია.** სინათლემ უნდა გაიაროს რამდენიმე შედარებით გამჭვირვალე უჯრედების შრე, სანამ ჩხირებსა და კოლბებს მიაღწევს. ეს ფოტორეცეპტორები ურთიერთობენ ბიპოლარული და განგლიოზური უჯრედების საშუალებით, რომელთა აქსონები ატარებენ მხედველობის შეგრძნებას (მოქმედების პოტენციალებს) ტვინისკენ. თითოეული ბიპოლარული უჯრედი იღებს ინფორმაციას რამდენიმე ჩხირისა და კოლბისგან, და თითოეული განგლიოზური უჯრედი რამდენიმე ბიპოლარული უჯრედისგან. ჰორიზონტალური და ამაკრინული უჯრედები ბადურის გასწვრივ ახდენენ ინფორმაციის ინტეგრაციას. შავი ისრები მიუთითებს მხედველობითი ინფორმაციის გზას ფოტორეცეპტორებიდან ოპტიკურ ნერვამდე.



▲ **სურათი 49.24 მხედველობის ნეირონული გზები.** ყველა ოპტიკური ნერვი შედგება მილიონი აქსონისგან, რომლებიც გარეთა დამუხლვილ ბირთვთან სინაფსებს წარმოქმნიან. ეს ბირთვები გადართავენ სიგნალს პირველად მხედველობით ქერქზე. იგი იმ ბევრ უბნათაგან ერთ-ერთია, რომელიც მხედველობითი აღქმის ჩამოყალიბებაში იღებს მონაწილეობას.

## კანცეფცია შემოწმება 49.4

1. განასხვავეთ პლანარიას და ბუზის სინათლის შემგრძნები ორგანოები. როგორ ადაპტირდებიან ისინი ცხოველის ცხოვრების სტილთან?
2. პრესბიოპიის პირობებში, თვალის ბროლი კარგავს ელასტიკურობას და ინარჩუნებს მუდმივ, ბრტყელ ფორმას. ახსენით, როგორ გავლენას მოახდენდა ეს ადამიანის მხედველობაზე.
3. ბადურაში ვერტიკალურ გზაზე კონცენტრირებით, ახსენით, როგორ იწვევს ფოტორეცეპტორის ილუმინაცია მოქმედების პოტენციალების გაზრდილ სიხშირეს განგლიოზურ უჯრედებში.

## კანცეფცია 49.5

### ცხოველების ჩონჩხი ასტოლვის, საყრდენ, დამცველობით და მოძრაობის ფუნქციებს

სენსორული სისტემის მიმოხილვისას, ვნახეთ, რამდენიმე მაგალითი იმის თაობაზე, თუ როგორ განაპირობებს ამა თუ იმ სპეციფიურ ქცევას ნერვული სისტემის სენსორული შესავალი: ჩრჩილის გაქცევის მანევრირება, როცა მას ღამურას სონარის ხმა ესმის, ჰიდრას კვებითი მოძრაობები, როდესაც ის გლუტათიონის გემოს შეიგრძნობს და პლანარიას განრიდება სინათლისგან. ცხოველთა ქცევა მოიცავს რთულ ციკლს. იგი შედგება ტვინის ოპერაციებისგან, რომლებიც ქცევას აყალიბებს, აღრიცხავს ქცევის შედეგებს სენსორული შესავლით და იყენებს აღნიშნულ შესავალს რათა განსაზღვროს შემდეგი მოქმედება. ქცევის სხვადასხვა ფორმებს ცხოველებში საერთო განმსაზღვრელი ფუნდამენტური მექანიზმები აქვთ. ცურვა, ხოხვა, ხტუნვა და ფრენა, ყველა ეს მოძრაობა დაკავშირებულია ამა თუ იმ ტიპის ჩონჩხის კუნთების მუშაობასთან.

### ჩონჩხის ციპები

ჩონჩხის სამი მთავარი ფუნქცია არის საყრდენი, დამცველობითი და მამოძრავებელი. ხმელეთის ცხოველების უმეტესობას ჩონჩხი რომ არ ჰქონოდა საყრდენად, საკუთარი წონის გამო დაიკეცებოდა. ასევე წყალში მცხოვრები ცხოველებიც უფრომო მასები იქნებოდნენ, ჩარჩო რომ არ ჰქონოდათ ფორმის შესანარჩუნებლად. ბევრ ცხოველში მაგარი ჩონჩხი უზრუნველყოფს რბილი ქსოვილების დაცვას. მაგალითად, ხერხემლიანების ქალა იცავს ტვინს. ხოლო ხმელეთის ხერხემლიანების ნეკნები ქმნის საკანს, რომელშიც მოთავსებულია გული, ფილტვები და სხვა შინაგანი ორგანოები. ჩონჩხი ასევე ეხმარება მოძრაობაში, აძლევს კუნთებს მყარ საყრდენს. ჩონჩხის სამი ძირითადი ტიპი არსებობს: ჰიდროსტატიკური, ეგზო (გარეთა) და ენდო (შიდა) ჩონჩხი.

### ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი

ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი შედგება სითხისგან, რომელიც სხეულის დახურულ უბანში წნევის ქვეშ არის. ამ ტიპის ჩონჩხი გვხვდება ნაწლავდრუიანებში, ბრტყელ ჭიებში, მრგვალ ჭიებში და ანელიდებში (იხილეთ თავი 33). ეს ცხოველები აკონტროლებენ თავიანთ ფორმასა და მოძრაობას, რისთვისაც იყენებენ სითხიანი ღრუების ფორმის ცვლილებას კუნთების საშუალებით. ნაწლავდრუიანებს, მაგალითად, ჰიდრას შეუძლია დაგრძელდეს პირის დახურვით და სხეულის კედელში მყოფი შემკუმშავი უჯრედების გზით ნაწლავის ღრუს დავიწროვებით. გამომდინარე იქედან, რომ წყლის შეკუმშვა შეზღუდულია, ღრუს დიამეტრის შემცირება ცხოველს სიგრძეში გაზრდას აიძულებს.

პლანარიებსა და სხვა ბრტყელ ჭიებში ინტერსტიციალური სითხე წნევის ქვეშაა და ფუნქციონირებს როგორც, მთავარი ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი. პლანარიას მოძრაობა განაპირობებულია სხეულის კედელში არსებულ კუნთებში ჰიდროსტატიკური ჩონჩხის წინააღმდეგ ძალის მოქმედებით. ნემატოდებს (მრგვალი ჭიები) სითხე სხეულის ღრუში აქვთ, რომელიც ფსევდოცელომია (იხილეთ სურათი 32.8 ბ). სითხე მაღალი წნევის ქვეშ იმოყოფება და სიგრძეში კუნთების შეკუმშვა მოძრაობას განაპირობებს.

ნიადაგის ჭიებსა და სხვა ანელიდებში, ცელომური სითხე მოქმედებს, როგორც ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი. ბევრ ანელიდაში ცელომური ღრუ იყოფა სეგმენტებს შორის არსებული ტიხრით, რაც აძლევს ცხოველს საშუალებას წრიული და სიგრძეში კუნთების საშუალებით თითოეული სეგმენტის ზომა ცალკე-ცალკე შეიცვალოს. ასეთი ანელიდები ჰიდროსტატიკურ ჩონჩხს პერისტალტიკისთვისაც იყენებენ. პერისტალტიკა არის ხმელეთზე მოძრაობის ფორმა, რომელიც წარმოიქმნება კუნთების რიტმულ ტალღებად შეკუმშვით, რომელიც წინიდან უკან ვრცელდება (სურათი 49.25).

ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი კარგად შეესაბამება წყლის გარემოში ცხოვრებას. ის ასევე იცავს შინაგან ორგანოებს, უზრუნველყოფს საყრდენს ხოხვისათვის და თხრისთვის ხმელეთის ცხოველებში. ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი არაეფექტურია ხმელეთზე აქტივობისას, რომლის დროსაც სხეული ხმელეთის ზედა იყოს ისე, როგორც არის სიარულისა და სირბილის დროს.

### ეგზოჩონჩხი

ეგზოჩონჩხი არის მყარი საყრდენი, რომელიც ცხოველის სხეულის ზედაპირზეა. მაგალითად, უმეტესი მოლუსკი მოთავსებულია კალციუმის კარბონატის ნიჟარაში. კალციუმის კარბონატი მანტიიდან გამოიყოფა, რომელიც თავის მხრივ სხეულის კედლის გამონაზარდია (იხილეთ სურათი 33.16). როდესაც ცხოველი იზრდება, ნიჟარაც იზრდება გარეთა კიდიდან. ორსაგდულიანი მოლუსკები კეტავენ თავიანთ ნიჟარას იმ კუნთების საშუალებით, რომელიც ამ ეგზოჩონჩხზეა დამაგრებული.

ფესასხსრიაანების ეგზოჩონჩხი კუტიკულით არის წარმოდგენილი. კუტიკულა ეპიდერმისის მიერ გამოყოფილი არააცოცხალი შრეა. კუნთები დაკავშირებულია კუტიკულას შიდა მხარესთან. კუტიკულას დაახლოებით 30-50% შედგება ქიტინისგან, ცელულოზის მსგავსი პოლისაქარიდისგან. ქიტინის ფიბრილები ცილოვან მატრიქსშია ჩაძირული და ქმნის რთულ, მაგარ და მოქნილ მასას. იქ, სადაც დაცვა ყველაზე მეტად მნიშვნელოვანია, კუტიკულა გამაგრებულია ორგანული ნივთიერებებით, რომლებიც აკავშირებენ

ეგზოჩონჩხის ცილებს. ზოგი კიბოსნაირი, კიდევ უფრო მეტად ამაგრებს ეგზოჩონჩხს კალციუმის დამატებით. ამისგან განსხვავებით მცირე ურთიერთკავშირია პროტეინებსა ან არაორგანულ მარილებს შორის იმ ადგილებში, სადაც კუტიკულა თხელი და მოქნილი უნდა იყოს, მაგალითად, როგორიცაა კიდურების სახსრები. ინტენსიური ზრდისას ფეხსახსრიანებმა უნდა გამოცვალონ ეგზოჩონჩხი და წარმოქმნან ახალი, უფრო დიდი ზომის ეგზოჩონჩხი (**იხილეთ სურათი 5.10**).

## ენდოჩონჩხი

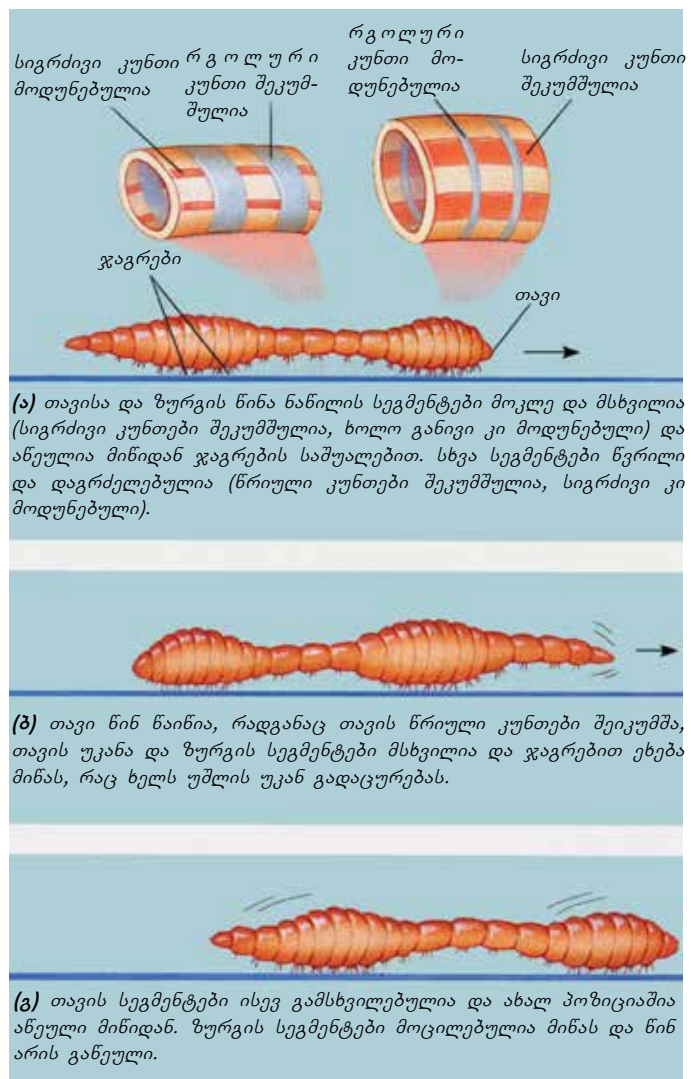
ენდოჩონჩხი შედგება მაგარი საყრდენი ელემენტებისგან, როგორიც არის ძვალი, რომელიც ცხოველის რბილ ქსოვილ შია ჩაფლული. ღრუბლები არაორგანული ნივთიერებების ნემსებით ან უფრო რბილი ცილოვანი ძაფებით არის გამყარებული (**იხილეთ სურათი 33.4**). ეკალკანიანებს კანის ქვეშ აქვთ მყარი ფირფიტები, რომლებსაც ოსიკლებს უწოდებენ. ოსიკლები შედგება მაგნიუმის და კალციუმის კარბონატების კრისტალებისგან და ჩვეულებრივ ერთმანეთთან ცილოვანი ძაფებით არის დაკავშირებული. ზღვის ზღარბის ოსიკლები მჭიდროდ არიან დაკავშირებული, მაშინ, როცა ზღვის ვარსკვლავების ოსიკლებს შორის კავშირი უფრო ფაშარია. ეს აძლევს ამ ორგანიზმებს მკლავის ფორმის შეცვლის საშუალებას.

ქორდიანებს აქვთ ენდოჩონჩხი, რომელიც შედგება ხრტილის, ძვლის ან ამ ორი ქსოვილის კომბინაციისგან (**იხილეთ სურათი 40.5**). ძუძუმწოვრების ჩონჩხი შედგება 200-ზე მეტი ძვლისგან, აქედან ზოგი შერწყმულია, სხვები კი სახსრებში იოგებით არის დაკავშირებული, რაც თავისუფალ მოძრაობას უზრუნველყოფს (**სურათი 49.26**). ანატომიის სპეციალისტები ხერხემლიანთა ჩონჩხს ორ ძირითად ნაწილად ყოფენ: ღერძის ჩონჩხი, რომელიც მოიცავს ქალას, ხერხემალს და ნეკნების საკანს და აპენდიკულარული ჩონჩხი, რომელიც მოიცავს კიდურების ძვლებს და პექტორალურ და პელვიკარულ სარტყლებს. ეს სარტყლები ამაგრებენ ღერძის ჩონჩხის დანამატებს. ყოველ დანამატს აქვს რამდენიმე ტიპის სახსარი, რაც უზრუნველყოფს სხეულის მოძრაობის მოქნილობას.

## ფიზიკური საყრდენი ხმოლოთჲ

ინჟინერი, რომელიც ხიდს ან მაღალ შენობას აშენებს, უნდა ითვალისწინებდეს ზომის და მასშტაბის ცვლილებების ეფექტს. ზომის გაზრდა მცირე მასშტაბიანი მოდელიდან ნამდვილ საგნამდე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შენობის დიზაინზე. მაგალითად, შენობის საყრდენის სიძლიერე დამოკიდებულია მისი გადამკვეთი უბნის არეალზე, რომელიც დიამეტრის კვადრატულად იზრდება. საყრდენზე არსებული დაძაბულობა დამოკიდებულია შენობის წონაზე, რომელიც იზრდება მისი სიმაღლის ან რომელიმე სხვა ხაზოვანი განზომილების კუბურად. ხიდისა და შენობის სტრუქტურის მსგავსად ცხოველის სხეულის სტრუქტურა საყრდენი უნდა იყოს მისი ზომებისთვის. აქედან გამომდინარე, დიდი ზომის ცხოველს პატარა ზომის ცხოველისგან განსხვავებით სხეულის განსხვავებული პროპორციები აქვს. თავგს რომ სპილოს ზომა ჰქონოდა, მისი სუსტი ფეხები წონასთან სერიოზულ შეუსაბამობაში იქნებოდა.

შენობის ანალოგიურად, ჩვენ შეიძლება ვივარაუდოთ რომ



▲ **სურათი 49.25 პერიტალტიკური მოძრაობა ნიადაგის ჭიაში.** სიგრძივი კუნთების შეკუმშვა ამსხვილებს და ამოკლებს ჭიას; წრიული კუნთების შეკუმშვა აგრძელებს და აბრტყელებს.

ცხოველის ფეხის ძვლების ზომა პროპორციულია იმ დაძაბულობისა, რომელსაც სხეულის წონა განაპირობებს. მაგრამ, ჩვენი ვარაუდი ალბათ მაინც მთლად ზუსტი ვერ იქნებოდა; ცხოველთა სხეული რთულია, არ არის გაქვავებული და არ წარმოადგენს შენობის ანალოგიას, რაც მხოლოდ ნაწილობრივ ხსნის სხეულის სტრუქტურასა და საყრდენს შორის დამოკიდებულებას. ცხოველის ფეხის სიდიდე, მისი სხეულის ზომასთან შესაბამისობაში, მხოლოდ ნაწილია რთული ურთიერთობის. აღმოჩნდა რომ სხეულის პოზა — ფეხების პოზიცია სხეულთან მიმართებაში — უფრო მნიშვნელოვანი სტრუქტურული თვისებაა სხეულის წონის საყრდენად, ყოველ შემთხვევაში ძუძუმწოვრებსა და ფრინველებში. კუნთები და მყესები (კუნთის ძვალთან დამაკავშირებელი შემადგენელი ქსოვილის წარმონაქმნები), რომლებიც დიდი ძუძუმწოვრების ფეხებს შედარებით სწორად და სხეულის ქვევით პოზიციაში ამყოფებს, დატვირთვის ძირითად ნაწილს იღებს.

## კანცეფცია შემოჭმა 49.6

1. ახსენით როგორ გამოიყენებდა ნიადაგის ჭია თავის კუნთებს, სხეულის მაქსიმალურად გაჭიმვისთვის.
2. შეადარეთ ასთაკვის ეგზოჩონჩხი მისი ბრჭყალის მომჭერ ზედაპირსა და ბრჭყალების შეერთების ადგილებში.
3. შეადარეთ მოძრაობები, რომელიც იდაყვში არსებული ორი ტიპის სახსრით არის უზრუნველყოფილი.

შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი

## კანცეფცია 49.6

### კუნთები ჩონჩხის ნაწილს შუკუმშვის შედეგად ამობრუნებენ

უჯრედულ დონეზე, ცხოველის ყველა მოძრაობა ეყრდნობა ორ განსხვავებულ შეკუმშვის სისტემას. ორივე შემთხვევაში, ცილოვანი ძაფების მოძრაობა ხდება ერთმანეთის საპირისპიროდ. უჯრედის მოძრაობის ეს ორი სისტემა – მიკრომილაკებისა და მიკროფილამენტების საშუალებით – განხილული იყო მეექვსე თავში. მიკრომილაკები პასუხისმგებლები არიან წამწამების და შოლტების ტალღისებრ მოძრაობაზე. მიკროფილამენტები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ამებოიდურ მოძრაობაში. ისინი, ასევე, კუნთოვანი უჯრედების შეკუმშვაზე ელემენტებს წარმოადგენენ.

კუნთის მოქმედება მის შეკუმშვაში გამოიხატება; კუნთებს მხოლოდ პასიურად შეუძლიათ გაჭიმვა. ამიტომაც, სხეულის ნაწილების ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით მოძრაობის უნარი მოითხოვს, რომ კუნთები ანტაგონისტურ წყვილებად იყოს დაკავშირებული ჩონჩხთან და წყვილის ყოველი წევრი ერთმანეთის საპირისპიროდ მოქმედებდეს (**სურათი 49.27**). მაგალითად, ჩვენ ვხრით მკლავს ორთავა კუნთის შეკუმშვით, ხოლო გაშლის შემთხვევაში ორთავა კუნთი დუნდება, საწინააღმდეგო მხარეს მოთავსებული სამთავა კი იკუმშება.

იმისთვის, რომ გავიგოთ, თუ როგორ იკუმშება კუნთი, ჩვენ მისი სტრუქტურა უნდა გავაანალიზოთ. დავიწყებთ ჩონჩხის კუნთის სტრუქტურისა და შეკუმშვის მექანიზმებით და შემდეგ გადავალთ სხვა სახის კუნთებზე.

### სქალხმლანების ჩონჩხის კუნთები

ხერხემლიანების ჩონჩხის კუნთები, რომლებიც ძვლებთან არიან დაკავშირებული, პასუხისმგებელი არიან მოძრაობაზე და ხასიოდებიან პატარ-პატარა ერთეულების იერარქიით (**სურათი 49.28**). ჩონჩხის კუნთი შედგება გრძელი ბოჭკოების გროვისაგან, რომელიც კუნთის სიგრძის პარალელურად ლაგდება. თითოეული ბოჭკო არის მრავალბირთვიანი ერთი უჯრედი, რომელიც ბევრი ემბრიონული უჯრედის შერწყმის შედეგად წარმოიქმნება. კუნთოვანი ბოჭკოები, თავის მხრივ, წარმოადგენენ სიგრძედ გან-

ლაგებული მიოფიბრილების კონას. მიოფიბრილები კი ორი ტიპის მიოფილამენტებისგან შედგება: წვრილი და მსხვილი მიოფილამენტებისგან. წვრილი ფილამენტები შედგება აქტინის ორი ჯაჭვისა და რეგულატორული ცილის ერთი ჯაჭვისგან, რომლებიც ერთმანეთზეა გადაგრეხილი. მსხვილი ფილამენტების შემადგენლობაში მიოზინის მოლეკულები გვხვდება.

ჩონჩხის კუნთს განივზოლიან კუნთსაც უწოდებენ. მიოფილამენტების რეგულატორული წყობა ქმნის მუქ და ღია უბნებს და ეს იძლევა განივ დახაზულობას. კუნთის მთავარი შემკუმშავი ერთეული არის სარკომერი, რომლის საზღვარსაც ქმნის Z ხაზი. მეზობელი მიოფიბრილების Z ხაზები ერთმანეთის გასწვრივ ლაგდება, რაც ასევე ხელს უწყობს განივ დახაზულობას, რომელიც სინათლის მიკროსკოპში შეიმჩნევა. თხელი ფილამენტები Z ხაზებთან არის დაკავშირებული და სარკომერის ცენტრისკენ პროეცირდება. მოსვენების მდგომარეობაში მყოფ კუნთოვან ბოჭკოში თხელი და სქელი ფილამენტები არ გადაფარავენ მთლიანად ერთმანეთს და სარკომერის კიდესთან არსებული უბანი, რომელშიც მხოლოდ თხელი ფილამენტებია, I უბნად იწოდება. A უბანი არის ფართო ნაწილი, რომელიც სქელი ფილამენტების სიგრძეს შეესაბამება. თხელი ფილამენტები სარკომერის მთელ სიგრძეზე არ არის გადაჭიმული, და A უბნის ცენტრში მდებარე H ზონა მხოლოდ მსხვილ ფილამენტებს შეიცავს. სარკომერში მსხვილი და წვრილი ფილამენტების ასეთი განლაგება არის საკვანძო იმისთვის, თუ როგორ ხდება სარკომერის და აქედან გამომდინარე მთელი კუნთის შეკუმშვა.

### კუნთის შეკუმშვის ფილამენტების მეცურების მოდელი

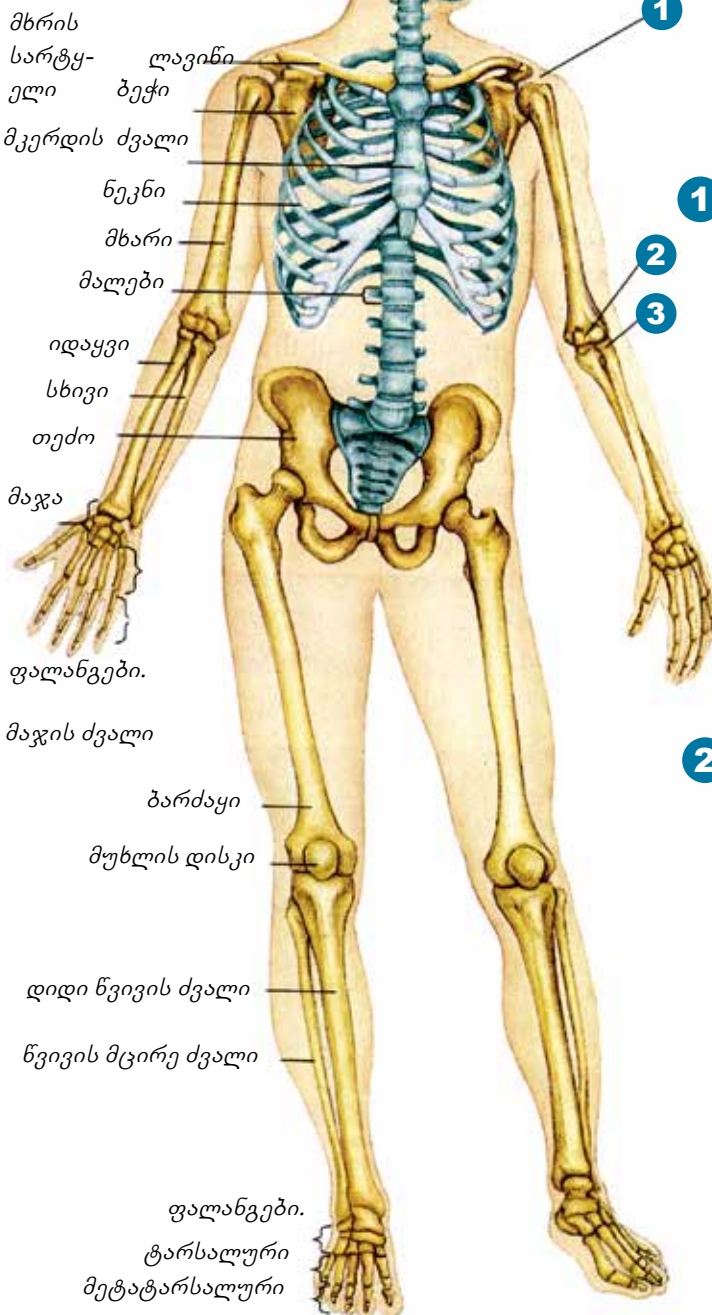
ის, თუ რა ხდება მთლიანი კუნთის შეკუმშვის დროს, ჩვენ შეგვიძლია ავხსნათ, თუკი ფოკუსს ცალკეულ კუნთოვან ბოჭკოზე გავაკეთებთ (**სურათი 49.29**). კუნთის შეკუმშვის ფილამენტების მეცურების მოდელის მიხედვით, როდესაც სარკომერი მოკლდება, არც წვრილი და არც მსხვილი ფილამენტები არ იცვლიან სიგრძეს, არამედ, ისინი ცურავენ ერთმანეთის გასწვრივ და იწვევენ თხელი და სქელი ფილამენტების უფრო მეტ გადაფარვას. ამის შედეგად, მხოლოდ წვრილი ფილამენტების შემცველი I უბანი და მსხვილი ფილამენტების შემცველი H ზონა მცირდება.

ფილამენტების მეცურება დამოკიდებულია წვრილი და მსხვილი ფილამენტების შემადგენლობაში მყოფი აქტინისა და მიოზინის შორის ურთიერთქმედებაზე. მიოზინის თითოეული მოლეკულა შედგება გრძელი „კუდისა“ და გლობულარული „თავისგან“, რომელიც კიდისკენ არის მიმართული. კუდი, ფილამენტის შემადგენლობაში მყოფი მიოზინის სხვა მოლეკულების კუდებთან არის დაკავშირებული. თავი ბიოენერგიული რეაქციების ცენტრია, რომელიც კუნთის შეკუმშვას ენერგიით უზრუნველყოფს. მას შეუძლია ატფ-ს დაკავშირება და მისი ჰიდროლიზი ადფ-მდე და არაორგანულ ფოსფორამდე. როგორც 49.30-ე სურათზეა ნაჩვენები, ატფ-ს ჰიდროლიზი რთავს საფეხურებს, რომელშიც მიოზინი აქტინს უკავშირდება. ქმნის ხიდს და ექაჩება თხელ ფილამენტს სარკომერის ცენტრისკენ. ხიდი წყდება მაშინ, როდესაც ატფ-ს ახალი მოლეკულა უკავშირდება მიოზინის თავს. განმეორებად ციკლში, თავისუფალი თავი შლის ახალ ატფ-ს და უკავშირდება ახალ საკონტაქტო უბანში აქტინის სხვა მოლეკულას, წვრილი ფილამენტის გასწვრივ.

ყოველი 350 თავის შემცველი მსხვილი ფილამენტი ქმნის და

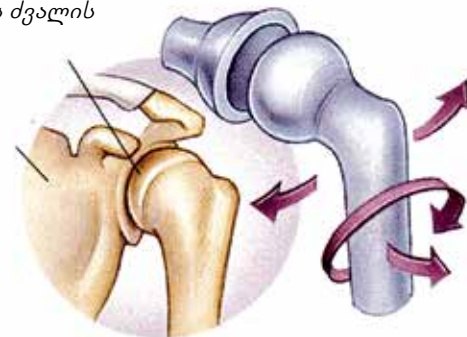
## გასაღები

ლერძის ჩონჩხი  
აპენდიკულარული  
ჩონჩხი



მხრის ძვლის  
თავი

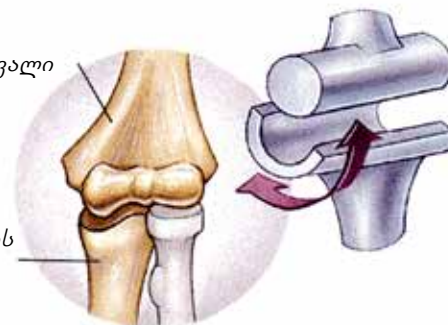
ბეჭი



ფოსოიან სახსრებს მიეკუთვნება მხრის ძვლის სახსარი ბეჭთან და ბარდაყის ძვლის სახსარი თეძოსთან. ასეთი შეერთება გვაძლევს საშუალებას მკლავი და ფეხი რამდენიმე სიბრტყეში ვამოძრაოთ.

მხრის ძვალი

იდაყვის  
ძვალი

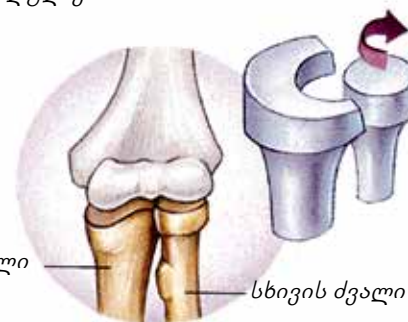


2

ნიჟარის საკეტის მსგავსი სახსარი არის მხარსა და იდაყვის ძვლებს შორის და მოძრაობას ერთ სიბრტყეში ზღუდავს.

იდაყვის ძვალი

სხივის ძვალი



3

ლერძზე მბრუნავი სახსარი გვაძლევს საშუალებას ვაბრუნოთ თავი გვერდებზე და წინამხარი იდაყვთან მიმართებაში.

შლის დაახლოებით ხუთ ხიდს წაშში, რაც ფილამენტების ურთიერთმეცურებას უზრუნველყოფს.

ტიპური კუნთოვანი ბოჭკო მოსვენების მდგომარეობაში შეიცავს მხოლოდ რამდენიმე შეკუმშვისთვის საკმარის ატფს. განმეორებითი შეკუმშვისთვის საჭირო ენერგია ინახება ორ სხვა ნივთიერებაში: კრეატინ ფოსფატსა და გლიკოგენში. კრეატინ ფოსფატს შეუძლია სწრაფად წარმოქმნას ატფ, ადფ-ზე ფოსფატური ჯგუფის გადატანით. დარჩენილი კრეატინ ფოსფატის მარაგი საკმარისია კუნთის შეკუმშვისთვის დაახლოებით 15 წამის განმავლობაში. გლიკოგენი იშლება გლუკოზად, რომელიც, შესაძლოა, გლიკოლიზის ან აერობული გარდაქმნის შედეგად ატფ-ის სინთეზისთვის იქნეს გამოყენებული (იხილეთ თავი 9). ტიპური კუნთოვანი ბოჭკოს გლიკოგენური საცავიდან გლუკოზის გამოყენებით გლიკოლიზს შეუძლია 1 წუთის განმავლობაში მიმდინარე შეკუმშვა უზრუნველყოს, მაშინ როცა აერობული სუნთქვისას გამოიყოფა თითქმის ერთი საათის შეკუმშვისთვის საკმარისი ენერგია.

### კალციუმის და რეგულატორული ცილების როლი

ჩონჩხის კუნთის ბოჭკო იკუმშება მხოლოდ მაშინ, როდესაც მამოძრავებელი ნეირონით სტიმულირდება. როდესაც კუნთოვანი ბოჭკო მოსვენებულია, თხელი ფილამენტების მიოზინის დამაკავშირებელი უბნები ბლოკირებულია რეგულატორული ცილით – ტროპომიოზინით (სურათი 49.31 ა).

კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვისთვის, ეს დამაკავშირებელი უბნები უნდა გათავისუფლდეს. ეს მჟღავნდება, როდესაც კალცი-

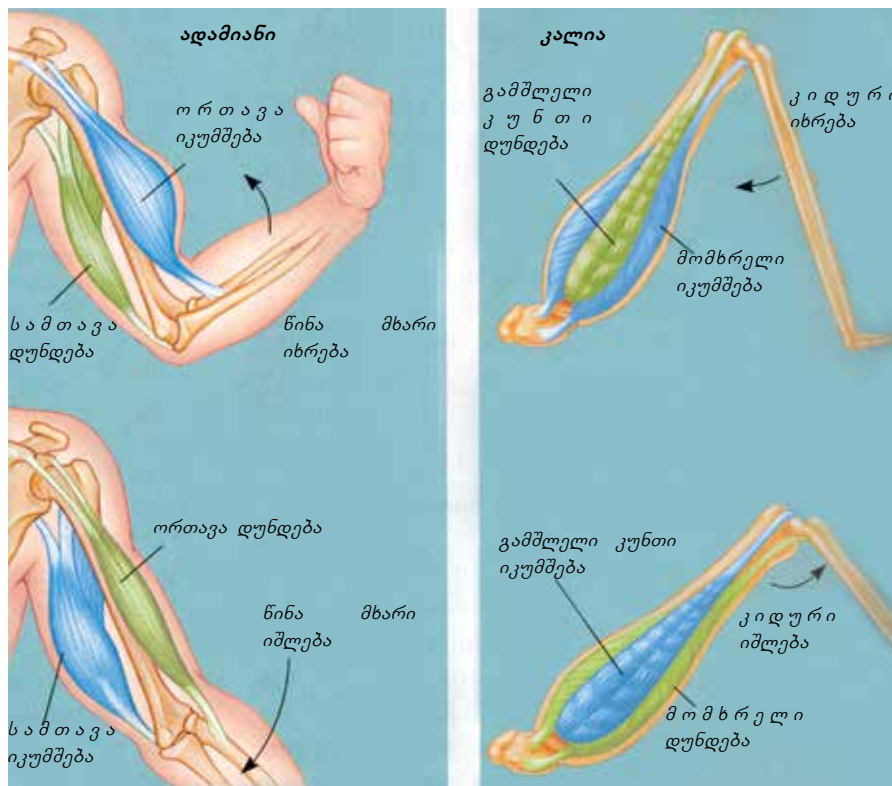
უმის იონები უკავშირდება რეგულატორული ცილების სხვა ჯგუფს - ტროპონინის კომპლექსს, რომელიც აკონტროლებს ტროპომიოზინის პოზიციას თხელ ფილამენტებზე. კალციუმის დაკავშირება ხელს უწყობს მიოზინის დამაკავშირებელი უბნის გახსნას თხელ ფილამენტებზე (სურათი 49.31ბ). ციტოზოლში კალციუმი არსებობისას, წვრილი და მსხვილი ფილამენტები ერთმანეთში მისრიალებენ და კუნთოვანი ბოჭკო იკუმშება. კალციუმის კონცენტრაცია დაცემისას, დაკავშირების უბნები ისევ იფარება და შეკუმშვა წყდება.

კუნთის შეკუმშვის განმაპირობებელი სტიმული იმ მამოძრავებელი ნეირონის მოქმედების პოტენციალია, რომელიც აღნიშნულ კუნთოვან ბოჭკოს სინაფსურად უკავშირდება. (სურათი 49.32). მამოძრავებელი ნეირონის სინაფსური ტერმინალი ათავისუფლებს ნეიროტრანსმიტერ აცეტილქოლინს, იწვევს კუნთოვანი ბოჭკოს დეპოლარიზაციას და მასში მოქმედების პოტენციალის აღძვრას. მოქმედების პოტენციალები ვრცელდება კუნთოვანი ბოჭკოს სილრმეში, პლაზმური მემბრანის ჩალრმავებებში, რომელთაც განივი T მილაკები ეწოდებათ. T მილაკები მჭიდრო კონტაქტს ამყარებენ სარკოპლაზმურ რეტიკულუმთან, განსაკუთრებულ ენდოპლაზმურ ბადესთან. როდესაც კუნთოვანი ბოჭკო მოსვენებულია, სარკოპლაზმური რეტიკულუმის მემბრანა ციტოზოლიდან ქაჩავს კალციუმის იონებს თავის შიგთავსისკენ, ასე, რომ ის კალციუმის იონების შიდაუჯრედულ სათავსოს წარმოადგენს. კუნთოვანი ბოჭკოს მოქმედების პოტენციალი ხსნის სარკოპლაზმური რეტიკულუმის კალციუმის იონების არხებს და აღნიშნული იონები ციტოზოლში

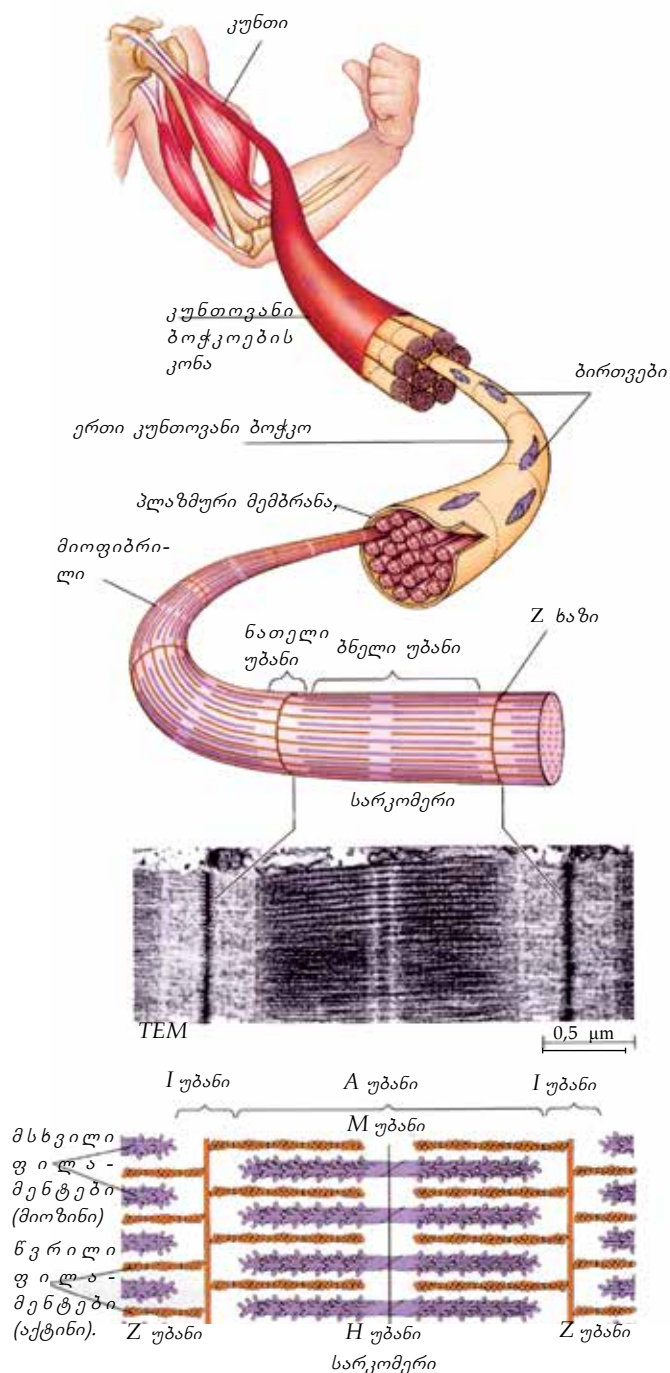
გადმოდიან. კალციუმის იონები უკავშირდება ტროპონინის კომპლექსს და იწვევს კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვას. შეკუმშვა წყდება, როდესაც სარკოპლაზმური რეტიკულუმში კალციუმის იონებს უკან გადაქაჩავს და ტროპომიოზინი ისევ ბლოკავს წვრილი ფილამენტის მიოზინის დამაკავშირებელ უბნებს. 49.33-ე სურათი მიმოიხილავს ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვის საფეხურებს.

რამდენიმე დაავადება იწვევს დამბლას, როდესაც ხდება მამოძრავებელი ნეირონებით ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოს აგზნების შეფერხება. ამიოტროფული ლატერალური სკლეროზის (ალს) დროს, რომელსაც ადრე ლიუ გერინგის დაავადებას უწოდებდნენ, თავის ტვინის ლეროსა და ზურგის ტვინის მამოძრავებელი ნეირონების დეგენერაცია ხდება. შედეგად, მათთან დაკავშირებული კუნთოვანი ბოჭკოები ატროფირდება. ალს პროგრესირებადი და ჩვეულებრივ სასიკვდილო დაავადებაა. ლეტალური შედეგი სიმპტომების გამოვლენიდან ხუთი წლის მანძილზე დგება და ამ დროს მკურნალობა ვერ ხერხდება.

ბოტულიზმი გამოწვეულია არასწორედ შენახულ საკვებში ბაქტერია Clostridium botulinum-ის მიერ გამოყოფილი ეგზოტოქსინის მოქმედების შედეგად (იხილეთ თავი 27). ტოქსინი კუნთების პარალიზებას იწვევს მამოძრავებელი ნეირონებიდან აცეტილქო-

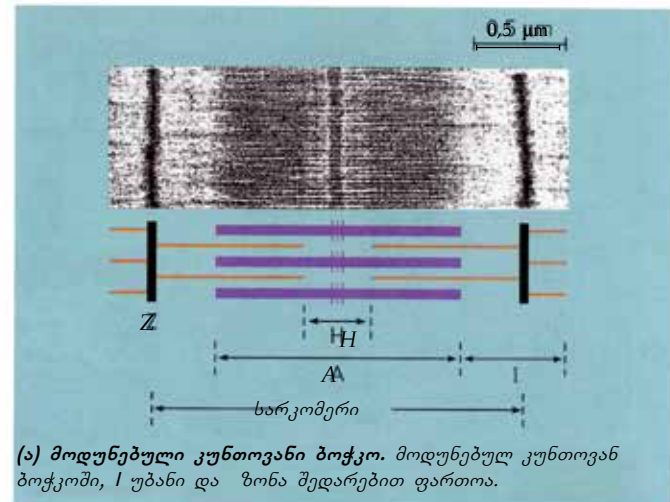


▲ სურათი 49.27 კუნთებისა და ჩონჩხის ურთიერთქმედება მოძრაობის დროს. სხეულის ნაწილების ნიწა და უკან მოძრაობა ძირითადად ანტაგონისტური კუნთების ხარჯზე ხორციელდება. ასეთი მოწყობილობა მუშაობს ენდო ან ეგზოჩონჩხთან.

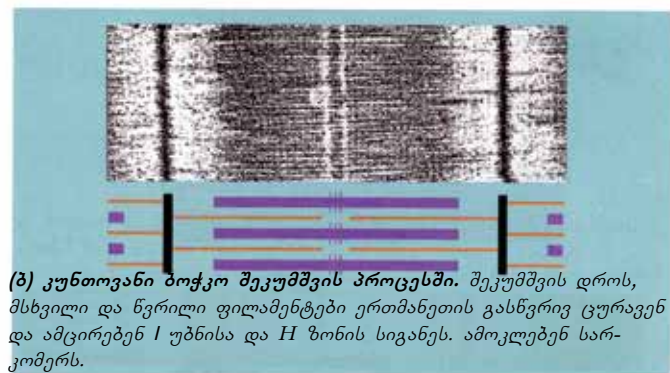


▲ სურათი 49.28 ჩონჩხის კუნთის სტრუქტურა.

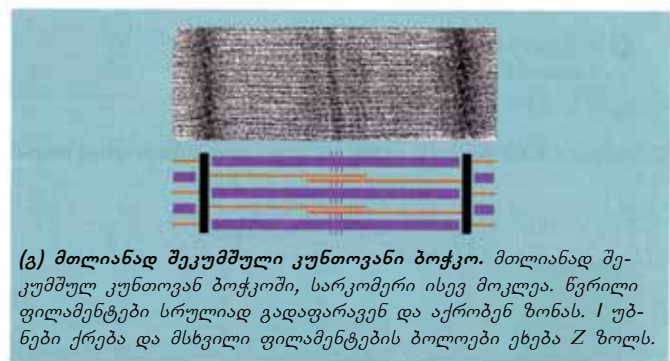
ლინის გამოყოფის ბლოკირებით. ტოქსინი აგრეთვე „ბოტოქს“-ით მკურნალობისას შეიყვანება სახის განსაზღვრულ კუნთებში ნაოჭების მოსაცილებლად. Myasthenia gravis არის ავტოიმუნური დაავადება, როდესაც ადამიანი გამოიმუშავებს ანტისხეულებს კუნთოვანი ბოჭკოს აცეტილქოლინის რეცეპტორების მიმართ. ამ რეცეპტორების რიცხვი მცირდება და სინაპსური გადაცემა მამოძრავებელ ნეირონებს და კუნთოვან ბოჭკოებს შორის ნაკლებად ეფექტური ხდება.



(ა) მოდუნებული კუნთოვანი ბოჭკო. მოდუნებულ კუნთოვან ბოჭკოში, I უბანი და ზონა შედარებით ფართოა.



(ბ) კუნთოვანი ბოჭკო შეკუმშვის პროცესში. შეკუმშვის დროს, მსხვილი და წვრილი ფილა-მენტები ერთმანეთის გასწვრივ ცურავენ და ამცირებენ I უბნისა და H ზონის სიგანეს. ამოკლებენ სარკომერს.

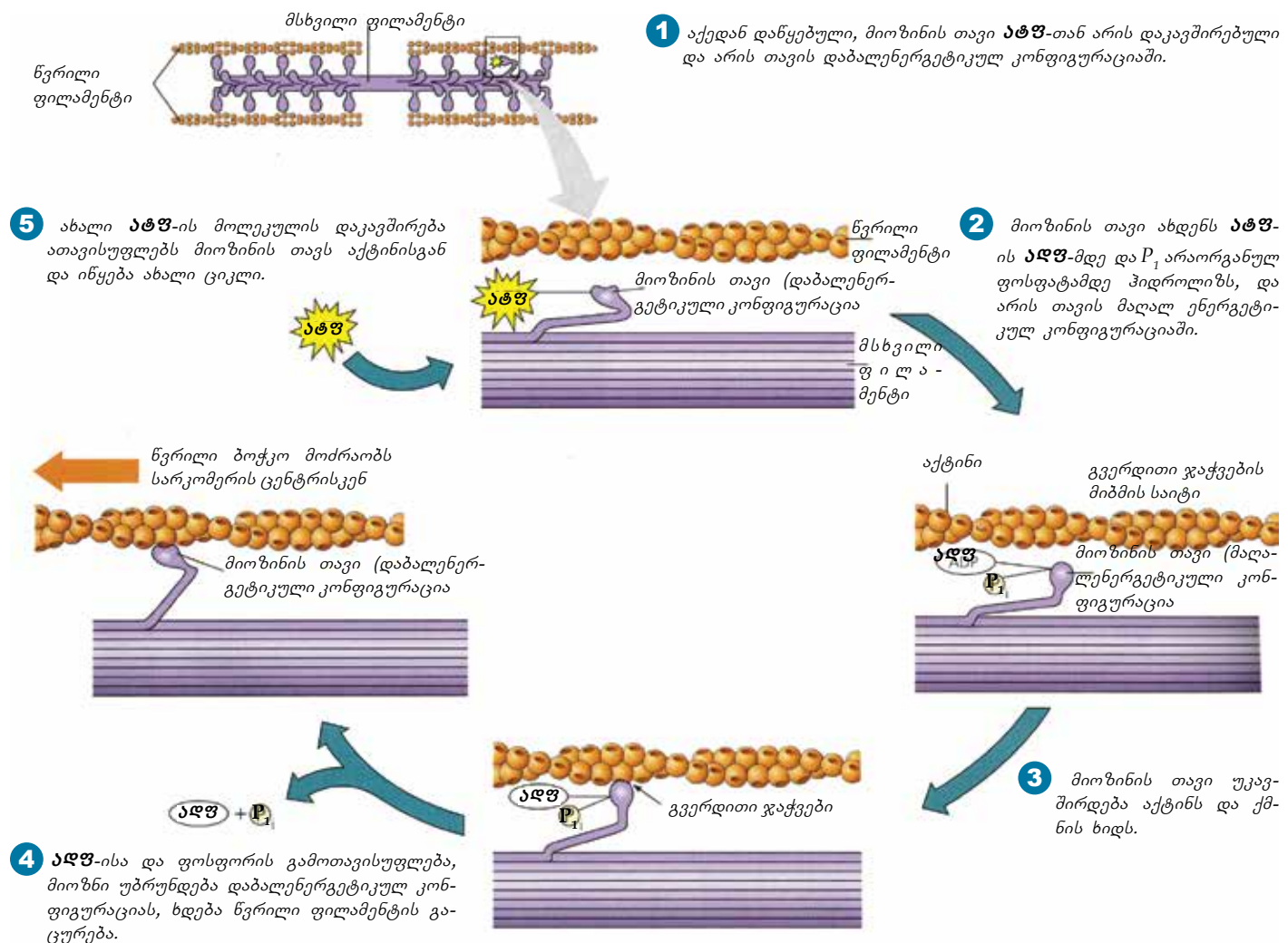


(გ) მთლიანად შეკუმშული კუნთოვანი ბოჭკო. მთლიანად შეკუმშულ კუნთოვან ბოჭკოში, სარკომერი ისევ მოკლეა. წვრილი ფილა-მენტები სრულიად გადაფარავენ და აკრობენ ზონას. I უბნები ქრება და მსხვილი ფილა-მენტების ბოლოები ეხება Z ზოლს.

▲ სურათი 49.29 კუნთის შეკუმშვის ფილა-მენტების შეცურების მოდელი. ელექტრომიკროგრაფი აჩვენებს, რომ მსხვილი (მიოზინის) ფილა-მენტები (შინდისფერი) და წვრილი (აქტინის) ფილა-მენტები (სტაფილოსფერი) არ იცვლება კუნთის შეკუმშვის დროს.

## კუნთოვანი დაძაბულობის ნეირონული კონტროლი

როდესაც მოქმედების პოტენციალი კუნთოვან ბოჭკოზე მამოძრავებელი ნეირონიდან აცეტილქოლინის გამოთავისუფლებს, კუნთოვანი ბოჭკო მოკლე, სულ ან არაფრის შეკუმშვით პასუხობს, რომელსაც ტოკვა ეწოდება. ჩვენი ყოველდღიური გამოცდილება აჩვენებს, რომ მთელი კუნთის შეკუმშვა, როგორცაა ორთავა



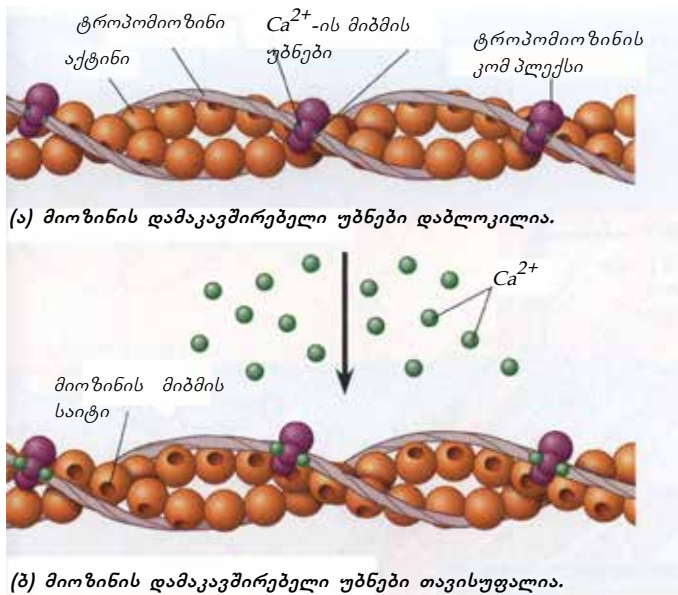
▲ **სურათი 49.30** მიოზინ-აქტინის ურთიერთქმედება საფუძვლად უდევს კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვას.

კუნთი, საფეხურებრივია, ჩვენ შეგვიძლია ვარგეფილიროთ მისი შეკუმშვის სიძლიერე და მოცულობა. ექსპერიმენტული კვლევებიც ადასტურებს ამ დაკვირვებას. ორი ძირითადი მექანიზმი უბრუნველყოფს მთლიანი კუნთის ასეთ შეკუმშვას: 1) კუნთოვანი ბოჭკოების რაოდენობის შეცვლა რომელიც კუმშვაში მონაწილეობს და 2) კუნთოვანი ბოჭკოების სტიმულირების სიხშირის ცვლილება. განვიხილოთ თითოეული მექანიზმი.

ხერხემლიანთა ჩონჩხის კუნთში, თითოეული კუნთოვანი ბოჭკო ინერვირდება მხოლოდ ერთი მამოძრავებელი ნეირონით, მაგრამ თითო დატოტილი მამოძრავებელი ნეირონი შეიძლება სინაფსებს ბევრს კუნთოვან ბოჭკოზე წამოეყვანოს (სურათი 49.34). შესაძლოა იყოს ასობით მამოძრავებელი ნეირონი რომელიც აკონტროლებს კუნთის შეკუმშვას თითოეული კუნთოვანი ბოჭკოების საკუთარი ჯგუფი. **მოტორული ერთეული** შედგება ერთი მამოძრავებელი ნეირონისგან და ყველა კუნთოვანი ბოჭკოსგან, რომელსაც ის აკონტროლებს. როდესაც მამოძრავებელი ნეირონი მოქმედების პოტენციალს წარმოშობს, მოტორული ერთეულის ფარგლებში ყველა კუნთოვანი ბოჭკო, როგორც ჯგუფი იკუმშება.

შეკუმშვის სიძლიერე დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენ კუნთოვან ბოჭკოს აკონტროლებს აღნიშნული მამოძრავებელი ნეირონი. უმეტეს კუნთში, სხვადასხვა მოტორულ ერთეულის შემადგენლობაში მყოფი კუნთოვანი ბოჭკოების რიცხვი მერყეობს რამდენიმე დან, ასეულობამდე. ნერვულ სისტემას შეუძლია არეგულიროს შეკუმშვის სიძლიერე მთელ კუნთში, იმისდა მიხედვით თუ რამდენი მოტორული ერთეული აქტივდება მოცემულ მომენტში. იგი აგრეთვე უბრუნველყოფს დიდი და მცირე მოტორული ერთეულების შერჩევით გააქტივებას. კუნთის ძალა (დაძაბულობა) პროგრესულად იზრდება, რაც სულ უფრო მეტი მამოძრავებელი ნეირონის აქტივირებას იწვევს. აღნიშნულ პროცესს მამოძრავებელი ნეირონების ჩართვას უწოდებენ. იმის და მიხედვით თუ, მამოძრავებელი ნეირონების რა რაოდენობას რთავს ტვინი და, როგორია მათი მოტორული ერთეულების ზომა, ადამიანს შეუძლია ჩანგალი ან რამე უფრო მძიმე – მაგალითად, როგორიც არის ბიოლოგიის სახელმძღვანელო – ასწიოს.

ზოგი კუნთი, განსაკუთრებით ისინი, რომლებიც სხეულს გამართულს იჭერს, თითქმის მუდმივად ნაწილობრივ შეკუმშულია.



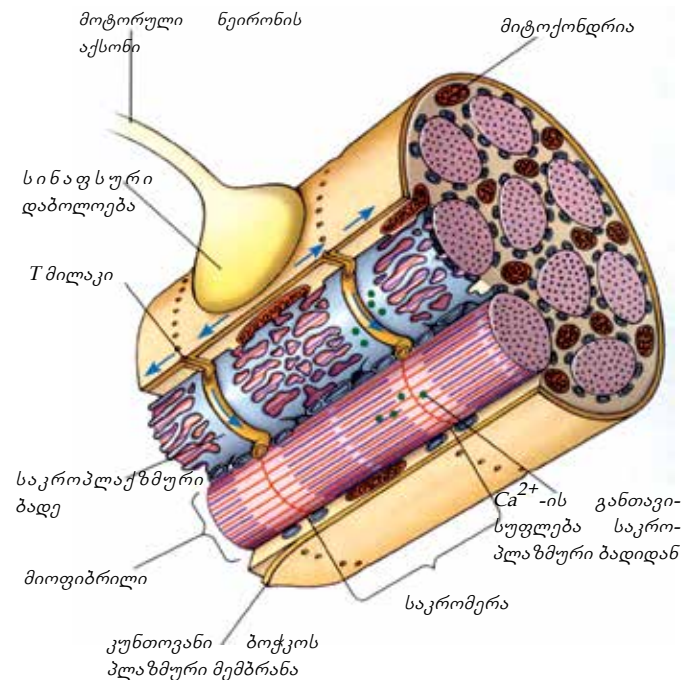
▲ **სურათი 49.31** რეგულატორული ცილებისა და კალციუმის როლი კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვაში. თითოეული წვრილი ფილა-ამენტი შედგება აქტინის ორი ჯაჭვისგან, რომელიც სპირალურად არის ერთმანეთზე გადავრეხილი.

გახანგრძლივებული შეკუმშვა იწვევს კუნთის გაძაღვას, რომელიც გამოწვეულია ატფ-ის დაშლით, ნორმალური ელექტრული სიგნალისთვის საჭირო იონთა გრადიენტის გაფანტვით და ლაქტატის აკუმულაციით (**იხილეთ სურათი 9.17**).

ბოლოდროინდელმა კვლევებმა აჩვენა, რომ შესაძლოა ლაქტოზა იღებდეს მონაწილეობას კუნთის დაღლაში, მაგრამ მას აქვს სასარგებლო როლი კუნთის ფუნქციონირებისთვის. ნერვული სისტემა ახდენს აქტიური მოტორული ერთეულების ცვლილებას. ის აძლევს საშუალებას სხვადასხვა მოტორულ ერთეულს მორიგეობით მონაწილეობა მიიღოს კუნთის გახანგრძლივებულ შეკუმშვაში.

მეორე მექანიზმი, რომლითაც ნერვული სისტემა წარმოქმნის მთლიანი კუნთის საფეხურებრივ შეკუმშვას კუნთოვანი ბოჭკოების სტიმულაციის სიხშირის შეცვლაა. ერთი მოქმედების პოტენციალი წარმოქმნის კუნთის ტოკვას 100 მილიწამის (მწ) ან უფრო ნაკლები დროის განმავლობაში. თუ მეორე მოქმედების პოტენციალი მოვა მანამ, სანამ კუნთოვანი ბოჭკოს მოდუნება მთლიანად არ აქვს დამთავრებული, ორი ტოკვა შეჯამდება და შედეგად უფრო დიდ დაძაბვას ვიღებთ (**სურათი 49.35**). შემდგომი შეჯამება ხდება, თუ სტიმულაციის სიხშირე იზრდება. როდესაც სიხშირე იმდენად მაღალია, რომ კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვებს შორის მოდუნება არ შეუძლია, შეკუმშვები ერწყმის ერთ გლუვ შეკუმშვად, რომელსაც **ტეტანუსი** ეწოდება (არ აგერიოთ იმავე სახელწოდების დაავადებაში). მამოძრავებელი ნეირონები მოქმედების პოტენციალს ჩვეულებრივ სწრაფად განმუხტავდი ზალპის სახით მოიტანენ და შეკუმშვების შეჯამება იწვევს ტეტანურ შეკუმშვას.

შეჯამება და ტეტანუსის დროს დაძაბულობის გაზრდა ხდება განსაკუთრებით იმიტომ, რომ კუნთოვანი ბოჭკოები ძვლებს უშუალოდ კი არ უკავშირდებიან, არამედ შემაერთებელსოვილოვანი



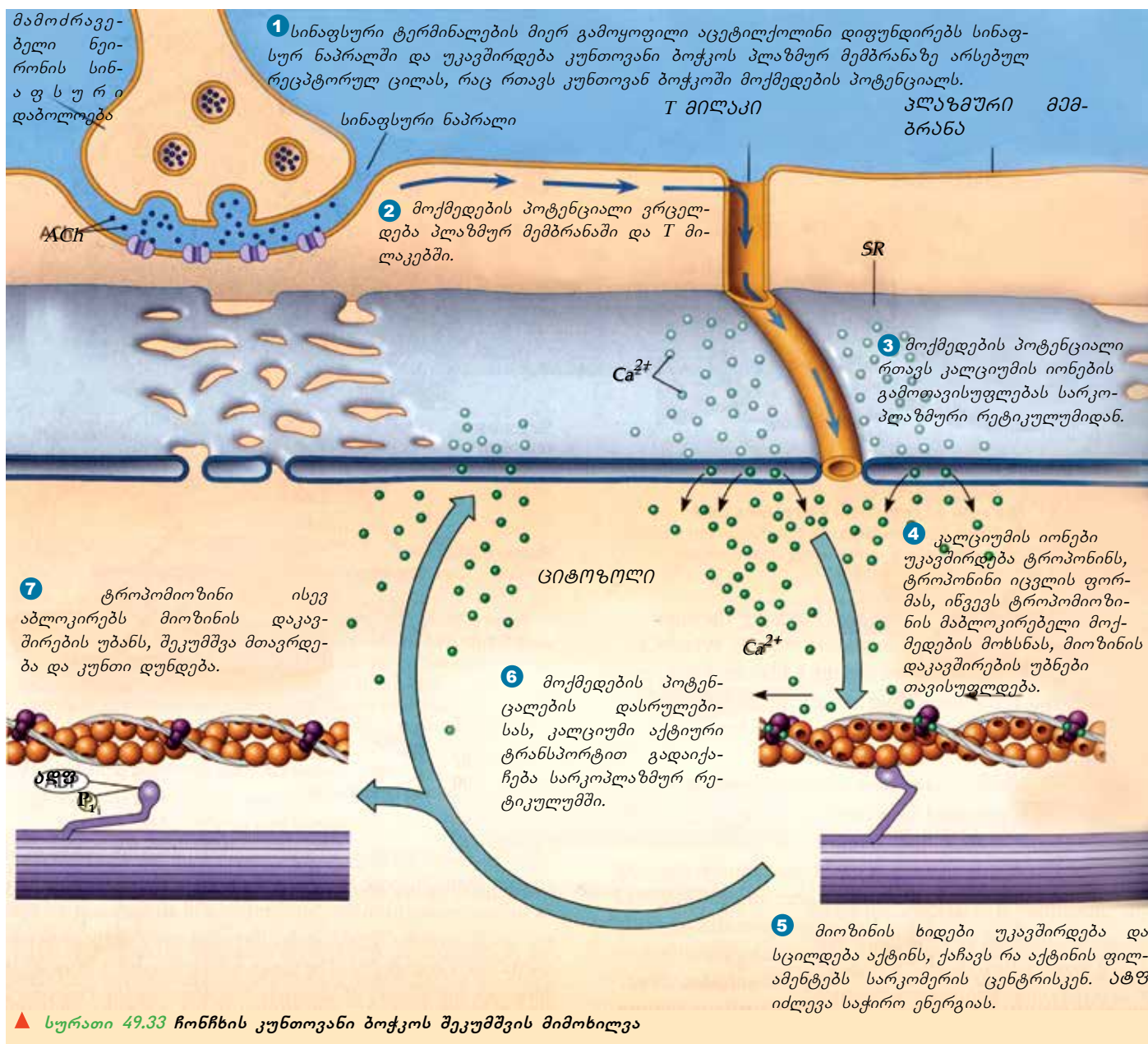
▲ **სურათი 49.32** T მილაკებისა და საკროპლაზმური რეტიკულუმის როლი კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვაში

მამოძრავებელი ნეირონის სინაფსური ტერმინალიდან ხდება აცეტილქოლინის გამოთავისუფლება, რომელიც იწვევს კუნთოვანი ბოჭკოს დეპოლარიზაციას. დეპოლარიზაცია იწვევს მოქმედების პოტენციალის აღმოცენებას (ლურჯი ისრები), რომელიც ვრცელდება მთელ კუნთოვან ბოჭკოში და აღწევს T მილაკებში. ეს მოქმედების პოტენციალი რთავს კალციუმის (მწვანე წერტილები) გამოთავისუფლებას საკროპლაზმური რეტიკულუმიდან ციტოზოლში. კალციუმი იწყებს ფილამენტების შეცურებას, აძლევს რა საშუალებას აქტისა და მიოზინის ერთმანეთს დაუკავშირდეს.

მყესებით. როდესაც კუნთოვანი ბოჭკო შეიკუმშება, ის ჭიმავს ამ ელასტიკურ სტრუქტურებს და გადასცემს დაძაბულებას ძვლებს. ერთხელობრივი შეკუმშვის კუნთოვანი ბოჭკო იწყებს მოდუნებას, სანამ ელასტიკური სტრუქტურები მთლიანად დაიჭიმებოდეს. შეჯამების დროს, მაღალსიხშიროვანი მოქმედების პოტენციალები იწვევს კუნთოვანი ბოჭკოს ციტოზოლში კალციუმის მაღალი კონცენტრაციის შენარჩუნებას, ახანგრძლივებს მიმდინარე პროცესებს და იწვევს ელასტიკური სტრუქტურების უფრო ძლიერ დაჭიმულობას. ტეტანუსისას ელასტიკური სტრუქტურები მთლიანად დაჭიმულია და დაძაბულება ძვლებს გადაეცემა.

### კუნთოვანი ბოჭკოების ტიპები

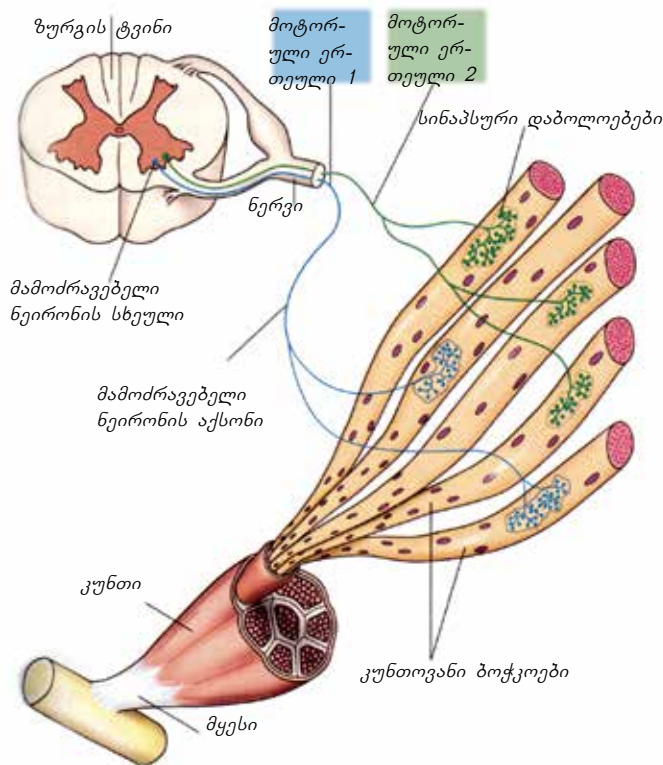
ყველა ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკო იკუმშება, როდესაც მამოძრავებელი ნეირონით მოსული სტიმულით აქტივდება, მაგრამ სიჩქარე, რომლითაც ეს ბოჭკოები იკუმშება განსხვავდება სხვადასხვა კუნთოვანი ბოჭკოსთვის. ეს განსხვავება ძირითადად იმაზეა დამოკიდებული, თუ რამდენად სწრაფად ახდენს მიოზინის თავები ატფ-ის პიდროლიზს. შეკუმშვის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით, კუნთოვანი ბოჭკოების ორ ტიპს – სწრაფსა და ნელს – გამოყოფენ. სწრაფი ბოჭკოები გამოიყენება მოკლე, სწრაფი, ძლიერი შეკუმშ-



ვითვის. ამისგან განსხვავებით, ნელი ბოჭკოები ხშირად ისეთ კუნთებშია ნაწილი, რომლებიც პოზის შენარჩუნებაში იღებს მონაწილეობას და შეუძლიათ ხანგრძლივად შეკუმშულ მდგომარეობაში ყოფნა. ნელ ბოჭკოებს, სწრაფ ბოჭკოებთან შედარებით, ნაკლები სარკოპლაზმური რეტიკულუმი და კალციუმის უფრო ნელი ტუმბო აქვთ. ასე რომ, კალციუმი ციტოზოლში უფრო დიდხანს ჩერდება. ეს იწვევს ნელ ბოჭკოში შეკუმშვის შენარჩუნებას დაახლოებით ხუთჯერ უფრო დიდი დროის განმავლობაში, ვიდრე სწრაფ კუნთოვან ბოჭკოებში.

ბოჭკოების კლასიფიკაციის მეორე კრიტერიუმი არის ის მთავარი მეტაბოლური გზა, რომელსაც ისინი ატფ-ის სინთეზისთვის იყენებენ. ბოჭკოებს, რომლებიც ძირითადად აერობულ სუნთქვას ეყრდნობიან, ოქსიდაციურ ბოჭკოებს უწოდებენ, ხოლო ძირითა-

დად გლიკოლიზის გამოყენებულ ბოჭკოებს გლიკოლიზურები ეწოდებათ. ოქსიდაციური ბოჭკოები ენერგიის სტაბილურ მომარაგებას უზრუნველყოფენ: მათ ბევრი მიტოქონდრია აქვთ, უხვად მარაგდებიან სისხლით და აქვთ ჟანგბადის შემცველი მიოგლობინი. მიოგლობინი მოყავისფრო-წითელი პიგმენტია შინაური ფრინველებისა და თევზების მუც ხორცში. ის უფრო მჭიდროდ იკავშირებს ჟანგბადს, ვიდრე ჰემოგლობინი. ყველა გლიკოლიზური ბოჭკო სწრაფია, მაგრამ ოქსიდაციური ბოჭკოები შეიძლება იყოს როგორც სწრაფი, ასევე ნელი. ამის გამო, შეკუმშვის სიჩქარესა და ატფ-ის სინთეზის გათვალისწინებით ჩვენ შეგვიძლია ჩონჩხის კუნთის ბოჭკოების სამი ძირითადი ტიპის გამოყოფა: ნელი ოქსიდაციური, სწრაფი ოქსიდაციური და სწრაფი გლიკოლიზური. ცხრილი 49.1 ადარებს მათ ზოგ მახასიათებელ ნიშან-თვისებას.



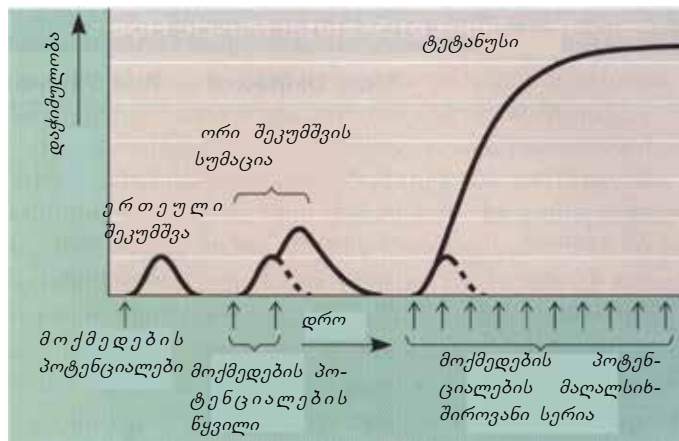
▲ **სურათი 49.34** ხერხემლიანთა ჩონჩხის კუნთის მოტორული ერეთეულები ყველა კუნთოვან ბოჭკოს აქვს ერთი სინაპსი ერთ მამოძრავებელ ნეირონთან, მაგრამ ყველა მამოძრავებელი ნეირონი ჩვეულებრივ ნარმოქმნის სინაფსს რამდენიმე კუნთოვან ბოჭკოზე. მამოძრავებელი ნეირონი და მასთან დაკავშირებული კუნთოვანი ბოჭკოები მოტორულ ერთეულს ქმნის.

ჩონჩხის უმეტესი კუნთი სამივე ტიპის კუნთოვან ბოჭკოს შეიცავს, თუმცა ხელისა და თვალის კუნთებს არ აქვთ ნელი ოქსიდაციური ბოჭკოები. იმ კუნთებში, რომელთაც აქვთ სწრაფი და ნელი კუნთოვანი ბოჭკოების ნარევი, თითოეული მათგანის შეფარდებითი პროპორცია გენეტიკურად არის განსაზღვრული. თუკი კუნთი განმეორებით ძირითადად ხანგრძლივად მიმდინარე პროცესების ემსახურება, მასში სწრაფი გლიკოლიზური ბოჭკოები შესაძლოა სწრაფ ოქსიდაციურ ბოჭკოებზე გარდაიქმნას. გამომდინარე იქედან, რომ სწრაფი ოქსიდაციური ბოჭკოები უფრო ნელა იღლები, კუნთი მთლიანად დადლისადმი უფრო მდგრადი ხდება.

## სხვა ციპის კუნთები

ცხოველთა სამყაროში კუნთების მრავალი ტიპი არსებობს. როგორც აქამდე აღინიშნა, მათ შეკუმშვას მსგავსი ფუნდამენტური მექანიზმები ახასიათებთ: აქტინისა და მიოზინის ფილამენტების შეცურება ერთმანეთში. ჩონჩხის კუნთთან ერთად, ხერხემლიანებს აქვთ გულისა და გლუვი კუნთები (**იხილეთ სურათი 40.5**)

ხერხემლიანების გულის კუნთი ნანახია მხოლოდ ერთ ადგილას – გულში. ჩონჩხის კუნთების მსგავსად, გულის კუნთიც განივზოლიანია. თუმცა არსებობს სტრუქტურული განსხვავება ჩონჩხისა და გულის კუნთებს შორის, რაც განაპირობებს მათ განსხვავებულ



▲ **სურათი 49.35** შეკუმშვების სუმატია. ეს გარფიკი ადარებს დაბალულობას, რომელიც კუნთოვან ბოჭკოში ვითარდება მამოძრავებელ ნეირონში ერთხელობრივი მოქმედების პოტენციალის საპასუხოდ. წყვეტილი ხაზი მიუთითებს დაბალულობას, რომელიც განვითარდება მხოლოდ პირველი მოქმედების პოტენციალის აღმოცენებისას.

ელექტრულ და მემბრანულ თვისებებს. მაშინ, როდესაც ჩონჩხის კუნთები, თუკი მათი სტიმულაცია მამოძრავებელი ნეირონით არ მოხდა, არ წარმოქმნის მოქმედების პოტენციალებს, გულის კუნთოვან უჯრედებს პლაზმურ მემბრანაში გააჩნია იონური არხები, რომლებიც რიტმულ დეპოლარიზაციას განაპირობებს. მოქმედების პოტენციალების ჩართვა ნერვული სისტემიდან მოსული სიგნალის გარეშე ხდება. გულის კუნთის მოქმედების პოტენციალები გრძელდება 20-ჯერ უფრო დიდხანს, ვიდრე ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოებისა და ასრულებს წამყვან როლს შეკუმშვის ხანგრძლივობის კონტროლში. გულის მეზობელი კუნთოვანი უჯრედები ერწყმის ერთმანეთს განსაზღვრულ უბნებში, რომელთაც ინტერკალატური დისკები ეწოდებათ, სადაც ნაპრალოვანი კავშირები (**იხილეთ სურათი 6.30**) უჯრედებს შორის უშუალო ელექტრულ დაწყვილებას უზრუნველყოფს. აქედან გამომდინარე, გულის ერთ ნაწილში წარმოქმნილი მოქმედების პოტენციალი ვრცელდება მთელ გულის კუნთში და მთელი გული იკუმშება.

**გლუვი კუნთი** ნაპოვანია შინაგანი ორგანოების კედლებში, როგორც არის სისხლძარღვები და მომწელებელი ტრაქტის ორგანოები. გლუვ კუნთოვან უჯრედებს არ აქვთ განივი დახაზულობა, რადგანაც მათი აქტინისა და მიოზინის ფილამენტები არ არის უჯრედის სიგრძეზე რეგულარულად ჩაწყობილი. სქელი ფილამენტები გაფანტულია ციტოპლაზმაში და თხელი ფილამენტები მიმაგრებულია სტრუქტურულ უბნებში, რომლებსაც მკვრივი სხეულები ეწოდებათ, რომლებიც პლაზმურ მემბრანაზეა მიბმული. აქ ნაკლები მიოზინია, ვიდრე განივზოლიან კუნთოვან ბოჭკოებში. ამასთან, მიოზინი არ არის დაკავშირებული აქტინის განსაზღვრულ ჯაჭვებთან. გლუვ კუნთოვან უჯრედებს არ აქვთ ტროპონინის კომპლექსი ან T მილაკები. მათი სარკოპლაზმური რეტიკულუმი არ არის კარგად განვითარებული. მოქმედების პოტენციალის განმავლობაში კალციუმის იონები ციტოზოლში ძირითადად პლაზმური მემბრანის საშუალებით შემოდის და ფილამენტებამდე აღწევს მათი შედარებით მცირე რაოდენობა. კალციუმის იონები კალმოდულინთან დაკავშირებით იწვევს შეკუმშვას (**იხილეთ თავი 11**). აღნიშნული კომპლექსი ააქტივებს ფერმენტს რომელიც ფოსფორილირებას ახდენს მიოზინის

## ცხრილი 49.1 ჩონჩხის კუნთოვანი ზოგადი ციპები

| ნელი დაჟანგვითი                 |                  | სწრაფი დაჟანგვითი  |        | სწრაფი გლიკოლიზური |
|---------------------------------|------------------|--------------------|--------|--------------------|
| შეკუმშვის სიჩქარე               | ნელი             | სწრაფი             | სწრაფი |                    |
| მიოზინის ატფაზური ნელი აქტივობა |                  | სწრაფი             | სწრაფი |                    |
| ატფ სინთეზის ძირითადი გზა       | აერობული სუნთქვა | აერობული სუნთქვა   | სწრაფი | გლიკოლიზი          |
| დაღლილობის სიჩქარე              | ნელი             | საშუალო            | სწრაფი |                    |
| ბოჭკოს დიამეტრი                 | პატარა           | საშუალო            | ფართო  |                    |
| მიტოქონდრიები                   | ბევრი            | ბევრი              | ცოტა   |                    |
| კაპილარები                      | ბევრი            | ბევრი              | ცოტა   |                    |
| მიოგლობინის შემადგენლობა        | მაღალი           | მაღალი             | დაბალი |                    |
| ფერი                            | წითელი           | მოვარდისფრო წითელი | თეთრი  |                    |

თავის. გლუვი კუნთები შედარებით ნელა, მაგრამ სიგრძის გაცილებით უფრო დიდ დიაპაზონში იკუმშება, ვიდრე განივზოლიანი კუნთები. ზოგი გლუვი კუნთოვანი ბოჭკო იკუმშება, მხოლოდ ავტონომიური ნერვული სისტემის ნეირონების სტიმულაციისას. სხვებს შეუძლიათ მოქმედების პოტენციალების წარმოქმნა ნერვული იმპულსაციის გარეშე.

უხერხემლოებს აქვთ ხერხემლიანების მსგავსი გლუვი და განივზოლიანი კუნთები. ფეხსახსრიანების კუნთები ხერხემლიანების კუნთების თითქმის იდენტურია. მწერების საფრენ კუნთებს შეუძლია დამოუკიდებელი რიტმული შეკუმშვა და ამრიგად ზოგი მწერის ფრთებს შეუძლია მოძრაობის უფრო სწრაფად განხორციელება, ვიდრე მოქმედების პოტენციალი ცენტრალური ნერვული სისტემიდან კუნთამდე აღწევს. სხვა საინტერესო ევოლუციური ადაპტაცია აღმოჩენილ იქნა კუნთებში, რომლებიც ნიჟარას დახურულ მდგომარეობაში აკავებენ. ამ კუნთების მსხვილი ფილამენტები შეიცავენ ცილა პარამიოზინს. ის საშუალებას აძლევს კუნთებს თითქმის ერთი თვის მანძილზე ენერგიის ძალიან დაბალი დანახარჯით შეკუმშულნი დარჩნენ.

## ჯანსაღი შიმშილი 49.6

1. შეაჯამეთ განივზოლიანი კუნთების შეკუმშვისას მიკროსკოპული დამამტკიცებელი საბუთები, რომლებიც მსხვილი და წვრილი ფილამენტების ერთმანეთში შეცურებას მიუთითებს.
2. როგორ შეიძლება ნერვულმა სისტემამ გამოინიშნოს ჩონჩხის კუნთის მიერ მისი შესაძლებლობის ყველაზე ძლიერი შეკუმშვა.
3. შეადარეთ კალციუმის იონების როლი ჩონჩხის და გლუვი კუნთის შეკუმშვაში

შემოთავაზებული პასუხებისთვის იხილეთ დანართი A.

## ჯანსაღი 49.7

## ლოკომოცია მოითხოვს ენერგიას ხახუნისა და გრავიტაციის დასაძლევად

მოძრაობა ცხოველების დამახასიათებელი ნიშან-თვისებაა. საჭმლის დასაჭერად, ცხოველმა უნდა იმოძრაოს, ან ამოძრაოს ირგვლივ მყოფი წყალი, თუ ჰაერი მისკენ. თუმცა ყველა ღრუბელი მჯდომარეა, ისინი იყენებენ შოლტებს, რათა წყლის ტალღები წარმოქმნან, რომლებიც მცირე ზომის ნაწილაკებს იზიდავენ. კნიდარიებიც ასევე ამოძრავებენ საცეცხებს მსხვერპლის დასაჭერად (იხილეთ თავი 33). ცხოველთა უმეტესობა მოძრაობა და მათი დროისა და ენერგიის მნიშვნელოვან ნაწილს საკვების აქტიურად ძებნაში, მეწყვილის ძიებასა და მტრისგან თავის დაღწევაში ატარებს.

ჩვენი ყურადღება ამ შემთხვევაში გამახვილებული იქნება ლოკომოციაზე, ანუ ერთი ადგილიდან მეორეზე აქტიურ გადაადგილებაზე.

ცხოველთა ლოკომოციის სხვადასხვა ფორმა არსებობს. ცხოველთა უმეტესი რიგი მოიცავს სახეობებს, რომლებიც ცურავენ. მიწაზე, ზღვისა და ტბის ფსკერზე ცხოველები ხოხავენ, დადიან, დარბიან ან დახტიან. აქტიური ფრენა (ხიდან და ამაღლებული მიწიდან ქვემოთ დაშვებისგან განსხვავებით) მხოლოდ ცხოველთა მცირე ჯგუფში განვითარდა. ასეთებია: მწერები, ფრინველები და ძუძუმწოვრებიდან ლამურები. დიდი მფრინავი რეპტილიების ჯგუფი მრავალი მილიონი წლის წინ გადაშენდა. ფრინველები და ლამურები დარჩნენ ერთადერთ მფრინავ ხერხემლიანებად დარჩნენ. ლოკომოცია, მისი ყველა გამოვლენით, საჭიროებს რომ ცხოველმა დახარჯოს ენერგია ორი ძალის დასაძლევად, რომელიც მას უძრავ მდგომარეობაში აჩერებს: ესენია ხახუნი და გრავიტაცია.

## ცურება

რამდენადაც ცხოველთა დიდი ნაწილი წყალში მოტივტივეა, მცურავი ცხოველებისთვის წყალში გრავიტაციის გადალახვა გაცილებით ნაკლებად პრობლემურია, ვიდრე მიწაზე მოძრაობა ან ცაში მფრენი ორგანიზმებისთვის. მეორეს მხრივ, წყალი უფრო მკვირივ გარემოა, ვიდრე ჰაერი. აქედან გამომდინარე ხახუნი წყლის ცხოველების უმთავრესი პრობლემაა. გლუვი თითისტარისებრი (ტორპედოს მსგავსი) ფორმა სწრაფი მცურავების ძირითადი ადაპტაციაა (იხილეთ სურათი 40.2).

ცხოველები სხვადასხვა ნაირათ ცურავენ. მაგალითად, ბევრი მწერი და ოთხფეხა ხერხემლიანი წყალზე მოსასმელად კიდურებს ნიჩბებივით იყენებს. კალმარი, ზღვის სავარცხელი და ზოგი კნიდარია ცურვისას წყალს იღებენ და მერე გამოასხამენ ფეთქებადი გზით. ზვიგენი და ძვლოვანი თევზები სხეულისა და კუდის გვერდებზე მოძრაობებით ცურავენ, ხოლო ვეშაპები და წყლის სხვა ძუძუმწოვრები სხეულის ზევით-ქვევით მოძრაობით.

## ლოჯიკა სმულოტა

ზოგადად, ხმელეთზე ლოკომოციის პრობლემები წყალში არსებული პრობლემების საწინააღმდეგოა. ხმელეთზე სიარულის, სირბილის, ხტუნვის ან ხოხვის დროს ცხოველმა უნდა მოახერხოს თავისი თავის დაჭერა და გრავიტაციის დაძლევა, მაგრამ ჰაერს შედარებით ნაკლები ხახუნი აქვს. როდესაც ხმელეთის ცხოველი დადის, დარბის ან ხტუნავს, მისი ფეხის კუნთები ხარჯავენ ენერგიას, რათა ერთის მხრივ, წინ გადაადგილება და მეორეს მხრივ, დაცემისგან დაცვა უზრუნველყონ. ყველა ნაბიჯთან ერთად ცხოველის ფეხის კუნთმა უნდა დაძლიოს ინერცია, როდესაც აჩქარებს ფეხს საწყისი დგომის მდგომარეობიდან. ხმელეთზე მოძრაობისთვის, ძლიერი კუნთები და ჩონჩხის საყრდენი უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე სხეულის ფორმა.

სხვადასხვა ხერხემალიანს ხმელეთზე გადაადგილებისთვის განსხვავებული ადაპტაცია აქვს. მაგალითად, კენგურუს აქვს დიდი ძლიერი კუნთები უკანა კიდურებზე, რაც ხტომისთვის შეგუებულია (სურათი 49.36). როდესაც კენგურუ მიწაზე ეშვება, მისი უკანა კიდურების მყესი უმაღლეს აგროვებს ენერგიას. რაც უფრო შორს ხტება ცხოველი, უფრო მეტ ენერგიას აგროვებს მყესი. მყესში დაგროვებული ენერგია შემდგომი გადახტომისთვის გამოიყენება და ამრიგად ამცირებს მთლიან ენერგიის ხარჯს, რომელსაც ცხოველი მოგზაურობისას იყენებს. მწერის, ძაღლის, ან ადამიანის ფეხები სიარულის ან სირბილის დროს გარკვეულ ენერგიას ინახავს, თუმცა გაცილებით ნაკლებს, ვიდრე კენგურუსი.

ბალანსის შენარჩუნება სიარულის, ხტომისა და სირბილისას, ასევე უმნიშვნელოვანესი ფაქტორია. კენგურუს გრძელი კუდი ეხმარება ბალანსის შენარჩუნებას ხტუნვის დროს და ასევე ქმნის სტაბილურ სამფეხს მის უკანა ფეხებთან ერთად, ცხოველის ჯდომის ან ნელა მოძრაობისას. მსგავსი პრინციპის გამოხატულებაა მოსიარულე კატა, ძაღლი ან ცხენი, რომლებიც სამ ფეხს მიწაზე დადგმულს ინარჩუნებენ. ორფეხა ცხოველები, როგორებიც არიან ადამიანები ან ფრინველები, სიარულის დროს ერთი ფეხის ნაწილს



▲ **სურათი 49.36 ენერგეტიკულად ეფექტური მოძრაობა ხმელეთზე** კენგურუს ოჯახის წევრები ადგილიდან ადგილზე გრძელ უკანა ფეხებზე ხტუნვით გადაადგილდებიან. ყოველი გადახტომის შემდეგ მყესში უცებ დაგროვილი კინეტიკური ენერგია შემდეგი გადახტომისთვის აფეთქებას უზრუნველყოფს. ფაქტიურად, დიდი კენგურუ, რომელიც ხტება 30კმ/სთ სიჩქარით, არ იყენებს იმაზე მეტ ენერგიას, ვიდრე 6 კმ/სთ სიჩქარით მოძრაობისას. გრძელი კუდი ბალანსის შენარჩუნებაში ეხმარება, როგორც ხტუნვის, ასევე ჯდომისას.

მაინც ტოვებენ მიწაზე დადგმულს. როდესაც ცხოველი დარბის, ოთხივე ფეხი (ან ორივე ფეხი, ორფეხა ცხოველების შემთხვევაში) შესაძლოა ძალიან ცოტა ხნით მიწის ზემოთ აღმოჩნდეს.

ხოხვა ძალიან განსხვავებული სიტუაციაა. რამდენადაც სხეულის უმეტესი ნაწილი მიწასთან შეხებაშია, მხოხავ ცხოველს მნიშვნელოვანი ენერგიის ხარჯვა უწევს ხახუნის გადასალახად. თქვენ წაკითხული გაქვთ, თუ როგორ ხოხავენ ჭიაყელები პერისტალტიკური გზით. ბევრი გველი ხოხავს თავისი სხეულის გვერდებზე მოძრაობით. ქვედა მხარეს არსებული მოძრავი გრძელი ქერცლი ეხმარება მას მიწაზე გადაადგილებაში. პითონები პირდაპირ გადაადგილდებიან კუნთების შეკუმშვით, რომელიც მუცელს ზევით სწევს და ქერცლს

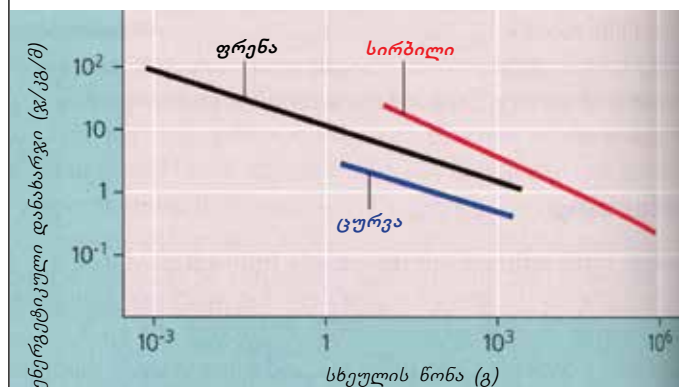
### სურათი 49.37

### კვლევა: რა ატის ლოჯიკის ენერგეტიკული დანახარჯი?

**მქსაერიმენტი** ფიზიოლოგები ენერგეტიკულ დანახარჯს, გამოყენებული ჟანგბადის, ან გამოყოფილი ნახშირორჟანგის გაზომვით აფასებენ. მაგალითად, ქვემოთ ნაჩვენებ განვრთნილ გრძელკუდიან თუთიყუშს აქვს მილთან შეერთებული სახის ნილაბი, რომელიც ფრინველის ფრენისას აირს აგროვებს.



**შედეგი** ეს გრაფიკი ადარებს სირბილთან, ფრენასთან და ცურვასთან სპეციალიზებული ცხოველების ენერგეტიკულ დანახარჯს ჯოლეტებში, ერთ კილოგრამ მასაზე, ერთ მეტრზე გადაადგილებისას (1 ჯ. = 0.24 კალ). მიაქციეთ ყურადღება, რომ ორივე ლერძი ლოგარითმულ შკალაშია მოცემული.



**დასკვნა** მოცემული მასის მქონე ცხოველებისთვის, ცურვა ენერგეტიკულად ყველაზე ეფექტურია და სირბილი კი ყველაზე ნაკლებად ეფექტური. ნებისმიერ შემთხვევაში, პატარა ცხოველი ერთ კილოგრამზე გაცილებით მეტ ენერგიას ხარჯავს, ვიდრე დიდი ზომის ცხოველი.

წინ გადაადგილებს და მერე უკან განდევნის მიწის საწინააღმდეგოდ.

## ფრენა

ფრენისას მთავარი პრობლემა გრავიტაციაა, რამდენადაც ფრთებმა უნდა განახორციელონ საკმარისი ზემოთ წევა, და გადალახონ გრავიტაციის ქვემოთ მიმართული ძალა. ფრენისთვის საკვანძო ფრთის ფორმაა. ფრთის ყველა ტიპის (მათ შორის თვითმფრინავის), სტრუქტურა ისეთია, რომ ჰაერის ტალღა შეცვალოს სხეულის მალა დარჩენის უზრუნველსაყოფად.

მფრინავი ცხოველები შედარებით მსუბუქი არიან, სხეულის წონა მერყეობს რამდენიმე გრამიდან ზოგი მწერის შემთხვევაში, დაახლოებით 20 კგ-მდე ყველაზე დიდი ზომის ფრინველებისთვის. ბევრ მფრინავ ცხოველს სტრუქტურული ადაპტაციები აქვს, რაც მათ სხეულის წონას ამცირებს. მაგალითად, ფრინველებს ჰაერით სავსე ღრუ ძვლები აქვთ და არა აქვთ კბილები (**იხილეთ სურათი 34**). თითისტარას ფორმა ამცირებს წინალობას მსგავსად წყლის ცხოველების შემთხვევისა.

## ლოკომოციის ენერგეტიკული ხარჯი

ცხოველთა ლოკომოციის შესწავლა ბიოენერგეტიკის საკითხებთან გვაბრუნებს, რომელიც 40-ე თავშია განხილული. ლოკომოციის ენერგეტიკული ღირებულება დამოკიდებულია ლოკომოციის ტიპზე და გარემოზე (**სურათი 49.37**). მორბენალი ცხოველები ჩვეულებრივ უფრო მეტ ენერგიას ხარჯავენ ერთ მეტრზე, ვიდრე ექვივალენტური ზომის მოცურავე ცხოველები, ნაწილობრივ იმიტომ, რომ სირბილი და სიარული გრავიტაციის დაძლევისთვის ენერგიას მოითხოვს. ცურვა ენერგეტიკულად ლოკომოციის ყველაზე ეფექტური ფორმაა (იმ დაშვებით, რომ ცხოველი ცურვისთვის არის სპეციალიზირებული). ჩვენ თუ შევადარებთ ენერგიის მოხმარებას წუთთან მიმართებაში, ვიდრე მეტრებთან მიმართებით, ვნახავთ, რომ მფრინავი ცხოველები უფრო მეტ ენერგიას იყენებენ ვიდრე იგივე მასის მქონე მცურავი და მორბენალი ცხოველები.

სურათ 49.37-ზე მოცემული გრაფიკის დადმავალი ფრთა ასევე აჩვენებს, რომ დიდი ზომის ცხოველი უფრო მეტად ეფექტურად

გადაადგილდება, ვიდრე მცირე ზომის ცხოველი, რომელიც იგივე სახის ტრანსპორტირებით ხასიათდება. მაგალითად, 450 კილოგრამიანი ცხენი ხარჯავს ნაკლებ ენერგიას სხეულის მასის კილოგრამზე, ვიდრე 4 კილოგრამიანი კატა იგივე დისტანციაზე. რა თქმა უნდა, ენერგიის მთელი რაოდენობა, რომელიც ლოკომოციაზე იხარჯება დიდი ზომის ცხოველისთვის უფრო მეტია.

იმ ენერგიის რაოდენობა, რომელსაც ცხოველი მოძრაობაზე იყენებს განსაზღვავს იმას, თუ მიღებული საკვების ენერგიის რა ნაწილი დაიხარჯება ზრდასა და გამრავლებაზე. აქედან გამომდინარე, სტრუქტურული და ქცევითი ადაპტაციები, რომლებიც ლოკომოციის ეფექტურობის გაზრდას იწვევს, ასევე ზრდის ცხოველის ევოლუციურ წარმატებას. თუმცა ჩვენ სენსორული რეცეპტორები და კუნთები ამ თავში ცალ-ცალკე განვიხილეთ, ისინი ერთიანი სისტემის ნაწილები არიან, რამდენადაც ტვინს, სხეულსა და გარეგან სამყაროს ერთმანეთს უკავშირებენ. ცხოველის ქცევა ამ სისტემის მოქმედების პროდუქტია. მერვე ნაწილი მიმოიხილავს ორგანიზმების ქცევას ეკოლოგიის უფრო ფართო კონტექსტში.

## კონცეფცია შემოწმება 49.7

1. შეადარეთ ცურვა და ფრენა მათ წინაშე არსებული მთავარი პრობლემების გათვალისწინებით და ის ადაპტაციები, რომელიც საშუალებას აძლევს ცხოველებს დაძლიოს აღნიშნული პრობლემები.
2. 49.37-ე სურათზე დაყრდნობით, რომელი ცხოველი იყენებს უფრო მეტ ენერგიას სხეულის მასის კილოგრამთან მიმართებაში, 1 მ-ზე გადაადგილებისას. 1 გ მფრინავი თუ 1 კგ. მორბენალი?

იმ აქტივობებისა და/ან კვლევების მიმოხილვისთვის, რომელიც 49-ე თავში იყო წარმოდგენილი, იხილეთ კემპბელის ბიოლოგიის მეშვიდე გამოცემის ინტერნეტ გვერდი და მენიუში მონიშნეთ „თავი 49“.

## 49-ე თავის შემოქმედება

### ბიბლიითადი კანცეფციების შემოქმედება:

#### კანცეფცია 49.1

### სენსორული რეცეპტორები გაზრდილიან გაღიზიანების ენერგიას და გადასცემენ სიგნალს ცენტრალურ ნერვულ სისტემას

- ▶ **სენსორული რეცეპტორების მიერ შესრულებული ფუნქციები.** სენსორული რეცეპტორები ჩვეულებრივ სპეციფიკური ნეირონები ან ეპითელიური უჯრედებია, რომელთაც გარემო სტიმულების დაფიქსირება შეუძლიათ; შინაგანი რეცეპტორები შინაგან სიგნალებს აფიქსირებენ. სენსორული ტრანსდუქცია არის სტიმულის ენერგიის გარდაქმნა მემბრანული პოტენციალის ცვლილებად, რომელსაც რეცეპტორულ პოტენციალს უწოდებენ. რეცეპტორულ უჯრედებში სიგნალის გარდაქმნის გზა ხშირად აძლიერებს სიგნალს, რაც თავის მხრივ განაპირობებს რეცეპტორული უჯრედების მიერ მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნას ან, ნეირომედიატორის გამოთავისუფლებას სენსორული ნეირონის სინაპსებში.
- ▶ **სენსორული რეცეპტორების ტიპები.** მექანორეცეპტორები პასუხობენ ისეთ სტიმულს, როგორიც არის წნევა, შეხება, გაჭიმვა, მოძრაობა და ბგერა. ქემორეცეპტორები ამჩნევენ ან ხსნარის მთლიან კონცენტრაციას, ან განსაზღვრულ მოლეკულებს. ელექტრომაგნიტური რეცეპტორები აფიქსირებენ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სხვადასხვა ფორმას. თერმორეცეპტორების განსხვავებული ტიპები გადასცემენ ინფორმაციას სხეულის ზედაპირსა და შიგნით არსებული ტემპერატურის შესახებ. ტკივილი განსხვავებული რეცეპტორების ჯგუფით შეიმჩნევა, რომლებიც პასუხობენ ქარბ სიცხეს, წნევას ან, განსაზღვრული სახის ნივთიერებებს.

#### კანცეფცია 49.2

### ის მიქანორეცეპტორები, რომლებიც სმენასა და წონასწორობაში ატიან ჩაბთული რეაგირებენ ნაწილაკების დალოქვასა ან სითხის მოძრაობაზე

- ▶ **გრავიტაციისა და ბგერის შეგრძნება უხერხემლოებში.** უხერხემლოთა უმეტესობა საკუთარ ორიენტაციას გრავიტაციასთან მიმართებაში სტატოცისტების საშუალებით შეიგრძნობს. ბევრი ფეხსახსრიანი ბგერას სხეულის ბენვებით შეიგრძნობს, რომლებიც ირხევა. ასევე აქვთ „ყურები“, რომლებიც შედგება ტიმპანური მემბრანისა და რეცეპტორული უჯრედებისგან.
- ▶ **სმენა და წონასწორობა ძუძუმწოვრებში.** ტიმპანური მემბრანა (ყურის ბარაბანი) ბგერით ტალღებს შუა ყურში სამ მცირე ზომის ძვალს გადასცემს, რომელიც თავის მხრივ რხევას ოვალური სარკმლის გავლით შიგნითა ყურის ლოკოკინაში არსებულ სითხეს აწვდის. სითხეში წნევის ტალღები იწვევენ ბაზილალური მემბრანის რხევას, კორტის ორგანოში არსებული წამწამოვანი უჯრედების დეპოლარიზაციას და რთავენ მოქმედების პოტენციალებს. ხოლო, ისინი სმენის ნერვის საშუალებით ტვინისკენ მიემართება. ბაზილალური მემბრანის თითოეული უბანი განსაზღვრულ სიხშირეზე ირხევა განსაკუთრებით ძლიერად და იწვევს დიდი ტვინის ქერქის, სმენის განსაზღვრული უბნის აგზნებას. შიგნითა ყურის უტრიკულა, საკულა და სამი ნახევრადრკალოვანი არხი ასრულებს წონასწორობისა და ბალანსის ფუნქციას
- ▶ **სმენა და წონასწორობა სხვა ხერხემლიანებში.** წყლის მოძრაობის დაფიქსირება თევზებსა და წყლის ამფობიებში ხორციელდება გვერდითი ხაზის საშუალებით, რომლებიც წამწამოვანი უჯრედების ჯგუფებს შეიცავენ.

#### კანცეფცია 49.3

### გემოსა და ყნოსვის შეგრძნებები უმეტეს ცხოველში მჭიდროდ ატის დაკავშირებული

- ▶ **გემოს შეგრძნება ადამიანში.** გემოსა და ყნოსვის შეგრძნება დამოკიდებულია ქემორეცეპტორების სტიმუ-

ლაციაზე, მცირე ხსნადი მოლეკულების საშუალებით, რომლებიც პლაზმური მემბრანის ცილებს უკავშირდება. ადამიანებში გემოს რეცეპტორები ორგანიზებულია ენასა და პირში არსებულ გემოს დვრილებში. გემოს ხუთი შეგრძნება – ტკბილი, მჟავე, ცხარე, მარილიანი და უმამი (გლუტამატი გამომჟღავნებული) – ტრანსდუქციის რამდენიმე განსაზღვრულ მექანიზმს გამოყოფს.

- ▶ **ყნოსვა ადამიანებში.** ყნოსვის რეცეპტორული უჯრედები ცხვირის ღრუს ზედა ნაწილშია მოთავსებული და აგზავნის აქსონებს ტვინისაკენ – საყნოსავი ბოლქვისკენ. 1,000-ზე მეტი გენი აკოდირებს იმ მემბრანულ ცილებს, რომლებიც სუნის ნივთიერებების განსაზღვრულ კლასს უკავშირდება. თითოეული რეცეპტორული უჯრედი აექსპრესირებს ან მხოლოდ ერთ, ან რამდენიმე გენს.

## ჯანცეფცია 49.4

### მთელ ცხოველთა სამცაბრში მხედველობა მსგავსი მქდანინგმებით ხბრცილდება

- ▶ **მხედველობა უხერხემლოებში.** უხერხემლოების სინათლის დეტექტორები მოიცავს მარტივ, სიათლე მგრძნობიარე ლაქას პლანარიაში; გამოსახულების წარმომქმნელ რთულ თვალს მწერებში, კიბოსნაირებში და ზოგ პოლიქეტაში და ზოგი მედუზას, პოლიქეტას ობობას-ნაირისა და მრავალი მოლუსკის ერთბროლიან თვალს.
- ▶ **ხერხემლიანების მხედველობის სისტემა.** ხერხემლიანების თვალის მთავარი ნაწილებია სკლერა, რომელიც მოიცავს კორნეას; კონიუქტივა; ქოროიდი, რომელიც მოიცავს ფერად გარსს ანუ ირისს; ბადურა, რომელიც მოიცავს ფოტორეცეპტორებს და ბროლი, რომელიც უზრუნველყოფს სინათლის ფოკუსირებას ბადურაზე. ფოტორეცეპტორები (ჩხირები და კოლბები) შეიცავენ პიგმენტ რეტინალს, რომელიც ცილა ოპსინთან არის დაკავშირებული. რეტინალის მიერ სინათლის აბსორბცია რთავს სიგნალის გადაცემის გზას, რომელიც ინვევს ფოტორეცეპტორების ჰიპერპოლარიზაციას და მათ მიერ ნაკლები ნეირომედიატორის გამოყოფას. სინაფსები ატარებენ ინფორმაციას ფოტორეცეპტორებიდან ბიპოლარული და შემდეგ განგლიოზური უჯრედებისკენ, რომელთა აქსონებიც მხედველობითი ნერვის შემადგენლობაში მოქმედების პოტენციალს ტვინს გადასცემენ. ბადურას სხვა ნეირონები ინვევენ ინფორმაციის ინტეგრაციას, მანამ სანამ ის ტვინს გადაეგზავნება. მხედველობის ნერვის აქსონთა უმეტესობა თალამუსის გარეთა დამუხლვილ ბირთვთან მიდის, რომელიც გადართავს ინფორმაციას მხედველობის პირველად ქერქზე. მხედველობის აღქმის ჩამოყალიბებაში რამდენიმე ინტეგრაციული ცენტრია ჩართული.

**აქტივობა – თვალის სტრუქტურა და ფუნქცია.**

## ჯანცეფცია 49.5

### ცხოველების ჩონჩხი ემსახურება საცბდრნ, დაცვით და მამობბაეველ ფუნქციებს

- ▶ **ჩონჩხის ტიპები.** ჰიდროსტატიკური ჩონჩხი ნაპოვნია ნაწლავლრუიანების, ბრტყელი ჭიების, ნემატოდების, ანელიდების უმეტესობაში. სგი შედგება სითხისგან, რომელიც სხეულის დახურულ კომპარტმენტებში გარკვეული წნევის ქვეშ იმყოფება.
  - ▶ **ეგზოჩონჩხი, რომელიც უმეტესობა მოლუსკსა და ფესხასხრიაწშია ნაპოვნი, არის ცხოველის ზედაპირზე მკვრივი საფარი.** ენდოჩონჩხი, რომელიც ღრუბლებში, ეკალკანიანებსა და ქორდიანებში გვხვდება არის სხეულის სიღმეში მკვრივი საყრდენი ელემენტები.
- აქტივობა – ადამიანის ჩონჩხი;**  
**ფიზიკური საყრდენი მიწაზე;**  
**ჩონჩხთან ერთად კუნთები და მყესები იღებენ მონაწილეობას ხმელეთის დიდი ზომის ხერხემლიანების საყრდენ ფუნქციაში.**

## ჯანცეფცია 49.6

### კუნთები ჩონჩხის ნაწილს მუკუმშვის გზით ამობბაეველ

- ▶ **ხერხემლიანების ჩონჩხის კუნთები.** ჩონჩხის კუნთები ხშირად ანტაგონისტურ წყვილებს ქმნის და უზრუნველყოფს მოძრაობას შეკუმშვისა და ჩონჩხზე დამქაჩი მოქმედების გზით. ხერხემლიანთა ჩონჩხის კუნთები შედგება კუნთოვანი ბოჭკოების კონებისგან, რომლებიც თავის მხრივ მიოფიბრილებს შეიცავს. ეს უკანასკნელები კი აქტინის წვრილი და მიოზინის მსხვილი ფილამენტებისგან შედგება. მიოზინის თავები ატფ-ის ენერგიის გამოყენებით უკავშირდება წვრილ ფილამენტებს. მიოზინის მოლეკულების თავის გადახრა ქაჩავს წვრილ ფილამენტებს. როდესაც ატფ უკავშირდება მიოზინის თავს, ის თავისუფლდება და მზად არის ახალი ციკლის დასაწყებად. განმეორებითი ციკლი ინვევს მსხვილი და წვრილი ფილამენტების შეცურებას ერთმანეთში, სარკომერის დამოკლებას და კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვას.
- ▶ **მამობრავებელი ნეირონი აცეტილქოლინის გამოყოფით ინვევს შეკუმშვის დაწყებას.** აცეტილქოლინი კუნთოვანი ბოჭკოს მემბრანის დეპოლარიზაციას განაპირობებს. მოქმედების პოტენციალები კუნთოვანი ბოჭკოს შიგნით მიემართებიან T მილაკების საშუალებით და ასტიმულირებენ სარკოპლაზმური რეტიკულუმიდან კალციუმის იონების გამოთავისუფლებას. კალციუმის იონები გადაადგილებს წვრილ ფილამენტში

ტროპომიოზინ-ტროპონინის კომპლექსს, რაც საშუალებას აძლევს მიოზინის თავს დაუკავშირდეს აქტინს და დაიწყოს ციკლური პროცესის განხორციელება. მოტორული ერთეული შედგება მამოძრავებელი ნეირონისა და იმ კუნთოვანი ბოჭკოებისგან, რომლებსაც ის აინერვირებს. ბევრი მოტორული ერთეულის ჩართვა უფრო ძლიერ შეკუმშვას განაპირობებს. ერთხელობრივი შეკუმშვა ხორციელდება მამოძრავებელ ნეირონში ერთხელობრივი მოქმედების პოტენციალის საპასუხოდ. უფრო სწრაფად მიწოდებული მოქმედების პოტენციალები კი იწვევს საფეხურებრივ შეკუმშვას შეჯამების გზით. ტეტანუსი არის გლუვი და მდგრადი შეკუმშვა, როდესაც მამოძრავებელი ნეირონებით მოქმედების პოტენციალების ზალპი მოიცანება. ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოები მათ შეკუმშვის სიჩქარესა და ატმ-ის წარმოქმნის მთავარ გზაზე დაყრდნობით კლასიფიცირდება, როგორც ნელი ოქსიდაციური, სწრაფი ოქსიდაციური ან სწრაფი გლიკოლიზური. აქტივობა ჩონჩხის კუნთის სტრუქტურა.

**აქტივობა – კუნთის შეკუმშვა.**

**გამოკვლევა, თუ როგორ ახდენს ელექტრული გაღიზიანება კუნთის შეკუმშვას?**

- ▶ **კუნთების სხვა ტიპები.** გულის კუნთი მხოლოდ გულშია ნაპოვნი, შედგება განივზოლიანი უჯრედებისგან, რომლებიც ელექტრულად დკავშირებული არიან ერთმანეთთან და შეუძლიათ მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნა ნერვული სისტემიდან მოსული სიგნალის გარეშე. გლუვ კუნთში, შეკუმშვა უფრო ნელა ხორციელდება და შესაძლოა თითონ კუნთშივე დაიწყოს ან ავტონომური ნერვული სისტემის ნეირონებიდან მოსული სტიმულაციით იქნეს გამოწვეული.

**განცდვია 49.7**

## ლუჯმდცია მთხჯს ჟწტგჯას ხახუნისა და გტაჟიცდცჯის დასაბლუჯად

- ▶ **ცურვა.** ნინალობის დაძლევა მცურავების მთავარი პრობლემაა. გრავიტაცია ნაკლებ პრობლემას წარმოადგენს მცურავი ცხოველებისთვის, ხმელეთზე მოსიარულე ან მფრინავ ცხოველებთან შედარებით.
- ▶ **ლოკომოცია ხმელეთზე.** ხმელეთზე სიარული, სირბილი, ხტუნვა ან, ხოხვა ცხოველისგან კარგ საყრდენს და გრავიტაციის დაძლევის უნარს მოითხოვს.
- ▶ **ფრენა.** ფრენა მოითხოვს ფრთების მიერ საკმარისი აწევის განვითარებას, რამაც უნდა დაძლიოს გრავიტაციით ქვემოთ მიმართულ ძალის მოქმედება.
- ▶ **ლოკომოციის ღირებულებების შედარება.** ის ცხოველები, რომლებიც ცურვის მიმართ არიან სპეციალ-

იზირებულნი ხარჯავენ ნაკლებ ენერგიას ერთ მეტრზე, ვიდრე შესაბამისი ზომის მფრენი ან სირბილით გადაადგილებადი ცხოველები.

## შჯამტმთ საჟთატბ ცდნა

### თჟთშმტმტმტა

1. ქვემოთ მოყვანილი სენსორული რეცეპტორებიდან, რომელი არ არის სწორედ დაწყვილებული თავის კატეგორიაში.
  - ა. წამწამოვანი უჯრედები – მექანორეცეპტორები;
  - ბ. კუნთის თითისტარა – მექანორეცეპტორი;
  - გ. გემოს რეცეპტორები – ქემორეცეპტორი;
  - დ. ჩხირი – ელექტრომაგნიტური რეცეპტორი;
  - ე. ყნოსვის რეცეპტორი – ელექტრომაგნიტური რეცეპტორი;
2. ზოგი ზვიგენი ხუჭავს თვალს კბენამდე. თუმცა, ის ვერ ხედავს თავის მსხვერპლს, ის ზუსტად კბენს სამიზნეს. მკვლევარებმა შენიშნეს, რომ ზვიგენი მეტალის ობიექტზე ზოგჯერ სწორ კბენას ვერ ახერხებს. ასევე მას აქვს აკვარიუმის ქვიშაში ჩამარხული ბატარიების პოვნის უნარი. ეს მიუთითებს, რომ ზვიგენები მათი მსხვერპლის კვალს კბენის განხორციელებამდე წამში ინარჩუნებენ, იმავე მექანიზმით რითაც ხორციელდება:
  - ა. ჩხრიალა გველის მიერ თავის მიგნება თავის სოროში;
  - ბ. მამრი აბრეშუმის ჭიის მიერ მენწყილის ადგილმდებარეობის განსაზღვრა;
  - გ. ღამურას მიერ ჩრჩილის სიბნელეში პოვნა;
  - დ. იხვნისკარტას მიერ მისი მსხვერპლის მდებარეობის განსაზღვრა ტალახიან მდინარეში;
  - ე. ბრტყელი ჭიების მიერ გარიდება ნათელი ადგილებიდან;
3. ბგერის მოქმედების პოტენციალად გარდაქმნა ხდება:
  - ა. ტექტორულ მემბრანაში, რამდენადაც ის წამწამოვანი უჯრედებით სტიმულირდება;
  - ბ. როდესაც წამწამოვანი უჯრედები გადაიხრება ტექტორული მემბრანის საწინააღმდეგოდ, იწვევს მის დეპოლარიზაციასა და ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლებას, რომელიც მგრძნობიარე ნეირონის სტიმულაციას განაპირობებს;
  - გ. როდესაც ბაზილარული მემბრანა ნატრიუმის იონების მიმართ უფრო განვლადი ხდება და დეპოლარიზდება, მგრძნობიარე ნეირონში მოქმედების პოტენციალის დაწყება განაპირობებული;
  - დ. ბაზილარული მემბრანა ირხევა განსხვავებული სიხშირით სხვადასხვა მოცულობის ბგერაზე;
  - ე. შუა ყურში, რამდენადაც ვიბრაცია ჩაქუჩით, გრ-

- დემლითა და უზანგით ძლიერდება;
4. ჩამოთვლილთაგან რომელი არ არის სწორი ხერხემლიანთა თვალისთვის?
    - ა. მინისებრი სხეული არეგულირებს გუგაში შემავალი სინათლის რაოდენობას;
    - ბ. გამჭვირვალე რქოვანა სკლერას გაგრძელებაა;
    - გ. ფოვია არის მხედველობის ველის ცენტრი და მხოლოდ კოლებებს შეიცავს;
    - დ. წამწამოვანი კუნთი აკომოდაციაში იღებს მონაწილეობას;
    - ე. ბადურა მოთავსებულია ქოროიდის შიგნით და შეიცავს ფოტორეცეპტორებს;
  5. როდესაც სინათლე ჩხირის როდოპსინს ეცემა, რეტინალი სცილდება ოპსინს და იწყება სიგნალის გადაცემის გზის გააქტივება, რომლის დროსაც
    - ა. ხდება მეზობელი ბიპოლარული უჯრედის დეპოლარიზაცია და იწყება მოქმედების პოტენციალის გენერაცია განგლიოზურ უჯრედში;
    - ბ. ხდება ჩხირის დეპოლარიზაცია, რაც თავის მხრივ იწვევს ნეიროტრანსმიტერის გამოთავისუფლებას, რომელიც ბიპოლარული უჯრედის აგზნებას იწვევს;
    - გ. ხდება ჩხირის ჰიპერპოლარიზაცია, და მცირდება გლუტამატის გამოთავისუფლება, რომელიც ააგზნებს ზოგ ბიპოლარულ უჯრედს და შეაკავებს სხვას;
    - დ. ხდება ჩხირის ჰიპერპოლარიზაცია, იზრდება გლუტამატის გამოყოფა, რომელიც ააგზნებს ამაკრინულ უჯრედებს და აინჰიბირებს ჰორიზონტალურებს;
    - ე. გარდაქმნის ციმფ-ს გმფ-დ, ხსნის ნატრიუმის არხს, ახდენს მემბრანის ჰიპერპოლარიზაციას და როდოპსინის დაშლას იწვევს;
  6. მოლუსკებსა და ლობსტერებს აქვთ ეგზოჩონჩხი, მაგრამ ლობსტერები უფრო მოძრავნი არიან. რატომ?
    - ა. მოლუსკებს მხოლოდ ჩამკეტი კუნთები აქვთ, რომელიც ნიჟარას ხურავს, ლობსტერებს კი აქვთ როგორც ჩამკეტი, ისე გამხსნელი კუნთები.
    - ბ. მოლუსკის კუნთის პარამიოზინი ახერხებს, რომ კუნთი შეკუმშულ მდგომარეობაში შენარჩუნდეს ენერგიის დაბალი დანახარჯით, მაშინ, როცა ლობსტერების კუნთები ძალიან ჰგავს ხერხემლიანთა განივზოლიან კუნთებს.
    - გ. მოლუსკები ახერხებენ გაზრდას, მხოლოდ ნიჟარის გარეთა კუთხეში შრეების დამატებით, მაშინ როცა ლობსტერები განმეორებებით იცვლიან თავიანთ ეგზოჩონჩხს უფრო მოქნილი ჩონჩხით.
    - დ. ლობსტერების ჩონჩხს შეუძლია აქტიურად შეიკუმშოს, ხოლო მოლუსკებისას არ აქვს შემკუმშავი მექანიზმი.
  - ე. ლობსტერებს აქვთ დასახსრული ეგზოჩონჩხი, რაც მათი სხეულის ნაწილებს მოქნილი მოძრაობის საშუალებას აძლევს.
  - ე. ხერხემლიანთა ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვისას, კალციუმის იონები -
    - ა. არღვევენ ხიდს, მოქმედებენ რა როგორც კოფაქტორები ატფ-ის ჰიდროლიზში.
    - ბ. უკავშირდებიან ტროპონინს, უცვლიან მას ფორმას ისე, რომ მიოზინის აქტინთან დაკავშირების უბნები თავისუფლდება.
    - გ. მოქმედების პოტენციალს მამოძრავებელი ნეირონიდან კუნთოვან ბოჭკოს გადასცემენ.
    - დ. ავრცელებენ მოქმედების პოტენციალს T ტუბულებში;
    - ე. აღადგენენ პლაზმური მემბრანის პოლარიზაციას მოქმედების პოტენციალის შემდეგ.
  8. ტეტანუსი ეწოდება:
    - ა. მთავარი საყრდენი კუნთების ნაწილობრივ მდგრად შეკუმშვას.
    - ბ. ერთი კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვას სულ ან, არაფრის კანონის მიხედვით.
    - გ. უფრო ძლიერ შეკუმშვას, რომელიც ბევრი მოტორული ერთეულის გააქტივების შედეგია;
    - დ. გლუვ და მდგრადი შეკუმშვას, რომელიც სუმაციის შედეგია.
    - ე. კუნთის დაღლის მდგომარეობას ატფ-ის დაშლისა და ლაქტატის აკუმულაციის გამო;
  9. ჩამოთვლილთაგან რომელია სწორი გულის კუნთოვანი უჯრედებისთვის?
    - ა. მათ არ აქვთ აქტინისა და მიოზინის მონესრიგებული განლაგება;
    - ბ. მათ აქვთ ნაკლებად განვითარებული სარკოპლაზმური რეტიკულუმი; და აქედან გამომდინარე უფრო ნელა იკუმშებიან, ვიდრე გლუვი კუნთები;
    - გ. ისინი დაკავშირებულები არიან ინტერკალატური დისკებით, რომელთა საშუალებითაც მოქმედების პოტენციალი ვრცელდება გულის ყველა უჯრედში.
    - დ. მათი მოსვენების პოტენციალი უფრო დადებითია ვიდრე, მოქმედების პოტენციალის ზღურბლი.
    - ე. ისინი, მხოლოდ ნეირონებით სტიმულაციისას იკუმშებიან.
  10. რომელი ცვლილება აღმოცენდება ჩონჩხის კუნთოვანი ბოჭკოს შეკუმშვისას?
    - ა. A უბანი მოკლდება;
    - ბ. I უბანი მოკლდება;
    - გ. Z ზოლები ერთმანეთს სცილდება;
    - დ. წვრილი ფილამენტები იკუმშება;
    - ე. მსხვილი ფილამენტები იკუმშება;

**ვიქტორინის პასუხებისთვის იხილეთ დანართი.**

უფრო მეტი კითხვისთვის იხილეთ ინტერნეტ გვერდი ან კომპაქტდისკი.

## ფოლუციური კაჟშიტი

ხმელეთზე ლოკომოცია წყალთან შედარებით ჩვეულებრივ მოითხოვს უფრო მეტ ენერგიას. იმის გაერთიანებით რაც თქვენ ცხოველთა ფუნქციების შესახებ ისწავლეთ ამ თავებში, მიმოიხილეთ ძუძუმწოვართა ევოლუციური ადაპტაციები, რომელიც ხელს უწყობს ენერგიის მაღალ მოთხოვნებს ხმელეთზე მოძრაობისას.

## მეცნიერება, ცოდნოვანობა და საზოგადოება

თუმცა ჩონჩხის კუნთები ჩვეულებრივ სწრაფად იღლებიან, მოლუსკების ნიჟარების კუნთებს აქვთ ცილა პარამიოზინი, რომელიც მათ აძლევთ საშუალებას თვეების განმავლობაში შეკუმშულ მდგომარეობაში იყვნენ. შეკუმშვის უჯრედული მექანიზმების შესახებ თქვენს ცოდნაზე დაყრდნობით, შემოგვთავაზეთ ჰიპოთეზა თუ როგორ შეიძლება იფუნქციონიროს პარამიოზინმა. როგორ შეამოწმებდით თქვენს ჰიპოთეზას ექსპერიმენტულად?

**პლევა** - როგორ ახდენს გავლენას ელექტრული სტიმულაცია კუნთის შეკუმშვაზე?

მეცნიერება, ტექნიკა და საზოგადოება.

თქვენ შესაძლოა იცოდეთ, რომ მოხუც ადამიანს, ზოგჯერ ძვალი აქვს გატეხილი (ხშირად თეძო) ნაწილობრივ ოსტეოპოროზის გამო. ამის მიზეზი არის ძვლის სიმკვრივის დაქვეითება, რომელიც ბევრ ქალში მენოპაუზის შემდეგ ვლინდება. ოსტეოპოროზის თავიდან აცილების მიზნით, მკვლევარები გვირჩევენ ვარჯიშსა და კალციუმის მაქსიმალურად მიღებას, როდესაც ადამიანი 10-30 წლის ასაკშია. რეალურია, რომ ახალგაზრდა ადამიანებმა განიხილონ საკუთარი თავი როგორც მომავალმა ხანდაზმულმა მოქალაქეებმა? რას გვირჩევდით, როგორ უნდა მივუდგეთ ახალგაზრდებს და დავარწმუნოთ, რომ განივითა-რონ ჯანმრთელობისთვის სასარგებლო ჩვევები, რომელიც 40-50 წელი არაფერ დადებითში არ გამოიყვანდება?