

**V. Papunidze, G. Khatisashvili, T. Sadunishvili**

**PLANT  
FOR A HEALTHY  
ENVIRONMENT**

**Batumi Botanical Garden  
of Georgian Academy of Science**

**Durmishidze Institute of Biochemiatriy and Biotechnology  
of Georgian Academy of Science**

ვ. პაპუნძე, გ. ხატისაშვილი, თ. სადუნიშვილი

**მცენარე  
ჯანმრთელი  
გარემოსათვის**

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის  
ბათუმის ბოტანიკური ბაღი

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ს. დურმიშიძის სახ.  
ბიოქიმიისა და ბიოტექნოლოგიის ინსტიტუტი

მონოგრაფია ეძღვნება ტოქსიკური ქიმიური ნაერთებით გარემოს დაბინძურების პრობლემას. დახასიათებულია ძირითადი ანთროპოგენური ტოქსიკანტები, გარემოში მათი გავრცელების წყაროები; ადამიანის ჯანმრთელობაზე, ცხოველურ და მცენარეულ ორგანიზმებზე ტოქსიკანტების ზემოქმედების ხასიათი. განხილულია მცენარეში უცხო წარმოშობის ნაერთების შეღწევის, გადაადგილებისა და გარდაქმნების ძირითადი ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესები; ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის ფერმენტული მექანიზმები. აღწერილია ქიმიურად დაბინძურებული გარემოს გასუფთავების თანამედროვე ეკოლოგიური ტექნოლოგია (ფიტორემედიაცია), რომელიც დაფუძნებულია მცენარეების უნიკალურ უნარზე, ჰაერიდან, წყლიდან და ნიადაგიდან შთანთქან და გააუვნებელყონ უადრესად ფართო სპექტრის ქიმიური ტოქსიკანტები. წიგნში წარმოდგენილია საქართველოს ფლორის ფიტორემედიაციული შესაძლებლობები და ჩვენს ქვეყანაში ამ ტექნოლოგიის დანერგვის პერსპექტიულობა.

წიგნი განკუთვნილია ეკოლოგიური ქიმიის, ბიოტექნოლოგიის, ქსენობიოქიმიის, მცენარეთა და გარემოს დაცვის დარგში მოღვაწე სპეციალისტებისათვის; სტუდენტებისა და ასპირანტებისათვის.

- რედაქტორი:** საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის აკადემიკოსი,  
გ. კვესიტაძე
- რეცენზენტები:** საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის აკადემიკოსი,  
ნ. ნუცუბიძე  
საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წევრ-კორესპონდენტი,  
მ. გორდუზიანი

## სარჩმვი

შესავალი .....	8
1 გარემოს ქიმიური დამბინძურებლები .....	11
1.1 ორგანული ტოქსიკური ნაერთები .....	12
1.1.1 არომატული ნახშირწყალბადები .....	12
ბენზოლი და მისი კომოლოგები .....	12
პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები .....	14
1.1.2 პესტიციდები .....	15
1.1.3 ქლორორგანული ტოქსიკანტები .....	21
დიოქსინები .....	21
პოლიქლორირებული ბიფენილები .....	26
ქლორირებული ალკანები და ალკენები .....	27
1.1.4 ფეთქებადი ნიტრო-ნაერთები .....	30
2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (TNT) .....	31
1.1.5 ზედაპირულად აქტიური ნაერთები .....	34
1.2 არაორგანული ტოქსიკური ნაერთები .....	35
1.2.1 ნახშირბადის ოქსიდები .....	36
ნახშირბადის მონოოქსიდი (CO) .....	36
ნახშირბადის დიოქსიდი (CO <sub>2</sub> ) .....	37
1.2.2 გოგირდის დიოქსიდი (SO <sub>2</sub> ) .....	38
1.2.3 აზოტის ოქსიდები (NO <sub>x</sub> ) .....	40
1.2.4 ატმოსფეროს მეორადი დამბინძურებლები .....	43
ოზონი (O <sub>3</sub> ) .....	43
სმოგის წარმოქმნა .....	44
1.2.5 მძიმე მეტალები .....	48
დარიშხანი (As) .....	49
ტყვია (Pb) .....	50
ვერცხლისწყალი (Hg) .....	53
კადმიუმი (Cd) .....	34
2. ტოქსიკური ნაერთების მიმოქცევა ბუნებაში .....	56
2.1 ტოქსიკური ნაერთების გავრცელება ნიადაგში .....	58
2.2 ტოქსიკური ნაერთები წყალში .....	62
2.3 ტოქსიკური ნაერთების გავრცელება ჰაერში .....	65
2.4 ტოქსიკური ნაერთების გეოგრაფიული და ბიოტური გადატანა .....	69

3. მცენარეებში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევისა და ტრანსპორტის ფიზიოლოგიური ასპექტები .....	75
3.1 ტოქსიკური ნაერთების შეღწევა თესვებში .....	75
3.2 ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმა ფოთლებით .....	77
3.3 ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმა ფესვებით .....	84
3.4 ტოქსიკური ნაერთების გადაადგილება მცენარეში .....	89
4. ტოქსიკური ნაერთების გაუღენა უჯრედის სტრუქტურულ ორგანიზაციაზე .....	101
4.1 უჯრედის ულტრასტრუქტურული ცვლილებები .....	102
4.1.1 ცალკეული ტოქსიკანტების ზემოქმედება მცენარეულ უჯრედზე .....	106
მეთანი .....	107
ეთანი .....	108
პროპანი .....	109
ბუთანი .....	110
აირადი ალკანების ნარევი .....	111
პროპილენი .....	114
ბუთილენი .....	114
ბენზოლი და მისი წარმოებულები .....	115
პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები .....	116
ბენზიდინი .....	117
2,4-D .....	118
TNT .....	118
ტყვიის ნაერთები .....	120
4.2 მცენარეული უჯრედის ულტრასტრუქტურული რეორგანიზაცია ქსენობიოტიკების მეტაბოლიზმის პროცესში .....	120
5. ორგანული ტოქსიკანტების გარდაქმნა მცენარეულ უჯრედში .....	127
5.1 ჟანგვითი დეგრადაცია .....	133
5.1.1 პიდროქსილირება .....	134
ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა .....	144
პეროქსიდაზა .....	152
ფენოლოქსიდაზა .....	154
5.1.2 ღრმა ჟანგვა .....	160
5.2 პიდროლიზური ტიპის გახლეჩა .....	163
5.2.1 ესთერაზები .....	165
5.3 აღდგენითი გარდაქმნები .....	166
5.3.1 ნიტრორედუქტაზები .....	167
5.3.2 დეჰალოგენაზები .....	170
5.4 კონიუგატების წარმოქმნა .....	173

5.4.1 სპირტებისა და ფენოლების ჰიდროქსილის ჯგუფების გლიკოზილირება .....	174
5.4.2 ორგანული მჟავების კარბოქსილის ჯგუფების გლიკოზილირება .....	176
5.4.3 ამინო-ჯგუფების გლიკოზილირება .....	177
5.4.4 კარბოქსილის ჯგუფების კონიუგაცია ამინომჟავებთან .....	178
5.4.5 ქსენობიოტიკების კონიუგაცია პეპტიდებთან .....	179
5.4.6 ტრანსფერაზები .....	181
5.5 ტოქსიკური ნაერთების ექსკრეცია .....	184
<b>6. ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები .....</b>	<b>187</b>
6.1 ფიტოექსტრაქცია .....	190
6.2 რიზოფილტრაცია .....	194
6.3 ფიტოდეგრადაცია .....	196
6.4 რიზოდეგრადაცია .....	198
6.5 ფიტოსტაბილიზაცია .....	199
6.6 ფიტოოლატილიზაცია .....	200
6.7 ჰიდრაელიკური კონტროლი .....	201
6.8 კომპლექსური მეთოდები .....	201
6.9 ატმოსფერული ჰაერის გასუფთავება .....	202
6.10 ფიტორემედიაციაში გამოყენებული მცენარეები .....	206
6.10.1 ტრანსგენური მცენარეები ფიტორემედიაციაში .....	208
6.11 საქართველოს ფლორა და ფიტორემედიაცია .....	211
<b>ლიტერატურა .....</b>	<b>220</b>

*ეძღვნება საქართველოში  
ქსენობიოქიმიის ფუძემდებლის,  
აკადემიკოს სერგი დურმიშიძის  
დაბადების 95-ე წლისთავს*

## შესავალი

ტოქსიკური ქიმიური ნაერთებით გარემოს დაბინძურება თანამედროვე გლობალურ ეკოლოგიურ პრობლემას წარმოადგენს. XIX და XX საუკუნეები თვალნათლივ გვიჩვენებენ, რომ რაც უფრო მაღალ საფეხურს აღწევს საზოგადოების განვითარება, მით უფრო უარესდება პლანეტის ეკოლოგიური მდგომარეობა. ქიმიური ტოქსიკანტებით გარემოს დაბინძურება, რომელიც მუდმივად ზრდის ტენდენციას ავლენს, XXI საუკუნეში დამოკლეს მახვილოვით დაეკიდა კაცობრიობის თავზე.

გარემოს ქიმიური დაბინძურება შეიძლება გამოწვეული იყოს როგორც ადამიანის მოღვაწეობით (ანთროპოგენურად), ასევე ბუნებრივი სტიქიური პროცესებითაც. ამ უკანასკნელებს წარმოადგენს: ტოქსიკური აირების გამოყოფა ქვანახშირის, ტორფის, ბუნებრივი აირისა და ნავთობის საბადოებიდან, ჭაობებიდან, ვულკანების ამოფრქვევისას; ტოქსიკური ელემენტების (მაგ., ლარიზმანის, ვერცხლისწყლის და სხვ.) შემცველი ქანების გამორეცხვა წყალდიდობების, მიწისძვრების, მეწყერების დროს და ა.შ. გარემოს ლოკალური დაბინძურების მიზეზი შეიძლება იყოს აგრეთვე იმ მიკროორგანიზმების ცხოველყოფილობა, რომლებიც ტოქსიკურ ნაერთებს გამოყოფენ.

სამწუხაროდ, ადამიანის მოღვაწეობამ, რომელიც განუხრელადაა დაკავშირებული სხვადასხვა ქიმიური ნაერთების წარმოებასა და მათ გამოყენებასთან, გარემოს ქიმიური დაბინძურების მხრივ საგრძნობლად გადააჭარბა ბუნებრივ პროცესებს. მსოფლიოში ყოველწლიურად ასობით მილიონი ტონა ქიმიური პროდუქტი იწარმოება. ეს ნივთიერებები, აგრეთვე ბუნებაში მათი აბიოტური და ბიოტური გარდაქმნების შედეგად მიღებული პროდუქტები ხშირად ტოქსიკური ბუნებისაა. გარემოში ისინი სხვადასხვა გზით ვრცელდებიან, კოლოსალური რაოდენობით კონცენტრირდებიან ბიოსფეროში და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ეკოლოგიურ წონასწორობაზე. ურბანიზაციის, მრეწველობისა და ტრანსპორტის განვითარების, სოფლის მეურნეობისათვის ქიმიკატების წარმოების, სამხედრო მოქმედებებისა და სხვა საქმიანობის შედეგები ადამიანს ბუმერანგით უბრუნდება უკან სიცოცხლისათვის საშიში, ტოქსიკური ნაერთების სახით.

გარემოს დაცვა და ადამიანის ჯანმრთელობა ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირშია. ამ სფეროებში მოქმედი საერთაშორისო ორგანიზაციების ერთობლივი მკაცრი მოთხოვნებით სადღეისოდ აკრძალულია, ან მკვეთრად შეზღუდული მრავალი მაღალი ტოქსიკურობის მქონე ნაერთის წარმოება და გამოყენება, რათა მინიმუმამდე შემცირდეს ბუნებაში მათი გავრცელების შესაძლებლობა. უახლესი სამრეწველო ტექნოლოგიების რეგლამენტი აუცილებლად უნდა ითვალისწინებდეს სპეციალური ფილტრების, კატალიზატორების, გამწმენდი დანადგარებისა და ნაგებობების დამონტაჟებას, რომლებიც საგრძნობლად შეამცირებენ ტოქსიკური ნაერთების შემცველობას გამონაბოლქვ აირებში, საწარმოებიდან გამომდინარე წყლებში, საწარმო ნარჩენებში და ა.შ. მაგრამ ეს არ არის გამოსავალი შექმნილი მძიმე ეკოლოგიური სიტუაციიდან, ვინაიდან უკვე მნიშვნელოვნადაა დაბინძურებული მილიონობით ჰექტარი ნიადაგი, დიდი რაოდენობით წყალსატევები, მიწისქვეშა წყლები და სხვ. ეკოლოგიური მდგომარეობის გამოსწორებისათვის აუცილებელია გარემოდან ტოქსიკური ნაერთების მოცილება და მათი გაუვნებელყოფა.

ქიმიურად დაბინძურებული გარემოს გასუფთავება, მისი სრულყოფილი სახით აღდგენა და ხანგრძლივი დაცვა ყველაზე ეფექტურად და ეკონომიურად ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების გამოყენებითაა შესაძლებელი. ფიტორემედიაცია გულისხმობს ქიმიურად დაბინძურებული გარემოს გაწმენდა-აღდგენას მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების საშუალებით, რომლებსაც უნარი გააჩნიათ შეითვისონ და გარდაქმნან ორგანული და არაორგანული ტოქსიკანტების ფართო სპექტრი: ალიფატური, ციკლური და პოლიციკლური ნახშირწყალბადები, ფენოლები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, ქლორორგანული გამხსნელები, პესტიციდები, ფეთქებადი ნაერთები, მძიმე მეტალები, რადიონუკლიდები და სხვ. ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები სადღეისოდ მთელს მსოფლიოში წარმატებით ცვლიან გარემოს რემედიაციის არაბიოლოგიურ მეთოდებს. მცენარე, რომელსაც ტოქსიკანტების შეთვისება შეუძლია ბიოსფეროს სამივე ელემენტიდან — ჰაერიდან, ნიადაგიდან და წყლიდან, თავისი დეტოქსიკაციური პოტენციალით ეკოლოგიურად ჯანსაღი გარემოს აღდგენის ყველაზე ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს. ფიტორემედიაციის მთავარი უპირატესობა, სიიაფის გარდა, იმაში მდგომარეობს, რომ ამ გზით არ ირღვევა ეკოლოგიური ბალანსი — ქიმიური ტოქსიკანტის მოლეკულები მთლიანად შეითვისება უჯრედის მიერ და ის ატომები, რომლებიც ტოქსიკურ სტრუქტურას ქმნიდნენ, უვნებელი ნაერთების სახით ისევ ბუნებრივ წრებრუნვაში ერთვებიან.

წარმოდგენილი მონოგრაფიის მიზანია, თვალნათლვ წარმოვედგინოს, რა საშიშროებას წარმოადგენს ქიმიური დამბინძურებლები გარემოსათვის, როგორ მოქმედებენ ისინი ცოცხალი ორგანიზმების ჯანმრთელობაზე და რა შესაძლებლობებს ფლობს მცენარე, როგორც “მწვანე ფილტრი”, რომელიც თავის თავზე იღებს გარემოში მოხვედრილი ტოქსიკური ნაერთების შეკავებისა და გაუვნებელყოფის ფუნქციებს. განხილული იქნება ის ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური



პროცესები, რომელთა საშუალებითაც მცენარეში ქსენობიოტიკების შეღწევის, გადაადგილებისა და დეტოქსიკაციის პროცესები ხორციელდება.

მონოგრაფიაში განიხილება გარემოში გაბნეული ქიმიური ტოქსიკანტების გასაუვნებელყოფის და ჯანმრთელი გარემოს შენარჩუნების მიზნით მცენარის გამოყენების შესაძლებლობები. აღწერილი იქნება თანამედროვე ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები, მათი მოქმედების პრინციპები. წარმოდგენილი იქნება საქართველოს ფლორის ფიტორემედიაციული პოტენციალი, განსჯილი იქნება ჩვენს ქვეყანაში ფიტორემედიაციის დანერგვის პერსპექტიულობის საკითხი.

ავტორები თავის მოუალეობად თელიან, მადლიერების გრძნობა გამოხატონ ბიოლოგიის მეცნიერებათა კანდიდატის მარინა ფრუიძის მიმართ, ხელნაწერის მომზადებისას გაწეული დიდი დახმარებისათვის.

# 1. გარემოს ქიმიური დამბინძურებლები

ეკოლოგიურ ქიმიასი არსებობს პოპულარული განმარტება, რომლის მიხედვითაც გარემოს დამბინძურებელია ყველა ის ქიმიური ნაერთი, რომელიც “არაშესაბამის ადგილზე არაშესაბამისი რაოდენობით გვხვდება”. მართლაც, ბევრი ნაერთი ბუნებაში თავისთავადაა წარმოდგენილი, ზოგიერთი კი სინთეზურადაა ნაწარმოები და ბუნებისათვის უცხოა, მაგრამ მაღალი კონცენტრაციით ბუნებრივი ნაერთებიც კი უარყოფითად მოქმედებს ცოცხალ ორგანიზმებში მიმდინარე პროცესებზე. მაგ., ნახშირორჟანგი ჰაერის შემადგენელი კომპონენტია, მაგრამ ბუნებრივზე უფრო მაღალი კონცენტრაციით იგი უკვე გარკვეულ საფრთხეს უქმნის გარემოს ეკოლოგიურ წონასწორობას და ამ დროს იგი დამბინძურებლად უნდა ჩავთვალოთ.

ქიმიურ ნაერთებს წარმომავლობის მიხედვით ბუნებრივ ნაერთებად და ქსენობიოტიკებად ყოფენ. ქსენობიოტიკად ის ნაერთი ითვლება, რომელიც თავისი ქიმიური სტრუქტურითა და ბიოლოგიური თვისებებით უცხოა ბიოსფეროსათვის და მიღებულია მხოლოდ და მხოლოდ ქიმიური სინთეზის გზით. ასეთი ნაერთები ძალიან ხშირად მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევიან და სადღეისოდ პრობლემურ ქიმიურ დამბინძურებლებს წარმოადგენენ. მათ მიეკუთვნება: პესტიციდები, ლაქ-საღებავები, ორგანული გამხსნელები, ემულგატორები, დამაკონსერვებელი აგენტები, ნეთობპროდუქტები, საყოფაცხოვრებო ქიმიის პროდუქტები, პოლიმერების წარმოებაში გამოყენებული ქიმიკატები (პოლიმერები, მონომერები, პიგმენტები, პლასტიფიკატორები, სტაბილიზატორები, პლასტიციზერები და სხვ.), ფარმაცოლოგიური მრეწველობის პროდუქტები, ზედაპირულად აქტიური ნაერთები, ფრეონები, ფეთქებადი ნაერთები, შესაფუთი მასალები და მრავალი სხვა.

ქიმიური დამბინძურებლების განსაკუთრებულ ჯგუფს მიეკუთვნება რადიონუკლიდები, რომლებიც მაიონიზირებელი გამოსხივების წყაროს წარმოადგენენ და ამ მხრივ ზემოქმედებენ გარემოში მიმდინარე სასიცოცხლო პროცესებზე.

წინამდებარე თავში წარმოდგენილი იქნება გარემოს ქიმიური დამბინძურებლები, რომლებიც მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევიან და გლობალური მასშტაბით არიან გავრცელებული. განხილული იქნება მათი გავრცელების წყაროები, გამოყენების სფეროები და გარემოზე ზემოქმედების ხასიათი.

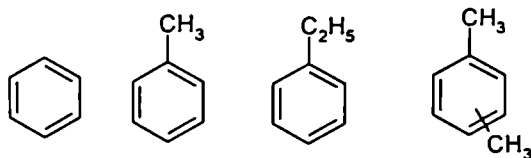
## 1.1 ორგანული ტოქსიკური ნაერთები

გარემოს ქიმიური დამბინძურებლების მრავალათასიან სიაში ორგანული ტოქსიკანტები უადრესად ფართო სპექტრით არის წარმოდგენილი. ორგანული დამბინძურებლების უმრავლესობა არაორგანული ტოქსიკური ნაერთებისაგან, განსაკუთრებით კი მძიმე მეტალებისაგან განსხვავებით, გარემოში მოხვედრისას მნიშვნელოვან ბიოტურ და აბიოტურ გარდაქმნებს განიცდის, რასაც შეიძლება ტოქსიკური თვისებების გაძლიერება, ან პირიქით, შესუსტება მოჰყვეს. ორგანული ტოქსიკური ნაერთების ეს თვისებებურება ყოველთვის გასათვალისწინებელია ამ ტიპის ტოქსიკანტების გარემოზე ზემოქმედების განსაზღვრისას, გარემოს ეკომონიტორინგისა და რემედიაციული ღონისძიებების ჩატარებისას.

### 1.1.1 არომატული ნახშირწყალბადები

#### ბენზოლი და მისი კომპოლოგები

ბენზოლის არომატული ბირთვი მრავალი ორგანული ნაერთის ტოქსიკურობას განაპირობებს. თვით ბენზოლი და მისი კომპოლოგები (ნახ. 1.1) უადრესად ტოქსიკური ნაერთებია.



ბენზოლი ტოლუოლი ეთილბენზოლი ქსილოლი

ნახ. 1.1. ბენზოლი და მისი უახლოესი კომპოლოგები.

ბენზოლის 90%-ზე მეტი იწარმოება ნავთობ-ქიმიური მრეწველობის მიერ, დანარჩენი 10% კი მიიღება კოქს-ქიმიური წარმოებისას და ბუნებრივი გაზიდან. 1980 წლიდან აშშ-ში, დიდ ბრიტანეთსა და ევროპის თანამეგობრობის ქვეყნებში მაღალი ტოქსიკურობის გამო ბენზოლის (20 ყველაზე საშიში ნაერთის სიაში ბენზოლი მე-6-ე ადგილზეა) წარმოება და გამოყენება მკვეთრად შეიზღუდა. მიუხედავად ამისა, ბენზოლის უმსხვილესი ექსპორტიორი — დიდი ბრიტანეთი ყოველწლიურად მილიონამდე ტონა ბენზოლს აწარმოებს. ბენზოლი სადღეისოდ ერთ-ერთ ყველაზე პრობლემურ ეკოლოგიურ დამბინძურებლად რჩება. ამიტომ საესებით მართებული იყო ამ რამდენიმე წლის წინ საქართველოში ეკოლოგების მიერ მთავრობისათვის წაყენებული მოთხოვნა, არ მიეცათ ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნისათვის პიროლიზური ფისიდან ბენზინის წარმოების

უფლება, თუ მიღებულ ნაეთობპროდუქტში ბენზოლის შემცველობა მინიმუმამდე არ იქნებოდა დაყვანილი.

ბენზოლისა და მისი ჰომოლოგების დიდი ნაწილი (ბენზოლის ჰომოლოგების ნარევის, ე.წ. BTEX<sup>1</sup>-ის სახით) საწვავის დანამატად გამოიყენება, რამდენადაც მათი საშუალებით ზდება ბენზინის ოქტანური რიცხვის გაზრდა. გარდა ამისა ბენზოლი გამოიყენება, როგორც ნედლეული სტიროლის, ციკლოპექსანის, ეთილბენზოლის, კუმოლის, ნიტრობენზოლის, ანილინისა და სხვა ნაერთების სინთეზში. ბენზოლი გამხსნელის ან დამატებითი კომპონენტის სახით შედის ლაქ-საღებავებში, მელნებში, თხევად რეზინში, აუჯის საპრიალებელ ცვილებში, სარეცხ საშუალებებში, ლაქის ამოსაყვან ნარეუებში, წებოებში, ფარმაცევტულ პრეპარატებში, პესტიციდებში და ა.შ. ცხადია, ზედმეტი არ იქნება, თუ აღვნიშნავთ, რომ ბენზოლი სიგარეტის კვამლის შემადგენლი კომპონენტია.

ბენზოლის მოლეკულები კოსმოსურ სოფრეცეშიცაა გავრცელებული, თუმცა ამას აღამიან ვერ გადაუბრალებთ — როგორც ასტრონომებს მიანიჩათ, ბენზოლი ვარსკვლავების ფორმირების გარკვეულ ეტაპზე გამოიყოფა. ვარაუდობენ, რომ ბენზოლი "ძველი", ნახშირბადით მდიდარი ვარსკვლავების ირგვლივ წარმოიქმნება. მაგ., ასეთ ვარსკვლავებს მიეკუთვნებიან წითელი გიგანტები, რომელთა მასა შხისას სულ ცოტა, სამკერ აღემატება.

ბენზოლისა და მისი ჰომოლოგების გარემოში გავრცელების ძირითადი ანთროპოგენური წყაროებია:

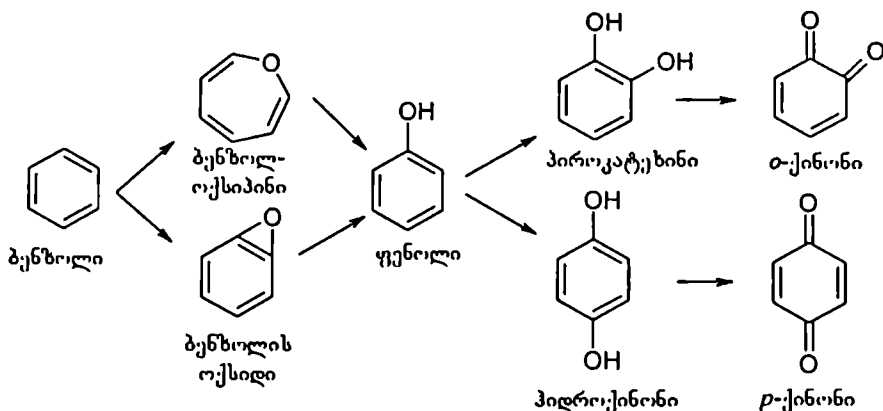
- ნედლი ნაუთობისა და ნაუთობ-პროდუქტების გაჟონვა ნაუთობის გადამუშავების პროცესში;
- ქვანახშირისა და ფისის გადამამუშავებელი კომბინატების ნარჩენები;
- საწარმოების ნარჩენები, რომლებიც ბენზოლს აწარმოებენ ან იყენებენ;
- სათბობისა და წიაღისეული საწვავის წვა;
- საწვავის გაჟონვა ავზებიდან, რეზერვუარებიდან და ტანკებიდან.

ემისიის შედეგად ბენზოლი, პირველ რიგში, ატმოსფეროში გამოიყოფა, საიდანაც სხვა ეკოსისტემებში ზდება. პაერიდან ბენზოლი ძირითადად აბინძურებს ოკეანებს, ზღვებს, ტბებს, წყალსაცავებსა და მდინარეებს, გრუნტისა და სასმელ წყლებს, ნიადაგს, სელიმენტებს<sup>2</sup> და ა.შ.

ბენზოლი და მისი ჰომოლოგები ლეიკემიის გამომწვევი კანცეროგენებია. თვით ბენზოლი საკმაოდ მდგრადი ნაერთია, მაგრამ ღვიძლში მოხვედრისას იგი ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზის მიერ იჟანგება და წარმოიქმნება ბენზოლ-ოქსიპინი ან ბენზოლის ოქსიდი (ნახ. 1.2). ეს ნაერთები, ბენზოლთან შედარებით, უკეთესი ხსნადობითა და რეაქციისუნარიანობით ხასიათდებიან. ისინი სისხლის ნაკადით ღვიძლიდან სხვა ორგანოებში გადაიტანება. ძელის

<sup>1</sup> BTEX — ბენზოლის, ტოლუოლის, ეთილბენზოლისა და ქსილოლის ნარევის აღმნიშვნელი აბრევიატურა

<sup>2</sup> სელიმენტი — დანალექი



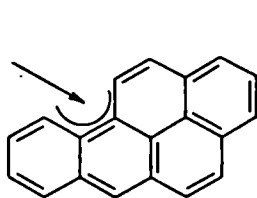
ნახ. 1.2. ბენზოლის გარდაქმნა ადამიანის ორგანიზმში.

ტენის ქსოვილის უჯრედებში მოხვედრისას ბენზოლის პირველადი გარდაქმნის პროდუქტები თავდაპირველად ფენოლამდე აღდგებიან, შემდეგ კი საფეხურებრივად იუნგებიან *o*- და *p*-დიფენოლებამდე (პიროკატეჟინამდე და ჰიდროჟინონამდე), და შესაბამის ქინონებამდე. ყველა ეს გარდაქმნა ფერმენტულია. წარმოქმნილი ქინონები ოქსო-ჯგუფების ხარჯზე იკავშირებენ ცილების ან ნუკლეინის მჟავების ორ-ორ მოლეკულას, იწვევენ მათ გადაჯვარედინებას, რაც ამ ბიოპოლიმერებს ხელს უშლის ნორმალური ბიოლოგიური ფუნქციის შესრულებაში. სწორედ ასეთ პირობებში შეიძლება განვითარდეს ისეთი პათოლოგია, როგორიც ლეიკემიაა.

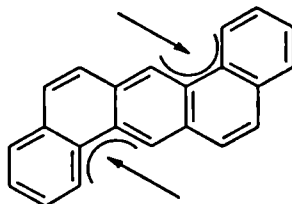
### პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები

პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები ძლიერ კანცეროგენულ ნაერთებს მიეკუთვნებიან. ისინი სამრეწველო მასშტაბით პრაქტიკულად არ იწარმოება და ორგანული ნაერთების წვის შედეგად წარმოიქმნება. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები გვხვდება ფისებში, ბიტუმებში, ჭვარტლში, ნიადაგის ჰუმინურ კომპონენტებში, შიდაწვის ძრავების გამონახობლქში, თამბაქოს კვამლსა და შებოლილ პროდუქტებში. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები წყალში პრაქტიკულად უხსნად ნაერთებს წარმოადგენენ, ახასიათებთ დნობისა და დუდილის მაღალი ტემპერატურა, გამოირჩევიან ქიმიური მდგრადობით მიუხედავად ამისა, ეს ლიპოფილური ნაერთები ფართოდაა გავრცელებული ნიადაგში, წყალსა და ჰაერში, რაც ცოცხალ ორგანიზმებში მათი ბიოკონცენტრირების რეალურ საშიშროებას განაპირობებს.

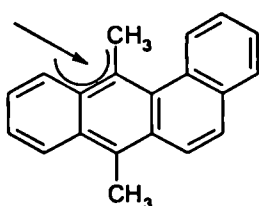
პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების უმეტესობა სულ ცოტა, ერთ სპეციფიკურ, "ჩაღრმავებულ" უბანს მაინც შეიცავს, რომლის არსებობასაც მიაწერენ კანცეროგენულ თვისებებს (ნახ.1.3).



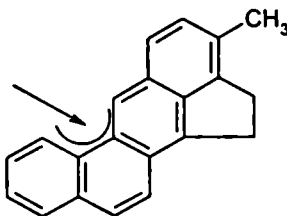
3,4-ბენზოფლურენი



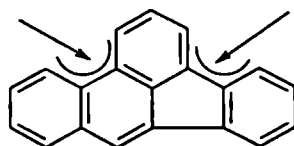
1,2,5,6-დიბენზოფლურენი



7,12-დიმეთილ-  
ბენზოფლურენი



3-მეთილფლურენი



3,4-ბენზოფლურენი

ნახ. 1.3. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების ზოგიერთი წარმომადგენელი. ისრით ნაჩვენებია სპეციფიკური "ჩაღრმავებული" უბნები.

ორგანიზმში მოხვედრისას პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები ფერმენტების (უპირატესად ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზების) მოქმედებით ეპოქსიდური ტიპის ნაერთებად იქცევა. ეს ეპოქსიდები თავის მხრივ ადვილად ურთიერთქმედებენ გუანინთან, რაც ხელს უშლის ღწმ-ის სინთეზს, არღვევს ტრანსკრიპციულ პროცესებს, იწვევს მუტაციებს და ხელს უწყობს სიმსივნური დაავადებების განვითარებას.

მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების გარკვეულ წარმომადგენლებს გარემოდან პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების შეთვისებისა და მათი გარდაქმნის მაღალი უნარი გააჩნიათ, რასაც ეფუძნება უახლესი ბიო- და ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები.

### 1.1.2 პესტიციდები

მცენარეთა დაცვის და მუნებლების წინააღმდეგ ბრძოლის საშუალებები, რომლებსაც საერთო სახელწოდება — პესტიციდები აერთიანებთ, გარემოს ყვე-

ლაზე უფრო გავრცელებული დამზინჟურეპლუბია. გარემოს დაცვის სააგენტოს (EPA) და მსოფლიოს ჯანდაცვის ორგანიზაციის (WHO) უახლესი მონაცემების მიხედვით, ამჟამად პესტიციდებს მიეკუთვნება 1000-ზე მეტი ნაერთი, რომლებიც სხვადასხვა ქიმიურ კლასებს წარმოადგენენ. მათ შორისაა: ამიდები, დიპირიდინლები, დიფენილეთერები, თიოკარბამატები, კარბამატები, კარბამიდები, კუ-მარინები, ნიტროფენოლები, პირაზოლები, პირეტროიდები, ტრიაზინები, ფენოქსიაცეტატები, შარდოვანას წარმოებულები, აგრეთვე ელემენტორგანული ნაერთები, რომლებიც შეიცავენ ქლორს, ბრომს, ფტორს, ფოსფორს, დარიშხანს, კალას, ვერცხლისწყალს, სპილენძს და სხვ. პესტიციდების ყოველწლიური წარმოება და მოხმარება, რაც მჭიდრო კავშირშია სოფლის მეურნეობასთან, ათობით მილიონ ტონას შეადგენს.

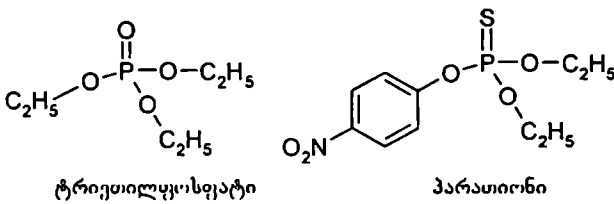
- მოქმედების ტიპის მიხედვით პესტიციდები შემდეგ ჯგუფებად იყოფა:
- ალგიციდები და მოლუსკიციდები — წყალმცენარეებისა და მოლუსკების საწინააღმდეგო საშუალებები, რომლებიც ტბების, არხების, საცურაო აუზების და წყლის სხვა რეზერვუარების სანიტარული კონტროლისათვის გამოიყენება; ასეთვე ტიპის პესტიციდები საჭიროა ნაუების, კატარდებისა და გემების წყალქვეშა ნაწილების დასაცავად, რათა ისინი არ დაიფაროს წყალმცენარეებით, მოლუსკებით და წყლის სხვა ორგანიზმებით;
  - აკარიციდები ანუ მიტიციდები — გამოიყენება ტკიპების საწინააღმდეგოდ;
  - ატრაქტანტები — პარაზიტების, მწერებისა და მღრღნელების მახეში მისატყუებელი საშუალებები;
  - ბაქტერიციდები, ბოიციდები, დეზინფექტანტები და სანიტაზერები — გამოიყენება ბაქტერიული დაავადებების გამომწვევი მიკროორგანიზმების გასანადგურებლად;
  - დესიკანტები — ქიმიკატები, რომლებიც ახდენენ მცენარეული ქსოვილების გამოშრობას, მაგ., სარეველა მცენარეების ფესვების გახშობას;
  - დეფოლიანტები — განკუთვნილია ფოთოლცვენის დასაჩქარებლად;
  - ინსექტიციდები — მავნე მწერებისა და სხვა ფეხსახსრიანების გასანადგურებელი საშუალებები;
  - მცენარეთა ზრდის რეგულატორები — მცენარეთა ზრდის, ყვავილობისა და რეპროდუქციის დამაჩქარებელი ქიმიკატები;
  - ნემატოციდები — მავნე ნემატოდებისაგან (მრგვალი ჭიებისაგან) დაცვის საშუალებები;
  - ოვიციდები — ქიმიკატები, რომლებიც ჭიებისა და მწერების კვერცხებს ანადგურებს;
  - რუპელენტები — მავნე მწერებისა და ფრინველების დასაფრთხობი საშუალებები;
  - როდენტიციდები — მღრღნელების საწინააღმდეგო საშუალებები;
  - ფერომონები — მწერების გამრავლების საწინააღმდეგო საშუალებები;
  - ფუმიგანტები — წარმოქმნიან გაზს ან ორთქლს, რომლებიც შენობებში, სარდაფებში ან ნიადაგში მავნებლების გასანადგურებლად გამოიყენება;

ფუნგიციდები — სოკოვანი დაავადებებისა და დაობების საწინააღმდეგო საშუალებები;

პერბიციდები — ქიმიკატები სარეველებისა და შხამიანი მცენარეების მოსასპობად.

პესტიციდების უაღრესად ფართო მოხმარება გარემოში მათი დიდი მასშტაბებით გავრცელებას იწვევს. სხვადასხვა პესტიციდებით დაბინძურებულია სასოფლო-სამეურნეო სფეროელების უზარმაზარი ტერიტორიები, გრუნტის წყლები, წყალსატევები და ა.შ. პესტიციდების შემადგენელი ძირითადი ან მინორული კომპონენტები უმეტეს შემთხვევაში უაღრესად ტოქსიკურ ნაერთებს წარმოადგენენ და კვებით ჯაჭვში მოხვედრისას მრავალ დაავადებას იწვევენ. ამ რაკურსით განვიხილოთ ზოგიერთი ფართოდ გავრცელებული პესტიციდი.

ფოსფორორგანული პესტიციდები, რომლებიც ფოსფორისა და თიოფოსფორის მჟავების ეთერებს წარმოადგენენ (მაგ., ინსექტიციდები — ალკილფოსფატები, პარათიონი) (ნახ.1.4), აგრეთვე კარბამატები (მაგ., პერბიციდები — ბარბანი და ბეტანალი, ფუნგიციდი — მანები და სხვ.) (ნახ.1.5), ნერეულ სისტემაზე მოქმედი აგენტებია. ისინი აბლოკირებენ აცეტილქოლინესტერაზის აქტიურ ცენტრს. ეს ფერმენტი ახდენს ნეიროტრანსმიტერის — აცეტილქოლინის მოცილებას ნერეული სინაპსიდან. აცეტილქოლინესტერაზის ინჰიბირების შედეგად სინაპსზე ხდება ჭარბი აცეტილქოლინის დაგროვება, რაც იწვევს აცეტილქოლინ-რეცეპტორით სიგნალის გადაცემის დარღვევას. ორგანიზმში შეღწეული პესტიციდის კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით დაავადება შეიძლება გამოიხატოს ნერწყვის გამოყოფის გაძლიერებით, ფილტვების შეშუპებით, კოლიკებით, ფაღარათით, გულისრევით, მხედველობის დაქვეითებით, სისხლის წნევის მომატებით, ტრემორით, ჰიპერაქტიურობით, კუნთების სპაზმებით, კრუნჩხვებით, მეტყველების აპარატის მოშლით და ა.შ. აღნიშნული პესტიციდების მაღალი დოზებით ორგანიზმში მოხვედრის შემთხვევაში შეიძლება განვითარდეს სასუნთქი გზების დამბლა და დაავადება ლეტალურად დასრულდეს.

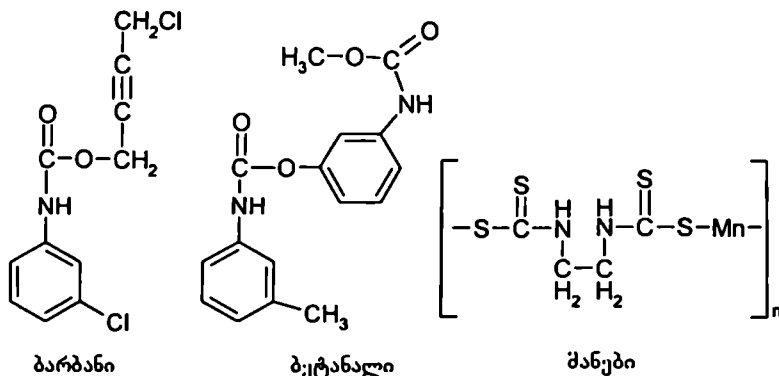


ნახ. 1.4. ფოსფორორგანული ინსექტიციდები — ფოსფორმჟავას (ტრიეთილფოსფატი) და თიოფოსფორმჟავას (პარათიონი) ნაწარმები.

კიდევ უფრო ტოქსიკურ ნაერთებს მიეკუთვნება ქლორორგანული ინსექტიციდები (ქლორდანი, ლინდანი, დიელდრინი, ლინდანი, DDT) (ნახ.1.6). ხსნარის სახით გამოყენებული ეს პესტიციდები, როგორც საჭმლის მომნელებელი სისტე-

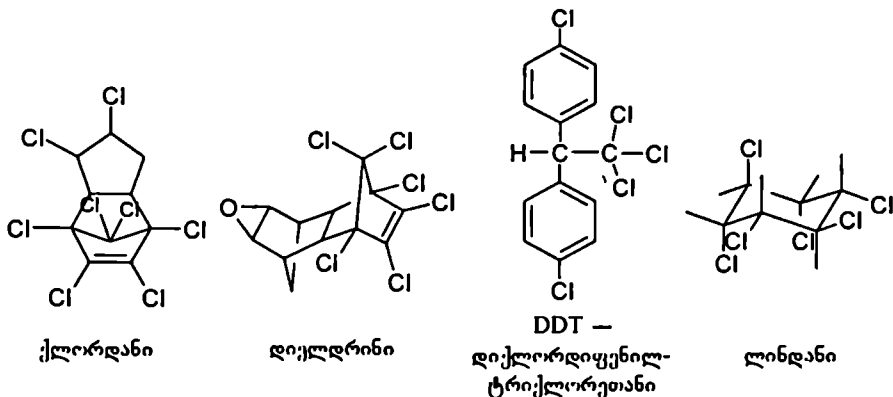


მიდან, ასევე კანიდან ადვილად აღწევენ ადამიანის ორგანიზმში. მაღალი ლიპოფილურობის გამო ისინი ცხიმოვან ქსოვილებში გროვდებიან, განჭოლვენ უჯრედების მემბრანებს და აზიანებენ მათ. ქლორორგანული ინსექტიციდები განსაკუთრებით მკენედ მოქმედებენ ნერვული უჯრედების მემბრანებზე და არღვევენ მათ ნორმალურ ციკლს. მართალია, ეს უჯრედები არ კარგვენ  $\text{Na}^+$ -ის გამტარუნარიანობას, მაგრამ ირღვევა ამ იონების ტუმბოს მარეგულირებელი მექანიზმი. ამის გამო ნერვული სიგნალებით აგზნების შემდეგ ე.წ. "სიმშვიდის პოტენციალი" საწყისი მდგომარეობის შესაბამის მნიშვნელობაზე აღარ ბრუნდება. ამის შედეგად იცვლება ნერვული უჯრედების აგზნებადობა, ზიანდება როგორც ნერვული გზები, ასევე სენსორული ნეირონები. გარდა ამისა, აღნიშნული ქლორორგანული ინსექტიციდები მკვეთრად გამოხატული კანცეროგენული თვისებებით ხასიათდებიან.



ნახ. 1.5. კარბამატული პერბიციდები ბარბანი — 4-ქლორ-2-ბუთინილ(3-ქლოროფენილ)-კარბამატი, ბექტანალი — 3-((მეთოქსიკარბონილ)ამინო) ფენილ-(3-მეთილფენილ)-კარბამატი და თიოკარბამატული ფუნგიციდი მანები — ((1,2-ეთანდილიბის(კარბამოდითიოატო)(2-))-მაგნიუმი.

DDT (დიქლორდიფენილტრიქლორეთანი) ინსექტიციდური მოქმედების მქონე უაღრესად აქტიური პრეპარატია, რომელიც პირველად სინთეზირებულ იქნა 1944 წელს, მაგრამ მისი ინსექტიციდური თვისებები მხოლოდ 1930 წელს გახდა ცნობილი. სწორედ ამ დროიდან მოყოლებული დაიწყო DDT-ს ფართო გამოყენება ანოფელესის — მალარიის გამომწვევი კოდოს წინააღმდეგ. ეს ინსექტიციდი იმდენად ეფექტური აღმოჩნდა, რომ დიდი ხნის განმავლობაში შეუზღუდავად გამოიყენებოდა თითქმის ყველა სახის მკენე მწერის გასანადგურებლად.



**ნახ. 1.6.** ქლორორგანული ინსექტიციდები, რომლებიც მდგრად ორგანულ დამბინძურებლებს მიეკუთვნებიან. 20 ყველაზე საშიშ ნაერთთა სიაში DDT მე-12-ე ადგილზეა, დიელდრინი — მე-18-ე, ხოლო ქლორდანი — მე-20-ე.

კვებით ჯაჭვში DDT-ს გავრცელება განიხილება, როგორც ბიოლოგიური გადატანის კლასიკური მაგალითი (იხ. § 2.4). ცხიშში მალალი ხსნადობის გამო კვებით ჯაჭვში გადაადგილებისას DDT-ს კონცენტრაცია მკვეთრად იზრდება. მაგ., როდესაც წვიმის წყალში გახსნილი DDT მცოხნაუი ცხოველების გაულით დედის რძეში ხვდება, იგი მილიონჯერ კონცენტრირდება.

ნიადგში მოხვედრილი DDT თიხაზე სორბირდება ან ნეშომპალაში გროვდება. განსაკუთრებით მალალია DDT-ს კონცენტრაცია წიწვებით წარმოქმნილ ნეშომპალაში, რადგან ინსექტიციდი კარგად იხსნება წიწვის ცვილოვან ნაერთებში.

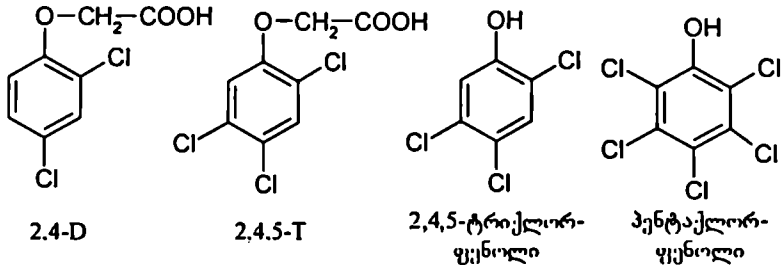
DDT ტიპიური კონტაქტური შხამია. იგი კანიდან ძალიან სწრაფად აღწევს ორგანიზმში. ნერულ სისტემაზე ზემოქმედების გამო DDT-ს მალალი კონცენტრაციები კიდურების დამბლას იწვევს. ვარაუდობენ, რომ დედის რძეში არსებულ DDT-ს შეუძლია შეაღწიოს ბავშვის სასქესო ჯირკვლებში (გონადებში) და უნაყოფობა გამოიწვიოს.

სამწუხაროდ, ჩვენს მოსახლეობაში DDT (იგოე “დუსტი”) დღესაც პოპულარულია, როგორც საკონლის მკენარი მწერების საწინააღმდეგო საშუალება. ალბათ ამით შეიძლება აიხსნას ის ფაქტი, რომ მიუხედავად იმპორტის აკრძალვისა, უკანასკნელ პერიოდში გარემოს დამცავი ორგანიზაციების მიერ ჩატარებულმა მონიტორინგმა საქართველოში დიდი რაოდენობით DDT აღმოაჩინა.

ჩვეულებრივ პირობებში DDT ძალიან ნელა და არასრულად იშლება. აერობულ პირობებში DDT-ს დაშლის პროდუქტებს დიქლორეთილენის წარმოებულები წარმოადგენენ, რომლებიც DDT-სთან შედარებით ნაკლებად ტოქსიკურებია.

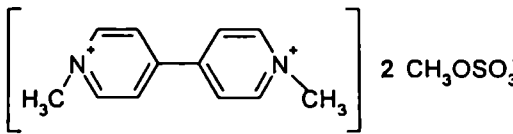
ანერობული დერადაციის შედეგად წარმოიქმნება დიქლორეთანის წარმოებულები, რომლებიც ადვილად გარდაიქმნება ძმარმჟეას ნაწარმებად.

აღნიშნული ინსექტიციდების გარდა, ქლორორგანულ ნაერთებს სხვა პესტიციდებშიც ეხვლებით. მათ შორისაა ისეთი ფართო მოხმარების პერბიციდი, როგორცაა 2,4-დიქლორფენოქსიმმარმჟეა, ანუ 2,4-D, "ნარინჯისფერი რეაგენტის" სახელით ცნობილი დეფოლიანტი 2,4,5-ტრიქლორფენოქსიმმარმჟეა (2,4,5-T), ინსექტიციდები ტრიქლორფენოლი, პენტაქლორფენოლი და სხვ. (ნახ.1.7).



ნახ. 1.7. ქლორორგანული პესტიციდები: პერბიციდი — 2,4-D (2,4-დიქლორფენოქსიმმარმჟეა), დეფოლიანტი — 2,4,5-T (2,4,5-ტრიქლორფენოქსიმმარმჟეა), ინსექტიციდები — 2,4,5-ტრიქლორფენოლი და 1,2,3,4,5-პენტაქლორფენოლი.

DDT-ს მსგავსად კონტაქტური შხამია პერბიციდი პარაქვატი (ნახ.1.8), რომელიც დიპირიდოლების კლასს მიეკუთვნება. მისი გამოყენებისას ძალიან დიდი სიფთხილეა საჭირო, რადგან პარაქვატის კანთან უბრალო შეხებაც კი ბუშტუკებისა და წყლულების გაჩენას იწვევს. ორგანიზმში შეღწევისას ეს დიპირიდოლი აზიანებს თირკმელებსა და ღვიძლს, შემდეგ იწვევს ფობროზულ ცვლილებებს ფილტვებში, რაც ლეტალური შედეგით მთავრდება.

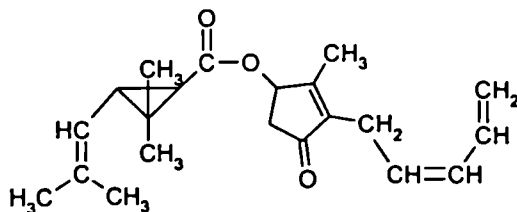


პარაქვატი

ნახ. 1.8. დიპირიდოლების წარმომადგენელი პერბიციდი პარაქვატი.

ტოქსიკური თვისებებით გამოირჩევიან აგრეთვე პირეტროიდული პესტიციდები, რომლებსაც ინსექტიციდური აქტიუობის გარდა, ადამიანის ნერუული

სისტემის დაზიანების უნარიც გააჩნიათ. პირეტროიდები ფართოდ გავრცელებული ბუნებრივი ინსექტიციდის — პირეტრინის (ნახ.1.9) სინთეზურ ანალოგებს წარმოადგენენ.



პირეტრინი

ნახ. 1.9. ბუნებრივი ინსექტიციდი — პირეტრინი, რომელსაც კრიზანთემა შეიცავს.

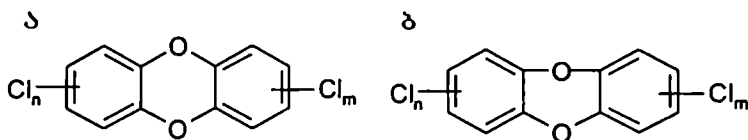
ქიმიური სინთეზის გზით მიღებული პირეტროიდები მოდიფიცირებულია სტაბილურობის გაზრდის მიზნით, თუმცა როგორც ბუნებრივი, ასევე სინთეზური პირეტროიდები, ადამიანის ორგანიზმზე ერთნაირი ხასიათის ტოქსიკური ზემოქმედებით ხასიათდებიან.

### 1.1.3 ქლორორგანული ტომსიკანტები

ქლორორგანული ტოქსიკანტების რიცხვი ქლორის შემცველი პესტიციდებით არ ამოიწურება. მათ მიეკუთვნება აგრეთვე დიოქსინები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, მეთანის, ეთანისა და ეთილენის ქლორწარმოებულები და სხვ. ქლორისა და სხვა ჰალოგენების ატომები მნიშვნელოვნად აძლიერებენ ნაერთების მდგრადობას როგორც აბიოტური ჟანგვის, ასევე დეტოქსიკაციურ პროცესებში მონაწილე მჟანგველი ფერმენტების მიმართ გარდა ამისა, ქლორ-შემცველი ნაერთების უმეტესობა მაღალი ლიპოფილურობით გამოირჩევა, რის გამოც ისინი ადვილად გადიან უჯრედის მემბრანულ ბარიერებს და თითქმის დაუბრკოლებლად აღწევენ სხვადასხვა ორგანელებში, მათ შორის ბირთვში და შეუქცევად ცვლილებებს იწვევენ.

#### დიოქსინები

ნაერთთა ჯგუფი, რომელიც პოლიქლორირებულ დიბენზოდიოქსინებსა და დიბენზოფურანებს აერთიანებს, განსაკუთრებით მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევა. ამ ნაერთების საერთო სახელწოდებაა დიოქსინები (ნახ.1.10).

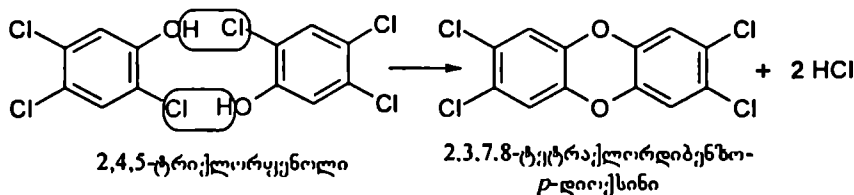


**ნახ. 1.10.** ქლორირებული ბენზოდიოქსინისა (ა) და ბენზოფურანის (ბ) ზოგადი ფორმულები.  $n+m$  — ქლორის ატომების საერთო რიცხვია, რომელიც, როგორც წესი, 4-დან 8-მდე იცვლება. გარემოში დიოქსინები ყოველთვის კონგენერების (იზომერების) რთული ნარევის სახითაა.

დიოქსინების, როგორც ტოქსიკური ნაერთების ისტორია 1971 წლიდან იწყება, როდესაც აშშ-ის მისურის შტატის ერთ-ერთ პატარა ქალაქში, თაიშ ბიჩში, დოლის წინ იპოდრომის გრუნტზე, ამტკვრების თავიდან ასაცილებლად, 10 მ<sup>3</sup> ტექნიკური ზეთი მოასხურეს. დოლიდან ერთი კვირაც არ იყო გასული, რომ იპოდრომის ტერიტორია დახოცილი ფრინველებით დაიფარა. ერთი თვის განმავლობაში დაიღუპა იპოდრომზე მოასპარეზე ცხენების დიდი ნაწილი, იქ მობინადრე შინაური ცხოველები, მძიმედ დააუადნენ ჟოკეი და რამდენიმე მცირეწლოვანი მაყურებელი. ამის შემდეგ ხელისუფლებამ მომხდარის მიზეზის დასადგენად სპეციალური გამოკვლევა ჩაატარა. აღმოჩნდა, რომ ყველაფერი სწორედ იმ ზეთმა გამოიწვია, რომელიც დოლის წინ გამოიყენეს. ეს ზეთი წარმოადგენდა 2,4,5-ტრიქლორფენოლის წარმოების ნარჩენს და დიდი რაოდენობით შეიცავდა დიოქსინებს. ამ ნაერთების კონცენტრაციამ იპოდრომის ნიადაგში 30—50 მკ/კგ-ს მიაღწია. სულ რამდენიმე წლის შემდეგ (1977 წ.) იტალიის ქალაქ სვევოში ქიმიური ქარხნის ტექნიკური ავარია დიდ კატასტროფაში გადაიზარდა. აფეთქდა დანადგარი, რომელშიც იყო ტექნიკური 2,4,5-ტრიქლორფენოლი დიოქსინის მინარევით. ამის შედეგად 5 კგ-მდე დიოქსინი 30 კმ<sup>2</sup>-ზე გაერცეულა, დაიხოცა 80 ათასამდე შინაური ფრინველი და ცხოველი, ხელისუფლებას მოუხდა 200 ათასი ტონა სახნაუი მიწის ექსკავაცია და მოცილება.

თაიშ ბიჩის შემთხვევა იმითაც იყო მნიშვნელოვანი, რომ გაირკვა დიოქსინების წარმოქმნის მექანიზმი. 2,4,5-ტრიქლორფენოლი წარმოადგენს შუალედ ნაერთს დეფოლიანტის — 2,4,5-T-ს სინთეზში. აღმოჩნდა, რომ როგორც 2,4,5-ტრიქლორფენოლი, ასევე 2,4,5-T ადვილად გარდაიქმნებიან დიოქსინის ერთ-ერთ კონგენერად — 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზო-*p*-დიოქსინად (ნახ. 1.11). ამიტომ ეს პესტიციდები ყოველთვის საშიში რაოდენობით შეიცავენ დიოქსინს, რომელიც მათთან შედარებით 500 ათასჯერ უფრო მეტად ტოქსიკურია. ამის სამწუხარო დადასტურებაა ვიეტნამის ომის დროს ამერიკის არმიის მიერ გამოყენებული “ნარინჯისფერი რეაგენტი”, რომელიც 2,4,5-T-სთან ერთად დიო-

ქსინებსაც შეიცავდა. მას ასხურებდნენ ვერტმფრენებიდან გაუვალ და დაბურულ ტყეებს, რომლებშიც ვიეტნამელი პარტიზანები იმალებოდნენ. ომის შემდეგ თვით ამერიკულ არმიაშიც მრავალი ჯარისკაცი აღმოჩნდა დიოქსინით მოწამლული, ვიეტნამის ნიადაგი კი დღესაც დაბინძურებულია ამ ტოქსიკანტებით.



**ნახ. 1.11.** 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზო-*p*-დიოქსინის წარმოქმნა 2,4,5-ტრიქლორფენოლიდან.

დიოქსინების ძირითადი წყაროებია ქიმიური საწარმოები, რომლებიც ქლორს, ქლორორგანულ პესტიციდებს, პოლიქლორბენზოლებს, ქლორირებულ ალკანებს და ალკენებს აწარმოებენ. ქლორის ელექტროქიმიური წარმოებისას ნახშირის ანოდის, ქლორისა და ჰაერის ჟანგბადის ურთიერთქმედებისას წარმოიქმნება დიოქსინი, რომელიც მინარევის სახით შედის იმ გაზში, რომლითაც ხდება ქლორირება. ამიტომ წყლის ქლორირება ყველაზე მეტად იწვევს დიოქსინით დაბინძურებას.

დიოქსინებით გარემოს დაბინძურების ინტენსივობის მიხედვით მეორე ადგილზეა ცელულოზა-ქაღალდის წარმოება. ცელულოზის წარმოებაში აუცილებელ ეტაპს წარმოადგენს ქლორიანი რეაგენტებით მერქნის დამუშავება, რისი მიზანიც ლიგნინის ფენოლური ფრაგმენტების მოცილებაა. ამ დროს საკმაო რაოდენობით დიოქსინები წარმოიქმნება. იგივე ხდება ქაღალდის წარმოებისას, როდესაც ქლორი ან ქლორის ნაერთები მათურებელ აგენტებად გამოიყენება.

ატმოსფეროში დიოქსინების ემისიის მიზეზს ხშირად ის მაღალტემპერატურული ქიმიური პროცესები წარმოადგენს, რომლებშიც ქლორის შემცველი ორგანული და არაორგანული ნაერთები მონაწილეობენ. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება, მაგ., საყოფაცხოვრებო ნაგვის წვა. დიოქსინების წყაროა საავტომობილო ტრანსპორტიც, რისი მიზეზიც 1,2-დიქლორეთანია, რომელსაც უმატებენ საწვავს, რათა შემცირდეს ტყვიის ნაერთების გამოლექვა ეთილირებული ბენზინით მომუშავე ძრავის შიდა დეტალებზე.

დიოქსინები სხვა პოლიქლორირებული ნაერთების მსგავსად გარემოში აბიოტური და ბიოტური გარდაქმნების მიმართ ძალიან მაღალი მდგრადობით გამოირჩევიან. ცოცხალ ორგანიზმებზე ზემოქმედების ხასიათის გათვალისწინებით დიოქსინები გარემოსა და ადამიანის ჯანმრთელობისათვის რეალურ საფრთხეს წარმოადგენენ.

დიოქსინებს უძლიერესი კანცეროგენული ეფექტი გააჩნიათ. კანზე მოხვედრისას ისინი იწვევენ ქლორაქნუს — დაავადებას, რომელიც გამოიხატება კანის განსაკუთრებით მძიმე დაზიანებებით, რის შედეგადაც დიდხანს შეუხორცებელი წყლულები რჩება. დიოქსინები აგრეთვე იწვევენ დაავადებებს, რომლებიც აზიანებენ ენდოკრინულ სისტემებს, არღვევენ სქესობრივ განვითარებაში მონაწილე ჯირკვლების ფუნქციონირებას, აზიანებენ ნაყოფის ნერვულ სისტემას და დამღუპველად მოქმედებენ ემბრიონის განვითარებაზე. დიოქსინების გაუღენით ორგანიზმში ვითარდება იმუნოდეფიციტი, რის შედეგადაც იმატებს ინფექციური დაავადებების მიმართ მგრძობიარობა.

დიოქსინი, როგორც შხამი, არაა ძლიერ სწრაფი მოქმედების მქონე, მაგრამ თუ მას სხვა ცნობილ შხამებს შევადარებთ (მინიმალური ლეტალური დოზის მიხედვით), ნათელი გახდება, რამდენად მაღალია მისი ტოქსიკურობა (ცხრილი 1).

### ცხრილი 1

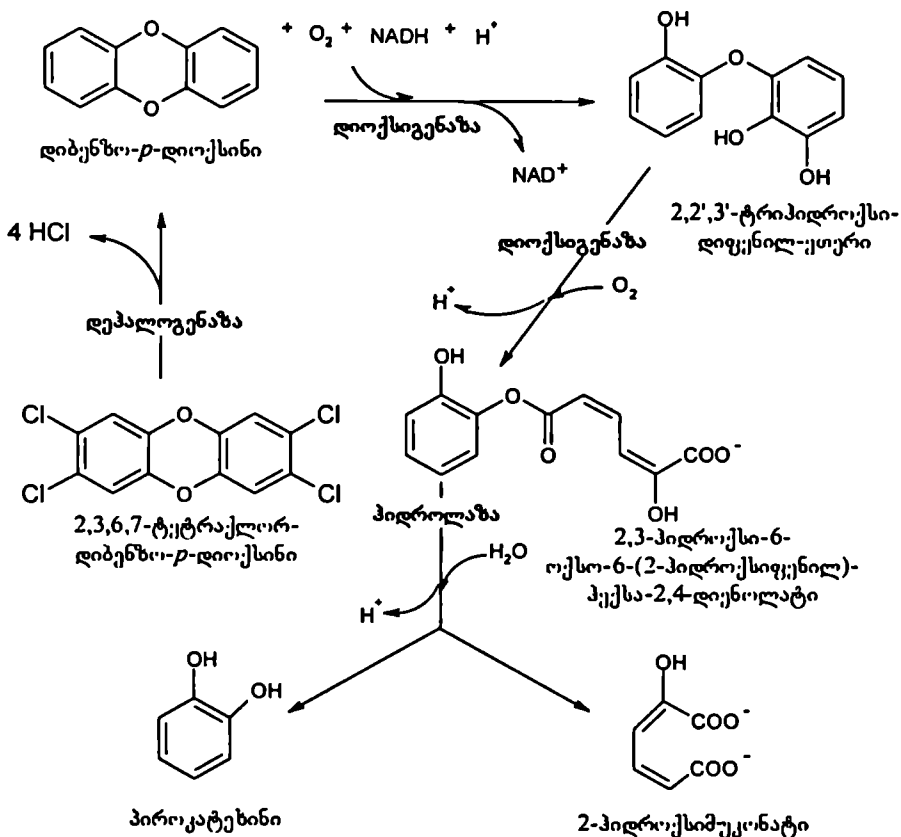
საერთო ტოქსიკურობის მაჩვენებელი ზოგიერთი ცნობილი შხამისათვის

შხამი	საერთო ტოქსიკურობა, მოლი/კგ
ბოტულიზმის ტოქსინი	$3.3 \cdot 10^{-17}$
დიფტერიის ტოქსინი	$3.0 \cdot 10^{-12}$
დიოქსინი	$3.0 \cdot 10^{-9}$
კურარუს (ტროპიკული ბაყაყის) შხამი	$7.2 \cdot 10^{-7}$
სტრიქნინი	$1.5 \cdot 10^{-6}$
ზომანი (საბრძოლო მომწამლავე ნაერთი)	$1.6 \cdot 10^{-7}$
კალიუმის ციანიდი	$3.1 \cdot 10^{-4}$

დიოქსინი, როგორც მოწამელის იარაღი, უკვე შესულია უახლეს ისტორიაში — ვარაუდობენ, რომ სწორედ მისი საშუალებით მოწამლეს ერთ-ერთი პოსტ-საბჭოთა სახელმწიფოს ოპოზიციის ლიდერი.

მაღალი მდგრადობის გამო დიოქსინები ძნელად ექვემდებარება ბიოდეგრადაციას. მათი სრული მინერალიზაცია შესაძლებელია მხოლოდ ანაერობული და აერობული მიკროორგანიზმების ერთობლივი მოქმედების შედეგად. ბოლო დროს აღმოჩენილია, რომ ზოგიერთ მიკროორგანიზმს უნარი აქვს, მოახდინოს ამ ტოქსიკანტების დაშლა. ასეთია ანაერობული ბაქტერია *Dehalococcus* sp., რომელიც აღდგენითი დეჰალოგენირების გზით დიოქსინის მოლეკულას ქლორის ატომებს აშორებს. წარმოქმნილი *p*-დიოქსინი დიოქსიგენაზებისა და ჰიდროლაზების თანმიმდევრული მოქმედებით გარდაიქმნება, რის შედეგადაც არომატული ბირთვი იხლიჩება და სტანდარტული უჯრედული მეტაბოლიტები წარ-

მოქმედა (ნახ.1.12). ასეთვე მოქმედების ეფექტი აღმოაჩნდა ბაზიდიალურ სოკოს — *Phanerochaete chrysosporium*.



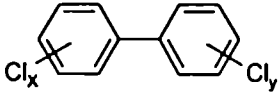
ნახ. 1.12. 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზო-*p*-დიოქსინის მიკრობული ბიოდეგრადაცია დეჰალოგენაზების, დიოქსიგენაზებისა და ჰიდროლაზების თანმიმდევრული მოქმედების შედეგად.

ნიადაგის ზოგიერთი მიკროსკოპიული სოკო და აქტინომიცეტი დიოქსინების მიმართ განსაკუთრებით მაღალი მგრძობიარობით გამოირჩევა. ნიადაგში ამ მიკროორგანიზმების არარსებობა შეიძლება გამოყენებულ იქნას დიოქსინებით დაბინძურების ბიონდიკაციისათვის.



**პოლიქლორირებული ბიფენილები**

დიოქსინებთან ერთად განსაკუთრებით მაღალი ტოქსიკურობით პოლიქლორირებული არომატული ნაერთების კიდევ ჯგუფი გამოირჩევა. ესენია პოლიქლორირებული ბიფენილები (მათ აღნიშნავენ, როგორც PCBs – Polychlorinated Byphenils) (ნახ. 1.13), რომლებიც აერთიანებენ 200-ზე მეტ უაღრესად ტოქსიკურ ნაერთს. ყველა პოლიქლორირებულ ბიფენილს ახასიათებს მაღალი თერმომდეგობა, ისინი არ იწვიან და სწორედ ამ თვისებების გამო გამოიყენებიან ელექტროტექნიკაში, პოლიგრაფიაში, ქაღალდის, მელნების და საღებავების წარმოებაში. ეს ნაერთები აალების საწინააღმდეგო დანამატების სახით შედიან ტრანსფორმატორების და ტექნიკურ ზეთებში, სხვადასხვა სითბოგადამცემ სითხეებში, პლასტმასებში, შესაფუთ მასალებში, პესტიციდებში და ა.შ.



**ნახ. 1.13.** პოლიქლორირებული ბიფენილების ზოგადი ფორმულა. მაგ., აროქლორ-1254-ში ქლორის ატომების ჯამური რაოდენობა  $x+y=5$ .

პოლიქლორირებული ბიფენილები წყალში პრაქტიკულად უხსნადია და დუდილის მაღალი ტემპერატურით ხასიათდება. მიუხედავად ამისა, PCBs მაინც დიდი რაოდენობითაა გავრცელებული გარემოში, რაც მათი განსაკუთრებით ფართო გამოყენებითაა განპირობებული. პოლიქლორირებული ბიფენილების წარმოება და გამოყენება სულ უფრო იზღუდება, მაგრამ ისინი მაინც საკმაოდაა დაგროვილი ნიადაგში და სელიმენტებში, საიდანაც ქაერსა და წყალში ვრცელდებიან. უაღრესად მაღალი ქიმიური სტაბილურობის გამო ეს ტოქსიკანტები დიდხანს ნარჩუნდებიან გარემოში უცვლელი სახით, ხოლო მაღალი ლიპოფილურობის გამო ადვილად ბიოკონცენტრირდებიან მცენარულ და ცხოველურ ქსოვილებში, საიდანაც კვებით ჯატვში ხვდებიან და დიდ საფრთხეს უქმნიან ადამიანის ჯანმრთელობას.

პოლიქლორირებული ბიფენილების მდგრადობას, უპირველეს ყოვლისა, პალოგენის ატომები განაპირობებენ. ქლორის 30%-ზე ნაკლები მასური შემცველობის ბიფენილები შედარებით ნაკლებად მდგრადია, ამიტომ ისინი უფრო ადვილად დგრაირდება და გამოიდევნება ორგანიზმიდან, ვიდრე ის ბიფენილები, რომელთა მოლეკულებშიც ქლორი მასის არანაკლებ 60%-ს შეადგენს.

ქლორის შემცველობასთან პირდაპირ კავშირშია პოლიქლორირებული ბიფენილების ტოქსიკურობაც. კანზე მოხვედრისას ისინი იწვევენ ქლორაკნეს, ხოლო ორგანიზმში შეღწევისას აზიანებენ ღვიძლს, ნერულ სისტემას, ცვლიან სისხლის შემადგენლობას. პოლიქლორირებულ ბიფენილებს მკვეთრად გამოხატული კანცეროგენული თვისებები ახასიათებთ.

პოლიქლორირებული ბიფენილების ლიკვიდაცია ძალიან ძნელია. მათი მოცილების ყველაზე გავრცელებული ხერხია ინცინერაცია, ანუ მაღალ ტემპერატურაზე დაწვა, მაგრამ ამისათვის, სულ ცოტა,  $1200^{\circ}\text{C}$ -ია საჭირო. რაც შეეხება გარემოს რემედაციის ბიოლოგიურ მეთოდებს, სადღეისოდ ისინი ნაკლებად ეფექტურია პოლიქლორირებულ ბიფენილებთან მიმართებაში. ისევე როგორც დიოქსინების შემთხვევაში, ამ ნაერთების მინერალიზაციისათვისაც აუცილებელია თავდაპირველად მოხდეს ანაერობული დეჰალოგენირება, რომ ბიფენილების არომატული ბირთვები ხელმისაწვდომი გახდეს იმ ჟანგვითი ფერმენტებისათვის, რომლებსაც ტოქსიკანტის ნახშირბადოვანი ჩონჩხის დარღვევა და სტანდარტულ უჯრედულ მეტაბოლიტებად მიის დაშლა შეუძლიათ ასეთი მიკროორგანიზმებისა და მცენარეების შესახებ სადღეისოდ ძალიან მწირი ინფორმაცია არსებობს, და ცხადია, ნაკლებადაა შემუშავებული შესაბამისი ბიო- და ფიტორემედაციული ტექნოლოგიებიც. ყოველივე ამის გამო პოლიქლორირებული ბიფენილები გარემოს დამბინძურებელ ნაერთთა იმ კატეგორიას მიეკუთვნება, რომლებიც უეჭველად უნდა ამოიღონ ხმარებიდან.

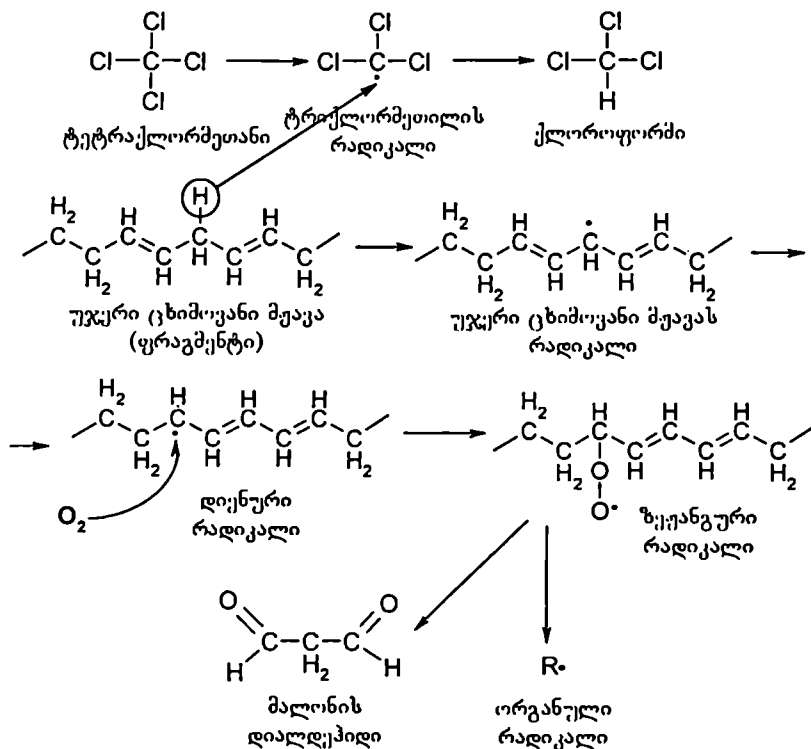
### *ქლორირებული ალკანები და ალკენები*

ნახშირწყალბადების ტოქსიკური წარმოებულებიდან განსაკუთრებით უნდა გამოიყოს ქლორჩანაცვლებული ალკანები და ალკენები, როგორებიცაა: ტეტრაქლორმეთანი —  $\text{CCl}_4$ , დიქლორმეთანი —  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , ქლოროფორმი —  $\text{CHCl}_3$ , დიქლორეთანი —  $\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$ , ვინილქლორიდი —  $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ , ტრიქლორეთილენი —  $\text{CCl}_2=\text{CHCl}$ , ტეტრაქლორეთილენი —  $\text{CCl}_2=\text{CCl}_2$  და ა.შ.). ეს ნაერთები დიდი რაოდენობით გამოიყენება გამხსნელებად და ორგანული სინთეზის საწყის რეაგენტებად. ქლორალკანები და ქლორალკენები ადვილად აქროლადი ნაერთებია. მათი წყალში ხსნადობა და ფუგიტიურობა გაცილებით მაღალია, ვიდრე შესაბამისი ნახშირწყალბადების, მაგ., ამ ნაერთებს შეუძლიათ გააღწიონ საკანალიზაციო სისტემის ბეტონის კედლებში და ამ გზით დააბინძურონ გრუნტის წყლები. ლიპოფილური თვისებების გამო ეს ტოქსიკანტები ცხოველთა ცხიმოვან ქსოვილებში გროვდება, საიდანაც კვებით ჯაჭვში ერთვება.

ტეტრაქლორმეთანი, ანუ ოთხქლორიანი ნახშირბადი უმთავრესად ცხიმების გამხსნელებად და ფტორქლორალკანების სინთეზში გამოიყენება. გამოანგარიშებულია, რომ მოხმარებული  $\text{CCl}_4$ -ის მთლიანი რაოდენობის 5—10% გარემოში ხვდება. აერობულ პირობებში — ჰაერზე და წყალსატევების ზედა ფენებში, სადაც წყალი ჟანგბადით მდიდარია, ტეტრაქლორმეთანი ძალიან მაღალ მდგრადობას ამჟღავნებს და მისი ნახვეარდამლის პერიოდი 60—100 წელია, ხოლო ჟანგბადით ღარიბ გარემოში, მაგ., ფსკერის დანალექსა და ლაშში ანაერობული მიკროორგანიზმები  $\text{CCl}_4$ -ს 14—16 დღის განმავლობაში ითვისებენ.

აღამიანის ჯანმრთელობისათვის საფრთხეს დვიძლში მიმდინარე ტეტრაქლორმეთანის გარდაქმნის პროდუქტები წარმოადგენენ. ციტოქრომ P450-

შემცველი მონოოქსიგენაზის მოქმედებით  $CCl_4$ -ს ქლორის ერთი ატომი სცილდება, რის შედეგადაც ფორმირდება ტრიქლორმეთილის რადიკალი (ნახ. 1.14). ეს რადიკალი ფოსფოლიპიდების შემადგენლობაში მყოფი უჯერი რიგის ცხიმოვანი მჟავიდან წყალბადატომს ახლეს და ქლოროფორმს წარმოქმნის, ხოლო თვით ცხიმოვანი მჟავიდან უჯერი რადიკალი მიიღება.



**ნახ. 1.14.** ტეტრაქლორმეთანი ინიცირებული უჯერი მჟავების ზეჟანგური ჟანგვის პროცესი, რომელიც ღვიძლის უჯრედების მემბრანებში მიმდინარეობს.

ეს გარდაქმნები სათავეს უდებენ ცხიმოვანი მჟავების ზეჟანგური ჟანგვის რეაქციებს, რომლებიც რადიკალურ-ჯაჭვური მექანიზმით მიმდინარეობს. უჯერი მჟავიდან შემდგომში თანმიმდევრულად წარმოიქმნება დიენური და ზეჟანგური რადიკალები, რაც საბოლოოდ მალონის დიალდეჰიდისა და ორგანული რადიკალის ფორმირებით მთავრდება. ზეჟანგური ჟანგვის შედეგად ირღვევა უჯრედე-

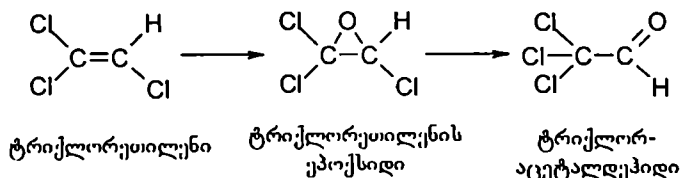
ბის და ცალკეული ორგანელების შემზარების მთლიანობა, რაც იწვევს ღვიძლის ფუნქციების მოშლას. ამის გამო ღვიძლიდან სისხლში გადადის ცილები (α-გლობულინები), ფერმენტები (ამინოტრანსფერაზები), ნაღვლის პიგმენტები (ბილირუბინი), მინერალური მარილები, იცვლება სისხლის ელექტროლიტური შედგენილობა და ვითარდება ტოქსიკური ჰეპატიტი.

ქლორანცელებული ალკანების გარდაქმნების შესწავლამ გამოავლინა, რომ ამ ნაერთების ჰეპატოტოქსიკური მოქმედება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული იმაზე, თუ რამდენად აქტიურად ურთიერთქმედებს ეს ნაერთი მონოოქსიგენაზასთან რადიკალური ბუნების ინტერმედიატის წარმოქმნით.

ღვიძლზე აქტიურ ტოქსიკურ ზემოქმედებას ახდენენ ქლორირებული ალკენებიც, მაგ., ტრიქლორეთილენი, რომელიც ფართოდაა გავრცელებული ჰაერში, ჩამდინარე წყლებსა და ნიადაგში. ტეტრაქლორმეთანის მსგავსად, აერობულ პირობებში ტრიქლორეთილენიც მეტად მდგრადია. მისი ნახევარდაშლის პერიოდი ზღვის წყალში თითქმის 1.5 წელია, ხოლო მტკნარში — 2.5-დან 6 წლამდე. ანაერობული ბაქტერიების მოქმედებით ტრიქლორეთილენის ნახევარდაშლის პერიოდი 40 დღემდე მცირდება. ამ დროს ტოქსიკანტის დიდი ნაწილი CO<sub>2</sub>-მდე იშლება.

ნიადაგში ტრიქლორეთილენი შეიძლება იმყოფებოდეს რამდენიმე თვის განმავლობაში. დადგენილია, რომ ალვის ზე, ვერხვი, ტირიფი, სამყურა, იონჯა, ჭვავი, სორგო და ზოგიერთი სხვა მცენარე აქტიურად შთანთქავს ნიადაგიდან ტრიქლორეთილენს და სხვა ქლორირებულ ალიფატურ ნახშირწყალბადებს, რის შედეგადაც ტოქსიკანტის 10–15% მინერალიზდება, დაახლოებით ამდენივე კი ტრანსსპირაციის დროს ფოთლებიდან ორთქლდება.

ტრიქლორეთილენი ტეტრაქლორმეთანის მსგავსია ორგანიზმზე ტოქსიკური ზემოქმედების მიხედვითაც. მეტაბოლური გარდაქმნების შედეგად, რომლებსაც ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა აკატალიზებს, ტრიქლორეთილენი ჯერ ეპოქსიდურ ნაერთად, შემდეგ კი ტრიქლორაცეტალდეჰიდად ტრანსფორმირდება (ნახ.1.15).



**ნახ. 1.15.** ცხოველურ ორგანიზმში ტრიქლორეთილენის ტრანსფორმაცია ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზის მოქმედებით.

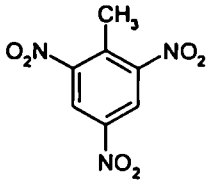
ფორმირებული ალდეჰიდიდან ორგანიზმში შეიძლება წარმოიქმნას ტრიქლორძმარმევა, ტრიქლორეთანოლი და ქლორალჰიდრატი. ტრიქლორალდე-

ჰიდი მუტაგენური თვისებებით ხასიათდება, ვინაიდან მას უნარი აქვს აქტიურად იმოქმედოს ღმ-თან და მისი სტრუქტურული ცვლილებები გამოიწვიოს.

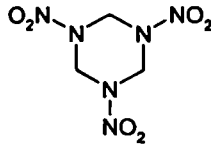
ანალოგიურად ვლინდება პოლიინილქლორიდის მონომერის — ვინილქლორიდის კანცეროგენული თვისებებიც. ეს პოლიმერი განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება — მისგან მზადდება ლინოლეუმი, რუცხვადი შპალერი, ხელოვნური ტყავი, პლასტიკური ბოთლები და ბევრი სხვა პოლიმერული ნაკეთობა.

## 1.1.4 ფეთქებადი ნიტრო-ნაერთები

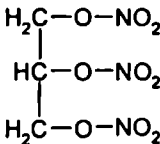
ჭურჭების, ნაღმების, ყუმბარებისა და სხვა საბრძოლო მასალის დასამზადებლად, როგორც წესი, ნიტრო-ჯგუფების შემცველი ორგანული ნაერთები გამოიყენება. ფეთქებადი ნიტრონაერთებია: 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (იგივე ტროტილი ანუ ტოლი — TNT), ტრინიტროგლიცერინი, ჰექსაჰიდრო-1,3,5-ტრინიტრო-1,3,5-ტრიაზინი (ცნობილია, როგორც ჰექსოგენი, ციკლონიტი, ან ბრიტანული კოდური სახელწოდებით — RDX), ოქტაჰიდრო-1,3,5,7-ტეტრანიტრო-1,3,5,7-ტეტრაზოცინი (უფრო ცნობილია კოდური სახელწოდებით — HMX) და სხვ. (ნახ.1.16).



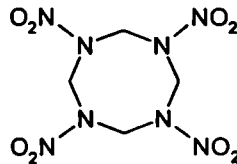
2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი  
(TNT)



ჰექსაჰიდრო-1,3,5-  
ტრინიტრო-1,3,5-ტრიაზინი  
(RDX)



ტრინიტროგლიცერინი



ოქტაჰიდრო-1,3,5,7-ტეტრანიტრო-  
1,3,5,7-ტეტრაზოცინი  
(HMX)

ნახ. 1.16. ფეთქებადი ნიტრო-ორგანული ნაერთები.

ფეთქებად ნაერთებს შორის ყველაზე ფართოდ TNT გამოიყენება, თუმცა სხვა ნაერთებს არანაკლები სიძლიერით აფეთქების უნარი აქვთ. მაგ., TNT-სთან

შედარებით RDX 1.5-ჯერ უფრო მძლავრ აფეთქებას იწვევს. RDX-ით ხშირად სარგებლობენ ტერორისტი—კამიკაძეები. ამ ნაერთისაგან ე.წ. “პლასტიკური ბომბები” მზადდება.

ნიტრო-ჯგუფები აღნიშნულ ნაერთებს არამარტო აფეთქების უნარს ანიჭებენ, არამედ მათ ტოქსიკურობასაც განაპირობებენ. ცხადია, ფეთქებადი ნაერთების გარემოში გავრცელება უფრო ხშირად ადამიანის სამხედრო მოღვაწეობასთანაა დაკავშირებული. სამხედრო პოლიგონების, არსენალების, სამხედრო ქარხნებისა და საწყოების ტერიტორიებზე ეს ნაერთები ნიადაგისა და გრუნტის წყლების პრობლემური დამბინძურებლებია.

## 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (TNT)

TNT გარემოში ორი გზით ხვდება: წარმოების ნარჩენების გავრცელებით და სამხედრო საქმიანობაში გამოყენებით. სამხედრო არსენალში ფეთქებად ნაერთებს შორის TNT ყველაზე ტოქსიკურია. საომარი მოქმედებებისა და სამხედრო სწავლების შემდეგ ათასობით ჰექტარი TNT-ით დაბინძურებული ნიადაგი რჩება. ნიადაგში TNT-ს ძვრადობა საკმაოდ შეზღუდულია ერთი მხრივ, წყალში მისი დაბალი ხსნადობით, მეორე მხრივ კი ნიადაგის ნაწილაკების მიერ ამ ნაერთის ძლიერი ადსორბციით. ამიტომ TNT ნიადაგიდან წყალში ძალიან მცირე რაოდენობით ხდება. გრუნტის წყლებისა და ბუნებრივი თუ ხელოვნური წყალსატევების TNT-ით დაბინძურებას ძირითადად სამხედრო ქარხნების ჩამდინარე წყლები იწვევს.

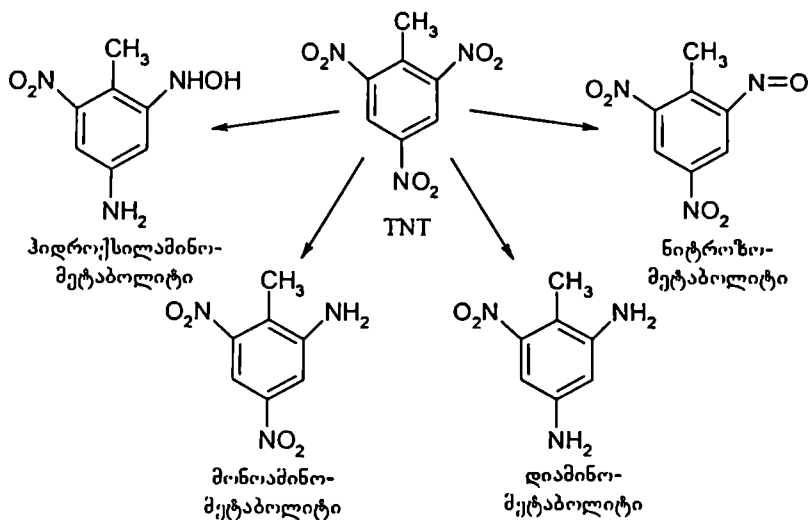
ორგანიზმში TNT აღწევს საჭმლის მომწელებელი ტრაქტიდან, კანიდან და ფილტვებიდან, საიდანაც იგი პირველ რიგში ღვიძლში ხვდება, შემდეგ კი ნაწილდება თირკმელებსა და ცხიმოვან ქსოვილში. TNT მრავალგვარი ქრონიკული დაზიანების სტიმულატორია. მსოფლიოს ჯანდაცვის ორგანიზაციის მიერ TNT კლასიფიცირებულია, როგორც მასამე ჯგუფის კანცეროგენული ნივთიერება.

ცხოველურ ორგანიზმებში TNT ნელა ტრანსფორმირდება და წარმოქმნის: ნიტროზო- და ჰიდროქსილაამინო-წარმოებულებს, ამინოინიტროტოლუოლებს, დიამინოტოლუოლებს და ა.შ. (ნახ. I.17). ეს ნაერთები ძირითადი მეტაბოლიტებია, ხოლო მეთილის ჯგუფის ჟანგვით მიმდინარე გარდაქმნების პროდუქტები — ბენზილის სპირტისა და ბენზოის მჟავის ნიტრო- და ამინო-წარმოებულები უმნიშვნელო რაოდენობით ფორმირდება.

TNT-ს ტოქსიკურობას ნიტრო-ჯგუფებიდან გენერირებული ნიტროზო- და ჰიდროქსილაამინო-ჯგუფები განაპირობებენ. ეს რეაქციისუნარიანი ჯგუფები აქტიურად უკავშირდებიან ისეთ ბიოპოლიმერებს, როგორებიც ნუკლეინის მჟავებია და ქიმიურ მუტაგენებს იწვევენ. მათგან განსხვავებით, ამინო-ჯგუფებიანი მეტაბოლიტები ადვილად უერთდებიან გლუკურონმჟავას, წარმოქმნილი კონიუგატი კი ჯერ უჯრედიდან, შემდეგ კი ორგანიზმიდან გამოიღვევა. ცხადია, ამის გამო TNT-ს დეტოქსიკაცია, უფრო ზუსტად, მისი მუტაგენური თვისე-

ბების მნიშვნელოვნად შემცირება ნიტრო-ჯგუფების აღდგენითაა შესაძლებელი. ამის განხორციელება ზოგიერთ მიკროორგანიზმს შეუძლია. ცნობილია, რომ აღნიშნული პროცესი ორი გზით შეიძლება განხორციელდეს:

- ნიტრო-ჯგუფის მოცილებით (ნიტრიტ-იონის) სახით და ამონიუმამდე მისი შემდგომი აღდგენით, რაც მხოლოდ აერობულ პირობებშია შესაძლებელი;
- ნიტრო-ჯგუფების ამინო-ჯგუფებამდე აღდგენით, რაც მიმდინარეობს როგორც აერობულ, ასევე ანაერობულ პირობებში.

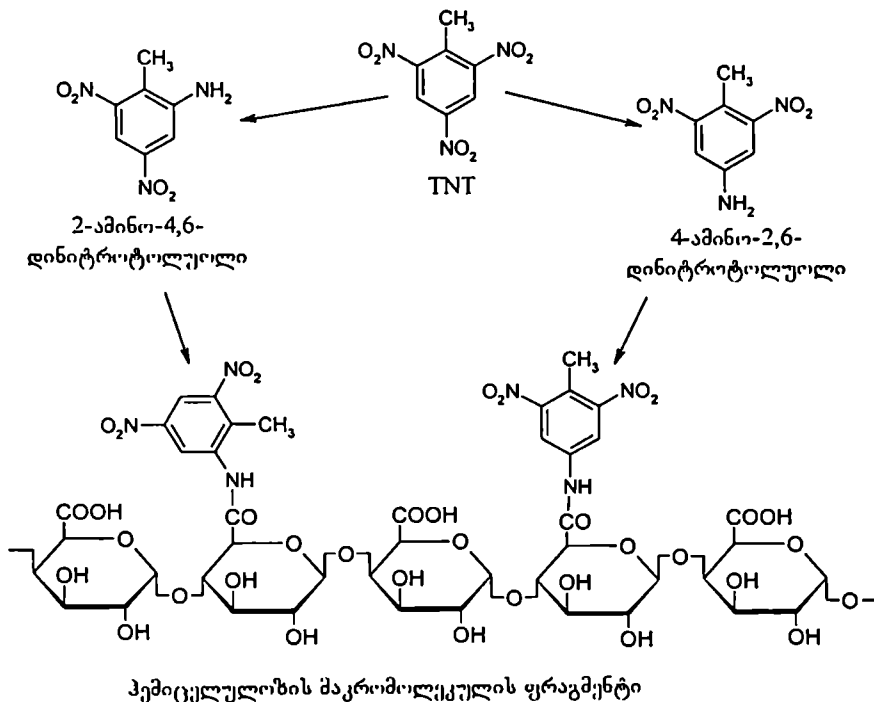


ნახ. 1.17. ცხოველურ ორგანიზმებში TNT-ს გარდაქმნის ძირითადი გზები.

*Pseudomonas*-ის ცალკეულ შტამებს და მიცელური სოკოების ზოგიერთ წარმომადგენელს TNT-ს აზოტის წყაროდ გამოყენება შეუძლიათ. მაგ., *Pseudomonas* sp. JLR11-ის შტამს შეუძლია ასიმილირებული TNT-ს აზოტის თითქმის 85% ჩართოს უჯრედული ნაერთების შემადგენლობაში. ეს ფაქტი იმის თვალსაჩინო მაგალითია, როგორ ერთვება ქსენობიოტიკის ტოქსიკურობის განმაპირობებელი ატომი მიკროორგანიზმის ნორმალური ცხოველქმედების პროცესში და როგორ გამოიყენება იგი შიდაუჯრედული ნაერთების საშენ მასალად.

ანალოგიურ უნარს ამჟღავნებს *Phanerochaete chrysosporium* და სხვა ბაზიდიალური სოკოები, რომლებიც TNT-ს მინერალიზაციას ახდენენ. ამ უნარს განაპირობებს სოკოს მაღალაქტიური ლიგნინოლიზური ფერმენტები პეროქსიდაზებისა და ლაკაზების სახით. ეს ფერმენტები ეფექტურად ჟანგავენ ამინო-ჯგუფებამდე აღდგენილ მეტაბოლიტებს, რაც საბოლოოდ TNT-ს ღრმა დეგრადაციით სრულდება.

TNT-ს ისეთი რედოქს-პოტენციალი გააჩნია, რომელიც ამ ქსენობიოტიკს საშუალებას აძლევს შეასრულოს ელექტრონების ტერმინალური აქცეპტორის როლი მიტოქონდრიულ სუნთქვით ჯაჭვში. საინტერესოა, რომ ამ დროს TNT-ს ნიტრო-ჯგუფების აღდგენა, ანუ დეტოქსიკაცია, უშუალოდაა შეუძლებელი ATP-ს სინთეზთან.



**ნახ. 1.18.** მცენარეში TNT-ს ტრანსფორმაციის ზოგიერთი გზა: მონოამინო-მეტაბოლიტების წარმოქმნა და მათი კონიუგაცია ჰემიცელულოზასთან პეპტიდური ბმების წარმოქმნით.

TNT-ს შთანთქმისა და გარდაქმნის უნარი ბევრ მცენარესაც ახასიათებს. ასეთებია წყლის მცენარე წივანა (*Myriophyllum aquaticum*), ზღვის წყალმცენარე *Nitella* sp., ვერხვი, სოია და სხვ. ეს მცენარეები მდიდარია ფერმენტ ნიტრორედუქტაზით, რომელიც TNT-ს ნიტრო-ჯგუფების აღდგენაში მონაწილეობს. აღდგენილი მეტაბოლიტები ახლადშეძენილი ამინოჯგუფების ხარჯზე კოვალენტურად უკავშირდებიან ჰემიცელულოზას (ნახ.1.18), ლიგნინს, პექტინს და სხვა ბიო-



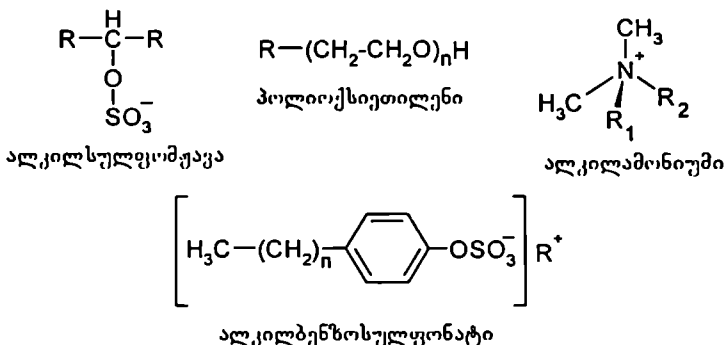
პოლიმერებს, რის შემდეგაც TNT-ს მეტაბოლიტები უხსნადი კონიუგატების სახით უჯრედის კედელში დეპონირდებიან.

ნიტრორედუქტაზის გენის ბაქტერიიდან მცენარეში გადატანა მნიშვნელოვნად ზრდის მცენარის მიერ TNT-ს შუთვისების უნარს. ამ მიზნით მიღებულ იქნა ტრანსგენური თამბაქო, რომელიც პერსპექტივაში შეიძლება გამოყენებული იქნას სამხედრო პოლიგონების ნიადაგების ფიტორემედიაციისათვის.

## 1.15 ზედაპირულად აქტიური ნაერთები

ზედაპირულად აქტიური ნაერთები, რომლებსაც ტენზიდებს და დეტერგენტებსაც უწოდებენ, წყლის ყველაზე მნიშვნელოვან ქიმიურ დამბინძურებლებს წარმოადგენენ. ტენზიდები ამცირებენ წყლის ზედაპირულ დაჭიმულობას, რაც ქაფის წარმოქმნას იწვევს, ამიტომ ისინი გამოიყენება, როგორც სარეცხი საშუალებების ძირითადი კომპონენტი.

ქიმიური თვალსაზრისით, ზედაპირულად აქტიური ნაერთები სხვადასხვა კლასის ნივთიერებებია, რომლებისთვისაც დამახასიათებელია მოლეკულაში ჰიდროფილური (პოლარული) და ჰიდროფობული (არაპოლარული) უბნების არსებობა. ჰიდროფილური უბანი შეიძლება შექმნას როგორც მუხტის მქონე, ასევე ნეიტრალურმა რადიკალმა. ამის მიხედვით არჩევენ იონურ და არაიონურ დეტერგენტებს. ყველაზე გავრცელებული ტენზიდები ალკილსულფონატებია. ამ ნაერთების მოლეკულაში ლიპოფილურ უბანს ქმნის ნახშირწყალბადის რადიკალი, ხოლო ჰიდროფილურს — გოგირდმჟეას ნაშთის იონი (ნახ. 1.19).



ნახ. 1.19. ყველაზე გავრცელებული ზედაპირულად აქტიური ნაერთები.

არაიონურ დეტერგენტებში, მაგ., პოლიოქსიეთილენში, მოლეკულის ჰიდროფილურ ნაწილს სპირტული ჰიდროქსი-ჯგუფები ქმნის (ნახ. 1.19). პოლიოქსი-

ეთილენს შეუძლია წარმოქმნას ესთერი ცხიმოვანი მჟავას ნაშთთან, ან ეთერი — მაღალმოლეკულურ სპირტთან.

ტენზიდებს წარმადგენენ აგრეთვე ალკილამონიუმის ნაერთები, რომლებიც პოლარულ კომპონენტად დადებითად დამუხტულ აზოტს შეიცავს (ნახ. 1.19). ამ ნაერთებისაგან მზადდება ე.წ. ინვერსიული საპნები, რომლებსაც ბაქტერიციდული თვისებები გააჩნიათ.

ზედაპირულად აქტიური ნაერთების მიმართ საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო მოთხოვნილება ძალზე დიდია. ამ ნაერთების უაღრესად ფართო გამოყენებამ ბევრი სამრეწველო ქალაქის მდინარეებსა და წყალსატევებში ქაფის დაგროვება გამოიწვია. ქაფი, გარდა იმისა, რომ ხელს უშლის ნაოსნობას, ძალზე უარყოფითად მოქმედებს გარემოს ეკოლოგიურ მდგომარეობაზე. ტენზიდების მაღალი ტოქსიკურობა თევზების და სხვა ჰიდრობიონტების მასიურ განადგურებას იწვევს.

ზედაპირულად აქტიური ნაერთები მხოლოდ თავისი ტოქსიკურობით არ აყენებენ ზიანს გარემოს. მდინარის წყალში ტენზიდის დაბალი, 0.05—0.10 მგ/ლ რიგის კონცენტრაცია ცი საკმარისია, რომ მოხდეს ფსკერის დანალექებიდან და ლამიდან სხვა ტოქსიკური ნაერთების გამორეცხვა და გააქტიურება. გასული საუკუნის 50-იან წლებში ტენზიდების გამოყენებამ ისეთი კატასტროფული შედეგები გამოიღო, რომ სარეცხი საშუალებების მწარმოებლები იძულებული გახდნენ შეექმნათ ახალი ტიპის ტენზიდები, რომლებიც გარემოში მოხვედრის შემდეგ ადვილად დაიშლებოდნენ უვნებელ ნაერთებად. ასეთი თვისებებით ის ტენზიდები ხასიათდება, რომლებიც არაგანშტოებულ ჰიდროფობულ ჯაჭვს შეიცავენ. მაგ., არაიონური დეტერგენტები და ალკილბენზოსულფონატები (ნახ. 1.19), დაბალტოქსიკური ტენზიდებია, ისინი ექვემდებარებიან ბიოლოგიურ დაშლას β-ჟანგვის გზით, რის შედეგადაც ძმარმჟავას ნაშთები წარმოიქმნება. ცხადია, ასეთი ტიპის ტენზიდების ძიება და დანერგვა ეკოლოგიური თავალსაზრისით გადაუდებელ ამოცანას წარმოადგენს.

## 1.2 არაორგანული ტოქსიკური ნაერთები

გარემოს არაორგანულ დამბინძურებლებს შორის შეიძლება გამოვყოთ ორი ჯგუფი — აირადი ნაერთები და მძიმე მეტალები.

ჰაერში მოხვედრილი ზოგიერთი აირადი ნივთიერება, ისეთიც კი, რომელიც ყოველთვისაა ატმოსფეროში, გარკვეული კონცენტრაციის ზევით საშიში ტოქსიკანტი ხდება. კერძოდ, გარემოსათვის სერიოზული ზარალის მიყენება შეუძლიათ ნახშირბადის, გოგირდისა და აზოტის ოქსიდებს, ოზონს, მეთანს, გოგირდწყალბადს და სხვ. აირებს.

## 1.2.1 ნახშირბადის ოქსიდები

### ნახშირბადის მონოოქსიდი (CO)

ნახშირბადის მონოოქსიდი, რომელიც ნახშირბადშემცველი ნაერთების არასრული წვის დროს წარმოიქმნება, ერთ-ერთი ყველაზე ტოქსიკური აირადი დამბინძურებელია. სადღეისოდ მთელს ატმოსფეროში დაახლოებით 60 მილიონი ტონა ნახშირბადის მონოოქსიდია. შედარებისათვის აღვნიშნავთ, რომ ეს რაოდენობა ჰაერში ნახშირბადის დიოქსიდის ჯამური შემცველობის მეთასხედ ნაწილს შეადგენს.

ნახშირბადის მონოოქსიდის ბუნებრივი ემისიის წყაროებია ვულკანების მოქმედება და ატმოსფეროში მეთანის ფოტოქიმიური დაჟანგვა. CO-ს ანთროპოგენური წარმოქმნა, უპირველეს ყოვლისა, საწვავის წვასთანაა დაკავშირებული. ამ მხრივ ავტომობილი ერთ-ერთ პირველ ადგილზეა. შიდაწვის ძრავებში საწვავის წვისათვის ოპტიმალური პირობები მხოლოდ გარკვეულ სამუშაო რეჟიმში მიიღწევა, როდესაც ძრავის სიმძლავრე დაახლოებით 75%-ით გამოიყენება. CO-ს გამოყოფა ამ დროს მინიმალურია. ყველა დანარჩენ შემთხვევაში კი, განსაკუთრებით ძრავის ამუშაებისას და "უქმ" რეჟიმში მუშაობისას, CO-ს შემცველობა გამონაბოლქვში განსაკუთრებით მაღალია. ნახშირბადის მონოოქსიდის გარემოში გამოყოფის შესაზღვრად მოწინავე ავტომწარმოებელი კომპანიები ავტომობილის მაყუნში ამონტაჟებენ სპეციალურ კატალიზატორებს, რომლებიც ხელს უწყობენ საწვავის ბოლომდე, CO<sub>2</sub>-მდე დაჟანგვას.

ღია ატმოსფეროში ნივთიერებები სწრაფად გადაადგილდება და ზავდება, ამიტომ ავტომობილების გამონაბოლქვში შემავალი CO ჰაერში საშიში რაოდენობით არ უნდა გროვდებოდეს. მიუხედავად ამისა, ზოგიერთ პირობებში CO-თი ჰაერის ლოკალურმა დაბინძურებამ შეიძლება განსაკუთრებით საშიშ ზღვრებს მიაღწიოს. ეს ხდება, მაგ., დიდი ქალაქებისა და ავტოსტრადების თავზე, როდესაც მაღალი ატმოსფერული წნევისა და ტემპერატურული ინვერსიის გამო ჰაერის მასების გადაადგილება იზღუდება და ე.წ. "კანიონის ეფექტი" იქმნება.

ადამიანისათვის ნახშირბადის მონოოქსიდი პირველ რიგში იმიტომაცა სახიფათო, რომ მას სისხლის ჰემოგლობინთან დაკავშირების უნარი აქვს. ნახშირბადის მონოოქსიდი, ჟანგბადის მსგავსად, ჰემოგლობინის ჰემში გარკვეულ კოორდინაციულ მდგომარეობას იკავებს. CO-ს მიმართ ჰემოგლობინის თვისობა 200—300-ჯერ აღემატება ჟანგბადის მიმართ თვისობას, ამიტომ CO-სთან დაკავშირებული ჰემოგლობინი, ანუ კარბოქსიჰემოგლობინი, ჟანგბადის გადატანის უნარს კარგავს, რაც საბოლოოდ ადამიანის დაღუპვის მიზეზი ხდება. სწორედ ამიტომ ნახშირბადის მონოოქსიდს "მზუთავ გაზსაც" უწოდებენ. გამოთვლილია, რომ ჰაერში 0.006%-ის ტოლი "მზუთავი გაზის" მოცულობითი კონცენტრაცია საკმარისია იმისათვის, რომ CO სისხლის ჰემოგლობინის ნახევარს შეუერთდეს. ეს საკმაოდ ახლოა ლეტალურ დოზასთან, რომლის დროსაც კარბოქსიჰე-

მოგლობინის კონცენტრაცია სისხლში ჰემოგლობინის საერთო შემცველობის 60%-ს აღემატება. ცხადია, ჰაერში ნახშირბადის მონოოქსიდი ასეთ კონცენტრაციას მხოლოდ დახურულ შენობაში, ვენტილაციის არარსებობისას თუ მიაღწევს. ასეთი პირობები იქმნება უსაფრთხოების აბსოლუტური უგულვებელყოფით დამონტაჟებული გამათბობელი დანადგარების ექსპლუატაციის დროს, რაც, სამწუხაროდ, ჩვენს სინამდვილეში არცთუ იშვიათად ხდება. უკანასკნელ წლებში სწორედ “მსუთავი გაზით” მოწამვლა სახელდება იმ ტრაგედიების მთავარ მიზეზად, რომლებმაც ბევრი ჩვენი თანამემამულის, მათ შორის უმაღლესი სახელმწიფო მოღვაწის სიცოცხლეც შეიწირა.

ატმოსფეროში ნახშირბადის მონოოქსიდი ზოგიერთ აბიოტურ გარდაქმნას, მაგ., ფოტოჟანგვას ექვემდებარება, მაგრამ გარემო პირობების მიმართ მაინც საკმაო მდგრადობით გამოირჩევა. არსებული ანთროპოგენური და ბუნებრივი წყაროებიდან ნახშირბადის მონოოქსიდის უწყვეტი ემისიის გამო ატმოსფეროში CO-ს იმაზე უფრო მაღალი კონცენტრაციით დაგროვებას უნდა იწვევდეს, ვიდრე ეს ფაქტობრივად ხდება. CO-ს კონცენტრაციის ასეთი შემცირების მიზეზია უმაღლესი მცენარეები, წყალმცენარეები და ნიადაგის მიკროორგანიზმები, რომლებიც CO-ს ფიქსაციას ახორციელებენ. ეს ორგანიზმები ნახშირბადის მონოოქსიდს ამინომჟავა სერინის საშუალებით იკავშირებენ, ან CO<sub>2</sub>-მდე ჟანგავენ.

### ნახშირბადის დიოქსიდი (CO<sub>2</sub>)

ნახშირბადის დიოქსიდი, ანუ ნახშირორჟანგი, ნორმალურ ბუნებრივ პირობებში ატმოსფეროს მოცულობის დაახლოებით 0.03%-ს შეადგენს. ატმოსფერული CO<sub>2</sub> ნიადაგთან, წყალთან და ცოცხალ ორგანიზმებთან (განსაკუთრებით, მცენარეებთან) მუდმივ ცვლაშია, რაც ნახშირორჟანგის ბუნებრივ წრებრუნვას ქმნის. ნახშირბადის დიოქსიდის ბუნებრივი ემისიის წყარო მრავალგვარია — ვულკანების ამოფრქვევა, სუნთქვის პროცესი, ორგანული ნაერთების მიკრობიოლოგიური დაშლა, ტყის მასივების ხანძრები. ამას ემატება დიდი მოცულობის “ანთროპოგენური CO<sub>2</sub>”, რომელიც სხვადასხვა სახის სათბობის წვის დროს გამოიყოფა. ცხადია, ასეთი მასშტაბური ემისია ატმოსფეროში კატასტროფული რაოდენობის CO<sub>2</sub>-ის დაგროვებას გამოიწვევდა, რომ არ ხდებოდეს მისი უწყვეტი ბუნებრივი ფიქსაცია, რომელიც ძირითადად ფოტოსინთეზით, ოკეანის წყალში გახსნით, ტუტემიწა მეტალების ოქსიდებთან შერთებით და ზოგიერთი სხვა პროცესის საშუალებით ხორციელდება.

ნახშირბადის დიოქსიდის გამოყოფისა და მისი შებოჭვის პროცესებს შორის დედამიწაზე დამყარებულია დინამიკური წონასწორული მდგომარეობა, რომელიც მატერიკებისა და ოკეანისათვის ერთნაირადაა დამახასიათებელი. ამ წონასწორობის დარღვევა, ცხადია, დიდ საფრთხეს შეუქმნის პლანეტაზე სიცოცხლის არსებობას. ამ მხრივ უაღსესად დიდ ეკოლოგიურ პრობლემებს ქმნის, ერთი

მხრივ, CO<sub>2</sub>-ის ემისიის ზრდა საწვავის შეუზღუდავი რაოდენობით წვის შედეგად, მეორე მხრივ კი CO<sub>2</sub>-ის ფიქსაციის შეფერხება მცენარეული საფარის შემცირების გამო, რაც თან სდევს ურბანიზაციას, ტყეების ჩეხვას და ა.შ.

ნახშირორჟანგის კონცენტრაციის ზრდა პლანეტის გლობალურ ეკოლოგიურ პრობლემას — ე.წ. “სათბურის ეფექტს” ქმნის. ამ ეფექტის არსი შემდეგში მდგომარეობს: მზის სხივების თბური ენერჯიის ნაწილი დედამიწას ათბობს, ნაწილი კი ინფრაწითელი სხივების სახით დედამიწის ზედაპირიდან აირეკლება და ვარსკვლავთშორის სივრცეში ბრუნდება. ამით პლანეტაზე ნორმალური სითბური ბალანსი მყარდება. ატმოსფეროში ზოგიერთი აირი, მათ შორის ნახშირორჟანგი, ამ ინფრაწითელ სხივებს შთანთქმავს, რის გამოც არეკლილი სითბოს ნაწილი ტროპოსფეროში რჩება და კოსმოსში აღარ ბრუნდება. ჰაერში ნახშირბადის დიოქსიდის კონცენტრაციის კრიტიკულ დონემდე გაზრდისას სითბოს შეკავების პროცესმა შეიძლება ისეთი მასშტაბი მიიღოს, რომ პლანეტის სითბური ბალანსი დაირღვეს და დედამიწა მართლაც სათბურს დაემსგავსოს. ყოველივე ამას კი გლობალური დათბობის გამოწვევა და დედამიწისათვის აუნახლაურებელი ზარალის მიყენება შეუძლია.

დედამიწაზე კლიმატის გლობალური შეცვლის პრობლემასთან დაკავშირებით მსოფლიოს წამყვანი სახელმწიფოების მიერ 1992 წელს ხელმოწერილ იქნა ე.წ. “კიოტოს პროტოკოლი”, რომლის მიხედვითაც მონაწილე სახელმწიფოებმა ვალდებულება აიღეს შემცირებინათ ატმოსფეროში CO<sub>2</sub>-ის გამოყოფა და სახელმწიფო კონტროლზე აეყვანათ ეს პროცესი. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ თათბირის მონაწილე ზოგიერთმა დიდმა სახელმწიფომ ხელშეკრულების დადებას თავი აარიდა და მხოლოდ დიდი დაგვიანებით შეუერთდა “კიოტოს პროტოკოლს”; რადგან ქვეყნის სამრეწველო კომპლექსების ისეთ რეჟიმზე გადაყვანა, რომლის დროსაც CO<sub>2</sub>-ის ემისია მინიმალური იქნება, საკმაოდ რთული განსახორციელებელი და სახელმწიფოს ეკონომიკისათვის ძალზე არახელსაყრელი აღმოჩნდა.

ინგლისელმა მეცნიერებმა 1996 წელს ატმოსფეროში CO<sub>2</sub>-ის გამოყოფის შემცირების ორიგინალური მეთოდი შეიმუშავეს, რომლის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ნავთობისა და ბუნებრივი გაზის ამოღების შედეგად წარმოქმნილი ცარიელი სივრცე ნახშირორჟანგის “ჩასამარხად” გამოიყენება. ამ მიზნით მათ წარმატებული ექსპერიმენტიც განახორციელეს — ნავთობის ერთ-ერთ ყოფილ წყალქვეშა საბადოში მაღალი წნევით ჩატუმბვს დიდი რაოდენობით CO<sub>2</sub>.

## 1.2.2 გოგირდის დიოქსიდი (SO<sub>2</sub>)

გოგირდის დიოქსიდის რეაქციისუნარიანობა ბევრად უფრო მაღალია, ვიდრე CO<sub>2</sub>-ის, ამიტომ SO<sub>2</sub> პირდაპირ ტოქსიკურ ზემოქმედებას ახდენს ორგანიზმზე.

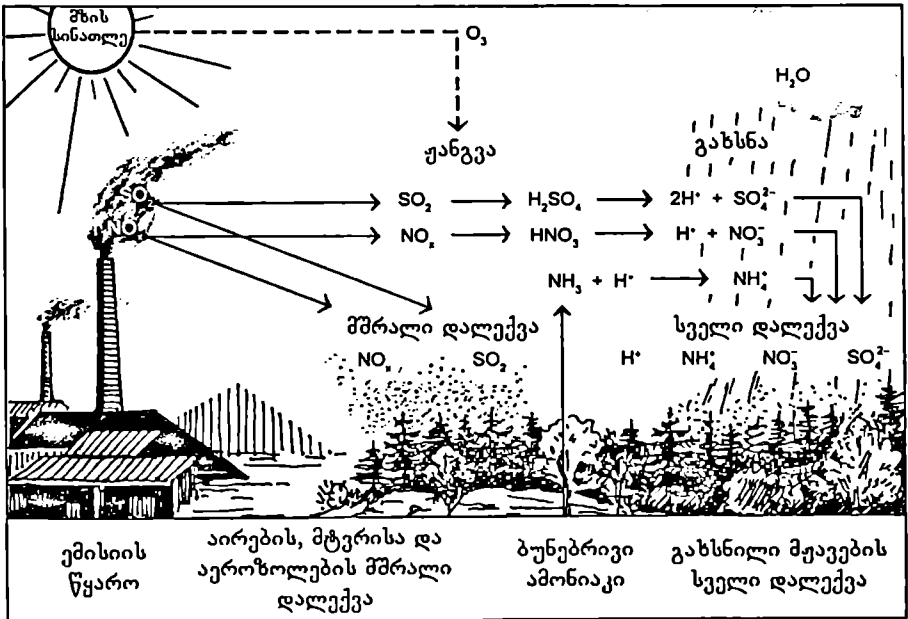
SO<sub>2</sub>-ის ბუნებრივ წყაროებს, პირველ რიგში, მიეკუთვნებიან: ვულკანები, ტყის ხანძრები, გოგირდის შემცველი ნაერთების მიკრობიოლოგიური გარდაქმ-

ნები და სხვ. ატმოსფეროში გამოყოფილი გოგირდის დიოქსიდი შეიძლება შეუერთდეს კირის მინერალებს, რის გამოც ჰაერში მისი მუდმივი კონცენტრაცია ნარჩუნდება.

ატმოსფეროში SO<sub>2</sub> უცვლელი სახით საშუალოდ ორი კვირის მანძილზე შეიძლება არსებობდეს. დროის ამ მონაკვეთის განმავლობაში აირი ვერ ასწრებს გლობალური მასშტაბით გავრცელებას. ამიტომ შესაძლებელია, რომ ემისიის წყაროს ირგვლივ SO<sub>2</sub>-მა ატმოსფეროს ლოკალური დაბინძურება გამოიწვიოს.

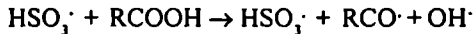
გოგირდის დიოქსიდი აზოტის ოქსიდებთან (NO და NO<sub>2</sub>) ერთად ატმოსფეროში მთელ რივ ქიმიურ გარდაქმნებს განიცდის, მათგან მთავარია ჟანგვა და მჟავების წარმოქმნა, რაც ე.წ. "მჟავა წვიმებს" იწვევს (ნახ. 1.20). ამ რეაქციების ინიციატორია ზღვება ულტრაიისფერი სხივებით და ისინი ჰაერის ჟანგბადის ან ოზონის მონაწილეობით მიმდინარეობს.

გამოანგარიშებულია, რომ მჟავა წვიმების 60—70% გოგირდის დიოქსიდით არის გამოწვეული. SO<sub>2</sub> და მჟავა ნალექები იწვევენ მეტალის ნაკეთობათა კოროზიას და ორგანული მასალების — ტყავის, ქაღალდის, ქსოვილების, რეზინისა და საღებავების დაშლას. მცენარეებისათვის განსაკუთრებით ტოქსიკურია



ნახ. 1.20. მჟავა წვიმების წარმოქმნის მექანიზმი.

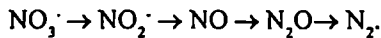
ჰიდროსულფიტ-იონი ( $\text{HSO}_3^-$ ), რომელიც მოქმედებს ფოსფორიკების უჯერ ცხიმოვან მჟავებთან და არაორგანულ და ორგანულ რადიკალებს წარმოქმნის:



ეს რადიკალები იწვევს ბიომემბრანების სტრუქტურის დარღვევას. ქლოროპლასტების მემბრანების დაზიანებისას  $\text{HSO}_3^-$  და  $\text{RCO}^\cdot$  რადიკალები ჟანგავენ და აუფერულებენ ქლოროფილს. გარდა ამისა,  $\text{SO}_2$ -ის გარდაქმნის პროდუქტები ხელს უწყობს ციტოპლაზმის pH-ის შეცვლას, კერძოდ, შემჟავებას, რაც იწვევს ქლოროფილის პორფირინის ბირთვიდან მაგნიუმის იონების მოცილებას.  $\text{HSO}_3^-$  ანჰიბირებს ფერმენტებს, რომლებიც მონაწილეობენ კალციუმის ციკლში  $\text{CO}_2$ -ის ფოტოქიმიური ფიქსაციის პროცესში. ამის გამო,  $\text{SO}_2$ -ის მოქმედების შედეგად ფოთოლი ყვითლდება და კარგავს ფოტოსინთეზის უნარს. გარდა ამისა, გოგირდის დიოქსიდი მნიშვნელოვნად ზღუდავს უჯრედულ მემბრანებს შორის ნივთიერებათა აქტიურ ტრანსპორტს, რის შედეგად ფოთლების ნეკროზი ვითარდება.

## 123 აზოტის ოქსიდები ( $\text{NO}_x$ )

აზოტის ოქსიდები ატმოსფეროს აქტიური ქიმიური დამბინძურებლების კიდევ ერთი ჯგუფია. ბუნებაში აზოტის ოქსიდების წარმოქმნა დაკავშირებულია ჭექა-ქუხილის დროს ელექტრონულ განმუხტვასთან, რის შედეგადაც ჰაერის აზოტისა და ჟანგბადისაგან ჯერ  $\text{NO}$ , ხოლო შემდეგ  $\text{NO}_2$  წარმოიქმნება. მცირე რაოდენობით  $\text{NO}_2$  გამოიყოფა სილოსის ფერმენტაციის პროცესში. ნიადაგში ჟანგბადის დეფიციტის დროს მიმდინარეობს ნიტრატების მიკრობიოლოგიური დენიტრიფიკაცია და აზოტის წარმოქმნა. ამ პროცესში შუალედური პროდუქტებია აზოტის (I) და (II) ოქსიდები.



ამ პროცესში ნიტრატ-იონების სიჭარბე  $\text{N}_2\text{O}$ -ის  $\text{N}_2$ -ად გარდაქმნას აბრკოლებს და ამით ხელს უწყობს  $\text{N}_2\text{O}$ -ის გამოთავისუფლებას. ამიტომ, ნიადაგიდან გამოყოფილი აზოტის ნაერთები უმეტესად აზოტის (I) ოქსიდისაგან შედგება.

ანთროპოგენური წარმოშობის აზოტის ოქსიდებს ძირითადად წარმოადგენენ  $\text{NO}$  და  $\text{NO}_2$ , რომლებიც  $1000^\circ\text{C}$ -ზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე სათბობის წვის დროს წარმოიქმნებიან. გარემოში  $\text{NO}_x$ -ის გამოყოფის ძირითადი წყაროა ბენზინზე მომუშავე საავტომობილო ტრანსპორტი. ავტომრეწველობის განვითარების მუდმივი ტენდენციაა ძრავაში საწვავის სრული წვის პირობების შექმნა, რიც შედეგადაც იზრდება წვის ტემპერატურა და მნიშვნელოვნად მატულობს ძრავის სიმძლავრე. მაგრამ, გარემოსათვის ეს ეფექტი მთლიანად დადებითი არაა: მართალია, გამონახობაში  $\text{CO}$ -ს შემცველობა მცირდება, მაგრამ ამ

ტემპერატურაზე აზოტის ოქსიდები და პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები წარმოიქმნება. ფაქტიურად, ერთი ტოქსიკანტი სხვა, არანაკლებ ტოქსიკური ნაერთებით იცვლება. შიდაწვის ძრავების გარდა, აზოტის ოქსიდები ფორმირდება ნიტრირების პროცესში, სუპერფოსფატის წარმოების დროს, შენადნობების დაშვადებისას, აზოტმჟავათი მეტალების გაწმენდისას, ფეთქებადი ნოტიერებების წარმოებისას და ა.შ. აზოტის ოქსიდებით ანთროპოგენური დაბინძურება კრიტიკულ ზღვარს მჭიდროდ დასახლებულ სამრეწველო ქალაქებში აღწევს.

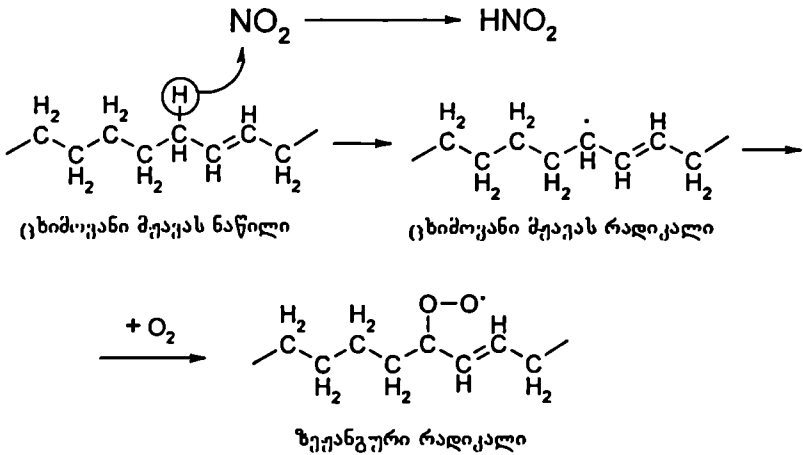
აზოტის დიოქსიდი ( $\text{NO}_2$ ) და მონოოქსიდი ( $\text{NO}$ ) მთელ რიგ ფოტოქიმიურ რეაქციებში მონაწილეობენ, რითაც ხელს უწყობენ ოზონისა და პეროქსიაციტილნიტრატის ( $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$ ) წარმოქმნას, რომლებიც სმოგის შემადგენლობაში შედიან (იხ. § 1.2.4).

აზოტის მონოოქსიდი არ აღიზიანებს სასუნთქ გზებს და ამიტომ მას ადამიანი ვერ შეიგრძნობს. ჩასუნთქვისას  $\text{NO}$  ჰემოგლობინთან წარმოქმნის არამდგრად ნიტროზონაერთს, რომელიც სწრაფად გადადის მეტ-ჰემოგლობინში. მეტ-ჰემოგლობინის  $\text{Fe}^{2+}$ -ს უნარი არ შესწევს  $\text{O}_2$  შექცევადად დაიკაფშიროს და მონაწილეობა მიიღოს ჟანგბადის გადატანის პროცესში. სისხლში მეტ-ჰემოგლობინის 60–70%-იანი კონცენტრაცია ლეტალურ დოზად ითვლება.

ემისიის წყაროსაგან დაცილებასთან ერთად  $\text{NO}$ -ს სულ უფრო მეტი რაოდენობა გადადის  $\text{NO}_2$ -ში. მიღებული მენაშული ფერის აირი განსაკუთრებით ძლიერად აღიზიანებს ლორწოვან გარსს. ორგანიზმის ტენიან ზედაპირებთან კონტაქტის შედეგად აზოტის დიოქსიდისაგან წარმოიქმნება აზოტოვანმჟავა და აზოტმჟავა. ეს მჟავები შლიან ფილტვების ალვეოლების კედლებს, რომელიც გამჭოლი ხდება სისხლის შრატისათვის. ამის შედეგად სისხლიდან სითხე ფილტვის ღრუში გადადის და ჩასუნთქულ ჰაერთან შერევისას ქაფდება, რაც ფილტვსა და ჰაერს შორის აირცვლას აბრკოლებს. ყოველივე ეს მნიშვნელოვნად ზღუდავს სუნთქვას. ორგანიზმზე ასეთი ზემოქმედების გამო აზოტის ოქსიდები სერიოზულ საფრთხეს წარმოადგენენ ადამიანის ჯანმრთელობისათვის მაშინაც კი, როდესაც ჰაერში მათი შემცველობა დასაშვებ ზღვარზე დაბალია.

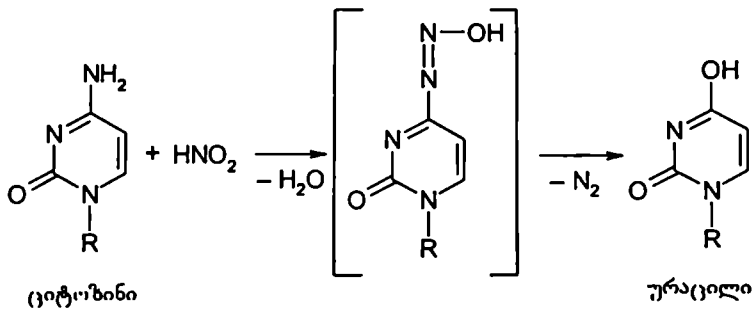
მჟავა წვიმების სახით აზოტის ოქსიდები იწვევენ მცენარის უჯრედებში მჟავიანობის ზრდას, რაც სერიოზულ ზიანს აყენებს მცენარეებს. აზოტის დიოქსიდის მცენარესთან უშუალო კონტაქტის შედეგად ფოთლები (ან წიწვები) ყვითლდება (ან მენაშულ ფერს იღებს). ეს მოვლენა შემდეგი მექანიზმით მიმდინარეობს:  $\text{NO}_2$  მოქმედებს მემბრანების უჯერ ცხიმოვან მჟავებთან წყალბადის მოხლეჩით, რასაც თან სდევს ზეჟანგური ჟანგვის ინიციაცია და ცხიმოვანი მჟავების ან მათი ზეჟანგების რადიკალების ფორმირება (ნახ.1.21). გარდა ამისა,  $\text{NO}_2$ -ს შეუძლია უჯერი ცხიმოვანი მჟავების ორმაგ კავშირებს მიუერთდეს და წარმოქმნას აქტიური რადიკალები. ყველა ეს რადიკალი, თავის მხრივ, იწვევს მემბრანების რღვევას, უჯრედების ნეკროზს, ა და ხ ქლოროფილების ფეოფიტინებად გარდაქმნას და კაროტინოიდების დაშლას.





ნახ. 1.21.  $\text{NO}_2$ -ის მოქმედების შედეგად უჯერი ცხიმოვანი მჟეაჲებიდან რადიკალების წარმოქმნის მექანიზმი.

უჯრედში წარმოქმნილი აზოტოვანი მჟეაჲც ტოქსიკურ თვისებებს ამჟღავნებს.  $\text{HNO}_2$  ნუკლეინის მჟეაჲს ჟანგვით ღეზამინირებას ახდენს, მაგ., ციტოზინს ურაცილად გარდაქმნის (ნახ. 1.22), რაც მუტაგენური ცვლილებების გამომწვევია.



ნახ. 1.22.  $\text{HNO}_2$ -ის მოქმედებით ციტოზინის გარდაქმნა ურაცილად.

გარემოზე აზოტის ოქსიდების არასასურველი ზემოქმედება არაპირდაპირი გზითაც ხდება, კერძოდ, ისინი იწვევენ ე.წ. მეორადი ღამინძურებლების ფორმირებას, რომლებიც მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევიან.

## 1.2.4 ატმოსფეროს მეორადი დაზიანებლები

**ოზონი(O<sub>3</sub>)**

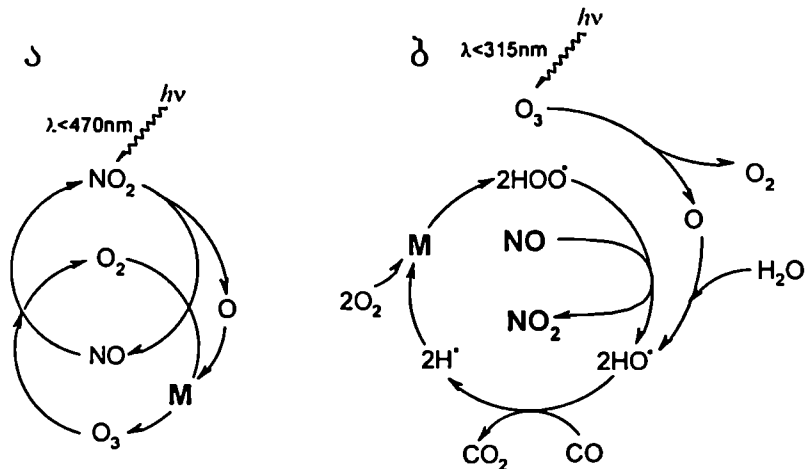
ატმოსფეროში აზოტის ოქსიდების კონცენტრაციის ზრდას ფოტოქიმიური რეაქციების ხარჯზე ოზონის მოლეკულების ფორმირება მოჰყვება. 470 ნმ-მდე ტალღის სიგრძის შხის სხივების გავლენით დედამიწის ზედაპირთან ახლოს NO<sub>2</sub> ფოტოლიზურად იშლება NO-დ და ატომურ ჟანგბადად. ეს უკანასკნელი ინერტულ M ნაწილაკებთან (ამ ნაწილაკის როლს ძირითადად აზოტის მოლეკულა ასრულებს) და მოლეკულურ ჟანგბადთან ურთიერთქმედებით ოზონს წარმოქმნის (ნახ.1.23ა). დედამიწის ზედაპირის სიახლოვეს მყოფ ჰაერის ფენებში ოზონი სწრაფად რეაგირებს NO-სთან და ისევე საწყის პროდუქტებს წარმოქმნის. ასე იქმნება ფოტოლიზური ციკლი და მყარდება წონასწორობა, რომელიც ხელს უშლის O<sub>3</sub>-ის დაგროვებას.

315 ნმ-ზე უფრო მოკლეტალღიანი სხივები ოზონის მოლეკულას შლის და წარმოიქმნება სინგლეტური ჟანგბადის ატომი, რომელსაც წყლის მოლეკულებთან ურთიერთქმედებისას ჰიდროქსილის რადიკალების (HO·) ფორმირების უნარი გააჩნია (ნახ. 1.23ბ). შემდგომი გარდაქმნები შეიძლება მიმდინარეობდეს ნახშირბადის მონოქსიდის მონაწილეობით, რომელიც HO·-რადიკალთან შეჯახებით წარმოქმნის CO<sub>2</sub>-ს და წყალბადის ატომის რადიკალს (H·). ეს უკანასკნელი უკავშირდება მოლეკულურ ჟანგბადს, რის შედეგადაც ფორმირდება ზეჟანგური რადიკალი, რომელიც ხელს უწყობს NO-ის NO<sub>2</sub>-მდე ჟანგვას. ამრიგად, ფოტოლიზური ციკლი, რომელიც ჰაერში ოზონის სტაბილურ კონცენტრაციას ინარჩუნებს, ირღვევა და იწყება ოზონის დაგროვება. აქედან გამომდინარე, ყველა ის პროცესი, რომელიც ხელს უწყობს NO-ს კონცენტრაციის შემცირებას და/ან NO<sub>2</sub>-ის გაზრდას, ანალოგიურ შედეგს იძლევა.

ორგანიზმზე ოზონისა და NO<sub>2</sub>-ის მოქმედება ერთმანეთის მსგავსია. ოზონი იწვევს ფილტვების შეშუპებას, ხელს უშლის მოციმციმე ეპითელიუმის ნორმალურ ფუნქციონირებას, რომელსაც ბრონქებიდან უცხო ნაერთები გამოაქვს. ყოველივე ეს კიბოთი დაავადების საშიშროებას ზრდის.

უმაღლეს მცენარეებზე მოქმედების მიხედვით ოზონი, აზოტის ოქსიდებთან შედარებით, გაცილებით უფრო ტოქსიკურია. O<sub>3</sub> უჯრედული მემბრანების სტრუქტურის ცვლილებებს იწვევს, რის შედეგად იზრდება უჯრედებში წყლისა და დაბალმოლეკულური ორგანული ნაერთების (გლუკოზის, ორგანული მჟავების, ამინომჟავებისა და სხვ.) შეღწევალობა. ამ პროცესის შედეგად ვითარდება მცენარის დაავადება, რომელიც ცნობილია, როგორც ფოთლების ვერცხლისფერი ლაქიანობა. ამ პათოლოგიის დროს უჯრედები ნეკროზდება, ირღვევა ასიმბალტების ტრანსპორტის პროცესი. ამის შედეგად ირღვევა ფოტოსინთეზი — ნიკოტინამიდური კოფერმენტის NADP-ს აღდგენის ნაცვლად, სინათლის მიერ აგზნებული ელექტრონები წარმოქმნიან სუპეროქსიდულ რადიკალებს, რომლებიც, თავის

მხრივ, ჟანგავენ ასკორბინის მჟეას, ან გენერირებენ წყალბადის ზეჟანგს. ელექტრონების ერთ-ერთ შუალედურ გადამტანზე — ფერედოქსინზე წარმოიქმნება ჰიდროქსილის რადიკალები, რომლებიც ცხიმოვანი მჟეების ზეჟანგურ ჟანგვას ინიცირებენ, რის შედეგადაც ფორმირდება თავისუფალი რადიკალები. ეს უკანასკნელები ქლოროფილს ჟანგავენ და ფოთლების გაუფერულებას იწვევენ.



ნახ. 1.23. მზის სხივებით წარმოქმნილი აზოტის ოქსიდების ფოტოლიზური ციკლები.

მაღალტოქსიკურია ოზონის მოქმედების შედეგად წარმოქმნილი ჰიდროქსილ-რადიკალებიც, რომელთა მოქმედებით ფოთლების ან წიწვების პრიალა ზედაპირზე ნაპრალეები ჩნდება. მიკროორგანიზმები ამ ნაპრალეებში ადვილად აღწევენ და იწევენ ინფექციურ დაავადებებს, რის შედეგადაც შეიძლება განადგურდეს ტყის მთელი მასივები.

**სმოგის წარმოქმნა**

ატმოსფეროში მოხვედრილი ქიმიური ტოქსიკანტები სხვა ეკოსისტემებთან შედარებით გაცილებით სწრაფად ვრცელდება, ამიტომ ჰაერში ტოქსიკანტი მაღალი კონცენტრაციით მხოლოდ ხანმოკლე დროის განმავლობაში, და ისიც ემისიის კერის ახლოს შეიძლება გროვდებოდეს. მიუხედავად ამისა, ზოგიერთი ფიზიკურ-ქიმიური, გეოგრაფიული და მეტეოროლოგიური ფაქტორების ერთობლიობას აგრეთვე შეუძლია გამოიწვიოს ჰაერის ხანგრძლივი და ლოკალური დაბინძურება. ამის მაგალითია სმოგის წარმოქმნა.

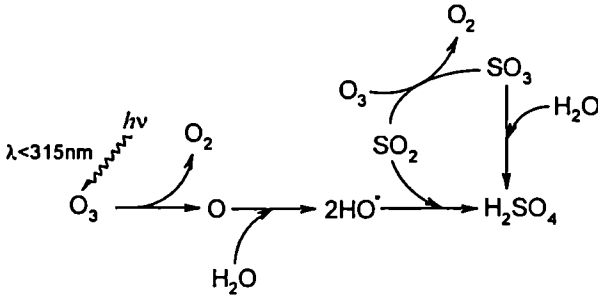
სმოგი (წარმოიშვა სიტყვებიდან smoke + fog, ე.ი. კვამლი + ნისლი) აირების ნარევია, რომელიც მოყვისფრო-მოყვითალო ან მეწამული ფერის ნისლისაგან წარმოქმნილი სახით ნახევრად გამჭვირვალე აფსკის სახით ხანგრძლივი დროის განმავლობაში არსებობს დიდი ქალაქებისა და სამრეწველო ცენტრების თავზე. ძირითადად არჩევენ ორი ტიპის სმოგს:

- 1 ლონდონური ტიპის სმოგი წარმოადგენს სქელ ნისლს, რომელიც შეიცავს კვამლსა და აირად სამრეწველო ნარჩენებს შეიცავს. ასეთი სმოგი წარმოიქმნება შემოდგომა—ზამთრის პერიოდში, ჩრდილოეთისა და საშუალო განედების ქალაქებში. იგი წარმოადგენს აეროზოლს, რომელიც ძირითადად  $SO_2$ -ს,  $H_2SO_4$ -სა და ჭვარტლს შეიცავს.
- 2 ლოს-ანჯელესური ტიპის სმოგი წარმოადგენს აფსკისებურ აეროზოლს ტოქსიკური აირების მაღალი კონცენტრაციით. იგი არ შეიცავს ნისლს. ასეთი ტიპის სმოგს აგრეთვე ფოტოქიმიურსაც უწოდებენ, ვინაიდან წარმოიქმნება მზის ულტრაიისფერი რადიაციით ინიცირებული ფოტოქიმიური რეაქციების შედეგად, რომლებშიც ტრანსპორტისა და სამრეწველო ობიექტების გამონაბოლქვში შემაჯალი აირები მონაწილეობენ. ლონდონურისაგან განსხვავებით, ფოტოქიმიური სმოგი დამახასიათებელია სამხრეთი განედების ქალაქებისათვის და ზაფხულის თვეებში წარმოიქმნება. ლოს-ანჯელესური სმოგის შემადგენლობაში შედის აზოტის ოქსიდები, ოზონი, პეროქსიაცეტილნიტრატი და ორგანული რადიკალები.

სმოგის წარმოქმნა იმ ოქსებში ხდება, სადაც ჰაერის ანთროპოგენური დაბინძურება ძლიერდება ადგილმდებარეობის გეოგრაფიული თავისებურებებითა (მაგ., მთები, რომლებიც ჰაერის ნაკადებს აკავებენ) და მეტეოროლოგიური პირობებით (მაგ., ტროპოსფეროს ტემპერატურული ინვერსიები, რომლებიც ხელს უშლიან აირების ვერტიკალური მიმართულებით განაწილებას). სმოგი, როგორც წესი, წარმოიქმნება ჰაერის დაბალი ტურბულენტობის, სუსტი ქარის ან წყნარი ამინდის დროს. სხვაგვარად რომ ითქვას, სმოგის ფორმირებისათვის ხელსაყრელია ყველა ის პირობა, რომელიც ხელს უშლის ჰაერში აირადი ტოქსიკანტის გავრცელებას, განზავებას და დაბინძურების კერიდან დიდ მანძილზე მოცილებას. სმოგი ამცირებს ხილვადობას, აჩქარებს მეტალების კოროზიას, აზიანებს სამშენებლო მასალებს, ანადგურებს მცენარეულ საფარს, აღიზიანებს სასუნთ გზებსა და მხედველობის ორგანოებს. ინტენსიური და ხანგრძლივი სმოგი შეიძლება გახდეს მრავალგვარი დაავადების გახშირების მიზეზი.

ლონდონური ტიპის სმოგის წარმოქმნას ხელს უწყობს ტენიანი ჰაერი და გოგირდის დიოქსიდი, რომელიც დიდი რაოდენობით გამოიყოფა ზამთრის გათბობის სეზონში ქვანახშირის წვის შედეგად. ასეთი ტიპის სმოგის ფორმირების პროცესი შეიძლება შემდეგი სახით წარმოვიდგინოთ (ნახ. 1.24): ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებით, რომელთა ტალღის სიგრძე 315 ნმ-ზე ნაკლებია, ოზონი იშლება აგზნებულ მდგომარეობაში მყოფი სინგლეტური ჟანგბადის ატომის გამოთავისუფლებით, რომელიც წყლის ატმოსფერულ ორთქლთან მაღალ-

რეაქციისუნარიან ჰიდროქსილ-რადიკალებს ( $\text{HO}^\cdot$ ) წარმოქმნის. ეს რადიკალები ადვილად ჟანგავენ გოგირდის დიოქსიდს გოგირდმჟავამდე.  $\text{SO}_2$  შესაძლოა უმუ-  
ალოდ ოზონითაც დაიჟანგოს, ხოლო წარმოქმნილი გოგირდის ანჰიდრიდი ( $\text{SO}_3$ )  
აქტიურად იერთებს წყალს და ასევე წარმოქმნის გოგირდმჟავას. საბოლოოდ,  
გოგირდის ოქსიდები და მჟავები ჭკარტლთან და წყლის ორთქლთან ერთად მუქ,  
სქელ აეროზოლს წარმოქმნის.

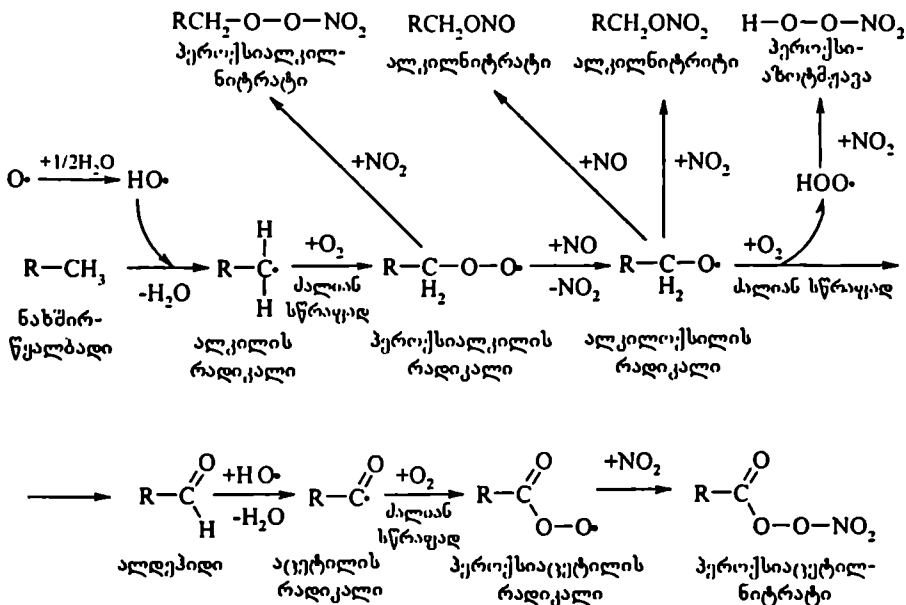


ნახ. 1.24. ლონდონური ტიპის სმოგის კომპონენტების ფორმირების პროცესი.

ფოტოქიმიური სმოგი რთული შედგენილობისაა. ის შეიცავს ჟანგვის მაღალი  
უნარის მქონე დაახლოებით ასი ტოქსიკური ნაერთისა და რადიკალის ნარევეს.  
ფოტოქიმიური სმოგის წყაროებია, ძირითადად, აზოტის ოქსიდები, ოზონი და  
აქროლადი ორგანული ნაერთები: ეთანი, პროპანი, ბუთანი, ეთილენი, პროპენი,  
აცეტილენი, მეთანოლი, ფორმალდეჰიდი, აცეტალდეჰიდი და სხვ., რომლებიც  
ჰაერში სხვადასხვა ანთროპოგენური წყაროებიდან, მათ შორის, გამონ-  
აბოლქვიდან ხვდება. ყველა ეს ნაერთი მონაწილეობს მთელ რიგ რეაქციებში,  
რომელთა შედეგადაც სმოგის კომპონენტები — ე.წ. “მეორეული დამბინძურე-  
ბლები” ფორმირდება (ნახ.1.25).

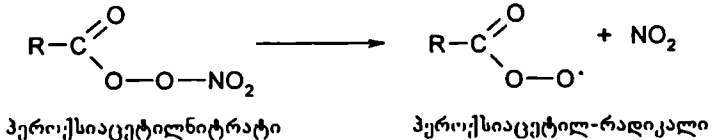
ლოს-ანჯელესის ტიპის სმოგის კომპონენტების წარმოქმნა იწყება ოზონის  
ფოტოქიმიური დაშლის შედეგად გენერირებული სინგლეთური ჟანგბადისა და  
წყლის ურთიერთქმედებით (იხ. ნახ.1.23ბ). ამ დროს წარმოიქმნება ჰიდროქსი-  
ლის რადიკალი, რომელიც ჟანგავს ჰაერში არსებულ აქროლად ორგანულ ნაერთს  
(ნახ.1.25). ჟანგვის პირველ ეტაპზე წამოიქმნება ალკილური რადიკალი, რომელ-  
იც ძალზე სწრაფად იერთებს მოლეკულურ ჟანგბადს და გადადის პეროქსი-  
რადიკალში. ამ რადიკალს შეუძლია  $\text{NO}$  დაჟანგოს  $\text{NO}_2$ -მდე, რის შემდეგ მის-  
გან ალკილური რადიკალი ფორმირდება. ალკილ-რადიკალი, თავის მხრივ,  
სწრაფად იჟანგება ჟანგბადით და ალდეჰიდს წარმოქმნის. ამ სტადიის შემდეგ  
რეაქციაში ისევე ერთვება ჰიდროქსილის რადიკალი, რომელიც ალდეჰიდს აცე-  
ტილის რადიკალამდე ჟანგავს. ამ რადიკალთან ჟანგბადის სწრაფი მიერთების

შედეგად წარმოიქმნება პეროქსიაცეტილის რადიკალი. ეს უკანასკნელი იერთებს აზოტის დიოქსიდს და სმოგის ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს — პეროქსიაცეტილნიტრატს გენერირებს.



ნახ. 1.25. ლოს-ანჟელესური ტიპის სმოგის კომპონენტების წარმოქმნის გამართლებული სქემა.

პეროქსიაცეტილნიტრატი, აზოტის ოქსიდებისა და ოზონის მსგავსად, დამლუპველად მოქმედებს მცენარეზე. მცენარის უჯრედში ეს ტოქსიკანტი ფოტოლიზურად იშლება აზოტის დიოქსიდად და პეროქსიაცეტილ-რადიკალად (ნახ.1.26). ეს უკანასკნელი შლის ქლოროფილს და ამით ფოტოსინთეზური აპარატის ფუნქციონირებას არღვევს.



ნახ. 126. მცენარულ უჯრედში პეროქსიაცეტილნიტრატის დაშლის შედეგად პეროქსიაცეტილ-რადიკალის წარმოქმნა.

აზოტის ოქსიდები წარმოქმნიან სხვა მეორად დამბინძურებლებსაც, რომლებიც შედიან ფოტოქიმიური სმოგის შემადგენლობაში. ესენია: პეროქსიდილინტრატი, ალკილინტრატი, ალკილინტრიტი, პეროქსიზოტმეტაჟა და სხვ., რომლებიც ფორმირდებიან თავისუფალ რადიკალებთან აზოტის ოქსიდების მოქმედების შედეგად. გარდა ამისა, ეს რადიკალები ოლეფინებთან ერთად პოლიმერისაციის რეაქციებში მონაწილეობენ. პოლიმერული ჯაჭვის წარმოქმნა მანამდე გრძელდება, სანამ  $\text{NO}_2$ -ის მოლეკულები ან ორგანული რადიკალები არ გამოიწვევენ ჯაჭვის გაწყვეტას. ნახშირწყალბადების პოლიმერისაციის შედეგად ხდება სმოგისათვის დამახასიათებელი კვამლიანი მასის წარმოქმნა, რომელიც ატმოსფეროს გამჭვირვალობას ამცირებს.

## 12.5 მძიმე მეტალები

ადამიანი თავის სამრეწველო საქმიანობისას აქტიურად იყენებს 35 სხვადასხვა მეტალს, რომელთაგან 23 მძიმე მეტალს მიეკუთვნება. მძიმე მეტალები აერთიანებენ იმ ქიმიურ ელემენტებს, რომელთა სიმკვრივე  $5\text{გ/სმ}^3$ -ს აღემატება: Ag, As, Au, Bi, Cd, Ce, Cr, Co, Cu, Fe, Ga, Hg, Mn, Ni, Pb, Pt, Te, Th, Sb, Sn, U, V და Zn. ამ ელემენტების უმეტესობა განსაზღვრული, მცირე რაოდენობით ცოცხალი ორგანიზმის აუცილებელ კომპონენტებს წარმოადგენენ, მაგრამ ნებისმიერი მათგანის ჭარბი კონცენტრაცია მწვავე ან ქრონიკულ მოწამვლას იწვევს. მძიმე მეტალების ტოქსიკურობა მცენარეებისა და მიკროორგანიზმებისათვის ზოგადად ზრდა-განვითარების შეფერხებაში გამოიხატება. ცხოველისა და ადამიანის ორგანიზმში მძიმე მეტალი სერიოზულად აზიანებს ცენტრალურ ნერვულ სისტემას, ცვლის სისხლის შემადგენლობას, უარყოფით გავლენას ახდენს ღვიძლის, ფილტვების, თირკმელებისა და სხვა ორგანოების ფუნქციებზე. ხანგრძლივი ზემოქმედებისას მძიმე მეტალებს შეუძლიათ გამოიწვიონ მწვავე ფიზიოლოგიური ცვლილებები, ათვისებიანი სიმსივნე, ალერგია, დისტროფია, ფიზიკური და ნევროლოგიური დეგენერაციული პროცესები, რომლებიც ალცჰეიმერისა და პარკინსონის დაავადებების მსგავსი სიმპტომებით ხასიათდება.

20 ყველაზე საშიში ნაერთის სიაში, რომელიც 2003 წელს ტოქსიკური ნაერთებისა და დაავადებების რეგისტრაციის სააგენტომ (The Agency for Toxic Substances and Disease Registry — ASTDR) და აშშ-ს გარემოს დაცვის სააგენტომ (U.S. Environmental Protection Agency — EPA) ერთობლივად შეადგინეს, მძიმე მეტალებს — დარიშხანს, ტყვიას, ვერცხლისწყალსა და კადმიუმს შესაბამისად — I, II, III და VII ადგილები უკავიათ.

მძიმე მეტალების გარემოში გავრცელება, ტოქსიკურობა და მათ მიერ გამოწვეული დაავადებები აღწერილია მრავალრიცხოვან მონოგრაფიებში და მიმოხილვით სტატიებში. წინამდებარე ნაშრომში მოკლედ დავახასიათებთ იმ მძიმე მეტალებს, რომელთა გარემოში გავრცელება სერიოზულ ეკოლოგიურ პრობლემებს ქმნის.

## დარიშხანი (As)

დარიშხანი ყველაზე ტოქსიკურია იმ ელემენტებს შორის, რომლებსაც ადამიანი თავისი მოღვაწეობის სხვადასხვა სფეროში იყენებს. დარიშხანის ყველა ნაერთი მაღალტოქსიკურია. გაცხელებისას ისინი იშლებიან და მეტალური დარიშხანის მომწამლავ ორთქლს გამოყოფენ.

დარიშხანი შედის სპილენძის, ტყვიის, ნიკელის, კობალტისა და ზოგიერთი სხვა მეტალის შემცველი მადნების შედგენილობაში. გარემოში დარიშხანის მოხვედრა სხვადასხვა გზითაა შესაძლებელი. უსენია: დარიშხანის მოპოვება-გადამუშავების სამთამადნო სამუშაოები, სპილენძის, ტყვიისა და თუთიის გამოდნობა, ქვანახშირის წვა და ა.შ. გარდა ამისა, დარიშხანის ოქსიდები, არსენიტები და არსენატები შედიან ინსექტიციდების, დესიკანტებისა და პერბიციდების შემადგენლობაში. ისინი ფართოდ გამოიყენება მეჩენის დამუშავებისას (2000 წლის მონაცემებით აშშ-ში ამ მიზნით გამოიყენეს მთელი მოხმარებული დარიშხანის 88%), სხვადასხვა სახის მინის, ანტიკოროზიული შენადნობების, სარჩილაკების, საბრძოლო მასალების, აკუმულატორების დასაშაადებლად. მაღალი სისუფთავის დარიშხანი აუცილებელი კომპონენტია მზის ბატარეებში, შუქდიოდებში, ლაზერებში, ინტეგრალურ სქემებში, ნახეარგამტარებში და ა.შ. გასული საუკუნის 70-იან წლებამდე დარიშხანის არაორგანული ნაერთები გამოიყენებოდა მედიცინაშიც, კერძოდ, ამ ელემენტს შეიცავდა ლეიკემიის, ფსორიაზისა და ასთმის სამკურნალო პრეპარატები.

ატმოსფეროში სხვადასხვა გზით მოხვედრილი დარიშხანის ნაერთები ილექება მიწისა და წყლის ზედაპირზე, სორბირდება მცენარეებზე, აღწევს მათში და ამ გზით ხედება კვებით ჯაჭვში.

დარიშხანით მოწამვლა, ანუ არსენიზმი, ძალიან იშვიათი დაავადებაა. ადამიანები, რომლებსაც ხშირი კონტაქტი აქვთ დარიშხანის ორთქლთან ან მტვერთან, უფრო ხშირად ქრონიკული მოწამვლის შედეგად იღუპებიან. დარიშხანის არალეტალური დოზა იწვევს ერთროციტების ჰემოლიზს, კანის, ცენტრალური ნერვული სისტემისა და კუჭ-ნაწლავის ტრაქტის გაღიზიანებას.

დარიშხანი და მისი ნაერთები ძლიერი კანცეროგენებია. ისინი იწვევენ კანის, ლეიძლის, ნაწლავების, შარდის ბუშტისა და ფილტვების სიმსივნეს. განსაკუთრებით ხშირია კანის კიბოთი იმ ადამიანების დაავადება, რომლებსაც უშუალო კონტაქტი აქვთ დარიშხანის შემცველ ნაერთთან. მაგ., უნგრეთში გასული საუკუნის შუა პერიოდში ვაზის მავნებლის — ფილოქსერას წინააღმდეგ დაიწვეს დარიშხან-შემცველი ინსექტიციდების გამოყენება, რის შემდეგაც გახშირდა ე.წ. “მევენახეთა კიბო” — მევენახეების დაავადება კანის სიმსივნით.

ტროპიკული წყლების ზოგიერთი წყალმცენარე დარიშხანის მიმართ მაღალი მდგრადობით გამოირჩევა. ისინი დარიშხანს არსენატის ( $AsO_4^{3-}$ ) სახით შთანთქავენ, შემდეგ აღადგენენ მას არსენიტამდე ( $AsO_3^{3-}$ ) და ამ სახით იკავშირებენ ფოსფორლიპიდებით თუ მცენარე ამ უნარს მოკლებულია, დარიშხანი



კოვალენტურად უკავშირდება ფერმენტების სულფჰიდრილურ ჯგუფებს და მათ ინჰიბირებას იწვევს, რაც მეტად დამორგუნველად მოქმედებს მცენარის ზრდა-განვითარებაზე.

დარიშხანის ნაერთების შეთვისებისა და გარდაქმნის უნარი აქვთ აგრეთვე ზოგიერთ ბაქტერიას და მიცელურ სოკოს. მაგ., აერობულ პირობებში მეთანოგენური ბაქტერიები ახდენენ არაორგანული დარიშხანის მეთილირებას, წარმოქმნილი დარიშხან-ორგანული ნაერთები შემდგომ ფერმენტულად აღდგება აქროლად ალკილარსინებად.

საქართველოსათვის დარიშხანით გარემოს დაბინძურების პრობლემა მეტად აქტუალურია, ვინაიდან არსებობს მისი საბადო, რომლის აქტიური ექსპლუატაცია მიმდინარეობდა საბჭოთა პერიოდში. ამჟამად, როგორც საბადო, ისე გამამდიდრებელი ქარხანა ფაქტობრივად აღარ ფუნქციონირებს, ამიტომ წარმოების ნარჩენების გაერცელების საფრთხის თავიდან ასაცილებლად აუცილებელია სათანადო მონიტორინგის განხორციელება და კონსერვაციული სამუშაოების ჩატარება.

### ტყვია (Pb)

ტყვია წარმოებაში ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ გამოყენებული მძიმე მეტალაა. მეტალური ტყვია და მისი ნაერთები (ოქსიდები, პოლოგენიდები, კარბონატები, ქრომატი, სულფატი და სხვ.) გამოიყენება: აკუმულატორების, პიეზოელექტრონული ელემენტების, რუზინის, მინის, მინანქრის, ემალის, საგოზავის, სარჩილაის წარმოებაში; მანქანათმშენებლობაში, პოლიგრაფიაში, საღებავების (ტყვიის თურა, სხვადასხვა პიგმენტები) დასამზადებლად; ლაქ-საღებავების მდგრადობის გასაზრდელად და სხვ. მეტალური ტყვია გამოიყენება  $\gamma$ -გამოსხივებისაგან დასაცავად. ტყვიის ორგანული ნაერთი — ტეტრაეთილტყვია ბენზინის ანტიდეტონატორული დანამატია.

ყოველწლიურად მთელს მსოფლიოში რამდენიმე მილიონი ტონა ტყვია და მისი ნაერთები იწარმოება. ტყვიის გარემოში გაერცელებას იწვევს: მეტალის მოპოვება, ტრანპორტირება და გადაამუშავება; წარმოებები (მეტალურგიული, მეტალ-გადამამუშავებელი, მანქანათმშენებლობის, ქიმიური, ქიმიურ-ფარმაცევტული, ნავთობ-ქიმიური და სხვ.), რომლებშიც ტყვიის ნაერთები მაღალტემპერატურული ტექნოლოგიური პროცესების საშუალებით გადაამუშავდება; შიგაწვის ძრავების მუშაობა ტეტრაეთილტყვიის შემცველ ბენზინზე; ტყვიის შემცველი დეტალების ცვეთა და სხვ. არსებობს მონაცემები, რომელთა მიხედვითაც საშხედრო მოქმედებების ადგილებსა და პოლიგონების ნიადაგებში ტყვიის შემცველობა მნიშვნელოვნად აჭარბებს ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციას. ნასროლი საბრძოლო ტყვიის გულა, რომელიც სპილენძთან და რკინასთან ტყვიის შენადნობს წარმოადგენს, წვიმისა და ტენიანი ჰაერის ზემოქმედებით ადვილად

განიცდის კოროზიას და ნიადაგში ხვდება. ამ გზით ნიადაგში ტყვია 5 სმ-ის სიღრმემდე შეიძლება გავრცელდეს.

ავტომაქნების გამონაბოლქე აირებში ტყვია ოქსიდების, ქლორიდების, ფტორიდების, ნიტრატების, სულფატების და სხვა სახით გვხვდება გამონაბოლქეში. ეს ნაერთები მყარი ნაწილაკების სახითაა. მათი დაახლოებით 20% უშუალოდ საავტომობილო გზების მახლობლად იღვქება. სწორედ ამის გამო ეკოლოგების რეკომენდაციით იკრძალება სასოფლო-სამეურნეო კულტურების, განსაკუთრებით კი სწრაფად მზარდი ბოსტნეულის დათესვა გზატკეცილების პირას.

ტყვია ტოქსიკურია მიკროორგანიზმებისთვისაც. ნიადაგში ტყვიის მომეტებული კონცენტრაცია მიკრობიოცენოზის ძირითადი წარმომადგენლების რიცხვს მკვეთრად ამცირებს. მიკროფლორისათვის ტყვიის ტოქსიკურობის ხარისხი ნიადაგის ტიპზეა დამოკიდებული, მაგ., შუმიწა ნიადაგებში ტყვია ტოქსიკურ თვისებებს გაცილებით ნაკლებად ამჟღავნებს. ტყვიის და მისი ნაერთების მიმართ მაღალმგრძობიარობას ამჟღავნებენ აქტინომიცეტები და აზოტის ფიქსაციის უნარის მქონე ბაქტერიები, ხოლო ცალკეული მიკროსკოპიული სოკოები და ზოგიერთი ბაქტერია მაღალი მდგრადობით გამოირჩევიან. ცხადია, ასეთი მიკროორგანიზმები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ბიოინდიკატორებად ნიადაგის ტყვიით დაბინძურების ხარისხის განსაზღვრისათვის.

მცენარეებისათვის ტოქსიკურად ითვლება ნიადაგში ტყვიის ისეთი კონცენტრაცია, რომელიც მოსავლიანობას 10%-ით ამცირებს. მცენარეში ტყვია ადვილად არ შეიღწევა და არ გადაადგილდება, მაგრამ როდესაც ნიადაგში ტყვიის შემცველობა 50 მგ/კგ-ს აღწარბებს, მცენარეებში, განსაკუთრებით კი ბოსტნეულში, მძიმე მეტალის შემცველობა დასაშვებ ზღვარზე უფრო მაღალი ხდება. უნდა აღინიშნოს, რომ ადამიანის ორგანიზმში მოხვედრილი ტყვიის 90% კვებითი ჯაჭვების საშუალებითაა შეღწეული, ტყვიის შემცველი საკვების 60—70%-ს კი მცენარეული პროდუქტები წარმოადგენენ.

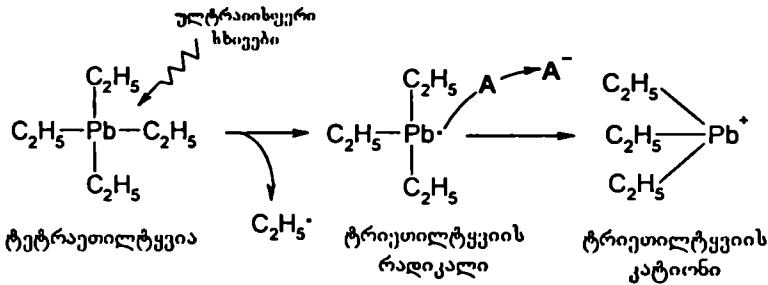
ადამიანისათვის ტყვია ზომიერად ტოქსიკურია. მის მიერ გამოწვეული ქრონიკული მოწამვლა — “სატურნიზმი” — მრავალგვარი კლინიკური გამოვლინებით ხასიათდება. ამ დროს ზიანდება ცენტრალური და პერიფერიული ნერვული სისტემა, ძვლის ტვინი, სისხლძარღვები, იცვლება სისხლის შემადგენლობა, ითრგუნება ცილის სინთეზი. ტყვია მოქმედებს უჯრედის გენეტიკურ აპარატზეც, რაც გონადოტოქსიკური და ემბრიოტოქსიკური ეფექტებით ვლინდება. ტყვია ააქტიურებს სიმსივნურ პროცესებს.

საინტერესოა, რომ ერთ-ერთი ისტორიული ვერსიის თანახმად, ტყვია ის მეტალია, რომელმაც რომის იმპერია იმსხვერპლა. ცხადია, აქ საუბარია არა ცეცხლსასროლ იარაღზე, არამედ ტყვიისაგან დამზადებულ ჭურჭელზე, რომელიც ძველ რომში ძალიან პოპულარული იყო. ვარაუდობენ, რომ ტყვიის ჭურჭლის რეკლამულმა გამოყენებამ დააუძლურა რომაელების ორგანიზმი და მათ სათანადო წინააღმდეგობა ვეღარ გაუწიეს ცივილიზაციისაგან შორს მდგარ დამპყრობლებს. ტყვიასთან დაკავშირებულ ის-

ტორიულ თემატიკას თუ გაეგარძელებოთ შეიძლება ისიც გაეიხსენოთ რომ ამ მძიმე მეტალმა გარიანად შეარყია რუსეთის სამეფო გუბერნიის ჯანმრთელობაც. ცნობილია, რომ მოსკოვის კრემლში წყალგაყვანილობის სისტემაში ტყვიის მილებს იყენებდნენ, რის გამოც ხელმწიფის ოჯახის წევრები თაობიდან თაობამდე იწამლებოდნენ ტყვიის შენაერთებით ამ ხედრს მხოლოდ პეტრე დიდი გადაურჩა, რომელიც ბაკშვობას ქალაქკარეთ ატარებდა, შემდეგ კი თავისივე დაარსებულ სანქტ-პეტერბურგში დაქვედრდა.

ტყვიის არაორგანული ნაერთებიდან განსაკუთრებით ტოქსიკურია ტყვიის თუთრა, ტყვიის (II) სულფატი და ტყვიის (II) ოქსიდი. კიდევ უფრო ტოქსიკურია ტყვიის ის ნაერთები, რომლებიც ტოქსიკურ ანიონს (არსენატს, ქრომატს, აზიდს) შეიცავენ. სხვა ნაერთები ტოქსიკურობით ბევრად არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან და ერთნაირად ზემოქმედებენ ორგანიზმზე. საერთოდ, ტყვიის ნაერთებს შორის ტოქსიკურობაში სხვაობა განპირობებულია ამ ნაერთების განსხვავებული ხსნადობით კუჭის წვეწმინდაში, ნაწლავებში, სისხლსა და ციტოპლაზმაში. ტყვიის მცირედ და ძნელად ხსნადი ნაერთები შეიძლება ისე გარდაიქმნან ნაწლავებში, რომ მნიშვნელოვნად გაიზარდოს როგორც ხსნადობა, ასევე ნაწლავების მიერ მათი შეწოვის უნარიც.

ტყვიის ორგანული ნაერთებიდან აღსანიშნავია ტეტრაეთილტყვია, ბენზინის დანამატი, რომელიც ანტიდეტონატორია და ბენზინის ოქტანური რიცხვის გასაზრდელად გამოიყენება. ეს ნაერთი ძლიერი ბიოციდია. იგი უშუალოდ არ მოქმედებს ორგანიზმზე. აქროლადი ბუნების მქონე ტეტრაეთილტყვია ადვილად ერცელებოდა ჰაერში და ულტრაიისფერი სხივების ზემოქმედებით ტრიეთილტყვიის რადიკალს წარმოქმნის (ნახ. I.27). ამ რადიკალის ურთიერთქმედებით აქცეპტორული ბუნების ნაერთთან (A) ტრიეთილტყვიის კატიონი მიიღება.



ნახ. I.27. ტრიეთილტყვიის კატიონის წარმოქმნა ტეტრაეთილტყვიიდან.

წარმოქმნილი ტრიეთილტყვიის კატიონი (Pb(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub><sup>+</sup>) იონური მუხტის მეშვეობით ჰიდროფილურ თვისებებს აქვს, ხოლო ეთილის ჯგუფები ნაერთისათვის ლიპოფილურ “კუდს” წარმოადგენს. ამგვარი აღნაგობის გამო ტრიეთილტყვიის კატიონი ადვილად ახერხებს მემბრანული ბარიერის გაღლას და უჯრედში

შესვლას. ეს კატიონი უკავშირდება ცილებისა და პეპტიდების გოგირდის ატომებს, რაც ბიოპოლიმერების სტრუქტურულ და ფუნქციურ ცვლილებებს იწვევს.

სწორედ ასეთი მაღალი ტოქსიკურობის გამო ეთილირებული ბენზინის გამოყენება მსოფლის მრავალ ქვეყანაში, მათ შორის საქართველოშიც, აკრძალული ან შეზღუდულია.

### მერცხლის წყალი (Hg)

სინგური (HgS), რომლის სახითაც ვერცხლისწყალი ბუნებაში გვხვდება, ძალიან დაბალი ხსნადობის გამო, შედარებით უვნებელია და გავრცელების დაბალი უნარით გამოირჩევა, მაგრამ ზოგიერთი ბუნებრივი პროცესის (ვერცხლისწყლის შემცველი ქანების გამოფიტვა და ეროზია, ვულკანების აქტიურობა) და განსაკუთრებით, ადამიანის მიერ ამ ელემენტის გამოყენების გამო, სადღეისოდ მსოფლიო ოკეანეში 50 მილიონ ტონამდე ვერცხლისწყალია დაგროვილი. ვერცხლისწყლის გავრცელების ანთროპოგენურ წყაროებს მიეკუთვნება: ქლორის ელექტროქიმიური წარმოება, ვერცხლისწყლის შემცველი პესტიციდების, ფარმაცევტული პრეპარატების, გემების საღებავების, ორგანული სინთეზის კატალიზატორების, ხელსაწყოების და ა.შ. დაშვადება და გამოყენება.

ვერცხლისწყალი უპირატესად წყლის დაბინძურებას იწვევს. ბუნებრივ პირობებში ვერცხლისწყლის ნაერთები, ძირითადად, მდინარეების დანალექებზე აღსორბირდება, საიდანაც შემდგომში ნელ-ნელა თავისუფლდება და წყალში იხსნება. ამგვარად, ასეთი დანალექები ვერცხლისწყლით დაბინძურების მუდმივი წყარო ხდება. თავდაპირველად ეს მძიმე მეტალი წყალში  $Hg^{2+}$ -ის სახით გადადის, ხოლო შემდეგ ანაერობული მიკროორგანიზმების მოქმედებით სწრაფად ურთიერთქმედებს ორგანულ ნივთიერებებთან და ძალზე ტოქსიკურ ნაერთებს — მეთილვერცხლისწყლის კატიონს ( $CH_3-Hg^+$ ) და დიმეთილვერცხლისწყალს ( $CH_3-Hg-CH_3$ ) წარმოქმნის. წყალში კარგი ხსნადობის გამო მეთილვერცხლისწყლის კატიონი ადვილად აღწევს ჰიდრობიონტებში (პლანქტონში, წყალმცენარეებში, მოლუსკებში, თევზებში და სხვ.), საიდანაც კვებით ჯაჭვში ერთვება. მეთილვერცხლისწყალი განსაკუთრებით საშიშია ადამიანისა და ცხოველებისათვის, რადგან იგი სწრაფად ხვდება სისხლში, გადადის ტვინის ქსოვილში, აზიანებს ნათხემსა და თავის ტვინის ქერქს, რაც კლინიკურად გამოიხატება გაშუშებით, ორიენტაციის დაკარგვით, მხედველობის გაუარესებით და სხვა სიმპტომებით. ვერცხლისწყლის ნაერთები უკავშირდებიან სულფჰიდრიდურ და ფოსფატურ ჯგუფებს, რის გამოც იწვევენ უჯრედული მეტაბოლიზმის ზოგიერთი საკვანძო ფერმენტის, მაგ., სუნთქვის პროცესში მონაწილე ციტოქრომოქსიდაზის (EC 1.9.3.1) ინჰიბირებას. გარდა ამისა, ორგანულ ნაერთებში შემავალი ვერცხლისწყალი აზიანებს უჯრედისა და ორგანელების მემბრანებს, ცვლის მათ განვლადობას. ვერცხლისწყლით მოწამვლას ხშირად ლეტალური დასასრული აქვს.

## კადმიუმი (Cd)

კადმიუმი ერთ-ერთი მაღალტოქსიკური მძიმე მეტალია. იგი გამოირჩევა ძალიან მაღალი ძვრადობით და ადვილად აღწევს ორგანიზმში. მეტალურ კადმიუმს იყენებენ ნიკელ-კადმიუმიანი აკუმულატორების, ავტომობილების რადიატორების, ატომური რეაქტორების მარეგულირებელი ღეროების, სარჩილაკებისა და სხვადასხვა შენადნობების დასამზადებლად. კადმიუმორგანული ნაერთები შედის ფოსფორიანი სასუქების, პესტიციდების, ღიზელის საწვავის დანამატების შემადგენლობაში.

კადმიუმის ნაერთები პოლიმერული მასალების კარგი სტაბილიზატორებია. ამ მიზნით მათ ხშირად იყენებენ პოლიენილიქლორიდისაგან პლასტმასების, ლინოლეუმის, ღერმატინის და სხვა ნაკეთობების დამზადებისას. კადმიუმის ბევრი არაორგანული ნაერთი თერმომედეგი პიემენტია (მაგ., კადმიუმის სულფიდი —  $CdS$  — ყვითელია, სელენიდი —  $CdSe$  — წითელი, ოქსიდი და კარბონატი —  $CdO$  და  $CdCO_3$  — თეთრი) და გამოიყენება რუზინის ნაკეთობებისა და ტყავის შესაღებად, ფერადი მინის, ემალისა და მინანქრის დასამზადებლად, ლაქებისა და პოლიგრაფიული საღებავების წარმოებაში და ა.შ. კადმიუმის ტოქსიკურობის გამო გასული საუკუნის 80-იან წლებში საბჭოთა კავშირში სასტიკად აიკრძალა საბავშვო სათამაშოების შესაღებად კადმიუმის შემცველი საღებავების გამოყენება.

გარემოში კადმიუმის ემისიის ძირითადი ანთროპოგენური წყაროებია: თუჯის, ფოლადისა და სხვა შენადნობების წარმოება, საწვავი წიაღისეულისა და ნავის წვა, ღიზელის საწვავით მომუშავე ტრანსპორტის გამონაბოლქვი, თამბაქოს კვამლი, კადმიუმის ნაერთებით მოსარგებლე საწარმოების ჩამდინარე წყლები, კადმიუმის გამორეცხვა სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების ნიადაგებიდან, სადაც გამოიყენებოდა კადმიუმ-შემცველი სასუქები და ა.შ.

ატმოსფეროში მოხვედრის შემდეგ კადმიუმის ნაერთები ძირითადად მტკერის მიკრონაწილაკებს უერთდება და მათთან ერთად აღწევს ადამიანისა და ცხოველის ორგანიზმში ან მცენარეში. კადმიუმიანი მტკერი მშრალი ან სველი დალექვისას მცენარეში ფოთლების კუტიკულიდან შედის, ან ფესვებიდან შეიწოვება ხსნარის სახით. მცენარეში კადმიუმის მაღალი კონცენტრაცია იწვევს ნორმალური ზრდის დათრუნვას, მაგ., კადმიუმის გაელენით პარკოსნებისა და სტაფილოს მოსავლიანობა 50%-ით მცირდება. ბაზილიალური სოკოების ბევრ წარმომადგენელს კადმიუმის დიდი რაოდენობით დაგროვება შეუძლია.

ადამიანის ორგანიზმში კადმიუმი უპირატესად კვებითი ჯაჭვებით ხვდება. კადმიუმი ამცირებს ტრიპსინისა და ჰეპსინის — საჭმლის მომხელელებელი ტრაქტის უმნიშვნელოვანესი ფერმენტების აქტივობას. კადმიუმის ძირითადი ტოქსიკურობა იმაში გამოიხატება, რომ იგი კალციუმის ანტაგონისტია — ორგანიზმში კადმიუმი ჭარბი რაოდენობით დაგროვება კალციუმის დეფიციტს იწვევს. კადმიუმი განსაკუთრებით ტოქსიკურია ახალგაზრდა, მზარდი ორგანიზმისათვის, რომელსაც დიდი მოთხოვნილება აქვს კალციუმზე. ბავშვებსა და მოზარდებში

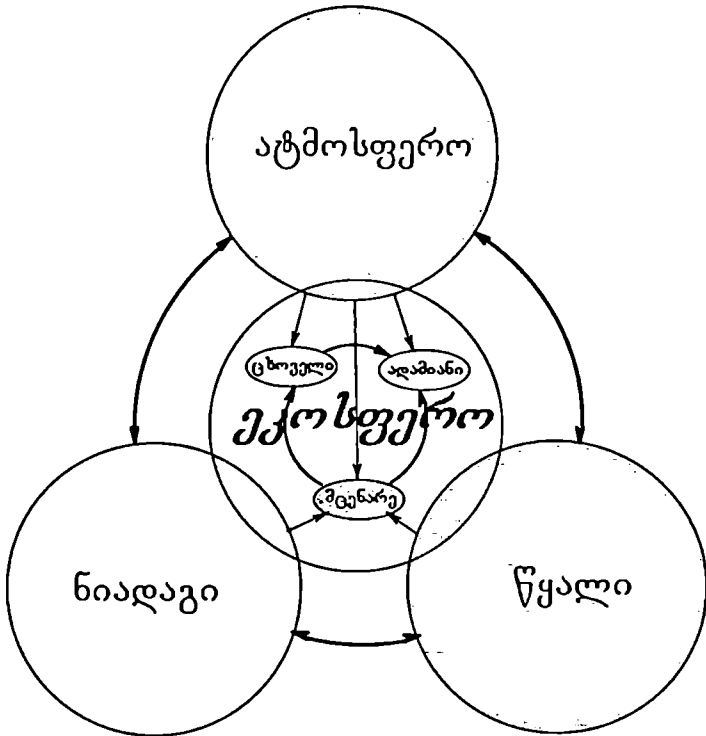
კადმიუმი გროვდება ძვლოვან ქსოვილში, შესაბამისად მცირდება ძვლებში კალციუმის შემცველობა და ამის შედეგად ვითარდება დაავადება “იტაი-იტაი”, რომელიც ძვლების დარბილებითა და გამრუდებით გამოიხატება.

თირკმელებში, ღვიძლსა და შარდის ბუშტში კადმიუმი პეპტიდებს უკავშირდება და წარმოქმნის მეტალოთიონინებს, რომლებიც სხვადასხვა ორგანოებსა და ქსოვილებს შორის კადმიუმის ცვლაში მონაწილეობს. ყველაზე მგრძობიარე კადმიუმის მიმართ თირკმელებია. ამ ორგანოებში კადმიუმი თუთიის ანტაგონისტურ თვისებებს ამჟღავნებს, აინჰიბირებს თუთიის შემცველ ფერმენტებს, რითაც არღვევს თირკმელების ნორმალურ ფუნქციონირებას და იწყება დაავადება პროტეინურია — შარდში ცილის გამოყოფა. ღვიძლში კადმიუმის დამაზიანებელი მოქმედება გამოწვეულია სულფჰიდრილური ჯგუფების შემცველი ფერმენტების ინჰიბირებით.

ზოგიერთ ორგანიზმს, მაგ., წვიმის ჭიებს, კადმიუმის ძალიან სწრაფი დაგროვების უნარი აქვთ, რის გამოც ისინი ხშირად ნიადაგში კადმიუმის ბიონდიკაციისათვის გამოიყენება.

## 2. ბუნებაში ტოქსიკური ნაერთების მიმოქცევა

ბუნებაში ტოქსიკური ნაერთების მიმოქცევა შეიძლება წარმოვიდგინოთ მარტივი, მაგრამ მეტად ინფორმაციული სქემის სახით, რომელიც თანამედროვე ეკოლოგიური ქიმიის ერთ-ერთი ფუძემდებლის, გერმანელი პროფ. ფ. კორტეს მიერ არის შემოთავაზებული (ნახ.2.1).



ნახ. 2.1. ბუნებაში ტოქსიკური ნაერთების მიმოქცევა.

პრაქტიკულად ყველა ტოქსიკურ ნაერთს ახასიათებს ფუგიტიურობა — ნივთიერების სწრაფვა, გასცდეს იმ არის საზღვრებს, რომელშიც იგი გამოიყენეს (შეიტანეს, დაასხურეს, მიმოაფრქვიეს და ა.შ.). სწორედ ფუგიტიურობა წარმოადგენს ტოქსიკანტების იმ უმნიშვნელოვანეს თვისებას, რაც გარემოში მათი გაერცელების ტენდენციას განსაზღვრავს და რის გამოც ხდება ბიოსფეროს დაბინძურება.

ტოქსიკური ნაერთების ფუგიტიურობის შედეგი, პირველ რიგში, არის მათი გავრცელება ცალკეული ეკოსისტემის შიგნით, შემდეგ კი ერთი ეკოსისტემიდან მეორეში მიგრაცია. ტოქსიკური ნაერთების მიგრაცია რთული, მრავალსაფეხურებიანი პროცესია, რომელიც გამოწვეულია მთელი რიგი ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური ფაქტორებით, კერძოდ:

- ტოქსიკანტების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით — მოლეკულური მასით, წყალში ხსნადობით, ჰიდროფობულობით (ეს მახასიათებელი რაოდენობრივად ფასდება არაპოლარულ და პოლარულ გამხსნელებს — *n*-ოქტანოლსა და წყალს შორის ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტით, რომელიც  $K_{ow}$ -ით აღინიშნება); აქროლადობით (რომელსაც ორთქლის კუთრი წნევა განსაზღვრავს), ქიმიურად აქტიური ფუნქციური ჯგუფების არსებობით და ა.შ.;
- ფიზიკური პროცესებით — ადსორბციით, დესორბციით, დიფუზიით, კონვექციით, დისპერსიით, მშრალი და სველი დალექვით, რომელთა საშუალებითაც ხორციელდება ნივთიერებების გადატანა, ემისია (გავრცელება) და ცალკეულ ფაზაში შეკავება;
- ქიმიური პროცესებით — ჟანგვით, აღდგენით, ჰიდროლიზით, ფოტოლიზით, ბუნებრივ ნაერთებთან ტოქსიკანტების ან მათი წარმოებულების კონიუგაციით და ა.შ.;
- ბიოლოგიური პროცესებით, რომლებიც მონაწილეობენ ბუნებაში ნივთიერებების წრებრუნვაში. მათ მიეკუთვნება: ბიოკონცენტრირება, ბიოაუგმენტაცია, ბიოაკუმულაცია, ბიოტრანსფორმაცია, ბიოდეგრადაცია, ნივთიერებების ბიოტური გადატანა და ა.შ.;
- გეოგრაფიული პროცესებით, რომლებითაც ხორციელდება ნივთიერებების გლობალურად გადატანა და ცირკულაცია ატმოსფეროში (ქარები, ნალექები), ოკეანეში (დინებები), მდინარეებში და ა.შ.

ეკოსისტემაში ტოქსიკური ნაერთის გავრცელების პირველ სტადიაზე ნივთიერება იმ არის საზღვრებიდან გამოდის, რომელშიც ის კონკრეტულად გამოიყენეს. ამ პროცესის სიჩქარე, პირველ რიგში, დამოკიდებულია ამა თუ იმ ობიექტის ტოქსიკანტით დამუშავების კონკრეტულ ტექნოლოგიაზე (მაგ., პესტიციდის გამოყენების შემთხვევაში დიდი მნიშვნელობა აქვს, როგორ ხდებოდა მისი მოსხურება — უშუალოდ დედამიწიდან თუ თვითმფრინავიდან). ტოქსიკანტის ემისიის დონე ბევრადაა დამოკიდებული იმაზეც, თუ რამდენად ღიაა ის სისტემა, რომელშიც პირველად მოხდა ტოქსიკანტის შეტანა, რამდენად მოქმედებენ ამ სისტემაზე ატმოსფერული ნალექები, ქარები, წყლის დინებები და სხვა გეოგრაფიული ფაქტორები.

გამოყენების ლოკალური უბნიდან გამოსვლის სტადიის შემდეგ ტოქსიკური ნივთიერება მიმდებარე ეკოსისტემებში არაერთგვაროვნად ნაწილდება. ტოქსიკანტების განაწილების უმნიშვნელოვანესი ეტაპია ნივთიერებების აბიოტური და ბიოტური გადატანა ნიადაგს, წყალსა და ჰაერს შორის.



## 2.1 ტოქსიკური ნაერთების გავრცელება ნიადაგში

ძირითადი პროცესები, რომლებიც ნიადაგისა და წყლების დაბინძურებას იწვევს, ამ ეკოსისტემების ფაზების გამყოფ ზედაპირზე მიმდინარეობს. ტოქსიკური ნაერთების ნიადაგში მოხვედრისა და გავრცელების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორია წყალი — წვიმისა და ხელოვნური მორწყვის სახით. წყალი ნიადაგის ზედაპირიდან სიღრმეში ჩადინებისას თან წარიტაცებს გახსნილ ან სუსპენზირებულ ტოქსიკურ ნაერთებს, რის შედეგადაც ბინძურდება მიწისქვეშა წყლები, ხშირად სასმელი წყალიც.

ნიადაგის ქიმიური დაბინძურების დროს ტოქსიკანტის გავრცელების ხარისხს, პირველ რიგში, ადსორბციული პროცესები განსაზღვრავს. ნიადაგში მოხვედრილი ტოქსიკანტი, როგორც წესი, არათანაბრად ნაწილდება, რადგან ნიადაგის შემადგენელი კომპონენტები სხვადასხვა ადსორბციული თვისებებით ხასიათდება. ტოქსიკური ნაერთის სორბცია ძირითადად ნიადაგის ლიპოფილური ორგანული მატერიის და მინერალური კომპონენტების (ძირითადად თიხის სახით) მიერ ხდება. ადგილი აქვს აგრეთვე ტოქსიკანტის კოალენტურად დაკავშირებას ჰუმინურ კომპონენტთან. ადსორბცია შექცევადია, მაგრამ არასრულად, ვინაიდან ადსორბციის საპირისპირო პროცესი — დესორბცია, რომელიც მარილების ხსნარების საშუალებით მიმდინარეობს, მთლიანად ვერ ათავისუფლებს ნიადაგის ჰუმინურ ფრაქციასთან დაკავშირებულ ტოქსიკანტებს. დესორბციას ხელს უშლის აგრეთვე ტოქსიკანტების მოლეკულების ჩაშენება იმ ღრუებსა და თავისუფალ სივრცეებში, რომლებიც თიხის შრეების სტრუქტურაში ან ჰუმინური მაკრომოლეკულების შიგნით არსებობს.

ადსორბცია მნიშვნელოვნად ანელებს გახსნილი ქიმიური ნაერთების მასის გადატანას, რომელიც ტოქსიკანტების ნიადაგში მიგრაციის ძირითადი მამოძრავებელი ძალაა. ეს პროცესი მიმდინარეობს ნივთიერებების დიფუზიით, კონვექციითა და დისპერსიით.

მასის დიფუზიური გადატანა წარმოადგენს ნივთიერებების სტრუქტურული ნაწილაკების (მოლეკულების, ატომების ან იონების) თავისუფალ გადაადგილებას კონცენტრაციული გრადიენტის მიმართულებით, რომელიც ბროუნის სითბური მოძრაობის შედეგად ხორციელდება. ამ პროცესის ინტენსივობა არაა დამოკიდებული წყლის დინების სიჩქარეზე და განისაზღვრება შემდეგი პარამეტრებით:

- ნიადაგის ფორიანობით (ფორების ზომითა და რაოდენობით);
- დიფუნდირებული ნივთიერებების მოლეკულური თვისებებით (მოლეკულური მასით, მოლური მოცულობით);
- ნიადაგსა და წყალს შორის ნივთიერებათა კონცენტრაციების სხვაობით (კონცენტრაციული გრადიენტის ვექტორის მნიშვნელობით) და სხვ.

დიფუზიის შემაფერხებელი ფაქტორებია ნიადაგის მაღალი ფორიანობა, მოლეკულათა დიდი ზომები, კონცენტრაციული გრადიენტის დაბალი ძალა და

სხვ. ამ ფაქტორების ჯამი შეადგენს ე.წ. იმპედანსს, რომლის სიდიდე გვიჩვენებს ნიადაგსა და წყალში დიფუზიის სიჩქარეების თანაფარდობას.

დიფუზიასთან ერთად, ძალიან მნიშვნელოვანი ფაქტორია გახსნილი ნოეთიერებების წარტაცება წყლის ნაკადით. ნოეთიერების ასეთ იძულებით გადაადგილებას მასის კონვექციული გადატანა ეწოდება. კონვექციის სიჩქარე დამოკიდებულია წყლის ნაკადის მოცულობასა და გახსნილი ნოეთიერებების კონცენტრაციაზე.

ნიადაგის ფორების არაერთგვარონების გამო ნიადაგის სხვადასხვა უბნებში წყალში გახსნილი ნოეთიერების კონცენტრაციები განსხვავებულია, რაც დისპერსიას, ანუ მასის არათანაბრად გადატანას განაპირობებს. დისპერსია საკმაოდ მნიშვნელოვანი ფაქტორია ნიადაგიდან გრუნტის წყლებში ქიმიური ნაერთების გადატანისას.

ნიადაგში მასის გადატანა უფრო რთული პროცესებიათაღ მიმდინარეობს, რომლებიც ნიადაგის კომპლექსური სტრუქტურის მრავალ პარამეტრზეა დამოკიდებული. მაგ.: მიწის ზედაპირიდან წყლის აორთქლება იწვევს ნიადაგის სიღრმიდან ზედაპირისაკენ წყლის ამოქაჩვას. ეს წყალი კონვექციურად წარიტაცებს ტოქსიკურ ნაერთს და მის გადატანას ახდენს. ასეთივე მაგალითია ნაერთების გადატანა ნიადაგის მაკროფორებში (ბზარებში, წვიმის ჭიების მიერ გაკეთებულ ხერელებში და სხვ.) ჩანადენი წყლით.

ნიადაგიდან წყალში ტოქსიკური ნაერთების მიგრაციის პროცესის განხილვისას გასათვალისწინებელია, რომ უმეტეს შემთხვევაში ტოქსიკანტებს თან ახლავთ მათი ნაწილობრივი გარდაქმნის პროდუქტები. ისინი წარმოიქმნება ნიადაგის მიკროორგანიზმების უჯრედული და არაუჯრედული ფერმენტების, აგრეთვე, ფესვთა სისტემის ექსუდატების ფერმენტების მოქმედების შედეგად. ტოქსიკანტების გარდაქმნები შეიძლება აგრეთვე ხორციელდებოდეს აბიოტური რეაქციების ხარჯზეც, რომლებიც მიმდინარეობს მზის სხივების ზემოქმედებით, ჰაერის ჟანგბადისა და წყლით მონაწილეობით ასეთი გარდაქმნებისას დიდი მნიშვნელობა აქვს ნიადაგის მინერალურ ნაერთებს (მაგ., რკინის, ალუმინისა და სხვა მეტალთა ოქსიდებს), რომლებიც კატალიზატორების როლს ასრულებენ.

ნიადაგში ლოკალური დაბინძურება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ნარჩუნდება. ამის მიზეზი შეიძლება იყოს არამარტო ნიადაგის მაღალი ადსორბციული უნარი, არამედ თვით ტოქსიკანტების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებიც, განსაკუთრებით მათი ხსნადობა და მაღალი მდგრადობა გარემო პირობების მიმართ.

ნიადაგის მიერ ტოქსიკური ნაერთების დაკავშირება ხორციელდება როგორც არაორგანული ნაწილით, ასევე მისი ორგანული მატერიით. მაგ., ნაჩვენებია, რომ ნიადაგში შეტანილი პესტიციდის — ამიბენის 29% ჰუმუსს უკავშირდება, ხოლო 9% — თიხით შთანთქმება. მინერალებიდან ყველაზე ძლიერი ადსორბენტი თიხებია, რომელთა ადსორბციის უნარი იზრდება შემდეგი თანმიმდევრობით:

ილიტი < ბენტონიტი < კაოლინი.

ტოქსიკანტები, აღსორბციის გარდა, ჰუმუსის მასას წყალბადური და კოვალენტური ბმებითაც უკავშირდება. ჰუმუსთან დაკავშირება ძირითადად ტოქსიკანტების პოლარული ფუნქციური ჯგუფების (ჰიდროქსილის, ამინის, კარბონილის, კარბოქსილის და სხვ.) ხარჯზე წარმოებს. ეს ჯგუფები, ერთი მხრივ, ზრდიან ტოქსიკანტების მოლეკულების პოლარობას და ამით ხელს უწყობენ წყალბადური ბმებისა და ვან-დერ-ვაალსის მიზიდულობის ძალების წარმოქმნას ტოქსიკური ნაერთისა და ნიადაგის ორგანულ მატერიას შორის, ხოლო მეორე მხრივ, განაპირობებენ ტოქსიკანტის კოვალენტურად დაკავშირებას ჰუმუსის კომპონენტებთან, მაგ., ჰუმინისა და ფულვო-მჟავებთან. ნიადაგთან დაკავშირებული ტოქსიკანტების გამოთავისუფლება ელუციის ან ჰიდროლიზის მეშვეობით ძალიან ნელა მიმდინარეობს, ამიტომ ნიადაგი, როგორც წესი, ხანგრძლივი დროის განმავლობაში რჩება დაბინძურებული.

ნიადაგის დაბინძურების ხანგრძლივობის კიდევ ერთი მიზეზია ტოქსიკანტის ქიმიური სტაბილურობა. ტოქსიკანტების მდგრადობა ბევრადაა დამოკიდებული მათ ქიმიურ სტრუქტურაზე. დადგენილია, რომ ალიფატური ნახშირწყალბადების მდგრადობა იზრდება ნაჯერობისა და ჯაჭვების განტოტვის ხარისხის მატებასთან ერთად. არომატული ნახშირწყალბადები გარდაქმნებისადმი უფრო მდგრადია, ვიდრე ალიფატური, ამასთან, არომატულ ბირთვში ჩანაცვლებული ჯგუფების რაოდენობის გაზრდით ნაერთის სტაბილურობაც მატულობს. ყველაზე მაღალი სტაბილურობით გამოირჩევა ჰალოგენირებული არომატული ნახშირწყალბადები, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ჩამნაცვლებლები ქლორისა და ფტორის ატომებია.

გარემო პირობების მიმართ ტოქსიკური ნაერთების მდგრადობას, ანუ პერსისტენტულობას, საზღვრავენ იმ დროის ხანგრძლივობით, რომლის განმავლობაშიც ტოქსიკანტის მთელი რაოდენობის 95% გარდაიქმნება. გარემოს დამბინძურებლებს შორის ეკოლოგები გამოყოფენ განსაკუთრებით მაღალი სტაბილურობის მქონე, ე.წ. მდგრად, ანუ პერსისტენტულ ორგანულ დამბინძურებლებს (Persistent Organic Pollutant — POPs), რომლებსაც მიეკუთვნება: დიოქსინები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, ქლორორგანული პესტიციდების უმრავლესობა (აღდრინი, დიელდრინი, ენდრინი, ქლორდანი, ლინდანი, ჰექტაქლორი, ჰექსაქლორბენზოლი, მირექსი, ტოქსაფენი, DDT და სხვ.), პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები და სხვ. 95%-იანი დაშლის პერიოდი დიოქსინებისათვის 14—15 წელია, პოლიქლორირებული ბიფენილებისათვის — 10—12 წელი, DDT-სათვის — 4 წელი, ჰექტაქლორისათვის — 3.5 წელი, ლინდანისათვის — 3 წელი და ა.შ. ფართოდ გავრცელებული სიმეტრიული ტრიაზინების კლასის პესტიციდები (სიმაზინი, ატრაზინი, პრომეტრინი) ნიადაგში ორ წელზე მეტს ძლებს, კარბამატები — რამდენიმე თვიდან 1 წლამდე, ხოლო ფოსფორორგანული ინსექტიციდები (ქლოროფოსი, მეტაფოსი და სხვ.) და ფენოქსიმამრმჟავას წარმოებულები — 2,4-D, 2,4,5-T და სხვები რამდენიმე თვეში იშლებიან.

ნიადაგში ტოქსიკანტების დეგრადაცია შეიძლება განხორციელდეს როგორც აბიოტურად, ასევე ბიოტურადც. აბიოტური გარდაქმნები წარმოადგენენ ფოტოქიმიურ და ქიმიურ ჟანგვა-აღდგენით რეაქციებს, აგრეთვე ტოქსიკანტების პიდროლიზურ დაშლას. ამ რეაქციებში მონაწილეობენ ნიადაგის ორგანული ნივთიერებები, მეტალთა ოქსიდები და მინერალები. მაგ., ნიადაგში აბიოტურად მიმდინარეობს: ინსექტიციდების — ლინდანისა და DDT-ს აღდგენითი დეჰიდროქლორირება, პარათიონისა და პენტაქლორნიტრობენზოლის ნიტრო-ჯგუფების ამინო-ჯგუფებამდე აღდგენა, ფოსფორორგანული ინსექტიციდების პიდროლიზი და სხვა პროცესები. ტოქსიკური ორგანული ნაერთების სრული დეგრადაციის ძირითადი გზა მათი ბიოლოგიური მინერალიზაციაა, ე.ი. როდესაც ორგანული ნაერთების დაშლის პროდუქტებს წარმოადგენენ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$  და სხვა არაორგანული ნივთიერებები. ასეთი დეგრადაცია ხორციელდება მიკროორგანიზმებით, რომლებიც ტოქსიკურ ნაერთებს ნახშირბადის, აზოტის ან ფოსფორის ერთადერთ წყაროდ იყენებენ.

ტოქსიკანტების მიკრობიოლოგიური დაშლის სიჩქარე დამოკიდებულია მთელ რიგ ფაქტორებზე, როგორებიცაა: ნიადაგში ჟანგბადის კონცენტრაცია, ტემპერატურა, ნიადაგის pH, არაორგანული და ორგანული საკვები ნივთიერებების არსებობა, შესაბამისი მიკროფლორა და სხვ. ჩამოთვლილი ფაქტორებიდან ყველაზე მეტად მნიშვნელოვანია ჟანგბადის შემცველობა, რომელიც ალიმიტირებს როგორც აერობული, ასევე ანაერობული მიკროორგანიზმების გამრავლების ინტენსივობას.

უმეტეს შემთხვევაში POPs-ის მინერალიზაცია ანაერობული და აერობული მიკროორგანიზმების განსაზღვრული თანმიმდევრობით მოქმედებას საჭიროებს. როგორც წესი, თავდაპირველად აუცილებელია ქლორის ატომების მოხლეჩა, ან პიდროქსილის რადიკალებით მათი ჩანაცვლება. ასეთი გარდაქმნები უპირატესად ჟანგბადით ღარიბ ნიადაგში, ანაერობული მიკროორგანიზმებით ხორციელდება. ანაერობული პროცესის შედეგად ტოქსიკანტისაგან რჩება არომატული ბირთვი, რომელიც ხელმისაწვდომი ხდება აერობული მიკროორგანიზმების არაუჯრდელი ოქსიდაზებისათვის (პეროქსიდაზები, ლაკაზები, ლიგინაზები და სხვ.), რომლებიც არომატული ბირთვის ჟანგვით გახლეჩას აწარმოებენ. ცხადია, POPs-ის დაშლისათვის ხელსაყრელი პირობები — ნიადაგში მიკროორგანიზმების ანაერობული და აერობული ფორმების მონაცვლეობითი მოქმედება — მხოლოდ იშვიათ შემთხვევაში შეიძლება შეიქმნას. სწორედ ეს უნდა განაპირობებდეს ქლორორგანული ტოქსიკანტების განსაკუთრებით მაღალ მდგრადობას ნებისმიერ ეკოლოგიურ ნიშში.

## 2.2 ტოქსიკური ნაერთები წყალში

წყლიან გარემოში ქიმიური დამბინძურებლების დიფუზია საკმაოდ სწრაფად მიმდინარეობს, ამიტომ ტოქსიკანტი მასში სწრაფად ვრცელდება და ზაფხულს, რის შედეგადაც დაბინძურებას განიცდის არამარტო ცალკეული წყალსაცავები ან მდინარეების მონაკვეთები, სადაც დაბინძურებული წყლები ჩაედინება, არამედ საბოლოოდ ზღვები და ოკეანეებიც. ზღვის ეკოსისტემებს განსაკუთრებით საგრძნობ ზარალს აყენებს ნავთობის ნახშირწყლებით დაბინძურება. გასული საუკუნის შუა წლებში ცნობილი ნორვეგიელი მეცნიერი, მოგზაური და მწერალი ტურ ჰეიერდალი “კონ-ტიკით” წყნარ ოკეანეში მოგზაურობის შემდეგ წერდა, რომ გაოცებული დარჩა შუა ოკეანეში ნავთობის უამრავი ლაქის არსებობით. სწორედ ნორვეგიელი სწავლული გახდა პირველი, ვინც ნავთობით დაბინძურების პრობლემებზე გაამახვილა საზოგადოების ყურადღება.

სადღეისოდ, აშშ-ს ეროვნული მეცნიერებათა აკადემიის მონაცემების მიხედვით, მსოფლიო ოკეანეში ერთ წელიწადში საშუალოდ 1.3 მილიონი ტონა ნავთობი და ნავთობპროდუქტები ხვდება. გარემოში ნავთობი შემდეგი გზებით ვრცელდება:

- ოკეანეში მოხვედრილი ნავთობის საერთო რაოდენობის თითქმის ნახევარი ბუნებრივად გაიჟონება წყალქვეშა შლიეფებიდან; ამას ემატება ღია ოკეანეში ჩატარებული ნავთობ-მოპოვებითი სამუშაოების, კერძოდ, ჭაბურღილების ბურღვის დროს ნავთობის დანაკარგები.
- ნავთობის დიდი რაოდენობა ოკეანეში ვრცელდება საზღვაო ტანკერებში ნავთობის ჩატვირთვისა და გადმოტვირთვის ოპერაციების შედეგად. ნავსადგურში ნავთობის დაცლის შემდეგ ტანკერს ავსებენ ზღვის წყლით, რომელიც ბალასტის როლს ასრულებს გემის ბალანსირებისათვის უკან დაბრუნების დროს. ცხადია, გადმოტვირთვის შემდეგ ტანკერის რეზერვუარში რჩება ნავთობის გარკვეული ნაწილი, რომელიც ტანკერის გზაში ყოფნის დროს ბალასტურ წყალს ერევა და მასთან ემულსიას ქმნის. როდესაც ტანკერი ნავთობის ახალი პარტიის ჩასატვირთად ნავსადგურს უბრუნდება, ბალასტი, ნავთობის ემულსიასთან ერთად, ნაპირთან ახლოს, ღია ზღვაში იღვრება.
- ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების მნიშვნელოვანი რაოდენობა იღვრება გარემოში ტანკების, ცისტერნებისა და სხვა რეზერვუარების გაწმენდისა და გამორეცხვისას.
- ტანკერების ავარიები ხშირად ხდება ოკეანეში ნავთობის დიდი რაოდენობით დაღვრის მიზეზი, რასაც უამრავი ფაქტი ადასტურებს. მაგ., 2002 წლის ნოემბერში ბისკაის ყურეში ტანკერ “პრესტიჟის” ავარიის შედეგად ოკეანეში დაახლოებით 40 ათასი ტონა ნედლი ნავთობი დაიდგარა.
- ნავთობსადენებიდან გაჟონილი ან ავარიის შედეგად დაღვრილი ნავთობი, სი-

ბლანტის მიუხედავად, ღრმად ჩადის ნიადაგში, აღწევს გრუნტის წყლებს და საბოლოოდ მსოფლიო ოკეანეში ხვდება.

- ნედლი ნაუთობის გადამუშავების ნარჩენები და ნაუთობპროდუქტები სწრაფად ვრცელდება ჩამდინარე და გრუნტის წყლებით, აგრეთვე მდინარეებით.
- თვითმფრინავების მიერ ოკეანეში საწვავის დაღერა — არცთუ იშვიათია ისეთი შემთხვევა, როდესაც მფრინავები დაშვების წინ ოკეანეში ღვრიან დიდი რაოდენობით ზედმეტ საწვავს, რათა შეამსუბუქონ თვითმფრინავი და გაიადვილონ დაჯდომა. ამით განსაკუთრებით ხშირად სამხედრო თვითმფრინავები სარგებლობენ ავიაშვიდზე დაფრენის წინ.

ნედლი ნაუთობი შეიცავს ასამდე სხვადასხვა ქიმიურ კომპონენტს, რომელთა ქიმიური შემცველობა ფართო საზღვრებში მერყეობს და ძირითადად ნაუთობის საბადოს ადგილსამყოფელზეა დამოკიდებული. ნაუთობის დაახლოებით 75%-ს ნახშირწყალბადები შეადგენს, ხოლო დანარჩენი ნაწილი წარმოადგენს ნახშირწყალბადების წარმოებულებს, რომლებიც შეიცავენ გოგირდს, აზოტსა და ჟანგბადს. ნაუთობის ნახშირწყალბადები შედგება ალკანების, ციკლოპარაფინების (ნაფთენების), არომატული და ნაფთენო-არომატული ნახშირწყალბადებისაგან.

ნაუთობის მასის საშუალოდ 10—30%-ს პარაფინები შეადგენენ. ნაუთობის *n*-პარაფინების ჯაჭვის სიგრძემ შეიძლება ნახშირბადის 43 ატომს მიაღწიოს. ასეთია *n*-ტრიტეტრაკონტანი —  $C_{43}H_{88}$ . უფრო ხშირად გვხვდება  $C_6-C_{25}$  ალკანების განშტოებულ-ჯაჭვიანი იზომერები, რომლებიც ძირითადად ერთ- და ორნახშირბადიან გვერდით რადიკალებს შეიცავენ.

ნაფთენები ნაუთობში 30—60%-ს წარმოადგენენ. მათი უმრავლესობა მონოციკლურია (მაგ., ციკლოპენტანი და ციკლოჰექსანი), მაგრამ ცალკეული სახის ნედლ ნაუთობში პოლიციკლური ნაფთენებიც გვხვდება.

ბენზოლისა და ნაფტალინის რიგის ნახშირწყალბადები ნაუთობში წარმოდგენილია 5%-მდე (მასის მიხედვით), დაახლოებით ასეთივე მასური წილი აქვთ პოლიციკლურ არომატულ ნახშირწყალბადებსაც, რომლებიც ნაუთობის მაღალმდუღარე (240—400°C) ფრაქციის ძირითად ნაწილს შეადგენენ. ნაფთენო-არომატული ნახშირწყალბადები, რომლებიც გაკერებულ და არომატულ ციკლებს შეიცავენ, ნაუთობში წარმოდგენილი არიან  $C_9-C_{25}$  ნახშირწყალბადების სახით და საერთო მასის 5—30%-ს შეადგენენ. ნაუთობის ე.წ. “ნარჩენი” ფრაქცია, რომლის დუდილის ტემპერატურაა 400°C, შედგება კონდენსირებული ჰეტეროციკლური ბირთვებისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია მოკლე *n*-პარაფინების ჯაჭვებით. ამ ფრაქციას პიროლიზურ ფისსაც უწოდებენ.

ოკეანეში მოხვედრის შემდეგ ნაუთობი იწყებს გადაადგილებას ქარის, ზღვის დინებების, მიქცევის და მოქცევის გავლენით. ჰიდროფობულობის და დაბალი სიმკვრივის გამო ნაუთობი წყლის ზედაპირზე წარმოქმნის თხელ აფსკს ლაქების სახით ნაუთობის ყველა სახეობა შეიცავს დაბალ-მდუღარე კომპონენტებს, რომლებიც სწრაფად ორთქლდებიან. რამდენიმე დღის განმავლობაში ნაუთობის ლაქის

დაახლოებით მეოთხედი აორთქლების შედეგად ქრება. გარდა ამისა, დაბალმოლეკულური კომპონენტების ნაწილი წყალში იხსნება და ამ გზით გამოეყოფა ნავთობის ლაქებს. ამასთან, არომატული ნახშირწყალბადები უფრო მაღალი ხსნადობით ხასიათდებიან, ვიდრე *n*-პარაფინები. ამ პროცესების შედეგად ნავთობის ლაქაში მხოლოდ ძნელად აქროლადი კომპონენტები რჩება. ისინი ერთდებიან გროვებად, რომლებიც თანდათან ფსკერზე ილექებიან, ან ფისოვანი ბურთულების სახით დაცურავენ წყლის ზედაპირზე და საბოლოოდ ზღვებისა და ოკეანეების სანაპირო ზონებში გამოირიყებიან. ოკეანეების ეკოსისტემაზე ნავთობში შემცველი კომპონენტების მოქმედება ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში მიმდინარეობს. ნავთობის მცირე რაოდენობაც საკმარისია, რომ სერიოზულად დაირღვეს ზღვებისა და ოკეანეების უნიკალური და მრავალფეროვანი ცოცხალი სამყარო. ცნობილია, რომ ნავთობის ერთი მეგილიონედი მასური წილი ნავთობის შემცველობის დროსაც კი წყალი სასმელად უვარგისი ხდება. ნავთობის ლაქები წყლის ზედაპირზე დროთა განმავლობაში წარმოქმნიან ნავთობისა და წყლის შემცველ ემულსიურ ფენას, რომელიც ნაწილობრივ აფერხებს აირების მიმოცვლას წყალსა და ჰაერს შორის. ყველა ცოცხალი ორგანიზმი ასეთი ფენის ქვეშ ანაერობულ პირობებში იმყოფება და იგუდება. სუნთქვისას მათ უჯრედებში გროვდება CO<sub>2</sub>, რაც იწვევს აციდოზს, ანუ უჯრედული სითხის შემუავებას.

ცოცხალი ორგანიზმების ნავთობით ან ნავთობპროდუქტებით შემოგარსვის ეფექტი ამ ტიპის დაბინძურების ყველაზე მკვეთრ შედეგია. ზღვის მოქცევის ზონაში უამრავი მცენარე, პლანქტონი და ფრინველი ნავთობპროდუქტებით შემოიგარსება და ამ მიზეზით იღუპება. ოკეანეში დაღვრილი ნავთობი განსაკუთრებით დიდ ზიანს ფრინველებს აყენებს. ნავთობით ფრინველების ფრთების დაფარვა, რასაც “ნავთობის ჭირს” უწოდებენ, პრაქტიკულად ყოველთვის იწვევს ფრინველის დაღუპვას, რადგან ასეთ მდგომარეობაში ფრინველს უჭირს ფრენა, ირღვევა სითბოიზოლაცია და ხდება ორგანიზმის გადაცივება. დაღუპვის მიზეზი შეიძლება აგრეთვე გახდეს ნავთობის კომპონენტებით მონამვლა, როდესაც ფრთების გაწმენდის მცდელობის დროს ფრინველები უნებლიედ ყლაპავენ ნავთობს. გარდა ამისა, კვერცხებზე ნავთობის მოხვედრისას ნადგურდება ემბრიონები.

ნავთობის ლაქის შემადგენლობა მუდმივად იცვლება მისი კომპონენტების დაშლისა და ტრანსფორმაციის გამო. ნავთობის ნახშირწყალბადებმა შეიძლება განიცადონ ნაწილობრივი დეგრადაცია ქიმიური ჟანგვისა და ფოტოჟანგვის შედეგად, მაგრამ მათ სრულ დაშლას ძირითადად მიკროორგანიზმები აწარმოებენ. არც ერთ ტაქსონომიურ ჯგუფში არ არსებობს მიკროორგანიზმების ისეთი უნიკერსალური სახეობა, რომელსაც ნედლი ნავთობის ყველა კომპონენტების ასიმილირება შეუძლია. პარაფინები მიკრობიოლოგიურ დესტრუქციას გაცილებით ადვილად განიცდიან, ვიდრე ციკლოპარაფინური და არომატული ნახშირწყალბადები. მიკროორგანიზმების ცალკეული შტამების მოქმედება ხასიათდება გარკვეული სელექტიურობით, ამიტომ ნავთობის კომპონენტების სრული დე-

სტრუქციისათვის საჭიროა მიკროორგანიზმების სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების წარმომადგენლების მთელი კონსორციუმის მონაწილეობა, რაც ზღვის მარილიან წყალში პრაქტიკულად განუხორციელებადია. ნათობის ნახშირწყალბადების ბაქტერიული დაშლის შედეგად უფრო ხშირად წარმოიქმნება დაბალმოლეკულური შუალედური პროდუქტები, რომლებიც ნახშირწყალბადებთან შედარებით წყალში უკეთესად იხსნებიან. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგიერთი მათგანი (სპირტები, ალდეჰიდები და სხვ.) მაღალი ტოქსიკურობით ხასიათდება, ამიტომ ასეთი ნაერთები გარკვეულ საფრთხეს უქმნიან ზღვის ორგანიზმებს. ნათობის მიკრობიოლოგიური დაშლის პროცესებზე გაუღენას ახდენენ ტემპერატურა, წყალში ჟანგბადის პარციალური წნევა და ა.შ. გამოანგარიშებულია, რომ 1 ლ ნედლი ნათობის სრული ჟანგვისათვის საჭიროა იმდენი ჟანგბადი, რამდენსაც 375 ტონა ზღვის წყალი შეიცავს.

ნათობს ცოცხალი ორგანიზმისთვის ზიანის მოტანა არა მარტო უშუალო კონტაქტის დროს შეუძლია. განსაკუთრებით სახიფათოა წყალში თითქოს უმნიშვნელო რაოდენობით გახსნილი არომატული და პოლიციკლური ნახშირწყალბადები, რომლებიც მაღალი ლიპოფილურობის გამო ადვილად აღწევენ წყლის ბინადართა ორგანიზმში. უნდა აღინიშნოს, რომ ძალიან დაბალი ( $10^{-7}\%$  რიგის) კონცენტრაციისას ეს ტოქსიკანტები ზღვის ორგანიზმებში არასასურველ ცელილებებს იწვევენ;  $10^{-6}$ – $10^{-5}\%$  რიგის კონცენტრაციების დროს გამოიხატება მათი ფიზიოლოგიური აქტივობის დაქვეითება;  $10^{-4}$ – $10^{-2}\%$  კონცენტრაციები ლეტალურ დოზას წარმოადგენს მატლების, ჭუპრების, თაეკომბალების, ლავრების, ლიფსიტების, ზღვის უხერხემლოების, ხამანწყების, კრევეტების, ლოკოკინებისა და თევზებისათვის;  $10^{-2}$ – $10^{-1}\%$  კონცენტრაციას კი მხოლოდ ზოგიერთი ზღვის მცენარე უძლებს.

## 2.3 ტოქსიკური ნაერთების გავრცელება კაერში

ატმოსფეროში ტოქსიკური ნაერთები შეიძლება გაერცელდნენ როგორც უშუალოდ ემისიის წყაროდან, ასევე დაბინძურებული ნიადაგიდან ან წყლიდან. ამ დროს დიდი მნიშვნელობა ენიჭება იმ წონასწორულ პროცესებს, რომლებიც ჰაერისა და წყლის, ან ჰაერისა და ნიადაგის ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე აღიძვრება. ეს პროცესები დინამიკურია და ორივე მიმართულებით მიმდინარეობს. ორივე პროცესი — როგორც მყარი ან თხევადი ფაზიდან ქიმიური ნაერთის ჰაერში გადასვლა (აქროლება), ისე მისი საპირისპირო მიმართულებით გადატანა (ე.წ. შმრალი დაღეჟვა) — დიფუზიის შედეგია და ერთი და იგივე კანონზომიერებებს ემორჩილება.

დიფუზიური ბუნების გამო ჰაერისა და წყლის გამყოფი ზედაპირის პერპენდიკულარული მიმართულებით ნოეთიერების გადატანის სიჩქარე კონცენტ-



რაციული გრადიენტის, ანუ ფაზებში ამ ნივთიერების კონცენტრაციებს შორის სხვაობის პირდაპირპროპორციულია. ცხადია, ამ დროს ნივთიერების ნაკადი მაღალი კონცენტრაციიდან დაბლისაკენ არის მიმართული. წყლის ქიმიური დაბინძურების შემთხვევაში ტოქსიკანტის გადაადგილება მუდმივად ჰაერის მიმართულებით ხდება, რადგან ჰაერი წყალთან შედარებით უფრო ღია სისტემაა, და შესაბამისად, მასში გადატანილი ტოქსიკური ნაერთი სწრაფად განზავდება. ამიტომ ბუნებრივ პირობებში აირად ფაზაში მყოფი ნაერთების კონცენტრაცია ყოველთვის უფრო დაბალია, ვიდრე წყალში. ამ დროს ხსნარში ტოქსიკანტის კონცენტრაცია ექსპონენციალურად მცირდება.

სისტემაში წყალი—ჰაერი ტოქსიკანტების ფუგიტიურობა თითქმის მთლიანად მათ აქროლადობაზეა დამოკიდებული. ეს სიდიდე განისაზღვრება აირად და თხევად ფაზებში ნივთიერებათა გადატანის სიჩქარით, ტემპერატურითა და ჰენრის კონსტანტით. ამ სისტემაში ნივთიერების გადატანის საერთო სიჩქარე ( $K$ ) შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება:

$$K = \left[ \frac{1}{k_l} + \frac{RT}{k_g H} \right]^{-1} \quad (1.1)$$

სადაც  $R$  გაზების უნივერსალური მუდმივაა,  $T$  — აბსოლუტური ტემპერატურა,  $k_l$  — სითხეში ნივთიერების გადატანის სიჩქარე,  $k_g$  — აირად ფაზაში ნივთიერების გადატანის სიჩქარე, ხოლო  $H$  — ჰენრის კონსტანტა.

ფორმულიდან (1.1) გამომდინარე, ტოქსიკური ნაერთების წყლიდან აქროლების სიჩქარე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ჰენრის კონსტანტის სიდიდეზე. როდესაც ჰენრის კონსტანტის მნიშვნელობა მაღალია ( $> 500$  კაპ/მოლი), რაც ახასიათებს ორთქლის მაღალი წნევისა და/ან დაბალი ხსნადობის მქონე ნაერთებს (მაგ., ბენზოლს, ტოლუოლს, ქლორირებულ ალკანებსა და ალკენებს, აგრეთვე ბევრ სხვა ადვილად აქროლად ნაერთს), მაშინ განტოლებაში მარჯვენა შესაკრები ( $RT/k_g H$ ) მნიშვნელოვნად მცირდება. ამ შემთხვევაში ნივთიერების გადატანის საერთო სიჩქარე მხოლოდ მარცხენა შესაკრებზე ( $1/k_l$ ) აღმოჩნდება დამოკიდებული. ეს იმას ნიშნავს, რომ ნივთიერების აქროლადობა მხოლოდ თხევად ფაზის მიერ კონტროლდება და სითხეში ნივთიერების გადატანის სიჩქარით —  $k_l$ -ით განისაზღვრება. თავის მხრივ,  $k_g$ -ის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნივთიერების მოლეკულურ მასაზე, მოლურ მოცულობაზე და გარემო ფაქტორებზე — ტემპერატურაზე, წნევაზე, სითხის ტურბულენტობაზე, სიბლანტეზე, ზედაპირულ დაჭიმულობაზე, ქარის სიჩქარეზე და ა.შ. ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს, რომ ის ნივთიერებები, რომლებსაც ჰენრის კონსტანტის მაღალი მნიშვნელობა ახასიათებთ, ინდივიდუალურ ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს შორის განსხვავების მიუხედავად, წყლის ფაზიდან ჰაერში ადვილად და ერთნაირი სიჩქარით გადავლენ.

მეორე ზღვრული შემთხვევის დროს, ე.ი. როცა ნოეთიერების პენრის კონსტანტა ძლიერ დაბალია ( $< 0.5$  კაშ/მოლი), ფორმულაში (1.1) განმსაზღვრელი ხდება მეორე შესაკრებიც, ე.ი. აქროლადობა უკვე აირადი ფაზითაც კონტროლდება. ასეთ ნაერთებს ორთქლის დაბალი წნევა და/ან კარგი ხსნადობა გააჩნიათ (მაგ., ფოსფოროვანილი პესტიციდები, ზედაპირულად აქტიური ნაერთები) და ისინი ძნელად აქროლადია.

წყლიდან ნოეთიერების აქროლები და მისი საპირისპირო პროცესის — მშრალი დალექვის გარდა, წყალსა და ჰაერს შორის ნოეთიერებათა ცვლა სხვა გზითაც შეიძლება განხორციელდეს. ასეთია, მაგ., ქარის მიერ ზღვის წყლის გაშხეფება, ჰაერში არსებული ტოქსიკანტის ატმოსფერულ ნალექში გახსნა და ამ გზით მისი წყალში მოხვედრა (ე.წ. სველი დალექვა). კონკრეტულ ეკოლოგიურ სისტემაში წყალსა და ჰაერს შორის ნაერთების გადატანის რომელ გზას ენიჭება უპირატესობა, გეოგრაფიული და კლიმატური ფაქტორებით განისაზღვრება.

გადატანილი მასის მიხედვით ნიადაგსა და ჰაერს შორის ნოეთიერებათა ცვლა უფრო მოცულობითია, ვიდრე წყალსა და ჰაერს შორის. გარდა ამისა, ამ დროს მასის გადატანის პროცესი გაცილებით რთულია, რადგან ამ დროს ნოეთიერების გადატანაზე ერთობლივად მოქმედებს ყველა ის ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს ნოეთიერებათა ცვლას სამივე ფაზას შორის: სითხე—მყარი ფაზა (იგულისხმება სისტემა, რომელსაც ნიადაგის ტენი და მყარი მატერია ქმნიან), მყარი ფაზა—აირი (ე.ი. და ნიადაგის მყარი ფაზა და ჰაერი) და სითხე—აირი (ნიადაგის ტენი და ჰაერი).

ნიადაგსა და წყალს შორის მასის გადატანა, ისევე როგორც წყალსა და ჰაერს შორის, დიფუზიის საშუალებით ხორციელდება და ორივე მიმართულებით მიმდინარეობს. ნიადაგიდან ნაერთის აქროლების სიჩქარე დამოკიდებულია მოლეკულურ მასაზე, ტემპერატურაზე, ნაჯერი ორთქლის წვევასა და აირად ფაზაში მისი გადაადგილების სიჩქარეზე. ნიადაგიდან ტოქსიკური ნაერთის ჰაერში გადასვლის პროცესი დამოკიდებულია აგრეთვე ნიადაგის ტიპზე, ტემპერატურაზე, ქარის სიჩქარესა და სხვა კლიმატურ პირობებზე. აქროლადობას პირველ რიგში, განსაზღვრავს იმ ადსორბციული ძალების მოქმედება, რომელთა საშუალებითაც ნიადაგის ნაწილაკები ტოქსიკანტის მოლეკულებს იკავშირებენ.

ნიადაგის მშრალი ზედაპირის მიერ ადსორბირებული ქიმიური ნაერთის ჰაერში მიგრაცია წყალხსნარიდან აქროლების ანალოგიურად ხდება. პროცესი პირველი რიგის კინეტიკური განტოლებით აღიწერება:

$$F = \frac{k_p PM}{RT} \quad (1.2)$$

სადაც  $F$  არის ნოეთიერების ნაკადი, რომლის განზომილებასაც წარმოადგენს კგ წმ<sup>-1</sup>·მ<sup>-2</sup>, ანუ იგი გვიჩვენებს დროის ერთეულში ნიადაგის ერთეული ფართო-

ბიდან ჰაერში გადასული ნოთიერების მასას. ფორმულაში (1.2)  $k$  აირად ფაზაში ნოთიერების გადატანის სიჩქარეა,  $P$  — ნაჯერი ორთქლის წნევა,  $M$  — მოლური მასა,  $R$  — გაზების უნივერსალური მუდმივა,  $T$  — აბსოლუტური ტემპერატურა.

ნიადაგის ტენიანი ზედაპირიდან ტოქსიკური ნაერთის აქროლება უფრო მეტი ინტენსივობით ხდება, ვიდრე შშრალიდან. ეს მოვლენა მხოლოდ წყლის ორთქლის მიერ ტოქსიკანტის მოლეკულების წარტაცებით, ანუ თანაორთქლებით არ ხორციელდება, რადგან, ჯერ ერთი, თანაორთქლებისათვის ბევრად უფრო მაღალი კონცენტრაცია და ტემპერატურაა საჭირო, ვიდრე ეს ბუნებრივ პირობებში იქმნება; მეორე მხრივ, თანაორთქლების მთავარი მიზეზია ურთიერთქმედება წყლისა და ტოქსიკანტის მოლეკულებს შორის (წყალბადური ბმების წარმოქმნა, პიდრატაცია და სხვ.), რაც ნაკლებად ახასიათებს ტოქსიკანტების უმრავლესობას მათი პიდროფობული ბუნების გამო; მესამე მხრივ, ცნობილია, რომ წყლის ორთქლი სწრაფად აჯერებს ატმოსფეროს, რაც ანელებს აორთქლების სიჩქარეს, ამიტომ თანაორთქლების შემთხვევაში ტოქსიკანტის აქროლება თანდათან უნდა მცირდებოდეს, რაც რეალურად არ ხდება. ამრიგად, ტენიანი ნიადაგიდან წყლისა და ტოქსიკანტის აქროლება პრაქტიკულად ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი პროცესებია.

ნიადაგის ტენიანობის მატებასთან ერთად აქროლების ინტენსივობა იზრდება. შშრალი ნიადაგიდან აქროლებისას ტოქსიკანტის მოლეკულებმა უნდა დაძლიონ ის ადსორბციული ძალები, რომლებიც მათ ნიადაგის მყარ ნაწილაკებთან აკავშირებს. ტენიანი ნიადაგიდან აქროლებისას ეს ფაქტორი თითქმის უგულებელყოფილია, რადგანაც წყლის მოლეკულები ტოქსიკანტს მყარი ფაზიდან გამოირეცხვენ, ე.ი. ხდება ელუცია, რაც პრაქტიკულად დესორბციის პროცესს წარმოადგენს. ამიტომ ტენიანი ნიადაგიდან აქროლებისას ქიმიური ნაერთები ჰაერში უპირატესად თხევადი ფაზიდან გადადიან.

ნიადაგის სიღრმეში ამა თუ იმ გზით მოხვედრილი ტოქსიკანტი ზედაპირის მიმართულებით გადაადგილდება. ეს პროცესი რამდენიმე მამოძრავებელი ძალის მიერ შეიძლება წარიმართოს, რაც ტოქსიკანტის ჰენრის კონსტანტის მნიშვნელობაზეა დამოკიდებული. მაღალი ჰენრის კონსტანტის მქონე ტოქსიკანტები (მაგ., ქლორორგანული გამხსნელები, ინსექტიციდები — ლინდანი, DDT და სხვ.), ადვილად აქროლადობის გამო წყლისაგან დამოუკიდებლად გადაადგილებიან ნიადაგის სიღრმიდან ზედა ფენებისაკენ. ჰენრის კონსტანტის დაბალი მნიშვნელობის მქონე ტოქსიკანტებს (ასეთია, მაგ., ტრიაზინული პერბიციდი პრომეტონი), ზედაპირისაკენ ამოძრავებს “ფითლის” ეფექტი: ნიადაგის ზედაპირიდან წყლის აორთქლების გამო აღიძრება კაპილარული ძალები, რომლებიც იწვევენ წყლის გადატანას ნიადაგის სიღრმიდან ზედაპირისაკენ. ამ დროს ადგილი აქვს კონვექციის მოვლენას — წყალთან ერთად ზედაპირისაკენ გადაადგილება მასში გახსნილი ტოქსიკანტიც.

ტოქსიკანტი ნიადაგიდან ჰაერში შეიძლება არაპირდაპირი გზითაც მოხვედეს. ამას ადგილი აქვს ნიადაგის ქარით ეროზიის დროს, როდესაც ჰაერის

მასა წარიტაცებს გამოფიტული ნიადაგის ნაწილაკებს მათზე აღსორბირებულ ტოქსიკანტთან ერთად.

## 2.4 ტოქსიკური ნაერთების გეოგრაფიული და ბიოტური გადატანა

ჰაერს, წყალსა და ნიადაგს შორის ტოქსიკური ნაერთების პირველადი გაწაწილების შემდეგ, ხდება სხვადასხვა მანძილზე ნოეთიერებათა გეოგრაფიული გადატანა ფიზიკური ფაქტორების ზემოქმედების შედეგად. ნოეთიერებათა გეოგრაფიული გადატანა, უპირველეს ყოვლისა, ჰაერისა და წყლის ნაკადებით ხორციელდება.

ატმოსფერული გადატანა გარემოში ქიმიური ნოეთიერებების გადაადგილების უმთავრესი გზაა. ჰაერში ნოეთიერებების გადატანა დამოკიდებულია ატმოსფეროს ვერტიკალურ სტრუქტურაზე, აგრეთვე ქარის მიმართულებაზე და სიჩქარეზე. ჰაერში ნოეთიერებების გადანაცვლება და ტროპოსფეროში მათი გადატანა სწრაფად ხდება, ხოლო ტროპოსფეროსა და სტრატოსფეროს შორის რამდენიმე წელი გრძელდება. ლოკალურ არეში ტროპოსფერული გადატანა რამდენიმე წუთში ხდება, რეგიონალური მასშტაბით საათები და დღეებია საჭირო, ხოლო გლობალური მასშტაბით — რამდენიმე კვირა.

ტოქსიკური ნაერთების ჰაერთან სრული შერევის პერიოდი ნახევარსფეროს ფარგლებში ორი კვირიდან სამ თვემდე მიმდინარეობს, ხოლო ნახევარსფეროებს შორის სრული დიფუზია დაახლოებით ერთი წელი გრძელდება. პროცესის გახანგრძლივება იმით არის გამოწვეული, რომ დედამიწის ირგვლივ ეკვატორული ზონა დაბალი წნევისაა, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს ჰაერის მასების ცვლას ნახევარსფეროებს შორის.

გარდა ამისა, ატმოსფერული გადატანა დაკავშირებულია მეტეოროლოგიურ პირობებზე და დედამიწის ზედაპირის თავისებურებებთან. აირადი და მბინძურებლების პორიზონტალური გადატანა განისაზღვრება ე.წ. “გაბატონებული ქარების” მიმართულებით, ხოლო ტოქსიკური გამონაბოლქვები აირების ვერტიკალური მიმართულებით გადატანა დამოკიდებულია ქარის სიჩქარეზე. ამ პარამეტრის ზრდასთან ერთად ჰაერში აირების გადანაცვლება სულ უფრო მეტად ინტენსიური ხდება, რაც იწვევს ემისიის კრებთან ტოქსიკანტების კონცენტრაციების შემცირებას. ამჟვე დროს, ქარის დიდი სიჩქარე ხელს უშლის ვერტიკალური მიმართულებით ტოქსიკური აირების ატანას, რაც ზღუდავს ატმოსფეროს მაღალ ფენებში მათ გავრცელებას. ტოქსიკური აირების პორიზონტალური გავრცელების პროცესზე გაუღენას ახდენენ მთის მასივები, ტყეები, დაბალი და მაღალი წნევის არეების მონაცვლეობა, რომლებიც ცვლიან ქარის საწყის მიმართულებას, აგრეთვე ატმოსფერული ნალექები, რომლებიც წყალში ხსნადი აირების უმეტეს ნაწილს აკავენ.

მაგნე აირების გავრცელებაზე გავლენას აგრეთვე ახდენს ატმოსფეროს ცალკეული ფენის ტემპერატურა. საერთოდ, ტროპოსფეროში ჰაერის ტემპერატურა სიმაღლის ზრდასთან ერთად მცირდება. დედამიწის ზედაპირის ძლიერი დათბობა ხელს უწყობს ჰაერის ვერტიკალური დინებების წარმოქმნას, რომლებიც ზევით წარიტაცებენ წარმოებისა და ავტოტრანსპორტის ტოქსიკურ გამონაბოლქვებს. ამ აირების ტემპერატურა ზმირად ჰაერის ტემპერატურაზე მაღალია, რაც აგრეთვე იწვევს ვერტიკალური მიმართულებით ტოქსიკური აირების გადაადგილებას. ასეთ პირობებში აირებს შეუძლიათ შეუფერხებლად ზემოთ ასვლა და მათი გავრცელების სიმაღლე 500—700 მ-ს აღწევს. აირების ვერტიკალური გადაადგილების სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება ტემპერატურული ინვერსიის დროს, ე.ი. როდესაც სხვადასხვა მიზეზით სიმაღლის ზრდასთან ერთად ტემპერატურა კი არ ქვეითდება, არამედ პირიქით — იზრდება, რაც, ცხადია, ზღუდავს აირის ზევით ასვლას. ტემპერატურული ინვერსია ორი მიზეზით შეიძლება მოხდეს:

1. დედამიწის ზედაპირთან ახლოს მყოფი ჰაერის ფენების უცარი გაცივების გამო — წელიწადის თბილ და ცხელ პერიოდში, ასეთი ტემპერატურული ცვალებადობა დამითაა მოსალოდნელი, როცა ინვერსიული ფენის სისქე ათუფლიდან ასეულ მეტრამდე აღწევს, ხოლო ტემპერატურის მატება გრადუსის მეთუდიდან 15—20°C-მდე მერყეობს. დილიდან შუადღემდე მზის სხივებით გათბობის გამო, ასეთი ტემპერატურული სხვაობა, და შესაბამისად, ინვერსიაც სწრაფად ქრება. შემოდგომასა და ზამთარში ინვერსია უფრო მეტად დღისით ხდება, როდესაც დედამიწა უმნიშვნელოდაა გამთბარი და ამ დაბალ ტემპერატურას მთელი დღის განმავლობაში მუდმივად ინარჩუნებს, ამ დროს კი ჰაერის ზედა ფენა შეიძლება უფრო მეტადაც გათბეს.

2. ქვედა ციფ ფენებზე თბილი ჰაერის ნაკადის ზედდება. მეორე შემთხვევაში ინვერსიის მიზეზია ტროპოსფეროს ზედა ფენებში ანტიციკლონის მიერ შეკუმშული ჰაერის გაცხელება. თბილი ჰაერის ინვერსიული ფენები აწევბა დედამიწის ზედაპირის ციფ ფენებს, რომლებიც გათბობას ვერ ასწრებენ.

ინვერსიის შედეგად აირადი ტოქსიკანტები ყველაზე დაბალი ინვერსიული ფენის ქვეშ გროვდებიან და დედამიწის ირგვლივ საჰაერო სივრცეს აბინძურებენ. ინვერსია სმოგის წარმოქმნის ერთ-ერთი მიზეზია.

ოკეანეების ზედაპირზე ატმოსფერული ცირკულაცია იწვევს ზღვების დინებებს, რომლებიც დაბალ განედებში ანტიციკლონური ხასიათისაა, ხოლო შუა და პოლარულ განედებში — ციკლონური. პასატური ქარების გავლენით წარმოიქმნება დასავლეთ მიმართულების ძლიერი პასატური დინებები, რომლებიც კონტინენტების აღმოსავლეთ სანაპიროებზე მიმართულებას იცვლიან და სანაპიროს გასწვრივ მიედინებიან 40—50° განედებამდე. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს უფრო მაღალ განედებში გაბატონებული ქარები ამ დინებების მიმართულებას საპირისპირო მხარეს ცვლიან და თბილ დინებებს წარმოქმნიან (მაგ., გოლფსტრიმი ატლანტის ოკეანეში, კუროსიო — წყნარში). სამხრეთის

განშტოებები უფრო სუსტია და ცივი ღინებების სახით მოძრაობენ სანაპიროსკენ, უერთდებიან პასატის ღინებების ჩრდილოეთის განშტოებებს და ამგვარად იკვრება ციკლონური წრე. ატლანტისა და წყნარ ოკეანეებში ანტიციკლონები წარმოიქმნება სამხრეთ ნახევარსფეროშიც. ინდოეთის ოკეანეში ზღვის ღინებებს სეზონური ხასიათი გააჩნიათ და იცვლებიან გაბატონებული ქარების — მუსონების მიმართულებით შორეული ჩრდილოეთისა და სამხრეთის ცივი წყლები ქმნიან რამდენიმე ციკლონურ წრეს. ოკეანეების წყლების ცირკულაცია ხდება ვერტიკალური მიმართულებითაც ღინებების კონვერგენციის (შეერთების) და დივერგენციის (გაყრის) შედეგად, აგრეთვე წყლის კონვექციული შერევის დროს. გარდა ამისა, მსოფლიო ოკეანეში წყლის ღინება შეიძლება გამოიწვეული იყოს ლოკალური ქარებით, მიქცევებით, მოქცევებით, მიწისქვეშა ბიძგებით და სხვ. ოკეანური ცირკულაცია ხელს უწყობს ქიმიური დაბინძურებლების გლობალურ გადატანას, რაც რამდენიმე წლის განმავლობაში გრძელდება. რეგიონული განაწილების დროს მდინარეებში წყლით გადატანას არსებითი მნიშვნელობა არ გააჩნია, მაშინ როდესაც ტოქსიკანტების ლოკალური გავრცელებისათვის მნიშვნელოვანი ფაქტორებია ზედაპირული და გრუნტის წყლები.

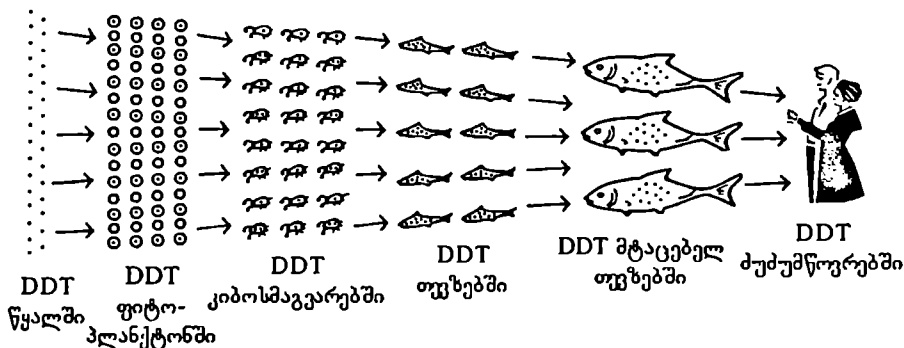
ბიოსფეროში გეოგრაფიულ გადატანასთან ერთად ადგილი აქვს ტოქსიკური ნაერთების ბიოტურ გადატანას, რომელიც ცოცხალი ორგანიზმებით ხორციელდება. საერთოდ, ბიოტური გადატანის მასშტაბი უფრო მცირეა, ვიდრე გეოგრაფიული. ბიოტური გადატანა ხდება იმ მწერების, ფრინველების, თევზებისა და ცხოველების აქტიური გადაადგილების შედეგად (მწერების მიგრაციები, ფრინველების სეზონური გადაფრენა, საქონელის გადაღენა და სხვ.), რომლებიც ეკოტოქსიკანტებს აკუმულირებენ. ბიოტური გადატანის მნიშვნელოვანი სახეა კვებითი ჯაჭვით ერთი ორგანიზმიდან მეორეზე ტოქსიკური ნაერთების გადატანა. ბიოტური გადატანის პროცესს მიეკუთვნება აგრეთვე ადამიანის ისეთი მოქმედება, რომლის შედეგადაც ხდება ქიმიური ნაერთებით დაბინძურებული სამშენებლო მასალების, სოფლის მეურნეობის პროდუქტებისა და სხვა სამეურნეო საქონელის ლოკალური და რეგიონალური მასშტაბებით გავრცელება (ამის მაგალითად გამოდგება საერთაშორისო ინციდენტი, რომელიც ბელგიური ქაფმის ხორცში დიოქსინების აღმოჩენას მოჰყვა — ამ ნაწარმის ექსპორტი მკაცრად აღიკვეთა, ხოლო პროდუქცია განადგურდა). ტოქსიკანტების ბიოტური გადატანის კლასიკური მაგალითია წყლის ჭიების მოქმედება, რომლის შედეგადაც დანალექში კონცენტრირებული ქიმიური ნაერთები (პესტიციდები, დიოქსინები, პოლიქლორირებული ბიფენილები და სხვ.) წყლის ფაზაში გადადის.

ბიოტური პროცესების შედეგად ტოქსიკანტების გადატანა არც ისე მასშტაბურია, მაგრამ ზოგიერთი მათგანი, განსაკუთრებით კი ტოქსიკური ნაერთების კვებით ჯაჭვში გადატანა სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი და აქტუალურია, რადგან სწორედ ეს პროცესი წარმოადგენს ადამიანის ორგანიზმში ტოქსიკური ნაერთების მოხვედრის ერთ-ერთი ძირითად გზას. კვებითი ჯაჭვები სხვადასხვა ორგანიზმებს შორის ურთიერთკავშირის ერთ-ერთი ფორმაა, როდესაც ყოველი

შემდეგი რგოლის წარმომადგენლისათვის საკვებს წინა რგოლის ორგანიზმი წარმოადგენს.

საინტერესოა, რომ კვებითი ჯაჭვით ტოქსიკური ნაერთის გადაცემის შესაძლებლობა აღექვსანდრე დიუმას აღწერილი აქვს ჯერ კიდევ XIX საუკუნეში, როცა კაცობრიობას ეკოლოგიური პრობლემები ნაკლებად აწუხებდა. მისი ცნობილი რომანის მთავარი გმირი, გრაფი მონტე-კრისტო მოუთხრობს ქალბატონ დე ვილფორს ვინმე აბატ ადელმონტეს შესახებ, რომელმაც ბაჭია გამოკვება დარიშხანით მოწამლული კომბოსტოთი, მისი შიგნული კი ქათმებს დაუყარა საწიწკნად. ამის შემდეგ ერთ-ერთი მოწამლული ქათამი ქორის ნაღავი გახდა. მტაცებელი მოწამულის გამო დასუსტდა, თევზსაშენში ჩაეარდა და თავად იქცა ქარიელაპიების საკილიოდ. ბოროტი აბატის ზრახვების უკანასკნელი მსხვერპლი მისი მეზობელი მეშაშულე გახდა, რომლის სუფრაზეც დარიშხანით მოწამლული თევზი აღმოჩნდა. რასაკვირველია, კვებითი ჯაჭვის თანამედროვე გაგება ბევრად განსხვავდება გამოჩენილი ფრანგი მწერლის ფანტაზიისაგან, მაგრამ ერთი რამ უნდა აღინიშნოს: საწარმოებიდან გარემოში ტოქსიკური ნაერთების გამომშვება ისეთივე წინასწარ განზრახული ბოროტებაა, როგორსაც უკეთური აბატი ჩაიღოდა.

კვებით ჯაჭვში DDT-ს გადაადგილება ბიოტური გადატანის ამ სახის კლასიკურ მაგალითს წარმოადგენს (ნახ.2.2).



ნახ. 2.2. კვებით ჯაჭვში DDT-ს გადაადგილების სქემა.

ყველაზე ადვილად ქიმიური ტოქსიკანტები კვებით ჯაჭვში წყლის ორგანიზმებიდან ხვდება. მაგ., როდესაც DDT-ს თვითმფრინაიდან აფრქვევენ წყალსატევებში მალარიის გადამტანი კოლო ანოფელესის გასანადგურებლად, რამდენიმე დღის შემდეგ იგი წყალში აღარ იღენტიფიცირდება, რადგან მთლიანად ნაწილდება ფსკერის ნალექში, მიკროორგანიზმებში და ფიტოპლანქტონში, ე.ი. კვებითი ჯაჭვის საწყის რგოლზე ხვდება და იწყება ორგანიზმებში მისი გადატანის პროცესი ნახ.2.2-ზე მოყვანილი სქემის მიხედვით.

კვებითი ჯაჭვის ყოველ შემდეგ რგოლზე გადასვლით, ე.ი. ტროფიკული დონის ამაღლებით, ცოცხალი ორგანიზმების ქსოვილებში ბიომასის ერთულზე გადაანგარიშებით ტოქსიკანტების დაახლოებით 10-ჯერ კონცენტრირება ხდება. ორგანიზმში ტოქსიკანტის ასეთი დაგროვება გამოწვეულია შემდეგი მიზეზებით

1. ორგანიზმში მოხვედრილი ტოქსიკური ნაერთები, რომლებიც ფერმენტულად არ იშლება და დიდი ხნის განმავლობაში უცვლელი სახით რჩება. უმეტეს შემთხვევაში ტოქსიკურად ითვლება ისეთი ნაერთები, რომლებიც ძნელად მეტაბოლიზდებიან, ან საერთოდ არ მონაწილეობენ პლასტიკურ და ენერგეტიკულ ცვლაში. მათ გააჩნიათ ბიოლოგიური ნახვეარდაშლის ხანგრძლივი პერიოდი, ლიპოფილურობა, ადვილად აკუმულირდებიან ლიპიდებში, ცხიმოვან ქსოვილებში, მცენარეების ვაკუოლებში და ა.შ. ნაწილობრივ გარდაქმნის შემთხვევაში ტოქსიკანტები უკავშირდებიან შიდაუჯრედულ ორგანულ ნივთიერებებს, მათ შორის უჯრედულ პოლიმერებს (ცილებს, პოლისაქარიდებს, ნუკლეინის მჟავებს), რის შემდეგაც ორგანიზმიდან მათი გამოძევება პრაქტიკულად შეუძლებელი ხდება.
2. კვებითი ჯაჭვის ყოველ შემდეგ რგოლში ორგანიზმის ბიომასა მცირდება, რის შედეგადაც ტოქსიკანტის კონცენტრაცია იზრდება. აქ იგულისხმება, რომ ნებისმიერი ორგანიზმი თავისი არსებობის განმავლობაში საკუთარ მასაზე ბევრად უფრო მეტი მასის საკვებს ითვისებს, თუმცა მტაცებელი ორგანიზმი ზომით თითქმის ყოველთვის მეტია მსხვერპლზე. ამგვარად, კვებითი ჯაჭვის ყოველ ეტაპზე ორგანიზმი-მომხმარებელი ამუშავებს და ხარჯავს მიღებული საკვების მთელ ბიომასას, ხოლო ტოქსიკური ნივთიერება, რომელიც საკვებშია და ამ დროს არ გარდაიქმნება, ორგანიზმში რჩება, ისევე, როგორც ფილტრაციის შემდეგ ნალექი ფილტრზე.
3. ორგანიზმში კონცენტრირებული ტოქსიკანტი იწვევს მოწამელას, რის შედეგადაც ცხოველები ნაკლებად მოძრაობენ, კარგავენ სისწრაფეს, მოქნილობას, ორიენტაციას და რეაქციას, ამის გამო ისინი იოლად ხდებიან უფრო მაღალ ტროფიკულ დონეზე მყოფი მტაცებლების მსხვერპლი.

ცოცხალ ორგანიზმში ქიმიური ტოქსიკანტების დაგროვება, ანუ ბიოაკუმულაცია ხორციელდება საკვებთან ერთად შეღწევის შედეგად ან არაკვებითი გზით ეკოლოგიურ ქიმიამში დამკვიდრებული ტერმინოლოგიით პირველ პროცესს ნივთიერებათა ბიოაუმენტაცია ეწოდება, ხოლო მეორეს — ბიოკონცენტრირება.

წყალში მობინადრე ორგანიზმებისათვის, ანუ პიდრობიონტებისათვის ბიოაკუმულაციის პროცესი განპირობებულია ბიოკონცენტრირებით — უშუალოდ გარემოდან შეღწევის ხარჯზე. ორგანიზმში დაგროვილი ტოქსიკანტების კონცენტრაცია შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება:

$$C_A = \frac{K_1}{K_2} \cdot C_H = K_B \cdot C_H \quad (1.3)$$



სადაც  $C_1$  ორგანიზმში ნოეთიერების წონასწორული კონცენტრაციაა (მკგ/კგ),  $C_{\#}$  — წყალში ნოეთიერების კონცენტრაცია (მკგ/კგ),  $K_1$  — მოხმარების სიჩქარის კონსტანტა (დღე<sup>-1</sup>),  $K_2$  — გამოყოფის სიჩქარის კონსტანტა (დღე<sup>-1</sup>),  $K_{BC}$  — ბიოკონცენტრირების კოეფიციენტი.

როგორც ფორმულიდან ჩანს, წყლის ორგანიზმებში ტოქსიკური ნაერთების შემცველობა დამოკიდებულია არამარტო საარსებო გარემოში ამ ნოეთიერებათა კონცენტრაციაზე, არამედ ბიოკონცენტრირების კოეფიციენტზეც ( $K_{BC}$ ). ეს პარამეტრი ფარდობითი სიდიდეა და გვიჩვენებს, რამდენჯერ აღემატება ორგანიზმში ტოქსიკური ნაერთის შედწვევის სიჩქარე ორგანიზმიდან მისი გამოძევების სიჩქარეს.  $K_{BC}$ -ს სიდიდე სხვადასხვა ქიმიური ნაერთისათვის წყლის ორგანიზმებში შეიძლება განსხვავდებოდეს 5 რიგით და დამოკიდებულია, ერთი მხრივ, ნოეთიერების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, მეორე მხრივ კი ორგანიზმში ლიპიდების რაოდენობრივ შემცველობაზე, რადგან ტოქსიკური ნაერთები სწორედ მათში გროვდება.

ტოქსიკანტების ყველაზე მნიშვნელოვანი თვისებაა ლიპოფილურობა, რომლის შეფასება ხდება —  $n$ -ოქტანოლსა და წყალს შორის ნოეთიერების განაწილების კოეფიციენტით ( $K_{OW}$ ).  $K_{BC}$  და  $K_{OW}$  კოეფიციენტების ათობით ლოგარითმებს შორის სწორხაზოვანი დამოკიდებულებაა. ასეთი კორელაცია იმაზე მიუთითებს, რომ წყლიდან ორგანიზმში ლიპოფილური ქიმიკატების შედწვევა და დაგროვება პრინციპში წყლის ფაზასა და ორგანიზმების ლიპიდურ ფრაქციებს შორის ტოქსიკანტის განაწილების პროცესს წარმოადგენს. ტოქსიკანტების ბიოკონცენტრირება სხვა ფაქტორებითაც განისაზღვრება, მაგ., ემემბრანების სელექციური შედწვევადობით, ტოქსიკანტების კონიუგაციისა და დეგრადაციის სპეციფიკური ბიოქიმიური რეაქციების ინტენსივობით და ა.შ. მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტებით დადასტურებულია, რომ ლიპოფილური ბუნების მქონე ტოქსიკური ნოეთიერებები, DDT-ს მსგავსად, ჰიდრობიონტების საშუალებით ძალიან სწრაფად ხვდებიან კვებით ჯაჭვში.

წყლის ორგანიზმებისაგან განსხვავებით, ხმელეთის ცხოველებში ტოქსიკური ნაერთების ბიოაკუმულაცია ძირითადად, ბიოუგმენტაციით მიმდინარეობს, ე.ი. ისინი ორალური გზით აღწევენ საჭმლის მომწელებელ ტრაქტში. ამ ორგანიზმებში დაგროვების პროცესის ინტენსიურობა დამოკიდებულია აგრეთვე  $K_{OW}$ -ს სიდიდეზე. აქ მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ტოქსიკანტების ფერმენტული გარდაქმნები, რომლებიც ღვიძლში მიმდინარეობენ, სადაც უცხო ნაერთების დეგრადაცია და გაუვნებელყოფა ხორციელდება. ქიმიკატების, განსაკუთრებით კი ორგანული ტოქსიკანტების ბიოტრანსფორმაცია, ყველაზე მეტად დამახასიათებელია მიკროორგანიზმებისთვის, მცენარეებისათვის და ხმელეთის ცხოველებისათვის, ჰიდრობიონტებში კი ეს პროცესი უმნიშვნელოა.

უმაღლესი მცენარეები ქიმიურ დამბინძურებლებს ითვისებენ ნიადაგიდან, წყლიდან და ჰაერიდან. ამ პროცესების გზები და მექანიზმები სხვადასხვაგვარია და მათ დეტალურად შემდგომ თავში განვიხილავთ.

### 3. მცენარეებში ტოქსიკური ნაერთების შემდგომისა და ტრანსპორტის ფიზიოლოგიური ასპექტები

მცენარეში ანთროპოგენური ტოქსიკური ნაერთების შეღწევა პაერიდან, ნიადაგიდან ან წყლიდან ხდება. მცენარეები ამ ნაერთებს ძირითადად ფესვებისა და ფოთლების საშუალებით შთანთქავენ. ტოქსიკური ნაერთი შეიძლება მოხვდეს თესლშიც, როდესაც მათ დათესვის ან შენახვისათვის სხვადასხვა ქიმიკატებით (ინსექტიციდებით, ფუნგიციდებით და ა.შ.) ამუშავენ.

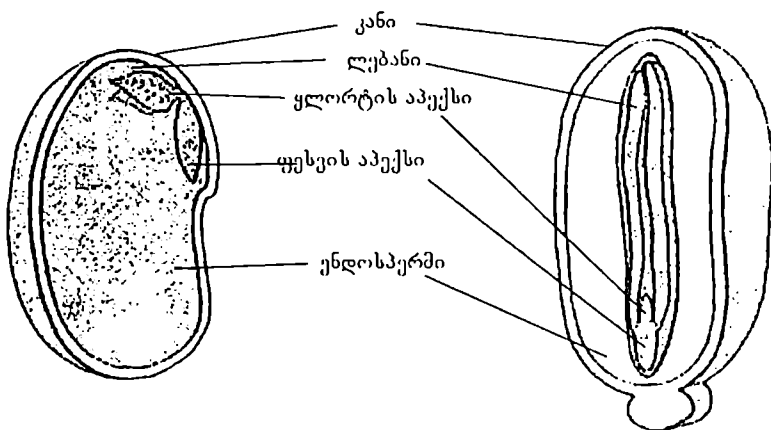
ფოთლებში ტოქსიკანტების შეღწევა ორი გზით ხდება უშუალოდ მცენარეებზე სხვადასხვა ქიმიკატების ხსნარების შესხურებით, ან პაერიდან აირადი ტოქსიკანტების შთანთქმით ფესვებში უცხო ნაერთები წყალთან და ნიადაგის საკვებ ნივთიერებებთან ერთად შეიწოვება. როგორც წესი, ფესვები ქიმიურ ნაერთებს უფრო დაბალი შერჩევითობით ითვისებენ, ვიდრე ფოთლები. ამდენად, მცენარის ფესვებითა და ფოთლებით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის პროცესები თავისი ფიზიოლოგიით არსებითად განსხვავებულია.

უნდა აღინიშნოს, რომ კვლევები, რომლებიც ამ საკითხებს ეძღვნებოდა, ინტენსიურად ტარდებოდა 1965—1990 წლებში, შემდგომში მათ მიმართ ინტერესი საგრძნობლად შემცირდა. როგორც ჩანს, ეს იმით აიხსნება, რომ 80-იანი წლების ჩათვლით მცენარე განიხილებოდა, როგორც ორგანიზმი, რომელსაც ძირითადად შეუძლიათ უჯრედშორის სივრცეში ქსენობიოტიკების აკუმულირება, მაგრამ არ გააჩნიათ მათი სრული მინერალიზაციის უნარი. 90-იან წლებში დაგროვილი ექსპერიმენტული მონაცემებით მცენარეების დეგრადაციულ უნარზე წარმოდგენა ძირფესვიანად შეიცვალა, რამაც ერთმნიშვნელოვნად დაადასტურა უმაღლესი მცენარეების მაღალი ეკოლოგიური პოტენციალი. რა თქმა უნდა, ეს აღმოჩნდა ძლიერი იმპულსი, რამაც გამოიწვია მრავალი მკვლევარის დაინტერესება გაგრძელებულიყო კვლევა მცენარეების დეტოქსიკაციური პოტენციალის გამოსავლენად.

#### 3.1 ტოქსიკური ნაერთების შემდგომი თხსნა

მცენარის თესლში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევის პროცესი რამდენიმე ძირითად პარამეტრზეა დამოკიდებული. მათგან უპირველესია თესლის კანის განვლადობა, რამდენადაც კანი იმ ბარიერს წარმოადგენს, რომელიც ხელს უშლის შიდა ფენების უჯრედებში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევას (ნახ.3.1). პროცესის ინტენსივობას განსაზღვრავს აგრეთვე ისეთი ფაქტორები, როგორებიცაა:

ნოტიერების ქიმიური სტრუქტურა, ლიპოფილურობა, მოლეკულური მასა, კონცენტრაცია, ინკუბაციის ხანგრძლივობა, ტემპერატურა, ტენიანობა და სხვ.



ნახ. 3.1. მცენარის ორლებნიანი (მარცხნივ) და ერთლებნიანი (მარჯვნივ) თესლების სტრუქტურა.

თესლის კანის გამტარუნარიანობით მცენარეები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან მაგ., ბამბის თესლის კანი უფრო ნაკლებად შეღწევადია ტოქსიკური ნაერთების მიმართ, ვიდრე ლობიოსი, ამიტომ პერბიციდები — ტერბუტრინი და ფლუმეტრონი ბამბაში ძირითადად თესლის კანში გროვდება, ხოლო ლობიოს თესლებში ტოქსიკანტები ადვილად აღწევენ შიდა ქსოვილებში. ქლოროფანული გამხსნელი — დიქლორმეთანი ამარანტისა და შერიის თესლებზე განსხვავებულად მოქმედებს, რაც დამოკიდებულია დამუშავების ხანგრძლივობაზე და ფიზიოლოგიურ მდგომარეობაზე. თესლის კანის მოცილების შემთხვევაში დიქლორმეთანი აღმოცენებისა და თესლის სუნთქვის ინტენსივობის შემცირებას იწვევს. ვარაუდობენ, რომ დიქლორმეთანს თესლის კანის შიგნით შეღწევა არ შეუძლია. სარეველა ბალახის — *Portulaca oleracea*-ს და ამარანტის თესლების აღმოცენებაზე უმდაბლესი ალკანების, ალკენების, ალკადიენებისა და ალდეჰიდების გავლენის შესწავლა აჩვენებს, რომ უჯერი ნახშირწყალბადები (ეთილენი, პროპილენი და პროპანდიენი) ადვილად აღწევენ თესლებში და მათ აღმოცენებას ასტიმულირებენ. ალდეჰიდები ალკენებთან და დიენებთან შედარებით სუსტ მასტიმულირებელ ეფექტს ავლენენ, ხოლო ალკანებს ფიზიოლოგიური ზემოქმედების უნარი საერთოდ არ გააჩნიათ.

სიმინდის, სოიოსა და აბუსალათინის თესლების მიერ წყალხსნარებიდან სხვადასხვა პერბიციდების შთანთქმის შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ თესლების

მიერ ტოქსიკანტების აბსორბციის უნარი ქვემოთ ჩამოთვლილი რიგის მიხედვით იზრდება:

ფლუმეტურონი < 2,4-D < დიფენამიდი < დიფლურალინი < ატრაზინი < < პრომეთინი < ქლორპროფამი.

ექსპერიმენტული მონაცემების განზოგადებით თესლებით შთანთქმის პროცესის რაოდენობრივი მხარე შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$M(t) = \frac{4\pi a^2}{W_s} (C_0 - C_i) \left[ \frac{Dt}{a} + 2 \left( \frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \right]$$

სადაც  $M(t)$  არის თესლის მიერ აბსორბირებული ჰერბიციდის რაოდენობა, მკგ/გ;  $t$  — ინკუბაციის დრო, წმ;  $a$  — თესლის რადიუსი, სმ;  $W_s$  — ჰაერზე გამშრალი თესლის მასა, გ;  $D$  — შთანთქმის არეში ჰერბიციდის დიფუზიის კოეფიციენტი, სმ<sup>2</sup>/წმ;  $C_0$  — ჰერბიციდის საწყისი კონცენტრაცია თესლის კანის ზედაპირის უშუალო სიახლოვეს (მკგ/მლ).

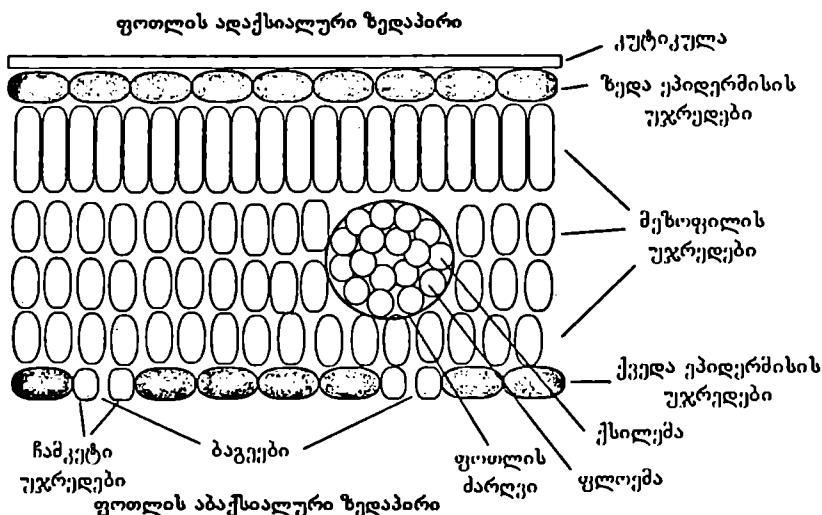
სოიის თესლების მიერ <sup>14</sup>C-ით ნიშანდებული ჰერბიციდების — ამიბენის, ატრაზინის, მონურონის, S-ეთილდიპროპილთიოკარბამატისა და ქლორპროფამის შთანთქმამ აჩვენა, რომ ჰერბიციდის კონცენტრაციასა და თესლში მისი შეღწევის ინტენსივობას შორის არსებობს პირდაპირპროპორციული დამოკიდებულება. პროცესი ტემპერატურაზეცაა დამოკიდებული — 10°C-დან 30°C-მდე ტემპერატურის მატება შთანთქმის პროცესს შესამჩნევად აძლიერებს. უნდა აღინიშნოს, რომ აღმოცენების უნარის მქონე და არააღმოცენებადი თესლების მიერ შთანთქმის ინტენსივობა ერთნაირია.

### 3.2 ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმვა ფოთლებით

ფოთოლში ქსენობიოტიკის შეღწევა ორი ძირითადი გზით ხორციელდება: უცხო ნაერთის მოლეკულამ ბაგეების ხერხელებში უნდა შეაღწიოს, ან უნდა გადალახოს აპკისმაგვარი ცვილისებრი ბარიერი, რომელსაც კუტიკულით დაფარული ეპიდერმისი ქმნის. როგორც წესი, ბაგეები ძირითადად ფოთლის ქვედა (აბაქსიალურ) ზედაპირზეა განლაგებული, ხოლო კუტიკულის ფენა ზედა (ადაქსიალურ) ზედაპირზე უფრო მეტი სისქისაა (ნახ.3.2).

ბაგეების აპარატი უამრავი ხერხელისაგან შედგება. საჭიროების შემთხვევაში ბაგეებს შეუძლიათ შეცვალონ ხერხელის ჭრილის ზომა, რის მეშვეობითაც მცენარე აკონტროლებს სხვადასხვა მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების შეთვისება. ცხადია, ამ პროცესით ფოთლებში ქსენობიოტიკების შეღწევაც რეგულირდება.

ბაგეების ჭრილების ზომები დამოკიდებულია სპეციალიზებული ჩამკეტი უჯრედების მოძრაობაზე, რომლებსაც ლობიოს მარცვლის ფორმა აქვთ.



ნახ. 3.2. ფოთლის სტრუქტურის სქემატური გამოსახულება.

ბაგეების ჩამკეტი უჯრედების მოძრაობას კალიუმის იონების კონცენტრაცია არეგულირებს — ამ უჯრედებში კალიუმის იონების რაოდენობის გაზრდით ბაგეები იხსნება. ბაგეების ზერელების გახსნა, და შესაბამისად, ბაგისეული დიფუზიის ინტენსივობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე: სინათლის ინტენსივობაზე, ტემპერატურაზე, ტენიანობაზე, უჯრედმორის სივრცეში  $\text{CO}_2$ -ის პარციალურ წნევაზე, მცენარის ჰიდრატაციის მდგომარეობაზე, იონურ ბალანსზე, ფერომონებზე და ა.შ.

აირების გარდა, სითხის ფოთოლში შეღწევაც ბაგეების გავლით ხდება. განსხვავება იმაში მდგომარეობს, რომ აირების შეღწევადობა დამოკიდებულია ბაგის ზერელის გაღების ზომაზე (საერთოდ, ბაგის ზერელის ზომა შეიძლება იცვლებოდეს 4-დან 10 ნმ-მდე), ხოლო სითხისა — ბაგეების მორფოლოგიურ თავისებურებებზე, ფოთლის ზედაპირის ლიპოფილურობაზე, სითხის ზედაპირულ დაჭიმულობაზე და ყველა იმ ფაქტორზე, რომლებიც ფოთლის სითხით დასველების ხარისხს განსაზღვრავენ. ჩატარებული ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ 30 დინი/სმ-ზე უფრო მაღალი ზედაპირული დაჭიმულობის სითხეები ვერ ასველებენ *Zebrina purpusii*-ის ფოთლებს, ამიტომ ისინი ინფილტრაციით ვერ აღწევენ ფოთოლში. 30 დინი/სმ-ზე ნაკლები ზედაპირული დაჭიმულობის სითხეები კი მომენტალურად შედიან ბაგეების ზერელებში (შედარებისათვის: სუფთა წყლის

ზედაპირული დაჭიმულობაა 72.5 დინი/სმ, ხოლო ეთანოლის — 22 დინი/სმ). აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ გარემოს დამბინძურებლების დიდი ნაწილი ფოთოლში სწორედ ხსნარის სახით აღწევს.

მსხლის ფოთლების ქვედა, ბაგეებით მდიდარი ზედაპირიდან  $\alpha$ -ნაფტილმარმეჟას შეღწევა მნიშვნელოვნად ძლიერდება სინათლის გავლენით, რომელიც, როგორც ცნობილია, დიდ გავლენას ახდენს ბაგეების გახსნაზე. ისევე როგორც ბუნებრივი ფიტოკორმონები, ზრდის რეგულატორი  $\alpha$ -ნაფტილმარმეჟა საგრძობლად მოქმედებს ბაგეების გახსნის მექანიზმზე. ექსპერიმენტულად ნაჩვენებია, რომ *Stachyurpheta indica*-ს ფოთლებში  $\alpha$ -ნაფტილმარმეჟა და მისი მეტაბოლიტი — 2-ნაფტოქსიიმარმეჟა თრეუნივენ ჩამკეტ უჯრედებში კალიუმის დაგროვებას და ამის გამო მნიშვნელოვნად ამცირებენ ბაგეების გახსნის სიგანეს. ფოთლებით ტოქსიკანტების შთანთქმის დროს ბაგეების მნიშვნელოვან როლზე მიუთითებს აგრეთვე პერბიციდის — ქარვის მჟავას 2,2-დიმეთილჰიდრაზიდის შეღწევა ლობიოს იზოლირებულ ფოთლებში. ეს პროცესი განათების ინტენსივობასთან ერთად ძლიერდება, რაც თავის მხრივ ბაგეების გახსნას ასტიმულირებს.

აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ფოთლებით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის პროცესში ბაგეების როლის შესახებ ურთიერთსაპირისპირო მოსაზრებები არსებობს. მაგ., ზოგიერთი მკვლევარი თვლის, რომ ფოთოლში ბაგეებით შეღწეული ქსენობიოტიკის რაოდენობა ფრიად უმნიშვნელოა. ამასთან, საკმაოდ ხშირად, ერთი და იგივე ნაერთისათვის სრულიად საპირისპირო ხასიათის მონაცემებია მიღებული. მაგ., მინდვრის ნარის სხვადასხვა ეკოტიპები, რომლებიც ერთმანეთისაგან ფოთლის ზედაპირის ერთეულზე ბაგეების რაოდენობით განსხვავდებიან, ერთნაირად ითვისებენ ფოთლებიდან 2,4-D-ს და ეს პროცესი არ არის დამოკიდებული ბაგეების ზერელების ფართობზე და მათი განლაგების სიხშირეზე, ე.ი. ფოთლის ზედაპირზე ბაგეების არსებობა გავლენას არ ახდენს ფოთოლში 2,4-D-ს შეღწევის პროცესზე. ამავე დროს, სხვა კვლევებით ნაჩვენებია, რომ ინტენსიური განათების პირობებში (რაც თავისთავად ბაგეების გახსნას იწვევს) ამ პერბიციდის ფოთოლში შეღწევა უფრო ინტენსიურად ხდება. ჰიპოტომატური ფოთლების (ასე უწოდებენ ფოთლებს, რომლებსაც ბაგეები მხოლოდ ერთ, ქვედა ზედაპირზე აქვთ განლაგებული) აბაქსიალური ზედაპირი 2,4-D-ს უფრო ინტენსიურად შთანთქავს, ვიდრე ადაქსიალური, რაც მიუთითებს, რომ პერბიციდი ფოთოლში უპირატესად ბაგეების ზერელებით აღწევს.

ბაგეების საშუალებით ფოთოლში შეღწევა არაორგანული აირებისათვის ძირითადი გზაა. მაგ., ბაგეების აპარატით ნახშირორჟანგი 100-ჯერ უფრო სწრაფად შთანთქმება, ვიდრე კუტიკულით ზოგიერთი მცენარეებისათვის (გვიმრები, წყალმცენარეები და სხვ.), რომელთაც ბაგეები არ გააჩნიათ, ფოთლებში ტოქსიკანტების მოხვედრის ერთადერთ გზას ეპიდერმისის კუტიკულის გავლით შეღწევა წარმოადგენს.

კუტიკულა წარმოადგენს აკისმაგვარ ცვილისებრ ფენას, რომელიც ფარავს თითქმის ყველა უმაღლესი მცენარეების მიწისზედა ნაწილებს, მათ შორის ფოთ-

ლების ეპიდემიის უჯრედების გარე ზედაპირსაც. კუტიკულის ძირითადი ფუნქციაა შეამციროს წყლის აორთქლების (ტრანსპირაციის) ინტენსიუობა და ამით დაიცვას მცენარე გაუწყლობისაგან. დადგენილია, რომ კუტიკულა განჭოლვადია არამარტო ლიპოფილური ნივთიერებებისათვის, არამედ აირების ჰიდროფობული მოლეკულებისათვისაც.

ფოთლების კუტიკულის სისქე და ქიმიური შედგენილობა სხვადასხვა საზღვრებში იცვლება და დამოკიდებულია მცენარის სახეობაზე, ასაკზე, დეროზე ფოთლების განლაგებაზე, აგრეთვე გარემოს ფაქტორებზე — ტემპერატურაზე, ტენიანობაზე და სხვ. კუტიკულის ძირითადი ნაწილი ცვილით გაჟღენთილი კუტინისაგან შედგება. ცვილი წარმოადგენს გრძელჯაჭვიანი ალკანების, სპირტების, კეტონების, კარბონმჟავების, ეთერებისა და ესთერების რთულ ნარევეს. კუტიკულის გარე ზედაპირზე ცვილის შემადგენლობაში ჭარბობენ ალკანები და ესთერები. აღნიშნული კომპონენტების გარდა, ცვილში ზოგჯერ შედიან გრძელჯაჭვიანი დიკეტონები ( $C_{28}-C_{31}$ ), ტრიტერპენოიდები (მაგ., ურსოლის მჟავა), ლიტერპენები, გლიცერიდები და ფენოლური ნაერთები. ცვილის ძირითადი მასა, რომლითაც დაფარულია ფოთოლი, შედგება გრძელჯაჭვიანი განუტოტველი ალკანებისაგან, რომლებიც ნახშირბადატომთა კენტ რიცხვს ( $C_{31}-C_{33}$ ) შეიცავენ. მათ შორის დიდი რაოდენობითაა  $n$ -ალკანები —  $C_{29}H_{60}$  და  $C_{31}H_{64}$  აგრეთვე  $n$ -კარბონმჟავების ესთერები პირველად და მეორეულ სპირტებთან.

ფოთლის კუტიკულის სისქე მცენარის ასაკზე დამოკიდებულებით იცვლება. ახალგაზრდა ფოთლების კუტიკულა ჩვეულებრივ თხელია და უფრო არათანაბრადაა განვითარებული, ვიდრე ასაკიანი ფოთლების. ფოთლების ასაკთან ერთად კუტიკულარული ცვილის რაოდენობაც იზრდება. კუტინის სინთეზი მხოლოდ ფოთლების მთლიანი გაშლის შემდეგ წყდება. ამით აიხსნება ის ფაქტი, რომ ტოქსიკურ ნაერთებს ახალგაზრდა ფოთლები ბევრად ინტენსიურად შთანთქავენ, ვიდრე ზრდასრული. მაგ., ნაჩვენებია, რომ ფოთლების ასაკის ზრდასთან ერთად მცირდება ქარვის მჟავას 2,2-დიმეთილპიდრაზიდის შეღწევა ლობიოს ფოთლებში. ანალოგიური შედეგებია მიღებული 2,4-D-ს, ნიტროფენის ინდოლქმარმჟავას და სხვა ტოქსიკანტების ფოთლის ადაქსიალური ზედაპირით შთანქმის პროცესის შესწავლისას. კუტიკულის სისქე ყოველთვის არ არის ცვილის შემცველობის რაოდენობრივი მაჩვენებელი. მაგ., ორი ჯიშის ქლიაყი (*Prunus domestica*) ფოთლების ადაქსიალური კუტიკულა უფრო სქელია (1.6-2.0 ნმ), ვიდრე აბაქსიალური (1.2 ნმ), მაგრამ ორივე მცენარის შემთხვევაში ფოთლის ადაქსიალური ზედაპირის ყოველ 1 სმ<sup>2</sup>-ზე 34-35 მკგ ცვილია, ხოლო აბაქსიალურზე 47-52 მკგ.

ტოქსიკური ნაერთების უმეტესობა მაღალი ლიპოფილურობით გამოირჩევა, ამიტომ მათთვის ფოთლების ცვილის ლიპოფილური ზედაპირი აქტიურად სორბენტს წარმოადგენს. ეს ნაერთები კუტიკულაში დიდი რაოდენობით გროვდებიან და თანდათან ფოთლის შიდა უჯრედებში აღწევენ. არაა გამორიცხული რომ აღსორბიებული ტოქსიკანტის მოლეკულები კუტიკულიდან ეპიდემიისი

უჯრედების შიგნით ცვილის ცალკეულ კომპონენტებთან ერთად მიგრირებენ და შემდგომ შიდაუჯრედულ მემბრანებში ერთვებიან. არსებობს მოსაზრება, რომლის თანახმადაც კუტიკულის ცვილისებრი ფენა წარმოადგენს თავისებურ ბარიერს, რომელიც ზღუდავს ტოქსიკური ნაერთების ფოთლებში შეღწევას. ეს თვალნათლივანაჩვენები ბარდის (*Pisum sativum*) იზოგენური ხაზების წარმომადგენლების მაგალითზე, რომლებიც გენეტიკურად ცვილს სხვადასხვა რაოდენობით წარმოქმნიან. ფენოტიპურად ეს ფოთლებზე განსხვავებული სისქის კუტიკულით გამოიხატება. მცენარეების უცვილო ფოთლებზე დატანისას პესტიციდები კარბოფოსი და ტეტრინიტროფოსი ძალიან სწრაფად, უკვე 3—4 საათში თითქმის მთლიანად აღწევენ ფოთლების ფოტოსინთეზირებად ქსოვილებში, მაშინ როდესაც სხვა, ცვილიანი ფოთლების მქონე მცენარეებში ეს პრეპარატები ძალიან მცირე შეღწევადობით ხასიათდებიან. აგრეთვე ნაჩვენებია, რომ ვეროპული *Ulex europaeus* ნაზარდების კენწეროს ზედაპირიდან ცვილის მოცილების შემდეგ რადიოაქტიური სისტემური პერბიციდის —  $^{14}\text{C}$ -პიკლორამის შთანთქმის ინტენსივობა 3.5-ჯერ იზრდება.

კუტიკულაში ტოქსიკანტის შეღწევის ინტენსივობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული თვით ნივთიერების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, და პირველ რიგში, მის ლიპოფილურობაზე. მაგ., სუფრის ჭარხლის (*Beta vulgaris*) ფოთლებში სწრაფად აღწევს პესტიციდი პირანოზი, ხოლო მასზე ნაკლებად ლიპოფილური ფენმედიფამი და ბენზტიაზურონი უმნიშვნელო რაოდენობით შთაინთქმება. მრავალ ორგანულ ტოქსიკანტს შეუძლია შეცვალოს კუტიკულის ცვილის შემადგენლობა და სტრუქტურა, რის შედეგადაც ტოქსიკური ნაერთებისათვის კუტიკულის შეღწევადობა შესაძინევად იზრდება. ამის მაგალითია დიმეთილსულფოქსიდი, რომელიც გამხსნელია ცვლილებისათვის და კუტიკულაში განსაკუთრებით მაღალი შეღწევის სიჩქარით ხასიათდება.

ფოთოლში შეღწევისას მცირე ზომის მოლეკულებმა უფრო ადვილად უნდა გადალახონ კუტიკულის ბარიერი, მაგრამ კორელაცია შეღწევადობასა და მოლეკულურ მასას შორის ყოველთვის არ ვლინდება. როგორც აღმოჩნდა, ფოთლების კუტიკულა შეღწევადია ისეთი დიდი ზომის მოლეკულებისთვისაც, როგორებიცაა ზედაპირულად-აქტიური ნივთიერებები, გრძელჯაჭვიანი ცხიმოვანი მჟავები და ალკანები, პეპტიდები, მარილები, 2,4-D-ს გრძელჯაჭვიანი ამინები და სხვ.

კუტიკულის გავლით ფოთოლში შეღწევის პროცესში მეტად მნიშვნელოვანია ტოქსიკური ნივთიერებების აგრეგატული მდგომარეობაც. ფუნგიციდ პირაკარბოლიდის მაგალითზე ნაჩვენებია, რომ ამ ნაერთის ფოთოლში შეღწევადობა დისპერსიულობის ხარისხის მატებასთან ერთად შემდეგი თანმიმდევრობით იზრდება:

ფუნგილი<სუსპენზია<ემულსია<ჰემარიტი ხსნარი.

იზოგენური ნივთიერებების ხსნარების ფოთლებში შეღწევადობის ინტენსივობა ბევრად და დამოკიდებული ხსნარის pH-ზე. ისეთი ტოქსიკური ნაერთების



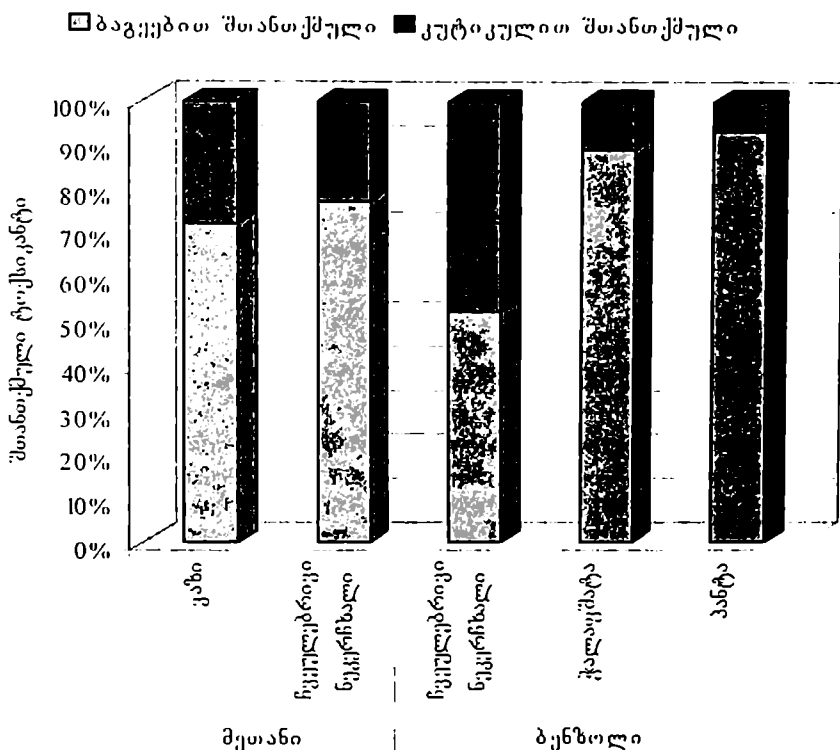
მაგალითზე, როგორებიცაა პიკლორამი, 2,4,5-T, 2,2-დიმეთილპილრაზიდი, α-ნაფტილიმპარმეჟა და სხვ., გამოვლინდა მეტად საინტერესო კანონზომიერება: უცხო ნაერთთა მოლეკულები, განსაკუთრებით სუსტი მჟავები, უმეტესად არადისოცირებულ მდგომარეობაში შთაინთქმებიან, ვინაიდან არაიონური სახით მათ ნაკლები პოლარობა გააჩნიათ, და შესაბამისად, მათთვის კუტიკულის ცვილის ლიპოფილური ბარიერის გადალახვა უფრო იოლია.

ტოქსიკური ნაერთები ძალიან ადვილად აღწევენ დაზიანებულ ან დასნებოვნებულ ფოთლებში. ამის ერთ-ერთი თვალსაჩინო მაგალითია პათოგენით დასნებოვნებული კიტრის (*Cucumis sativus*) ფოთლებში რადიოაქტიური ნახშირბადით ნიშანდებული ამინომჟავური პესტიციდის — N-ლაუროილ-L-ვალინის დიდი რაოდენობით შეღწევა, მაშინ როდესაც ჯანმრთელ მცენარეზე აღნიშნული ტოქსიკანტის დასხურების შემდეგ რადიოაქტიური ნიშანი მცენარეში მხოლოდ კვალის სახითაა აღმოჩენილი.

მეტად საინტერესო შედეგებია მიღებული ჰიპოსტომატური ფოთლების მიერ ნახშირწყალბადების შთანთქმის შესწავლისას. ნიშანდებული ნახშირწყალბადების — [<sup>14</sup>C]მეთანისა და [1-<sup>6-14</sup>C] ბენზოლის გამოყენებით ჩატარდა სპეციალური გამოკვლევა, რათა ერთმანეთს შედარებოდა ბაგეებითა და კუტიკულით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის ინტენსივობები (ნახ.3.3). ამ მიზნით რადიოაქტიური ნაერთების შემცველ ატმოსფეროში ათავსებდნენ ჩვეულებრივი ნეკრჩხლის, კაკასიური ველური მსხლის (*Pyrus caucasica*), ვაზის (*Vitis vinifera*) და ჭალაფშატას (*Elaeagnus angustifolia*) ფოთლებს. ნახშირწყალბადთან კონტაქტი ხდებოდა ფოთლის ფირფიტის მხოლოდ ერთ-ერთ მხარესთან. ექსპონირებული ფოთლებიდან გამოყოფილი მეტაბოლიტების ჯამურმა რადიოაქტიურობამ აჩვენა, რომ ფოთლებით აიროვანი ალკანებისა და არომატული ნახშირწყალბადების შთანთქმა უპირატესად ბაგეებით ხორციელდება, თუმცა ტოქსიკური ნაერთის განსაზღვრული რაოდენობა კუტიკულის გავლითაც აღწევს ფოთლის ქსოვილებში.

ანალოგიური შედეგებია მიღებული მთელი რიგი ჰერბიციდებისათვის (α-ნაფტილიმპარმეჟა, 2,4-D, პიკლორამი, შარდოვანას წარმონაქმნები), რომლებიც ფოთლებზე ხსნარის სახით იქნა დატანილი. ამ ექსპერიმენტებშიც მიიღეს, რომ ტოქსიკური ნაერთები ფოთლების აბაქსიალური, ბაგეებით მდიდარი ზედაპირით უფრო ინტენსიურად შთაინთქმება, ვიდრე აბაქსიალურით. ეს ერთხელ კიდევ მიუთითებს ბაგეების აქტიურ როლზე ტოქსიკური ეგზოგენური ნაერთების შთანთქმის პროცესში. როგორც ზევით აღინიშნა, ფოთლების ქვედა ზედაპირზე კუტიკულა უფრო თხელია, ვიდრე ზედაზე და ალბათ ნაწილობრივ ეს ფაქტორიც განაპირობებს ფოთლის აბაქსიალური ზედაპირიდან ტოქსიკური ნაერთების შეღწევის გაადვილებას.

ფოთლის ტრიქომის უჯრედებს, რომლებიც წარმოადგენენ ბუნების, მეჭეჭების, ქერცლის და სხვა სახის ეპიდერმისის გამონაზარდებს, ასევე შეუძლიათ



ნახ. 3.3. პიპოსტომატური ფოთლებით [ $^{14}\text{C}$ ] მეთანისა (ხვედრითი რადიოაქტიურობა  $1 \mu\text{Ci}/\text{მლ}$ ) და [ $1-6-^{14}\text{C}$ ] ბენზოლის (ხვედრითი რადიოაქტიურობა  $4.9 \text{ mCi}/\text{მლ}$ ) შთანთქმა. მეთანის კონცენტრაცია ჰაერში —  $1.5\%$  (მოცულობით), ექსპოზიცია 8 სთ. ბენზოლის კონცენტრაცია ჰაერში  $2 \text{ მგ}/\text{ლ}$ , ექსპოზიცია 4 სთ.

მონაწილეობა მიიღონ ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმაში. *Lithocarpus densiflorus*-ის ახალგაზრდა ფოთლების მიერ პერბიციდ  $^{14}\text{N}$ -ტრიკლოპირის შთანთქმის მაგალითზე ნაჩვენებია კორელაცია ფოთლების ადაქსიალურ ზედაპირზე ვარსკლავისებური ტრიქომის რიცხვსა და შთანთქმული პერბიციდის რაოდენობას შორის.

ტოქსიკური ნაერთების ფოთლებში მოხვედრის ერთ-ერთი შესაძლო მექანიზმია აგრეთვე ექტოდერმებში მათი მოლეკულების შეღწევა. ექტოდერმები

უჯრედის კედლებს შორის საცარიელს წარმოადგენენ, რომლებიც შევსებულია ცელულოზური ფიბრილების არხებით, რომლებიც პლანტულემებს კუტიკულასთან აერთებენ. ამ არხებს წყალში ხსნადი ნივთიერებების ფოთლით შთანთქმის პროცესში და ასევე მათი ექსკრეციის დროსაც გამტარი გზების მოვალეობა შეუძლიათ შეასრულონ. მაგ., ნაჩვენებია, რომ ხორბლისა (*Triticum vulgare*) და ლობიოს ფოთლებით ტრიითუმით დანიშნული  $[^3\text{H}]$  2,4-D-ს ადსორბცია ძირითადად ეპიდერმული უჯრედების ანტიკლინარულ კედლებზე ხდება, ანუ ისეთ ადგილებში, სადაც ექტოდესმებია განლაგებული. ამ პერბციდის ტოქსიკანტის შთანთქმის ინტენსივობა ექტოდესმების რაოდენობის პირდაპირპროპორციული აღმოჩნდა.

### 3.3 ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმა ფესვებით

ფესვებით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის მექანიზმი პრინციპულად განსხვავდება ფოთლებში მიმდინარე ანალოგიური პროცესებისაგან. ფესვებიდან მცენარეში ნივთიერებების შეღწევა ხდება მხოლოდ ახლგაზრდა ფესვების ბუსუსების გაუკორპელები უჯრედის კედლით, რომელსაც კუტიკულა არ გააჩნია. ამიტომ ფესვები უცხო ნაერთებს ბევრად უფრო ნაკლები შერჩევითობით შთანთქავენ, ვიდრე ფოთლები.

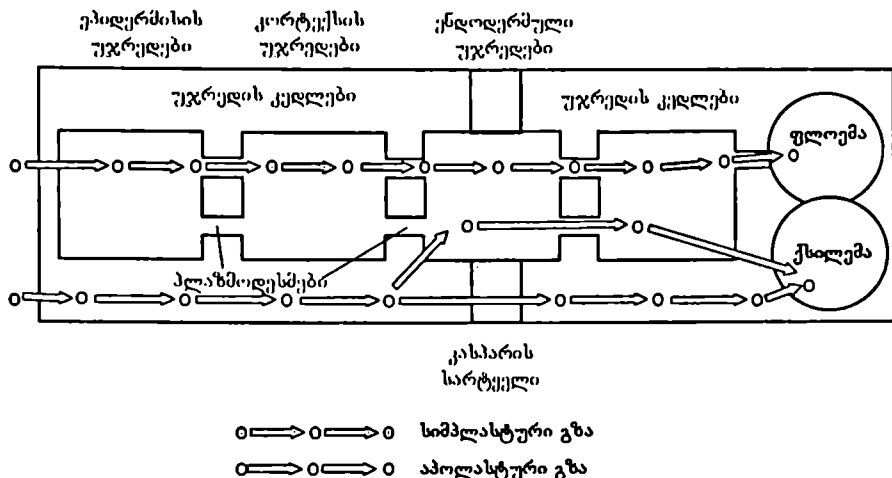
ფესვებში ტოქსიკური ნაერთები, ბუნებრივი საკვები ნივთიერებების მსგავსად, წყლის უწყვეტ ნაკადთან ერთად შედიან. ისინი ძირითადად თავისუფალი უჯრედ-შორისი სივრცის — აპოპლასტის გავლით გადაადგილდებიან და აღწევენ სატრანსპორტო ქსოვილში — ქსილემაში (ნახ.3.4). ტოქსიკანტების შედარებით მცირე რაოდენობა სიმპლასტური გზით — უჯრედებისა და მათი შემაერთებული პლანტოდესმების გავლით მოძრაობს და ფლოემაში ხვდება.

ქსილემა წარმოადგენს ჭურჭელს “ცალმხრივი მოძრაობით”, რომელიც მიმართულია ფესვებიდან ზემოთ — ყლორტებისაკენ, ხოლო ფლოემით შესაძლებელია “ორმხრივი მოძრაობა”, და ამ ჭურჭლით ნივთიერებებს შეუძლიათ იმოძრაონ როგორც ქვემოთ (ბაზიპეტალურად), ასევე ზემოთ (აკროპეტალურად). ფესვებში შეღწეული ტოქსიკური ნაერთები ქსილემისაკენ ძირითადად აპოპლასტურად, შემდეგი გზით გადაადგილდებიან:

ფესვების ბეწვები → უჯრედშორისი სივრცე → კორტექსის უჯრედების კედლები → ენდოდერმისი → კასპარის სარტყელის გადაღახვა → ქსილემა.

კასპარის სარტყელი, რომელიც ჭურჭლების ცენტრალური არხის ირგვლივა განლაგებული, ფესვებში ისეთივე ფუნქციას ასრულებს, როგორსაც კუტიკულის ცვილის ფენა ფოთლებში — მცენარეებს იცავს წყლის დანაკარგისაგან. ლიპოფილურობის გამო კასპარის სარტყელი ტოქსიკური ნაერთების ტრანს-

პორტირებისას დამატებით წინააღმდეგობას ქმნის, რომლის გადალახვა ოსმოსით, ან სიმპლასტური გზით მისი გარშემოულით ხერხდება.



ნახ. 3.4. მცენარის ფესვში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევის შესაძლო გზები.

აპოპლასტში, რომელიც მიკროკაკილარების სისტემას წარმოადგენს, ნივთიერებები დიფუზიის გზით აღწევენ. ამ კაკილარებით ისინი შეუფერხებლად გადაადგილდებიან, გზაში მემბრანული ბარიერები არ ხვდებათ, რაც სიმპლასტური ტრანსპორტირებისათვის არის დამახასიათებელი.

ქსენობიოტიკები ფესვებით ორი ფაზით შთანთქმდება. პირველ, სწრაფ ფაზაში ხდება ნივთიერებების დიფუზია გარემოდან ფესვებში, ხოლო მეორე ფაზა წარმოადგენს მცენარეთა ქსოვილებში ნივთიერებების ტრანსფორმაციისა და დაგროვების ნელ პროცესს. შთანთქმის პროცესის ინტენსივობა დამოკიდებულია ტოქსიკანტის მოლეკულურ მასაზე, კონცენტრაციაზე, პოლარობაზე, pH-ზე, ტემპერატურაზე, ნიადაგის ტენიანობაზე და მრავალ სხვა ფაქტორზე.

კონცენტრაცია დიფუზიური პროცესების განმსაზღვრელი ფაქტორია. ამდენად, ვინაიდან ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის საწყის ეტაპზე ფესვების აპოპლასტში ნივთიერებების დიფუზიური შეღწევა ხდება, პროცესის სიჩქარე ნიადაგში ტოქსიკანტის კონცენტრაციის პირდაპირპროპორციულია.

ტემპერატურა ასევე არსებითია ორგანული ტოქსიკანტების ფესვებით შთანთქმის საერთო პროცესში. ეს ფაქტორი ძირითადად შთანთქმის მეორე ფაზაზე ახდენს გავლენას, რადგან დიფუზიის პროცესი თითქმის არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. ტემპერატურული კოეფიციენტი, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ იზრდება რეაქციის სიჩქარე ტემპერატურის ყოველი 10°C-ით

გაზრდის დროს, დიფუზიური პროცესებისათვის შედარებით დაბალი სიდიდისაა (1.2—1.4). პასიური დიფუზიური შთანთქმის შემდეგ აქტიური გადატანა მიმდინარეობს, რაც განპირობებულია ტრანსპირაციით, მეტაბოლური გარდაქმნებით და ნოთიერებების აკუმულაციის პროცესებით. ტრანსპირაციული ნაკადის ინტენსივობა ტემპერატურის აწევასთან ერთად იზრდება. ასევეა ფერმენტული რეაქციებიც (ტემპერატურული კოეფიციენტის მნიშვნელობა მათთვის 1.3-დან 5.0-მდე იცვლება), რასაც საბოლოო ჯამში ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის პროცესის ინტენსივობის გაზრდა მოჰყვება.

ნოთიერების მოლეკულური მასა ტოქსიკური ნაერთების ფესვებში შესვლის პროცესის ძირითადი მალიმიტირებელი ფაქტორია. მცენარეები შედარებით ადვილად შთანთქავენ ისეთ ორგანულ ნოთიერებებს, რომელთა მოლეკულური მასა 1 kD-ს არ აღემატება. ბამბისა და ჩვეულებრივი წიწკის (*Capsicum annuum*) ფესვებით სხვადასხვა მოლეკულური მასების პოლიეთილენგლიკოლის შთანთქმის პროცესის გამოკვლევით დადგენილია, რომ ფესვებში უფრო დიდი ზომის მოლეკულებსაც შეუძლიათ შეღწევა. მაგ., მცენარეები ფესვებით შთანთქავენ პოლიეთილენგლიკოლის ისეთ ფორმებსაც, რომელთა მოლეკულური მასა 4-დან 20 kD-მდეა, თუმცა, ბუნებრივია, მცენარეში პოლიეთილენგლიკოლის შეღწევა პოლიმერის მოლეკულური მასის უკუპროპორციულია. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ფესვების მექანიკური დაზიანების დროს პოლიეთილენგლიკოლი მცენარეებში უფრო სწრაფად და საკმაოდ დიდი რაოდენობით შედის. აგრეთვე დადგენილია, რომ ლობიოსა და ბამბის აღმონაცენებით შთანთქმული პოლიეთილენგლიკოლი მცენარეში თავისი მოლეკულური მახასიათებლების შეუცვლელად გადაადგილდება (ე.ი. არ გარდაიქმნება). სხვა ავტორების მონაცემების თანახმად, ფესვებით მაღალმოლეკულური ნაერთების შთანთქმა შესაძლებელია მხოლოდ მათი მოლეკულების დეგრადაციის შემდეგ. ბამბაზე, ბოლოკსა (*Raphanus sativus*) და სტაფილოზე (*Daucus carota*) ჩატარებულმა გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ ნიშანდებული მაღალმოლეკულური ჰუმინის მჟავების ძირითადი ნაწილი ფესვების ზედაპირზე აღსორბირდება, მცირე ნაწილი ეპიდერმისის უჯრედებში ხდება, მაგრამ უფრო შიდა ქსოვილებში ეს მაკრომოლეკულები ვერ აღწევენ. ფულვომჟავას უფრო პატარა ზომის მოლეკულები ღრმად შედიან და ქსილემის ცენტრალურ ცილინდრს აღწევენ. მაგრამ, ამ შემთხვევაშიც ფულვომჟავების ნიშანდებული ნახშირბადი მცენარის მიწისზედა ნაწილში ვერ აღწევს. ამავე მოსაზრებას ადასტურებს რადიოაქტიური პოლიურეთანის გამოყენებით ჩატარებული ექსპერიმენტებიც — ნიადაგში შეტანილი პოლიმერის ნიშანდებული ნახშირბადი მხოლოდ მაკრომოლეკულების ნაწილობრივი დესტრუქციის შემდეგ შთანთქმება პომიდორის (*Lycopersicum esculentum*), კიტრისა და მარწყვის (*Fragaria vesca*) ფესვთა სისტემებით.

ფესვებით საკმაოდ ფართო სპექტრის პიდროფილური და ლიპოფილური ორგანული მოლეკულები (ალიფატური, არომატული და პოლიციკლური ნახშირწყალბადები, სპირტები, ფენოლები, ამინები და სხვ.) შთანთქმება. ფესვების

ისეთი ნაერთებიც შეიწოვება, რომელთაც განსაკუთრებით დაბალი წყალში ხსნადობა ახასიათებს (მაგ., პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები). ფესვით შთანთქმის პროცესში საკმაოდ დიდი მნიშვნელობა აქვს ნაერთების ლიპოფილურობას. ცნობილია, რომ ყველაზე უფრო აქტიურად შთანთქმება ზომიერად ჰიდროფობული ნივთიერებები, რომელთა  $\log K_{ow}$  მაჩვენებლის მნიშვნელობა 0.5-დან 3.0-მდე ზღვრებს შორისაა.

რიზოსფეროს pH მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მთელ რიგ ისეთ პროცესებზე, რომლებიც არსებითაა ნიადაგიდან ფესვთა სისტემით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმაზე, კერძოდ, pH-ის მაჩვენებელზე დამოკიდებულია:

- იონოგენური მოლეკულების დისოციაციის ხარისხი;
- ნიადაგის ნაწილაკების მიერ ტოქსიკური ნაერთების ადსორბცია;
- ნადაგში ტოქსიკანტების მოლეკულების ძვრადობა;
- ფესვების მშთანთქავი ქსოვილების შეღწევადობა.

მცენარეების ფესვებში ტოქსიკანტების შეღწევის პროცესზე pH-ის გავლენის მაგალითად შეიძლება მოიყვანოთ შერიისა (*Avena sativa*) და სოიის ფესვებით ინსექტიციდ პიკლორამის შთანთქმა. გარემოს pH-ის 3.5-დან 4.5-მდე ცვლილების დროს შთანთქმული ტოქსიკანტების რაოდენობა მკვეთრად მცირდება, ხოლო pH-ის შემდგომი ცვლილება 4.5-დან 9.5-მდე დიაპაზონში მხოლოდ უმნიშვნელო გავლენას ახდენს შთანთქმის პროცესზე. პიკლორამის დისოციაციის ხარისხი pH 3.5-ზე მხოლოდ 20%-ს შეადგენს, ხოლო pH 4.5-ზე ინსექტიციდის იონიზირებული მოლეკულების შემცველობა 71.5%-ს აღწევს. აქედან გამომდინარეობს, რომ პიკლორამი მცენარეთა ფესვებით უპირატესად არაიონური სახით შთანთქმდება. უნდა აღინიშნოს, რომ იონოგენური ნაერთებისათვის ფოთლებში და ფესვებში ერთნაირი კანონზომიერება ვლინდება: ასეთი ტოქსიკური ნაერთები ორივე ორგანოს მიერ უმთავრესად არადისოცირებული, ე.ი. უმუხტო ფორმით შთანთქმდება.

ნიადაგზე ტოქსიკანტების ადსორბციისა და დესორბციის პროცესები, აგრეთვე ნიადაგში მათი გადაადგილება, ასევე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული გარემოს მჟავიანობაზე. მაგ., კერბიციდი ატრაზინის ნიადაგიდან მოცილება უკეთესად ხდება სუსტ ფუძე არეში (pH 8.3), ხოლო სხვა კერბიციდები — ქლორამბენი და დიკამბა უფრო მაღალი ხარისხით ექსტრაგირდება, როდესაც ნიადაგში სუსტი მჟავა არეა (pH 4.1). კიდევ უფრო მეტი მნიშვნელობა აქვს pH-ს მძიმე მეტალების ნაერთებისათვის, რომლებიც, როგორც წესი, დაბალ pH-ზე წყალში გაცილებით მეტ ხსნადობას ამჟღავნებენ.

ფესვებში ორგანული დამბინძურებლების მოლეკულები წყლის ნაკადთან ერთად შეიღწევა, ამიტომ ცხადია, რომ ფესვთა სისტემით მათი შთანთქმის ინტენსივობა ნიადაგის ტენიანობითაც განისაზღვრება. ნიადაგის წყლის პოტენციალის დაქვეითების პარალელურად მცირდება მცენარის მიერ შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთების რაოდენობა. ნიადაგის ტენი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ნიადაგის მიერ ტოქსიკანტების ადსორბციის და დესორბციის პროცესში. ნიადაგიდან

ორგანული გამხსნელებით სიმეტრიული ტრიაზინების, ატრაზინისა და ქლორამბენის ექსტრაქციის დროს, გამხსნელში წყლის დამატება ექსტრაგირებული ჰერბიციდების რაოდენობას საგრძნობლად ზრდის და ტოქსიკანტების ნიადაგიდან მთლიანად მოცილების აუცილებელ პირობას წარმოადგენს.

ფესვებით ორგანული ტოქსიკანტების შთანთქმის პროცესზე არსებით გავლენას ახდენს აგრეთვე ნიადაგის ქიმიური შემადგენლობა. ნაჩვენებია, რომ ნიადაგში ორგანული ნივთიერებების შემცველობის ზრდასთან ერთად მცირდება ჰერბიციდების პრომეტრინის, ფლუმეთურონისა და ტრიფლურალის ტოქსიკურობა. ანალოგიური შედეგებია მიღებული სოიის აღმონაცენებზე სიმეტრიული ტრიაზინების (ქლორ-, მეთილთიო- და მეთოქსიტრიაზინების) 13 წარმომადგენლის მოქმედების შესწავლის დროს. ამავე დროს აღინიშნება საინტერესო კანონზომიერება: ჰიდროფილური ტოქსიკანტების ტოქსიკურობა ნაკლები ხარისხით ითრგუნება, ვიდრე ლიპოფილურის. საგარაუდოა, რომ ნიადაგში ორგანული ნივთიერებების შემცველობის გაზრდა ხელს უწყობს ლიპოფილური ჰერბიციდების მოლეკულების ნიადაგით ადსორბციას, რის შედეგად გაძიებულია ფესვებით ტოქსიკანტების შთანთქმის პროცესი და, მაშასადამე, უჯრედებში ტოქსიკური კონცენტრაციის შესაბამისი დონე არ მიიღწევა.

ყველა ის ფაქტორი, რომელიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ტრანსპირაციისა და მეტაბოლიზმის პროცესებზე, მეტ-ნაკლებად მოქმედებს ფესვებით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმაზეც. ასეთი ფაქტორია, მაგ., მცენარეების მინერალური კვება. ტრანსპირაციის სტიმულატორი — შარლოვანა პომიდორის მცენარის ფესვებით ატრაზინის შთანთქმის პროცესს აძლიერებს. სუნთქვის ინჰიბიტორი — ციანიდი  $10^{-3}$  M კონცენტრაციის დროს ხორბლისა და შერიის აღმონაცენების მიერ ტრიქლორმარმჟავას შთანთქმას დაახლოებით 30%-ით ამცირებს. 2,4-D მაღალი კონცენტრაციების დროს მოქმედებს, როგორც მეტაბოლიზმის ინჰიბიტორი. ეს ჰერბიციდი  $10^{-3}$  M კონცენტრაციით ხორბლის აღმონაცენებით ტრიქლორმარმჟავას შთანთქმას 70%-ით თრგუნავს, ხოლო შერიის აღმონაცენებზე მოქმედებისას იგივე პროცესს 54%-ით აფერხებს. ფესვებში ტოქსიკური ნაერთების შესვლაზე სხვადასხვა საკვები ელემენტების არსებობა ან მათი უკმარისობა განსხვავებულად მოქმედებს. მაგ., ნაჩვენებია, რომ ლობიოს ნაზარდებში ჰერბიციდების — მეთილ-2-ბენზიმიდაზოლკარბამატისა და მეთილთიოფანატის შეღწევა მცირდება საკვებ ხსნარში აზოტის, გოგირდისა და ბორის ნაკლებობის დროს. მაგრამ აზოტის, ბორის და კალიუმის დეფიციტის დროს იზრდება ამავე მცენარეში ჰარათიონის შეღწევის ინტენსივობა. ხორბლის ფესვებით ჰერბიციდი ბუტურონის შთანთქმა მცირდება აზოტის, ფოსფორის, კალიუმის ან მაგნიუმის სიმცირის დროს. თუმცა შესაძლებელია, რომ ფესვებით შთანთქმის პროცესი საერთოდ არ იყოს დამოკიდებული საკვებ ელემენტებზე. მაგ., მინერალური მარილები გავლენას არ ახდენს სიმინდის იზოლირებულ ფესვებში ბენზიმიდაზოლისა და თიოფანატის შეღწევის პროცესზე.

### 3.4 ტოქსიკური ნაერთების გადაადგილება მცენარეში

მცენარეებში ფესვებით და ფოთლებით შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთები იმავე ფიზიოლოგიური პროცესების შედეგად გადაადგილდებიან, რომელთა საშუალებითაც საკვები ნივთიერებების ტრანსპორტი ხორციელდება. მცენარეში ნივთიერებების ტრანსლოკაციას ორი მამოძრავებელი ძალა ემსახურება, კერძოდ, ესენია:

- ტრანსპირაციული ნაკადი — ფესვიდან ყლორტებისაკენ მიმართული წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების ტრანსპორტი, რომელიც ქსილემაში განლაგებული ჭურჭლებისა და ტრაქეიდების გავლით ხორციელდება;
- ასიმილატების ნაკადი — ფოთლებიდან ქვემოთ (ყლორტის ღეროსა და ფესვისაკენ) და ზემოთ (ყლორტების კენწეროებისა და ნაყოფებისაკენ) განლაგებული ორგანოებისაკენ მიმართული ნივთიერებების ტრანსპორტი, რომელიც ფლოემის საცრისებური მილების გავლით მიმდინარეობს.

ტრანსპირაციული ნაკადი ფოთლებიდან წყლის აორთქლებით არის გამოწვეული. ტრანსპირაცია, ანუ მცენარის ფოთლებიდან წყლის აორთქლება დიფუზიური პროცესია, რომელიც ხორციელდება წყლის მოლეკულების კინეტიკური ენერჯით და სისტემაში მცენარე-ჰაერი წყლის პოტენციალის<sup>1</sup> ( $\Psi_w$ ) გრადიენტით. ყველა გარეშე ფაქტორი, რომელიც ამ გრადიენტს ზრდის, ტრანსპირაციის პროცესსაც აძლიერებს. მაგ., ტემპერატურის აწევა ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის კლებას იწვევს, რის შედეგადაც ჰაერში წყლის პოტენციალი მატულობს და ტრანსპირაციის ინტენსივობა იზრდება. ტრანსპირაციას აძლიერებს ქარიც, რომელიც აჩქარებს ფოთლების ზედაპირიდან წყლის აორთქლებას. ასევე მოქმედებს განათება, რომელიც ხელს უწყობს ბაგეების გახსნას, საიდანაც ხდება წყლის აორთქლება.

ფიზიკური თვალსაზრისით, ტრანსპირაციული ნაკადი მოძრაობაში მოჰყავს ძალას, რომელიც ატმოსფერული ჰაერისა და ნიადაგის წყლის პოტენციალებს შორის სხვაობით აღიძვრება. პოტენციალის ვარდნა ამ ორ სისტემას შორის საკმაოდ დიდია: ატმოსფეროში  $\Psi_w \sim 900$  ატმ 50% ჰაერის ტენიანობის დროს, ხოლო ნიადაგის ეს სიდიდე, როგორც წესი ნულს ოდნავ აღემატება. მცენარეთა წყლის პოტენციალი, ჰაერისა და ნიადაგის წყლების პოტენციალებს შორის საშუალო სიდიდეს შეადგენს. ცხადია, მცენარე ყოველთვის გამოყოფს წყლის

<sup>1</sup> წყლის პოტენციალის სიდიდე ( $\Psi_w$ ) ყოველთვის უარყოფითია და წამოადგენს სხვაობას განსაზღვრულ წერტილში წყლის ქიმიურ პოტენციალს ( $\mu_w$ ) და სუფთა წყლის პოტენციალს ( $\mu_w^0$ ) შორის, გაყოფილს წყლის პარციალურ მოლარულ მოცულობაზე ( $\bar{V}_w$ ):

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{\bar{V}_w}$$



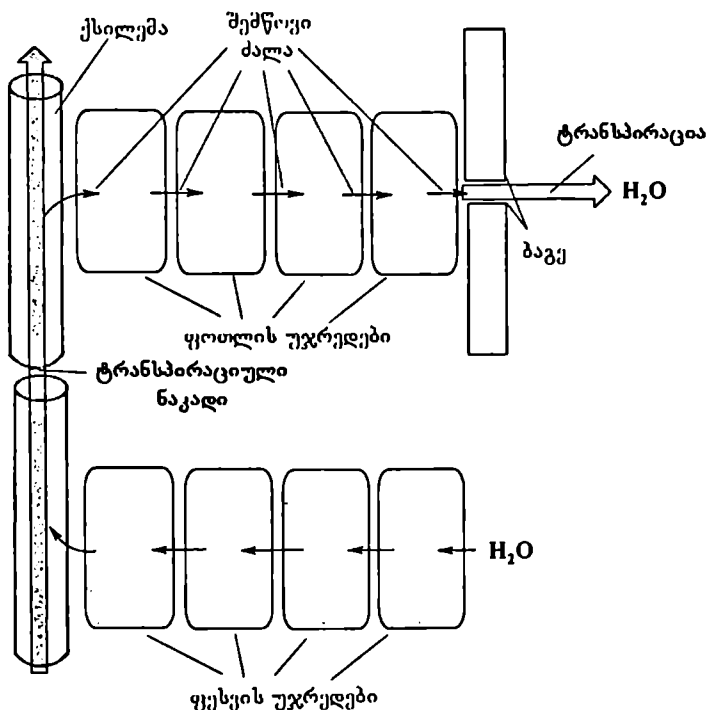
ორთქლს ატმოსფეროში, სადაც წყლის პოტენციალი მეტია, თვითონ კი მას იწოვს ნიადაგიდან, სადაც  $P_{\infty}$  უფრო ნაკლებია. ამის შედეგად წარმოიქმნება ნიადაგიდან ატმოსფეროსაკენ მიმართული წყლის მუდმივი ნაკადი, რომელიც მცენარეზე გაივლის ტრანსპირაციული ნაკადის სახით.

ტრანსპირაცია მცენარეს გადაზურებისაგან იცავს. ამ პროცესში ჩართულია როგორც ბაგეების აპარატი, ასევე კუტიკულანანი ზედაპირიც. მცენარეები წყლის ძირითად ნაწილს ატმოსფეროში ბაგეებით გამოყოფენ, ხოლო კუტიკულით ტრანსპირაციის წილი საშუალოდ 10%-ს შეადგენს (თხელი კუტიკულის მქონე მცენარეებში ამ მაჩვენებელმა შეიძლება 20%-მდე მიაღწიოს). ბაგეების ჭრილების საერთო ფართობი ფოთლის ზედაპირული ფართობის მხოლოდ 1—2%-ის ტოლია, მაგრამ ფოთლის ასეთი მცირე ფართობიც კი ძალიან დიდი რაოდენობის წყლის აორთქლების საშუალებას იძლევა. მაგ., დღე-ღამის განმავლობაში არყის ხე საშუალოდ 400 ლიტრ წყალს აორთქლებს, ვერხვის ზოგიერთი სახეობა — 190-დან 1 330 ლიტრამდე, ტირიფი — 1 900 ლიტრს, შედარებისათვის: ასეთივე რაოდენობა წყლის აორთქლება შეუძლია იონჯას ნათესს 0.234 ჰა ფართობიდან.

ფოთლებიდან წყლის აორთქლების ხარჯზე ტრანსპირაციული ნაკადის წარმოქმნის მექანიზმი შეიძლება წარმოადგინოთ სქემის სახით, რომელიც ნახ.3.5-ზეა მოცემული. ფოთლის შიგნით განლაგებული მეზოფილის უჯრედები, რომლებიც ბაგეების ჭრილებით ჰაერს ეხებიან, ტრანსპირაციის პროცესში წყალს კარგავენ. ამის შედეგად, უჯრედის კედელში წყლის დეფიციტი ჩნდება, რომელიც სწრაფად ერცელებს მთელ უჯრედზე. წყლის დაკარგვა იწვევს უჯრედის კედლის შეკუმშვას, ციტოპლაზმისა და ვაკუოლების მოცულობის შემცირებას. ამის გამო უჯრედის წყლის პოტენციალი მატულობს და იზრდება ოსმოსური წნევა. სხვა სიტყვებით, ბაგეებთან ახლომდებარე უჯრედებში ატმოსფეროსთან წყლის პოტენციალის სხვაობის გამო, წარმოიქმნება განსაკუთრებული შემწოვი ძალა, რომელიც ართმევს წყალს მეზობელ უჯრედს, სადაც იგივე პროცესი მეორდება. ამგვარად, შემწოვი ძალა უჯრედიდან უჯრედს გადაეცემა და აღწევს ფოთლებში გამაყალ ქსილემის ჭურჭლს, სადაც გაუზნოება წარმოიქმნება. ქსილემის ჭურჭლები მილაკების უწყვეტ სისტემას წარმოადგენს, რომელიც ფოთლებიდან ფესვებამდე აღწევს. ამიტომ ფოთლის ჭურჭელში აღძრული გაუზნოება ფესვების ჭურჭლსაც გადაეცემა თუ ამ ჭურჭლებში გაუზნოება მეტია, ვიდრე ფესვის უჯრედებში, ცხადია, შემწოვი ძალით წყალი ფესვის უჯრედებიდან ჭურჭლებში გადადის და ზევით, ფოთლისაკენ მიემართება.

ტრანსპირაციით გამოწვეული შემწოვი ძალა წყლის სვეტს ქვევიდან ზევით 1-დან 100-მდე მ/წმ სიჩქარით წევს. სიჩქარე შეიძლება შეიცვლოს მცენარის სახეობის, მისი სიმაღლისა და ბუნებრივი პირობების შესაბამისად. ვიწრო ჭურჭლებში მოძრაობის დროს წინააღმდეგობის გადასალახად ყოველ 10 მეტრ სიმაღლეზე საჭიროა დაახლოებით 1.5 ატმ წნევა. ტრანსპირაციული ნაკადი — როგორც პროცესი, ხორციელდება 100 მეტრზე უფრო მეტი სიმაღლის ხეებშიც. ცნობილია, რომ ხე-მცენარეში შეიძლება შეიქმნას 35 ატმ-მდე წნევა, რომელ-

იც საკმარისია, რომ წყლის სვეტმა ააღწიოს დაახლოებით 140 მ სიმაღლეზე და გადაიღაზოს კოქეზიის ძალა (აირისაგან თავისუფალ წყლის მოლეკულებს შორის შეჭიდულობა).



ნახ. 3.5 მცენარეებში ტრანსპირაციული ნაკადის აღმერის სქემატური გამო-სახულება.

ტრანსპირაციის დღე-ღამური ნაკადის ინტენსივობა გარკვეულწილად გარე-მოს ტემპერატურაზეა დამოკიდებული და მის პარალელურად იცვლება: მაქსი-მუმს შუადღის შემდეგ აღწევს, მინიმუმს კი ღამით. ტემპერატურის გარდა, ასეთ რეჟიმს ხელს უწყობს განათებაც: დილით სინათლის მოქმედებით ბაგეები იხს-ნება, ღამით კი იხურება. ცხელ, მშრალ დღეებში, როდესაც ფოთლების ზედა-პირიდან წყლის აორთქლების სიჩქარე ფესვებიდან წყლის შესვლის ინტენსივობას აღემატება, წარმოქმნილი წყლის დეფიციტი იწვევს ფოთლების შეჭკნობას, ბა-გეების დახურვას და, ამგვარად, ტრანსპირაციის ინტენსივობის კლებას. დაღამე-

ბისას ბაგეები იხურება, ტემპერატურა ეცემა და კლებულობს წყლის აორთქლების ინტენსივობა. ამ დროს ფესვებიდან წყლის ინტენსიურად შესვლის გამო მცენარეში წყლის დეფიციტი აღმოფხვრება.

მცენარეების ბევრი მორფოლოგიური თვისებურება ხელს უწყობს ტრანსპირაციის შემცირებას, მაგ., ცვილისებრი ნაფიფქი (ნაყოფზე, ფოთლებზე), შესქელებული კუტიკულა, კორპის ფენა, მეზოფილურ ფენაში ჩაფლული ბაგეები, მკვდარი ბუსუსები, ფოთლოვანი ზედაპირის შეჭმუხვნა-შემცირება (რედუქცია). ყველა ეს ნიშნები ახასიათებთ ე.წ. ქსეროფიტებს — მცენარეებს, რომლებიც მშრალ ადგილებში იზრდება. მათგან საპირისპირო თვისებებს ამჟღავნებენ პიგროფიტები — ტენის მოყვარული მცენარეები, რომლებსაც ზედმეტი წყლის მოსაცილებლად ტრანსპირაციის გასაძლიერებელი საშუალებები გააჩნიათ ფოთლების დიდი ზედაპირი, ამოწეული ბაგეები, თხელი კუტიკულა და ა.შ. წყალში ჩაძირული და წყლის ზედაპირზე მცურავი წყლის მცენარეები — პიდროფიტები — წყალს შეხების მთელი ზედაპირით შთანთქავენ. მათ აქვთ ნაკლებად განვითარებული ჭურჭლები და ამდენად, ამ მცენარეებში წყლის ნაკადი უმნიშვნელო ინტენსივობით გადაადგილდება.

ზემომოყვანილი თვისებები გააჩნიათ ჰომეოფიტებს — იმ უმაღლეს მცენარეებს, რომლებსაც ტენიანობის შენარჩუნება შეუძლიათ მათი ანტიპოდებია პოიკილოქსეროფიტები — უმაღლესი და ზოგიერთი უმაღლესი მცენარეები, რომელთა უჯრედების ტენიანობა ცვალებადია. ასეთ მცენარეებში წყლის პოტენციალი გარემოსთან წონასწორობაში იმყოფება. ამ მცენარეებში წყლის შთანთქმა განუყოფელია გაცემასთან, ხოლო წყლის ცირკულაცია თითქმის არ ხდება.

მცენარის მიერ ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმასა და გადაადგილებაში ტრანსპირაციული ნაკადის მნიშვნელობაზე მეტყველებს კანონზომიერება, რომლის მიხედვითაც დაბინძურებული ნიადაგიდან ტოქსიკანტის შეთვისების სიჩქარე ტრანსპირაციის პირდაპირპროპორციულია. ეს დამოკიდებულება შემდეგი ფორმულით გამოიხატება:

$$U = (TSCF)(T)(C)$$

სადაც U არის ტოქსიკანტის შეთვისების სიჩქარე, მგ/დღეში; T — მცენარეთა ტრანსპირაციის სიჩქარე, ლ/დღეში; C — ტოქსიკანტის კონცენტრაცია ნიადაგის წყლოვან ფაზაში, მგ/ლ; TSCF — ტრანსპირაციული ნაკადის კონცენტრაციის კოეფიციენტი. ეს უკანასკნელი უგანზომილებო სიდიდეა, რომელიც გვიჩვენებს ტრანსპირაციული ნაკადის სითხეში ორგანული ტოქსიკანტების კონცენტრაციის შეფარდებას გარემოში მის კონცენტრაციასთან. ეს სიდიდე დამოკიდებულია ტოქსიკანტის ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე და შემდეგი ფორმულით გამოიანგარიშება:

$$TSCF = 0.75 \exp \left[ -\frac{(\log K_{ow} - 2.50)^2}{2.4} \right]$$

როგორც ამ უკანასკნელი ფორმულიდან ჩანს, ძირითადი პარამეტრი, რომელიც ტოქსიკანტის თვისებებისთვისაა დამახასიათებელი, არის  $\log K_{ow}$  — ოქტანოლსა და წყალს შორის განაწილების კოეფიციენტის ათობითი ლოგარითმი. ეს სიდიდე, რომელიც ფაქტობრივად ჰიდროფობულობის ხარისხის მაჩვენებელია, მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავს მცენარეების მიერ ტოქსიკანტის შთანთქმის ეფექტურობას და ფესვიდან მიწისზედა ორგანოებისაკენ მის გადაადგილებას. ცნობილია, რომ ძლიერ ჰიდროფობული ტოქსიკური ნაერთები, რომელთა  $\log K_{ow}$ -ის მნიშვნელობა 3.5-ზე მეტია, იმდენად მტკიცედ აღსორბირდებიან ნიადაგის სტრუქტურებზე ან მცენარეთა ფესვების ზედაპირზე, რომ მცენარის შიგნით ვეღარ აღწევენ. ასეთებია: 1,2,4-ტრიქლორბენზოლი, 1,2,3,4,5-პენტაქლოროფენოლი, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, დიოქსინები და სხვ. ზომიერად ჰიდროფობული ტოქსიკანტები, რომელთა  $\log K_{ow}$  1-დან 3.5-მდე მნიშვნელობისაა (მაგ., ენოლი, ნიტრობენზოლი, ბენზოლი, ტოლუოლი, ტრიქლორეთილენი, ატრაზინი და სხვ.), დიდი რაოდენობით შთანთქმებიან და ძალიან ადვილად გადაადგილდებიან მცენარეებში. შედარებით ჰიდროფილური ტოქსიკანტები  $\log K_{ow}$ -ის ერთზე დაბალი მნიშვნელობით (ანილინი, RDX და სხვ.), სუსტად აღსორბირდებიან და მცენარეებით მხოლოდ უმნიშვნელო რაოდენობით შთანთქმებიან.

ასიმილაციების ნაკადი. თუ ფესვებიდან შეღწეული ტოქსიკური ნაერთები მცენარეებში ტრანსპირაციული ნაკადით გადაადგილდებიან, ფოთლებით შთანთქმული უცხო ნივთიერებები ფოთლებში წარმოქმნილი ასიმილაციების ნაკადთან ერთად ტრანსპორტირდებიან. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ტრანსპირაციული ნაკადი ქსილემაში მიედინება, ხოლო ასიმილაციების ტრანსპორტის გზა ფლოემაზე გადის. აქვე გაეიხსენოთ, რომ თუ ქსილემაში “ცალმხრივი მოძრაობაა”, ფლოემაში ნივთიერებების ტრანსპორტირება ორივე მიმართულებით არის შესაძლებელი.

ფლოემა საცრისებურ მილებს წარმოადგენს, რომელიც წარმოქმნილია განუვითარებელი ვაკუოლების მქონე სპეციალიზებული უჯრედებისაგან. ეს უჯრედები ერთმანეთთან ფორებითაა დაკავშირებული, ხოლო სიმპლასტთან — პლაზმოდესმებით. ამ უჯრედებში ციტოპლაზმის pH 7.0-დან 7.5-მდეა, ფლოემის წველის pH დაახლოებით 8.0-ის ტოლია, ხოლო ვაკუოლების სითხის pH — 5.5-ის. აპოპლასტში, უჯრედშორის სივრცესა და ქსილემის ტურტლებში pH 5.0-დან 6.0-მდეა. წყლის ნაკადი ქსილემაში ჩვეულებრივ 50—100-ჯერ უფრო სწრაფია, ვიდრე ფლოემაში, სადაც სითხის მოძრაობის სიჩქარე 0.5-დან 1.0 მ/სთ-მდე საზღვრებში იცვლება.

ფლოემის საცრისებური მილები შედგება ნაწვერებისაგან — უჯრედებიდან, რომლებიც გრძივადაა შეერთებული. ნაწვერებს შორის არის განივი კედლები, რომელთაც საცრისებური ფირფიტები ეწოდებათ. საცრისებური ფირფიტები განჭოლილია ფართო პლაზმოდესმებით — სატრანსპორტო ფორებით, რომლებშიც გადის პროტოპლაზმური ჭიმები. საცრისებური ფირფიტების უჯრედები თავისებურია: ბირთვები დაშლილია, პლასტიდები განუვითარებელია, გვხვდება მცირე ზომის მიტოქონდრიები, რომელთა რაოდენობა ბევრად ნაკლებია, ვიდრე ნორმალურ უჯრედებში. ფლოემის წარმომქმნელ უჯრედებს არ გააჩნიათ ტონოპლასტიები. უჯრედის ცენტრში მოთავსებულია ვაკუოლის მსგავსი ღრუ — ლუმენი, რომელიც შევსებულია ფაშარი პროტოპლაზმით, ხოლო პერიფერიაზე უჯრედის კედლის გასწვრივ განლაგებულია მკეროვი პროტოპლაზმის თხელი ფენა. საცრისებურ მილებს აქვთ კარგად განვითარებული შიდა ზედაპირი, რომლებიც გარკვეულ სატრანსპორტო ფუნქციას ასრულებენ. საცრისებური მილის ყოველ ნაწვევარს უშუალოდ ერთეის ციტოპლაზმით მდიდარი, მეტაბოლურად ძალიან აქტიური უჯრედი-თანამგზავრი, რომელიც ნაწვერებთან ერთად ერთ მთლიან მერისტემულ უჯრედს წარმოქმნის. უჯრედები-თანამგზავრები საცრისებური მილების ნაწვერებს მრავალრიცხოვანი პლაზმოდესმებით უკავშირდება, რომლებიც ასიმილატების ტრანსპორტის დროს არხების ფუნქციას ასრულებენ.

ასიმილატების ტრანსპორტი საკმაოდ ენერგოტევადი პროცესია. ის მნიშვნელოვნად ფერხდება ჟანგბადის უკმარისობის დროს, ტემპერატურის დაქვეითებისას, სუნთქვის გამთიშველების ან ინჰიბიტორების მოქმედებით. ასიმილატები (გლუკოზა, ამინომჟავები) სიმპლასტური გზით მათი წარმოქმნის ადგილიდან უჯრედ-თანამგზავრებამდე და საცრისებური მილების გარემომცველ პარენქიმულ უჯრედებამდე აღწევენ. ამ უჯრედებში, რომლებიც მდიდარია ფოსფატაზებით, თავდაპირველად გლუკოზიდან საქაროზა სინთეზდება, ხოლო შემდეგ ზორციელდება ასიმილატების აქტიური ტრანსპორტი საცრისებურ მილებში. ასიმილატების აქტიური გადატანა ასევე ხდება იმ უჯრედებიდან, სადაც ეს ნაერთები მარაგის სახითაა დაგროვილი. ამ უჯრედებიდან ასიმილატები საცრისებურ მილებში გადაიტანება და სიმპლასტური გზით ტრანსპორტირდება ცალკეულ უჯრედებამდე.

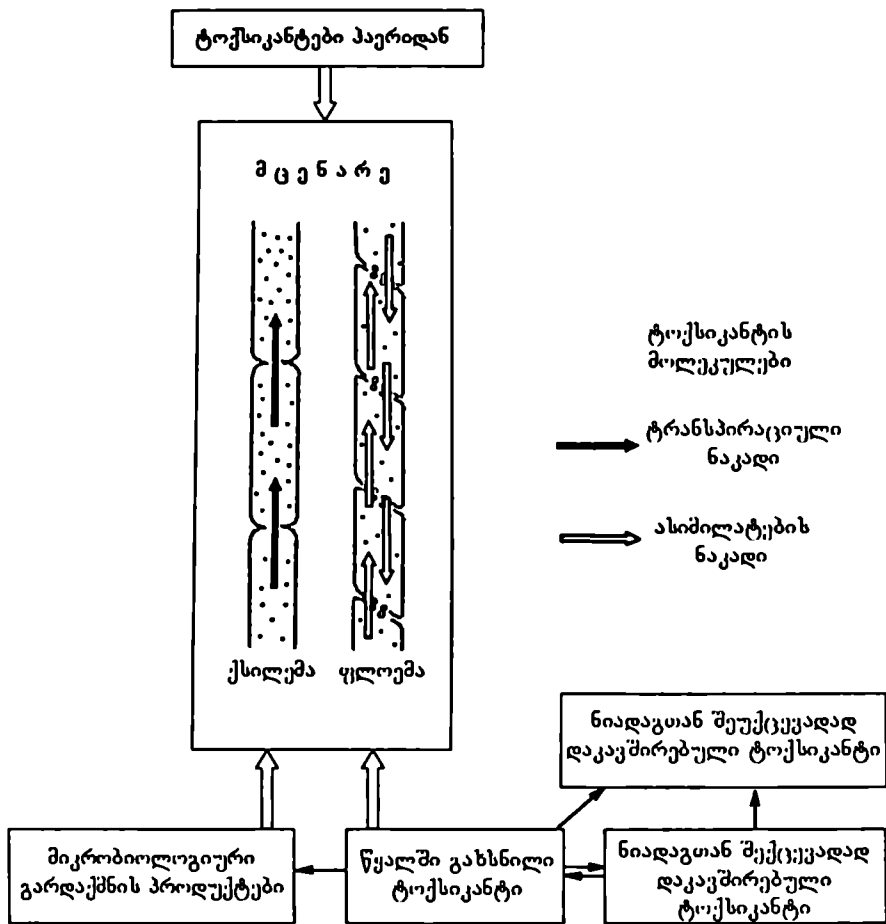
ასიმილატების ნაკადის წარმოქმნის მექანიზმი შემდეგში მდგომარეობს: ასიმილატების სინთეზის ადგილებში ამ ნაერთების მაღალი კონცენტრაცია წყლის ოსმოსურად შთანთქმის ზრდას იწვევს, რაც მაღალ ჰიდროსტატიკურ წნევას წარმოქმნის. ამჟებ დროს, იმ უჯრედებში, რომლებშიც ასიმილატების კონცენტრაცია დაბალია, წყლის ოსმოსური შთანთქმა უმნიშვნელოა და შესაბამისად, სუსტია ჰიდროსტატიკური წნევა. ამრიგად, უჯრედებს შორის წარმოიქმნება ასიმილატების კონცენტრაციული გრადიენტი, რომლის მიმართულებითაც უნდა მოხდეს წნევის გათანაბრება. ამის გამო ასიმილატების შემცველი ხსნარი საცრისებურ მილსა და გარემომცველ უჯრედებს შორის არსებული ნახევრადმედწევადი მემბრანის წინაღობას გადალახავს და ასიმილატების ნაკადს წარმოქმნის.

ფლოემაში კერბიციდების გადაადგილება დამოკიდებულია ქსოვილებში ნახშირწყლების (უპირველეს ყოვლისა, საქაროზის) ბიოსინთეზის პროცესებზე და მათ გადაადგილებაზე მეზოფილური უჯრედებიდან ფლოემის საცრისებური უჯრედების კომპლექსამდე. უმაღლეს მცენარეებში ნახშირწყლების გადაადგილება ორი მექანიზმით წარმოებს: 1) საქაროზის გადაადგილება აპოპლასტით და შემდგომ ფლოემაში შეღწევა; 2) სიმპლასტური კავშირებით მეზოფილის და ფლოემის უჯრედებს შორის მოძრაობა. ნაჩვენებია, რომ მცენარეში ფოთლიდან შეღწეული კერბიციდების გადაადგილება საქაროზის ტრანსპორტის პროცესის პარალელურად მიმდინარეობს.

ყოველივე ზემოთქმულს თუ შევაჯერებთ, შეიძლება თვალი მოვადევნოთ მცენარეებში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევისა და გადაადგილების გზებს, როგორც ეს ნახ.3.6-ზეა ნაჩვენები.

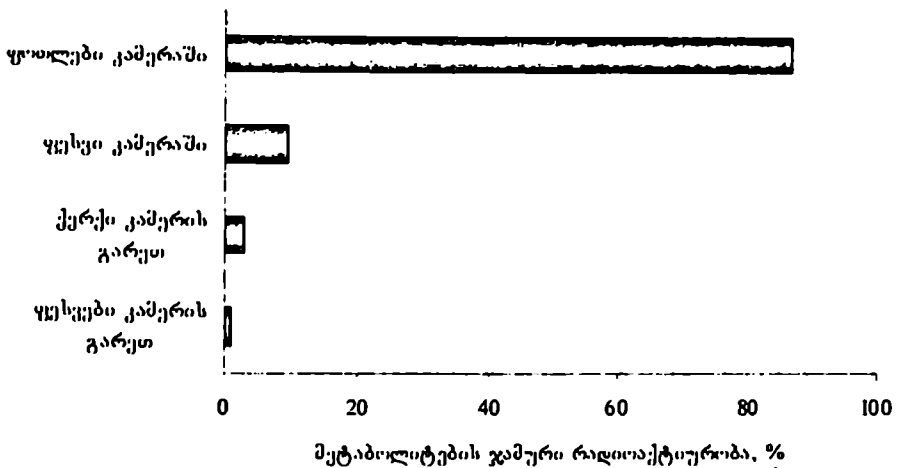
ნიადაგში მოხვედრილი ტოქსიკანტის ნაწილი შესაძლოა ნიადაგის ნაწილაკებს შექცევადად ან შუექცევადად დაუკავშირდეს, რაც დამოკიდებულია ტოქსიკანტის ქიმიურ ბუნებაზე, მის პიდროფობულობაზე ( $K_{ow}$ -ის მნიშვნელობაზე), ნიადაგის pH-ზე, ტენიანობაზე და სხვა მახასიათებლებზე. ტოქსიკანტების გარკვეულმა ნაწილმა შეიძლება განიცადოს მიკრობიოლოგიური გარდაქმნა რიზოსფერული მიკროორგანიზმებით, ხოლო დანარჩენი ნაწილი ფესვებში შესვლის შემდეგ ქსილემის ტურჭლებით გადაადგილდება. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ტოქსიკანტების გარდა, ფესვებში შეღწევა მათი მიკრობიოლოგიური დეგრადაციის პროდუქტებსაც შეუძლიათ ამის შემდეგ ხდება ტრანსპირაციული ნაკადით შთანთქმული ტოქსიკანტების ტრანსპორტი და მათი მთელ მცენარეში ტრანსლოკაცია. რაც შეეხება ფოთლებში ბაგეებით და/ან კუტიკულის გავლით შეღწეულ ტოქსიკანტებს, ისინი ასიმილატებთან ერთად ფლოემის საცრისებურ მილებში ხვდებიან და ორი მიმართულებით გადაადგილდებიან: ბაზიპეტალურად — ქვევით, ფესვებისაკენ და/ან აკროპეტალურად — ზევით, ყლორტის წვეროსა და ნაყოფებისაკენ.

მცენარეებში ფოთლებიდან ან ფესვებიდან შეღწეული ტოქსიკური ნაერთების გადაადგილება მრავალი ექსპერიმენტული მონაცემებით დასტურდება. მაგ., რადიოაქტიური ნახშირბადით ( $^{14}C$ ) ნიშანდებული ნახშირწყალბადებთან ( $C_1$ -,  $C_2$  ალკანებთან, ციკლოპექსანთან, ბენზოლთან, ტოლუოლთან და სხვ.) მრავალი მცენარის (ერთწლიანი და მრავალწლიანი მცენარეების 55 წარმომადგენელი) ინკუბაციის შედეგად დადგინდა, რომ ყველა გამოკვლეული მცენარე სხვადასხვა ინტენსივობით შთანთქმევენ ნახშირწყალბადებს და მათ ღრმა მეტაბოლურ გარდაქმნებს ახორციელებენ. ამასთან ერთად ნაჩვენებია, რომ ფოთლებით შთანთქმის შემდეგ ნახშირწყალბადების გარდაქმნის პროდუქტები ღეროს გავლით ფესვებისაკენ გადაადგილდებიან, ხოლო ფესვებიდან შთანთქმული ნახშირწყალბადების მეტაბოლიტები ფოთლებისაკენ ტრანსპორტირდებიან (ნახ.3.7 და 3.8).



ნახ. 3.6. მცენარეებში ტოქსიკური ნაერთების შეღწევისა და გადაადგილების შესაძლო გზები.

მრავალი პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადი, მაღალი პიდროფობულობის მიუხედავად, ნიადაგიდან, საკვები არედან და ხსნარებიდან აქტიურად შთაინთქმება როგორც ფესვებიდან, ასევე ფოთლებიდან და მთელ მცენარეში ტრანსპორტირდება. უნდა აღინიშნოს, რომ პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, რომლებიც ორ ან სამ ბირთვს შეიცავენ (მაგ., ნაფთალინი, ანტრაცენი, ფენანტრენი) უფრო ადვილად შთაინთქმებიან და დეგრადირდებიან, ვიდრე ხუთბირთვიანი (მაგ., პერილენი, 3,4-ბენზპირენი, ბენზანტრაცენი, ლიბენზ(ა,ჰ)ანტრაცენი).

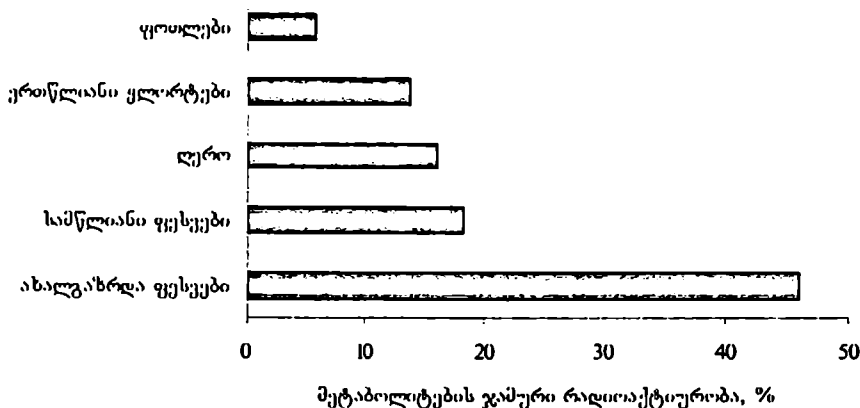


**ნახ. 3.7.** ნეკერჩხლის (*Acer campestre*) ფოთლებით შთანთქმული  $[1-6-^{14}C]$  ბენზოლის რადიოაქტიური ნიშნის განაწილება მცენარის ორგანოებში. მცენარის დაფესვიანებული კალმების ფოთლიანი ნაწილები მოთავსებული იყო პერმეტულ კამერაში, რომელშიც მიეწოდებოდა ბენზოლის ორთქლი. ბენზოლის ხვედრითი რადიოაქტიურობა შეადგენდა  $5.5 \mu Ci/მგ$ -ს, ბენზოლის კონცენტრაცია კამერაში —  $2 მგ/მლ$ -ს, ტემპერატურა —  $21^{\circ}C$ , ექსპოზიცია ხდებოდა სიბნელეში, 96 სთ-ის განმავლობაში.

ფლოემასა და ქსილემაში შეღწევის და მათი საშუალებით მთელ მცენარეში ტრანსლოკაციის უნარი მრავალი პესტიციდის მაგალითზეა შესწავლილი. ქსენობიოტიკების ფლოემური ტრანსპორტის თავისებურებები ახსნილია ე.წ. “შუალედური შეღწევადობის” კიპოთეზით, რომელიც პირველ რიგში იმაზეა დაფუძნებული, რომ ფლოემისა და ქსილემის ჭურჭლები ერთმანეთის უშუალო სიახლოვეშია განლაგებული. ამ კიპოთეზის მიხედვით

- ნებისმიერი მოლეკულა, რომელსაც მემბრანაში მაღალი შეღწევის უნარი ახასიათებს, ადვილად შევა ფლოემაში, მაგრამ ვერ მიაღწევს მაღალ კონცენტრაციებს, რადგან ფლოემური უჯრედების მემბრანები მას ვერ შეაკავებენ, იგი ფლოემიდან ქსილემაში გადავა და შემდეგ ქსილემური ნაკადით სწრაფად გადაადგილდება;
- მემბრანაში დაბალი შეღწევის უნარის მქონე ნებისმიერი მოლეკულა ვერ შეძლებს ფლოემაში მაღალი კონცენტრაციით დაგროვებას, და შესაბამისად, ეფექტურად ვერ იმორჩევა ამ ჭურჭელში;





**ნახ. 3.8.** ჩაის მცენარის (*Thea sinensis*) ფეხვებით შთანთქმული  $[1-6-^{14}\text{C}]$  ბენზოლის რადიოაქტიური ნიშნის განაწილება მცენარის ორგანოებში. მცენარე მოთავსებული იყო ბენზოლის ნაჯერ წყალხსნარზე. ბენზოლის ხვედრითი რადიოაქტიურობა შეადგენდა  $2.5 \mu\text{Ci}/\text{მგ}$ -ს, ტემპერატურა —  $20-30^\circ\text{C}$ , ექსპოზიცია ხდებოდა სიბნელეში, 72 სთ-ის განმავლობაში.

- ამ ორი დებულებიდან გამომდინარე, ფლოემაში გადაადგილების ყველაზე მაღალი უნარით ისეთი ნივთიერებები უნდა ხასიათდებოდნენ, რომლებსაც მემბრანებში შუალედური შეღწევადობა გააჩნიათ.

ამ პიპოთუზაზე და სხვა ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით, რომლებიც მიღებულია აბუსალათინის აღმონაცენების მიერ ჰერბიციდების შეთვისებისა და ტრანსპორტის შესწავლისას, შემუშავდა მცენარეულ სატრანსპორტო გზებში ტოქსიკური ნივთიერებების მოძრაობის მათემატიკური მოდელი, რომელსაც კლეიერის მოდელს უწოდებენ. ასეთი მოდელი წარმატებით გამოიყენეს როგორც სისტემური ჰერბიციდების, ასევე მნიშვნელოვანი მეორადი მეტაბოლიტების — გიბერელინი  $A_1$ -ის, სალიცილმჟავას, ოლიგოგლაქტურონიდებისა და გლუკოზინოლატების მცენარეში ტრანსლოკაციის პროგნოზირებისათვის.

სისტემური ჰერბიციდები, რომლებსაც მცენარეებში შეღწევის და მისი ტრანსპორტული გზებით გადაადგილების უნარი გააჩნიათ, იყოფა ფლოემო-მობილურ, ქსილემო-მობილურ და ამბი-მობილურ (ამ უკანასკნელებს შუძლიათ გადაადგილება როგორც ფლოემაში, ასევე ქსილემაშიც) ნაერთებად. კლეიერის მოდელის მიხედვით, ასეთ მობილურობას განსაზღვრავს დისოციაციის კონსტანტა ( $pK_a$ ) და ლიპოფილურობა ( $K_{ow}$ ). დადგენილია, რომ ფლოემო-მობილურია

ისეთი პერბიციდები, რომლებიც ძლიერ და საშუალო მჟავებს წარმოადგენენ ( $pK_a < 4$ ) და საშუალო ლიპოფილურობა გააჩნიათ ( $\log K_{ow}$ -ის მნიშვნელობა დაახლოებით 1-დან 2.5—3-მდეა). უფრო სუსტ მჟავებს ( $pK_a > 5$ ) და არაიონიზებული ნაერთებს ფლოემო-მობილურობისათვის უფრო მეტი პოლარობა უნდა ახასიათებდეთ ( $K_{ow} < 1$ ). საშუალო ლიპოფილურობის ( $\log K_{ow}$  0-დან 4-მდე დიაპაზონში) და იონიზაციის დაბალი ხარისხის ( $pK_a > 7$ ) პერბიციდებს მხოლოდ ქსილემაში გადაადგილების უნარი ახასიათებთ, ხოლო რაც უფრო მეტია ლიპოფილურობა, შესაბამისად, უფრო მაღალი უნდა იყოს იონიზაციის ხარისხიც. მაღალი ჰიდროფილურობის ( $\log K_{ow} < 0$ ) მქონე სუსტი მჟავები ( $pK_a > 7$ ) ამბი-მობილურობი არიან, ხოლო მაღალი ლიპოფილურობის მქონე პერბიციდებს ( $\log K_{ow} > 4$ ),  $pK_a$ -ს მნიშვნელობის მიუხედავად, არ შეუძლიათ ქსილემაში ან ფლოემაში მოძრაობა. ასეთ ნაერთებს არასისტემური, ანუ კონტაქტური პერბიციდები მიეკუთვნება.

$K_{ow}$ -ს და  $pK_a$ -ს სხვადასხვა მნიშვნელობების მქონე პესტიციდ ფუნეთილამინის ექვსი წარმოებულის მცენარეში გადაადგილების უნარის შესწავლით დადგენილია, რომ საშუალო ლიპოფილურობის ( $\log K_{ow} = 2-3$ ) მქონე ძლიერი ფუძეები ( $pK_a = 9.5$ ) ფესვებით ადვილად შეითვისება და ყლორტებისაკენ სწრაფად გადაადგილდება. ამ პროცესების ინტენსივობა მცირდება, როდესაც pH-ის მნიშვნელობა 5.0-მდე კლებულობს. ეს იმით აიხსნება, რომ ამინური ფუძეები მჟავა არეში პროტონს იერთებენ (პროტონირდებიან), რის შედეგად მუხტს იძენენ და მათი შემბრანაში განვლადობა იზრდება.

სოიის ფესვებით ზოგიერთი ფუნგიციდის, პერბიციდის, ინსექტიციდის შეთვისების და ქსილემაში გადაადგილების შესწავლამ აჩვენა, რომ ამ პროცესების მიმდინარეობას ტოქსიკანტის ლიპოფილურობა განსაზღვრავს და ქსილემის წვეწვში მაქსიმალურ კონცენტრაციას ის პესტიციდები აღწევენ, რომელთა  $\log K_{ow}$ -ს მნიშვნელობა დაახლოებით 3-ის ფარგლებშია.

მაღალი ლიპოფილურობის მიუხედავად, ფუნგიციდი მორფოლინი სისტემურია, ე.ი. მცენარეებში შედის და გადაადგილდება. ამ მოვლენის ასახსნელად შესწავლილი იყო, ნიშანდებული მორფოლინური ფუნგიციდების  $^{14}C$ -დოლემორფის და ტრიდემორფის შეთვისებისა და ტრანსპორტის პროცესები pH-ის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. აღმოჩნდა, რომ pH 5.0-ზე შეთვისებისა და გადაადგილების ინტენსივობა უმნიშვნელოა, ხოლო pH 8.0-ზე — პროცესების სიჩქარე დაახლოებით ორი რიგით იზრდება. დადგენილია, რომ pH-ის 8.0 მნიშვნელობის დროს უფრო მეტად ლიპოფილური ტრიდემორფი დიდი რაოდენობით შთაინთქმება ფესვებით და ყლორტებისაკენ ზომიერად გადაადგილდება. ამ დროს დოლემორფი ფესვებში მცირე რაოდენობით გროვდება, მაგრამ ეპიდერმისით ქსილემაში ძალიან ეფექტურად გადაადგილდება. საინტერესოა აღვნიშნოთ, რომ ეს სურათი პრაქტიკულად არ იცვლება 24-დან 48 სთ-მდე ინკუბაციის გახანგრძლივებისას.

ამრიგად, განხილული ფაქტების შეჯერებას ერთ მნიშვნელოვან დასკვნამდე მივყავართ მცენარე — უნივერსალური ორგანიზმია, რომელსაც გააჩნია კოლოსალური შესაძლებლობები, ნიადაგიდან, წყლიდან და ჰაერიდან შთანთქმას სხვადასხვა ქიმიური დამბინძურებლები. ფესვებიდან და ფოთლებიდან შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთები ტრანსპირაციული ნაკადით და ასიმილაციების ნაკადით სხვა ორგანოებში გადაადგილდებიან, შედიან თითქმის ყველა ქსოვილში და იქ გროვდებიან. თანამედროვე ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები უფრო ხშირად მცენარეების ამ თვისებებზეა დაფუძნებული. მაგრამ, უფრო მეტად მნიშვნელოვანია ის ფერმენტული სისტემები და მათ მიერ კატალიზებული პროცესები, რომლებიც შთანთქმული ტოქსიკანტების ღრმა დეგრადაციას (მინერალიზაციას) ახდენენ, რის შედეგადაც ნახშირბადატომები, რომლებიც ქსენობიოტიკების ტოქსიკურ სტრუქტურას ქმნიდნენ, კვლავ ბუნებრივ წრებრუნვაში ერთვებიან. სწორედ ეს თვისებები განსაზღვრავენ მცენარეების ეკოლოგიურ პოტენციალს და ახალი ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების სტრატეგიების შემუშავების საფუძველს წარმოადგენენ.

## 4. ტოქსიკური ნაერთების გავლენა უჯრედის

### სტრუქტურულ ორგანიზაციაში

თითოეული მცენარეული უჯრედი დამოუკიდებლად ფუნქციონირებადი ერთეულია. ყველა უჯრედის კოორდინირებული ფუნქციების ერთობლიობის ანაკრები კი ორგანიზმში მიმდინარე პროცესებს წარმოადგენს. ცხადია, ტოქსიკური ნაერთების გაუვნებელყოფის პროცესიც ცალკეულ უჯრედებში განხორციელებული ქიმიური რეაქციების შეჯამების შედეგს წარმოადგენს. ვიდრე განვიხილავდეთ, თუ რა სიმძლავრეებს ფლობს მცენარის მთელი ორგანიზმის ეს პატარა “სამქრო”, რომელიც გარემოს ტოქსიკური დაზიანებულობის უტილიზაციას ახდენს და მათგან სტანდარტულ მეტაბოლიტებს ან არატოქსიკურ კონიუგატებს ამზადებს, მიზანშეწონილი იქნება გავეცნოთ, როგორ ზემოქმედებას ახდენს მცენარეში შეღწეული ტოქსიკური ნაერთები თვით მცენარეულ უჯრედზე და მასში მიმდინარე პროცესებზე. ეს პრობლემა, ე.ი. ასეთი “საწარმოს” სიძლიერისა და ნაყოფიერების განსაზღვრა, საკმაოდ მნიშვნელოვანია ეკოლოგიური თვალსაზრისით, ვინაიდან მცენარეების დეტოქსიკაციური პოტენციალი — კაცობრიობის განკარგულებაში მყოფი ის ძირითადი ბიოლოგიური იარაღია, რომელიც გარემოს გაჯანსაღებისაკენაა მიმართული.

თანამედროვე ელექტრონული მიკროსკოპები, ქსოვილების ფიქსაციისა და ულტრათხელი ანათლების მიღების მეთოდები საშუალებას იძლევა უჯრედი სუბუჯრედული ორგანიზაციის დონეზე იქნას შესწავლილი და უფრო ზუსტად განისაზღვროს ტოქსიკური დაზიანებულობის ნეგატიური გავლენა მცენარეული უჯრედის ნატიფ არქიტექტონიკაზე.

მრავალრიცხოვანი გამოკვლევებით დამტკიცებულია, რომ ორგანული ტოქსიკანტების (პესტიციდების, ნახშირწყალბადების, ფენოლების, არომატული ამინების და სხვ.) მოქმედების შედეგად მცენარეულ უჯრედებში ადგილი აქვს მორფოლოგიური ცვლილებების მთელ კომპლექსს, რომლებიც დაკავშირებულია უჯრედის ულტრასტრუქტურული შენების დარღვევასთან. ტოქსიკანტების გავლენით გამოწვეული უჯრედის ორგანელების დაზიანება ხელს უწყობს მთელი რიგი სასიცოცხლო პროცესების ინტენსივობის დაქვეითებას, ფუნქციების დარღვევას და პათოლოგიური ძვრების განვითარებას, რაც ხშირად უჯრედის დაღუპვის მიზეზი ხდება.

უჭველია, რომ უჯრედში შეღწეული ტოქსიკანტი, რომლის კონცენტრაცია უჯრედისათვის საგრძნობია, პრაქტიკულად უარყოფითად მოქმედებს უჯრედული პროცესების მრავალფეროვნებაზე. ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე დადგენილია, რომ ქსენობიოტიკების მოქმედებისას უჯრედული პროცესიდან ყველაზე მოწყვლადი პროცესი ფოტოსინთეზია; გარდა ამისა, ხდება კრებლის ციკლის ფერმენტების და ჟანგვითი ფოსფორილების პროცესის ინჰი-

ბირება; ითრგუნება ATP-სა და სხვა ენერგეტიკულად მნიშვნელოვანი ნუკლეოტიდების ბიოსინთეზი და ა.შ.

#### 4.1 უჯრედის ულტრასტრუქტურული ცვლილებები

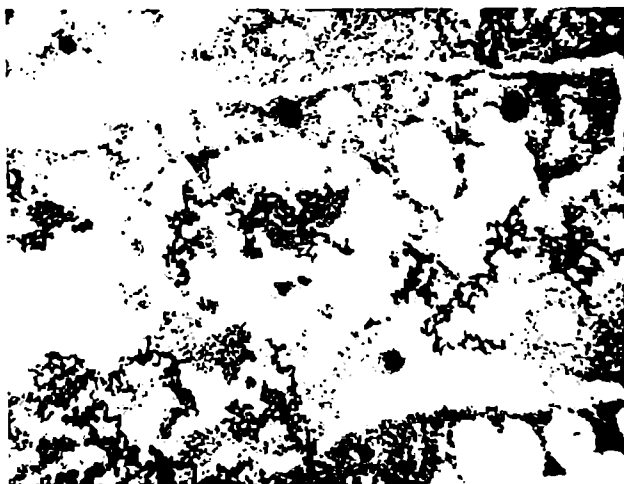
მცენარის უჯრედის რეაქცია ტოქსიკური ნაერთების შეღწევა განისაზღვრება ქსენობიოტიკების ქიმიური ბუნებით, მათი კონცენტრაციით და მცენარულ უჯრედებზე მოქმედების ხანგრძლივობით. ტოქსიკანტის ზემოქმედების შემდეგ უჯრედის ულტრასტრუქტურული ორგანიზაციის მდგომარეობის შეფასება საშუალებას იძლევა მცენარის ყველა სახეობისათვის განისაზღვროს ცალკეული ტოქსიკანტის დასაშვები დოზა და ამით შეფასდეს მათი დეტოქსიკაციური პოტენციალი.

ნიშანდებული ნახშირბადის ( $^{14}\text{C}$ ) შემცველი ტოქსიკური ნაერთების უჯრედში გადაადგილების პროცესების გამოკვლევა აჩვენებს, რომ ტოქსიკანტი ექსპოზიციის საწყის სტადიაზე (5–10 წუთის შემდეგ) შეინიშნება უჯრედოვან გარსში, მცირე რაოდენობით — ბირთვებსა და ბირთვკებში, იშვიათად — ციტოპლაზმასა და მიტოქონდრიებში. ექსპოზიციის დროის გაზრდასთან ერთად შესაძნეველ იზრდება ბირთვში შეღწეული ტოქსიკანტის რაოდენობა, იგი ლოკალიზდება ორგანელების მემბრანებზე და ტონოპლასტზე, ხოლო შემდეგ კი ვაკუოლებშიც. ამრიგად, სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის მქონე ტოქსიკური ნაერთები პრაქტიკულად ყველა სუბუჯრედულ ორგანელებში ნაწილდებიან, თუმცა, საბოლოოდ უფრო იკვეთება სურათი, რომელიც ტოქსიკანტების რადიოაქტიური ნიშნის ვაკუოლებში დეპონირების ტენდენციასზე მიუთითებს.

[ $^{14}\text{C}$ ] ფენოქსიმარმჟავას  $10^{-3}\text{ M}$  ხსნარში სიმინდის აღმონაცენების 10 წთიანი ექსპოზიციის შემდეგ, ხდება ჰერბიციდის ნიშანის ჩართვა ფესვის აპექსის უჯრედების ბირთვში, ბირთვკებში და ვაკუოლებში. ამ დროს, რადიოაქტიური ნიშანი იკავებს უჯრედის მთელი ფართობის დაახლოებით 3%-ს. მზესუშხირის შემთხვევაში [ $^{14}\text{C}$ ] ფენოქსიმარმჟავას ნიშანი აპექსის უჯრედების საერთო ფართობის დაახლოებით 16%-ს იკავებს, თუმცა სიმინდთან განსხვავებით, ტოქსიკანტი უმთავრესად შიდაუჯრედულ სივრცეში კონცენტრირდება და ბირთვში მხოლოდ მცირე რაოდენობით აღწევს (ნახ.4.1). მზესუშხირის ანალოგიურად, ფენოქსიმარმჟავა დიდი რაოდენობით შედის ბარდის ფესვების აპექსის უჯრედების მემბრანაში, მაგრამ ამ შემთხვევაში ტოქსიკანტი ლოკალიზდება ციტოპლაზმაში, ბირთვსა და ბირთვკებში.

სიმინდის უჯრედებში შეღწევა ასევე უძნელდება [ $^{14}\text{C}$ ] 2,4-D-ს. ეს ჰერბიციდი ადვილად და ღრმად შედის ბარდისა და მზესუშხირის უჯრედებში, რის შედეგაც სხვადასხვა სუბუჯრედოვან ორგანელებში ლოკალიზდება. ამ ტოქსიკანტთან მცენარეების 30-წუთიანი ინკუბაციის შედეგად ასეთი სურათი მიიღება:

სიმინდის უჯრედში პერბიციდი ძირითადად ხვდება ბირთვსა და ვაკუოლში. უკონსერვაციო რაოდენობით ლოკალიზდება ციტოპლაზმაში, მემბრანებში და უჯრედის საერთო ფართობის დაახლოებით 5%-მდე იკავებს. ინკუბაციის ანალოგიურ პირობებში მზესუმზირაში და ბარდაში ტოქსიკანტის რადიოაქტიური ნიშნის მთელი შიდაუჯრედული სივრცის 30%-ზე ვრცელდება, ერთევა მიტოქონდრიაში, პლასტიდებში, ბირთვებსა და ბირთვაკებში. შთანქმული რადიოაქტიურობის განსაზღვრა საშუალებას იძლევა ვიმსჯელოთ სხვადასხვა მცენარის უჯრედის შეღწევადობაზე კონკრეტული ტოქსიკური ნაერთების მიმართ ნაჩვენებია, რომ 2,4-D-ს მიმართ ყველაზე დაბალი შეღწევადობა დამახასიათებელია სიმინდის ფოთლებისათვის (7%), საშუალო მანევრებელი აქვს ბარდას — 22%. ხოლო ყველაზე მაღალი მზესუმზირას — 50%.



ნახ. 4.1. მზესუმზირის ფესვების უჯრედის ფრაგმენტი [ $1-^{14}C$ ] ფენოქსიმარმეჟას  $10^{-4} M$  ხსნართან 10-წუთიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეიმჩნევა რადიოაქტიური ნიშნის შეღწევა შიდაუჯრედულ სივრცეში.  $\times 50\ 000$

არომატულ ამინთან — [ $1-6-^{14}C$ ] ბენზილინთან (კონცენტრაცია  $2.2 \cdot 10^{-4} M$ ) სიმინდის 3-დღიანი აღმონაცენების ფესვების ინკუბაციის დროს ტოქსიკანტის უჯრედში შეღწევა უკვე 10 წუთიანი ექსპოზიციის შემდეგ შეიმჩნევა. ბენზილინი ამ დროში ასწრებს გადალახოს უჯრედის კედელი, პლაზმალემა და ბირთვში მოხვდეს. 30 წუთის განმავლობაში ტოქსიკანტი აღწევს ბირთვებში, ხოლო 60 წთ-ში მცენარეული უჯრედი იწყებს ტოქსიკანტის დეპონირებას და ბენზილინის ძირითადი ნაწილი ვაკუოლებში აღმოჩნდება.

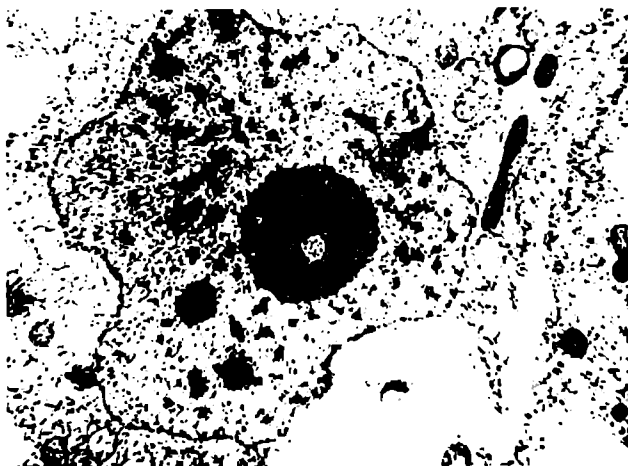
[ $1-^{14}C$ ] ბენზოის მჟავას შეღწევა სიმიდლის ფესვის უჯრედებში ბენზილინთან შედარებით გაცილებით უფრო ნელა ხდება. ტოქსიკანტი  $10^{-1}$  M კონცენტრაციით მხოლოდ ერთი საათის შემდეგ აღწევს ბირთვამდე. 24 სთ-ის შემდეგ ბენზოის მჟავას რადიოაქტიური ნიშანი თითქმის მთელ უჯრედს მოიცავს, კერძოდ: ციტოპლაზმას, პლასტიდებს, მიტოქონდრიებს, ენდოპლაზმურ ბადეს და ვაკუოლების ტონოპლასტებს. ამავე დროს, ბირთვებში ტოქსიკანტის რაოდენობრივი შემცველობა მნიშვნელოვნად კლებულობს. 72 სთ-ის შემდეგ, უჯრედში შეღწეული ბენზოის მჟავა უპირატესად ვაკუოლებში აკუმულირდება.

ორგანული ტოქსიკანტის მცენარეულ უჯრედებზე მოქმედების საერთო სურათი შემდეგნაირად გამოიყურება:

- საწყის ეტაპზე მცენარეულ უჯრედებზე ორგანული ტოქსიკანტების მოქმედება ბირთვების კონფიგურაციის შეცვლით ვლინდება. შეინიშნება  $\Delta$ ნმ-ის სინთეზის დათრგუნვა. ირღვევა პლაზმალემის ბარიერული ფუნქცია, აგრეთვე კალციუმის იონების დაგროვების უნარი. ამის შედეგად  $Ca^{2+}$ -ის კონცენტრაცია ციტოპლაზმაში იზრდება და  $Ca^{2+}$ -ATP-აზის აქტივობა ინჰიბირდება. ტოქსიკანტით დაზიანებულ უჯრედებში გვხვდება გაჯირჯებული კრისტების და მკერვი მატრიქსის მქონე მიტოქონდრიები. პლასტიდები ასევე ელექტრონულად მკერვი და გადიდებული ზომებისაა (ნახ.4.2);
- ტოქსიკანტების უფრო ხანგრძლივი ზემოქმედების შედეგად ხდება ენდოპლაზმური რეტიკულუმის ცისტერნების და გოლჯის აპარატის გაფართოება, ციტოპლაზმების ვაკუოლიზაცია; მცირდება ციტოპლაზმის მოცულობა და იზრდება პერიპლაზმური სივრცე. ფესვების აპექსების კორტექსის ზოგიერთ უჯრედებში შეინიშნება ჰიალოპლაზმაში რიბოსომების რაოდენობის გაზრდა და პოლისომების წარმოქმნა. მიტოქონდრიები განიცდიან ლიზისს, ხორკლიანი ენდოპლაზმური ბადის შემბრანებს სცილდება რიბოსომები. შეიმჩნევა ენდოპლაზმური რეტიკულუმის ხშირი კონტაქტები პლაზმალემასთან, ვაკუოლებთან, ბირთვულ შემბრანებთან და მიტოქონდრიებთან. აღინიშნება ბირთვის მოცულობის გადიდება და ე.წ. "ქრომატინული კოაგულაცია" — პათოლოგიური პროცესი, რომლის დროსაც ქრომოსომები ერთმანეთს ეწყებება, რასაც საბოლოოდ  $\Delta$ ნმ-ის სინთეზის დარღვევას იწვევს. ხშირ შემთხვევაში ბირთვულ გარსს მრავალრიცხოვანი გამონაზარდები უჩნდება, რის გამოც ბირთვები მათთვის უჩვეულო ფორმებს იღებენ (ნახ.4.3). დროის ამავე მონაკვეთის განმავლობაში ფოთლების უჯრედებში ქლოროპლასტების ფორმა და თვისობრივი შედგენილობა მთლიანად იცვლება. ეს ორგანელები არადა-მახასიათებელ კონფიგურაციას იძენს: გარე შემბრანა არ შეიმჩნევა, ლამელარული სისტემის ორიენტაცია დარღვეულია, მატრიქსი კი ნათელია და დიდი ზომის ოსმიოფილურ ჩანართებს შეიცავს. ფესვის შალითის დიფერენცირებული უჯრედების ციტოპლაზმაში, რომელიც ლორწოს სეკრეციას ახდენს, შეიმჩნევა ჰიპერტროფირებული სეკრეტორული ვეზიკულების დაგროვება, რომელთა უმრავლესობა პერიფერიაზე გადაადგილების და



ნახ. 4.2. სოიის ფესვების უჯრედის ფრაგმენტი  $1.5 \cdot 10^{-3} M$  ნიტრობენზოლის ხსნართან 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეინიშნება გაჯირჯებული კრისტების მქონე მიტოქონდრიები.  $\times 25\ 000$



ნახ. 4.3. სიმინდის ფესვების უჯრედის ფრაგმენტი  $2.25 \cdot 10^{-3} M$  ბენზოლის ხსნართან 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. აღინიშნება ბირთვული გარსის ინეგინირება.  $\times 60\ 000$



პლანზმალემასთან შეერწყმის მაგორად, მათი წარმოქმნის ადგილებში რჩება, ან ციტოპლაზმურ ორგანულებთან (მაგ., მიტოქონდრიებთან) კონტაქტში შედის. ასეთი ჰიპერტროფული ვეზიკულების ნაწილი ერთმანეთს უერთდება და ლორწოს მასიურ შიდაუჯრედულ “დეპოს” წარმოქმნის. უჯრედის პერიფერიისკენ მომწიფებული სეკრეტორული ვეზიკულების გადაადგილების პროცესის დათრგუნვის პარალელურად შეიმჩნევა ვეზიკულების გაჯირჯება და ნორმალური დიქტიოსომების გაქრობა.

- ტოქსიკანტების მცენარულ უჯრედებთან ექსპოზიციის დროის შემდგომი გაზრდა იწვევს უჯრედების მკვეთრად გამოხატულ შეუქცევად დესტრუქციას, რის შედეგად მცენარე იღუპება.

მცენარეული უჯრედის ულტრასტრუქტურულ ორგანიზაციაზე გავლენას ახდენს არამარტო ტოქსიკანტის ზემოქმედების დრო, არამედ კონცენტრაციაც. ზემოქმედების ხარისხის მიხედვით შეიძლება გამოიყოს ქსენობიოტიკების კონცენტრაციის სამი დონე:

- მეტაბოლური კონცენტრაცია — რომლის დროსაც ტოქსიკური ნაერთების მცენარეზე ზემოქმედების შედეგად უჯრედის ულტრასტრუქტურაში ნორმიდან შესამჩნევი გადახრები არ შეიმჩნევა. უნდა აღინიშნოს, რომ ქსენობიოტიკების უმეტესობა გარემოში ძალიან ხშირად სწორედ ასეთი დონით არის გავრცელებული;
- მაინჰიბირებელი კონცენტრაცია — რომლის დროსაც ტოქსიკური ნაერთი იწვევს უჯრედში მიმდინარე ბიოქიმიური პროცესების დათრგუნვას, ნუკლეინმჟავების ბიოსინთეზის და კალციუმის ჰომეოსტაზის დარღვევას, რასაც თანახლავს შესამჩნევი ულტრასტრუქტურული ცვლილებები;
- ლეტალური კონცენტრაცია — რომლის დროსაც ტოქსიკური ნაერთის მოქმედებით უჯრედის სრული დესტრუქცია ხდება, რასაც მცენარის დაღუპვა მოჰყვება.

რასაკვირველია, ზემოთ განხილული ორი ფაქტორის — ექსპოზიციის დროისა და კონცენტრაციის გარდა, მცენარეული უჯრედების ულტრასტრუქტურაზე ზემოქმედების ხასიათზე დიდი მნიშვნელობა აქვს თვით ტოქსიკანტის ქიმიურ ბუნებას. ქვევით განვიხილავთ ზოგიერთი ქიმიური კლასის ქსენობიოტიკის მიერ უჯრედებში გამოწვეულ ცვლილებებს.

#### 4.1.1 ცალკეული ტოქსიკანტების ზემოქმედება მცენარეულ უჯრედზე

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების შემუშავებისათვის ერთ-ერთი გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს იმის ცოდნას, თუ როგორ ზემოქმედებას ახდენს მცენარეებზე ცალკეული ტოქსიკური ნაერთები. ამ მხრივ მეტად მრავალფერო-

უნი და მნიშვნელოვანი ინფორმაციაა მიღებული საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ბიოქიმიისა და ბიოტექნოლოგიის ინსტიტუტის ო. ბუაძის სახ. ელექტრონული მიკროსკოპიის ლაბორატორიაში, სადაც მრავალი წელია მიმდინარეობს სხვადასხვა მცენარეების უჯრედების ულტრასტრუქტურაზე ტოქსიკური ნაერთების გავლენის შესწავლა. ამ მიმართულებით განსაკუთრებით ზედმიწევნითაა შესწავლილი ალკანები, ალკენები, არენები, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, 2,4-D, TNT, ფენოლები, ტყვიის ნაერთები და მრავალი სხვა. ამ ექსპერიმენტებში მცენარეების ნაზარდებს აირადი ან ხსნარის სახით მიწოდებოდათ ცალკეული ტოქსიკური ნაერთი ან მათი ნარევი. ქვევით აღწერილი იქნება ამ ექსპერიმენტებით მიღებული ზოგიერთი ტიპიური ულტრასტრუქტურული სურათი.

### **მეთანი**

მეთანთან ინკუბაციის შემდეგ სიმინდის ნაზარდების ფოთლების ზედა ნაწილის უჯრედებში აღინიშნება მთელი რიგი მორფოლოგიური გადახრები. პირველ რიგში ყურადღებას იპყრობს ქლოროპლასტების არაბუნებრივი გადანაწილება და მათი თავმოყრა უჯრედების პერიფერიულ ნაწილებში. ხშირად ამ ქლოროპლასტებში შეინიშნება სახამებლის ჭარბი დაგროვება. მათი სტრომა იმდენად მკვრივია (გამუქებულია), რომ მასში არ ჩანს გრანულები და თილაკოიდები. ქლოროპლასტების სტრომაში ჩანს საერთოდ ნათელი ადგილებიც (ნახ.4.4). წაგრძელებული ლამელური მემბრანები გაჭიმულია მთელ ქლოროპლასტზე, გრძივი ღერძის გასწვრივ. ქლოროპლასტების ირგვლივ დიდი რაოდენობითაა კონცენტრირებული ლიპიდური ჩანართები. მიტოქონდრიები ასევე ელექტრონულად მკვრივი მატრიქსით და გაფართოებული კრისტებით გამოირჩევიან. უჯრედებში აგრეთვე შესამჩნევია მთლიანად დაშლილი ქლოროპლასტები, რომლების ცალკეული გრანულები დაშლილია და ჰიალოპლაზმაში იმყოფება.

ქლოროპლასტების მორფოლოგია ფოთლების შუა ნაწილის უჯრედებში აგრეთვე გადახრილია ნორმიდან — მათ ნახეარმთვარის ფორმა აქვთ მიღებული. ისევე როგორც ფოთლის ზედა ნაწილში, ქლოროპლასტები უმეტეს შემთხვევაში უჯრედის საზღვრების გასწვრივ არიან დაჯგუფებული. ზოგიერთ უჯრედებში შეინიშნება ქლოროპლასტები დაშლილი შიდა მემბრანებით ნორმიდანაა გადახრილი მიტოქონდრიების შედგენილობაც — მათი ნაწილი ნორმაზე მეტადაა გამუქებული, ნაწილი კი უჩვეულოდაა განათებული.

ფოთლის ქვედა ნაწილში უჯრედები მეთანის მავნე ზემოქმედებას ნაკლებად განიცდიან. ამ უჯრედებში ქლოროპლასტებს უფრო მრგვალი ფორმა აქვთ. მათში არ ჩანს სახამებლის მარცვლები. მიტოქონდრიების უმრავლესობას ნათელი მატრიქსები გააჩნია.



ნახ. 4.4. სიმინდის ფოთლის ზედა ნაწილის უჯრედების ქლოროპლასტები მეთანთან (25% მოცულობით) 72-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. ძირითადი ცვლილებები აღინიშნება ქლოროპლასტებში. x 30 000

## ეთანი

მცენარულ უჯრედებზე ეთანის ზემოქმედების ნეგატიური ხასიათი თითქმის არ განსხვავდება მეთანისაგან. სიმინდის ფოთლის ზედა ნაწილში შეიმჩნევა ნორმალური ქლოროპლასტები ნახევარმთვარის ფორმის გრანებით. ზოგიერთი ქლოროპლასტი ნორმაზე უფრო მეტად არის წაგრძელებული და ისინი დიდი რაოდენობით სახამებლის მარცვლებს შეიცავენ (ნახ.4.5).

ფოთლის შუა ნაწილის უჯრედებში ქლოროპლასტები წაგრძელებულ ფორმას იღებენ. უმეტეს შემთხვევაში ისინი გრანებს არ შეიცავენ და გარკვეულად მხოლოდ მატრიქსი ჩანს. ქლოროპლასტების ნაწილი გარშემორტყმულია ე.წ. გაბერილი მემბრანებით და დესტრუქციის სხვადასხვა სტადიაზე იმყოფება. შეიმჩნევა აგრეთვე ქლოროპლასტები დაშლილი გარე მემბრანით. ასეთ უჯრედებში მიტოქონდრიები ინვაგინირებულებია, აქვთ ელექტრონულად მკვრივი მატრიქსი გაფართოებული კრისტებით. უჯრედების ციტოპლაზმა ნათელია.

ფოთლის ქვედა ნაწილში, ეთანი, მეთანის მსგავსად, ქლოროპლასტებისათვის დამახასიათებელი ფორმისა და სტრუქტურის რაიმე სპეციფიკურ გადახრებს არ იწვევს. ქლოროპლასტებს აქვთ მკვეთრად გამოსახული თილაკოიდების გრანები. ამ უჯრედების მიტოქონდრიებისათვის დამახასიათებელია გაჯირჯკებული კრისტების მქონე მკვრივი მატრიქსი.



ნახ. 4.5. სიმინდის ფოთლის ზედა ნაწილის უჯრედის ქლოროპლასტები ეთან-  
თან (25% მოცულობით) 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეინიშნება  
სახამებლის მარცვლების დიდი რაოდენობა. x 30 000

### პროკანი

აღკანების ჰომოლოგიური რიგის შემდეგი აირადი წარმომადგენლის — პროკანის მოქმედება კონდარის (*Lolium multiflorum*) მაგალითზეა შესწავლილი. ამ მცენარის ფოთლის ზედა ნაწილის უჯრედებში პროკანის ზემოქმედების შედეგად ქლოროპლასტები სხვადასხვა ფორმებს ღებულობენ — ნახევრადმრგვალი ელიფსოიდიდან ნახევარმთვარემდე. თითქმის ყველა ქლოროპლასტი დიდი რაოდენობით სახამებლის მარცვლებს შეიცავს. ელექტრონული მიკროსკოპით მიღებულ სურათებზე გრანები და თილაკოიდები კარგად შეიმჩნევა, მაგრამ ისინი ძირითადად ქლოროპლასტების ერთ მხარეს არიან გადაადგილებული. ციტოპლაზმა გაჯერებულია რიბოსომებით, რაც უეჭველად მიუთითებს ცილების ბიოსინთეზის პროცესის გაძლიერებაზე.

ფოთლის შუა ნაწილის უჯრედებში ქლოროპლასტებს აგრეთვე სხვადასხვაგვარი ფორმები აქვთ, მხოლოდ ამჯერად ქლოროპლასტის ფორმები ვარირებენ მრგვალიდან ნახევარმთვარემდე. ქლოროპლასტების სტრომა ნორმაზე მეტად განათებულია. გრანები შეიმჩნევა, მაგრამ მათი რაოდენობა შემცირებულია, ქლოროპლასტებში სახამებლის მარცვლები არ გვხვდება. მიტოქონდრიების მატრიქსიც ასევე განათებულია.

ფოთლის ქვედა ნაწილის უჯრედების ქლოროპლასტებში შეინიშნება სახამებელის მარცვლების გამოჩენა. ზოგიერთ ქლოროპლასტებში გრანები მემბრანაში ქაოსურადაა განლაგებული (ნახ.4.6). მიტოქონდრიების რაოდენობა ნორმას შეესაბამება.



ნახ. 4.6. სიმინდის ფოთლის ქვედა ნაწილის უჯრედების ქლოროპლასტები პროკანით (80% მოცულობით) გაჯერებულ ატმოსფეროში 72-საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ. აღინიშნება გრანულების ქაოსური განლაგება. X 30 000

### ბუთანი

ბარდის ფოთლების მაგალითზე განვიხილოთ დაბალმოლეკულური ნახშირწყალბადების კიდევ ერთი წარმომადგენლის — ბუთანის მოქმედება უჯრედის ულტრასტრუქტურაზე. ფოთლების ზედა ნაწილის უჯრედებში ამ ალკანთან ექსპოზიციის შედეგად ქლოროპლასტების ფორმა ნახევრადმრგვალი ან ნახევარმთვარის მსგავსი ხდება, გრანების რკალები მცირე რაოდენობითა და ყოველთვის არაა განლაგებული დიაგონალზე. სახამებლის მარცვლები წაგრძელებულია. ქლოროპლასტებისა და მიტოქონდრიების ნაწილი დაშლის სხვადასხვა სტადიაში იმყოფება. შეიძლება დააკვირდეთ მიტოქონდრიების თანმიმდევრულ დეგრადაციას: საწყის ეტაპზე მატრიქსი მკვრივდება, კრისტები თანდათან ჯირჯვდება და ამის შედეგად, მიტოქონდრია კრისტების გასწვრივ ირღვევა.

ფოთლის შუა ნაწილის უჯრედებში ქლოროპლასტებს ასევე სხვადასხვა ფორმები აქვთ. ნორმალური უჯრედის ულტრასტრუქტურისთვის დამახასიათ-

ბელი ფორებიდან გადახრა ყველაზე სპეციფიკურად გრანების ღებორიენტაციით გამოიხატება. შეიმჩნევა ინვაგინირებული ქლოროპლასტები. საყურადღებოა, რომ ამ უჯრედების ქლოროპლასტების თანდათანობითი დაშლის დამამთავრებელ სტადიაზე გრანულაში თილაკოიდები გაბერილ ფორმებს ღებულობენ.

ფოთლის ქვედა ნაწილის უჯრედებში ქლოროპლასტებს უმთავრესად ნახევარწრის ფორმის ნათელი სტრომა აქვთ. გრანულები და სახამებლის მარცვლები მცირე რაოდენობით შეინიშნება. მიტოქონდრიები ნათელია და კრისტების რაოდენობა მცირეა. ამ უჯრედისათვის დამახასიათებელი ნიშანი ის არის, რომ ენდოპლაზმური რეტიკულუმის მემბრანების უმრავლესობა გლუვია.

### აირადი ალკანების ნარევი

საინტერესო შედეგებია მიღებული სიმინდის ნახარდების ფოთლების უჯრედების ულტრასტრუქტურაზე ბუნებრივი აირის მსგავსი შემადგენლობის ალკანების ნარევის (მეთანი — 88.7%, ეთანი — 6.8%, პროპანი — 2.8%, ბუთანი — 1.7%) ზემოქმედების შესწავლით. ამ ექსპერიმენტებით მიღებულია ულტრასტრუქტურის დინამიკური ცვლილების სურათი. პერმეტულ კამერებში ამ ნარევიან 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ ნორმიდან გადახრა თითქმის ყველა უჯრედული ორგანულების დონეზე შეინიშნება, კერძოდ, ხდება ბირთვების ინვაგინაცია; ქლოროპლასტები შეიცავენ სახამებლის მსხვილ მარცვლებს, კარგავენ მათთვის დამახასიათებელ ელიფსოიდურ ფორმას და სიგრძეში იწელებიან (ნახ.4.7), ზოგიერთი მათგანი კი განათებული მატრიქსის მქონე ჩონჩხითა წარმოდგენილი; იზრდება სხვადასხვა ფორმის მიტოქონდრიების რაოდენობა, ისინი ზომაში გაზრდილია, ახასიათებთ მკვერი მატრიქსი და გაჯირჯეებული კრისტები.

48 საათიანი ინკუბაციის შემდეგ უჯრედებში შეიმჩნევა პერიპლაზმური სოცრის გადიდება. ქლოროპლასტების ლამელები ძნელად გასარჩევი ხდება, შიდა მემბრანასა და სტრომას შორის შეინიშნება განათებული ადგილების გამოჩენა, რომლებიც თითქოს აცალკევებენ სტრომასა და მემბრანას. სახამებლის შემცველობა ნორმაზე დაბალია. მიტოქონდრიების მატრიქსი ნათელია, თვით მიტოქონდრიები და მათი კრისტები კი გაჯირჯეებულია.

72 საათიანი ინკუბაციის შემდეგ ქლოროპლასტებისა და მიტოქონდრიების მდგომარეობა არ იცვლება, მაგრამ აღინიშნება ბირთვების უფრო ძლიერი პლაზმოლიზი და ინვაგინაცია, ენდოპლაზმური რეტიკულუმი უმეტეს ნაწილში აგრანულარული ხდება.

ინკუბაციის 96 საათის შემდეგ ნათლად ისახება ქლოროპლასტებში მომხდარი ძლიერი ცვლილებების შედეგი, რაც გამოიხატება ზომების გაზრდაში და სახამებლის მარცვლების დიდი რაოდენობით წარმოქმნაში. მიტოქონდრიების სიმკვრივე ირდევია, ისინი კონცენტრირებული არიან ბირთვებისა და ქლოროპლასტების ირგვლივ, კრისტები ოდნავ გაჯირჯეებულია. ქლოროპლასტები



ნახ. 4.7. სიმინდის ფოთლის უჯრედების ქლოროპლასტები აირადი ალკანების ნარევით (მეთანი — 88.7%, ეთანი — 6.8%, პროპანი — 2.8%, ბუთანი — 1.7%) გაჯერებულ ატმოსფეროში 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეინიშნება ქლოროპლასტების წაგრძელება, გრანების ქაოსური განლაგება და უჯრედის დესტრუქცია.  $\times 30\ 000$

ჯგუფებად გროვდებიან უჯრედის ცალკეულ ნაწილებში. შეინიშნება ციტოპლაზმაში ბირთვების ირგვლივ განლაგებული ოსმიოფილური მარცვლები დაგორგლილი მემბრანების სახის ორგანოები, რომელიც მიეღინურ ჩანართებს მიაგავს.

ალკანების ნარევიან 120 საათიანი ინკუბაციის შემდეგ აღინიშნება უჯრედის სტრუქტურული ორგანიზაციის მნიშვნელოვანი ცვლილება, კერძოდ: ადგილი აქვს ძლიერ პლაზმოლიზს, მემბრანული სისტემა არ ჩანს, ხოლო სტრომა განცალკევებულია შიდა მემბრანისაგან. ქლოროპლასტები ვიწრო და წაგრძელებული ფორმისაა, სხვადასხვა ფორმისა და ზომის მიტოქონდრიებს მკერფი მატრიქსი და გაჯირჯებული კრისტები აქვთ. ბირთვები ისევ ინვაგინირებულია.

სიმინდთან და სხვა გამოცდილ მცენარეებთან შედარებით ალკანების ნარევის ზემოქმედების მიმართ ყველაზე გამძლე კონინდარი აღმოჩნდა. ამ მცენარის ფოთლების ალკანების ნარევიან 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ მნიშვნელოვანი ულტრასტრუქტურული ცვლილებები არ აღინიშნება. ნორმიდან გადახრა

მხოლოდ 48 საათის შემდეგ ჩნდება, როდესაც სხედასხვა ფორმის ქლოროპლასტებზე ლამელური სისტემის მკაცრი ორიენტაციის დარღვევა და სახამებლის მარცვლების შემცველობის გაზრდა შეიმჩნევა. ამ უჯრედებისათვის აგრეთვე დამახასიათებელია თავისებურება — მიტოქონდრიების ქლოროპლასტებთან დაახლოება.

72-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ შეიმჩნება ტოქსიკანტის გავლენა ქლოროპლასტების და მიტოქონდრიების აგებულებაზე. დაშლილი ლამელური სისტემა და საკმაოდ მსხვილი ზომის სახამებლის მარცვლები ქლოროპლასტებში დიდი რაოდენობით შეინიშნება. ზოგიერთ უჯრედებში ქლოროპლასტები სრულიად დაშლილია. მიტოქონდრიების ნაწილს აქვს მკეროვი, ნაწილს კი ნათელი მატრიქსი, მაგრამ ყველა მათგანში კრისტები გაჯირჯეულია. ამ დროს მიტოქონდრიები ბირთვებისა და ქლოროპლასტების ირგვლივ არიან თავმოყრილი.

96 საათიანი ინკუბაციის შემდეგ, კონდარის უჯრედული ორგანოები თითქოს აღდგენას იწყებენ, ქლოროპლასტებში ქრება სახამებლის მარცვლების მნიშვნელოვანი რაოდენობა, მიტოქონდრიებში მატრიქსი ნორმალურ დამახასიათებელ ფორმას და სახესღებულობს. ერთადერთი შესამჩნევი პათოლოგია ბირთვში აღინიშნება, სადაც “ქრომატინული კოაგულაცია” იწყება.

ზემოაღწერილი, ერთი შეხედვით აღდგენითი პროცესი დროებითი ხასიათისა და აღკენების ნარევის 120-საათიანი ზემოქმედების შემდეგ უჯრედის ულტრასტრუქტურაში კვლავ ვლინდება მკვეთრად გამოხატული გადახრები: ქლოროპლასტები ღებულობენ მათთვის არადამახასიათებელ ფორმებს, ლამელური სტრუქტურა დეზორიენტირდება, სახამებლის მარცვლების რაოდენობა ისევ იზრდება და აღინიშნება ნაწილობრივი პლაზმოლიზი, თუმცა მიტოქონდრიები თითქმის ნორმალურ მდგომარეობაში რჩება.

ამგვარად, ზემოთ მოყვანილი შედეგების შეჯამებით, აშკარად გამოჩნდა, რომ დაბალმოლეკულური ალკანებისათვის დამახასიათებელი ერთ-ერთი ძირითადი პათოლოგიური ეფექტი არის ქლოროპლასტების მორფოლოგიური და სტრუქტურული ცვლილებები, რაც ამ ორგანელის მემბრანულ დონეზე ხორციელდება. აირადი ალკანების მიმართ ყველაზე მგრძობიარეა ფოთლის ზედა და შუა ნაწილი. ქლოროპლასტური თილაკოიდების დენსიტომეტრული ანალიზი უჩვენებს, რომ გამოკვლეული ალკანების ატმოსფეროში ფოთლების 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ ქლოროპლასტების საშუალო ფართობი იზრდება. საინტერესოა, რომ რაც მეტია ალკანში ნახშირბადატომების რიცხვი, მით უფრო მეტად ხდება ქლოროპლასტის ფართობის ზრდა. ამავე დროს, თილაკოიდების მემბრანებს შორის სისქე და მანძილი, პირიქით, მცირდება. თილაკოიდების მემბრანების გაჯირჯევა მორფოლოგიურ ცვლილებებს იწვევს, რასაც თან ახლავს ქლოროპლასტების მატრიქსის მნიშვნელოვანი შემცირება, რაც საბოლოოდ ნეგატიურად მოქმედებს მთელ რიგ ბიოქიმიურ პროცესებზე, უპირველეს ყოვლისა კი — ფოტოსინთეზზე.



### **პროპილენი**

პროპილენის (25% მოცულობით, ექსპოზიცია — 72 სთ) შემცველ ატმოსფეროში ბარდის აღმონაცენების გამოზრდით შემდეგი ულტრასტრუქტურული სურათი მიიღება: ფოთლის ზედა ნაწილში პლასტიდების და მიტოქონდრიების დონეზე შეიმჩნევა ნაწილობრივი პლასმოლიზი. ალკანებისაგან განსხვავებით, ამ შემთხვევაში ხდება ქლოროპლასტების ზომების შემცირება, ლამელური სისტემის გაწყვეტა, სახამებელის მარცვლების დაგროვება. მიტოქონდრიები გაჯირჯეულია, მათი მატრიქსი შემკვრივებულია, კრისტები კი — გაფართოებული.

ფოთლის შუა ნაწილის უჯრედებში პროპილენის დესტრუქციული გავლენა ძლიერდება. კერძოდ, პლასტიდებში სახამებელის უფრო ინტენსიური დაგროვება აღინიშნება, ზოგიერთ უჯრედებში ქლოროპლასტები დარღვეულია და გარკვევით ჩანს ციტოპლაზმის მთელ პერიმეტრზე განბნეული თილაკოიდების ცალკეული გრანულები. მიტოქონდრიები დესტრუქციის საწყის სტადიაზე იმყოფებიან — მატრიქსის შიგთავსის დაკარგვით ჩნდება განათებული ადგილები, კრისტების დიდი რაოდენობა საერთოდ ქრება და ორმაგი მემბრანისაგან ცარიელი კონტური რჩება.

ფოთლის ქვედა ნაწილი ქლოროპლასტების და მიტოქონდრიების დონეზე კიდევ უფრო მნიშვნელოვან ცვლილებებს განიცდის. ციტოპლაზმა ხდება ნათელი, ბირთვი — ფაშარი, მემბრანული კომპლექსები კი — ძნელად შესამჩნევი.

### **ბუთილენი**

ბარდის ფოთლების უჯრედების ულტრასტრუქტურაზე ბუთილენი (25% მოცულობით, ექსპოზიცია — 72 სთ) თითქმის პროპილენის ანალოგიურად მოქმედებს. ფოთლის ზედა ნაწილის უჯრედებში ორგანელების აგებულება, ძირითადად, ნორმის ფარგლებშია, მაგრამ ზოგიერთ ქლოროპლასტებში გრანები განლაგებულია გარე მემბრანებთან, რაც ნორმიდან გადახრას წარმოადგენს.

ბუთილენის დესტრუქციული მოქმედების გამოვლენა ფოთლის შუა ნაწილის უჯრედებში იწყება. ნორმალურად განვითარებულ ქლოროპლასტებთან ერთად შეინიშნება სრულად ან ნაწილობრივ დაშლილი ორგანელებიც. დეზორგანიზაცია შეიმჩნევა მიტოქონდრიებშიც, რომლებიც კარგავენ კრისტების განსაზღვრულ ორიენტაციას, ხოლო მატრიქსი ნათელი ხდება. ფოთლის ქვედა ნაწილში საერთო სურათი იგეგა, მხოლოდ დესტრუქტურიებული ორგანელების წილი შესამჩნევად მომატებულია.

მოყვანილი მონაცემებიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ უმდაბლესი ალკანები იწვევენ უჯრედოვანი სტრუქტურებისთვის დამახასიათებელ და სპეციფიკურ ცვლილებებს. ალკანებისაგან განსხვავებით, რომლებიც ფოთლების ზედა და შუა ნაწილის უჯრედებს არღვევენ, ალკენები უფრო მეტად ფოთლის შუა და ქვედა ნაწილის უჯრედებზე ზემოქმედებენ. ორივე შემთხვევაში ყველაზე მეტად ქლოროპლასტები და მიტოქონდრიები ზიანდება.

### ბენზოლი და მისი წარმოებულები

ბენზოლის გავლენა შესწავლილია როგორც ერთწლიანი ბალახოვანი კულტურების, ასევე მრავალწლიანი ხე-მცენარეების ფოთლების უჯრედების ულტრასტრუქტურულ ორგანიზაციაზე. არაერთი გამოკვლევით ნაჩვენებია, რომ ბენზოლის ზეგავლენით გამოწვეულ ნეგატიურ ცვლილებებს, პირველ რიგში, ფოტოსინთეზური აპარატი განიცდის. ეს ულტრასტრუქტურულად ქლოროპლასტი-ლამელები-გრანების კომპლექსის დეზორგანიზაციით და ქლოროპლასტებში ოსმიოფილური ჩანართების გაჩენით გამოიხატება (ნახ.4.8). გამოვლენილია მცენარეები, რომელთა ფოტოსინთეზური აპარატი ბენზოლის მოქმედების მიმართ მაღალი რეზისტენტობით გამოირჩევა: ცაცხვი (*Tilia caucasica*), ნეკერჩხალი, სოჭი (*Abies*), ვერხვი, ჩვეულებრივი ნაძვი, კაკლის ხე (*Juglans regia*), ჭადარი (*Platanus*). კვიპაროსი, იფანი (*Fraxinus excelsior*) და სხვ.



ნახ. 4.8. ნეკერჩხლის ფოთლის უჯრედის ფრაგმენტი [ $1-6-^{14}\text{C}$ ] ბენზოლთან (კონცენტრაცია —  $10^{-4}\text{ M}$ ) 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეინიშნება ქლოროპლასტი-ლამელები-გრანების კომპლექსის დეზორგანიზაცია და ქლოროპლასტებში ოსმიოფილური ჩანართების გაჩენა.  $\times 60\ 000$

ბენზოლის ორთქლის ( $4 \cdot 10^{-5}\text{ M}$ ) დაბალი კონცენტრაციების მოქმედება ლობიოს 7-დღიანი აღმონაცენების ფოთლების უჯრედულ ულტრასტრუქტურაში მხოლოდ უმნიშვნელო ცვლილებებს იწვევს, რაც გამოიხატება ქლოროპლასტებში მატრიქსის განათებული ფრაგმენტების გამოჩენაში. კონცენტრაციის

ხუთჯერ ( $2 \cdot 10^{-4}$  M-მდე) გაზრდის დროს ბენზოლის ნეგატიური მოქმედება მხოლოდ ქლოროპლასტების დონეზე ვლინდება, რაც ლამელების და თილაკოიდების დეზორიენტაციით გამოიხატება. კიდევ უფრო მაღალი —  $4 \cdot 10^{-4}$  M კონცენტრაციის დროს უჯრედის ულტრასტრუქტურაში უკვე არსებითი ცვლილებები შეიმჩნევა: ქლოროპლასტებში შიდამემბრანული სისტემები და მატრიქსი ირღვევა, უჯრედის კედელი და მიტოქონდრიები მკეროვდება, ჩნდება ჩანართებიც, რომლებიც პერიპლაზმაში მიეღინური ტიპისაა, ხოლო ვაკუოლებში — ოსმიოფილური.

არომატული ნიტრო-წარმოებულები — ნიტრობენზოლი, *o*-ნიტროფენოლი და 2,4-დინიტროფენოლი ( $10^{-3}$  M კონცენტრაციით) ფოთლის ზედა და ქვედა ნაწილებში უჯრედული ულტრასტრუქტურის სრულ დესტრუქციას იწვევენ. ამასთან ბენზოლი, ფენოლი, *o*-ნიტროფენოლი და *o*-კრეზოლი მხოლოდ ფოთლის ქვედა ნაწილში ინდუცირებენ პათოლოგიურ დარღვევებს. როგორც ამ ნაერთების მაგალითებიდან ჩანს, ქსენობიოტიკების განსხვავებული ტოქსიკურობა განპირობებულია არა მარტო განსაზღვრული ფუნქციური ჯგუფების არსებობით, არამედ ტოქსიკანტების მოლეკულაში მათი განლაგებითაც.

### პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები

პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების (ბენზ[*a*]ანტრაცენის და 3,4-ბენზპირენის) ფესვებში შეღწევის შემდეგ უჯრედული ულტრასტრუქტურის დესტრუქცია ბირთვის დონეზე მიმდინარეობს. ნორმიდან გადახრის პირველი ნიშნებია ბირთვული მემბრანის კონფიგურაციის მნიშვნელოვანი ცვლილება. ამ დროს თვით ბირთვი ინვაგინირებულია (ნახ.4.9). 3,4-ბენზპირენის დაბალი კონცენტრაციები ( $10^{-4}$  M-ის რიგის) უჯრედული სტრუქტურების მკვეთრად გამოხატულ პათოლოგიებს არ იწვევენ. როგორც ჩანს, ამის მიზეზია უჯრედებში მიმდინარე ტოქსიკანტების ღრმა ფერმენტული ჟანგვითი გარდაქმნები, რის შედეგად მათი დეგრადაციის პროდუქტები უჯრედისათვის დამახასიათებელ მეტაბოლურ პროცესებში ერთვებიან. სწორედ ტოქსიკანტების ასეთი კონცენტრაციები შეიძლება ჩაითვალოს მეტაბოლურად (იხ. § 4.1). კონცენტრაციის  $10^{-3}$  M-მდე (მაინჰიბირებელი კონცენტრაცია) გაზრდით ბირთვში სხვადასხვა ფორმისა და ზომის გროების გაჩენა შეიმჩნევა, რაც “ქრომატინული კოაგულაციის” დასაწყისის მანიშნებელია, ეს კი თავისთავად ღმმ-ის სინთეზის ბლოკირებაზე მიუთითებს. ამ დროს პათოლოგიური გადახრები აღინიშნება მიტოქონდრიებშიც, რომლებიც სურათზე განათებული ჩანს შიგთავსის დაკარგვის გამო. უფრო მაღალი,  $10^{-2}$  M-ის რიგის კონცენტრაცია ლეტალურია — ამ დროს უჯრედის სრული დესტრუქცია იწყება. უნდა აღინიშნოს, რომ პლასტიდები პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების ზემოქმედების მიმართ ყველაზე გამძლეა.



ნახ. 4.9. სიმინდის ფესვების უჯრედის ფრაგმენტი  $10^{-7}$  M 3,4-ბენზპირენის ხსნართან 24-საათიანი ინკუბაციის შემდეგ. შეიმჩნევა ბირთვის ინვაგინაცია და "ქრომატინული კოაგულაცია".  $\times 60\ 000$

### ბენზილინი

არომატული ამინი — ბენზილინი უადრესად მაღალ ტოქსიკურობას ამჟღავნებს. მის მეტაბოლურ კონცენტრაციებად  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  M ითვლება (სიმინდის 7-დღიანი აღმონაცენების ფესვების შემთხვევაში). ამ დროს უჯრედის ულტრასტრუქტურაში შესამჩნევი ცვლილებები ჯერ არ ვლინდება. უფრო მაღალი კონცენტრაციის ( $10^{-5}$  M-ის) დროს, ფესვების მერისტემული ზონის უჯრედებში ბირთვების ინვაგინაცია, ბირთვაკების ფორმის შეცვლა, პლასტიდების მატრიქსის შემკვრივება და მიტოქონდრიების ნაწილობრივი ღიზისი აღინიშნება. კონცენტრაციის  $10^{-4}$  M-მდე გაზრდა  $\text{Ca}^{2+}$ -ის სინთეზის ინჰიბირებას იწვევს, რის გამოც  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP-აზის აქტივობა ძლიერ ითრუნება და მემბრანის ბარიერული ფუნქცია ირღვევა. ამის შედეგად, მემბრანასთან დაკავშირებული  $\text{Ca}^{2+}$  გამოთავისუფლდება, ეს კატიონი გამოდის ორგანულებიდან, რომლებიც "კალციუმის დეპოს" წარმოადგენენ და ადვილად აღწევს ციტოპლაზმაში. საბოლოოდ, კალციუმის იონების კონცენტრაცია ციტოპლაზმაში ძლიერ იზრდება. როგორც ჩანს, უჯრედის ულტრასტრუქტურული ცვლილებები  $\text{Ca}^{2+}$ -დამოკიდებული მეტაბოლური პროცესების რეგულაციის და, მაშასადამე, კალციუმის ჰომეოსტაზის დარღვევით არის გამოწვეული.

## 2,4-D

პერბიციდ 2,4-D-ს გავლენის ხასიათი ქლოროპლასტების სტრუქტურაზე და ვაზის ფოთლების ფოტოსინთეზური აპარატის ფუნქციონირებაზე ტოქსიკანტის მზარდი კონცენტრაციების პათოლოგიური მოქმედების კიდევ ერთი თვალსაჩინო მაგალითია. 2,4-D-ს კონცენტრაციის მატება 0.01-დან 1%-მდე შესამჩნევად აძლიერებს ფოთლის ქვედა ნაწილის დაზიანებას, რაც კარგად ჩანს მიკროსკოპში. უჯრედის მემბრანული ორგანოების, განსაკუთრებით კი ქლოროპლასტების დაშლა მკვეთრად გამოხატული ამ პერბიციდის 0.1%-იანი კონცენტრაციის დროს. როდესაც უჯრედში შეღწეული 2,4-D-ს კონცენტრაცია 1%-ს აღწევს, აღინიშნება ფოტოსინთეზური აპარატის ფუნქციონირების ძლიერი დარღვევა და უჯრედების მთლიანი დესტრუქცია. უნდა აღინიშნოს რომ ანალოგიური სურათები შეორდება სხვა პერბიციდის — დინიტრო-*o*-კრეზოლის იგივე კონცენტრაციების შემთხვევაში.

ასევე კლასიკური სურათი მიიღება 2,4-D-სთან ინკუბაციის ხანგრძლივობის გაზრდისას. პერბიციდთან (კონცენტრაცია 0.3%) სიმინდის ნაზარდების ექსპოზიციის დროის გაზრდა 24-დან 72 სთ-მდე უჯრედული სტრუქტურების დესტრუქციული ცვლილებების გაღრმავებას იწვევს. დროის ამ მონაკვეთში ფოთლის ზედაპირი მისთვის დამახასიათებელ ხაოებიან სტრუქტურას ნაწილობრივ კარგავს და ბაგეები ეპიდერმისში იძირება. 2,4-D-ს შემოქმედებით ლიმონის (*Citrus limon*) ფოთლებში ეპიდერმული უჯრედებით მჭიდროდ გარშემოერთყმიან ბაგეებს, რის გამოც ამ უკანასკნელთა ფორმა უფრო მომრგვალებული ხდება. ფოთლის უჯრედებში ზიანდება მიტოქონდრიებიც, რომელთა კრისტები ნორმალურ ფორმას კარგავს და ძლიერ იგრიხება. პერბიციდებთან კონტაქტი ვაზის ფოთლების ზედაპირის ნორმალური ფორმის დაკარგვას იწვევს. ასეთი ფოთლების უჯრედებში მიტოქონდრიული კრისტების გასწორება აღინიშნება. ნორმიდან სხვა დამახასიათებელ გადახრას ბაგეების ზომების შემცირება წარმოადგენს. ეპიდერმისის ქსოვილის უჯრედების სტრუქტურული ცვლილებები საბოლოოდ ფოთლის ელასტიურობის დაკარგვას იწვევენ.

## TNT

ნიშანდებული [1-<sup>14</sup>C] TNT-ს  $5 \cdot 10^{-4}$  M ხსნარზე 5 დღე-ღამის განმავლობაში ინკუბირებული სოიის ფესვების უჯრედებში შეღწეული ტოქსიკანტი, უჯრედის კედლებში ელექტრონულად მკეროვი (გამუქებული) ნიშნის სახით მჟღავნდება ენდოპლაზმურ რეტიკულუმში, მიტოქონდრიებში, პლასტიდებში, ბირთვებში, ბირთვაკებში და ვაკუოლებში (ნახ.4.10). TNT-ს აღნიშნული კონცენტრაცია სიმინდის ფესვების უჯრედების მთლიან დესტრუქციას იწვევს. სოიის ფოთლებში TNT-ს რადიოიზოტოპური ნიშანი ჩნდება უჯრედის კედლებში, ქლოროპლასტებში და ვაკუოლებში. სიმინდის ფოთლების უჯრედებში ნიშანდებული ნაერთები



ნახ. 4.10. სოიის ფესვების უჯრედის ფრაგმენტები  $[^{14}\text{C}]\text{-TNT-ს } 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ M}$  ხსნარზე 5-დღიანი ინკუბაციის შემდეგ. რადიოაქტიური ნიშანი შეიმჩნევა ბირთვში და ბირთვკვებში (1), მიტოქონდრიებში (2,4,5,7,8), ენდოპლაზმურ რეტოკულუმში (2,7), პლასტიდებში (3,4), ვაკუოლებში (4) და უჯრედის კვლებში (6). 1,2 - x 28 000; 3,5,8 - 6 36 000; 4 - x 18 000; 6,7 - x 20 000

ანალოგიურად ნაწილდება. ამ ორი მცენარის უჯრედების ულტრასტრუქტურების შედარებით ანალიზი საშუალებას იძლევა დავასკვნათ, რომ სოია გაცილებით უფრო მდგრადია TNT-ს მოქმედების მიმართ, ვიდრე სიმინდი.

ზემოთ მოყვანილი შედეგებიდან განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს TNT-ს ლოკალიზაცია იმ მემბრანულ სტრუქტურებზე, რომლებიც მონაწილეობენ ადღგენითი ექვივალენტების (ენდოპლაზმური რუტიკულუმის მემბრანები, მიტოქონდრიები და პლასტიდები) ტრანსპორტში. საკარაუდოა, რომ TNT-ს ასეთი ლოკალიზაცია განპირობებულია მისი ფერმენტული ტრანსფორმაციით, რაც ნიტრორედუქტაზების საშუალებით ხორციელდება. ეს ფერმენტები ნიტროჯგუფების ადღგენისათვის საჭირო ელექტრონებს სწორედ მემბრანული რედოქს-ჯაჭვებიდან იღებენ. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ეს მემბრანები ბევრ ადგილზე კონტაქტირებენ ერთმანეთთან, რაც ორგანოებიდან ნიტრორედუქტაზებზე აღმდგენელი ექვივალენტების მიგრაციას აადვილებს.

### **ტყვიის ნაერთები**

მძიმე მეტალები ორგანული ქსენობიოტიკებისაგან განსხვავებულად მოქმედებენ უჯრედის ულტრასტრუქტურულ ორგანიზაციაზე. ეს კარგად ჩანს სხვადასხვა მცენარეების უჯრედებზე იონურ მდგომარეობაში მყოფი ტყვიისა და მისი EDTA-სთან კომპლექსის გავლენის მაგალითზე.  $Pb^{2+}$  (კონცენტრაცია 400 მკ/ლ) ფესვის უჯრედების სრულ დესტრუქციას იწვევს, ხოლო მისი ნაერთები ელექტრონულად მკვრივი ნალექის სახით უჯრედის კედლებსა და დამოკიდებული ორგანოების ფრაგმენტებში აღინიშნება. ფოთლების უჯრედებში ტყვია ყველა შიდაუჯრედულ სტრუქტურაში შეიმჩნევა, დიდი რაოდენობით კი სახამებლის გრანულებში და სტრომაში გროვდება.

ტყვიის EDTA-სთან კომპლექსი (1 : 2 მოლური თანაფარდობით) ფესვების უჯრედების ანალოგიურ დეზორგანიზაციას იწვევს. EDTA-სთან ხელატირებული ტყვია ელექტრონულად მკვრივ ნალექს არ წარმოქმნის, მაგრამ შეიმჩნევა ლიპიდური გლობულების გაზრდა, ქლოროპლასტების ლამელების შიდამემბრანული სისტემის ფრაგმენტაცია და დეზორიენტაცია, ქლოროპლასტების გარეთა მემბრანის ნაწილობრივი ლიზისი და სხვა მძიმე პათოლოგიური დაზიანებები.

## **4.2 მცენარეული უჯრედის ულტრასტრუქტურული რეორგანიზაცია ქსენობიოტიკების მეთაბოლიზმის პროცესში**

ზემომოყვანილი მონაცემების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ მცენარეები ერთმანეთისაგან განსხვავებიან ორგანული ტოქსიკანტების ასიმილირების უნარით. ციტოპლაზმაში შეღწევის შემდეგ ტოქსიკური ნაერთები

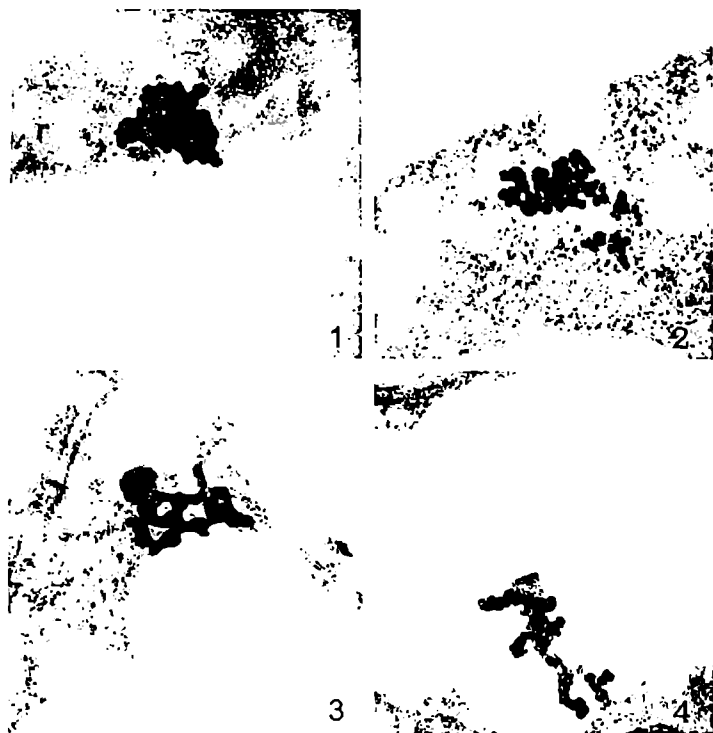
სხვადასხვა ინტენსივობით ერთგებიან სუბუჯრედულ ორგანელებში. ერთდროულად ხდება იმ ფერმენტების ინდუქცია, რომლებიც ტოქსიკანტების შემდგომ ჟანგვით გარდაქმნებში მონაწილეობენ. ყველა ცნობილი ტოქსიკური ნაერთები მცენარეული უჯრედის აგებულებას სხვადასხვა ხარისხით ცვლის. მიუხედავად იმისა, რომ ტოქსიკური ნაერთების დაბალი, ე.წ. მეტაბოლური კონცენტრაციის დროს უჯრედის ციტოლოგია ძირითადად არ იცვლება, უეჭველია, რომ უჯრედების ულტრასტრუქტურაში ამ შემთხვევაშიც ადგილი აქვს ნორმიდან ზოგიერთ შექცევად გადახრას, კერძოდ, პერიპლაზმური სივრცის გაფართოებას, პლაზმოდემების რაოდენობის შემცირებას ან მათ მთლიან გაქრობას, ენდოპლაზმური ბადის მოცულობის გაფართოებას, ვაკუოლების რიცხვის გაზრდას, ორგანელებს შორის კონტაქტების გაჩენას და ა.შ. ცხადია, ყველა ეს ცვლილება ხელს უწყობდეს ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის პროცესის გაძლიერებას. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, უჯრედი გარკვეულ ულტრასტრუქტურულ რეორგანიზაციას ახდენს, რათა უცხო ნაერთის გაუვნებელყოფის მიზნით შიდაუჯრედული რესურსების მობილიზაცია მოახდინოს.

განსაკუთრებულ ყურადღებას იპყრობს ისეთი პროცესები, რომლებიც ხელს უწყობენ ტოქსიკური ნაერთების უჯრედიდან მოცილებას. ამ პროცესებიდან პირველ რიგში უნდა გამოიყოს უჯრედში შეღწეული ქსენობიოტიკების ვაკუოლებში დეპონირება, რაც პრაქტიკულად ყველა ორგანული ტოქსიკანტისთვის დამახასიათებელი მოვლენაა და ხელს უწობს ტოქსიკური ნაერთის მოცილებას სიცოცხლისათვის მნიშვნელოვანი ცენტრებიდან, როგორებიცაა ბირთვი, მიტოქონდრიები, პლასტიდები და ა.შ. ამ პროცესის თანმიმდევრული მსვლელობა განსაკუთრებით თვალსაჩინოდ შეინიშნება ქსენობიოტიკების ნიშანდებული პრეპარატების გამოყენების დროს (ნახ.4.11).

ვაკუოლებში ძირითადად ნაწილობრივ გარდაქმნილი ტოქსიკანტები თავსდება. ხშირად ისინი ქსენობიოტიკების და/ან ენდოგენურ ნაერთებთან მათი გარდაქმნის შუალედური პროდუქტების კონიუგატებს წარმოადგენენ. მაგ., ქერის (*Hordeum vulgare*) აღმონაცენების ფესვების უჯრედებში ნიშანდებული 2,4-D-ს შეღწევის შემდეგ ვაკუოლებში აღმოჩენილია რადიოაქტიური კონიუგატები, რომლის 80% პერბიციდების მეტაბოლიტების O-β-D-გლუკოზიდებს წარმოადგენენ.

ტოქსიკანტების მოქმედებით ვაკუოლების ზომები, როგორც წესი, მნიშვნელოვნად მატულობს. ტოქსიკური ნაერთების ვაკუოლიზაციის პროცესის ინტენსიფიკაციის გარდა, ხშირად აღინიშნება, მცირე ზომის ვაკუოლების შერთობა და მათგან უფრო დიდი ზომის ორგანელების წარმოქმნა, რომლებიც მცენარეულ უჯრედში საკმაოდ დიდ შიდაუჯრედულ სივრცეს იკავებენ. ამჟამად დროს, როგორც კი უჯრედს ამის შესაძლებლობა ეძლევა, ე.ი. როდესაც ტოქსიკური ნაერთის ზემოქმედება იხსნება და ციტოპლაზმაში ტოქსიკური ნაერთების კონცენტრაცია მცირდება, იწყება ტოქსიკანტების ნაშთების გამოტანა ვაკუოლებიდან ციტოპლაზმაში, შემდეგ კი მათი უჯრედიდან გარეთ, უჯრედშორის სივრცეში გატანა. ეს მოვლენა გარკვევით შეინიშნება ტოქსიკანტის შემცველი არედან ბუნე-





**ნახ. 4.11.** სიმინდის ნაზარდების ფესვის აპექსის უჯრედში  $[1-^{14}\text{C}]$  ნიტრობენზოლის (0.15 mM) შეღწევის და მოძრაობის ცალკეული სტადიები. ფოტომონტაჟი გვიჩვენებს პლაზმალემის მემბრანაში ქსენობიოტიკის შეღწევას (1), ციტოპლაზმაში გადაადგილებას (2), ვაკუოლთან მისვლას (3) და მასში დეპონირებას (4). 1 —  $\times 48\,000$ ; 2 —  $\times 36\,000$ ; 3 —  $\times 50\,000$ ; 4 —  $\times 30\,000$

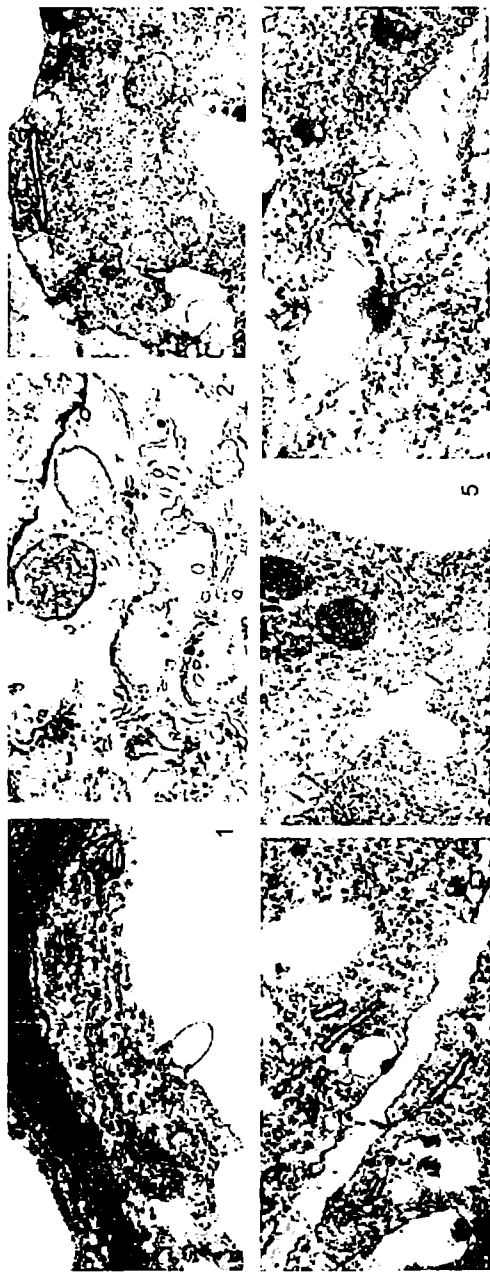
ბროვ საკვებ არეზე მცენარეების გადატანის შემდეგ. ასეთ შემთხვევებში უჯრედის პერიპლაზმური სივრცე საგრძნობლად ფართოვდება. ენდოპლაზმური რეტისკულუმის ხორკლიანი მემბრანების აგრანულაციის შემდეგ ხდება მათი კონტაქტი ვაკუოლებთან და კონიუგატების ნაწილი ვაკუოლებიდან გლუვ მემბრანულ ცისტერნებში გადადის (ნახ.4.12–2). ამის შემდეგ იწყება ენდოპლაზმური რეტისკულუმის ცისტერნების ვეზიკულების სახით ფრაგმენტაცია. ეს ვეზიკულები უჯრედის პერიფერიისაკენ გადაადგილდებიან და პლაზმალემის მემბრანებთან გროვდებიან (ნახ.4.12–3). ტოქსიკანტის უჯრედიდან გამოტანის დასკვნით ფა-

ხაში ადგილი აქვს ე.წ. ვეზოციტოზური სეკრეციის პროცესის გააქტიურებას — ვეზიკულები პლაზმალემასთან ხშირ კონტაქტებს წარმოქმნიან და ერწყმიან მათ  $Ca^{2+}$ -დამაკავშირებელი ცენტრების საშუალებით (ნახ. 4.12—4,5). ყოველივე ამის შედეგად ვეზიკულების შიგთავსი პერიპლაზმურ სივრცეში გამოდის (ნახ. 4.12—6). გამორიცხული არაა, რომ აღწერილი პროცესის შედეგად ვეზიკულებმა უჯრედის გარეთ კონიუგატებთან ერთად ტოქსიკანტების დამჟანგველი ფერმენტული სისტემებიც გამოიტანონ და ქსენობიოტიკის დეტოქსიკაციის პროცესი უჯრედშორის სივრცეში გაგრძელდეს.

ვაკუოლიზებული კონიუგატების უჯრედის საზღვრებს გარეთ გატანა უფრო მარტივი გზითაც — ვაკუოლიდან პერიპლაზმაში პირდაპირი ექსკრეციით შეიძლება განხორციელდეს. ამ პროცესში უშუალო მონაწილეობას იღებს აგრანულირებული ენდოპლაზმური რეტიკულუმის ცისტერნები, რომლებიც ვაკუოლებისა და პლაზმალემის დამაკავშირებელ არხებს წარმოქმნიან (ნახ. 4.12—1). ამ არხებით იხსნება გზა ტოქსიკური ნაშთების ვაკუოლებიდან პირდაპირ უჯრედშორის სივრცეში გადასასვლელად.

ტოქსიკური ნაერთების გავლენის შედეგად მცენარულ უჯრედებში ძალიან ხშირად რიბოსომების რაოდენობის მკვეთრი ზრდა შეინიშნება, რაც, ცხადია, ცილების ბიოსინთეზის პროცესების გაძლიერებასთან არის დაკავშირებული. ნიტრობენზოლის სხვადასხვა კონცენტრაციების ზემოქმედების შემდეგ, სიმინდის ფესვის აპექსის ზონის ულტრათხელი ანათალების ელექტრონულ-მიკროსკოპიული დაშვრისას გარკვევით აღინიშნება რიბოსომების სიმრავლის გამო გამუქებული უჯრედები. ნიტრობენზოლის დაბალი კონცენტრაციების ( $1.5 \cdot 10^{-5}$  M) დროს ასეთი უჯრედები მხოლოდ სიმინდის ფესვებში ვლინდება, ხოლო სოიის უჯრედებში, რომლებიც მდიდარია სამარაგო ცილოვანი კონგლომერატებით, რიბოსომების რაოდენობა მხოლოდ  $1.5 \cdot 10^{-5}$  M კონცენტრაციების დროს იზრდება, როდესაც ცილების მარაგი დახარჯულია. ცილების ბიოსინთეზის გაძლიერებამ, ერთი მხრივ, ხელი უნდა შეუწყოს იმ ცილოვანი დეფიციტის ბალანსირებას, რაც ტოქსიკურ ნაერთებთან კონიუგაციის დროს ცილების ხარჯვის გამო წარმოიქმნება, ხოლო მეორე მხრივ, უნდა მოახდინოს დეტოქსიკაციურ პროცესებში მონაწილე ფერმენტების ინდუქცია. ჰისტოქიმიური და ბიოქიმიური ანალიზებით დადგენილია, რომ ამ დროს დეტოქსიკაციისთვის მნიშვნელოვანი ისეთი ფერმენტები ინდუცირდება, როგორებიცაა: პეროქსიდაზები, ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზები, ფენოლოქსიდაზები. ამ ოქსიდაზების შემცველობა და აქტიუობა ზოგჯერ ერთი რიგითაც კი იზრდება უჯრედის კულტურაში, პლაზმალემაში, ენდოპლაზმური რეტიკულუმის მემბრანებში, ტონოპლასტებსა და ვაკუოლებში, ე.ი. იქმნება პირობები, რომლებიც ხელს უწყობენ ტოქსიკანტების ჟანგვითი გარდაქმნების გაძლიერებას.

მცენარეული უჯრედის ძალისხმევა, მინიმუმამდე დაიყვანოს ქსენობიოტიკების დესტრუქციული მოქმედება, ულტრასტრუქტურულად არამარტო დეტოქსიკაციაში მონაწილე ფერმენტების ინდუქციით, არამედ მათი ეფექტური ფუნ-



ნახ. 4.12. ტოქსიკანტის კაკოულებიდან უჯრედის გარეთ გამოტანის ცალკეული სტადიების ფოტომონტაჟი. ამ ექსპერიმენტებში დაკვირვება ხდებოდა სიმინდის აღმონაცემების ფესვების აპექსის უჯრედებზე. მცენარეები 2,4-D-სთან (1.4x10<sup>-4</sup>M) 96 საათიანი ინკუბაციის შემდეგ გადატანილი იყო ჩვეულებრივ საკვებ არეზე, რომელიც ტოქსიკანტს არ შეიცავდა.

1 — კაკოულებსა და პერიპლასმას შორის ენდოპლასმური რეტიკულუმით არხების წარმოქმნა. x 20 000

2,3 — გლუვი ენდოპლასმური რეტიკულუმის ფრაგმენტაცია და კაკოულებთან მათი კონტაქტირება. x 30 000

4 — ეპიკელის კონტაქტი პლამბალემასთან. x 20 000

5 — ეპიკელის შემზარანის შერწყმა პლამბალემასთან. x 25 000

6 — პერიპლასმაში გატანილი ეპიკელის შიგთოქსი შემზარანული ფრაგმენტებით. x 25 000

ქციონირებისათვის საჭირო ოპტიმალური პირობების შექმნითაც გამოიხატება. ორგანული ტოქსიკანტების ჟანგვა-აღდგენითი გარდაქმნების დროს, ხშირად ხდება კონტაქტების გაჩენა იმ უჯრედულ ორგანულებს შორის, რომლებსაც მემბრანებზე ელექტრონების სატრანსპორტო რედოქს-ჯაჭვები აქვთ განლაგებული. კერძოდ, კონტაქტირებენ მიტოქონდრიების, ენდოპლაზმური რეტიკულუმისა და პლასტიდების მემბრანები. მაგ., სიმინდის ფესვის უჯრედებზე ნიტრობენზოლის ზემოქმედების შემდეგ განსაკუთრებით ხშირდება ენდოპლაზმური რეტიკულუმის კონტაქტები მიტოქონდრიებთან — შეინიშნება დიდი რაოდენობით ისეთი მიტოქონდრიები, რომლებიც ენდოპლაზმური მემბრანებით არის გარშემორტყმული (ნახ.4.13). ასეთი სახის ულტრასტრუქტურული რეორგანიზაცია მიტოქონდრიულ და მიკროსომულ ელექტრონულ-სატრანსპორტო სისტემებს საშუალებას აძლევს გადაიტანონ აღდგენილი ექვივალენტები ენდოპლაზმურ მემბრანებზე განლაგებულ ციტოქრომ P450-შემცველ მონოოქსიგენაზურ სისტემაზე. ციტოქრომ P450 ამ ელექტრონებით ააქტიურებს მოლეკულურ ჟან-



**ნახ. 4.13.** ნიტრობენზოლის  $1.54 \cdot 10^{-4} M$  ხსნართან ინკუბირებული სიმინდის ფესვების აპექსის უჯრედის ფრაგმენტი (ინკუბაცია 24-სთ). შეინიშნება მიტოქონდრიები, რომლებიც გარშემორტყმულია ენდოპლაზმური მემბრანებით.  $\times 60\ 000$

გბადს, რათა მისი ერთი ატომი ქსენობიოტიკის მოლეკულაში ჩანერგოს და საფუძველი ჩაუყაროს მის შემდგომ ბიოდერგადაციას. საინტერესოა, რომ ეს მოელენა, რომელიც ცნობილია, როგორც ქსენობიოტიკების ჟანგვაზე განხორციელებული “მიტოქონდრიული კონტროლი”, დამახასიათებელია როგორც ცხოველური, ასევე მცენარეულ ორგანიზმებისათვის.

ანალოგიური ულტრასტრუქტურული ცვლილებები, რომლებიც მემბრანულ სტრუქტურებს შორის კონტაქტების წარმოქმნას იწვევენ, მცენარეულ უჯრედებზე TNT-ს ზემოქმედების დროსაც შეინიშნება (ნახ.4.10—2,4). ამგვარად ენდოპლაზმურ რეტიკულუმთან და მიტოქონდრიებთან კონტაქტში შედიან ადდგენითი ექვივალენტების სხვა მომწოდებლები — პლასტიდები. ამ შემთხვევაში ელექტრონები საჭიროა არა ჟანგვისათვის, არამედ ტოქსიკანტის ნიტროჯგუფების ადდგენისათვის, რის შედეგადაც TNT-საგან ნაკლებად ტოქსიკური ამინო-წარმოებულები წარმოიქმნება.

ამგვარად, ტოქსიკური ნაერთების ზემოქმედებისას მცენარეულ უჯრედში ენერგეტიკული და პლასტიკური ცვლის ისეთი კოორდინაცია ხორციელდება, რომლის შედეგადაც დეტოქსიკაციისათვის საჭირო ენერგია შესაბამის ფერმენტებს უშუალოდ ელექტრონების (და არა ATP-ს) სახით მიეწოდება. ამ პროცესებით უჯრედი ჟანგვა-ადდგენითი ფერმენტების მაქსიმალურ მობილიზებას ახდენს და მათ ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციაზე მიმართავს.

## 5. ორგანული ტოქსიკანტების გარდაქმნა

### მცენარულ უჯრედში

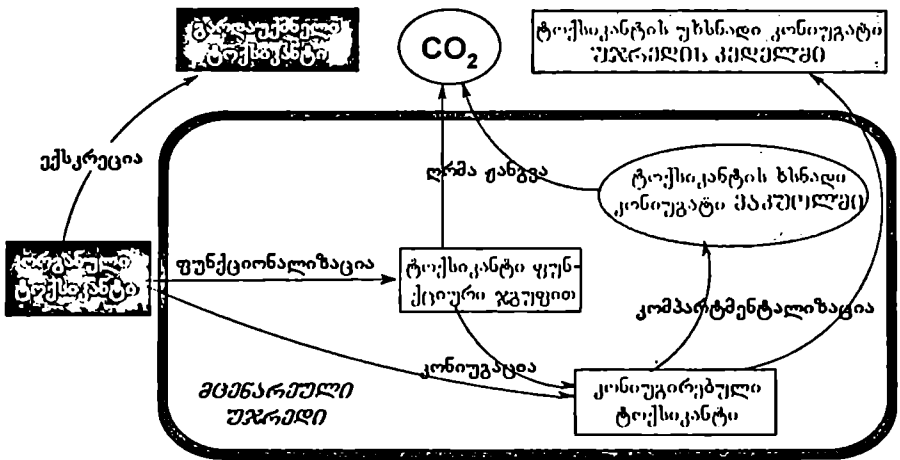
სადღეისოდ არსებული მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე დაბეჯითებით შეიძლება დაეამტკიცოს, რომ უცხო ნაერთების ტოქსიკური ზემოქმედებისაგან თავდასაცავად მცენარე რაიმე ახალი, სპეციალური მექანიზმების ჩამოყალიბებას არ საჭიროებს და იგი დეტოქსიკაციისათვის იმ ბიოქიმიური და ფიზიოლოგიური პროცესების განსაზღვრულ ანაკრებს იყენებს, რომლებიც ნორმალურ ცხოველქმედებაში მონაწილეობენ. ასეთ პროცესებს წარმოადგენენ:

- ექსკრეცია;
- შიდაუჯრედულ ნაერთებთან ტოქსიკური ნაერთების კონიუგაცია და წარმოქმნილი კონიუგატების შემდგომი კომპარტმენტალიზაცია;
- ტოქსიკანტების დეგრადაცია უჯრედის სტანდარტულ მეტაბოლიტებამდე და ნახშირორჟანგამდე.

ზემოაღნიშნული პროცესების საშუალებით მცენარეები გარემოდან შეღწეული ტოქსიკური ნაერთების სრულ ან ნაწილობრივ გაუვნებელყოფას ახდენენ. სწორედ ამ თვისებებიდან გამომდინარე, შემუშავებულია ისეთი კონცეფციები, როგორცაა “მწვანე ფილტრი”, ან “მწვანე ღვიძლი”, რომლებიც სამრეწველო ეკოლოგიური ტექნოლოგიების თეორიულ საფუძველს წარმოადგენენ.

მცენარეში შეღწეული ორგანული ქსენობიოტიკის “ბედი” სქემატურად ნახ.5.1-ზეა წარმოდგენილი. როგორც ამ სქემაზე ვხედავთ, მცენარეებისათვის ტოქსიკური ნაერთების ნევატიური ზემოქმედებისაგან “თავიდან აცილების” ყველაზე მარტივ ხერხს ექსკრეციის პროცესი წარმოადგენს. ექსკრეციის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ტოქსიკანტის მოლეკულები უჯრედების გვერდის ავლით, და შესაბამისად, შიდაუჯრედული მეტაბოლური გარდაქმნებისაგან თავის არიდებით, აპოპლასტური გზით გადაადგილდებიან და ამგვარად გამოიღწებიან მცენარეული ორგანიზმიდან. ტოქსიკანტის ელიმინაციის ასეთი გზა ყველაზე მარტივია, მაგრამ მისი განხორციელება შესაძლებელია მხოლოდ მაღალი ძვრადობის მქონე (ფლოემო-მობილური ან ამბო-მობილური) ტოქსიკანტების მაღალი კონცენტრაციების დროს. ეკოლოგიური თვალსაზრისით, ექსკრეციის ნაკლოვანება ისაა, რომ ტოქსიკანტი არ განიცდის ქიმიურ გარდაქმნებს, ამიტომ მთლიანად ინარჩუნებს ქიმიურ სტრუქტურას და, მაშასადამე, ტოქსიკურ თვისებებსაც.

უფრო ხშირად ადგილი აქვს ქსენობიოტიკების უჯრედებში შეღწევას, რის შემდეგ ისინი ფერმენტულ გარდაქმნებს განიცდიან და რაც მათი ტოქსიკურობის ხარისხის შემცირებას იწვევს. დღეისათვის მცენარეულ უჯრედებში ტოქსიკური ნაერთების ტრანსფორმაციის სამი თანმიმდევრული ფაზა განიხილება:



ნახ. 5.1. მცენარეულ უჯრედში ორგანული ტოქსიკანტის ტრანსფორმაციის გზების სქემა.

I — ფუნქციონალიზაცია;

II — კონიუგაცია;

III — კომპარტმენტალიზაცია.

I ფაზა არის ტოქსიკური ნაერთის ფუნქციონალიზაცია — პროცესი, რომლის დროსაც ჰიდროფობული ორგანული ქსენობიოტიკების მოლეკულები ფერმენტული გარდაქმნების (ჟანგვა, აღდგენა, ჰიდროლიზი და ა.შ.) ხარჯზე ჰიდროფილურ ფუნქციურ აგუფს (ჰიდროქსილის, ამინს, კარბოქსილს და ა.შ.) იძენს. ფუნქციონალიზაციის შედეგად ტოქსიკანტის მოლეკულების პოლარობა და რეაქტიულობის უნარიანობა მნიშვნელოვნად იზრდება. ამავე დროს, ეს გარდაქმნები ხელს უწყობენ წარმოქმნილი მეტაბოლიტების თვისობის ამაღლებას იმ ფერმენტების მიმართ, რომლებიც მათ შემდგომ გარდაქმნებს (კონიუგაციას ან ღრმა ჟანგვას) აკატალიზებენ. იდეალური იქნება შემთხვევა, როდესაც ტოქსიკანტის ჟანგვითი დეგრადაციის შედეგად უჯრედის სტანდარტული მეტაბოლიტები და დაბალმოლეკულური არაორგანული ნაერთები (მაგ., CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCl, NH<sub>3</sub>) წარმოიქმნება. ამ გზით მცენარეული უჯრედი არამარტო უცხო ნაერთების ტოქსიკურობის სრულ გაუვნებელყოფას ახდენს, არამედ მათ ნახშირბადის ატომებს საკუთარი პლასტიკური და ენერგეტიკული მიზნებისათვის იყენებს. მცენარეულ დეტოქსიკაციურ პროცესის მთავარ არსს სწორედ ასეთი გარდაქმნების

ერთობლიობა წარმოადგენს. ამდენად, შეიძლება განესაზღვროთ, რომ ქსენობიოტიკის დეტოქსიკაციის პროცესი იგეგა, რაც უცხო ნაერთის მეტაბოლიზმი. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ტოქსიკური ნაერთის გაუვნებელყოფა იმ ხარისხით ხდება, რა დონეზეც შეიძლება მცენარის უჯრედი ამ ნაერთის მეტაბოლიზებას, ანუ საერთო მეტაბოლიზმში მის ჩართვას.

მცენარულ უჯრედში ქსენობიოტიკების სრული დეგრადაცია, ანუ მინერალიზაცია ხორციელდება მხოლოდ ტოქსიკანტის დაბალი, ე.წ. მეტაბოლური კონცენტრაციების დროს, და ამისათვის განსაზღვრული დროა საჭირო. მაღალი კონცენტრაციების დროს ტოქსიკანტის სრული მინერალიზაცია არ ხდება, და ამ გზით უჯრედში შეღწეული ტოქსიკანტის მაქსიმუმ 20—30% შეიძლება იშლებოდეს. ტოქსიკური ნაერთების დანარჩენი ნაწილი კონიუგაციას განიცდის.

ტრანსფორმაციის II ფაზას წარმოადგენს კონიუგაცია — შიდაუჯრედული პროცესი, რომლის შედეგადაც ხდება ტოქსიკანტების ქიმიური დაკავშირება უჯრედის ენდოგენურ ნივთიერებებთან (ცილებთან, პეპტიდებთან, ამინომჟავებთან, ორგანულ მჟავებთან, დაბალმოლეკულურ შაქრებთან და პოლისაქარიდებთან, პექტინურ ნაერთებთან, ლიგნინთან და ა.შ.). კონიუგაციის პროცესს განიცდიან ქსენობიოტიკების გარდაქმნის შუალედური პროდუქტები ან ფუნქციური ჯგუფების მქონე ქსენობიოტიკები, რომლებსაც შეუძლიათ შიდაუჯრედულ ნაერთებთან რეაგირება და მათთან კოვალენტურად დაკავშირება პეპტიდური, ეთერული, ესთერული და სხვა ქიმიური ბმების საშუალებით. კონიუგატების წარმოქმნა იწვევს ორგანული ქსენობიოტიკების ტოქსიკურობის შემცირებას და ამასთან, ჰიდროფილურობის მნიშვნელოვან ზრდას, რაც, თავის მხრივ, მათ უფრო მაღალ ძვრადობას განაპირობებს. კონიუგირებულ მდგომარეობაში ტრანსფორმირებული ტოქსიკური ნაერთების ტრანსპორტირება და შემდგომი კომპარტმენტალიზაცია მნიშვნელოვნად ადვილდება.

კონიუგაცია არის ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული თავდაცვითი საშუალება, რომელსაც მცენარე ტოქსიკური ნაერთების ზემოქმედებისას იყენებს. მიუხედავად ამისა, ვერ ვიტყვი, რომ ეს პროცესი მცენარისათვის მომგებიანია ენერგეტიკული და ფიზიოლოგიური თვალსაზრისით. კონიუგაციის დროს ხდება მცენარისათვის არახელსაყრელი პროცესი — უჯრედისათვის ფუნქციურად მნიშვნელოვანი ნაერთების ხარჯვა, რაც იწვევს გარკვეულ დეფიციტს, ამცირებს მცენარეების გამძლეობას გარემო პირობების სხვა არახელსაყრელი ფაქტორების ზემოქმედებისაგან. ღრმა დეგრადაციისაგან განსხვავებით, კონიუგაციის დროს ქსენობიოტიკები მოლეკულის ძირითად სტრუქტურას (მაგ., არომატულ ბირთვს) ინარჩუნებენ, ამიტომ მათი სრული გაუვნებელყოფა არ ხდება და ტოქსიკურობა მხოლოდ ნაწილობრივ და დროებით არის დაკარგული. არსებობს ექსპერიმენტული მონაცემები, რომ ტოქსიკანტების შემცველი არიდან ნორმალურ საკვებ არეზე მცენარეების გადატანისას ადგილი აქვს ტოქსიკანტების ნაშთების თანდათანობით მინერალიზაციას.



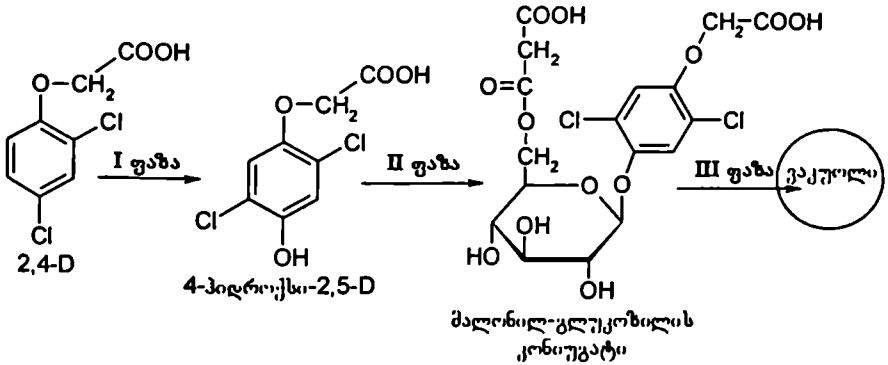
ცხადია, რომ კონიუგაცია ეკოლოგიური თვალსაზრისითაც არ წარმოადგენს ტოქსიკანტების გაუვნებელყოფის საუკეთესო საშუალებას. ტოქსიკანტების "შშმანთქმელი" მცენარეები მათი მატარებლები ხდებიან, ვინაიდან ტოქსიკანტების უმეტესი ნაწილი (ჩვეულებრივ 50—70% ან უფრო მეტიც) მცენარეებში კონიუგატების სახით გროვდება. ეს აუცილებლად უნდა იყოს გათვალისწინებული ფიტორემედიაციულ ტექნოლოგიებში მცენარეების გამოყენების დროს. ტოქსიკური ნივთიერებების კონიუგატები განსაკუთრებით საშიშია კვებით ჯაჭვში მოხვედრისას: თბილსისხლიანი ორგანიზმების საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის ფერმენტებს შეუძლიათ კონიუგატების ჰიდროლიზური დაშლა, რის შედეგადაც გამოთავისუფლდებიან ტოქსიკანტები ან მათი ნაწილობრივი გარდაქმნის პროდუქტები, რომლებიც მთელ რიგ შემთხვევებში უფრო ტოქსიკური არიან, ვიდრე საწყისი ქსენობიოტიკები. ამიტომ სასურველია, რომ ფიტორემედიაციაში გამოყენებულ მცენარეებს გააჩნდეთ მაქსიმალურად ძლიერი ფერმენტული სისტემები, რომელთა საშუალებითაც ტოქსიკანტების ღრმა დეგრადაციას განახორციელებენ. ასეთი მცენარეების სელექცია ან გენურ-ინჟინერული მეთოდებით მათი შექმნა უახლესი ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების ძირითად სტრატეგიას წარმოადგენს.

ამდენად, კონიუგაციის დროს მიმდინარე პროცესი ტოქსიკური ნაერთის დეტოქსიკაციას, ანუ გაუვნებელყოფას სულაც არ წარმოადგენს და იგი იმ მიზანს ემსახურება, რომ ტოქსიკური ნაერთების მეტაბოლიტები მოცილებულ იქნას უჯრედის იმ უბნებიდან, სადაც სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი პროცესები მიმდინარეობს. სწორედ ამიტომ კონიუგატები, როგორც წესი, ციტოპლაზმაში არ რჩება და III ფაზაში ისინი უჯრედის გარკვეულ ნაკვეთურებში გადაიტანება.

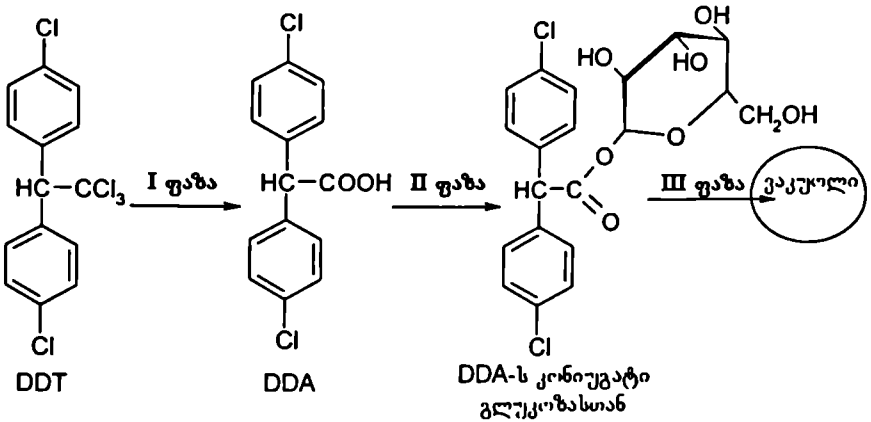
III ფაზა — კომპარტმენტალიზაცია — უმეტეს შემთხვევაში ტოქსიკური ნაერთების კონიუგატების განსაზღვრულ უჯრედულ ნაკვეთურებში (კომპარტმენტებში) დაგროვების საბოლოო ეტაპს წარმოადგებს. როგორც წესი, უჯრედში წარმოქმნილი სხნადი კონიუგატები ვაკუოლებში აკუმულირდებიან, ხოლო პექტინთან, ლიგნინთან, ჰემიცელულოზასთან ან სხვა პოლისაქარიდებთან ბმული უხსნადი კონიუგატები უჯრედიდან ვეზიციტოზური პროცესით გამოდიან და უჯრედის კედელსა და უჯრედშორის სივრცეში — აპოპლასტში გროვდებიან.

ტოქსიკური ნაერთების უტილიზაციის ზემომოყვანილი გზის (ფუნქციონალიზაცია → კონიუგაცია → კომპარტმენტალიზაცია) რეალური არსებობა თვალსაჩინოდაა ნაჩვენები ქლოროვანი პესტიციდების ზოგიერთი წარმომადგენლის მაგალითზე. პერბიციდი 2,4-D ჰიდროქსილირების შემდეგ წარმოქმნის კონიუგატს გლუკოზასთან და მალონილის ნაშთებთან, რის შემდეგ ხდება მათი ვაკუოლიზაცია (ნახ.5.2).

ინსექტიციდი DDT პირველადი ჟანგვითი რეაქციების შედეგად იძენს კარბოქსილის ჯგუფს და გარდაიქმნება დიქლორდიფენილმარმეჟად (DDA-ად), რომელიც გლუკოზასთან ადვილად წარმოქმნის ესთერს და ასევე ვაკუოლებში გროვდება (ნახ.5.3).



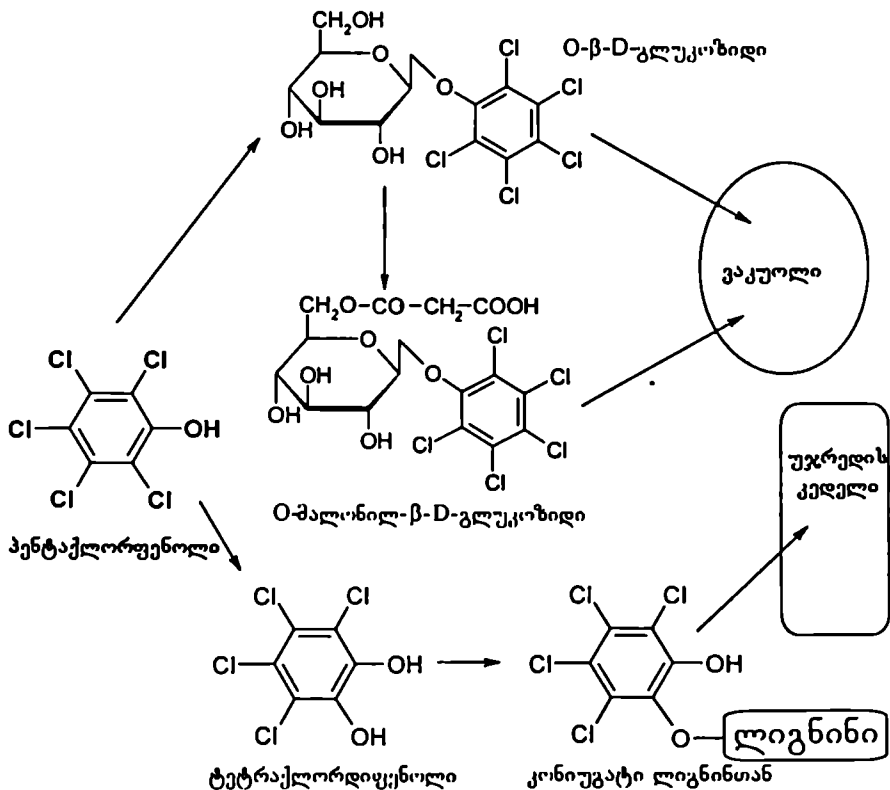
ნახ. 5.2. მცენარეულ უჯრედში 2,4-D-ს ტრანსფორმაციის სამი თანმიმდევრული ფაზა.



ნახ. 5.3. მცენარეულ უჯრედში DDT-ს ტრანსფორმაციის სამი თანმიმდევრული ფაზა.

ბიოციდი 2,3,4,5,6-პენტაქლორფენოლი კონიუგირდება როგორც უშუალოდ, ასევე ტრანსფორმირებული სახით. ფენოლური ჰიდროქსილის საშუალებით ეს ტოქსიკანტი პირდაპირ, ყოველგვარი წინასწარი გარდაქმნის გარეშე წარმოქმნის ხსნად კონიუგატებს — β-D-გლუკოზიდსა და O-მალონილ-β-D-გლუკოზიდს, რომლებიც ვაკუოლებში დეპონირდებიან. გარდა ამისა, პენტაქლორფენოლმა შეიძლება განიცადოს ჰიდროქსილირება და ამ შემთხვევაში ის მეორე ჰიდროქ-

სილის ჯგუფს იძენს, რომელსაც შეუძლია ლიგნინის დაუკავშირდეს. კონიუგაციის შედეგად მიიღება უხსნადი კონიუგატი, რომელიც შემდეგ უჯრედის კელეში ერთვება (ნახ.5.4).



ნახ. 5.4 მცენარეულ უჯრედში 2,3,4,5,6-პენტაქლოროფენოლის ტრანსფორმაციის გზები.

ასეთივე მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ TNT-ს ადღგენილი მეტაბოლიტების დაკავშირება ჰემიცელულოზასთან (იხ. § 1.1.4, ნახ.1.15), რომელიც უჯრედის კელის ერთ-ერთი შემადგენელი კომპონენტია.

მცენარეულ უჯრედში მიმდინარე ქსენობიოტიკის დეტოქსიკაციის პროცესი მეტაბოლიზმს რომ წარმოადგენს, ის ფაქტიც ადასტურებს, რომ ქიმიური რეაქციები, რომლებიც ქსენობიოტიკების ტრანსფორმაციისა და უტილიზაციის სამივე ფაზის განმავლობაში მიმდინარეობს, ფერმენტულ ხასიათს ატარებენ. ქსენობიოტიკების არყოფნის დროს, ეს ფერმენტები, ჩვეულებრივ ფიზიოლოგიურ

პროცესებში მონაწილეობენ, რომლებიც ტიპიურია მცენარულ უჯრედში ნოთიერებებთან ნორმალური ცვლისათვის.

ტოქსიკური ნაერთების ქიმიური მოდიფიკაციის საწყის რეაქციებში შემდეგი ფერმენტები მონაწილეობენ:

- ოქსიდაზები, რომლებიც აკატალიზებენ პიდროქსილირებას, დემეთილირებას და სხვა ჟანგვით რეაქციებს — ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზები, პეროქსიდაზები, ფენოლოქსიდაზები, ასკორბატოქსიდაზები, კატალაზები და ა.შ.;
- რედუქტაზები, რომლებიც აკატალიზებენ ნიტროჯგუფების აღდგენას — ნიტრორედუქტაზები;
- დეჰალოგენაზები, რომლებიც პოლიჰალოგენირებული ტოქსიკური ნაერთებიდან ჰალოგენების ატომების მოხლეჩას ახდენენ;
- ესთერაზები, აპიდროლიზებენ ტოქსიკურ ნაერთებში ეთერული და ესთერული ბმების გაწყვეტას.

დეტოქსიკაციის მეორე ფაზის პროცესები — ტოქსიკანტების შიდაუჯრედული ნაერთების კონიუგაციის რეაქციებს ტრანსფერაზები (გლუტათიონ S-ტრანსფერაზა, გლუკურონოზილ-ტრანსფერაზა, გლუკოზილ-ტრანსფერაზა და სხვ.) აკატალიზებენ. მესამე ფაზა — კონიუგატების კომპარტმენტალიზაცია ATP-დამაკავშირებელი კასეტური ტრანსპორტიორების (ე.წ. ACT-ს) მონაწილეობით მიმდინარეობს. ეს ფერმენტები ძირითადად ვაკუოლების ტონოპლასტებზეა ლოკალიზებული და სხვადასხვა მეორეული მეტაბოლიტების ვაკუოლებში გადატანას ემსახურება. ქსენობიოტიკების სტრუქტურაზე დამოკიდებულებით, ტოქსიკური ნაერთების შიდაუჯრედული გარდაქმნები III ფაზის შემდეგაც შეიძლება გაგრძელდეს და ამ შემთხვევაში დეტოქსიკაციის პროცესში სხვა ფერმენტებსაც შეუძლიათ მიიღონ მონაწილეობა. მაგ., ვაკუოლებში ლოკალიზებული გლუტათიონთან დაკავშირებული კონიუგატები პეპტიდაზების ზემოქმედების შედეგად ადვილად გარდაიქმებიან ცისტეინთან დაკავშირებულ კონიუგატად. ტოქსიკური ნოთიერებების ღრმა გარდაქმნის მრავალეტაპიან პროცესში არაპირდაპირ ერთეება პლასტიკური, ენერგეტიკული და აზოტოვანი ცვლის სხვა მრავალი ფერმენტიც, რომლებიც მცენარულ უჯრედს დამატებითი ენერგიით და აუცილებელი ენდოგენური ნაერთებით ამარაგებენ.

## 5.1 შანგვითი ღებრადაცია

მცენარულ უჯრედში შეღწეული ორგანული ქსენობიოტიკები ტრანსფორმაციის პროცესში მრავალგვარ გარდაქმნებს განიცდიან. რეაქციის ტიპი, რომელსაც უჯრედი ირჩევს ტოქსიკური ნაერთის დეგრადაციის საწყის სტადიაზე, უპირველეს ყოვლისა, თვით უცხო ნაერთის მოლეკულის ქიმიურ თვისებებზეა დამოკიდებული. კერძოდ, გარდაქმნის გზას იმ ფუნქციური ჯგუფების შემცველო-

ბა განსაზღვრავს, რომლებიც ყველაზე ადვილად ექვემდებარებიან ქიმიურ გარდაქმნებს. თუ უფრო დაუკონკრეტებთ მცენარეულ უჯრედში ქსენობიოტიკის გარდაქმნა ჟანგვის, აღდგენის ან ჰიდროლიზის რეაქციებით იწყება. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია ჟანგვითი დეგრადაციის რეაქციები, რომლებიც უმთავრესად ჰიდროქსილირების გზით ხორციელდება.

## 5.11 ჰიდროქსილირება

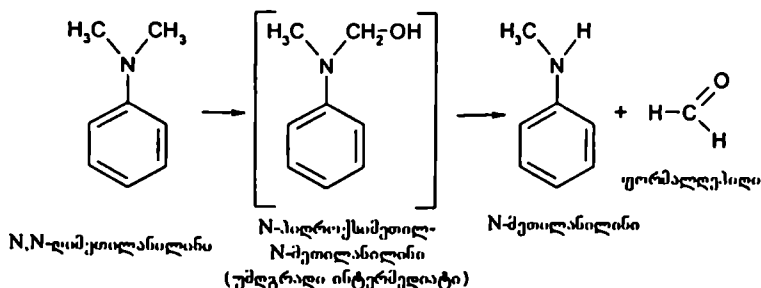
ნებისმიერი სტრუქტურის მქონე ქსენობიოტიკების მოლეკულაში ჰიდროქსილის ჯგუფის ჩანერგვა არსებითად ზრდის მის პოლარობას და ჰიდროფილურობას. ჰიდროქსილირება აუცილებლად საჭიროებს გააქტიურებული ჟანგბადის ატომს, ამიტომ რეაქციას მაღალი აქტივაციის ენერგია აქვს. უმრავლეს შემთხვევაში ეს პროცესი მთელი დეტოქსიკაციის პროცესის საწყის და ამასთანავე სიჩქარის მაღლიმიტირებელ სტადიას წარმოადგენს. ორგანული ქსენობიოტიკების ჰიდროქსილირებას თან ახლავს კონიუგაციის ან სრული ჟანგვის პროცესები.

გვზოგენური ალკანების და N-ალკილ-წარმოებულების ჟანგვითი დეგრადაცია, ჩვეულებრივ, ალკილური ჯგუფების ჰიდროქსილირებით იწყება. მიუხედავად იმისა, რომ ამ ნაერთების მეტაბოლიზმის პროდუქტებს შორის შესაბამისი ჰიდროქსი-წარმოებულების იდენტიფიკაცია ყოველთვის არ არის შესაძლებელი, მათი შემდგომი მეტაბოლიზმის პროდუქტები ერთმნიშვნელოვნად მიუთითებენ ჰიდროქსილის ჯგუფების შემცველი შუალედური პროდუქტების წარმოქმნაზე. ექსპერიმენტულად დამტკიცებულია, რომ ფოთლებით შთანთქმული დაბალმოლეკულური  $[C_1-C_4-^{14}C]$  ალკანები განიცდიან ჟანგვით დეგრადაციას  $^{14}CO_2$ -მდე. მეტაბოლიზმის პროდუქტების ანალიზი საშუალებას იძლევა ვივარაუდოთ, რომ ეს ნახშირწყალბადები მონოტერმინალურად იჟანგებიან და შუალედურ პროდუქტებს წარმოადგენენ პირველადი სპირტები, რომლებიც შემდგომ კანბონმჟავებამდე იჟანგებიან.

ალკილური ჯგუფების ჰიდროქსილირება დამახასიათებელი რეაქციაა მცენარეებში შარდოვანას ნაწარმი პერბიციდების მეტაბოლიზმის პროცესისათვის. ეს პერბიციდები განიცდიან N-ალკილჯგუფების ჰიდროქსილირებას. N-ჰიდროქსილალკილური ჯგუფები, როგორც წესი, უმდგრადია და სწრაფად იჟანგება, ამიტომ ჰიდროქსილირების პროცესის შედეგად საწყისი ქსენობიოტიკების N-დეალკილირება ხდება (ნახ.5.5). მაგ., პერბიციდი N-მეთილფენილი პირველადი მეტაბოლური ტრანსფორმაციის დროს სწორედ ასეთ N-დეალკილირებას განიცდის.

ზოგიერთ შემთხვევაში წარმოქმნილი ჰიდროქსილის ჯგუფები მეცხეულად კონიუგირებენ გლუკოზასთან. მაგ., ბამბის ფოთლებში  $[^{14}C]$  მონურონისაგან ჯერ ჰიდროქსიმეთილ-წარმოებული მიიღება, შემდეგ კი ამ ინტერმედიატისაგან იმდენად სწრაფად წარმოიქმნება β-D-გლუკოზიდი, რომ მეტაბოლიტებს შორის ჰიდროქსილირებული შუალედური პროდუქტის იდენტიფიცირება ვერ ხერხდებ-

ბა. ასეთვე β-D-გლუკოზიდი ფორმირდება შაქრის ლერწაში (*Saccharum officinarum*) დიურონის პიდროქსილმეთილ-წარმოებულის კონიუგაციის შედეგად.

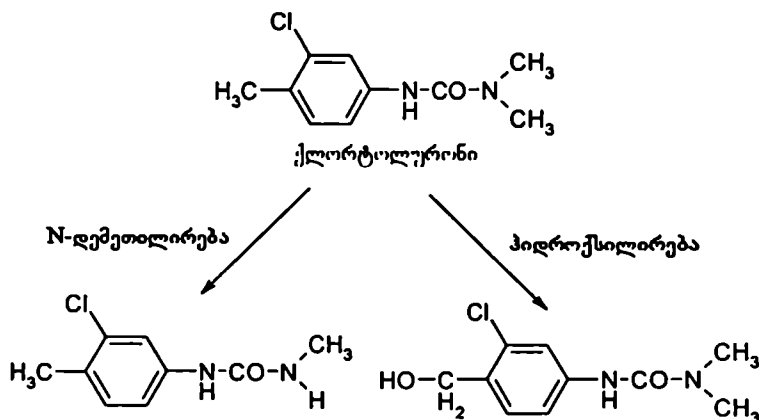


ნახ. 5.5. მოდელური ქსენობიოტიკის — N,N-დიმეთილანილინის N-დემეთილირება N-ალკილის ჯგუფის პიდროქსილირების შედეგად.

მცენარეებში მეთილის ჯგუფების პიდროქსილირების პროდუქტები (პიდროქსიმეთილ-წარმოებულები) შარდოვნას წარმოებული მრავალი სხვა პერბიციდების პირველადი გარდაქმნების პროცესების დროს წარმოიქმნებიან, მაგ., ასეთი სახის ტრანსფორმაციას განიცდიან: ბუტურონი ხორბალში, მონოლინურონი ისპანახში (*Spinacia oleracea*), ტერბუტიურონი შაქრის ლერწაში, ქლორტოლურონი ხორბალში. საინტერესოა, რომ ქლორტოლურონის პიდროქსილირება ორ მდგომარეობაში ხდება (ნახ.5.6): N-მეთილის ჯგუფის პიდროქსილირება იწვევს დემეთილირებას, ხოლო არომატულ რგოლთან დაკავშირებული მეთილის ჯგუფის პიდროქსილირების შედეგად მდგრადი პიდროქსიმეთილ-წარმოებული ფორმირდება, რადგანაც, N-პიდროქსიმეთილ-ჯგუფისაგან განსხვავებით, C-პიდროქსიმეთილ-ჯგუფი ბევრად უფრო მდგრადია. ამას ადასტურებს პერბიციდების მოქმედების მიმართ მდგრად და მგრძობიარე ხორბლის ჯიშებში შთანქმული ქლორტოლურონისაგან წარმოქმნილი მეტაბოლიტების ანალიზი. მათ შორის გვხვდება როგორც N-დემეთილირების პროდუქტი, ასევე C-პიდროქსიმეთილ-წარმოებული.

მცენარეებში ანალოგიურ N-დეალკილირებას სიმეტრიული ტრიაზინები განიცდიან. ტრიაზინული პერბიციდების შემთხვევაში N-დეალკილირება გვერდითი ჯაჭვების (ალკილური ჯგუფების) პიდროქსილირებით მიმდინარეობს. ამ შემთხვევაშიც პიდროქსილირებული შუალედური პროდუქტები სწრაფად კონიუგირდებიან შიდაუჯრედულ ნაერთებთან, ამიტომ მცენარეული ბიომასიდან შესაბამისი პიდროქსი-წარმოებულების გამოყოფა არ ხერხდება. მაგ., ატრაზინი და სიმაზინი ადვილად დეალკილირდებიან, თუმცა მეტაბოლიტებს შორის შესაბამისი შუალედური პიდროქსი-წარმოებულები არ იდენტიფიცირდება. საერ-

თოდ, პიდროქსილირების პროდუქტების აღმოჩენა მხოლოდ ერთეულ შემთხვევებშია შესაძლებელი, ისიც მაშინ, როდესაც ისინი ძირითად მეტაბოლიტებს არ წარმოადგენენ. მაგ., კარტოფილის (*Solanum tuberosum*) და სიმინდის სუსპენზიურ კულტურებში ატრაზინის მეტაბოლიტებს შორის პიდროქსი-წარმოებულები არაა აღმოჩენილი, მაგრამ იონჯის მცენარეებში იდენტიფიცირებულია სხვა სიმეტრიული ტრიაზინის — ტერბუტრინის პიდროქსილირების პროდუქტი. ზემოთქმულის დამადასტურებელი კიდევ ერთი მაგალითია მეთილის ჯგუფის პიდროქსილირების პროდუქტის აღმოჩენა  $[2-^{14}\text{C}]$  ტერბაცილით დამუშავებულ იონჯის მცენარეებში.



ნახ. 5.6. მცენარეში ქლორტოლურონის პირველადი გარდაქმნის გზები.

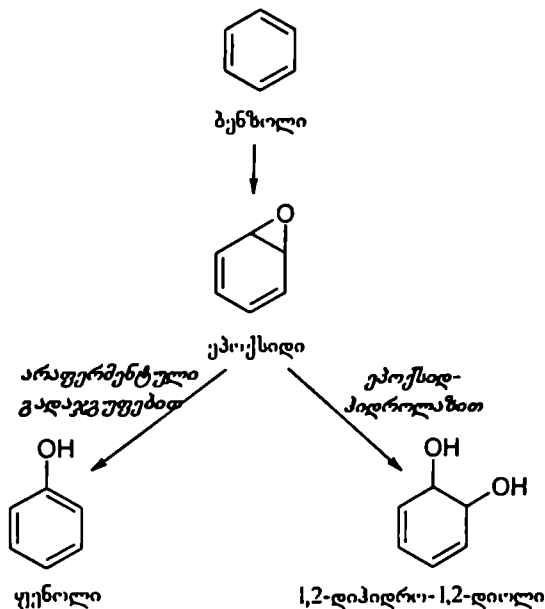
ზოგიერთი ქსენობიოტიკის მოლეკულებში პიდროქსილირებას მეთილენის ( $-\text{CH}_2-$ ) ჯგუფები განიცდიან. მაგ., ქერში, სიმინდსა და მარწყვში (*Fragaria vesca*) პიდროქსილირდება კარბოფურანის მესამე ლოკანტის მეთილენური ჯგუფის ნახშირბადატომი, და არა ტერმინალური მეთილის ჯგუფი.

მცენარეებში  $[^{14}\text{C}]$  ციკლოპექსანის მეტაბოლიზმი მიუთითებს, რომ ამ ნახშირწყალბადის ციკლი იშლება შესაბამისი ალიფატური პროდუქტების წარმოქმნით დადგენილია, რომ უმაღლეს მცენარეებში ციკლოპექსანის მეტაბოლიზმის პირველი ეტაპია მისი პიდროქსილირებით ციკლოპექსანოლის წარმოქმნა.

პიდროქსი-წარმოებულების წარმოქმნა მეტაბოლიზმის საწყის ეტაპს წარმოადგენს უმაღლეს მცენარეებში გარემოს ისეთი მნიშვნელოვანი დამბინძურებლების გარდაქმნისას, როგორებიც არამატული ნახშირწყალბადებია. დადგენილია, რომ მცენარეებში  $[1-6-^{14}\text{C}]$  ბენზოლის დამლით ალიფატური პროდუქტების (მუკონის და ფუმარის მჟავების) ფორმირება ხდება. ბენზოლიდან ანალოგიური პროდუქტები აგრეთვე ნაყოფებშიც წარმოიქმნება. სიმინდის, ბარდის და გოგრას

(*Cucurbita pepo*) სტერილურ აღმონაცენებში, რომლებიც ნიშანდებული ბენზოლის ხსნარზე ინკუბირდებოდა, ნიშანდებული ფენოლია იზოლირებული. ფენოლი ქსოვილებში უმნიშვნელო რაოდენობით იდენტიფიცირდება, თუმცა ალიფატურ პროდუქტებში ბენზოლის ნიშანდებული ნახშირბადის ჩართვის ხარისხი ბევრად მაღალია. აქედან გამომდინარე, ფენოლი იმდენად სწრაფად განიცდის შემდგომ გარდაქმნებს, რომ იგი მხოლოდ უმნიშვნელო რაოდენობით, კვლის სახით რჩება მეტაბოლიტებს შორის.

არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება ორ სტადიას მოიცავს. საგარაუდოდ, შუალედური პროდუქტია ეპოქსიდი, რომლისგანაც შემდგომში არაფერმენტული ან ფერმენტული გზით შესაბამისად მონოფენოლი ან 1,2-დიჰიდრო-1,2-დიოლი უნდა წარმოიქმნას (ნახ.5.7).

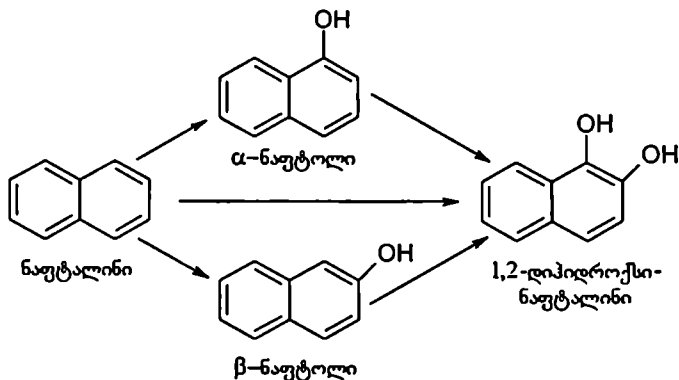


ნახ. 5.7. არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება ბენზოლის მაგალითზე.

ჰიდროქსილირებით მიმდინარეობს მცენარეების მიერ შთანთქმული პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების ტრანსფორმაცია. ნაჩვენებია, რომ მთელი რიგი პოლიარომატული ნაერთები — ნაფტალინი (ნახ.5.8), 3,4-ბენზპირენი (ნახ.5.9), ბენზ[ა]ანტრაცენი, დიბენზანტრაცენი და სხვები მცენარეებში ჟანგვის შედეგად იშლება და ნახშირბადის ატომების მნიშვნელოვანი ნაწილი ალიფატურ ნაერთებში ერთვება. მცენარეებში ამ ნახშირწყალბადების ტრანს-



ფორმაციის პირველად რეაქციას ჰიდროქსილირება წარმოადგენს. უნდა აღინიშნოს, რომ არაჩანაცვლებულ პოლიარომატულ ბირთვში ყოველთვის არსებობს ე.წ. L-უბანი, რომელიც ჰიდროქსილირების სამიზნეა. მაგ., ნაფტალინში არომატული ბირთვი 1 და 2 მდგომარეობებში ჰიდროქსილირდება (ნახ.5.8), ხოლო 1,2-დიჰიდროქსინაფტალინი შემდგომში ქინონამდე იჟანგება, რასაც არომატული ბირთვის გახლეჩა მოსდევს. 3,4-ბენზპირენში ასეთი უბანია მე-6 მდგომარეობა, რომელიც ყველა შემთხვევაში ჰიდროქსილირდება (ნახ.5.9).

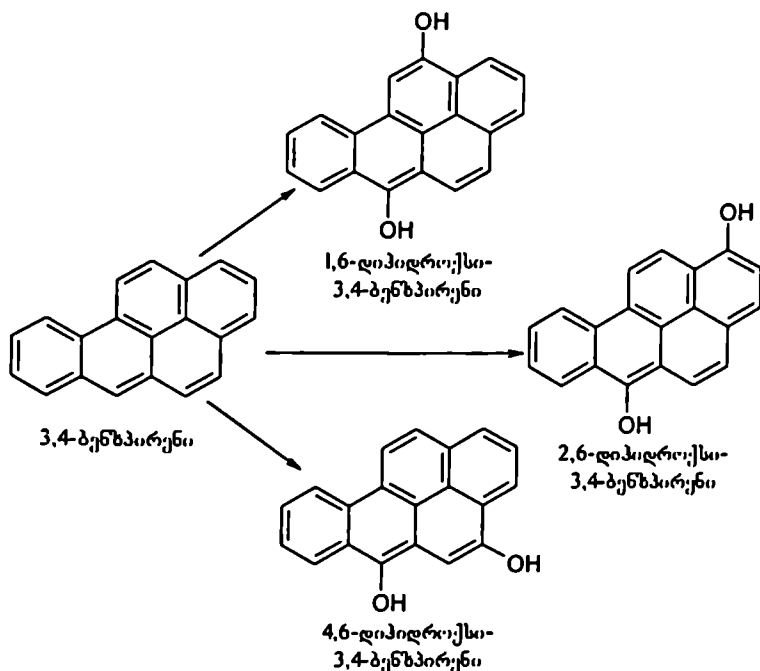


ნახ. 5.8. არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირებით მიმდინარე ნაფტალინის გარდაქმნის რეაქციები.

არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება მნიშვნელოვანი ეტაპია არენების მრავალი წარმოებულის ბიოტრანსფორმაციის პროცესში. მაგ., მცენარეებში ასე გარდაიქმნება ნიტრობენზოლი, ანილინი, ქლორბენზოლი და სხვ. (ნახ.5.10).

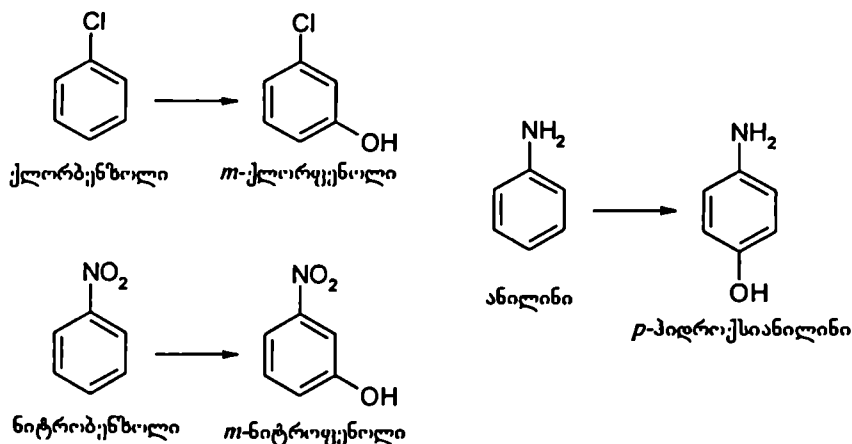
უმეტეს შემთხვევაში, არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირების პროდუქტები, წარმოქმნილი ჰიდროქსილის ჯგუფის საშუალებით დაუყოვნებლივ გლუკოზილირებას განიცდიან, სწორედ ამიტომ ჰიდროქსილირების პროდუქტების გამოყოფა ყოველთვის არ არის შესაძლებელი. მაგ., ჰერბიციდი ბენტაზონი ჰიდროქსილირდება 6-ჰიდროქსიბენტაზონის ან 8-ჰიდროქსიბენტაზონის წარმოქმნით, ეს ინტერმედიატები შემდგომში გლუკოზილირებით კონიუგირდებიან. ბენტაზონით დამუშავებულ მცენარეულ ქსოვილებში, გლუკოზიდებთან ერთად ჰერბიციდის საწყისი ჰიდროქსი-წარმოებულები მხოლოდ უმნიშვნელო რაოდენობითაა აღმოჩენილი. ცხადია, ეს მიუთითებს, რომ არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება ქსენობიოტიკის ტრანსფორმაციის მთელი შემდგომი პროცესის მალიმიტირებელი სტადიაა.

ფენოქსიმმარმეა უმთავრესად, არომატული რგოლის მე-4 მდგომარეობაში ჰიდროქსილირდება. ამავ დროს, ჩანერგილი ჰიდროქსილური ჯგუფი ხშირ-

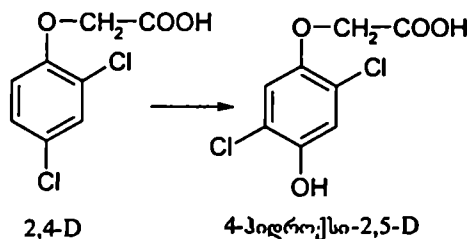


ნახ. 5.9. არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირებით მიმდინარე 3,4-ბენზოფლენის გარდაქმნის რეაქციები.

ად გლიკოზილირების საშუალებით კონიუგირდება. არომატულ ბირთვში პალოგენირებული ფენოქსიმარმეაუები ჰიდროქსილირებიან პალოგენებით ჩაუნაცვლებელ ბენზოლის ბირთვის ნახშირბადის ატომებში. ამავე დროს, 2,4-D-ს შემთხვევაში ჰიდროქსილირება ხშირად მე-4 მდგომარეობაში ხდება და ქლორის ატომი მე-3 ან მე-5 მდგომარეობაში გადაინაცვლებს (ნახ.5.11). მაგ., დიქლორ-4-ჰიდროქსი-ფენოქსიმარმეაუ წარმოადგენს 2,4-D-ს ჰიდროქსილირების ძირითად მეტაბოლიტს ისეთ სარეველ ბალახებში, როგორებიცაა: ყანის ჭლექი (*Polygonum convolvulus*), რძიანა (*Euphorbia esula*), ყვითელი ძურწა (*Setaria glauca*), შერიუკა (*Avena fatua*), ველური მღოგვი, ღიჭა (*Sonchus arvensis*), ყვითელი ცოცხი (*Kochia scoparia*). პერბიციდების მიმართ მგრძნობიარე და მდგრადი სოიის ჯიშებში 2,4-D-ს ტრანსფორმაციამ უჩვენა, რომ პერბიციდის მიმართ მდგრად სახეობაში განსაკუთრებით ინტენსიურად 4-ჰიდროქსი-წარმოებული წარმოიქმნება, რომელიც შემდეგ მხოლოდ გლუკოზიდის ფორმით კონიუგირებს.



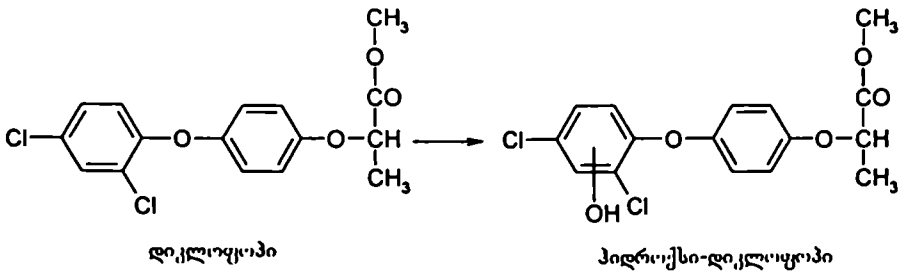
ნახ. 5.10. არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირებით მიმდინარე ქლორბენზოლის, ნიტრობენზოლისა და ანილინის პირველადი გარდაქმნის რეაქციები.



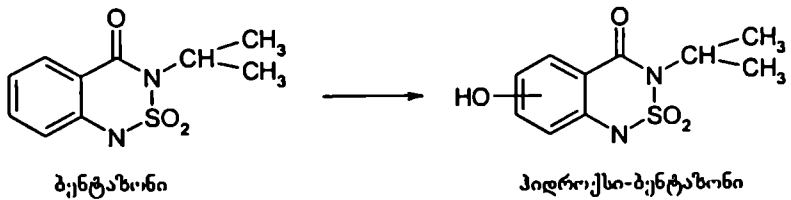
ნახ. 5.11. 2,4-D-ს ჰიდროქსილირება, რის შედეგადაც ქლორის ატომი არომატულ ბირთვში პოზიციას იცვლის.

ჰერბიციდი დიკლოფოპი და მისი დიმეთილეთერი (დიკლოფოპ-მეთილი) ანალოგიურად ჰიდროქსილირდება, თუმცა ზოგიერთ მცენარეებში კარბოქსილური ჯგუფის გლუკოზილირებით მიღებული პროდუქტი ძირითად მეტაბოლიტს წარმოადგენს. დიკლოფოპის მიმართ მდგრადი ან მგრძობიარე კონინდარის (*Lolium rigidum*) სხვადასხვა ბიოტიპების ტოლერანტობა ჰერბიციდის მეტაბოლიტებზე არ არის დამოკიდებული. დადგენილია, რომ ორივე ბიოტიპის როგორც ღეროებში, ასევე ფესვებში ფიტოტოქსიკური დიკლოფოპის მნიშვნელოვანი რაოდენობა ფორმირდება, რომლებიც კონიუგატებს წარმოქმნიან, ან არომატ-

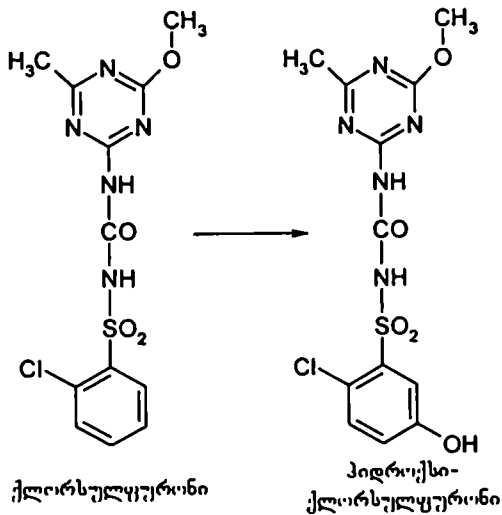
ული ბირთვის ჰიდროქსილირებას განიცდიან (ნახ.5.12). ასეთვე გარდაქმნას განიცდის ბენტაზონი (ნახ.5.13) და ქლორსულფურონი (ნახ.5.14).



ნახ. 5.12. დიკლოფოპის არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება.

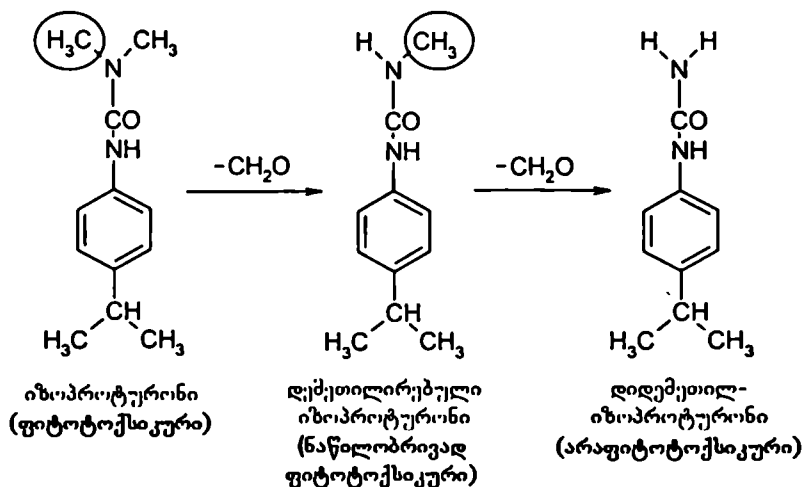


ნახ. 5.13. ბენტაზონის არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება.



ნახ. 5.14. ქლორსულფურონის არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება.

მრავალი ჰერბიციდის მცენარეულ მეტაბოლიზმში ჰიდროქსილირება საწყისი ეტაპს წარმოადგენს. ზოგიერთ შემთხვევაში ამ რეაქციის შედეგად ქსენობიოტიკის ტოქსიკურობა შესამჩნევად მცირდება ან სრულიად ქრება. ამის თვალსაჩინო მაგალითია იზოპროტურონის ორმაგი N-დემეთილირება, როდესაც ჰერბიციდი ჯერ ნაწილობრივ, ხოლო შემდეგ სრულად კარგავს ფიტოტოქსიკურობას (ნახ.5.15).



ნახ. 5.15. იზოპროტურონის N-დემეთილირების ორი სტადია.

სხვადასხვა მცენარეებში ჰიდროქსილირდება აგრეთვე ბენზოის მჟავა და მისი წარმოებულები. ბენზოის მჟავა ერთდროულად *o*- და *p*-მდგომარეობებში ჰიდროქსილირდება და ზოგჯერ ბენზოის მჟავას ორივე ჰიდროქსი-წარმოებულ ქსოვილებში ერთდროულადაა წარმოდგენილი. დიკამბა მე-5 მდგომარეობაში ჰიდროქსილირდება და ეს პროდუქტი მრავალ მცენარეში ამ ჰერბიციდის გარდაქმნის მთავარ პროდუქტს წარმოადგენს.

იზოპროპილ-კარბანილატი და იზოპროპილ-*m*-ქლორკარბანილატი არომატული ბირთვის სხვადასხვა მდგომარეობაში განიცდიან ჰიდროქსილირებას, რასაც გლუკოზასთან შემდგომი კონიუგაცია მოსდევს. მაგ., იონჯას მიერ შთანთქმული იზოპროპილ-კარბანილატი ტრანსფორმირდება იზოპროპილ-4-ჰიდროქსიკარბანილატად და ეს ნაერთი ძირითადი მეტაბოლიტია. ზორბლის, შაქრის ჭარხლის და იონჯას ნაზარდებზე ჩატარებული ცდებით ნაჩვენებია, რომ მხოლოდ ზორბალში წარმოიქმნა 2-ჰიდროქსი და 4-ჰიდროქსი-წარმოებულები. იზოპროპილ-3-ქლორკარბანილატის ჰიდროქსილირება შესაძლოა ასევე წარიმარ-

თოს იზოპროპილ-3-ქლორ-2-ჰიდროქსიკარბანილატის ან იზოპროპილ-3-ქლორ-2-ჰიდროქსიკარბანილატის წარმოქმნით.

ზშირად ორგანული ტოქსიკანტის ჰიდროქსილირების უნარი მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ამ ნაერთის მიმართ მცენარის ტოლერანტობას. მაგ., ბენტაზონის მიმართ მდგრადი მცენარეები ინტენსიურად ახდენენ ამ ჰერბიციდის შემდგომ გარდაქმნას, ხოლო ამ ჰერბიციდის მიმართ მგრძობიარე მცენარეებში ტოქსიკური ნაერთის ტრანსფორმაცია გაცილებით უფრო დაბალ დონეზე მიმდინარეობს. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს კანონზომიერება ვლინდება როგორც მთლიანი მცენარეების, ასევე მათი სუსპენზიური კულტურების მიერ ბენტაზონის ტრანსფორმაციის პროცესში.

ხორბლის ნაზარდებში ჰერბიციდი ქლორსულფურონი არომატულ ბირთვში ჰიდროქსილირების გზით ტრანსფორმირდება, ხოლო წარმოქმნილი ჰიდროქსი-წარმოებული სწრაფადვე გლუკოზილირდება. მეორე მხრე, სელის (*Linum msitatissimum*) ნაზარდებში იმავე ჰერბიციდის მხოლოდ ჰეტეროციკლურ რგოლში ჩანაცვლებული მეთილის ჯგუფი ჰიდროქსილირდება.

სულფონილ-შარდოვანას ტიპის ჰერბიციდები, როგორც წესი, თავდაპირველად ჰიდროქსილირებიან არომატულ ან ჰეტეროციკლურ ბირთვში, ან ალიფატურ გვერდით ჯაჭვში. ტრანსფორმაციის შემდეგ ეტაპს წარმოქმნილი ჰიდროქსი-წარმოებულების გლუკოლიზირება წარმოადგენს. მაგ., მცენარეებში პრომისულფურონი (სულფონილ-შარდოვანას ჰერბიციდი) პირიმიდინულ რგოლში ჰიდროქსილირდება, მაგრამ ბენზოლის ბირთვის ჰიდროქსილირება არ ხდება. მეორე მხრე, ეთილირებული სიმინდის ნაზარდების მიკროსომები აკატალიზებენ ამ ჰერბიციდის ჰიდროქსილირებას როგორც ბენზოლის, ასევე პირიმიდინის ბირთვებში.

განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს მეთილაქსილის გარდაქმნა სალათის (*Lactuca sativa*) და ვაზის სუსპენზიურ უჯრედულ კულტურებში. ამ ნაერთის თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ მცენარეში მისი მეტაბოლიზმის საწყის სტადიაზე ერთდროულად ჰიდროქსილირდება არომატული ბირთვი, მეთილის ჯგუფი და N-მეთოქსიაცეტილის რადიკალიც.

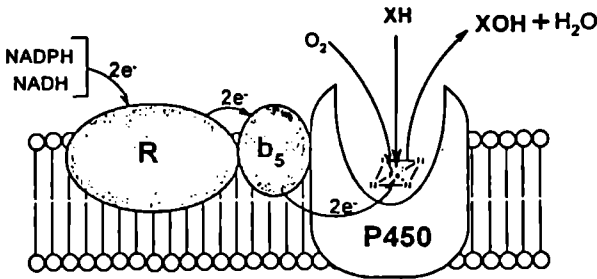
აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ არსებობს ჰიდროქსილირების საკმაოდ იშვიათი ფორმაც — ამიდური აზოტის ჰიდროქსილირება. ეს რეაქცია მიმდინარეობს შაქრის ჭარხლის ფოთლებში ჰერბიციდ ფენმედიფამის მეტაბოლიზმის დროს. დადგენილია, რომ ფენმედიფამის მიმართ მდგრადობას ამ რეაქციის განხორციელების უნარი განაპირობებს — ჰერბიციდის მიმართ მდგრადი მცენარეების ფოთლებში ამიდური აზოტის ჰიდროქსილირების სიჩქარე გაცილებით უფრო მაღალია, ვიდრე მგრძობიარე ჯიშებში.

ზემომოყვანილი მონაცემები კიდევ ერთხელ მიუთითებენ სხვადასხვა სტრუქტურის მქონე ქიმიური ნაერთების პირველად გარდაქმნებში ჰიდროქსილირების რეაქციის უნივერსალურობაზე. ქვემოთ განხილული იქნება ძირითადი ყან-

გვითი ფერმენტები, რომლებიც მცენარეულ უჯრედში ორგანული ქსენობიოტიკების ჰიდროქსილირებას აკატალიზებენ.

**ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა**

ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა (EC 1.14.14.1) ენდოპლაზმურ მემბრანებზე ლოკალიზებული მულტიფერმენტული სისტემაა, რომელიც მრავლობითი ფორმებითაა წარმოდგენილი ცხოველებში, მცენარეებსა და მიკროორგანიზმებში იგი ორგანული არაპოლარული ქსენობიოტიკების ჰიდროქსილირების რეაქციას ახორციელებს და, ამდენად, დეტოქსიკაციის მთლიანი პროცესის მიმდინარეობაზეა პასუხისმგებელი. ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზები შერეული ფუნქციის მქონე ოქსიდაზებს წარმოადგენენ, რამდენადაც ისინი მოლეკულური ჟანგბადის ერთი ატომით სუბსტრატის არაპოლარულ მოლეკულას ჟანგავენ, მეორე ატომს კი წყლის მოლეკულამდე აღადგენენ (ნახ.5.16). რეაქციის შედეგად ჟანგბადატომი C—H, N—H ან S—H ბმებში ინერგება და ჰიდროქსილირებულ პროდუქტს წარმოქმნის, რომელიც ახლადშექმნილი ფუნქციური ჯგუფის ხარჯზე მაკონიუგირებელ ნაერთებს უკავშირდება, ან ჟანგვითი დეგრადაციის შემდგომ რეაქციებში მონაწილეობს.

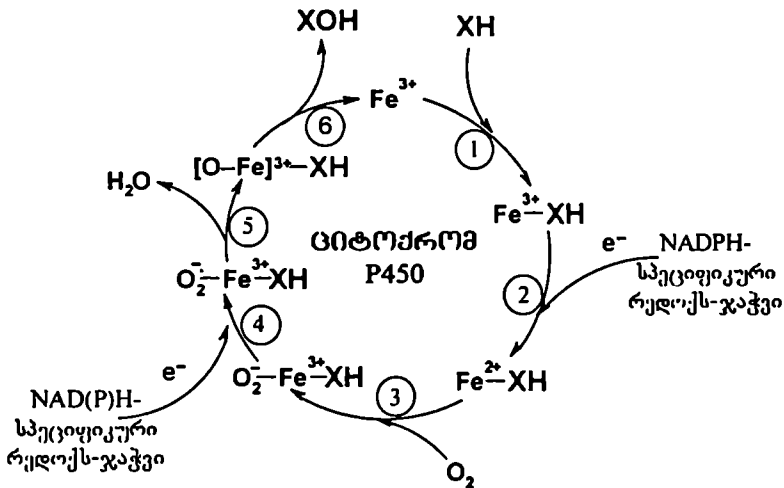


**ნახ. 5.16.** ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემის ფუნქციონირება. R — NAD(P)H-ციტოქრომ P450-რედუქტაზა; b<sub>5</sub> — ციტოქრომ b<sub>5</sub>; P450 — ციტოქრომ P450; XH — არაპოლარული სუბსტრატი (ქსენობიოტიკი); XOH — ჰიდროქსილირებული პროდუქტი

სუბსტრატის მოლეკულაში ჩასანერგი ჟანგბადატომი გააქტიურებას საჭიროებს, რისთვისაც მონოოქსიგენაზა ნიკოტინამიდური კოფერმენტების — NADH-ისა და NADPH-ის აღმდგენელ ექვივალენტებს იყენებს. კოფერმენტებიდან ელექტრონების გადატანა მიკროსოპული NADH- და NADPH-სპეციფიკური რედოქს-ჯაჭვებით ხორციელდება, რომლებიც ციტოქრომებთან — b<sub>5</sub>-თან და P450-თან ერთად ერთიან მონოოქსიგენაზურ სისტემას ქმნიან. ელექტრონების საწყით

სი და შუალედური გადამტანები ისეთ რედოქს-პოტენციალებს ფლობენ, რომ ტერმინალურ კომპონენტზე ციტოქრომ P450-ზე გადატანისას ელექტრონი თითქმის იზოპოტენციურ ველში მოძრაობს, ამიტომ ქსენობიოტიკების მიკროსომული ჟანგვა ATP-ს სახით ენერჯის რეალიზაციასთან არაა შეუღლებული — აქ ელექტრონების ენერჯია უშუალოდ ჰიდროქსილირების დეტოქსიკაციურ პროცესს ხმარდება. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ნიკოტინამიდური კოფერმენტების ელექტრონები რედოქს-ჯაჭვის საწყისი კომპონენტიდან — NADPH-ციტოქრომ P450-რედუქტაზიდან პირდაპირ ციტოქრომ P450-ზეც გადადის და ციტოქრომ b<sub>5</sub>-ის, როგორც ელექტრონების შუალედური გადამტანის მონაწილეობა ელექტრონთა ტრანსპორტში აუცილებელი არ არის. ეს ციტოქრომული მედიატორი მაშინაა საჭირო, როდესაც მონოოქსიგენაზური სისტემა ელექტრონებს სხვა რედოქს-ჯაჭვებიდან, მაგ., მიტოქონდრიული ელექტრონის სატრანსპორტო სისტემიდან იღებს.

ციტოქრომ P450-ით ჰიდროქსილირების რეაქციაში ციკლური მექანიზმით ფუნქციონირებს. მონოოქსიგენაზური ციკლი შემდეგი სტადიებისაგან შედგება (ნახ.5.17):



ნახ. 5.17. ციტოქრომ P450-ის მიერ განხორციელებული მონოოქსიგენაზური ციკლი.

1. ჰიდროქსილირების საწყის სტადიას დაქანგული (Fe<sup>3+</sup>) მდგომარეობაში მყოფი ციტოქრომ P450-ის ჰემის მიერ სუბსტრატის მოლეკულის დაკავშირება წარმოადგენს. ამ დროს მიიღება ფერმენტ-სუბსტრატის კომპლექსი — ფერი-ციტოქრომ P450. ამ კომპლექსის წარმოქმნით ჰემური რკინის სპინური მდგომარეობა იცვლება და იგი დაბალსპინურიდან (სადაც 3d<sup>5</sup> ელექტრონები



- მაქსიმალურად გაწვეილებულია) მაღალსპინურში გადადის (სადაც 3d<sup>9</sup> ელექტრონები მაქსიმალურად გაუწვეილებულია). ამის გამო ციტოქრომ P450-ის რედოქს-პოტენციალი მკუთრად იცვლება და მისი მნიშვნელობა -300 mV-დან +170 mV-მდე იზრდება, რაც, თავის მხრივ, NADPH-იდან და NADH-იდან აღმდგენელი ექვივალენტების ფერიციტოქრომზე გადასვლას თერმოდინამიკურად ხელსაყრელს ხდის.
- ფერმენტ-სუბსტრატის კომპლექსი ერთი ელექტრონით აღდგება და ფერიციტოქრომიდან ფეროციტოქრომ P450 წარმოიქმნება. ამ ეტაპზე ციტოქრომ P450-ისათვის ელექტრონის მოწოდებულ რედოქს-პარტნიორს NADPH-ციტოქრომ P450-რედუქტაზა (EC 1.6.2.4) წარმოადგენს.
  - ფერიციტოქრომ-სუბსტრატის კომპლექსი მოლეკულურ ჟანგბადს იკავშირებს და წარმოიქმნება ოქსიციტოქრომ P450. ამ დროს რკინა თავის ელექტრონს ჟანგბადის მოლეკულას გადასცემს და თვითონ კვლავ დაჟანგულ ( $Fe^{3+}$ ) მდგომარეობას უბრუნდება. ეს პროცესი ციკლის ყველაზე სწრაფი ეტაპია. სამმაგ-მა კომპლექსმა შეიძლება განიცადოს დისპროპორციონირება სუპეროქსიდული ანიონ-რადიკალის წარმოქმნით არაა გამორიცხული, რომ ფერმენტ-სუბსტრატულმა კომპლექსმა ჟანგბადის მოლეკულის ნაცვლად წყალბადის ზეჟანგიდან ან ორგანული ჰიდროზეჟანგებიდან აღდგენილი ჟანგბადატომები დაიკავშიროს.
  - ოქსიციტოქრომის, ჟანგბადისა და სუბსტრატისაგან წარმოქმნილი სამმაგი კომპლექსი მეორე ელექტრონით აღდგება, რის შედეგადაც პეროქსიციტოქრომ P450 წარმოიქმნება. მონოქსიგენაზურ ციკლში ეს სტადია ყველაზე ნელია, ამიტომაც დეტოქსიკაციის მთლიანი პროცესის სიჩქარე სწორედ ამ ეტაპზე ლიმიტირდება. ამ დროს რეაქციის განხორციელებისათვის ყველა პირობაა შექმნილი: აქტიურ ცენტრში იმყოფება სუბსტრატიც და ჟანგბადიც. საჭიროა მხოლოდ ენერჯიის დამატებითი ულუფა მეორე ელექტრონის სახით, რათა აქტივაციის ენერჯიამ იმ ზღვარს მიაღწიოს, რომელიც აუცილებელია სუბსტრატის მოლეკულაში ჟანგბადის ატომის ჩასანერგად. მეორე ელექტრონის დონორს ამ სტადიაზე შეიძლება წარმოადგენდეს როგორც NADPH, ასევე NADH. მიუხედავად იმისა, რომ ერთნაირ პირობებში უპირატესობა NADPH-ციტოქრომ P450-რედუქტაზას ენიჭება, ელექტრონის მოწოდებაში ხშირად მიკროსომული და მიტოქონდრიული NADH-ციტოქრომ b<sub>5</sub>-რედუქტაზებიც მონაწილეობენ.
  - პეროქსიციტოქრომ P450-ის სამმაგი კომპლექსი იშლება და წყლის მოლეკულა გამოიყოფა. ამ დროს წყლის მოლეკულას წარმოქმნის აქტიურ ცენტრზე ფორმირებული სუპეროქსიდული ანიონ-რადიკალის ერთი ატომი, რომელიც NAD(P)H-ის ჟანგვისას მიღებულ ორ პროტონს იერთებს.
  - ფერმენტის აქტიურ ცენტრზე დარჩენილი ჟანგბადის მეორე ატომი ე.წ. მაპიდ-როქსილირებული ნაწილაკის სახით ურთიერთქმედებს სუბსტრატთან, მის მოლეკულაში ინერგება და ჰიდროქსილირებულ პროდუქტს წარმოქმნის,

რომელიც, თავის მხრივ, შორდება აქტიურ ცენტრს. ამ დროს ციტოქრომ P450-ის ჰემი კვლე დაქანგულ მდგომარეობას უბრუნდება და მას სუბსტრატ-ის ახალი მოლეკულის მიერთება შეუძლია.

სადღეისოდ ცნობილია, რომ მონოოქსიგენაზური რეაქცია არცთუ ისე სწრაფია – ციკლის სრული განხორციელებისათვის 1-დან 10 წმ-მდეა საჭირო. სწორედ ამიტომ ქსენობიოტიკებისა და ენდოგენურ ნაერთთა მეტაბოლიზმში ციტოქრომ P450-დამოკიდებული ეტაპი თითქმის ყოველთვის სირქარის მაღიმტირებელ რგოლს წარმოადგენს.

ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემები ორ მთავარ ტიპად იყოფა: ბაქტერიულ/მიტოქონდრიულად (I ტიპი) და მიკროსომულად (II ტიპი). მეორე მხრივ, მონოოქსიგენაზური სისტემების კლასიფიცირება მათი ცილური კომპონენტების რაოდენობის მიხედვითაც არის შესაძლებელია. ამ ნიშნით სისტემა შეიძლება იყოს სამ-, ორ- ან ერთკომპონენტიანი. მიტოქონდრიული და ბაქტერიული ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემა სამკომპონენტიანია და იგი NADH- ან NADPH-დამოკიდებულ FAD-შემცველ ფლავოპროტეინს, რკინა-გოგირდოვან ცილასა და ციტოქრომ P450-ს შეიცავს. ეუკარიოტების მიკროსომული ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემა ორკომპონენტიანია და იგი FMN-შემცველი NADPH-ციტოქრომ P450-რედუქტაზისა და ციტოქრომ P450-ისაგან შედგება. *Bacillus megaterium*-ში გვხვდება უნიკალური ერთკომპონენტიანი ხსნადი მონოოქსიგენაზა ციტოქრომ P450<sub>BM-3</sub>-ის სახით, რომლის პოლიპეპტიდური ჯაჭვი ფლავინისა და ჰემის ორ, ფუნქციურად განსხვავებულ დომენს შეიცავს. უნდა აღინიშნოს, რომ ეს დომენები სტრუქტურითა და ფუნქციით მიკროსომული ტიპის მონოოქსიგენაზებთან უფრო ახლოა, ვიდრე ბაქტერიულ/მიტოქონდრიულ ტიპთან.

პროკარიოტული და ეუკარიოტული ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემები სტრუქტურულ-ფუნქციური ორგანიზაციის თვალსაზრისით მეტ-ნაკლებად განსხვავებულია. პროკარიოტებში მონოოქსიგენაზური სისტემის კომპონენტები ხსნადი ფორმითაა, ხოლო სიცოცხლის ეუკარიოტულ ფორმაზე გადასვლისას სისტემის კომპონენტებმა ენდოპლაზმურ მემბრანებში ჩაშენების უნარი შეიძინეს. უმაღლესი ორგანიზაციის ფორმა აქვს ღვიძლის ციტოქრომ P450-ს, რომელიც ინტეგრალური ცილაა და მემბრანულ ბიშრეს ორივე მხარეს განჭოლავს. მონოოქსიგენაზური სისტემის დანარჩენი კომპონენტებიც მემბრანებშია განლაგებული. ლიპიდური მატრიქსი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მონოოქსიგენაზური სისტემის ფუნქციონირებაში: იგი განაპირობებს ცალკეული კომპონენტების ურთიერთკავშირს, ხელს უწყობს აქტიური კონფორმაციის შენარჩუნებას, ელექტრონთა ტრანსპორტის პროცესს, სუბსტრატების დაკავშირებას და ა.შ. გარდა ამისა, მემბრანა ბარიერულ ფუნქციას ასრულებს მთელი რიგი ქსენობიოტიკებისათვის, ამის გამო მიკროსომულ ჰიდროქსილირებას ყოველთვის წინ უსწრებს ორგანული ქსენობიოტიკის ლიპიდებში შეღწევის პროცესი. ციტოქრომ P450-სა და ლიპოფილურ ქსენობიო-

ტიკს შორის კატალიზურად აქტიური კომპლექსის ფორმირებას მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ის ფაქტორი, რომ ამ დროს უცხო ნაერთი ჰიდროფილური ურთიერთქმედების ძალების გავლენით წყლიანი ფაზიდან ფოსფოლიპიდური ფაზისაკენ მიიზიდება.

მცენარეული ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზური სისტემის სტრუქტურული ორგანიზაცია უნიკალურია იმ მხრივ, რომ მემბრანასთან დაკავშირებული მონოოქსიგენაზის გარდა, მცენარის უჯრედში ფუნქციონირებს არამემბრანული, ხსნადი ფერმენტიც. ყოველივე ეს მნიშვნელოვნად ზრდის მცენარის დეტოქსიკაციურ შესაძლებლობებს და კიდევ უფრო აძლიერებს ტოქსიკური ნაერთებისაგან თავდასაცავ სისტემას.

მონოოქსიგენაზური სისტემის ტერმინალური კომპონენტი — ციტოქრომ P450 — პროტოპორფირინ IX-ს შემცველი ჰემოპროტეინია. იგი უნივერსალური გავრცელების მქონე ფერმენტია და ორგანიზმებში მრავლობითი ფორმებით არის წარმოდგენილი. ამჟამად ჰემოპროტეინის სხვადასხვა იზოფერმენტების მაკოდირებელი 150-ზე მეტი გენია იდენტიფიცირებული. ნომენკლატურულ სისტემაში ციტოქრომ P450-ის მრავლობითი ფორმები გაერთიანებულია გენების ერთ სუპერ-ოჯახში, რომელიც CYP აბრევიატურით აღინიშნება. სუპეროჯახში კოდირებულია 450-მდე ფერმენტი, რომლებიც ოჯახებად და ქვეოჯახებად იყოფა. თითოეული ოჯახი, რომელსაც თავისი ნომერი აქვს მინიჭებული, აერთიანებს 40%-ით იდენტური ამინომჟაგური თანმიმდევრობის მქონე ციტოქრომ P450-ის იზოფორმებს. ცალკეული ქვეოჯახი, რომელიც ლათინური ასოთი მოიხსენიება, 55% ჰომოლოგიურობის ხარისხის მქონე იზოფორმებს შეიცავს. ამჟამად არსებობს ციტოქრომ P450-ების გენების 65 ოჯახი. მაგ., “ოჯახი 1” — პოლიციკლური არომატული ნაერთებით ინდუცირებად ციტოქრომ P450-ებს მოიცავს, ხოლო “ოჯახი 3”-ის წარმომადგენლები სტეროლებით ინდუცირდება. “ოჯახი 2” აერთიანებს რამდენიმე ქვეოჯახს, მაგ., “ქვეოჯახ 2B”-ში ფენობარბიტალით ინდუცირებული ჰემოპროტეინებია, ხოლო “ქვეოჯახ 2E”-ს იზოფორმებისათვის ინდუქტორი ეთანოლია. ზოგჯერ, მოხერხებულობისათვის, ოჯახისთვის ისეთი ნომერია შერჩეული, რომ იგი ფერმენტის სპეციფიკურ აქტივობას უკავშირდება. მაგ., “ოჯახი 11” შეიცავს ციტოქრომ P450-ებს, რომლებსაც სტეროიდ-11β-ჰიდროქსილაზური აქტივობა გააჩნიათ. ასევე დანომრილი “ოჯახი 17” (სტეროიდ-17-α-ჰიდროქსილაზა), “ოჯახი 21” (სტეროიდ-21-ჰიდროქსილაზა) და სხვ. თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ოჯახებსა და ქვეოჯახებში იზოფორმები ერთიანდება არა სუბსტრატული სპეციფიკურობის, არამედ გენეტიკური ჰომოლოგიურობის ხარისხის მიხედვით. მცენარეებში ყველაზე უკეთ შესწავლილია CYP76B1, რომელიც ფერმენტთა კლასიკური კლასიფიკაციის მიხედვით დარიჩინმჟაგა-4-ჰიდროქსილაზას (EC 1.14.14.1) წარმოადგენს. ეს ციტოქრომ P450 აქტიურად აკატალიზებს მრავალი ტოქსიკური ნაერთის, მათ შორის სხვადასხვა ქიმიური ბუნების ჰერბიციდების მეტაბოლურ გარდაქმნებს. აბრევიატურაში CYP76B1 “CYP76” მიუთითებს გენების ოჯახზე, “B” — ქვეოჯახზე, ხოლო “1” —

სპეციფიკურ ინდიკატორულ გენზე. საერთოდ, მცენარეებში აღმოჩენილია 120-მდე ღწმ-ის თანმიმდევრობა, რომლებშიც კოდირებულია ციტოქრომ P450. ეს მცენარეებია: ხორბალი, აუკადო (*Percea americana*), ბადრიჯანი (*Solanum melongela cv. Sinsadoharanasu*), კატაპიტნა (*Nepeta racemosa*), გველის სურო (*Catharanthus roseus*), პიტნა (*Mentha piperita*), ქუთქუთა (*Thlaspi arvense*), წიწმატი (*Arabidopsis thaliana*), სიმინდი, მიწაშლა (*Hellianthus tuberosus*), მაშალობიო, იონჯა, მზესუმზირა, ბარდა, სელი, გვაიულა (*Parthenium argentatum*), პეტუნია (*Petunia hybrida*), ჯადგარი (*Phalaenopsis sp. ჰიბრიდი SM9108*), სორგო, კონახური (*Berberis stolonifera*), მინდვრის მლოვეი (*Brassica campestris*), ცერცვი (*Vicia faba*), თამბაქო, სოია და სხვ.

მცენარეში ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა ერთ-ერთ საკანძო ფერმენტს წარმოადგენს მთელი რიგი მეორეული ნაერთების ბიოსინთეზებში, კერძოდ, მისი მონაწილეობით სინთეზდება: ლიგნინის მონომერები, ანთოციანიინები, ფურანოკუმარინები, იზოფლავონოიდები, სტეროლები, გიბერულინები, ალკალოიდები, ციანოგენური გლიკოზიდები, ფიტოალექსინები, ლიმონენი, გერანიოლი, ცხიმოვანი მჟავების ჰიდროქსი-წარმოებულები და სხვ. ასევე დიდია ფერმენტის მნიშვნელობა სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის, ლიპოფილური ბუნების მქონე ორგანული ქსენობიოტიკების მეტაბოლიზმში. ციტოქრომ P450-ის დანიშნულებაა რთული, რეგიო- და სტერეოსპეციფიკური რეაქციების კატალიზება, რომლის დროსაც ხდება ალიფატური და არომატული ნაერთების C- და N-ჰიდროქსილირება, N-, O- და S-დეალკილირება, დეამინირება, N- და S-ჟანგვა, დეჰალოგენირება და სხვ.

მტკიცდება, რომ ჰერბიციდების მიმართ მრავალი მცენარისათვის მდგრადობის ბიოქიმიურ საფუძველს სწორედ ციტოქრომ P450-ის აქტიური ფუნქციონირება წარმოადგენს. ამ დროს ჰერბიციდისაგან წარმოიქმნება ნაკლებად ტოქსიკური ჰიდროქსილირებული პროდუქტი, რომელიც ადვილად უკავშირდება ენდოგენურ ნაერთებს და ციტოპლაზმიდან გაუყოლებში ან უჯრედგარე სივრცეში გამოიდევენება. ამის თვალსაჩინო მაგალითია ხორბალსა და სიმინდში ფენილშარდოვანას კლასის ჰერბიციდის — ქლორტოლურონის მეტაბოლიზმი. ჰერბიციდი ჯერ ციტოქრომ P450-დამოკიდებულად გარდაიქმნება, რის შედეგადაც ტოქსიკური ნაერთი N-დემეთილრებასა და ჰიდროქსილირებას განიცდის, შემდეგ კი კონიუგირდება (ნახ.5.6).

ფენილშარდოვანას სხვა წარმომადგენელი იზოპროტურონი მიწაშლაში ციტოქრომ P450-დამოკიდებული N-დემეთილირების ორი სტადიის შედეგად საერთოდ კარგავს ფიტოტოქსიკურობას და მცენარისათვის უვნებელ მეტაბოლიტს წარმოქმნის (ნახ.5.15).

ციტოქრომ P450-ით კატალიზებული არომატული ბირთვის ჰიდროქსილირება ტიპიურია მრავალი ჰერბიციდისათვის, მაგ., ამ გზით მიმდინარეობს ხორბალში დიკლოფოპის (ნახ.5.12), ხოლო სიმინდში ბენტაზონის (ნახ.5.13) ტრანსფორმაციის პირველი ეტაპები. ამავე მცენარეებში სულფონილ-შარდოვანას წარ-

მოებულები (პრიმისულფურონი, ქლორსულფურონი და ტრიასულფურონი) არმატული ბირთვის ჰიდროქსილირებით მეტაბოლიზდება (ნახ.5.14). აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა ზემოაღნიშნული გარდაქმნა გლუკოზასთან კონიუგაციის რეაქციებით გრძელდება.

ენდოგენური სუბსტრატებისა და ქსენობიოტიკების ჰიდროქსილირება შესაძლებელია ციტოქრომ P450-ის ერთი და იგივე იზოფორმითაც კატალიზდებოდეს, რაც მთელი რიგი ექსპერიმენტული ფაქტებით დასტურდება. მაგ., ზორბლის ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზა ჟანგავს როგორც ენდოგენურ სუბსტრატს — ლაურინმჟავას, ასევე ეგზოგენურ ჰერბიციდს — დიკლოფოსს. საფურის კულტურა, რომელშიც კლონირებულია მიწაშლას ციტოქრომ P450-ის გენი CYP73A1, აწარმოებს როგორც საკუთარი ენდოგენური სუბსტრატის ტრანს-დარიჩინმჟავას, ასევე მოდელური ქსენობიოტიკის — *p*-ქლორ-N-მეთილანილინის ჰიდროქსილირებას. სოიის ეთილირებული ნაზარდების ფესვების მიკროსომებთან [ $^{14}C$ ] ტრანს-დარიჩინმჟავას და N,N-დიმეთილანილინის ერთდროული ინკუბირების შედეგად ენდოგენური სუბსტრატის ჰიდროქსილირება 70—80%-ით ინჰიბირდება (შესადარებლად გამოიყენებოდა საკონტროლო ვარიანტი, რომელშიც დარიჩინმჟავა მიკროსომებთან ქსენობიოტიკის გარეშე ინკუბირდებოდა). ამავე პირობებში ქსენობიოტიკის N-დემეთილირება მხოლოდ 25—30%-ით ითრგუნება (კონტროლი — ქსენობიოტიკი და მიკროსომები დარიჩინმჟავას გარეშე). N,N-დიმეთილანილინის გარდა, ანალოგიურ ეფექტს აჩვენებდნენ სხვა ქსენობიოტიკებიც — ეთილმორფინი, ანილინი, 3,4-ბენზპირენი, *p*-ნიტროანიზოლი, ამინოპირინი). ქსენობიოტიკებისა და დარიჩინმჟავას NADPH-დამოკიდებული ჟანგვის პროცესების კინეტიკური ანალიზი აჩვენებს, რომ ქსენობიოტიკების მიერ დარიჩინმჟავა-4-ჰიდროქსილაზის აქტივობის ინჰიბირება კონკურენტული ხასიათისაა და გამოწვეულია ფერმენტის უფრო მაღალი თვისობით ქსენობიოტიკების მიმართ. ეს შედეგები მიუთითებენ, რომ ქსენობიოტიკების თანამყოფობისას ციტოქრომ P450-ის ფიზიოლოგიური ფუნქცია (დარიჩინმჟავას ჰიდროქსილირება) მცირდება და ამის ხარჯზე ფერმენტი ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციაზე გადაერთვება. ამასთან, ექსპერიმენტებში გამოყენებული ქსენობიოტიკების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების შესწავლა აჩვენებს, რომ აღნიშნული მოვლენა პირდაპირ კავშირში უნდა იყოს ქსენობიოტიკის პოლარობასთან — რაც უფრო მეტია ქსენობიოტიკის ჰიდროფობულობა, მით მეტია მისი თვისობა ციტოქრომ P450-ის მიმართ. როგორც ჩანს, ჰიდროფობული ქსენობიოტიკის უჯრედში შეღწევა იმ რეგულატორულ სიგნალს წარმოადგენს, რომელიც ციტოქრომ P450-ის “ენდოგენურიდან” “ეგზოგენურ” რეჟიმზე გადართვას იწვევს. ფუნქციონირების რეჟიმის შეცვლა კი გამოწვეული უნდა იყოს ციტოქრომ P450-ის მიმართ ლიპოფილური ქსენობიოტიკების მაღალი თვისობით, რომელიც ბუნებრივი სუბსტრატების თვისობას აჭარბებს.

ქსენობიოტიკის შემცველ არეზე მცენარის გამოზრდისას, როგორც წესი, ენდოპლაზმური მემბრანების ფრაქციაში (მიკროსომებში) ციტოქრომ P450-ის

შემცველობა საგრძობლად იზრდება. მცენარეული ციტოქრომ P450, რომელიც შეესაბამება CYP76B1 გენს, აქტიურად ინდუცირდება ქსენობიოტიკებით ფენილეთილბარბიტურის მეუათი, ქლოფიბრატი, ამინოპირინით, 2,4-D-ით, პროქანილით, ქლორაცეტამილით, თიოკარბამატი, ქლორტოლურონით, ბენტაზონით და სხვ. იგი ეფექტურად ჟანგავს ალკოქსიკუმარინებს, ალკოქსირეზორუფინებს, ასევე ფენილშარდოფანას მრავალ წარმოებულს. ჰემოპროტინი ამ ნაერთების N-დემეთილირებას ისეთივე სიჩქარით წარმართავს, როგორც ნორმალური ფიზიოლოგიური პროცესებისთვისაა დამახასიათებელი.

დადგენილია, რომ ციტოქრომ P450-ის CYP76B1 გენის კონსტიტუციური ექსპრესია წიწმატსა და თამბაქოში მნიშვნელოვნად ზრდის ამ მცენარეების მდგრადობას ჰერბიციდების მიმართ, მაგ., იზოპროტურონისა და ქლორტოლურონის მიმართ ტოლერანტობა ათმაგდება, ხოლო ლინურონის მიმართ — 20-ჯერ იზრდება. ამასთან, მცენარეებში სხვა რაიმე შესაძენვეი ფენოტიპური გადახრები არ გამოიხატება. ვარაუდობენ, რომ ჰერბიციდებით დაბინძურებული ნიადაგების ფიტორემედიაციისათვის მცენარეების შერჩევისას CYP76B1 გენი ეფექტურ სელექციურ მარკერად შეიძლება იქნას გამოყენებული.

ციტოქრომ P450-ის მიმართ ცალკეული ქსენობიოტიკების ინდუქციური ეფექტი დამოკიდებულია არამარტო თვით ქსენობიოტიკის ქიმიურ თვისებებზე, არამედ მისი გარდაქმნისას წარმოქმნილი ინტერმედიატების თავისებურებებზეც. ზოგიერთი მეტაბოლიტები, რომლებიც მაღალი რეაქციისუნარიანობით ხასიათდებიან, ინდუცირებული ციტოქრომ P450-ის ინაქტივაციას იწვევენ, რის შედეგადაც ჰემოპროტინი არააქტიურ, ციტოქრომ P420-ის ფორმაში გადადის. ზემოთქმულის თვალსაჩინო მაგალითია N,N-დიმეთილანილინისა და 3,4-ბენზპირენის ერთმანეთისაგან რადიკალურად განსხვავებული ინდუქციური ეფექტების შედარება: N,N-დიმეთილანილინის შემცველ საკვებ ხსნარზე გამოზრდილი კონიდრისა და სოიის აღმონაცენების ფესვებში ჰემოპროტინის აქტიური ფორმის (P450-ის) შემცველობის მნიშვნელოვანი მატება შეინიშნება, მაშინ როდესაც 3,4-ბენზპირენი არააქტიური ფორმის (P420-ის) შემცველობის ძლიერ ზრდას იწვევს. ამავე დროს ცნობილია, რომ N,N-დიმეთილანილინის ჰიდროქსილირების პროდუქტები (N-მეთილანილინი, *p*-ჰიდროქსი-N,N-დიმეთილანილინი და სხვ.) არ წარმოადგენენ ისეთ აქტიურ ნაერთებს, როგორებიცაა 3,4-ბენზპირენის ჟანგვის შუალედური პროდუქტები — ეპოქსიდები, დიოლები და ქინონები. ამ უკანასკნელთა “აგრესიულობა” გამოიხატება ჟანგბადის აქტიური ფორმების (მაგ., სუპეროქსიდული ანიონ-რადიკალის) გენერაციაში, რომლებიც ციტოქრომ P450-ის აქტიური ცენტრის ქიმიურ მოდიფიკაციას და ამ გზით ფერმენტის მის შეუქცევად ინაქტივაციას იწვევს. ნაჩვენებია, რომ ასეთი ტიპის ინაქტივაცია მცენარეული ციტოქრომ P450-ის დამახასიათებელი თვისებაა და ამ დროს წარმოქმნილ ციტოქრომ P420-ს, მონოოქსიგენაზურის სანაცვლოდ, პეროქსიდაზული აქტიუობა გააჩნია. ასეთი მოდიფიკაციით მცენარეული უჯრედი, ერთი მხრივ, აქტიური რადიკალების გენერატორის — ციტოქრომ P450-ის ლიკვიდაცია

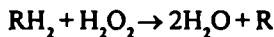
ახდენს, მეორე მხრე კი იძენს პეროქსიდაზული აქტივობის მქონე ციტოქრომ P420-ს, რომელსაც ქსენობიოტიკების ჟანგვის არანაკლები უნარი შესწევს, ვიდრე მონოოქსიგენაზას.

მცენარეში შესაბამისი გენების კლონირებით ციტოქრომ P450-ის რაოდენობრივი შემცველობის გაზრდა შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას პერბიციდების მიმართ მცენარის ტოლერანტობის და ფიტორემედიაციული თვისებების ამძღვლებს მიზნით მცენარეებში ციტოქრომ P450-ის გენის ექსპრესია მიზანშეწონილია ასევე ბუნებრივი ფარმაცევტული საშუალებების იაფი წარმოებისათვის, მაგ., სიმსივნის საწინააღმდეგო მცენარეული ალკალოიდების — ტაქსოლისა და ინდოლის მისაღებად, ასევე ფიტოესტროგენებისა და ანტიოქსიდანტების წარმოსაქმნელად, რომლებსაც მცენარე მკენე მწერებისა და პათოგენური მიკროორგანიზმების საწინააღმდეგოდ იყენებს.

### პეროქსიდაზა

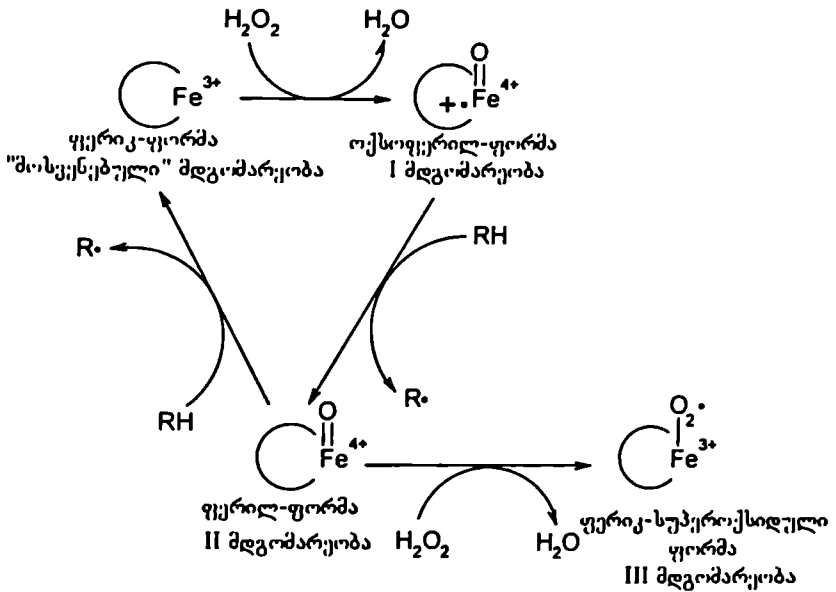
პეროქსიდაზა (EC 1.11.1.7) ფართოდ გავრცელებული ფერმენტია, რომელიც აღმოჩენილია ყველა მწვანე მცენარეში, სოკოებსა და აერობულ ბაქტერიებში. პეროქსიდაზის მრავლობითი ფორმები ფუნქციების მრავალფეროვნებას ამჟღავნებენ, მონაწილეობენ მთელ რიგ ფიზიოლოგიურ და დეტოქსიკაციურ პროცესებში: ჰორმონალურ რეგულაციაში, ლიგნინფიკაციაში, სტრესულ სიტუაციებზე საპასუხო რეაქციებში, უჯრედს იცავენ ინფექციისაგან, ჰიდროზუფანგებისაგან, მათ შორის სხვადასხვა რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი წყალბადის ზეჟანგისაგან, რაც ყველა ფოტოსინთეზური მცენარისთვისაა დამახასიათებელი. პეროქსიდაზა მცენარეებში ყველა ქსოვილში გვხვდება, ფერმენტი ლოკალიზებულია უჯრედის კედელში, ვაკუოლებში, ტონოპლასტებში, ენდოპლაზმური რეტიკულუმისა და პლაზმალემის მემბრანებში.

პეროქსიდაზა აკატალიზებს რეაქციას, რომელშიც სუბსტრატის დასაყანგად წყალბადის ზეჟანგში არსებული ჟანგბადის აქტიური ფორმა გამოიყენება:



ფერმენტი ერთი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან შედგება და პროტოპორფირინ IX-ს სახით ჰემის ერთ სტრუქტურულ ერთეულს შეიცავს. მცენარეული პეროქსიდაზებისთვის, ცხოველურისაგან განსხვავებით, დამახასიათებელია აპოფერმენტი, რომლის დაახლოებით 25%-ს ნახშირწყლოვანი ფრაგმენტი წარმოადგენს. ეს ნახშირწყლოვანი ნაშთი პეროქსიდაზების მოლეკულას იცავს პროტეოლიზისაგან და ხელს უწყობს ფერმენტის კატალიზურად აქტიური კონფორმაციის შენარჩუნებას.

ცნობილია, რომ პეროქსიდაზები მრავალ თავისუფალ-რადიკალურ რეაქციას აკატალიზებენ. ნატიურ მდგომარეობაში ფერმენტი სამჟალენტთან ჰემურ რკინას შეიცავს (ნახ.5.18). წყალბადის ზეჟანგის დაკუმირების შედეგად ჰემი ორი



ნახ. 5.18. პეროქსიდაზის მოქმედების მექანიზმი.

ელექტრონით იფანგება. აქტიური ცენტრის უშუალო სიახლოვეში განლაგებული ფუძე ბუნების მქონე ორი ამინომჟავა — არგინინისა (Arg<sub>14</sub>) და ჰისტიდინის (His<sub>42</sub>) ნაშთები კატალიზური აქტის ამ სტადიაზე წყალბადის ზეჟანგის აქტივაციაში ერთვებიან. His<sub>42</sub> თავდაპირველად მოქმედებს, როგორც პროტონის აქცეპტორი (ფუძური კატალიზატორი), ხოლო შემდეგ, ნეიტრალურ pH-ზე, დონორის როლში გამოდის (მთავური კატალიზატორი). ეს ხელს უწყობს ჰემთან ბმული ზეჟანგის მოლეკულაში პროტონის გადაცემას ჟანგბადის α-დან β-ატომისაკენ. ამის შედეგად ზეჟანგში O—O ბმა მაქსიმალურად პოლარიზდება, რის გამოც პეტეროლიტურად იზლიჩება და ოქსოფერილი (პეროქსიდაზის I მდგომარეობა) ფორმირდება. ამ დროს Arg<sub>14</sub> ჰისტიდინის pK<sub>a</sub>-ს მნიშვნელობას ამცირებს და ეს ამინომჟავური ნაშთი ფერმენტის აქტიურ ცენტრში დამატებით უერთდება წყალბადის ზეჟანგის მოლეკულას. ოქსოფერილი, რომელიც ჰემის პორფირინულ ბირთვში ოთხვალენტიან რკინას შეიცავს, სტაბილიზებულ კატიონურ რადიკალს წარმოადგენს. ოქსოფერილი დასაჟანგი სუბსტრატის ორი მოლეკულით ორ ეტაპად აღდგება. პირველ სტადიაზე, ოქსოფერილი კატიონ-რადიკალის მეშვეობით სუბსტრატიდან ერთი ელექტრონის მოხლეჩას ახდენს და ფერილ-ფორმაში (პეროქსიდაზის II მდგომარეობაში) გადადის. ამ დროს რადიკალი და დადებითი მუხტი



ნეიტრალდება, მაგრამ რკინა კვლავ ოთხვალენტური მდგომარეობაში რჩება. შემდეგ ეტაპზე სუბსტრატის სხვა მოლეკულიდან მეორე ელექტრონით იხლიჩება, ჰემის რკინა სამვალენტური მდგომარეობამდე აღდგება და წარმოიქმნება ფერილ-ფორმა, ე.ი. ფერმენტი ე.წ. “მოსვენებულ” მდგომარეობაში გადადის. ფერილ-ფორმის წყალბადის ზეჟანგთან ურთიერთმოქმედების შემთხვევაში კატალიზურად ინაქტივირებული ფერილ-სუპეროქსიდული ფორმა (პეროქსიდაზის III მდგომარეობა) წარმოიქმნება, რომელშიც ჰემის სამვალენტური რკინა სუპეროქსიდულ რადიკალთან არის დაკავშირებული.

პეროქსიდაზით კატალიზებული რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი R-თავისუფალი რადიკალის შემცველ პროდუქტს სხვა ნივთიერებების, მათ შორის ქსენობიოტიკების დაჟანგვაც შეუძლია.

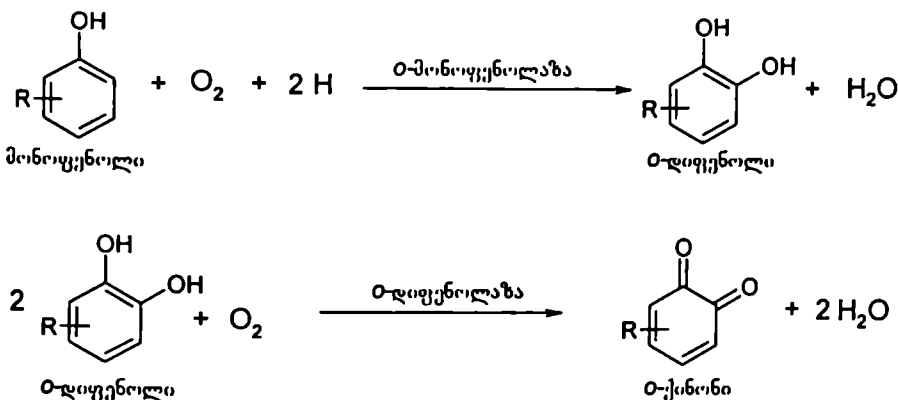
მცენარეული პეროქსიდაზების ანალოგიურად, ჟანგვით რეაქციებში მონაწილეობენ მიკროორგანიზმების პეროქსიდაზები: ლიგინ-პეროქსიდაზა და მანგანუმ-დამოკიდებული პეროქსიდაზა (Mn-პეროქსიდაზა). სხვადასხვა ნაერთების ჟანგვის გარდა, სათანადო ელექტრონების დონორების თანაობისას ლიგინ-პეროქსიდაზა აღდგენით რეაქციებშიც იღებს მონაწილეობას.

ზოგიერთი მკვლევარის თვალსაზრისით მცენარეებში ორგანული ტოქსიკური ნაერთების ძირითადი ნაწილი პეროქსიდაზებით იჟანგება. ეს ჰიპოთეზა ექსპერიმენტულად დასაბუთებულ შემდეგ მოსაზრებებს ეყრდნობა: მცენარეებში პეროქსიდაზა ფართოდ არის გავრცელებული; აქვს მაღალი თვისობა სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის მქონე ორგანული ქსენობიოტიკების მიმართ; გააჩნია უნივერსალური სუბსტრატული სპეციფიკურობა. ეს თავისებურებები განსაზღვრავს პეროქსიდაზის აქტიურ მონაწილეობას დეტოქსიკაციური პროცესების ფართო დიაპაზონში. ქსენობიოტიკების ჰიდროქსილირების რეაქციებში მცენარეული პეროქსიდაზების მონაწილეობაზე მრავალი ფაქტი მიუთითებს, მაგ., სხვადასხვა მცენარეების პეროქსიდაზებს შეუძლიათ დაჟანგონ N,N-დიმეთილანილინი, 3,4-ბენზპირენი, 4-ნიტრო-0-ფენილენდიამინი, 4-ქლორანილიდი, ფენოლი, ამინოფლუორენი, პარაოქსიაცეტანილიდი, დიეთილსტილბესტროლი, ჰიდროქსიბუთილტოლუოლი, ჰიდროქსიანიზოლები და ა.შ. ტრითიუმით ნიშანდებული მეთილის ჯგუფის შემცველი [C<sup>3</sup>H<sub>7</sub>] TNT-ს გამოყენებით ნაჩვენებია, რომ პირშუშხას პეროქსიდაზის სუფთა პრეპარატს შეუძლია ისეთი ძნელად დასაჟანგი ჯგუფიც კი დაჟანგოს, როგორსაც TNT-ს მეთილის ჯგუფი წარმოადგენს.

### ფენოლოქსიდაზა

ფენოლოქსიდაზა (EC 1.14.18.1) სპილენძის შემცველი მეტალოფერმენტია, რომელიც ფართოდაა გავრცელებული მიკროორგანიზმებში, მცენარეებში, მწერებსა და ცხოველურ ორგანიზმებში. ეს ფერმენტი საკვანძო როლს ასრულებს ისეთ პროცესებში, როგორცაა ნაყოფების და ბოსტნეულის პიგმენტირება. მცენარეებში ფერმენტი წარმოადგენილია მრავლობითი ფორმებით, რომლებიც

გეზედება აქტიურ ან ლატენტურ მდგომარეობაში. ფენოლოქსიდაზების მიერ კატალიზებული რეაქციები ორი ტიპისაა (ნახ.5.19):

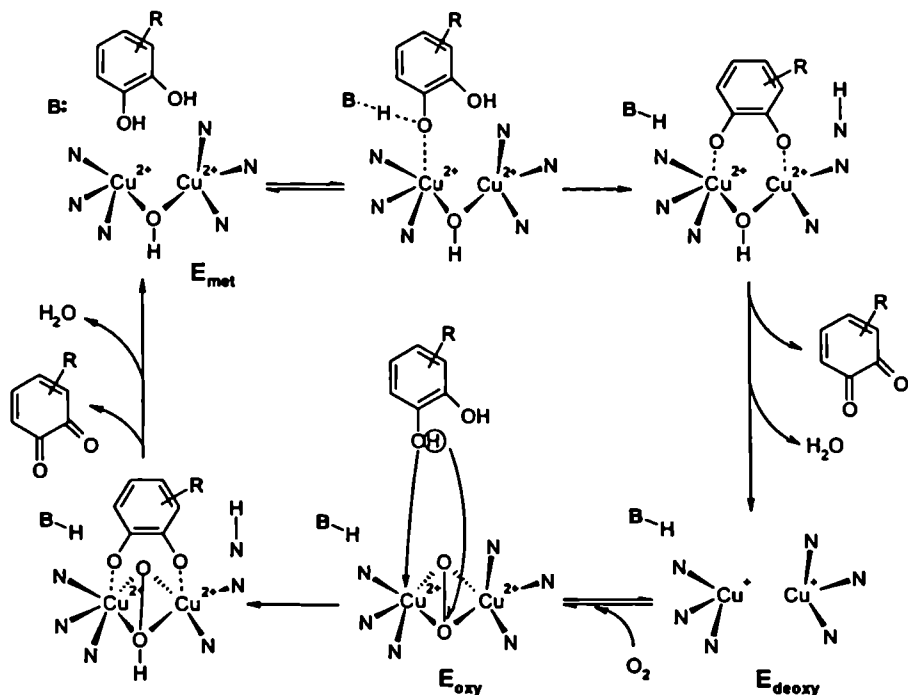


ნახ. 5.19. მცენარეების ფენოლოქსიდაზების მიერ კატალიზებული მონოფენოლაზური და დიფენოლაზური რეაქციები.

- მონოოქსიგენაზური, ანუ მონოფენოლაზური რეაქცია — მონოფენოლების o-ჰიდროქსილირება;
- დეჰიდროგენაზური, ანუ დიფენოლაზური რეაქცია — o-დიფენოლების o-ჰინონებად შედგება.

მონოფენოლაზური და დიფენოლაზური კატალიზური რეაქციები ხშირად არაფერმენტულ პროცესებთანაა შეუღლებული, მაგ., o-ჰინონების ფორმირებას მოჰყვება არაფერმენტული კონდენსაციის რეაქციები, რომლის შედეგადაც პიგმენტები წარმოიქმნება.

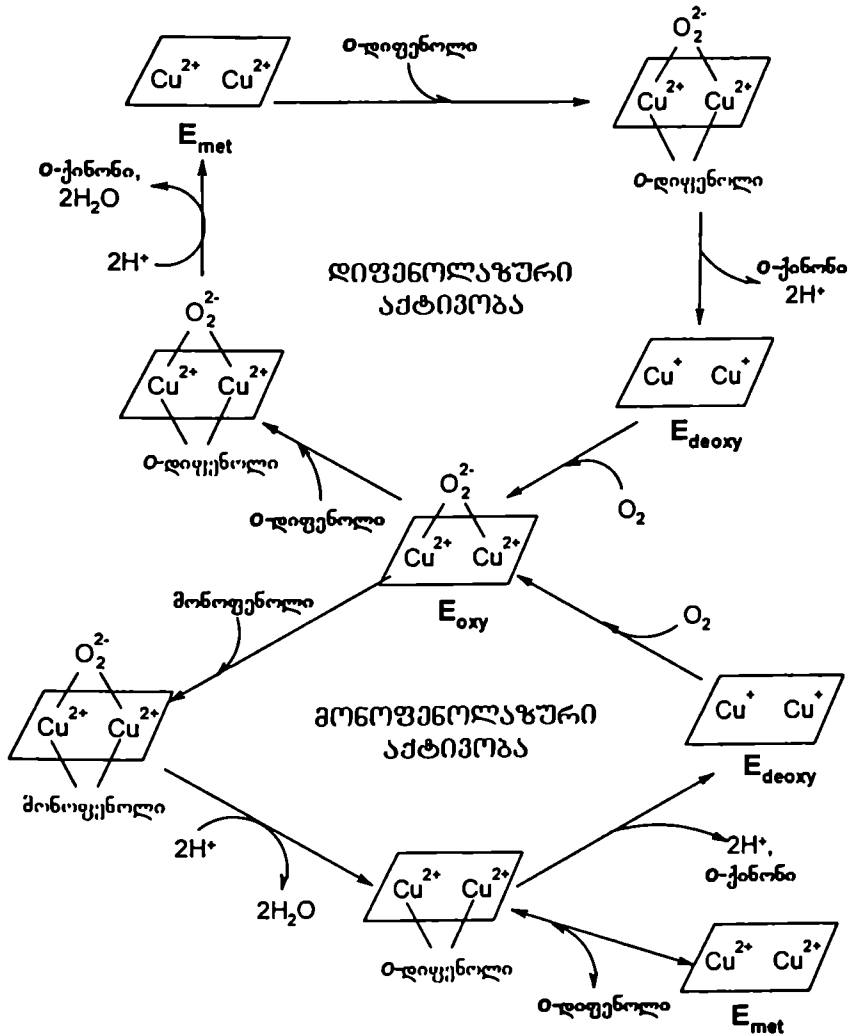
ფენოლოქსიდაზის მოქმედების შესაძლო მექანიზმი შესწავლილია ბაზიდიალური სოკოს — *Agaricus bisporus* თირიზინაზის მაგალითზე. ეს ფერმენტი ფენოლოქსიდაზების ტიპური წარმომადგენელია და სამი — მეტ-, დეოქსი- და ოქსი-ფორმების სახით არსებობს. ფერმენტის აქტიური ცენტრი ორბირთვიანია (ნახ.5.20). თითოეული ბირთვის სპილენძის იონი პისტინის ნაშთების აზოტის სამი ატომის გარემოცვაში იმყოფება. სწორედ სპილენძის იონების ვალენტობით განსხვავებიან ერთმანეთისაგან ფენოლოქსიდაზის ფორმები, კერძოდ, მეტ- და ოქსი-ფორმებში სპილენძის იონები ორვალენტია, ხოლო დეოქსი-ფორმა ერთვალენტია სპილენძის შეიცავს. სუბსტრატთან (მაგ., o-დიფენოლთან) დაკავშირება მხოლოდ მეტ- და ოქსი-ფორმებს შეუძლიათ, ხოლო დეოქსი-ფორმას ასეთი უნარი არ გააჩნია. მოლეკულური ჟანგბადი, რომელიც ფენოლების ჟანგვაში მონაწილეობს, პირიქით, მხოლოდ თავისუფალ დეოქსი-ფორმას უკავშირდება.



ნახ. 5.20. ფენოლოქსიდაზის მოქმედების მექანიზმი.

o-დიფენოლური რეაქცია სუბსტრატის დაკავშირებით იწყება. ამ დროს ფერმენტის მეტ-ფორმის (სქემაზე —  $E_{met}$ ) ერთ-ერთ სპილენძის (II) იონს უკავშირდება o-დიფენოლი, რომელიც აქტიური ცენტრის სიბრტყის მიმართ პერპენდიკულარულ (აქსიალურ) პოზიციას იკავებს. პროცესს თან ახლავს o-დიფენოლის ჰიდროქსილის ჯგუფებიდან ფერმენტის აქტიურ ცენტრზე პროტონების გადასვლა. პირველი მათგანი აპოფერმენტზე (სქემაზე აღნიშნულია, როგორც B) გადადის, ხოლო მეორე — პისტიდინის ნაშთის აზოტის ატომზე, რომელიც მეორე სპილენძის (II) იონიდან თავისუფლდება. ამის შემდეგ იწყება o-დიფენოლის ჟანგვის რეაქცია: ელექტრონები სუბსტრატიდან სპილენძის (II) იონებზე გადადიან, რის შედეგადაც o-ჰინონი წარმოიქმნება, ხოლო ფერმენტი დეოქსიფორმაში გადადის (სქემაზე —  $E_{deoxy}$ ). ამ ფორმას აქვს ორბიტრთვიანი აქტიური ცენტრი, სადაც მეტალების იონები ერთვალენტურიან მდგომარეობაშია. დეოქსიფორმა სწრაფად იკავშირებს ჟანგბადის მოლეკულას და ფერმენტი ოქსი-ფორმაში გადადის, რომელსაც, ისევე როგორც მეტ-ფორმას, o-დიფენოლის მოლეკულის მიერთებისა და ჟანგვის უნარი გააჩნია.

ფენოლოქსიდაზის ოქსი-ფორმას, *o*-დიფენოლის გარდა, მონოფენოლის მიერთებაც შეუძლია. ამ შემთხვევაში ფერმენტი მონოფენოლაზურ აქტივობას ამჟღავნებს. როგორც ნახ.5.21-ზე წარმოდგენილი სქემიდან ჩანს, ფერმენტის ერთსა და იგივე იზოფორმას როგორც დიფენოლაზური, ასევე მონოფენოლაზური აქტივობის გამოვლენა შეუძლია.



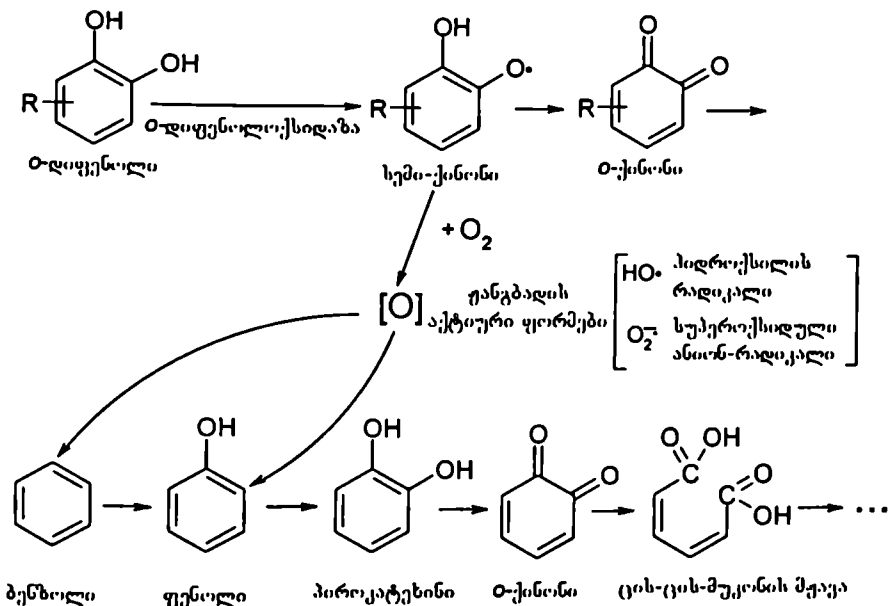
ნახ. 5.21. ფენოლოქსიდაზის დიფენოლაზური და მონოფენოლაზური რეაქციების მექანიზმი.

ნაჩვენებია, რომ ზოგიერთ მცენარეში ფენოლოქსიდაზის აქტივობის ტიპი დამოკიდებულია ფერმენტის მრავლობითი ფორმების მოლეკულურ მასაზე, კერძოდ, დაბალი მოლეკულური მასის მქონე ფორმები (14, 21, 28, 35, 42, 55 და 70 kD) ამჟღავნებენ ორივე — მონოფენოლაზურ და დიფენოლაზურ აქტივობას, ხოლო მოლეკულური მასის ზრდასთან ერთად, 118 და 250 kD მასის მქონე ფორმებს მხოლოდ დიფენოლაზური აქტივობის გამოვლენა შეუძლიათ. ეს მოვლენა აიხსნება დაბალმოლეკულური ფორმების ასოციაციის დროს აქტიური ცენტრის სტერიული გადაფარვით, რაც ხელს უშლის მონოფენოლების დაკავშირებას ოლიგომერულ, მაღალმოლეკულურ ფორმებთან.

ძირითადი ფუნქციის — ფენოლური ნაერთების ჟანგვაში მონაწილეობის გარდა, ფენოლოქსიდაზას შეუძლია აგრეთვე აქტიურად ჩაერთოს ორგანული ქსენობიოტიკების ჟანგვით დეგრადაციაში. ამ დროს ფერმენტის მოქმედების მექანიზმი ქსენობიოტიკების ქიმიურ ბუნებაზე დამოკიდებულია. თუ ქსენობიოტიკი ფენოლური ბუნებისაა, მაშინ ის ფერმენტის სუბსტრატია და უშუალოდ დაიჟანგება ორივე გზით — მონოფენოლაზური და დიფენოლაზური რეაქციებით სხვა შემთხვევაში, ე.ი. თუ ქსენობიოტიკი ფენოლოქსიდაზის სუბსტრატი არ აღმოჩნდება, საუარაუდოა, რომ ქსენობიოტიკის ჟანგვა ენდოგენურ ფენოლებთან თანადაჟანგვის მექანიზმით წარიმართება. მაგ., ნაჩვენებია, რომ ისპანახის ფენოლოქსიდაზა ეფექტურად ჟანგავს არომატულ ნახშირწყალბადებს ბენზოლს და ტოლუოლს, რის შედეგადაც ქინონები წარმოიქმნება. პროცესი მნიშვნელოვნად სტიმულირდება საინკუბაციო არეში ფენოლოქსიდაზის სუბსტრატის — პიროკატეხინის შეტანით მოცემულ შემთხვევაში ფერმენტი ენდოგენური ფენოლის დაჟანგვით სემი-ქინონს და ქინონს წარმოქმნის, რომლებსაც მაღალი ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალი გააჩნიათ (ნახ. 5.22). სემი-ქინონს შეუძლია მოლეკულური ჟანგბადის გააქტიურება და მისგან ჟანგბადის აქტიური ფორმების ფორმირება. ამ ფორმებს — სუპეროქსიდულ ანიონ-რადიკალსა ( $O_2^{\cdot-}$ ) და ჰიდროქსილის რადიკალს ( $HO^{\cdot}$ ) ორგანული ქსენობიოტიკების ჟანგვის უნარი გააჩნიათ. ამრიგად, ფენოლოქსიდაზა აქტიურად მონაწილეობს ორგანული ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის პროცესში, რის საფუძველსაც ჟანგბადის თავისუფალი რადიკალების ფორმირებით მიმდინარე თანადაჟანგვის მექანიზმი წარმოადგენს.

საუარაუდოა, რომ ანალოგიური მექანიზმით იჟანგება ნიტრობენზოლი *m*-ნიტროფენოლად, აგრეთვე  $[C_6H_5]$  TNT-ს მეთილის ჯგუფი, რაც ნაჩვენებია ჩაის ფოთლებიდან გამოყოფილი ფენოლოქსიდაზის ფერმენტული პრეპარატის მაგალითზე.

ქსენობიოტიკების ჟანგვით პროცესებში მცენარეული ფენოლოქსიდაზების მონაწილეობის შესახებ მონაცემები საკმაოდ მცირეა. ამ თვალსაზრისით უკეთესადაა შესწავლილი ბაზიდიალური სოკოების ლაკაზები (*p*-ფენოლოქსიდაზები). დადგენილია, რომ ლაკაზები მონაწილეობენ მრავალი ალიფატური და არომატული ნახშირწყალბადების დეგრადაციაში, აგრეთვე ალკენების ჟანგვაში.



ნახ. 5.22. ბენზოლის თანადაქანგვის მექანიზმი ო-დიფენოლის ფენოლოქსიდაზით ქანგვის პროცესში.

ნაჩვენებია, რომ სოკო *Trametes versicolor*-იდან გამოყოფილი ლაკაზის ნედლი ექსტრაქტი ქანგავს 3,4-ბენზპირენს, ანტრაცენს, ქრიზენს, ფენანტრენს, აცენაფენს და სხვა პოლიციკლურ არომატულ ნახშირწყალბადებს. ამ ტოქსიკური ნაერთების ქანგვის პროცესის ინტენსიუობა იზრდება ლაკაზების სუბსტრატების — ფენოლის, ანილინის, 4-ოქსიბენზოინის მჟავას და 4-ჰიდროქსიბენზოინის სპირტის თანაობისას. ქსენობიოტიკების თანადაქანგვის პროცესში ეს სუბსტრატები მედიატორების როლს ასრულებენ. როდესაც მედიატორის რედოქს-პოტენციალი ( $E_p$ ) 0.9 V-ზე ნაკლებია, ქანგვის რეაქციის სიჩქარე მედიატორების  $E_p$ -ის მნიშვნელობის ზრდის პირდაპირ პროპორციულად იზრდება, ხოლო თუ მედიატორის რედოქს-პოტენციალი 0.9 V-ს აღემატება, მაშინ რეაქციის სიჩქარე კლებულობს. ბუნებრივი ნაერთები: მეთიონინი, ცისტეინი, ალდგენილი გლუტათიონი და სხვ., რომლებიც მედიატორების როლს ასრულებენ, აგრეთვე ასტიმულირებენ ქსენობიოტიკების ქანგვას. ეს მონაცემები იმაზე მიუთითებენ, რომ ო-დიფენოლოქსიდაზის მსგავსად, პოლიციკლურ არომატულ ნახშირწყალბადებს ლაკაზაც თანადაქანგვის მექანიზმით ქანგავს.

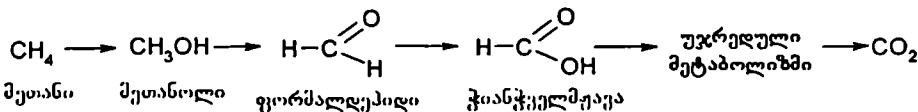
5.12 ღრმა შანვა

მცენარულ უჯრედში ქსენობიოტიკების შეღწევის შემდეგ მიმდინარე ტრანს-ფორმაციის პროცესების შედეგად, ქსენობიოტიკების უჯრედული გარდაქმნების ძირითადი და შუალედური პროდუქტებია:

- უცხო ნაერთების კონიუგატები, რომლებიც ქსენობიოტიკის ძირითად ნახშირბადის ჩონჩხს ინარჩუნებენ და ვაკუოლებში ან უჯრედშორის სივრცეში გროვდებიან;
- დაბალმოლეკულური ნაერთები — შუალედური მეტაბოლიტები, რომელთა არსებობა დადგენილია როგორც ციტოპლაზმაში, ასევე სხვა უჯრედულ სტრუქტურებშიც.

<sup>14</sup>C-ნიშანდებულ ნახშირწყალბადებზე ჩატარებული ექსპერიმენტები ადასტურებენ, რომ დაბალმოლეკულური ალკანების (C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub>) ან ციკლოპექსანის შემცველ ატმოსფეროში მოთავსებული მცენარეების სტერილური ნაზარდები ამ ნაერთებს შთანთქავენ და მათი მოლეკულების ღრმა გარდაქმნებს ახდენენ. ეს ნახშირწყალბადები მცენარულ უჯრედში იჟანგებიან და შესაბამის კარბონმჟავებს წარმოქმნიან. ალკანები მონოტერმინალურ ჟანგვას განიცდიან, ხოლო ციკლოპექსანი რგოლის დაშლით იჟანგება. საბოლოოდ ეს ნახშირწყალბადები <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>-მდე იჟანგებიან, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ მათი ღრმა დეგრადაციის დროს კრების ციკლის მჟავები წარმოიქმნება. ამგვარად, ეგზოგენური ნახშირწყალბადების ნახშირბადის ჩონჩხი უჯრედის მეტაბოლიზმში ერთვება.

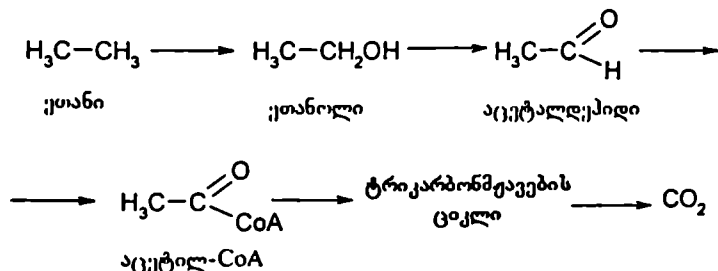
მცენარის მიერ შეთვისებული [<sup>14</sup>C] მეთანის რადიოაქტიური ნიშანი თავდაპირველად ორგანულ მჟავებში ერთვება, ხოლო შემდეგ მისი აღმოჩენა შესაძლებელია ამინომჟავებშიც. შაქრების ფრაქცია ამ დროს არარადიოაქტიურია. არააქროლად ორგანულ მჟავებს ამ შემთხვევაში ძირითადად კრების ციკლის მჟავები — ლიმონის, ქარვის, ფუმარისა და ვაშლის მჟავები წარმოადგენენ. ზოგიერთ შემთხვევაში შთანთქმული მეთანის მნიშვნელოვანი ნაწილი (30%-მდე) სრულ მინერალიზაციას განიცდის. ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით, საყარაულოა, რომ მცენარეში მეთანი საფეხურებრივ ჟანგვას განიცდის მეთანოლის, ფორმალდეჰიდისა და ჭიანჭველმჟავას წარმოქმნით (ნახ.5.23), რის შედეგადაც ალკანიდან სტანდარტული მეტაბოლიტები ფორმირდება.



ნახ. 5.23. უმაღლეს მცენარეებში მეთანის მეტაბოლური გარდაქმნები.

მცენარის მიერ შთანთქმული ნიშანდებული მეთანის, პროპანის, ბუთანისა და პენტანის რადიოაქტიური ნახშირბადატომები უმთავრესად დაბალმოლეკულური ნაერთების ფრაქციებში იყრიან თავს. მათგან დომინანტურია ორგანული

მეუეები — ფუმარის, ქარვის, მალონის, ლიმონისა და რძის მეუეები. აღნიშნული ნახშირწყალბადები მეთანის მსგავსად,  $^{14}\text{CO}_2$ -მდე იჟანგებიან. მაგ., ჩაის მცენარეებში მინერალიზდება 27—30% ეთანი და 10—13% პენტანი. ეთანის ნახშირბადატომების ზემოაღნიშნულ მეუეებში ჩართვა მიუთითებს, რომ ალკანის ჟანგვა მონოტერმინალური მექანიზმით მიმდინარეობს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, დიტერმინალური ჟანგვის დროს უნდა წარმოქმნილიყო რადიოაქტიური გლიკოლის, გლიოქსალისა და მეაუნის მეუეები, რაც არ შეინიშნება. ეთანის მონოტერმინალური ჟანგვის შედეგად აცეტილ-CoA ფორმირდება, რომელიც თავის მხრივ კრებსის ციკლის მეუეებში, კერძოდ, ქარვის მეუეაში ერთეება (ნახ.5.24).



ნახ. 5.24. უმაღლეს მცენარეებში ეთანის მეტაბოლური გარდაქმნები.

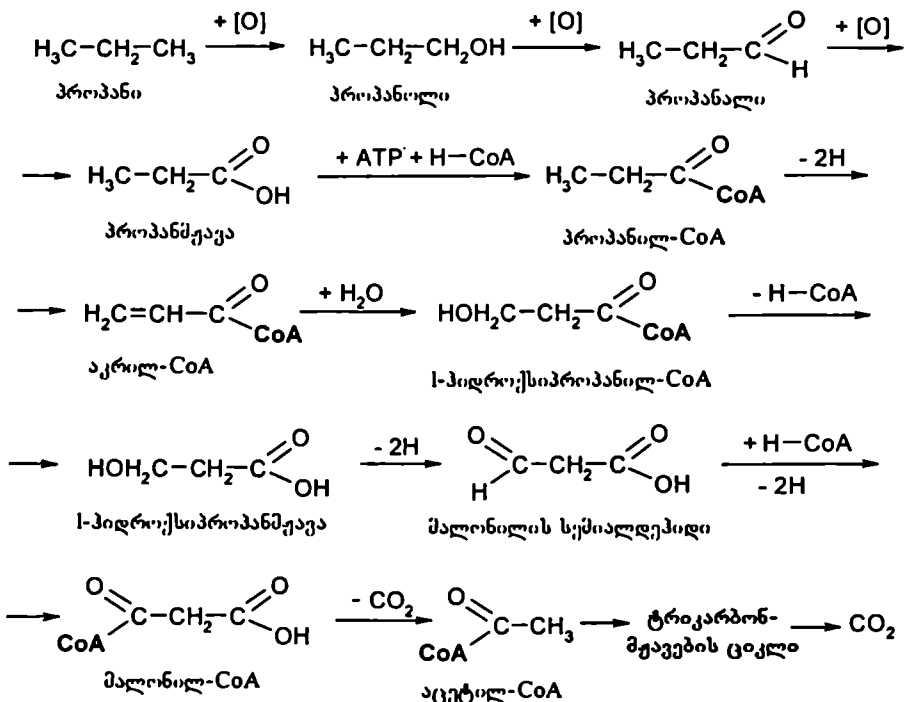
პროპანის მონოტერმინალური ჟანგვის შედეგად პროპიონმეუეა მიიღება, რომელიც თავის მხრივ მალონილ-CoA-ს წარმოქმნის, ხოლო ამ უკანასკნელის დეკარბოქსილირების შემდეგ კი აცეტილ-CoA ფორმირდება (ნახ.5.25).

სხვა ალკანების მსგავსად, პენტანიც ერთი ბოლოდან იჟანგება და ვალერიანის მეუეას წარმოქმნის, ამის შემდეგ β-ჟანგვის გზით იწყებს დეგრადაციას. ასეთვე გარდაქმნებს განიცდიან უფრო გრძელჯაჭვიანი ალკანებიც. მაგ., გვ-ზოგენური [ $^{14}\text{C}$ ] ოქტადეკანის წყლიან ემულსიასთან პრასის ფოთლების 40-წუთიანი ინკუბაციის შემდეგ ალკანის მთლიანი რადიოაქტიურობის 9.6% ესთერებში, 6.4% — სპირტებში, ხოლო 4% — ორგანულ მეუეებში აღმოჩნდა ჩართული.

რადიოაქტიური ნახშირბადით ნიშანდებული ბენზოლის და ფენოლის გამოყენებით ნაჩვენებია, რომ უმაღლეს მცენარეებში გვზოგენური არომატული ნახშირწყალბადების და მონოფენოლების ასიმილირება არომატული რგოლის გახლეჩით მიმდინარეობს. ამ ნაერთების ნახშირბადის ატომები, უჯრედული მეტაბოლიზმის შედეგად კარბონმეუეებსა და ამინომეუეებში ერთეებიან. მსგავსი მონაცემები მიღებულია აგრეთვე ტოლუოლისათვის, α-ნაფთოლისა და ბენზინისათვის.

მცენარულ ქსოვილში ბენზოლის ან ფენოლის შთანთქმის შემდეგ ყოველთვის იდენტიფიცირდება მუკონისა და ფუმარის მეუეები. ფუმარის მეუეა, როგორც

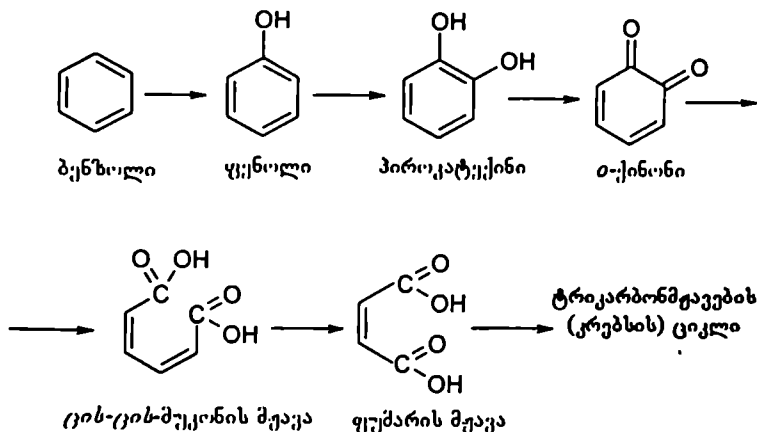




ნახ. 5.25. უმაღლეს მცენარეებში პროპანის მეტაბოლური გარდაქმნები.

ცნობილია, მუკონის მჟეას შემდგომი დაჟანგვით ფორმირდება. ამიტომ სავარაუდოა, რომ მცენარეების მიერ ბენზოლისა და ფენოლის ჟანგვითი ღვერადაციის პროცესში არომატული რგოლის გახლეჩის პირველ პროდუქტს მუკონის მჟეა წარმოადგენს, ხოლო ამ პროცესის შუალედურ ეტაპზე პიროკატეხინი და ოქინონი წარმოიქმნება (ნახ.5.26). საინტერესოა, რომ ანალოგიურად ხდება ენდოგენური სუბსტრატების არომატული რგოლის დაშლა — როდესაც 3,4-დიჰიდროქსიბენზონის მჟეასაგან 3-კარბოქსიმუკონის მჟეა წარმოიქმნება.

ფენოქსიალკილ-კარბონმჟეები, რომელთა გვერდითი ჯაჭვები 4 და მეტ ნახშირბადის ატომს შეიცავენ, მცენარეებში საკმაოდ ხშირად გვერდითი ჯაჭვის β-ჟანგვას განიცდიან. მაგ., 2,4-დიქლოროფენოქსიერბომჟეა ასეთი გარდაქმნის შედეგად 2,4-D-ს წარმოქმნის.



ნახ. 5.26. უმაღლეს მცენარეებში ბენზოლის მეტაბოლიზმი, რომელიც არომატული ბირთვის გახლეჩით მიმდინარეობს.

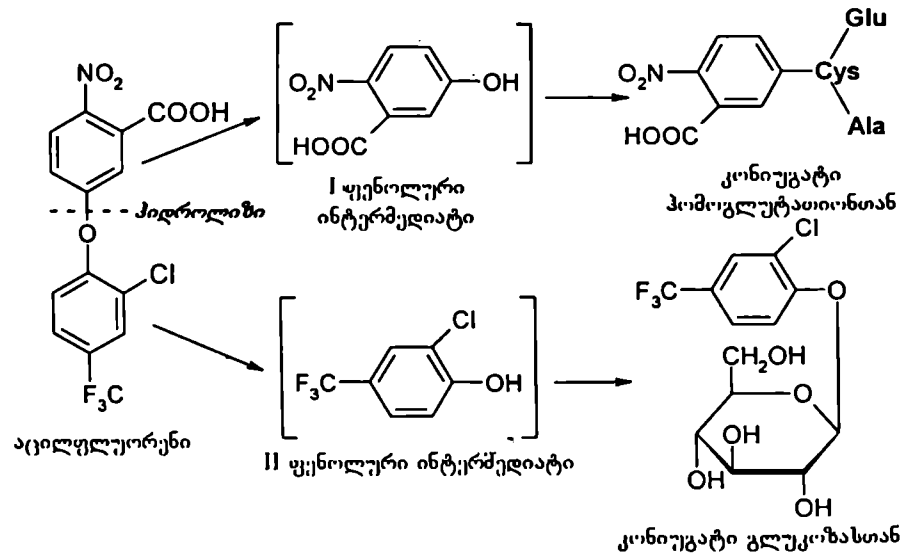
### 5.2 ჰიდროლიზური ტიპის გახლეჩა

ლიპოფილური ორგანული ქსენობიოტიკები, რომლებიც ესთერულ ბმებს შეიცავენ, ფუნქციურ ჯგუფებს არამარტო ჟანგებით დეგრადაციის შედეგად, არამედ თვით ქსენობიოტიკების მოლეკულების ჰიდროლიზური გახლეჩითაც იძენენ. ამის მაგალითია ისეთი ტოქსიკური ნაერთები, როგორებიცაა ფტალის მჟავას ესთერები და პესტიციდები: 2,4-D, მეთილდიქლოფენი, ბრომოქსილინოქტანოატი, ბინაპაკრილი, ტრიკლოპირი, არილფენოქსიპროპიონატი, პირეტრინი და სხვ. ნაჩვენებია, რომ ხორბალში, ქერში და ზოგიერთ სარეველ ბალახში ესთერული ბმის შემცველი პერბიციდები ფერმენტულად ჰიდროლიზდებიან. მაგ., ტრიკლოპირის სხვადასხვა ესთერებით აღნიშნული მცენარეების დამუშავებიდან 3 დღის შემდეგ უჯრედში შეღწეული ესთერების 94% ჰიდროლიზებული აღმოჩნდა.

სოიაში სულფონილ-შარდოუნას წარმოებულების მეტაბოლიზმი იმაზე მითითებს, რომ ესთერული ბმების გახლეჩის ინტენსივობა განსხვავებულია. ტიფენსულფურონ-მეთილი ძალიან სწრაფად ჰიდროლიზდება შესაბამისი ტიფენსულფურონის მჟავას წარმოქმნით. ტიფენგოგირდმჟავას მეთილ-ესთერის ნახეარდაშლის პერიოდი ქსოვილებში 4—6 სთ-ს შეადგენს, ქლორიმჟორონ-ეთილი შედარებით ნაკლები ინტენსივობით ჰიდროლიზდება, ხოლო მეთსულფურონ-მეთილი იგივე პირობებში საერთოდ არ განიცდის დეესთერიფიკაციას.

ქსენობიოტიკი, რომელიც ესთერულ ბმას შეიცავს, პირველადი გარდაქმნებისას სწორედ ამ ბმის გახლეჩით იშლება. ეთერული ბმა ესთერულთან შედარებით ნაკლებად ჰიდროლიზდება. ქსენობიოტიკ-ეთერებში თავდაპირველად სხვა, ადვილად დასაჟანგი ჯგუფების ტრანსფორმაცია მიმდინარეობს და მხოლოდ ამის შემდეგ იწყება ეთერული ბმების ჰიდროლიზი. მაგ., დიფენილ-ეთერების ჰიდროლიზური გახლეჩა იმ შემთხვევაში ხდება, როდესაც ამ ნაერთებს არომატულ ბირთვში ალკილური ჩამნაცვლებლები სცილდება. ასეთი კანონზომიერება გამოვლენილია ზორბლის, შერიის, კინდრის და სოიის მაგალითებზე. მაღალი სელექტიურობის მქონე პერბიციდი — AKH-7088, რომელიც ალკილური გვერდითი ჯაჭვების მქონე დიფენილეთერს წარმოადგენს, სოიის ნახარდებში გვერდითი ჯაჭვები სრული დაჟანგვის შემდეგ ჰიდროლიზდება.

არაალკილური ჩამნაცვლებლების მქონე აციფლუორენის მეტაბოლიზმის პირველადი სტადიას ეთერული ბმის ჰიდროლიზი წარმოადგენს, რის შედეგადაც შესაბამისი ფენოლები წარმოიქმნება. ეს ინტერმედიატები სწრაფად კონიუგირდებიან გლუკოზასთან და ჰომოგლუტათიონთან (ნახ.5.27). ანალოგიურად მიმდინარეობს ფლუოროდიფენისა და ნიტროფენის მეტაბოლიზმიც. სხვა დიფენილ-ეთერებიც შესაბამისი ფენოლების ფორმირებით იშლება. როგორც წესი, ფენოლური ბუნების მეტაბოლიტები კონიუგატებს სწრაფად წარმოქმნიან.

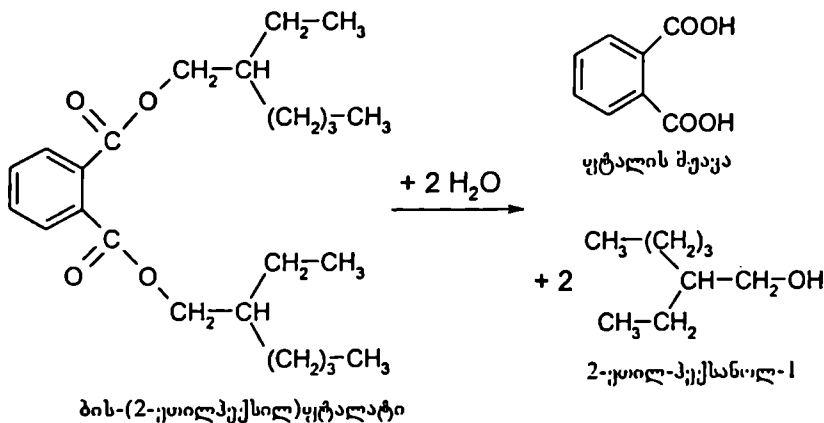


ნახ. 5.27. უმაღლეს მცენარეებში აციფლუორენის მეტაბოლიზმი, რომელიც ეთერული ბმის ჰიდროლიზური გახლეჩით იწყება.

5.2.1 ესთერაზები

ტოქსიკური ორგანული ნაერთების პიდროლიზის რეაქციები სერინული პიდროლაზებით კატალიზდება. ასეთი ფერმენტებია: კარბოქსილესტერაზა (EC 3.1.1.1), არილესტერაზა (EC 3.1.1.2), ლიზოფოსფოლიპაზა (EC 3.1.1.5), აცილესტერაზა (EC 3.1.1.6), აცილგლიცეროლიპაზა (EC 3.1.1.23), აცილნიტრატ-პიდროლაზა (EC 3.1.1.28), პალმიტოლ-CoA-პიდროლაზა (EC 3.1.2.2), ამიდაზა (EC 3.5.1.4), აცილ-არილამიდაზა (EC 3.5.1.13) და ა.შ. ასევე უნდა აღინიშნოს ფოსფატაზების (EC 3.1.3) ქვექვეკლასის ფერმენტები, რომლებიც ფოსფორორგანული ტოქსიკანტების პიდროლიზში მონაწილეობენ. სუბსტრატული სპეციფიკურობა ესთერაზებს საშუალებას აძლევს აქტიურად მიიღონ მონაწილეობა ლიპოფილური ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის პირველ ფაზაში.

დადგენილია, რომ ხორბალი 12-მდე ესთერაზას შეიცავს. მათგან ერთ-ერთი სპეციფიკურია ისეთი სუბსტრატების მიმართ, რომლებიც ესთერის სპირტულ ნაშთში 6-8 ნახშირბადატომიანი ჯაჭვის მქონე რადიკალს შეიცავენ. აღმოჩნდა, რომ ესთერაზების ეს ფორმა აქტიურად მონაწილეობს ესთერული ტიპის ქსენობიოტიკის — ბის-(2-ეთილჰექსილ)ფტალატის პიდროლიზში (ნახ.5.28). აღნიშნული ნაერთი გამოიყენება პლასტმასების წარმოებაში, როგორც დამარბილებელი საშუალება (პლასტიციზერი) და ერთ-ერთ ფართოდ გავრცელებულ ეკოტოქსიკანტს წარმოადგენს.



ნახ. 5.28. ფტალის მჟეავას ესთერის პიდროლიზური გახლენა უმაღლესი მცენარეების ესთერაზებით

ესთერაზები ეფექტურად აპიდროლიზებენ *p*-ნიტროფენილაცეტატის და  $\alpha$ -ნაფთილაცეტატის ტიპის მოდეულურ ქსენობიოტიკებს. სხვადასხვა მცენარეების

ესთერაზების აქტივობის შედარება უჩვენებს, რომ მოდელური ქსენობიოტიკების მიმართ აქტივობა ყველაზე მაღალია ხორბალში, თუმცა ამავე დროს სარეველებში — ველურ შვრიასა და ვენახის მელაკუდაში (*Alopecurus myosuroides*) ესთერაზა უფრო აქტიურად პესტიციდების ესთერების (მეთილ-დიკლოფოპის, ბრომოქსინილოქსანოატის და ბინაპაკრილის) ჰიდროლიზს აკატალიზებს. ასეთი განსხვავება გამოწვეულია მცენარეებში ესთერაზების სხვადასხვა ფორმების არსებობით. ყველა გამოკვლეულ სარეველებში დომინანტურ ფორმებს ფუძე ესთერაზები ( $pl > 5.0$ ) წარმოადგენენ, რომლებიც პესტიციდების მიმართ მაღალი თვისობით ხასიათდებიან, ხოლო ხორბალში ფუნქციონირებს მჟავა ესთერაზა ( $pl 4.6$ ), რომელსაც პირიქით, ყველაზე მაღალი აქტივობა  $\alpha$ -ნაფტილაცეტატის მიმართ აქვს და პესტიციდების მიმართ სპეციფიკურობას არ ამჟღავნებს.

მარცვლოვანი კულტურებისა და სარეველების ჰიდროლიზური ფერმენტების ოჯახი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს როგორც შიდაუჯრედულ მეტაბოლურ პროცესებში, ასევე ჰერბიციდების აქტივაციაშიც (ზოგიერთი ესთერული ტიპის ჰერბიციდი თავის აქტივობას მხოლოდ ჰიდროლიზური დაშლის შემდეგ ამჟღავნებს). მაგ., სერინული ჰიდროლაზების ოჯახის წარმომადგენელი — კარბოქსილესთერაზა, შესაბამისი ესთერული წინამორბედების ჰიდროლიზის შედეგად ააქტიურებს ჰერბიციდებს — არილოქსიფენოქსიპროპიონატებს. ეს ესთერაზა იდენტიფიცირებულია მელაკუდაში, სარეველაში, რომელიც ჩრდილოეთ ევროპაში მარცვლოვან კულტურებს დიდ პრობლემებს უქმნის. აღნიშნული ფერმენტი კლონირებული და ექსპრესირებულია *Pichia pastoris*-ს საფუარში. აღმოჩნდა, ესთერაზა ფორმირდება ამ გენ-მოდიფიცირებული შტამის ღრმა კულტოვირების შედეგად, როგორც არაუჯრედული პროდუქტი. ამ ფერმენტის კლონირება მცენარეებშიცაა განზრახული.

### 5.3 ალდგენითი გარდაქმნები

პირველადი გარდაქმნა ზოგიერთი ქსენობიოტიკისათვის ალდგენით რეაქციას წარმოადგენს. ასეთ ტოქსიკანტებს წარმოადგენენ, ერთი მხრივ, ნიტროჯგუფების შემცველი ნაერთები (ნიტრობენზოლი, დინიტრობენზოლი, ფთოქებადი ნოთიერებები — TNT, ნიტროგლიცერინი, RDX, HMX და სხვ.), მეორე მხრივ კი პოლიჰალოგენირებული ნახშირწყალბადები (ქლორირებული ალკანები, ალკენები, არენები, ბიფენილები და ა.შ.).

მრავალ ორგანიზმებში TNT ამონიდინიტროტოლუოლებამდე და/ან დიამინონიტროტოლუოლებამდე ალდგება. ნიტროარომატული ტოქსიკანტების მინერალიზაციის უნარის მქონე ზოგიერთი მიკროორგანიზმი TNT-ს უფრო ღრმად — ტრიამინოტოლუოლებამდე ალდგენს, რომელიც შემდგომ შედარებით ადვილად იჟანგება ოქსიდაზებით ნიტრო-ჯგუფების ალდგენის რეაქციებს ნიტრორედუქტაზები აკატალიზებენ.

ქლორირებულ ნახშირწყალბადებში ქალოგენის ატომი მჟანგველი ფერმენტებისათვის მიუწვდომელს ხდის ალიფატური ჯაჭვის ან არომატული ბირთვის ნახშირბადატომებს, ამიტომ ამ ნაერთების პირველად გარდაქმნებს ხშირად აღდგენითი დეჰალოგენირება წარმოადგენს, რის შემდეგაც ქალოგენისაგან განთავისუფლებული ნახშირბადოვანი ჩონჩხი გაცილებით ადვილად ექვემდებარება ჟანგვით გარდაქმნებს. აღდგენითი დეჰალოგენირების რეაქციები დეჰალოგენაზებით კატალიზდება.

### 5.3.1 ნიტრორედუქტაზები

ფერმენტები, რომლებიც TNT-ს ტიპის ფეთქებადი ნოთიერებების ნიტროჯგუფების აღდგენას აკატალიზებენ, ე.წ. არასპეციფიკურ NAD(P)H-დამოკიდებულ ნიტრორედუქტაზებს (EC 1.6.6) წარმოადგენენ. ეს ფერმენტები აღმოჩენილია ყველა ბიოლოგიურ ობიექტში: ცხოველებში, მცენარეებსა და მიკროორგანიზმებში. მათგან ყველაზე უკეთ შესწავლილია *Enterobacter cloacae* ნიტრორედუქტაზა. მისი აპოფერმენტი ორ მონომერს შეიცავს, რომლებიც დიმერს წარმოქმნიან. დიმერის ზედაპირთან დაკავშირებულია ფლავინმონონუკლეოტიდის ორი პროსტეტიური ჯგუფი. ამ ნუკლეოტიდის ორი კოფაქტორის საშუალებით ფერმენტი NADH-იდან და/ან NADPH-იდან აღმდგენელ ექვემდებარებულს ედებულობს. ჩვეულებრივ, თავისუფალ დაჟანგულ ფლავინის ბრტყელი კონფიგურაცია გააჩნია, მაგრამ დაჟანგულ ნიტრორედუქტაზაში ფლავინის ბირთვი 16°-იანი კუთხით მოხრილ კონფორმაციას იღებს. ასეთი დახრის არსებობა ხელს უწყობს დაჟანგული ფერმენტის აღდგენას ფლავინის ბირთვზე ორი ელექტრონის გადატანით, რის შედეგადაც დახრილობა 25°-მდე იზრდება. ფერმენტის ასეთი აღდგენისათვის აუცილებელია ორი ელექტრონი, რადგან ერთელექტრონიანი აღდგენის შემდეგ წარმოიქმნება ფლავინის სემი-ქინონური ფორმა, რომელიც აქტიური ცენტრის მოხრილი კონფორმაციის გამო არასტაბილურია, ვინაიდან სემი-ქინონური ფორმის ხანგრძლივი შენარჩუნება მხოლოდ ბრტყელი კონფიგურაციის დროს არის შესაძლებელი.

ნიტრორედუქტაზით TNT-ს აღდგენა განპირობებულია თვით ტოქსიკანტის ქიმიური სტრუქტურით TNT-ს ნიტრო-ჯგუფებში აზოტის ატომს, ჟანგბადატომების მაღალი ელექტროუარყოფითობის გამო, ნაწილობრივ დადებითი მუხტი გააჩნია. შესაბამისად, ეს მუხტი და თვით აზოტის მაღალი ელექტროუარყოფითობა ამ ნიტრო-ჯგუფებს ადვილად აღდგენის უნარს ანიჭებენ. მეორე მხრივ, TNT-ს არომატული ბირთვის დელოკალიზებული ელექტრონები ნიტრო-ჯგუფებთან მიიზიდებიან და, ბირთვი ელექტროფილური ხდება.

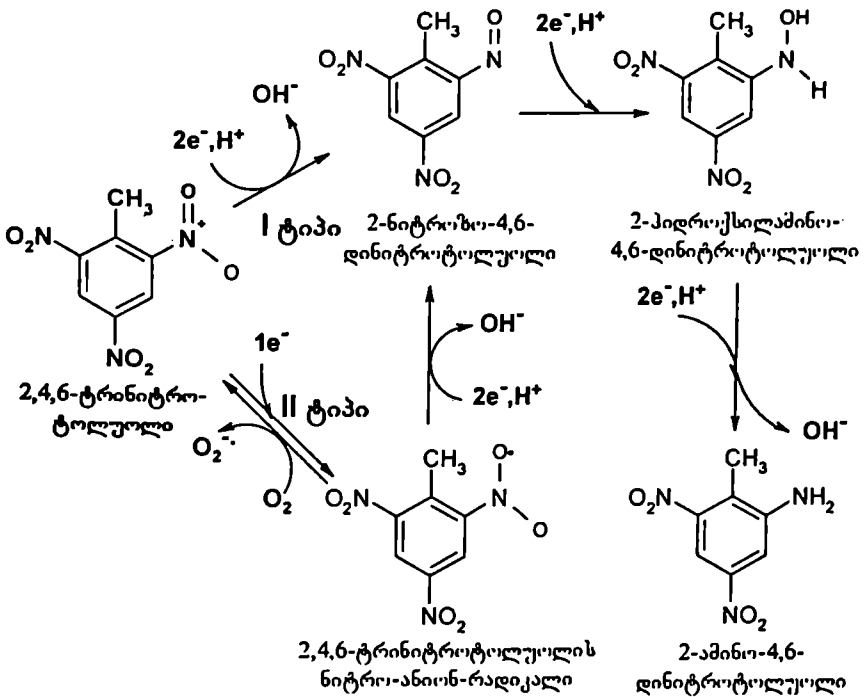
ნიტრორედუქტაზა TNT-ს ნიტრო-ჯგუფების აღდგენისათვის ელექტრონების წყაროდ აღდგენილ პირიდინნუკლეოტიდებს (NADH-სა და NADPH-ს) იყენებს. არსებობს ნიტრორედუქტაზების ორი ტიპი (ნახ.5.29): I ტიპის ნი-

ტრორედუქტაზები, რომლებიც ფუნქციონირებენ ცხოველებში, მცენარეებსა და ზოგიერთ მიკროორგანიზმებში (მაგ., ბაქტერიების წარმომადგენლებში *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Pseudomonas* და აქტინომიცეტებში), ნიტრო-ჯგუფის აღდგენას სამ ეტაპად ახორციელებენ. თითოეულ ეტაპზე ორედუქტონიანი აღდგენა ხდება და შუალედურ პროდუქტებად TNT-ს ნიტროზო- და პიდროქსილამინო-წარმოებულები მიიღება. მთლიანად ეს პროცესი თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნის გარეშე მიმდინარეობს. I ტიპის ნიტრორედუქტაზები არ არიან მგრძნობიარე ჟანგბადის მიმართ, ე.ი. შეუძლიათ იმოქმედონ როგორც აერობულ, ასევე ანაერობულ პირობებში. II ტიპის ნიტრორედუქტაზები (რომლებიც გამოვლენილია ვირთხის ღვიძლის მიკროსომებში, აგრეთვე *Escherichia coli*-სა და *Clostridium*-ის ცალკეულ კულტურებში) მხოლოდ ანაერობულ პირობებში ფუნქციონირებენ. მათ მიერ კატალიზებულ რეაქციაში განსხვავებულია პირველი ეტაპი, რომლის დროსაც TNT-ს ერთედუქტრონიანი აღდგენა ხდება და ნიტრო-ანიონ-რადიკალი წარმოიქმნება, შემდეგ კი აღდგენითი პროცესი I ტიპის ნიტრორედუქტაზის ანალოგიურად მიმდინარეობს. აერობულ პირობებში სწორედ ეს, პირველი სტადია, შექცევადი ხდება, ვინაიდან ნიტრო-ანიონ-რადიკალი მოლეკულურ ჟანგბადთან რეაგირებისას TNT-ს წარმოქმნით იშლება, ხოლო ჟანგბადიდან სუპეროქსიდული ანიონ-რადიკალი გენერირდება.

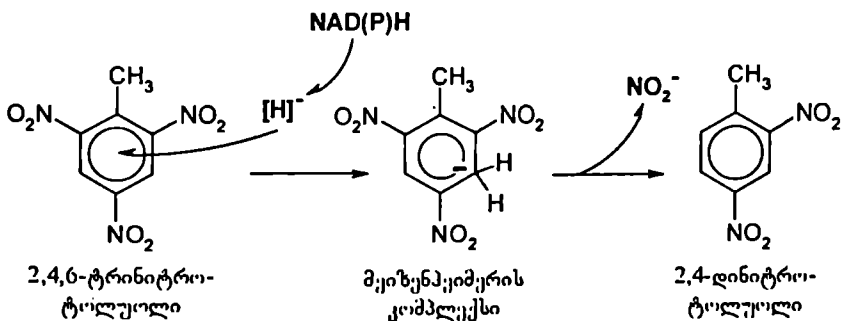
უნდა აღინიშნოს, რომ TNT-ს პირველი ნიტრო-ჯგუფის (2 ან 4-ის მდგომარეობაში) აღდგენის რეაქცია ბევრად სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე დანარჩენი ჯგუფებისა, რადგანაც ნიტრო-ჯგუფის გარდაქმნა ამინურ ჯგუფად ნიტრო-არომატულ ბირთვში ელექტრონულ დეფიციტს ამცირებს, შესაბამისად, ელექტროფილურობაც მცირდება და დანარჩენი ნიტრო-ჯგუფების აღდგენისათვის საჭიროა უფრო დაბალი ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალი.

ამინამდევ აღდგენის გარდა, ნიტრორედუქტაზები აკატალიზებენ აგრეთვე TNT-ს მოლეკულებიდან *o*-ნიტრო-ჯგუფის მოცილებას (ნახ. 5.30). როგორც ზემოთ აღინიშნა, TNT-ს არომატულ ბირთვში ელექტრონების დეფიციტი ნუკლეოფილურ შეტევას ასტიმულირებს. ამის გამო არომატულ ბირთვზე შეიძლება მოხვედეს არა ელექტრონი, არამედ აღდგენილი პირიდინ-ნუკლეოტიდებისაგან მოხლეჩილი პიდრიდ-ანიონი. ასეთ შემთხვევაში TNT-დან წარმოიქმნება მეიზენპეიმერის კომპლექსის ტიპის არაარომატული სტრუქტურა. ამ კომპლექსიდან ნიტრიტ-ანიონის მოხლეჩით 2,4-დინიტროტოლუოლის ფორმირება ხდება. უნდა აღინიშნოს აგრეთვე, რომ ნიტრო-ჯგუფის მოხლეჩა უფრო დამახასიათებელია ანაერობული პირობებისათვის, ხოლო აერობულ პირობებში ნიტრო-ჯგუფების აღდგენა ხდება.

მცენარეები, რომლებიც ფეთქებადი ნივთიერებებით დაბინძურებული ნიადაგების და გრუნტის წყლების ფიტორემედიაციისათვის გამოიყენება, აუცილებლად უნდა შეიცავდნენ მაღალაქტიურ ნიტრორედუქტაზას. წყალხსნარიდან TNT-ს შეთვისების სხვადასხვა უნარის მქონე მცენარეების ნიტრორედუქტაზული აქტივობის შედარება აჩვენებს, რომ რაც უფრო მაღალია მცენარის ნიტრო-



ნახ. 5.29. ორი ტიპის ნიტრორედუქტაზების მოქმედების მექანიზმი.



ნახ. 5.30. ნიტრორედუქტაზით TNT-ს დენიტრირების მექანიზმი.



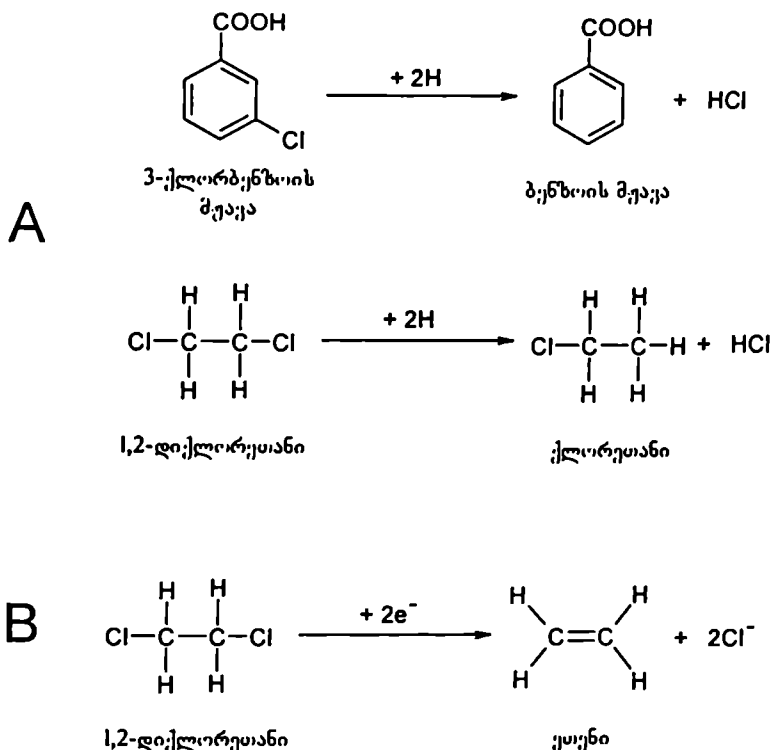
რედუქტაზული აქტივობა, მით უფრო სწრაფად ხდება TNT-ს ასიმილირება. ეს შედეგები საშუალებას იძლევა ვთვარაუდოთ, რომ ნიტრორედუქტაზის აქტივობა შეიძლება გამოვყენოთ TNT-ით დაბინძურებული გარემოს ფიტორემედიაციისათვის მცენარეების შერჩევის ბიოქიმიურ კრიტერიუმად. დადგენილია აგრეთვე, რომ TNT-ის ფერმენტული გარდაქმნების შედეგად ძირითადად მონოამინოწარმოებულების (2-ამინო-4,6-დინიტროტოლუოლის და 4-ამინო-2,6-დინიტროტოლუოლის) ფორმირება ხდება, რომლებიც უპირატესად (ზოგიერთ შემთხვევაში 60%-მდე) მცენარეული უჯრედის უხსნად ბიოპოლიმერებთან (მაგ., ჰემიცელულოზასთან და ლიგნინთან) კონიუგირებენ და უჯრედის კედელში გროვდებიან.

TNT-ით დაბინძურებული ნიადაგების ფიტორემედიაციაში, ძალიან ეფექტურია მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების კონსორციუმების მონაწილეობა — რემედიაციის პროცესის საწყის ეტაპზე მაღალაქტიური ნიტრორედუქტაზის მქონე ბაქტერიებს შეუძლიათ ნიადაგში TNT-დან მონოამინოდინიტროტოლუოლები და დიამინოტოლუოლები წარმოქმნან, რომლებიც მცენარეებით ადვილად ამოიწვლილება ნიადაგიდან. მაგ., ასეთ ფიტორემედიაციულ სისტემას ქმნიან *Pseudomonas*-ის ბაქტერიული კულტურა და ბალახოვანი მცენარე — სწორი შერივლა (*Bromus erectus*). არსებობს აგრეთვე ალტერნატიული პერსპექტივა — ბაქტერიული ნიტრორედუქტაზის გენის მქონე ტრანსგენური მცენარეების გამოყენება (იხ § 6.10.1).

## 5.32 დეჰალოგენაზები

დიოქსინების, პოლიქლორირებული ბიფენილების, ქლორირებული გამხსნელების, ქლორორგანული პესტიციდებისა და სხვა ჰალოგენ-შემცველი ორგანული ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის საწყის სტადიას ჰალოგენის ატომის მოცილება, ანუ დეჰალოგენირება წარმოადგენს. ამ გზით ჰალოგენირებული ტოქსიკანტისაგან ნაკლებად ტოქსიკური პროდუქტი მიიღება, რომელიც შემდგომში გაცილებით ადვილად დეგრადირდება, ვიდრე საწყისი ნაერთი. დეჰალოგენირების პროცესი შეიძლება წარიმართოს როგორც ჟანგვით, ასევე ადღენითი რეაქციების საშუალებით. ადღენითი დეჰალოგენირება მიმდინარეობს როგორც აერობულ, ასევე ანაერობულ პირობებში და ეს პროცესი სპეციფიკური ფერმენტების — დეჰალოგენაზების საშუალებით კატალიზდება. დეჰალოგენაზა საკვანძო ფერმენტია ე.წ. ჰალორესპირატორულ სუნთქვაში, რომელიც დამახასიათებელია ზოგიერთი გრამდადებითი ბაქტერიებისათვის, აგრეთვე მ- და E-პროტეობაქტერიებისათვის. ეს მიკროორგანიზმები ქლორალკენებს (ტრიქლორეთილენს, ტეტრაქლორეთილენს) და ქლორარომატულ ნაერთებს (ქლორფენოლებს, 3-ქლორბენზოის მეთაჯას) ელექტრონების ტერმინალურ აქცეპტორად იყენებენ და დეჰალოგენირებით გამოთავისუფლებული მეტაბოლური ენერჯის აკუმულირებას ახდენენ.

ანაერობულ პირობებში აღდგენითი დეჰალოგენირება ორი გზით შეიძლება წარიმართოს (ნახ.5.31):

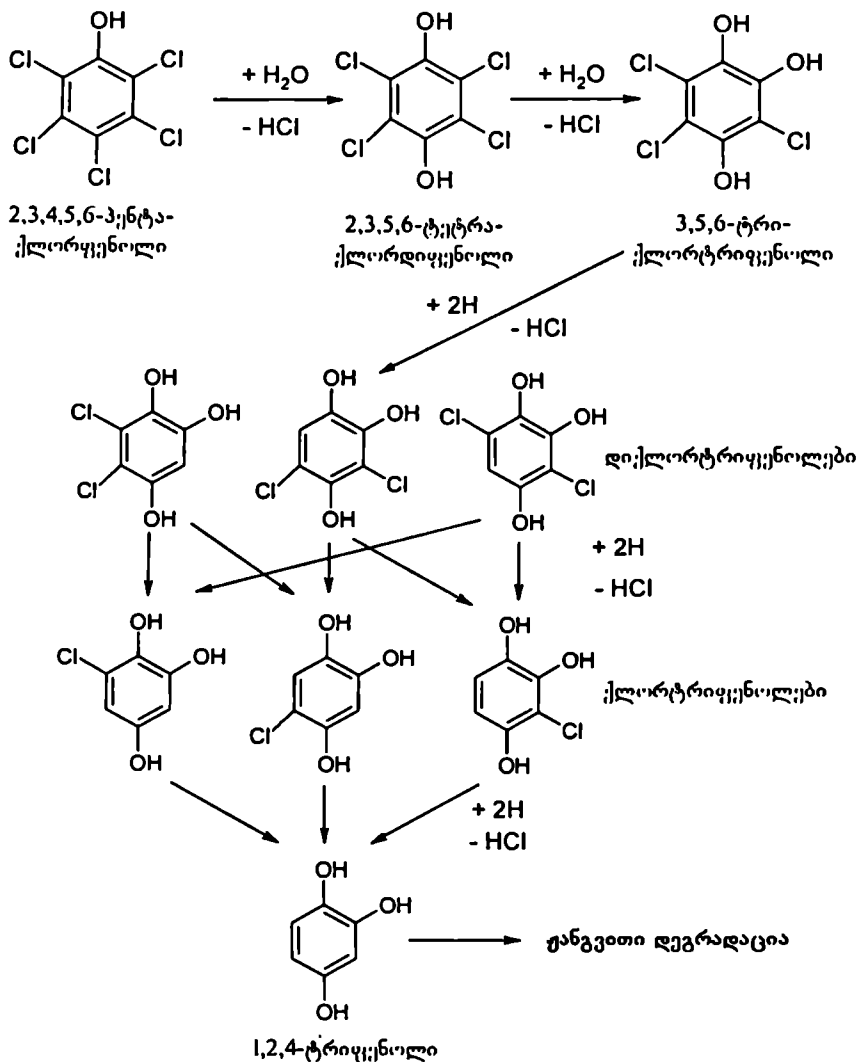


ნახ. 5.31. ანაერობულ პირობებში მიმდინარე აღდგენითი დეჰალოგენირება პიდროგენოლიზისა (A) და ვიცინალური აღდგენის (B) გზებით

1. პიდროგენოლიზით — წყალბადით ალკილ- ან არილჰალოგენიდების ჰალოგენის ატომის ჩანაცვლებით (ნახ.5.31-A);
2. ვიცინალური აღდგენით, ანუ დიჰალოელიმინირებით — ალკილჰალოგენიდებიდან ორი ჰალოგენის ატომის მოხლეჩით და ამის ხარჯზე ნახშირბადატომებს შორის დამატებითი ბმის გაჩენით (ნახ.5.31-B).

ცხადია, ორივე პროცესი აღმდგენელი ექვეფალენტების წყაროს საჭიროებს, რისთვისაც NADH ან აღდგენილი გლუტათიონი გამოიყენება.

*Flavobacterium*-ის, *Rhodococcus*-ის და სხვა აერობული ბაქტერიების შტამები აღდგენით დეჰალოგენირებას იმისთვის იყენებენ, რომ პოლიქლორირებული

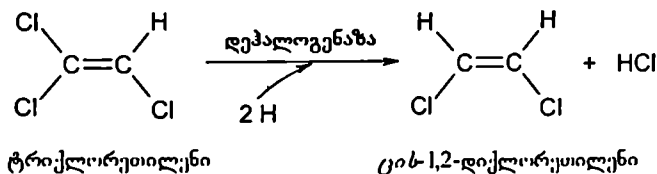


ნახ. 5.32. აერობულ პირობებში *Rhodococcus chlorophenolicus*-ის მიერ პენტაქლოროფენოლის გარდაქმნა ჰიდროლიზისა და ჰიდროგენოლიზის თანმიმდევრული რეაქციების საშუალებით.

არომატული ბირთვი მისაწვდომი გახადონ ოქსიგენაზებისათვის, რომლებსაც ამ ბირთვის გახლეჩა და ნაერთის ჟანგვით დეგრადაცია შეუძლიათ. ანაერობებისაგან განსხვავებით აერობებში ალდგენით დეპალოგენირებას წინ უსწრებს ნახშირბადისა და ქლორის ატომს შორის ბმის ჰიდროლიზური გახლეჩა (ნახ.5.32).

ცნობილია, რომ ზოგიერთ მცენარეს (სოია, სამყურა, ხორბალი და სხვ.) უნარი შესწევს განახორციელოს პოლიქლორირებული ბიფენილების დეპალოგენირება. ამ დროს პროცესის სპეციფიკურობას ქლორის ატომების რაოდენობა და არომატულ ბირთვში მათ მიერ დაკავებული პოზიცია განსაზღვრავს.

წყლის მცენარე კანადური ელოდეა (*Elodea canadensis*) ტრიქლორეთილენს ბაქტერიების მსგავსად დეპალოგენაზის საშუალებით გარდაქმნის (ნახ.5.33). აღმოჩნდა, რომ ამ მცენარეში ფერმენტს არომატული ქლორნაწარმის სუბსტრატად გამოყენება არ შეუძლია.



ნახ. 5.33. კანადურ ელოდეაში ტრიქლორეთილენის გარდაქმნა დეპალოგენაზით

ჰიბრიდული ვერხვი იგეგვ ტრიქლორეთილენის ტრანსფორმაციის დროს მეტაბოლიტებად ტრიქლორძმარმჟავას, დიქლორძმარმჟავასა და ტრიქლორეთანოლს წარმოქმნის, ე.ი. ამ მცენარეში ქლორირებული ტოქსიკანტი ჟანგვით დეგრადაციის გზით გარდაიქმნება. დადგენილია, რომ ამ შემთხვევაში პროცესი მიკროსომული ციტოქრომ P450-ით კატალიზდება.

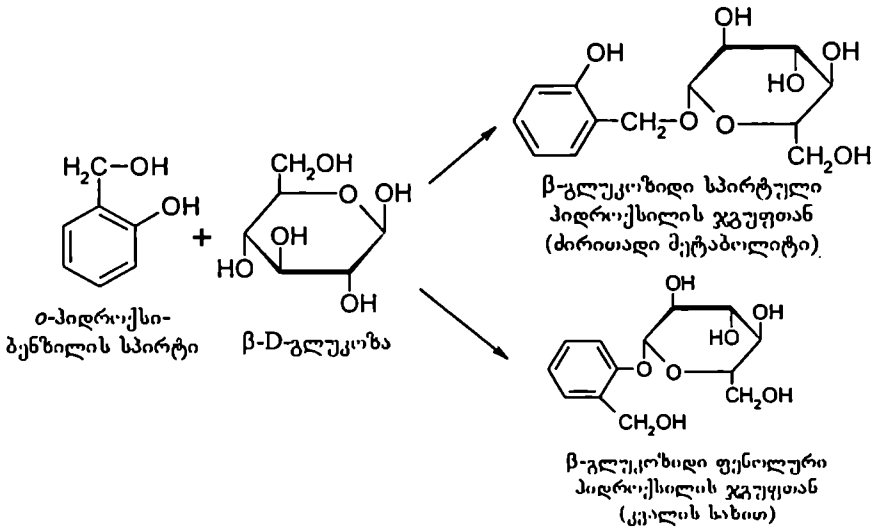
## 5.4 კონიუგატების წარმოქმნა

კონიუგაცია — უმაღლეს მცენარეებში უცხო ნაერთების დეტოქსიკაციაში ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული მექანიზმია. კონიუგირებული ფორმით ქსენობიოტიკების ტოქსიკურობა მნიშვნელოვნად შემცირებულია და, მაშასადამე, უჯრედის პომოსტაზზე მათი ნეგატიური მოქმედება დაქვეითებულია.

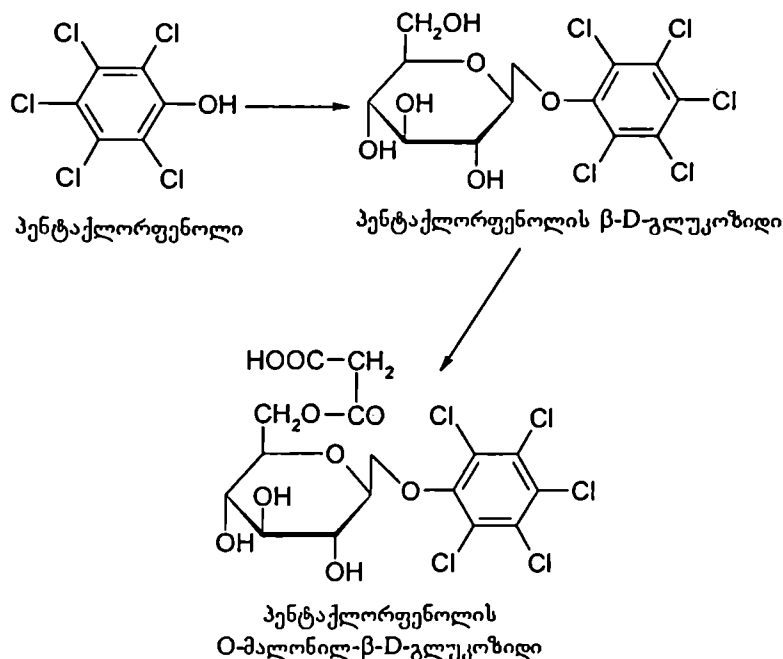
ქვემოთ განხილული იქნება კონიუგაციის ძირითადი ტიპები, რომლებიც დამახასიათებელია მცენარეული უჯრედისათვის.

### 5.4.1 სპირტებისა და ფენოლების ჰიდროქსილის აზოფების გლიკოზილირება

გლიკოზილირება, ანუ შაქრის ნაშთთან ქსენობიოტიკის დაკავშირება უმაღლეს მცენარეებში არსებული ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი დეტოქსიკაციური მექანიზმია. მცენარეებში ყველაზე ხშირად ამგვარ გარდაქმნებს სპირტები და ფენოლები განიცდიან, რაც მრავალი ექსპერიმენტული მონაცემით დასტურდება. მაგ., ეთანოლის შეცველ არეზე მამა-ლობის ნაზარდების კულტივირების დროს შეიმჩნება ეთილ-β-გლიკოზიდების ფორმირება. უცხო ნაერთების სპირტული ჰიდროქსილის აზოფების გლიკოზილირების სხვა მაგალითად შეიძლება ჩაითვალოს *o*-ჰიდროქსიბენზოლ-β-გლუკოზიდის წარმოქმნა, რომელიც ლობიოს ნაზარდებში სალიგენინის შეყვანის შემდეგ იდენტიფიცირდება. გერანოილი, რომელიც შეყვანილია ვაშლის (*Malus silvestris*) ნაყოფებში მათი შენახვის დროს, აგრეთვე განიცდის გლუკოზილირებას და გერანილ-β-D-გლუკოზიდს წარმოქმნის. საინტერესოა, რომ ძირითადად გლუკოზილირდება სპირტის ჰიდროქსილური აზოფი, და არა ფენოლური ჰიდროქსილი. მაგ., ლემნას (*Datura innoxia*) სუსპენზიური უჯრედების კულტურით სალიგენინის ტრანსფორმაციის შესწავლამ უჩვენა, რომ ძირითადი მეტაბოლიტია სპირტის ჰიდროქსილის აზოფთან კონიუგირებული გლუკოზიდი, ხოლო ფენოლის ჰიდროქსილის გლუკოზილირების პროდუქტი მხოლოდ კვალის სახით წარმოიქმნება (ნახ.5.34).



ნახ. 5.34. *o*-ჰიდროქსიბენზილის სპირტის გლიკოზილირება.



ნახ. 5.35. პენტაქლორფენოლის β-D-გლუკოზიდისა და O-მალონილ-β-D-გლუკოზიდის წარმოქმნა.

პერბიციდი N-ჰიდროქსიმეთილ დიმეტოატი ასევე განიცდის გლუკოზილირებას სპირტის თავისუფალი ჰიდროქსილადი ჰიდროქსილის ჯგუფით. ინსექტიციდი პენტაქლორფენოლი გლუკოზილირდება β-D-გლუკოზიდის წარმოქმნით, რომლის ნაწილი რეაგირებს მალონის მჟავასთან და 1-მალონილ-β-D-გლუკოზიდად გარდაიქმნება (ნახ.5.35). სწორედ ეს ორი კონიუგატი აღმოჩენილი სოიის და ხორბლის ქსოვილებში პენტაქლორფენოლის ზემოქმედების შემდეგ, ხოლო ცერცვის ნაზარდებზე ჩატარებული ცდებით დადგინდა, რომ ეგზოგენური ერთ-, ორ- და სამატომიანი ფენოლები შესაბამის β-მონოგლუკოზიდებად გარდაიქმნებიან.

ზოგიერთ შემთხვევაში ფენოლები დი- და ტრიგლუკოზიდებსაც წარმოქმნიან, მაგ., ხორბლის უჯრედებში ეგზოგენურად შეყვანილი ჰიდროქინონი დიგლუკოზიდის (გენტიობიოზიდის) და ტრიგლუკოზიდის ფორმირებით კონიუგირდება.

მცენარეულ ქსოვილებში უცხო ნაერთების გარდაქმნების დროს ძალიან ხშირად პირველადი პროდუქტების სახით ჰიდროქსი-წარმოებულები წარმოიქმნება, რომლებიც შემდეგ სწრაფ გლუკოზილირებას განიცდიან. ასეთი ტიპის გლუკოზილირების *in vivo* მაგალითს წარმოადგენს სისტემური ფუნგიციდის — ეთიმბიროლის ჟანგვის პროდუქტიდან კონიუგატის წარმოქმნა. ქერის ფოთლებში მოცემული ქსენობიოტიკის ალიფატური გვერდითი ჯაჭვი (ბუთილის ჯგუფი) იჟანგება და წარმოქმნილი სპირტული ჰიდროქსილის ჯგუფი შემდგომში გლუკოზილირებას განიცდის. პერბიციდ დიფენამიდის შემცველ არეზე გაზრდილ წიწაკის აღმონაცენებში და თამბაქოს კალუსში კონიუგაციას (გლუკოზილირებას) ასევე წინ უსწრებს N-მეთილის ჯგუფის ჟანგვა.

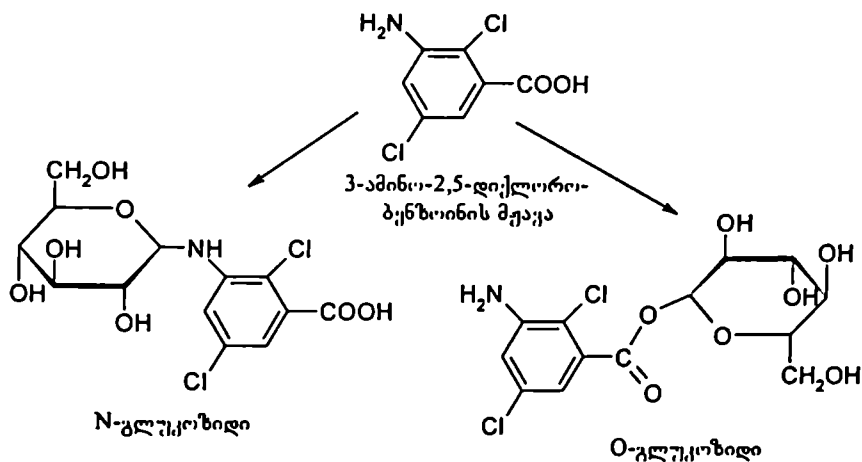
#### 5.4.2 ორგანული მჟავების კარბოქსილის ჯგუფების გლიკოზილირება

ქსენობიოტიკები, რომლებიც ორგანულ მჟავებს წარმოადგენენ, მცენარეებში ძირითადად კარბოქსილის ჯგუფების გლიკოზილირებით კონიუგირდებიან. გლუკოზასთან ესთერის ფორმირება განსაკუთრებით ფენოქსიმამრმჟავებისათვისაა დამახასიათებელი. მაგ., 2,4-D-ს შემცველ თხევად საკვებ არეზე ბრინჯის ფესვის კალუსური ქსოვილის კულტივაციის დროს მიმდინარეობს პერბიციდის მეტაბოლიზმის პროცესი, რომელშიც გლუკოზასთან 2,4-D-ს ესთერი ძირითად მეტაბოლიტს წარმოადგენს. ამავე დროს, არ შეინიშნება ამინომჟავებთან 2,4-D-ს კონიუგატების წარმოქმნა. აქედან გამომდინარე, აღნიშნულ ქსოვილებში 2,4-D-ს გარდაქმნის ძირითად გზას გლუკოზასთან ესთერის ფორმირება წარმოადგენს.

გლუკოზილირების უნარი გარკვეულწილად ქსენობიოტიკის მიმართ მცენარის მდგრადობასაც განსაზღვრავს. მაგ., ცხრა სახეობის მცენარის ფოთლებში 2,4-D-ს მეტაბოლიზმის შუალედური პროდუქტების შესწავლამ უჩვენა, რომ პერბიციდის მიმართ გამძლე მცენარეები (ველური ასლი (*Triticum dicocum*), ტიმოთულა (*Phleum pratense*) და ლობიო) დიდი რაოდენობით წარმოქმნიან 2,4-D-ს ესთერს გლუკოზასთან.

მცენარეებში კარბოქსილური ჯგუფების გარდა, სხვა მჟავური ჯგუფებიც განიცდიან გლიკოზილირებას. მაგ., ჰევეას (*Hevea brasiliensis*) ფესვებში მცენარეების ზრდის რეგულატორი ეტეფონი ფოსფორმჟავას ნაშთების საშუალებით გლუკოზილირდება და β-D-გლუკოპირანოზიდ-1-(2-ქლორეთილ)-ფოსფონატს წარმოქმნის.

უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში, გლუკოზის გარდა, სხვა შაქრებიც აგრეთვე მონაწილეობენ კარბოქსილის ჯგუფთან ესთერიფიკაციის რეაქციებში. მაგ., ოხრახუმის (*Petroselinum sativum*) სუსპენზიურ კულტურებში ნი-



**ნახ. 5.36.** 3-ამინო-2,5-დიქლორობენზოინის მჟეაჟს გლუკოზილირება უმაღლეს მცენარეებში.

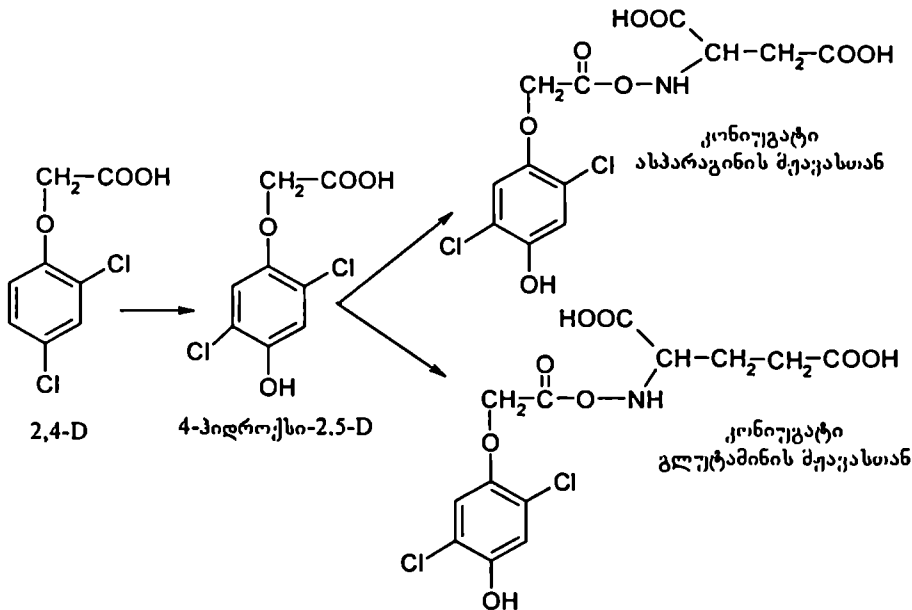
კოტინის მჟეაჟ წარმოქმნის არაბინოზიდს. ლიტერატურაში სხვა ანალოგიური მაგალითებიც არის აღწერილი.

### 5.4.3 ამინო-ჯგუფების გლიკოზილირება

გლიკოზილირების საშუალებით, ჰიდროქსილის და კარბოქსილის ჯგუფების გარდა, ეფექტურად ბლოკირდება ტოქსიკური ნაერთების ამინო-ჯგუფებიც. მაგ., ძურწას (*Setaria* sp.) ფესვებში, ყლორტებსა და ჰიპოკოტილებში 3-ამინო-2,5-დიქლორობენზოინის მჟეაჟ გლუკოზასთან ორი ტიპის კონიუგატს — ესთერსა და N-გლუკოზიდს წარმოქმნის (ნახ.5.36).

ბოლოკის (*Raphanus sativus*) უფესო ნაზარდებში ციტოკინინის სინთეზური ანალოგების კონიუგაციის პროდუქტების ანალიზით დადგინდა, რომ 4-(პურინ-6-ილ-ამინო) ერბომჟეაჟს, 6-(3,4-დიმეთოქსიბენზილ-ამინო)-პირინისა და 6-ბენზილ-ამინოპირინის ამიდები გლუკოზილირებას განიცდიან და შესაბამის 7-გლუკოპირანოზიდებად გარდაიქმნებიან. აღენინი და მეთილამინოპირინი ამ პირობებში არ გლუკოზილირდება. ლობიოს ნაზარდების ფესვებით შთანქმეული 6-ბენზილამინოპურინის გლიკოზილირებით რიბოზიდი წარმოიქმნება. ხორბლისა და სოიის მცენარეებში, აგრეთვე ხორბლის სუპენზიურ კულტურებში, 4-ქლორანილი-





ნახ. 5.37. ჰიდროქსილირებული 2,4-D-ს კონიუგაცია ამინომჟავებთან.

ნის და 3,4-დიქლორანილინის გლუკოზილირება და ერთდროულად მალონ-მჟავასთან კონიუგატის ფორმირება ხდება. პოშიდორში ჰერბიციდი მეტრიბუზინი ასევე კონიუგირდება მალონმჟავასთან გლიკოზილირების შემდეგ. სხვა მონაცემების მიხედვით, მეტრიბუზინის მეტაბოლიზმის პროცესში პოშიდორის სხვადასხვა ბიოტიპებში, რომლებიც ჰერბიციდის მიმართ მაღალი, საშუალო და დაბალი მგრძობიარობით ხასიათდებიან, ყველა შემთხვევაში ძირითად მეტაბოლიტს N-გლუკოზიდი წარმოადგენს. წიწმაცის ფესვების უჯრედული კულტურების სუს-პენზიაში ჰერბიციდი 3,4-დიქლორანილინი N-მალონილ- და N-გლუკოზილ-კონიუგატების წარმოქმნით მეტაბოლიზდება.

### 5.4.4 კარბოქსილის ჯგუფების კონიუგაცია ამინომჟავებთან

ვგზოგენური ნაერთების კარბოქსი-ჯგუფები, გლუკოზის გარდა, ამინომჟავებთანაც კონიუგირდება. სოიის გენოტიპებში 2,4-D-ს მეტაბოლიზმის შესწავლამ უჩვენა, რომ ჰერბიციდის მიმართ რუზისტენტულ სახეობებში ძირითად

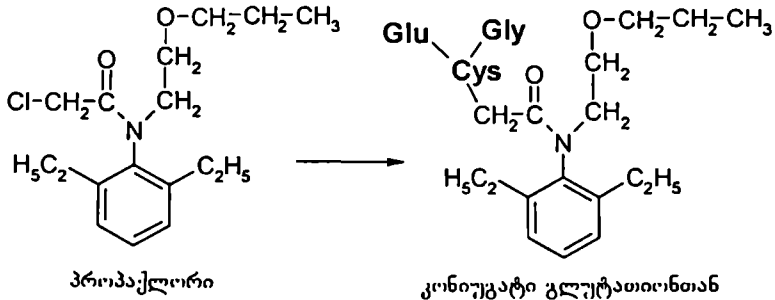
მეტაბოლიტს გლუკოზასთან 4-ოქსი-2,4-D-ს კონიუგატი წარმოადგენს, ხოლო მცენარის მგრძობიარე სახეობებში ადვილი აქვს ამინომჟავებთან კონიუგატების წარმოქმნას. სოიის ფესვების დიფერენცირებული ქსოვილების კალუსში, სიმინდის ენდოსპერმის ქსოვილურ კულტურაში, აგრეთვე თამბაქოს, სტაფილოსა და შხესუშხირის პარენქიმაში 2,4-D-ს კიდროქსილირების პროდუქტი გლუტამინის და ასპარაგინის მჟავებთან კონიუგირდება (ნახ.5.37).

## 5.4.5 ქსენობიოტიკების კონიუგაცია კმატიდებთან

უმაღლესი მცენარეების დეტოქსიკაციური უნარის ერთ-ერთი ყველაზე თვალსაჩინო გამოვლინებაა ქსენობიოტიკების და/ან მათი პირველადი ტრანსფორმაციის პროდუქტების კონიუგაცია ალდეგილ გლუტათიონთან (ტრიპეპტიდი, რომელიც შეიცავს  $\gamma$ -გლუტამინის მჟავას, ცისტეინის და გლიცინის ნაშთებს). დეტოქსიკაციის ეს გზა ყველაზე მეტად დამახასიათებელია სიმეტრიული ტრიაზინებისათვის, ქლორაცეტამიდებისათვის და სხვა ქალოგენშემცველი ქსენობიოტიკებისათვის. ბალახოვანი მცენარეების (გვარები: *Festucaee*, *Avenae*, *Triticeae*, *Paniceae*, *Andropogonae*, *Eragrostee*, *Chlorideae*) 53 წარმომადგენელში ატრაზინის გარდაქმნის შეწავლამ აჩვენა, რომ ყველა შემთხვევაში პერბიციდი გლუტათიონთან კონიუგატებს წარმოქმნის. პერბიციდის მიმართ გამძლე და მგრძობიარე ბალახოვანი მცენარეებში ატრაზინის ტრანსფორმაციის პროდუქტების ანალიზით ნაჩვენებია, რომ უროს (*Andropogon gerardii* vitman) და ფეტვის (*Panicum virgatum*) რეზისტენტულ მცენარეებში, ატრაზინის გლუტათიონთან კონიუგატი მთავარი მეტაბოლიტია. ატრაზინის მიმართ მგრძობიარე ინდური ბალახის (*Sorghastrum nutans*) და სამოურის ბალახის (*Bouteloua curti pendula* Michx Torr.) მცენარეებში უმთავრესად პერბიციდის N-დეეთილირებული პროდუქტი ფორმირდება. ზორბლის და კარტოფილის სუსპენზიურ კულტურებში ატრაზინის მეტაბოლიზმის შესწავლამ უჩვენა, რომ ზორბლის უჯრედებში პერბიციდი N-დეეთილირებას განიცდის, ხოლო კარტოფილის უჯრედებში გლუტათიონთან წინასწარი ტრანსფორმაციის გარეშე კონიუგირდება. კარტოფილის უჯრედებში აღმოჩენილია ფერმენტი გლუტათიონ S-ტრანსფერაზა, რომელიც ატრაზინის სუბსტრატის სახით იყენებს.

გლუტათიონთან კონიუგაცია დამახასიათებელია აგრეთვე ქლორაცეტამიდური პერბიციდისათვის. მაგ., სიმინდის, აბილილის (*Ipomoea purpurea*), ხვართქლას (*Convolvulus arvensis*), ცეცხლეკალას (*Xanthium pensylvanicum*) და შვიას (*Abutilon theophrasti*) ნაზარდებში აცეტოქლორი გლუტათიონთან კონიუგირდება. სიმინდის აღმონაცენებში ალაქლორი და მეტოლაქლორი აგრეთვე წარმოქმნიან გლუტათიონთან კონიუგატებს. სიმინდის აღმონაცენებიდან იზოლირებული გლუტათიონ S-ტრანსფერაზა, რომელიც ქსენობიოტიკის გლუტათიონთან კონიუგაციის პროცესს აკატალიზებს, სამკერ უფრო მაღალ აქ-

ტივობას ამჟღავნებს, როდესაც სუბსტრატის სახით ალაქლორი გამოიყენება. ბრინჯის აღმონაცენებში აგრეთვე შეიმჩნევა პრეტილაქლორის აქტიური ტრანსფორმაცია გლუტათიონურ კონიუგატად. ბენზილქლორიდის და პროპაქლორის ტიპის ქსენობიოტიკები გლუტათიონ კონიუგატს როგორც ფერმენტული, ასევე არაფერმენტული გზებით წარმოქმნიან (ნახ.5.38).



პროპაქლორი

კონიუგატი გლუტათიონთან

ნახ. 5.38. პროპაქლორის კონიუგაცია გლუტათიონთან.

მცენარეული წარმოშობის მეორე ტრიპეპტიდი — ჰომოგლუტათიონი (გლუტათიონისაგან იმით განსხვავდება, რომ გლიცინის მაგურად β-ალანინის შეიცავს) ასევე მონაწილეობს ქსენობიოტიკებთან კონიუგაციის რეაქციებში. ჰომოგლუტათიონის კონიუგატების ფორმირება აცეტოქლორთან ძირითადად სოიისათვის, მამა-ლობოსა და იონჯასათვის არის დამახასიათებელი. აგრეთვე ნაჩვენებია, რომ სოიის აღმონაცენებში ჰერბიციდი პროპაქლორი კონიუგატს ჰომოგლუტათიონთან წარმოქმნის. სოიის მცენარეებში ქლორიმურონ-ეთილის ტრანსფორმაციის მთავარი პროდუქტი ასევე ჰომოგლუტათიონური კონიუგატი წარმოადგენს.

ნაჩვენებია, რომ გლუტათიონი და ჰომოგლუტათიონი *in vivo* პირობებში წარმოქმნილი ქსენობიოტიკის ჰიდროქსილის ჯგუფთან კონიუგირდებიან. მაგ., სოიის აღმონაცენებში დიფენილეურის წარმოებული აციფლუროფენი ჰიდროლიზურად იშლება 2-ნიტრო-5-ოქსიბენზოინის მჟავად, რომელიც ჰომოგლუტათიონს ჰიდროქსილის ჯგუფის საშუალებით უერთდება.

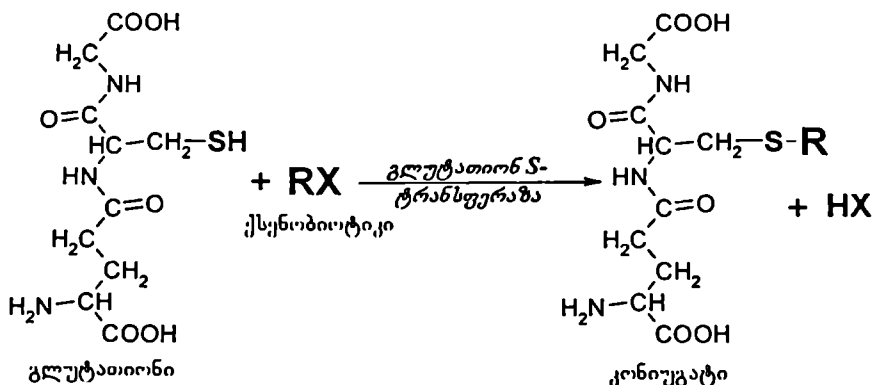
გლუტათიონთან და ჰომოგლუტათიონთან ქსენობიოტიკის შეერთების კიდევ ერთი დამახასიათებელი მექანიზმია ალკილ-თიოჯგუფებთან რეაქცია. სიმინდის აღმონაცენებში S-ეთილთიოდიპროპილთიოკარბამატი გლუტათიონთან ეთილის ჯგუფის საშუალებით კონიუგირდება. საგარაუდოა, რომ ამ კერძო შემთხვევაში ჰერბიციდი იფანგება შესაბამის სულფოოქსიდად, რომელიც გლუტათიონთან კონიუგირდება. სოიის მცენარეებში მეტრიბუზინი ჰომოგლუტათიონს მეთილ-თიოჯგუფის საშუალებით უკავშირდება. გარდა ამისა, ნაჩვენებია, რომ

ობრაზუშის და სოიის სუსპენზიური უჯრედული კულტურებიდან, აგრეთვე ბარდის აღმონაცენების პირველადი ფოთლებიდან გამოყოფილი მიკროსომები ჟანგვენ 3,4-ბენზპირენს, ხოლო ჟანგვის პროდუქტები ადვილად კონიუგირებენ გლუტათიონთან.

დაუზიანებელ მცენარეებში ფენოლის გლიკოზილირება არ ხდება, რასაც მრავალრიცხოვანი მონაცემები მოწმობენ. მაგ., სიმინდის, ბარდისა და გოგრის სტერილურ აღმონაცენებში [1.6-<sup>14</sup>C] ფენოლის მეტაბოლიზმის შესწავლა აჩვენებს, რომ მცენარეებში ფენოლები კონიუგატებს დაბალმოლეკულურ პეტიდებთან წარმოქმნიან. სხვა ერთატომიანი ფენოლები, მაგ., α-ნაფტოლი (გოგრაში, სიმინდსა და ბარდაში), o-ნიტროფენოლი (ბარდაში); 2,4-დინიტროფენოლი (სიმინდში, გოგრასა და ბარდაში) ასევე პეტიდებთან კონიუგირებენ. ფენოლები თავისი ჰიდროქსილის ჯგუფების საშუალებით პეტიდებს კოვალენტურად უკავშირდებიან. პეტიდების ამინომჟაური შემადგენლობა, რომლებიც ფენოლებთან კონიუგაციაში მონაწილეობენ, სხვადასხვაა. ფენოლის ხსნარით დამუშავებულ მცენარეებში დაბალმოლეკულური პეტიდების შემცველობა იზრდება. ზოგიერთ მცენარეებში პეტიდებთან კონიუგაცია ეგზოგენური ერთატომიანი ფენოლების გაუენებელყოფის მთავარ გზას წარმოადგენს. მცენარეების ქსოვილებში შეყვანილი ფენოქსიმარმეაჟები აგრეთვე წარმოქმნიან პეტიდებთან კონიუგატებს. ვაშში, სიმინდისა და ლობიოს სტერილურ აღმონაცენებში, 2,4-D კონიუგატებს დაბალმოლეკულურ პეტიდებთან წარმოქმნის. ამ მცენარეებში პეტიდები, რომლებიც მონაწილეობენ აღნიშნული ჰერბიციდების კონიუგაციაში, ჩვეულებრივ 6–10 ამინომჟაური ნაშთისაგან შედგებიან. მარცვლოვნებში ფენოქსიმარმეაჟასთან კონიუგაციაში მონაწილე პეტიდები და ცილები 2-დან 220-მდე ამინომჟაურ ნაშთს შეიცავენ.

## 5.4.6 ტრანსფერაზები

დეტოქსიკაციურ პროცესებში კონიუგაციის რეაქციებს აკატალიზებენ ფერმენტები, რომლებიც კლასიფიცირდებიან, როგორც ტრანსფერაზები (EC 2). ეს რეაქციები ქსენობიოტიკების ფუნქციონალიზაციის შემდგომი პროცესებია. ტრანსფორმაციის ამ, მეორე ფაზის დროს, მცენარეული უჯრედის ენდოგენურ ნაერთებთან უცხო ნივთიერებების დაკავშირება ხდება. ამ პროცესში ცალკეული ფერმენტის მონაწილეობა განისაზღვრება ქსენობიოტიკების ქიმიური ბუნებით და შესაბამისი ენდოგენური ნაერთების არსებობით. დღეისათვის არსებული მონაცემების თანახმად, კონიუგაციის პროცესებს შემდეგი ფერმენტები აკატალიზებენ: გლუტათიონ S-ტრანსფერაზა (EC 2.8.1.5), O-გლუკოზილ-ტრანსფერაზა (EC 2.4.1.7), N-გლუკოზილ-ტრანსფერაზა (EC 2.4.1.71), N-მალონილ-ტრანსფერაზა (EC 2.3.1.114), პუტრესცინ N-მეთილ-ტრანსფერაზა (EC

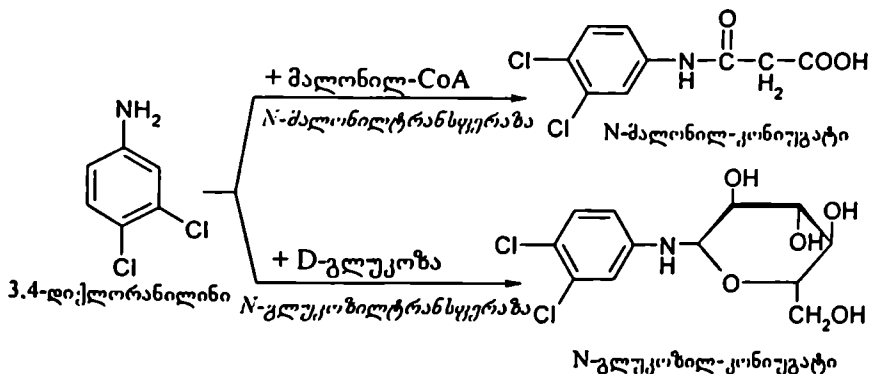


ნახ. 5.39. ქსენობიოტიკების კონიუგაცია გლუტათიონთან

2.1.1.53) და ზოგიერთი სხვა. ბუნებრივ პირობებში ეს ფერმენტები უჯრედს ნივთიერებათა ნორმალური ცვლისათვის ესაჭიროება, მაგრამ ტოქსიკური ნაერთების არსებობისას ისინი დეტოქსიკაციურ პროცესებში ერთვებიან. ყველა ენდოგენურ ნივთიერებას, რომლებიც კონიუგაციისათვის გამოიყენება, ჰიდროფილური ბუნება აქვს, ამდენად, კონიუგაციის შედეგად ორგანული ტოქსიკანტების ლიპოფილურობა მნიშვნელოვნად მცირდება. ასეთ კონიუგატებს ციტოპლაზმაში გადაადგილების მაღალი უნარი გააჩნიათ, ამიტომ ისინი კომპარტმენტალიზაციის ფაზის დროს ადვილად ტრანსპორტირდებიან ვაკუოლებსა და უჯრედის კედლებში.

ფართო სპეციფიკურობის მქონე ფერმენტების ჯგუფი — გლუტათიონ S-ტრანსფერაზები (გლუტათიონ S-ალკილტრანსფერაზა, გლუტათიონ S-არილტრანსფერაზა, გლუტათიონ S-არილალკილ-ტრანსფერაზა, S-(ჰიდროქსილალკილ)გლუტათიონ-ლიაზა და სხვ.) ელექტროფილური ტოქსიკური ნივთიერებების აღდგენილ გლუტათიონთან შეერთების რეაქციებს აკატალიზებენ. გლუტათიონ S-ტრანსფერაზები კოდირებულია გენების მრავალფეროვანი ოჯახით და 6 კლასად იყოფა. მცენარეებში გვხვდება გლუტათიონ S-ტრანსფერაზის π, τ, θ, ζ და λ კლასები. ეს ფერმენტი ქსენობიოტიკის (ან მისი ტრანსფორმაციის შუალედური პროდუქტის) ფუნქციურ ჯგუფსა და გლუტათიონის ცისტეინის ნაშთის SH-ჯგუფებს შორის რეაქციას ახორციელებს, რის შედეგადაც გოგირდის ატომს ქსენობიოტიკი კოვალენტური ბმით უკავშირდება (ნახ.5.39).

გლუტათიონ S-ტრანსფერაზა — უჯრედული სისტემის უნივერსალური ინსტრუმენტია ქსენობიოტიკების უტილიზაციისათვის არამარტო მცენარეებში, არამედ სხვა ორგანიზმებშიც. ნაჩვენებია, რომ ფერმენტი მონაწილეობს ჰერბი-



ნახ. 5.40. მცენარეებში 3,4-დიქლორანილინის კონიუგაციის შესაძლებელი გზები.

ციდების ფართო სპექტრის კონიუგაციაში: FOE 5043 (ფლუფენაცეტი), ტრისულ-ფურონი, ქლორიმურონ-ეთილი, აცეტოქლორი, მეტოლქლორი, ალაქლორი, ატრაზინი, საფენერები, ფლუოროდიფენი და მრავალი სხვ. უნდა აღინიშნოს, რომ ფერმენტს შეუძლია გლუტათიონთან დააკავშიროს როგორც ორგანული ტოქსიკანტები, ისე მძიმე მეტალები: Pb, Zn, Cd, Mi, Cu და სხვ.

კონიუგაციაში მონაწილე ტრანსფერაზების მეორე ჯგუფი — გლუკოზილ-ტრანსფერაზები — გლუკოზასა და ქსენობიოტიკების ფუნქციურ ჯგუფებს შორის რეაქციებს აკატალიზებენ. ასეთ ფუნქციურ ჯგუფს ხშირად ჰიდროქსილი ან ამინო-ჯგუფი წარმოადგენს. გლუკოზასთან მათი კონიუგაცია შესაბამისად O-გლუკოზილტრანსფერაზისა და N-გლუკოზილტრანსფერაზის საშუალებით ხორციელდება. ორივე ფერმენტი ჰერბიციდების (მაგ., 2,4-D-ს, საფენერების) და მთელი რიგი ორგანული ტოქსიკანტების (მაგ., 3,4-დიქლორანილინის, 4-ნიტრო-ფენოლის, 2,4,5-ტრიქლოროფენოლის) მოქმედებით ინდუცირდება.

შესაძლებელია, რომ სხვადასხვა მცენარეებში ერთი და იგივე ქსენობიოტიკის კონიუგაცია განსხვავებული ტრანსფერაზებით წარიმართოს. მაგ., სოიის და წიწმაცის ფესვის ქსოვილის კულტურებში 3,4-დიქლორანილინის მეტაბოლიზმის შესწავლამ უჩვენა, რომ სოიის უჯრედებში ქსენობიოტიკი კონიუგირდება მალონილთან N-მალონილტრანსფერაზის საშუალებით, ხოლო წიწმაცის უჯრედებში გლუკოზასთან შეერთების რეაქციას N-გლუკოზილტრანსფერაზა აკატალიზებს (ნახ.5.40).

მცენარეებში ინსექტიციდ DDT-ს მეტაბოლიზმის რაოდენობრივი შესწავლით საინტერესო შედეგებია მიღებული. როგორც ცნობილია, ეს ტოქსიკური ნაერთი წინასწარ იჟანგება 2,2-ბის(4-ქლოროფენილ)მმარმეჟამდე, ხოლო შემდეგ გლუკოზასთან კონიუგირდება და O-გლუკოზიდს წარმოქმნის (იხ. ნახ.5.3).

ამ უკანასკნელ რეაქციას O-გლუკოზილტრანსფერაზა აკატალიზებს. გამოთვლილია, სოიის უჯრედების 1 გრამი (ნედლი მასა), შეიცავს იმდენ O-გლუკოზილტრანსფერაზას, რამდენსაც 1 საათის განმავლობაში 855 მკგ DDT-ს მეტაბოლიზმის შუალედური პროდუქტების კონსუპცია შეუძლია. უდავოა, რომ ასეთი სახის ექსპერიმენტები მცენარეული ფერმენტების ეკოლოგიური პოტენციალის რაოდენობრივი შეფასების საშუალებას იძლევა.

## 5.5 ტოქსიკური ნაერთების მქსპრცია

ტერმინი “ექსკრეცია” მცენარის მიერ ფოთლებით და ფესვთა სისტემით შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთების უცვლელი სახით ნაწილობრივ გამოყოფას გულისხმობს. ფესვებით შთანთქმული ტოქსიკანტი ფოთლებიდან გამოიყოფა და პირიქით, მცენარეში ფოთლების ზედაპირიდან შეღწეული ქსენობიოტიკების ექსკრეციას ფესვები ახდენენ. რასაკვირველია, ორივე პროცესი ერთმანეთისაგან პრინციპულად განსხვავდება, რამდენადაც მცენარეებში ფესვებიდან და ფოთლებიდან შეღწეული ტოქსიკური ნაერთების ტრანსლოკაცია სხვადასხვაგზით ხდება: ფოთლების ბაგეებით გამოიყოფა იმ ტოქსიკანტების მოლეკულები, რომლებიც ფესვებში შეღწევის შემდეგ აპოპლასტში ტრანსპირაციული ნაკადით გადაადგილდებიან და მაღალი ქსილემური ძვრადობა გააჩნიათ (მაგ., ფენოლი). ფოთლებით შეღწეული ფლოემო-მობილური ან ამბი-მობილური ქსენობიოტიკები ასიმილატების ნაკადით გადაადგილდებიან, აღწევენ ფესვებამდე და ნიადაგში ან საკვებ ხსნარში გამოიყოფიან. ფესვებიდან ქსენობიოტიკების ექსკრეციის ერთ-ერთი შესაძლო მექანიზმია მათი ლორწოსთან ერთად გამოყოფა.

ექსკრეციის ამ ორი მექანიზმის არსებობა მრავალი ექსპერიმენტული მონაცემით დასტურდება. ფოთლებიდან შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთები, რომელთაც ფლოემაში გადაადგილების სწრაფი უნარი აქვთ, ხშირად ფესვებით გამოიყოფიან. ამავე დროს, ასეთი ექსკრეცია ყოველთვის არაა განპირობებული კონცენტრაციული გრადიენტით — პროცესი გრადიენტის საწინააღმდეგოდაც შეიძლება იყოს მიმართული. მაგ., სოიის და ზორბლის ფოთლებზე დატანილი [ $^{14}\text{C}$ ] ალაქლორი მცენარეების ფესვებით გამოიყოფა ისეთ საკვებ ხსნარში, რომელიც ალაქლორის უფრო მაღალ კონცენტრაციას შეიცავს, ვიდრე ფესვებში შეიძლება შეიქმნას. ამ მონაცემებიდან გამომდინარეობს, რომ ფლოემომობილური ტოქსიკური ნაერთები, რომელიც მცენარეებში ასიმილატების ნაკადით გადაადგილდებიან, ფესვებიდან აქტიური ტრანსპორტის მექანიზმით გამოიყოფიან. ფესვებიდან ქსენობიოტიკების ექსკრეცია, რომელიც უმაღლესი მცენარეებისათვის დამახასიათებელია ფუნქციურ პროცესს წარმოადგენს.

ფესვებიდან გარდაუქმნელი სახით გამოიყოფა არამარტო ფლოემო-მობილური, არამედ ფოთლების ზედაპირით შთანთქმული ამბი-მობილური ტოქსიკანტიც. ფესვისმიერი ექსკრეცია განსაკუთრებით დამახასიათებელია ფენო-

ქსიმარმუეებისათვის (2,4-D, 2,4,5-T და სხვ.), დიკამბასათვის, პიკლორამისა და სხვა სისტემური პერბიციდებისათვის. ფესვთა სისტემა უფრო ინტენსიურად გამოყოფს შთანთქმულ ტოქსიკანტებს, ვიდრე ფოთლები. მაგ., *Ampelampus albidus*-ის ფესვები 8 დღეში ფოთლებთან შთანთქმული 2,4-D-ს საერთო რაოდენობის 37%-ს გამოყოფენ.

რაც უფრო ახლოსაა განლაგებული ტოქსიკანტის შთანთქმელი ფოთლები ფესვებთან, მით უფრო მაღალია ფესვური ექსკრეციის ხარისხი. ფესვით ტოქსიკანტის გამოყოფის ინტენსიობა ფოთლებზე დატანილი პერბიციდის კონცენტრაციის პირდაპირპროპორციულად იზრდება. ტოქსიკური ნაერთის ექსკრეციასა და მის მიმართ მცენარის რუხისტენტობას შორის მკვეთრად გამოხატული დამოკიდებულება არ ელინდება — ექსკრეცია ხდება როგორც პერბიციდების მოქმედების მიმართ მგრძობიარე, ისე რუხისტენტული მცენარეების ფესვების მიერ.

ფესვთა სისტემის საშუალებით გამოიყოფა არა მარტო ფოთლებით შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთები. მაგ., ბამბის ნახარდებს ფესვებიდან მიქროდებოდან პერბიციდი ბიოკონი. ტოქსიკანტის შთანთქმის შემდეგ ნახარდები გადაიტანეს საკვებ ხსნარზე, რომელიც პერბიციდს არ შეიცავდა. ანალიზმა უჩვენა, რომ 2 დღის განმავლობაში ისევ ფესვებიდან უცვლელი სახით გამოიყოფა შთანთქმული პერბიციდის დაახლოებით 25—30%. სხვა მაგალითის მიხედვით, შაქრის ნეკერჩხლის (*Acer saccharinum*) და დასავლური ჭადრის (*Platanus occidentalis*) ერთწლიანი ნერგების მერქანში ინექციის გზით იქნა შეყვანილი მალეინის მუჟას პიდრაზიდი. ცლიდან 30 დღეში შეყვანილი პესტიციდის მთლიანი რაოდენობის 15% არატრანსფორმირებული სახით ფესვებიდან გამოიყო.

ზემომოყვანილი მაგალითებიდან ჩანს, რომ ფესვთა სისტემით გარდაუქმნელი სახით შთანთქმული ტოქსიკური ნაერთების მნიშვნელოვანი რაოდენობა გამოიყოფა. მაგრამ, უმეტეს შემთხვევაში ექსკრეტირებული ტოქსიკანტის რაოდენობა არცთუ ისე დიდია და 0.1-სა და 2%-ს შორის მერყეობს. მიუხედავად ამისა, ფესვიდან ექსკრეციის მოუღენის გათვალისწინება საჭიროა მცენარეების ზედა ნაწილების პესტიციდებით დამუშავების დროს, ვინაიდან ეს პროცედურა შეიძლება საბოლოოდ ნიადაგისა და გრუნტის წყლების სერიოზული ქიმიური დაბინძურების წყარო აღმოჩნდეს.

ფესვებიდან შთანთქმული ტოქსიკანტები ფოთლებიდან გამოიყოფა, თუმცა ეს საკმაოდ იშვიათად ხდება, ვიდრე ფესვური ექსკრეცია. ასეთი სახის ექსკრეციის ყველაზე თვალსაჩინო მაგალითია ფენოლის გამოყოფა ლელქაშის (*Scirpus lacustris*) ფოთლებით, რომლის ფესვები აღნიშნული ტოქსიკანტის ხსნარშია მოთავსებული. ამ დროს ექსკრეცია ისე ინტენსიურად მიმდინარეობს, რომ უკვე 90 წუთის შემდეგ ფოთლებთან ახლოს ჰაერი იძლევა დადებით თვისობრივ რეაქციას მასში ფენოლის არსებობაზე, ხოლო რამდენიმე საათის შემდეგ ფოთლებიდან ფენოლის გამოყოფა ყნოსვითაც შეიგრძნობა. სხვა მაგალითით ნაჩვენებია, რომ თამბაქოს და ბოლოკის ფოთლები, რომლებიც ყურწყებით ჩაშვებულია 1,2-დებრომეთანის ხსნარში, შთანთქავენ ტოქსიკანტს და შემდეგ მას



სწრაფად გამოყოფენ ატმოსფეროში. ამ და სხვა ანალოგიური მონაცემებიდან გამომდინარე, გამოთქმულია მოსაზრება, რომ მცენარეებს შეუძლიათ ამოიღონ ნიადაგიდან და გრუნტის წყლებიდან ნახშირწყალბადების ქალოგენწარმოებულები და ისინი თანდათან ჰაერში გააერცელონ. ასეთი მოსაზრება დადასტურებულია ლაბორატორიული და საველე ცდებით ვერხვის ჰიბრიდებზე, რომლებსაც ამოჰქონდათ ტრიქლორეთილენი 260 მგ/ლ კონცენტრაციით ხელოვნურად დაბინძურებული წყლიდან და ნიადაგიდან. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მცენარეებით შთანთქმული ტრიქლორეთილენის მთელი რაოდენობის 10%-ზე ნაკლები უცვლელი სახით ორთქლდება ვერხვის ფოთლებიდან, ხოლო უმეტესი ნაწილი მეტაბოლიზდება. ეს მაგალითი ნათლად მიუთითებს, რომ ყველაზე ინტენსიურად ექსკრეცია ხდება ტოქსიკანტის ძალიან მაღალი კონცენტრაციების დროს. ამ შემთხვევაში ტოქსიკური ნაერთი, თუ ის სწრაფად გადაადგილება ქსილემაში, ვერ ასწრებს მთლიანად ტრანსფორმირებას და ბაგეებიდან წყალთან ერთად ორთქლდება.

ამრიგად, ექსკრეცია მცენარისათვის დამახასიათებელი ფიზიოლოგიური პროცესია, რომელსაც მცენარე საჭიროების შემთხვევაში ტოქსიკური ნაერთის მოსაცილებლად იყენებს. უნდა აღინიშნოს, რომ უმაღლესი მცენარეების მიერ ფესვთა სისტემით ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმის და ფოთლებიდან მათი გარდაუქმნელი სახით გამოყოფის უნარი შეიძლება გამოყენებული იქნას, როგორც ფიტორემედიაციის მეთოდი დაბინძურებული ნიადაგების და წყლების გასასუფთავებლად. ეკოლოგიური თვალსაზრისით ექსკრეციის, როგორც ტექნოლოგიის მთავარი ნაკლია ქსენობიოტიკების ქიმიური სტრუქტურის და, შესაბამისად, ტოქსიკური თვისებების სრულად შენარჩუნება.

## 6. ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები

“ფიტორემედიაცია” (ფიტო — მცენარე + რემედიაცია — ზარალის ანაზღაურება, შეცდომის გამოსწორება) შედარებით ახალი, ამერიკელი მეცნიერის — ილია რასკინის მიერ 1994 წელს შემოღებული ტერმინია. თვით რასკინის სიტყვებით, ფიტორემედიაცია სათავეს იღებს იმ დროიდან, როდესაც ადამიანმა მცენარეების გამოყენებით ჭაობების ამოშრობა დაიწყო. გარემოს რემედიაციისათვის მცენარეების გამოყენების იდეა დიდი ხანია არსებობდა, თუმცა მხოლოდ უკანასკნელ პერიოდში კომბინირებულმა ინტერდისციპლინურმა კვლევებმა შექმნა საშუალება, რომ აღნიშნული იდეა გარემოს დაცვით ტექნოლოგიად ჩამოყალიბებულიყო. სადღეისოდ ფიტორემედიაცია წარმოადგენს ეკოლოგიურ ბიოტექნოლოგიას, რომელიც მცენარეებისა და ნიადაგის (რიზოსფეროს) მიკროორგანიზმების საშუალებით ნიადაგიდან, გრუნტის წყლებიდან და წყალსატევებიდან ტოქსიკური ნაერთების მოცილების საშუალებას იძლევა.

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები სადღეისოდ სულ უფრო ფართოდ გამოიყენება. თანამედროვე ფიტორემედიაცია მოიცავს რამდენიმე მეთოდს, რომელთა კლასიფიკაცია მოქმედების მექანიზმის მიხედვით ხდება. ძირითადი ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიებია:

**ფიტოექსტრაქცია** — ნიადაგიდან მძიმე მეტალების მოცილება მცენარეების საშუალებით;

**რიზოფიტრაცია** — გრუნტის წყლებიდან და წყალსატევებიდან მცენარეების საშუალებით მძიმე მეტალების ამოწვლილვა;

**ფიტოდეგრადაცია** (ფიტოტრანსფორმაცია) — ნიადაგიდან და წყლიდან მცენარეების საშუალებით ორგანული დამბინძურებლების შთანთქმა და მათი მეტაბოლიზირება უვნებელ ნაერთებად;

**რიზოდეგრადაცია** — ნიადაგის ორგანული დამბინძურებლების შთანთქმა და გაუვნებელყოფა მათი დეგრადაციის გზით, რომელიც რიზოსფეროს მიკროფლორით ხორციელდება და რომელშიც მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვთ მცენარის ფესვებს. ისინი მიკროორგანიზმების ცხოველმყოფელობას აუმჯობესებენ და დეტოქსიკაციის პროცესისათვის ოპტიმალურ პირობებს ქმნიან;

**ფიტოფლავატორია** (ანუ მცენარით აქროლება) — მაღალი ტრანსპირაციული უნარის მქონე მცენარეებით ადვილად აქროლადი ნაერთების მოცილება ნიადაგიდან ან წყლიდან და მათი ჰაერში ემისია;

**ფიტოსტაბილიზაცია** — ორგანული და არაორგანული დამბინძურებლების გადაყვანა ნაკლებად აქტიურ ან ნაკლებად მობილურ ფორმაში, რის შედეგადაც მცირდება გარემოზე მათი ტოქსიკური ზემოქმედების უნარი;

**ჰიდრაულიკური კონტროლი** — პრევენციული ღონისძიება, რომელიც მაღალი ტრანსპირაციის მქონე მცენარეების განაშენიანებას გულისხმობს. ეს მცენა-

რები ფესვებით დიდი რაოდენობით წყალს, და შესაბამისად, ტოქსიკურ ნაერთებსაც იწოვენ, რის შედეგადაც ზღუდავენ მის გავრცელებას დაბინძურების კერის ფარგლებს გარეთ.

**ჰეპატაციური საფარი სისტემების შექმნა** — გამოიყენება პერმანენტული დაბინძურების კერებში და ზღუდავენ დაბინძურებლის გავრცელებას ნიადაგის სიღრმეში, არ აძლევენ მათ გრუნტის წყლებში მოხვედრის საშუალებას;

**სანაპირო დამცავი კორიდორების გაშენება** — ხდება იმ მდინარეებისა და წყალსატევების გასწვრივ, რომლებშიც შესაძლოა მოხედეს პესტიციდების ნარჩენები, ან ქიმიური და სამხედრო საწარმოების მევენ გამოწვევები;

**მწვანე ფილტრი** — დაბინძურებული ჰაერის გასუფთავების ტექნოლოგია, რომლის საშუალებითაც მნიშვნელოვნად იზღუდება გზატკეცილებიდან ან ქარხნებიდან გამონაბოლქვი ტოქსიკური აირების გარემოში გავრცელება.

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიის შერჩევა კონკრეტული კრიტერიუმების მიხედვით ხდება. პირველ რიგში საჭიროა განისაზღვროს, თუ როგორი ტიპის ამოცანაა გადასატარებელი და რომელი მეთოდის გამოყენებაა მიზანშეწონილი. შემდგომში აფასებენ მეთოდის უპირატესობასა და ნაკლს. ამა თუ იმ ფიტოტექნოლოგიის გამოყენებისათვის ითვალისწინებენ, ერთი მხრივ, ტოქსიკანტის ბუნებასა და მის კონცენტრაციას, მეორე მხრივ კი ობიექტის (მაგ., სასოფლო-სამეურნეო საფარგულების, წყალსაცავების, ქიმიური ქარხნების ირგვლივ მდებარე ტერიტორიების, ყოფილი სამხედრო პოლიგონების და ა.შ.) თავისებურებებს, რომელიც რემედიაციას საჭიროებს. ამისათვის საჭიროა რემედიაციისათვის განკუთვნილი ობიექტის საფუძვლიანი და მრავალმხრივი მონიტორინგის ჩატარება, კერძოდ, უნდა დადგინდეს: ობიექტზე აღმოჩენილი ტოქსიკური ნაერთების ტიპი, კონცენტრაცია, ტოქსიკანტის ნიადაგში შეღწევის სიღრმე, ნიადაგის ტიპი, pH, ტენიანობა, ფიტორემედიაციის პერიოდში მოსალოდნელი ნალექების რაოდენობა, არსებული გრუნტის წყლების სიღრმე და სხვ. ამის შემდეგ, ხდება ფიტორემედიაციული მეთოდის ამორჩევა, რომელიც ითვალისწინებს კონკრეტული ტექნოლოგიისათვის მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების სელექციას.

გარემოს გასუფთავების სხვა, არაბიოლოგიურ და ბიოლოგიურ ტექნოლოგიებთან შედარებით, ფიტორემედიაციას მნიშვნელოვანი უპირატესობა გააჩნია, რასაც ბევრი კერძოდ და სახელმწიფო კომპანია ითვალისწინებს გარემოს ადღგენითი თუ პრევენციული ღონისძიებების პროექტირებისა და განხორციელების დროს. ეს უპირატესობა რამდენიმე ასპექტში ვლინდება:

1. ფიტორემედიაცია წარმატებით შეიძლება იქნას გამოყენებული ნებისმიერი ტიპის ქიმიური დაბინძურების შემთხვევაში. პრაქტიკულად გარემოს ყველა ტოქსიკური დაბინძურებელი, რომელიც I თაეში იყო განხილული, შეიძლება მოცილებულ იქნას გარემოდან ფიტორემედიაციის სხვადასხვა მეთოდების საშუალებით.

2. ფიტორემედიაცია უნივერსალურია არამარტო ქიმიური ნაერთების, არამედ გასასუფთავებელი ობიექტების მიმართაც, ვინაიდან მცენარეს შეუძლია

ტოქსიკური ნაერთების შთანთქმა როგორც ნიადაგიდან, ასევე წყლიდან და პაერიდან.

3. ფიტორემედიაცია უშუალოდ დაბინძურებულ უბანში, *in situ* (ე.ი. ადგილზე) პირობებში ხორციელდება, რაც ნიადაგის თვისებურებების (სტრუქტურა, რიზოსფეროს შედგენილობა, ფორიანობა, ტენიანობა და ა.შ.) მაქსიმალური შენარჩუნების საშუალებას იძლევა. სხვა რემედიაციული ტექნოლოგიები ძირითადად *ex situ* პირობებში ტარდება — საჭიროა ნიადაგის ექსკავაცია, ტრანსპორტირება, სპეციალურ ბიორეაქტორებში ჩატვირთვა ან ნაკვეთებში განთავსება და ა.შ. ცხადია, ნიადაგის ამგვარი გადამუშავებისას არ ხდება მისი სრულფასოვანი აღდგენა, რადგან ამ პროცესების დროს მნიშვნელოვნად ირღვევა ნიადაგის სტრუქტურა, რის ჩამოყალიბებასაც წლები სჭირდება. გარდა ამისა, თითოეული ოპერაცია დამატებით ხარჯებს მოითხოვს, რაც მნიშვნელოვნად აძვირებს ტექნოლოგიის თვითღირებულებას.

4. ფიტორემედიაცია გაცილებით ეკონომიური და მომგებიანია სხვა ტიპის ტექნოლოგიებთან შედარებით. გამოანგარიშებულია, რომ ერთი და იგივე ობიექტის გასასუფთავებლად ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიის გამოყენებისას სულ ცოტა, 4-ჯერ უფრო ნაკლები ხარჯია საჭირო, ვიდრე სხვა მეთოდებით სარგებლობისას. ეკონომიკური ეფექტი ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება გაცილებით უფრო მაღალიც იყოს. მაგ., ვერცხლისწყლით 50 სმ სიღრმეზე დაბინძურებული 1 აკრი (~04 ჰა) ნიადაგის გასუფთავებისათვის, რაც მოიცავს ნიადაგის ექსკავაციას, გარეცხვას და შემდეგ ადგილზე დაბრუნებას, საჭიროა 400 ათასიდან — 1700 ათასამდე ამერიკული დოლარი, ხოლო იგივე ფართობზე ფიტორემედიაციული მეთოდის გამოყენება გაცილებით ნაკლები — მხოლოდ 60 ათასიდან — 100 ათასამდე ამერიკული დოლარი იხარჯება. ზოგიერთ შემთხვევაში ეკონომიკური ეფექტი კიდევ უფრო მაღალია, მაგ., ძალზე ძვირადღირებულია ვიტრიფიკაციის ტექნოლოგია, რომელიც გამოიყენება მძიმე მეტალების ან რადიონუკლიდების მაღალი კონცენტრაციებით ნიადაგის დაბინძურების შემთხვევაში. ამ დროს საჭიროა ძალიან მაღალი ტემპერატურა (3000°C), რომ მოხდეს ნიადაგის დაბინძურებული ნაწილის ერთ მთლიან მასად შექცობა. შემდეგ ამ მასას აცილებენ დაბინძურებულ უბანს და შედარებით უსაფრთხო ადგილას ინახავენ ან მარხავენ. თუ იგივე დაბინძურების შემთხვევაში ფიტორემედიაციას მიმართავენ, პროცესის თვითღირებულება მინიმუმ ათასჯერ იაფდება. აქვე უნდა მივუთითოთ ფიტორემედიაციის ერთ ნაკლზე — მისი საშუალებით დასახული მიზნის მიღწევას თვეები და ზოგჯერ წლები ესაჭიროება, მაშინ როდესაც სხვა მეთოდების საშუალებით გარემოს გასუფთავება რამდენიმე დღესა ან კვირაში მიიღწევა. ამ მხრივ განსაკუთრებით ხანგრძლივია მძიმე მეტალებით დაბინძურების შემთხვევა. მაგ., თუ დაბინძურებულ ნიადაგში ვერცხლისწყლის კონცენტრაცია საშუალოდ 2500 მგ/კგ-ს შეადგენს, მაშინ ისეთი ტექნოლოგიის გამოყენების დროს, როგორც ფიტორექსტრაქციაა, ნიადაგების სრული რემედიაცია შესაძლოა მხოლოდ 10 წელიწადში განხორციელდეს. მხოლოდ დროის

ფაქტორია იმის მიზეზი, რომ დაბინძურებული ნიადაგების აღდგენით დაინტერესებული ორგანიზაციები ზოგიერთ შემთხვევაში არაფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების გამოყენებას ამჯობინებენ.

5. ფიტორემედიაცია თავისი არსით ერთდროულად რემედიაციულ, პროფილაქტიკურ და პრევენციულ ღონისძიებას წარმოადგენს, რადგან მისი საშუალებით შესაძლებელია არამართო აღვადგინოთ ქიმიურად დაბინძურებული გარემო, არამედ ხანგრძლივი დროით შევზღუდოთ ან საერთოდ ავიცილოთ თავიდან დაბინძურების კერებიდან ტოქსიკური ნაერთების გავრცელება. გარდა ამისა, მწვანე საფარის მიზანმიმართული განაშენიანება იცავს ნიადაგს გამოფიტვისა და ეროზიისაგან. პროფესიონალი დიზაინერებისა და დეკორატორების მეშვეობით ფიტორემედიაციამ შეიძლება დამატებითი ფასეულობა შეიძინოს ესთეტიკური თვალსაზრისითაც. ხატოვან შედარებას თუ მოვიშველიებთ, ფიტორემედიაცია ერთგვარი ელექსირია, რომელიც კურნავს და აჯანსაღებს ქიმიურად დაბინძურებულ ბუნებას და ამასთან ერთად, მისი გაახალგაზრდაებისა და გალამაზების საშუალებასაც წარმოადგენს.

ბუნებრივია, ფიტორემედიაცია არ უნდა განვიხილოთ, როგორც ყოვლისშემძლე საშუალება, რომელიც შეძლებს სწრაფად და იაფად გაასუფთავოს ობიექტი ნებისმიერი დამბინძურებლებისაგან. ასე მაგალითად, მცენარეს არ შეუძლია შეითვისოს დიოქსინები, რომლებიც ბოლო დროს სულ უფრო მეტად აბინძურებენ ბიოსფეროს, ასევე ნაკლები წარმატებებია მიღწეული პოლიქლორირებული ბიფენილებით დაბინძურებული გარემოს ფიტორემედიაციამ.

## 6.1 ფიტოქსტრაქცია

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგია — ფიტოქსტრაქცია — მძიმე მეტალებით და რადიონუკლიდებით დაბინძურებული ნიადაგების გასასუფთავებლად გამოიყენება. ფიტოქსტრაქციის ტექნოლოგიური თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ მძიმე მეტალები ფესვთა სისტემით საკვებ ნოტიურებებთან ერთად შეიწოვება და ქსილემური ტრანსპორტის საშუალებით მცენარის მიწისზედა ორგანოებში გადაადგილდება. მძიმე მეტალი სხვადასხვა ქსოვილებსა და ორგანულელებში აკუმულირდება. მაგ., თამბაქოსა და ქერში Zn ვაკუოლებში გროვდება, Cd, Mn და Pb კი ფოთლის ტრიქომებში. ზრდის ფაზისა და ტრანსლოკაციური პროცესების დასრულებისას მცენარეთა მიწისზედა ორგანოების მოცილება და შემდგომ მათი სათანადო გადამუშავება ხდება. ეს ტექნოლოგია განსაკუთრებით ეფექტური აღმოჩნდა მძიმე მეტალებისა და რადიოაქტიური ელემენტებისაგან ნიადაგების, სედიმენტების, თიხნარების და მცირე ზომის წყალსაცავების მძიმე მეტალებისა და რადიოაქტიური ელემენტებისაგან გასუფთავებისას. მაგ., მცენარეებს ერთი წლის განმავლობაში ერთი ჰექტარი ნიადაგიდან შეუძლიათ მოაშორონ 180-დან — 530-მდე კილოგრამი ტყვია.

დაბინძურებული ობიექტის ფიტოექსტრაქციის შემდეგ მცენარეული ბიომასა, როგორც წესი, იწვეება. წარმოქმნილი ნაცარი შეიძლება გამოყენებულ იქნას მძიმე მეტალების მისაღებად, თუ ეს ეკონომიკურად ხელსაყრელი აღმოჩნდა. უფრო იშვიათად ამ ბიომასისაგან კომპოსტს ამზადებენ, მაგ., ცნობილია, რომ სელენით დაბინძურებული ნიადაგის ფიტოექსტრაქციული დამუშავების შემდეგ მიღებული ბიომასა იმდენად არატოქსიკურია, რომ მას ცხოველთა საკვების შემცველ დანამატად იყენებდნენ.

მცენარეთა ფიტორემედიაციული მახასიათებლებიდან და მიწის ნაკვეთების ნიადაგობრივ-კლიმატური თავისებურებებიდან გამომდინარე, ფიტოექსტრაქციისათვის გამოსადეგი მცენარეები ექსპერიმენტულად უნდა შეირჩეს. ბიომასაში მეტალების დაგროვების უნარის რაოდენობრივი შეფასებისათვის გამოიყენება ფიტოექსტრაქციისა და ბიოაკუმულაციის კოეფიციენტები. ფიტოექსტრაქციის კოეფიციენტი წარმოადგენს მცენარეში დაგროვილი მეტალის კონცენტრაციის შეფარდებას ნიადაგში მძიმე მეტალის საწყის შემცველობასთან. ბიოაკუმულაციის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის მცენარეს მძიმე მეტალის შემცველ ხსნარზე ზრდიან, და შესაბამისად, კოეფიციენტი იგივე შეფარდებას გვიჩვენებს, ოღონდ გამყოფი ამ შემთხვევაში წყალში მძიმე მეტალის საწყისი კონცენტრაციაა.

ფიტოექსტრაქცია ორი ტექნოლოგიური მიდგომით — ინდუცირებული და უწყვეტი მეთოდებით ხორციელდება. უნდა აღინიშნოს, რომ ინდუცირებული ფიტოექსტრაქცია უფრო განვითარებული ტექნოლოგიური მეთოდია და უფრო პოპულარულია კომერციული თვალსაზრისით. თავის მხრივ, უწყვეტი ფიტოექსტრაქცია ზოგიერთ შემთხვევაში უფრო ეფექტური და შეუცვლელია. იგი წარმატებით გამოიყენება, როდესაც ნიადაგი დაბინძურებულია ისეთი მძიმე მეტალებით, როგორებიცაა: ტყვია, თუთია, დარიშხანი, კადმიუმი, ნიკელი და ქრომი.

ინდუცირებული ფიტოექსტრაქცია აუცილებლად ხელატის მონაწილეობით მიმდინარეობს. ამ დროს გამოიყენება სპეციფიკური მახელატირებელი აგენტები, რომლებიც მეტალებთან ხსნად კომპლექსებს წარმოქმნიან, მაგ., ხელატორებია: EDTA (ტყვიისათვის), EGTA (კადმიუმისათვის), ციტრათი (ურანისათვის) და სხვ. ხელატის მოქმედების შედეგად გაცილებით იზრდება მძიმე მეტალის ძვრადობა როგორც ნიადაგში, ასევე მცენარეში: ერთი მხრივ, ფესვთა სისტემა მძიმე მეტალის კომპლექსს სწრაფად ითვისებს, მეორე მხრივ, მეტალი ქსილემის საშუალებით მცენარის მიწისზედა ორგანოებში დიდი რაოდენობით ტრანსპორტირდება. ხელატის ეფექტი უფრო თვალსაჩინოა შემდეგი მაგალითიდან — EDTA საშუალოდ 100-ჯერ ზრდის ყლორტებში ტყვიის დაგროვებას.

ნიადაგიდან მოცილებული მეტალის ჯამური რაოდენობა დამოკიდებულია მოსავალში მეტალის კონცენტრაციასა და ჯამურ ბიომასაზე. ცნობილია, რომ დიდი ბიომასის მქონე მცენარეები — სიმინდი და მზესუმზირა შეიძლება გამოყენებულ იქნას ტყვიის მაღალი კონცენტრაციით დაბინძურებული ნიადაგის გასასუფთავებლად. ამ მცენარეებს წარმატებით იყენებენ ხელატმონაწილე ფი-

ტოქსტრაქციის ტექნოლოგიებში. ფიტორემედიაციის აღნიშნული მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნას სხვა მეტალების მიმართაც. ნაჩვენებია ტყვიის, კადმიუმის, სპილენძის, ნიკელის და თუთიის ერთდროული აკუმულაცია სარეპტულ მღოვცეში (*Brassica juncea*) მას შემდეგ, რაც ნიადაგში შეტანილი იქნა EDTA. ცხადია, მცენარეში მეტალის აკუმულაციის ეფექტურობა პირდაპირაა დაკავშირებული გამოყენებული ხელატიის მეტალისადმი სწრაფვასთან.

აქვე უნდა აღვნიშნოთ ხელატიით ინდუცირებული ფიტოექსტრაქციის ნაკლოვანი მხარე — ხელატიის გამოყენება მრავალ რისკ-ფაქტორს შეიცავს, ვინაიდან ფიტოექსტრაქციისათვის გამოსადევი ხელატების უმეტესობა მცენარისა და რიზოსფეროსათვის ტოქსიკურია. ხელატების ნიადაგში შეტანა ზუსტად უნდა ემთხვეოდეს მცენარის სწრაფი ზრდის ფაზას, რათა ხელატის სრულად შეთვისება მოხდეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ხელატი თვითონ დააბინძურებს ნიადაგს, ან, უარეს შემთხვევაში, გრუნტის წყლებში მოხვედბა და თან გახსნილ მეტალებსაც წარიტაცებს. კიდევ უფრო სახიფათოა ამ დროს ატმოსფერული ნალექის გაუთვალისწინებლობა, რომელსაც შეუძლია გრუნტის წყალში ჩარეცხოს მძიმე მეტალის ხელატთან კომპლექსი, ან უფრო ფართოდ გააერცელოს იგი. გარდა ამისა, ფიტოექსტრაქციული ტექნოლოგიის რეგლამენტი აუცილებლად უნდა ითვალისწინებდეს იმ ღონისძიებებს, რომლებიც არ დაუშვებენ მოსაულის სახით მოყვანილი მცენარეული ბიომასის ცხოველის საკვებად გამოყენებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში ხელატთან კომპლექსირებული მძიმე მეტალი კვებით ჯაჭვში მოხვედბა და ბევრ არასასურველ შედეგს მოიტანს. ამგვარად, ხელატიით ინდუცირებული ფიტოექსტრაქციის არასწორად გამოყენებამ შესაძლოა მნიშვნელოვნად გააუარესოს ეკოლოგიური სიტუაცია.

უწყვეტი ფიტოექსტრაქცია, ინდუცირებულთან შედარებით, უფრო ხანგრძლივი პროცესია და მის საფუძველს მცენარე-ჰიპერაკუმულატორების გამოყენება წარმოადგენს. ეს მცენარეები უჯრედებსა და უჯრედმორის სიერცეში მძიმე მეტალებს ზემადალი კონცენტრაციით აგროვებენ, რაც ჯერ კიდევ 1885 წელს აღმოაჩინა გერმანელმა მეცნიერმა ბაუშმანმა. მან შენიშნა, რომ თუთიით ბუნებრივად მდიდარ ნიადაგებზე მზარდი გარკვეული სახეობების მცენარეები ყლორტებსა და ფოთლებში ამ ელემენტს უჩვეულოდ დიდი დოზებით აგროვებდნენ. თითქმის ასი წლის შემდეგ, 1983 წელს, ჰიპერაკუმულაციის ფენომენი ფიტოექსტრაქციის კონცეფციის ერთ-ერთი საფუძველი გახდა.

ჰიპერაკუმულატორი მცენარეა, უპირველეს ყოვლისა, სარეპტული ანუ ინდური მღოვცე. ამ მცენარის მიერ აკუმულირებული მძიმე მეტალის კონცენტრაცია (მშრალ ბიომასაზე გადათვლით) შეიძლება 400—500-ჯერ აღემატებოდეს მეტალის კონცენტრაციას იმ ნიადაგში, რომელშიც მცენარე იზრდებოდა. ჰიპერაკუმულატორი მცენარის მიერ დაგროვილი მეტალის მასური წილი მშრალ მცენარეულ ბიომასაში 10%-საც კი შეიძლება აღწევდეს. ცხადია, ასეთი უნარი მცენარის ფიზიოლოგიურ თავისებურებებთან უნდა იყოს დაკავშირებული.

ლი. მაგ., ზოგიერთი მცენარე დარიშხანსა და სელენს აღადგენს აქროლად წყალბადნაერთებამდე, რომლებსაც მკვლელობის დასაფრთხილებად იყენებს.

სარეპტული მდოგვის გარდა, პიკერაკუმულატორები: იონჯა, მუხესუშხირა (*Helianthus annuus*), სორგო, მთელი რიგი ბალახოვანი და ზოგიერთი მარცვლოვანი კულტურა (ცხრილი 6.1). ცნობილია 400-მდე სახეობის მცენარე, რომლებსაც მძიმე მეტალების ფართო სპექტრის (Zn, Ni, Se, Co, Cu, Mn, Pb) პიკერაკუმულაციის უნარი გააჩნიათ მაგ., ტყვიისათვის ცნობილია პიკერაკუმულატორი მცენარეების 300 სახეობა, კობალტისათვის — 26, სპილენძისათვის — 24, თუთიისათვის — 18, მაგნიუმისათვის — 8, კერცხლისწყლისათვის — 5, კადმიუმისათვის — 1.

ტოქსიკური მეტალების პიკერაკუმულაცია მცენარის სპეციფიკური მექანიზმებით ხორციელდება. ასეთ მექანიზმებს წარმოადგენს მძიმე მეტალების ხელატირება ენდოგენურ ნაერთებთან, რომლებიც ამცირებენ მეტალების ტოქსიკურობას. დადგენილია, რომ ასეთი ტიპის ნაერთებს მეტალოთიონინები, ფიტოხელატინები, გლუტათიონი და სხვა გოგორდ-შემცველი პეპტიდები წარმოადგენენ. გარდა ამისა, დიდი მნიშვნელობა აქვს მცენარის ფესვებიდან რიზოსფეროში გამოყოფილ ექსუდატებს, რომელთა შედგენილობაში შედიან მეტალებთან კომპლექსირების უნარის მქონე ნაერთები — ე.წ. ფიტოსიდეროფორები. რიზოსფეროში ფიტოსიდეროფორები მეტალ-ხელატური კომპლექსების სახით იკავშირებენ რკინის, სპილენძის, თუთიის, მანგანუმის და სხვა იონებს, რის შედეგადაც იზრდება მცენარის ფესვთა უჯრედების პლანზმურ მემბრანებში ამ მეტალების განვლადობა და რაც საბოლოო ჯამში ნიადაგიდან მათ მოცილებას უწყობს ხელს.

### ცხრილი 6.1

მძიმე მეტალების ფიტოქსიკოლოგიისათვის გამოყენებული პიკერაკუმულატორი მცენარეები

მცენარე	მძიმე მეტალები
<i>Brassica juncea</i>	Pb, Cr (VI), Cd, Cu, Ni, Zn, Sr, B, Se
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Ni, Zn
<i>Thlaspi rotundifolium</i> ssp. <i>cepaefolium</i>	Pb
<i>Alyssum wulfenianum</i>	Ni
<i>Brassica napus</i>	
<i>Hibiscus cannabinus</i> L.	Se
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb cv. <i>Alta</i>	
<i>Populus</i>	As, Cd
<i>Helianthus annuus</i>	Cs, Sr
<i>Sorghum vulgare</i> L.	
<i>Medicago sativa</i>	Pb, Zn, Hg, Ni
<i>Zea mays</i>	



ფიტოხელატირების შედეგად მნიშვნელოვნად მცირდება მძიმე მეტალის ტოქსიკურობაც, რაც ჰიპერალუმულატორების რეზისტენტულობის საფუძველს წარმოადგენს. მეტალის ნაწილობრივი გაუვნებლყოფა სხვა მექანიზმებითაც მიიღწევა, მაგ., მცენარეულ ქსოვილებში მძიმე მეტალების უხსნადი ნაერთების წარმოქმნით, რასაც ადგილი აქვს ტყვიის შემთხვევაში, როდესაც ხდება მეტალის შიდა და ექსტრაუჯრედული დაღექვა კარბონატების, სულფატებისა და ფოსფატების სახით. ელემენტის ქიმიური გარდაქმნით ან ორგანულ ნაერთებში მისი გადაყვანით მცენარეებში მცირდება ისეთი მეტალების და არამეტალების ტოქსიკურობა, როგორებიცაა ქრომი, სელენი და დარიშხანი. სპილენძის მაღალი კონცენტრაციის მიმართ უჯრედის მდგრადობის გაუმჯობესების პირველი ეტაპია პლანტური მემბრანის რეზისტენტობის გაზრდა ან სპილენძის ზემოქმედების შედეგად დაზიანებული მემბრანის აღდგენა.

მცენარეებს ასევე შეუძლიათ მოახდინონ რკინის და სხვა მეტალების სოლუბილიზაცია ფესვებით. ფესვებში შეღწეული მეტალის იონი შეიძლება იქვე დაგროვდეს, ან გადატანილ იქნას მიწისზედა ნაწილში. საყარაუდოა, რომ მეტალის იონების ქსილემაში გავლა გადავილებულია სპეციალიზებული მემბრანული სატრანსპორტო სისტემებით.

განსაკუთრებით აღასანიშნავია მძიმე ელემენტების აქროლად ნაერთებში გადაყვანის უნარი. მაგ., ნაჩვენებია, რომ როგორც სელენის აკუმულატორი, ასევე არააკუმულატორი სახეობები აქროლებენ სელენს წყალბადნაერთის სახით, ხოლო დარიშხანს — დიმეთილარსინის სახით. აქროლად ნაერთებში მეტალების გადაყვანა და ჰაერში მათი განზავება ფიტოექსტრაქციის უნიკალური უპირატესობაა, რადგან აღარაა საჭირო მოსავლის აღება.

ფიტოექსტრაქციის მეთოდის გაუმჯობესების პროცესი გრძელდება, რაც გამოიხატება ახალი, დიდი ბიომასის მქონე მეტალთა ჰიპერაკუმულატორების ძიებაში. ჰიპერაკუმულატორების უმეტესობისათვის მთავარი ნაკლია მათი შედარებით მცირე ბიომასა და ნელი ზრდა, ხოლო სწრაფად მზარდი, დიდი ბიომასის წარმომქმნელი მცენარეები მძიმე მეტალებს დაბალი კონცენტრაციებით აკუმულირებენ. ამის გამო სადღეისოდ ჰიპერაკუმულაციის განმაპირობებელი გენების გადატანა დიდი ბიომასის მქონე მცენარეებში და ამ გზით ტრანსგენური ჰიპერაკუმულატორების შექმნა თანამედროვე გენური ინჟინერიის ერთ-ერთ სამიზნეს წარმოადგენს.

## 6.2 რიზოფილტრაცია

რიზოფილტრაცია წარმოადგენს ტექნოლოგიას, რომლის არსია ხსნარში არსებული დამბინძურებლის აღსორბაცია ან მექანიკური დაღექვა მცენარის ფესვებზე. მცენარეში ნაერთის შემდგომი შეღწევა და ტრანსლოკაცია, როგორც წესი, ძალზე მცირე რაოდენობით ხდება.

რიზოფილტრაცია ბიოტურ და აბიოტურ პროცესებს მოიცავს. მექანიკური სორბციის გარდა, ტოქსიკური ნაერთის დაკავშირებაში მონაწილეობენ ფესვის ექსუდატებიც, რომლებიც მძიმე მეტალებისა და ორგანული ნაერთების ადსორბციისა და იმობილიზაციისათვის შესაფერის პირობებს ქმნიან.

## ცხრილი 6.2

მძიმე მეტალებისაგან გარემოს გასასუფთავებელ რიზოფილტრაციულ ტექნოლოგიაში გამოყენებული მცენარეები

მცენარე	მძიმე მეტალები
<i>Brassica juncea</i>	Pb, Cd, Cr(VI), Zn, Ni, Ce, Sr
<i>Myriophyllum spicatum</i>	Pb, Cd, Ni, Zn,
<i>Helianthus annuus</i>	Cr(VI), Zn, Cd, Ni, Cu, U, Pb, Sr
<i>Phaseolus coccineus</i>	U
<i>Japanese lawngrass</i>	
<i>Eichhornia crassipes</i>	
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Pb
<i>Lemna minor</i>	
<i>Azolla pinnata</i>	

რიზოფილტრაციას უმეტესად იყენებენ გრუნტის, ზედაპირული, ჩანარეცხი და ჩამდინარე წყლების, აგრეთვე ბუნებრივი და ხელოვნური წყალსატევების გასასუფთავებლად. მეთოდი უპირატესად მძიმე მეტალებითა და რადიონუკლიდებით დაბინძურებული გარემოს გასასუფთავებლად გამოიყენება.

ამ ტექნოლოგიაში გამოყენებული მცენარეები მრავალგვარია (ცხრილი 6.2). უპირატესობა ენიჭება გრილი და თბილი სეზონის, ტენის მოყვარულ ხმელეთის მცენარეებს, რომლებსაც გააჩნიათ დიდი ბიომასის წარმოქმნის უნარი, სწრაფად მზარდი ფესვები, ფართო ფოთლები და ა.შ. ხშირად გამოიყენება აგრეთვე ჭობის მცენარეები, ხაესები, წყალმცენარეები, წყლის მცენარეები და სხვ.

რიზოფილტრაციის ტექნოლოგიის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ იგი ძალიან იაფია — 1000 ლ დაბინძურებული წყლის გასუფთავება სულ 1—3 ამერიკული დოლარი ჯდება. განსაკუთრებით ეფექტურია ე.წ. “ფლოტის” მეთოდი, როდესაც წყლის გასასუფთავებლად იყენებენ ხმელეთის მცენარეებს, რომლებიც სპეციალურ მოტივტივე პლატფორმაზეა მოთავსებული და მისი საშუალებით დაცურავენ წყლის ზედაპირზე. რიზოფილტრაციის ეს მეთოდი, რომელშიც ძირითად კულტურას მზესუმზირა წარმოადგენდა, წარმატებით იქნა გამოყენებული ჩერნობილის კატასტროფის შემდეგ რადიონუკლიდებით დაბინძურებული წყალსატევების გასასუფთავებლად.

### 6.3 ფიტოდეგრადაცია

ფიტოდეგრადაცია, ანუ ფიტოტრანსფორმაცია, ერთ-ერთ ძირითად და მნიშვნელოვან ფიტორემედიაციულ ტექნოლოგიას წარმოადგენს. იგი დაფუძნებულია მცენარის უნარზე, შეითვისოს ორგანული დამბინძურებელი და მოახდინოს მათი დეგრადაცია და მეტაბოლიზება ცალკეული ფერმენტებითა და ფერმენტული სისტემებით მცენარის მიერ გარემოდან შეთვისებული ტოქსიკური ორგანული ნაერთი მცენარისათვის დამახასიათებელ მეტაბოლურ გარდაქმნებს განიცდის. ქსენობიოტიკის ტრანსფორმაცია ჟანგვის, აღდგენის ან პიდროლიზის გზით იწყება, რაც საბოლოოდ კონიუგატების სახით მისი უტილიზაციით ან მინერალიზაციით მთავრდება.

ფიტოდეგრადაციული ტექნოლოგია ფართოდ გამოიყენება დიდი ფართობების გასასუფთავებლად ისეთი ორგანული დამბინძურებლებისაგან, როგორებიცაა: პენტაქლოროფენოლი, სხვადასხვა კლასის პერბიციდები, ფეთქებადი ნიტრო-ნაერთები, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები და ა.შ. ზოგიერთ შემთხვევაში მცენარის მიერ ტრანსფორმირებული ნაერთის ინტერმედიატი, შესაძლოა, უფრო მეტად ტოქსიკურიც კი იყოს, ვიდრე თვით ქსენობიოტიკია (მაგ., პენტაქლოროფენოლის ჟანგვის ერთ-ერთი პირველადი პროდუქტი — ტეტრაქლორკატეხინი), ამიტომ ამ ფაქტორს არსებითი მნიშვნელობა აქვს რემედიაციული ტექნოლოგიის შემუშავებისას.

განხილული ტექნოლოგიის გამოყენებისას დიდი მნიშვნელობა აქვს მორწყვის ფაქტორს. ორგანული ტოქსიკანტის ფესვებზე ადსორბცია ხელს უშლის მის მცენარეში შეწოვას, რის გამოც სასურველია ხშირი მორწყვა, რათა მოხდეს ფესვების გარეცხვა. გარდა ამისა, ორგანული ნაერთები წყალთან ერთად შეიწოვება, ამიტომ ბუნებრივია, რაც უფრო მეტ წყალს იწოვს მცენარე, უფრო ინტენსიურად ხდება გარემოს გასუფთავება დამბინძურებლისაგან.

ფიტოდეგრადაციაში გამოყენებული მცენარეები გამოირჩევიან დეტოქსიკაციაში მონაწილე ფერმენტების (მონოოქსიგენაზების, პეროქსიდაზების, ფენოლოქსიდაზების, ნიტრორედუქტაზების, ესთერაზების და ა.შ.) მაღალი აქტივობით ამ მცენარეებს შორის ხშირადაა როგორც მერქნიანი მცენარეები, ასევე ბალახოვნები, წლის მცენარეები და წყალმცენარეები (ცხრილი 6.3). ამის მიხედვით ფიტოდეგრადაციის ცალკეული მეთოდებია ფიკორემედიაცია (*ფიკოს* — წყალმცენარე) და დენდრორემედიაცია (*დენდროს* — ხე-მცენარე).

ფიტოდეგრადაციის ტექნოლოგიურ რეგლამენტში, როდესაც საჭიროა რამდენიმე სახეობის ერთობლივი ვეგეტაცია, აუცილებლად ითვალისწინებენ ე.წ. ალელოპათიურობას — ზოგიერთი სახეობის მცენარეთა ზრდის ინჰიბირებას სხვა სახეობის მცენარეთა მიერ პროდუცირებული ქიმიური ნაერთებით. ალელოპათიური ეფექტი შეიძლება გამოიწვიოს მცენარეთა ნარჩენებმაც, რომლებიც შერეულია ნიადაგთან ნაყოფიერების გაზრდის მიზნით. მაგ., თაღამურას ფეს-

## ცხრილი 6.3

ფიტოდეგრადაციულ ტექნოლოგიაში გამოყენებული მცენარეები

მცენარე	ორგანული ტოქსიკანტი
<i>Populus sp.</i>	კებიციდები, ტრიქლორეთილენი, TNT, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები
<i>Festuca arundinacea</i>	კებიციდები, ტრიქლორეთილენი, TNT, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, პოლიქლორირებული ბიფენილები
<i>Myriophyllum aquaticum</i>	კებიციდები, ფენოლები, TNT, RDX
<i>Solanium nigrum L</i>	პოლიქლორირებული ბიფენილები
<i>Armoracia rusticana</i>	
<i>Solanum tuberosum</i>	ფენოლები
<i>Raphanus sativus</i>	
<i>Medicago sativa</i>	
<i>Lolium perene</i>	ალკანები, ნაფთუნები, არენები და პოლიციკლური
<i>Lolium multiflorum</i>	არომატული ნახშირწყალბადები
<i>Trifolium sp.</i>	
<i>Juncus roemerianus</i>	
<i>Spartina alterniflora</i>	ნავთობის ნახშირწყალბადები
<i>Sagittaria lancifolia</i>	
<i>Spartina patens</i>	
<i>Acorus calamus L</i>	
<i>Elodea canadensis</i>	
<i>Heteranthera dubia</i>	
<i>Nitella sp.</i>	TNT, ტრიქლორეთილენი, ფენოლები
<i>Potamogeton crispus</i>	
<i>Scirpus cyperinus</i>	
<i>Spinicia oleracea</i>	

ვის, ღეროს და ფოთლის ნარჩენი აინჰიბირებს სიმინდის, ხორბლის და ქერის ზრდას. ალელოპათიურობა შეიძლება იყოს საკვანძო ფაქტორი ფიტორემედიაციისათვის ცალკეული მცენარეული სახეობების ვარგისიანობის განსაზღვრისას. გარდა ამისა, მცენარის მიერ პროდუცირებული ალელოპათიური ქიმიური ნაერთები, ასევე მცენარის ფესვების ექსუდატები გავლენას ახდენენ რიზოსფეროში მიმდინარე ნიადაგის დამბინძურებლების მიკრობულ მეტაბოლიზმზეც. ფიტოდეგრადაციის მეთოდის ეფექტურობისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს რიზოსფეროს მიკროორგანიზმთა აქტიურ დეგრადატორულ მოქმედებას. თანამედროვე ფიტორემედიაციულ ტექნოლოგიაში უკვე ინერჯება ისეთი მეთოდები, რომლებიც დაფუძნებულია მიკროორგანიზმთა და მცენარეთა ერთობლივ მო-

ქმედებაზე. მიკროორგანიზმები პირველი უტყვევ ტოქსიკური ნაერთების ისეთ ჯგუფებს, რომლებიც მცენარეებში ძნელად გარდაიქმნებიან მაგ., წითელბალახა აქტიურად იწოვს და ადვილად გარდაქმნის TNT-ს მეტაბოლიტებს, რომლებიც ნაწილობრივ გარდაქმნილია ბაქტერიული შტამის მიერ. მცენარისა და მიკროორგანიზმის ასეთი კონსორციუმების ძიება და შექმნა თანამედროვე ფიტორემედიაციის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მიმართულებას წარმოადგენს. ამ მხრივ ძალზე პერსპექტიულია სიმბიოზური მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების გამოყენება.

## 6.4 რიზოდემრადაცია

ფიტორემედიაციულ პროცესში მცენარე შეიძლება არაპირდაპირი გზითაც მონაწილეობდეს. ამის თვალსაჩინო მაგალითს რიზოდემრადაცია წარმოადგენს, როდესაც ტოქსიკანტის დაშლა რიზოსფეროს მიკროორგანიზმების მიერ ხორციელდება. ფესვთა სისტემა ხშირად ოპტიმალურ პირობებს ქმნის მიკროორგანიზმების გამრავლებისათვის რიზოსფეროში, ანუ ფესვთა ზონაში. აქ აქტიური კომპონენტის როლს ასრულებენ ფესვის ექსუდატები (გამონაყოფები), რომლებიც შეიცავენ ფერმენტებს, შაქრებს, ამინომჟავებს, ორგანულ მჟავებს, ცხიმოვან მჟავებს, ზრდის სტიმულატორებს, ნუკლეოტიდებს, ფლავონებს, ქინონებს და სხვ. ეს ნაერთები რიზოსფეროს მიკრობთა პოპულაციებისათვის საკვებ არეს წარმოადგენს და მათ ზრდა-განვითარებას ასტიმულირებს. გარდა ამისა, ექსუდატების ფერმენტები — ლაქაზები, დეჰალოგენაზები, დეჰიდროგენაზები, ნიტრორედუქტაზები, ნიტრილაზები და პეროქსიდაზები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ სხვადასხვა ქიმიური კლასის ორგანული დამბინძურებლების დეგრადაციის პროცესებში. რიზოდემრადაციის ტექნოლოგიას მიმართავენ იმ შემთხვევაში, როცა დამბინძურებლებს წარმოადგენენ: ნაეთობის ნახშირწყალბადები, მავთუთი, მინერალური ზეთები, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები — ანტრაცენი, პირენი, არენები — ბენზოლი, ტოლუოლი, ეთილბენზოლი, ქსილოლები; პესტიციდები — პენტაქლოროფენოლი, ქლორომეთილი; ჰერბიციდები — ატრაზინი, სიმაზინი, 2,4-D და სხვ.

რიზოდემრადაციას მიმართავენ ნიადაგის, სელიმენტის და თიხნარის დაბინძურების შემთხვევაში. ფიტოდემრადაციისაგან განსხვავებით, ტოქსიკანტების დემრადაციის პროცესი მცენარის გარეთ, ფესვთა ზონაში ხორციელდება და არ ხდება ქსენობიოტიკების ან მათი გარდაქმნის პროდუქტების მცენარეში ტრანსლოკაცია. ხშირ შემთხვევაში დამბინძურებელი სრულად იშლება — მინერალიზდება.

რიზოდემრადაცია თვით ბუნების მიერ შექმნილ და მისივე მიერ რეალიზებულ უნიკალურ ბიოტექნოლოგიას წარმოადგენს, და ცხადია, მასში რაიმე ცვლილებების შეტანა გაუმჯობესების თვალსაზრისით, არცთუ ისე ადვილია. მი-

## რიზოდეგრადაციაში გამოყენებული მცენარეები

მცენარე	ორგანული ტოქსიკანტი
<i>Agropyron desertorum</i>	ქენტაქლორფენოლი
<i>Phaseolus vulgaris</i>	პარათიონი
<i>Oryza sativa</i> L.	პროპანილი
<i>Kochia</i>	ატრაზინი
<i>Populus deltoides</i>	ბენზოლი, ტოლუოლი, ქსილოლი
<i>Maclura pomifera</i>	
<i>Malus fusca</i>	პოლიქლორირებული
<i>Mentha spicata</i>	ბიფენილები
<i>Morus rubra</i> L.	
<i>Glycine max</i> L.	
<i>Lespedeza cuneata</i>	
<i>Medicago sativa</i>	ტრიქლორეთილენი
<i>Pinus taeda</i> L.	
<i>Trifolium</i> sp.	ნაეთობის ნახშირწყალბადები
<i>Lolium multiflorum</i>	
<i>Agropyron smithii</i>	
<i>Andropogon gerardi</i>	
<i>Bouteloua curtipendula</i>	
<i>Bouteloua gracilis</i>	
<i>Elymus canadensis</i>	
<i>Festuca arundinacea</i>	პოლიციკლური
<i>Medicago sativa</i> L.	არომატული
<i>Panicum virgatum</i>	ნახშირწყალბადები
<i>Panicum virgatum</i> L.	
<i>Schizachyrium scoparius</i>	
<i>Sorghastrum nutans</i>	
<i>Sorghum vulgare</i> L.	

უხედავად ამისა, რიზოდეგრადაციული პროცესების რეგულირება შესაძლებელია, რაც ძირითადად შესაბამისი მცენარეების კულტოვირებით ან სელექციურად შერჩეული მიკროორგანიზმების შტამების ინტროდუცირებით ხორციელდება.

## 6.5 ფიტოსტაბილიზაცია

ფიტოსტაბილიზაცია ფიტორემედიაციის ერთ-ერთი მეთოდია და გულისხმობს ტოქსიკანტის ისეთ ნაერთებში გადაყვანას, რომლებსაც საგრძნობლად მცირე ძვრადობა და ტოქსიკური თვისებები გააჩნიათ ფიტოსტაბილიზაცია

დაფუძნებულია მცენარის უნარზე, მოახდინოს ტოქსიკანტის იმობილიზაცია ნიადაგში სორბცის, გამოლექვის ან კომპლექსირების საშუალებით. პროცესი ასტაბილურებს ნიადაგის მატრიქსს, ამცირებს ეროზიას და სელიმენტების მიგრაციის პროცესს. ამ დროს ტოქსიკანტი უკუშირდება ნიადაგის კომპონენტებს (ფულვომჟავებს, ჰუმინის მჟავებს, თიხებს და ა.შ.). ფიტოსტაბილიზაციის მეოთხედი საკმაოდ იაფია და მას იმ შემთხვევაში მიმართავენ, როცა დამბინძურებლის (ძირითადად As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn და სხვ.) სხვა მეთოდებით მოცილება შეუძლებელია, ან დიდ ხარჯსა და დროს მოითხოვს. ფიტოსტაბილიზაციის შედეგად მცირდება მძიმე მეტალის გავრცელების და მცენარეებში ან გრუნტის წყლებში მათი მოხვედრის საშიშროება. ნიადაგის გარდა, მეოთხედი გამოიყენება სხვა მყარი ფაზების — სელიმენტის, ლამისა და თიხნარის დასამუშაებლად.

ფიტოსტაბილიზაციის გამოყენებისას მცენარე ძირითადად ფესვის სიგრძის მიხედვით შეირჩევა. გამოიყენება სარეპტული მდოგვი, ვერხვი და *Populus*-ის გვარის სხვა წარმომადგენლები, მათი ჰიბრიდები, ზოგიერთი ბალახოვანი მცენარე და სხვ. ცხადია, ამ ტექნოლოგიის მთავარი ნაკლი ისაა, რომ ტოქსიკანტი მაინც ნიადაგში რჩება. ამის გამო ნიადაგი მუდმივ ზედამხედველობას მოითხოვს, საჭირო ხდება მისი პერიოდული შეტუტიანება, რის შედეგადაც წარმოიქმნება მძიმე მეტალების ფუძეები და ფუძე მარილები, მაგ., ფუძე კარბონატები, რომლებიც პრაქტიკულად უხსნადი ნაერთებია. ხშირ შემთხვევაში ფიტოსტაბილიზაციას წინ უსწრებს სხვა რემედიაციული ტექნოლოგია, კერძოდ ექსკავაცია. გასათვალისწინებელია აგრეთვე გრუნტის წყლების არსებობა, რაც წინასწარ უნდა დადგინდეს, რათა გამოირიცხოს დამბინძურებლის ჩარეცხვა. ამ ტექნოლოგიის შერჩევისას გასათვალისწინებელია აგრეთვე კლიმატის თავისებურებებიც, კერძოდ, ატმოსფერული ნალექის სიხშირე და რაოდენობა.

## 6.6 ფიტოვოლვატილიზაცია

ფიტოვოლვატილიზაცია, ანუ მცენარით აორთქლება კიდევ ერთი ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიაა, რომელიც მცენარეების უნიკალურ თვისებებზეა დაფუძნებული. ამ შემთხვევაში ტექნოლოგიის საფუძველს წარმოადგენს მცენარის უნარი, მოახდინოს ნიადაგიდან ან წყალხსნარიდან ქიმიური დამბინძურებლების ექსტრაქცია ფესვთა სისტემით, ტრანსპირაციული ნაკალით გადაიტანოს ეს ნაერთები ფოთლებში და ექსკრეციის საშუალებით ისინი ატმოსფეროში აირადი სახით გამოყოს. ფიტოვოლვატილიზაციის დროს დამბინძურებლის ქიმიური სტრუქტურა უფრო ხშირად უცვლელი რჩება, ზოგჯერ კი ნაკლებად ტოქსიკურ ფორმად ტრანსფორმირდება. მეოთხედი გამოიყენება წალსატყეების, საწარმოების ჩამდინარე წყლების, ნიადაგისა და თიხნარის გასასუფთავებლად. ტოქსიკანტი შეიძლება იყოს ფენოლი, ტრიქლორეთილენი, ტეტრაქლორეთილენი, ტეტრაქლორმეთანი და სხვა აქროლადი ქლორორგანული ნაერთები, აგრეთვე მძი-

მე მეტალები — სელენი, დარიშხანი, ვერცხლისწყალი. რედუქტაზების საშუალებით ეს მეტალები აქროლად ჰიდრიდებს ან მეტალორგანულ ნაერთებს წარმოქმნიან და ამ სახით გამოიყოფიან ქაერში ტრანსპირაციული პროცესის შედეგად.

ფიტოოლატილიზაციის მეთოდში ხშირად გამოიყენება ვერხვის კიბრიდები, ტირიფი, იონჯა, აკაცია, სარველები და სხვ. ამავე მიზნით ბოლო დროს ინერგება აგრეთვე გენეტიკურად მოდიფიცირებული მცენარეები.

ფიტოოლატილიზაციის შედეგად ატმოსფეროში ტოქსიკური ნაერთების ემისიის სიჩქარე საკმაოდ დაბალია, მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ამ ფაქტორის გათვალისწინება აუცილებელია მეთოდის გამოყენებისას, რადგან ქარის საშუალებით ტოქსიკური ნაერთი ადამიანთან შეიძლება მოხვდეს. გარდა ამისა, აღნიშნული მეთოდით სარგებლობისას დაუშვებელია მცენარის ნაყოფის საკვებად გამოყენება, ვინაიდან ტოქსიკანტის ნაწილი ნაყოფშიც აღწევს.

## 6.7 ჰიდრაპლიკური კონტროლი

ჰიდრაპლიკური კონტროლის ტექნოლოგიას სხვანაირად ფიტოჰიდრაპლიკასაც უწოდებენ. მეთოდის ძირითად პრინციპს წარმოადგენს ხე-მცენარის კარგად განვითარებული ფესვის მიერ წყალთან ერთად ტოქსიკანტის შეწოვა, რის საშუალებითაც კონტროლდება წყალში ტოქსიკური ნაერთის შემცველობა. ამ მეთოდით სარგებლობენ ორგანული და არაორგანული ტოქსიკანტებით დაბინძურებული გრუნტის წყლების გასუფთავებისას.

ჰიდრაპლიკურ კონტროლში გამოიყენება ვერხვი, ჭადარი, ტირიფი, არყის ხე, ევკალიპტი და მაღალი ტრანსპირაციული უნარის მქონე სხვა ფოთლოვანი ხე-მცენარეები. ცხადია, მეთოდის ნაკლს წარმოადგენს მისი დამოკიდებულება კლიმატზე და წელიწადის სეზონებზე — ზამთარში ფოთლოვანი მცენარეების მიერ ტოქსიკანტისაგან გასუფთავების პროცესი შენელებულია. წყლიდან დაბინძურებლის მოშორება ლიმიტირებულია მცენარის ფესვის სიღრმითაც. ამ ტექნოლოგიის გამოყენებისას გასათვალისწინებელია ტემპერატურის გავლენაც, რომელიც მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ტრანსპირაციის სიჩქარეს, და შესაბამისად, ფიტოჰიდრაპლიკური პროცესის ინტენსივობასაც.

## 6.8 კომპლექსური მეთოდები

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიები კომპლექსური მიდგომითაც ხორციელდება, რომლის მაგალითებია ვეგეტაციური საფარი სისტემების, ბუფერული ზონებისა და სანაპირო კორიდორების შექმნა. კომპლექსური მეთოდების მთავარი უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ფიტორემედიაციული მცენარეული საფარი ხანგრძლივმოქმედი და არ მოითხოვს ბიომასის მოცილებას.



ვეგეტაციური საფარი სისტემა ბალახოვანი და ხე-მცენარეებისაგან შედგება. ნიადაგში მათი ფესვები წარმოქმნიან ერთგვარ გეომემბრანას, რომელიც ორი მექანიზმით მოქმედებს:

1. ნიადაგის ზედა ფენაში შედარებით მოკლე ფესვების მქონე ბალახოვანი მცენარეებით იქმნება ე.წ. ვეპოტრანსპირაციული საფარი, რომლის დანიშნულებაცაა წყლის სწრაფი შეწოვა და ფოთლებით აორთქლება (ვეპოტრაცია). ეს პროცესი აბრკოლებს წყლის ჩაჟონვას ნიადაგის სიღრმეში და იქ მყოფი დამბინძურებლის ჩარეცხვას გრუნტის წყლებში.
2. ნიადაგის ქვედა ზონაში ხე-მცენარეების გრძელი ფესვები უშუალო შეხებაში უნდა იყოს ტოქსიკანტთან. ამიტომ მცენარეებს ამ შრისთვის ფესვთა სისტემის ზომის და დეტოქსიკაციის უნარის მიხედვით არჩევენ. ისინი ტოქსიკურ ნაერთებს იწოვენ და მათ დეგრადაციას ახდენენ.

ამ მეთოდით სუფთავდება ორგანული და არაორგანული არაფიტოტოქსიკური ნაერთებით დაბინძურებული ნიადაგი.

დაახლოებით ამავე პრინციპებით იქმნება ფიტორემედიაციული ბუფერული ზონები და სანაპირო კორიდორები. ისინი წარმოადგენენ ხელოვნურ ჭალებსა და კორომებს, რომლებსაც ქიმიური დაბინძურების კერების მიმდებარე ტერიტორიებზე, წყალსატევებისა და მდინარეების გასწვრივ აშენებენ.

## 6.9 ატმოსფერული ჰაერის გასუფთავება

ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების განვითარებისას უმთავრესი ყურადღება ნიადაგის ან წყლის რემედიაციას ეთმობა, მაგრამ არანაკლებ მნიშვნელოვანია ქიმიურად დაბინძურებული ჰაერის გასუფთავების მეთოდების და საშუალებების ძიება. ჰაერის დაბინძურების პრობლემის გლობალურობასა და აქტუალობაზე ის ფაქტიც მეტყველებს, რომ ატმოსფეროს სისუფთავებზე ზრუნვამ პოლიტიკური ხასიათიც შეიძინა — მთელი მსოფლიოს მოწინავე სახელმწიფოების მმართველი ორგანოების მიერ ხელმოწერილი და რატიფიცირებულია არაერთი ხელშეკრულება, დეკლარაცია და კონვენცია (მაგ., 1987 წლის მონრეალის პროტოკოლი, 1992 წლის კიოტოს პროტოკოლი, 1992 წლის რიოს დეკლარაცია, 1997 წლის ორპუსის დეკლარაცია და სხვ.), რომლებიც ამ ქვეყნებს ავალდებულებენ მაქსიმალურად შეზღუდონ და მკაცრად აკონტროლონ ტოქსიკური ნაერთების ატმოსფეროში განბნევა.

ჰაერის დაბინძურების პრობლემებზე მომუშავე სპეციალისტების მთავარი სტრატეგიაა ისეთი ტექნოლოგიებისა და გამწმენდი ნაგებობების შექმნა, რომლებიც საწარმოებისა და ტრანსპორტის მუზე აირების ატმოსფეროში მოხვედრის შესაძლებლობას მინიმუმამდე შეამცირებენ. სადღეისოდ ცნობილია მრავალი ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური მეთოდი, რომლებიც ჰაერის გასაწმენდად გამოიყენება. ბიოეკოლოგიური ტექნოლოგიები სპეციალური კონსტრუქციის

მქონე ბიოფილტრების, ბიოსკრუბერებისა და ბიორეაქტორების გამოყენებით რეალიზდება. ბიოფილტრის ძირითად ელემენტს მყარ მატარებელზე (ტორფზე ან სინთეზურ მასალაზე) იმობილიზებული ბიომასა წარმოადგენს. ბიოფილტრის მოქმედების დროს ამ ბიოელემენტზე მექანიკური ფილტრის საშუალებით ტოქსიკური ნაერთები აღსორბირდება, რის შემდეგაც ტოქსიკანტების მიკრობიოლოგიური დეგრადაცია იწყება. ბიოფილტრების ხანგრძლივი და ეფექტური მოქმედებისათვის აუცილებელი პირობაა ბიოფილტრის არეში გარკვეული რაოდენობის ტენის არსებობა, წინააღმდეგ შემთხვევაში ფილტრი შრება, იზზარება და მიკროორგანიზმების ფიზიოლოგიური აქტივობა მნიშვნელოვნად მცირდება, რაც საბოლოო ჯამში ბიოფილტრის მოქმედების ეფექტურობას აქვეითებს. ბიოფილტრები ერთმანეთისაგან განსხვავდება მასში გამოყენებული მიკროორგანიზმების სახეობების მიხედვით, რომლებიც გარკვეული ტოქსიკური ნაერთის მიმართ სპეციფიკურობით გამოირჩევიან.

ბიოფილტრებისაგან განსხვავებით, ბიოსკრუბერებში ტოქსიკანტი წყლიანი ფაზის მიერ აღსორბირდება, შემდგომ კი გადადის ბიორეაქტორში, რომელშიც მოთავსებულია მიკროორგანიზმებიანი მყარი მატარებელი ან აქტიური ლამი. აქ მიმდინარეობს ტოქსიკური ნაერთის აერობული ან ანაერობული დეგრადაცია.

მიკროორგანიზმების დეგრადატორულ უნარზე დაფუძნებულ სხვა ბიორეაქტორებში ძირითად მოქმედ ნაწილს იმობილიზებული მიკროორგანიზმების შრე წარმოადგენს, რომელიც წყლიან არეშია მოთავსებული. ამ არეში მოხვედრილი ტოქსიკანტი ბიოსრეზე სორბირდება და მიკროორგანიზმების მიერ ასიმილაციას და მეტაბოლურ გარდაქმნებს ექვემდებარება. ამ ტიპის ბიორეაქტორის მოქმედების სიჩქარე ლიმიტირებულია ტოქსიკანტის წყალში ხსნადობით და ბიომასის მიერ მისი გარდაქმნის უნარით.

ატმოსფეროს ქიმიური დაბინძურებლების შთანთქმისა და გაუვნებელყოფის მიზნით მცენარეების გამოყენება უადრესად ეფექტური და პერსპექტიულია. ამ მიმართულებით მცენარის ეკოლოგიური პოტენციალის შესწავლაში დიდი წვლილი მიუძღვის გამოკვლევებს, რომლებიც საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ბიოქიმიისა და ბიოტექნოლოგიის ინსტიტუტში აკადემიკოსების ს. ღურმიშიძისა და დ. უგრეხელიძის თაოსნობით ჯერ კიდევ ოთხი ათეული წლის წინ დაიწყო. ამ პერიოდში შესწავლილია 100-ზე მეტი ერთწლიანი და მრავალწლიანი მცენარე, მათ შორის ბალახოვნები, ბუჩქები, ხე-მცენარეები, რომლებსაც უნარი აქვთ ფოთლებით შთანთქმან და მეტაბოლურად დაშალონ 150-მდე ტოქსიკური ნაერთი, რომლებიც სხვადასხვა ქიმიურ კლასს მიეკუთვნება (ნახშირბადის, აზოტისა და გოგირდის ოქსიდები, ალკანები, ალკენები, ციკლოალკანები, არენები, პოლიციკლური არომატული ნაერთები, სპირტები, ფენოლები, ალდეჰიდები, კეტონები, მათი ნიტრო-, ამინო- და ჰალოგენწარმოებულები და სხვ.). აღნიშნული კვლევების შედეგების საფუძველზე შემუშავებულია “მწვანე ფილტრის” კონცეფცია, რომელიც გულისხმობს მაღალი ეკოლოგიური პოტენციალის მქონე მცენარეების მიზანმიმართულ განაშენიანებას ქიმიური დაბინძურების კერების

გარშემო, ავტომაგისტრალების გასწვრივ და ა.შ. სავსე ექსპერიმენტების საშუალებით დადგენილია, რომ “მწვანე ფილტრს” შეუძლია მნიშვნელოვნად შეამციროს გარემოდან ადამიანისაკენ მიმართული ქსენობიოტიკების ნაკადი.

ჰაერის დაბინძურების პრობლემის გადასაწყვეტად ფიტორემედიაციური მცენარეების გამოყენება უდიდეს უპირატესობას იძლევა სხვა ნებისმიერ სხვა მეთოდთან შედარებით ეს, უპირველეს ყოვლისა, იმაში მდგომარეობს, რომ ფიტოტექნოლოგია მუდმივმოქმედი და არაუიზარ სპეციალურ დანადგარებს არ მოითხოვს. მისი განხორციელებისას უმთავრესია ფიტორემედიაციური უნარის მქონე მცენარის სწორად შერჩევა და მთელი რიგი ფაქტორების გათვალისწინება, როგორებიცაა: ნიადაგის ტიპი, ქარების მიმართულება და სიჩქარე, ქიმიური დაბინძურების ხასიათი, თვით ტოქსიკანტის ბუნება და ა.შ. მთელ რიგ რეკომენდაციებში მოცემულია სამიარუსიანი “მწვანე ფილტრის” გაშენება: პირველი იარუსი უნდა შედგებოდეს ბალახოვანი მცენარეებისაგან, მეორეს წარმოადგენენ ბუჩქები, ხოლო მესამეს — ხე-მცენარეები. “მწვანე ფილტრის” ასეთი სტრუქტურა განპირობებულია იმით, რომ მცენარეთა ფოთლებს მაქსიმალურად დიდი კონტაქტი უნდა ჰქონდეთ ჰაერის ძირითად დამბინძურებლებთან, რომლებიც საშუალო კუთრი სიმკვრივის გამო მიწის ზედაპირიდან დაახლოებით 1.5 მ სიმაღლეზე კონცენტრირდებიან.

მცენარულ “მწვანე ფილტრს” ძალზე ეფექტურად შეუძლია შეაკავოს ავტორანსპორტის გამონაბოლქვში შემავალი ტოქსიკური ნაერთები — ნახშირბადის მონოოქსიდი, აზოტისა და გოგირდის ოქსიდები, არომატული ნახშირწყალბადები და სხვ. მაგ., ავტომაგისტრალების გასწვრივ რეკომენდირებულია ხუთრიგისანი მცენარეული ზოლის გაშენება, რომლის პირველი ოთხი რიგი 70 სმ-მდე სიმაღლის ბუჩქებისაგან (ძირითადად თუთისა და თრიმლისაგან) შედგება, ხოლო მეხუთე რიგს 6—8 მ სიმაღლის 12 წლიანი ხე-მცენარეები (ნეკერჩხალი, არყის ხე, თელა) წარმოადგენენ. დადგენილია, რომ ასეთი “მწვანე ფილტრი” ნახშირბადის მონოოქსიდის გავრცელების შესაძლებლობას 60—70%-ით ამცირებს.

უდიდესი ეკოლოგიური მნიშვნელობა აქვს მცენარეების ფოთლებისა და წიწვების მიერ კვამლის, აეროზოლებისა და მტერის მაკრო- და მიკრონაწილაკების შეკავებას. როგორც წესი, ამ ნაწილაკებზე აღსორბირებულია საწარმოებისა და ავტომობილების გამონაბოლქვში შემავალი მრავალი კანცეროგენული ნაერთი, მათ შორის ბენზოლი, ტოლუოლი, ბენზპირენი და სხვ. არენების შთანთქმისა და დეგრადაციის უნარის მიხედვით მცენარეები ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან. ამ შემთხვევაში გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ფოთლების აღსორბციული ზედაპირის საერთო ფართობს, ბაგეების განლაგებას და მათ სიხშირეს, კუტიკულის სისქეს, ნახშირწყალბადების დეგრადაციაში მონაწილე ფერმენტების შემცველობას და მათ აქტივობას. მაგ., დადგენილია, რომ ბენზოლისა და ტოლუოლის შთანთქმის მიხედვით მცენარეები შეიძლება დაიყოს ძლიერ, საშუალო და სუსტ შთანთქმელებად (ცხრილი 6.5). არომატული ნახ-

შირწყალბადების შთანთქმის უნარს რაოდენობრივად თუ გამოვსახავთ, ზოგიერთი მცენარის 1 კგ მწვანე ფოთოლს დღე-ღამის განმავლობაში 1-დან 10 მგ-მდე ბენზოლის ან ტოლუოლის შეთვისება შეუძლია. ამ მონაცემებიდან გამომდინარე, ადვილი წარმოსადგენია, როგორი მნიშვნელოვანი რაოდენობით ტოქსიკანტის მოცილება შეუძლია მცენარეს ატმოსფეროდან.

## ცხრილი 6.5

მცენარეთა ჯგუფები ატმოსფეროდან ბენზოლისა და ტოლუოლის ფოთლებით შთანთქმის უნარის მიხედვით  
მცენარეები ერთმანეთისაგან მტერისა და აეროზოლების შეკაების უნარის

სუსტი შთანთქმელები (0.001-დან 0.100 მგ-მდე)*	საშუალო შთანთქმელები (0.1-დან 1.0 მგ-მდე)*	ძლიერი შთანთქმელები (1.0-დან 10.0 მგ-მდე)*
<i>Aloe sp.</i>	<i>Alnus barbata</i>	<i>Acer campestre</i>
<i>Apteryx australis</i>	<i>Diospyros lotus</i>	<i>Amigdalus communis</i>
<i>Cupressus sempervirens</i>	<i>Fraximus excelsior</i>	<i>Amorpha fruticosa</i>
<i>Ficus carica</i>	<i>Gleditschia triacanthos</i>	<i>Castanea sativa</i>
<i>Ligustrum vulgare</i>	<i>Laurus nobilis</i>	<i>Catalpa bignonioides</i>
<i>Lycopersicum esculentum</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Cerasus avium</i>
<i>Mespilus germanica</i>	<i>Pinus eldarica</i>	<i>Cerasus vulgaris</i>
<i>Morus alba</i>	<i>Pinus sp.</i>	<i>Elaeagnus angustifolia</i>
<i>Pelargonium roseum</i>	<i>Populus tremula</i>	<i>Juglans regia</i>
<i>Persica vulgaris</i>	<i>Prunus armenicana</i>	<i>Lolium perene</i>
<i>Phragmites communis</i>	<i>Thea sinensis</i>	<i>Malus domestica</i>
<i>Picea abies</i>	<i>Tija sp.</i>	<i>Platanus orientalis</i>
<i>Platanus sp.</i>	<i>Ulmus fliacea</i>	<i>Populus canadensis</i>
<i>Prunus divaricata</i>	<i>Vitis vinifera</i>	<i>Pyrus caucasica</i>
<i>Prunus vachuschtii</i>		<i>Robina pseudacacia</i>
<i>Punica granatum</i>		<i>Salix alba</i>
<i>Rhododendron ponticum</i>		<i>Siringa vulgaris</i>
<i>Rosa sp.</i>		<i>Sophora japonica</i>
<i>Solanum tuberosum</i>		<i>Zelcova caprinifolia</i>
<i>Tilia caucasica</i>		
<i>Zea mays</i>		

\* მოცემულია 1 კგ მწვანე ფოთლის მიერ დღე-ღამის განმავლობაში შთანთქმული ბენზოლის ან ტოლუოლის მასა

მიხედვითაც განსხვავდებიან. ეს თვისება ფოთლოვან მცენარეებში უფროა გამოხატული, მაგ., თუ 1 კა სოჭის ტყე ყოველწლიურად 32 ტონა მტვერს ბოჭკოს, იგივე ფართობის წიფლის ტყეს 68 ტონა მტვერის შეკავება შეუძლია. კიდევ უფრო ეფექტური ხე-მცენარეა თელა, რომლის ბუსუსებიანი ფოთლები იდეალურია მტვერის მიკრონაწილაკებისაგან ჰაერის გასაფილტრად. მიუხედავად ფოთლოვანი მცენარეების ასეთი უპირატესობისა, წიწვოვნები მაინც შეუცვლელია იმ თვალსაზრისით, რომ ეს მარადმწვანე მცენარეები “მწვანე ფილტრის” ფუნქციებს მთელი წლის განმავლობაში ასრულებენ.

## 6.10 ფიტორემედიაციაში გამოყენებული მცენარეები

ფიტორემედიაციული ღონისძიებებისათვის მცენარის შერჩევის პროცესი საკმაოდ რთულია, რამდენადაც მრავალი პარამეტრის განსაზღვრას, დაზუსტებას და მათ კომპლექსურ გაანალიზებას მოითხოვს. ექვევარეშეა, რომ ნებისმიერ შემთხვევაში მცენარე თავის გარკვეულ წვლილს შეიტანს ქიმიურად დაბინძურებული გარემოს რემედიაციაში, მაგრამ ისიც ცხადია, რომ გარკვეული კრიტერიუმების გათვალისწინება უფრო მეტ შესაძლებლობას იძლევა მაქსიმალურად გამოიყენოთ მცენარეების ეკოლოგიური პოტენციალი.

ფიტორემედიაციული ღონისძიების დაგეგმვის საწყის ეტაპზე ხდება ტექნოლოგიის შერჩევა და რემედიაციული მიზნების ჩამოყალიბება. შემდგომი ეტაპია დაბინძურებული ადგილის დახასიათება, რისთვისაც საჭიროა განისაზღვროს დაბინძურების ტიპი, რაც გულისხმობს ტოქსიკანტის იდენტიფიკაციას, მისი კონცენტრაციის და ლოკალიზაციის დადგენას. უნდა დაზუსტდეს ნალექების რაოდენობა, ტემპერატურის ცვალებადობა, განათების ინტენსივობა და ა.შ. ასევე მნიშვნელოვანია ნიადაგის დახასიათება მისი მარილიანობის, pH-ის, ტენიანობის და მექანიკური სტრუქტურის მიხედვით. საჭიროა აგრეთვე დაწერილებითი ინფორმაცია იმის შესახებ, თუ რომელი მცენარეებია გავრცელებული მოცემულ ადგილზე. აღნიშნული პარამეტრების დადგენის შემდეგ ხდება მცენარის შერჩევა გარკვეული კრიტერიუმების მიხედვით თავს მცირეოდენი ფანტაზიის უფლებას თუ მოეცემთ, ძნელი არ იქნება წარმოვიდგინოთ, რა მოთხოვნებს უნდა აკმაყოფილებდეს იდეალური ფიტორემედიაციური მცენარე: მას უნდა გააჩნდეს კარგად განვითარებული ფესვთა სისტემა, უნდა წარმოქმნიდეს დიდ ბიომასას, იყოს მდგრადი დამბინძურებული ნაერთის მიმართ და ფლობდეს იმ ფიზიოლოგიურ და ბიოქიმიურ მექანიზმებს, რომლების საშუალებითაც ხორციელდება ნაერთების შთანთქმა, ტრანსლოკაცია, აკუმულაცია და/ან დეტოქსიკაცია. ცალკე მხარეა ექსუდატების გამოყოფის და ნიადაგის მიკროფლორასთან შეგუების უნარი, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს მცენარის ფიტორემედიაციულ პოტენციალს. აუცილებელია, ასეთ მცენარეს გააჩნდეს მაღალი რუხისტენენტულობა ექსტრემალური ტემპერატურების, პათოგენების, მწერების,

მარილიანობის, pH-ის, მომატებული ტენიანობის, გვალვის და სხვა სტრეს-ფაქტორების მიმართ. ყოველთვის ამის გათვალისწინებით ხდება ფიტორემედიაციისათვის ერთწლიანი, ორწლიანი ან მრავალწლიანი მცენარეების შერჩევა.

ფიტორემედიაციის განხორციელების შემდგომ ეტაპზე ხდება კულტურაციის მონიტორინგი, რაც გულისხმობს დათესვის მეთოდის შერჩევას, თესვების დამუშავებას და ნიადაგში მათი შეტანის სიღრმის დადგენას.

დაბინძურებული ობიექტის ფიტორემედიაციის საბოლოო ეტაპია ირიგაციული ღონისძიებები, pH-ის კონტროლი, პარაზიტებისაგან და ჩამოცვენილი ფოთლებისგან ფართობების დაცვა და მზადება მოსავლის აღებისათვის. ძალიან ხშირად ფიტოტექნოლოგიების რეკლამენტში დაწერილებითაა აღწერილი ფიტორემედიაციაში გამოყენებული მცენარეული ბიომასის უტილიზაციის პროცედურებიც.

ფიტორემედიაციაში გამოყენებული მცენარის ყველაზე მნიშვნელოვანი ნაწილია ფესვი, რადგან ტოქსიკანტის ბიოდეგრადაცია ხდება ფესვის ექსუდატით მიკროორგანიზმების სტიმულაციის გზით ან ფესვის სისტემაში არსებული ფერმენტული სისტემებით. ამდენად, ფესვების ტიპი და ფორმა (მთავარდერძიანი, ფუნჯა) მნიშვნელოვნად განაპირობებს რემედიაციის ეფექტურობას. აუცილებელი პირობაა ისიც, რომ დაბინძურებული და მცენარის ფესვი ერთ სიღრმეზე იმყოფებოდნენ. ფესვების ეფექტური სიღრმე იცვლება სახეობების მიხედვით. ამიტომ ამა თუ იმ მეთოდისთვის მცენარის შერჩევა ფესვთა სისტემის თავისებურებების გათვალისწინებით ხდება.

მცენარის ფესვის მაქსიმალური სიღრმე უმეტეს სიტუაციებს არ შეეფერება, რაც განპირობებულია ნიადაგობრთ-კლიმატური პირობებით (მაგ., ნიადაგის არასასურველი ტენიანობა, ან დიდ სიღრმეზე ცუდი ნიადაგობრთი პირობები). ბალახოვანი მცენარეების სახეობების დიდი ნაწილისათვის ფიტორემედიაციის ეფექტური სიღრმე მხოლოდ 30–60 სმ-ია, ეინაიდან მათი ფესვების 90% ამ სიღრმეზეა განლაგებული. ხეების ფესვების ეფექტური სიღრმე 3–6 მ-ია, თუმცა ცალკეული ფესვები გაცილებით უფრო ღრმადაც შეიძლება ჩადიოდეს ნიადაგში. ზოგიერთ ტექნოლოგიაში, მაგ., ფიტოპიდრაულიკაში, საჭიროა, რომ ფესვის სიღრმე 9 მ-საც კი აღწევდეს, რათა მან გრუნტის წყლებიდან მოახდინოს დაბინძურებლის ექსტრაქცია.

ფიტორემედიაციაში გამოყენებული მცენარისათვის დიდი ნაკლია ნელი ზრდა, ეინაიდან მცენარის ზრდის სიჩქარე მნიშვნელოვნად განაპირობებს რემედიაციის სიჩქარეს. მაგ., რიზოდეგრადაციისათვის, რიზოფიტორაციისა და ფიტოსტაბილიზაციისათვის სასურველია ფესვების სწრაფი ზრდა, ხოლო ფიტოექსტრაქციისათვის — ბიომასის სწრაფი დაგროვება მცენარის მიწისზედა ნაწილში. მეტალოიდი პიპერაკუმულატორებს ამ ტოქსიკანტების საკმაოდ მაღალი კონცენტრაციით დაგროვება შეუძლიათ, თუმცა მათი ბიომასა და ზრდის სუსტი სიჩქარე ნიშნავს, რომ მოცილებული მეტალების ჯამური მასა მცირე იქნება. ამ დროს ფიტორემედიაციული თვალსაზრისით ისეთი მცენარე უფრო

გამოსადგვია, რომელიც ჰიპერაკუმულატორი არ არის, მაგრამ უფრო მეტ ბიომასას წარმოქმნის, რადგან საერთო ჯამში უფრო მეტ მეტალს მოაცილებს დაბინძურებული ნიადაგიდან ან წყლიდან. სწორედ ამ მიზნით ფართოდ გამოიყენება ვერხვი, რომელიც ზრდის მაღალი სიჩქარით გამოირჩევა — ამ ხე-მცენარის ცალკეული ჰიბრიდები წელიწადში საშუალოდ 3–4 მ-ით იზრდება.

ხშირ შემთხვევაში ფიტორემედიაციაში შერეული სახეობების გამოყენება უფრო ეფექტურია, ვიდრე რომელიმე მონოკულტურის. ამ დროს გასათვალისწინებელია ადელოპათიურობა (იხ § 6.3). სასურველია, შერჩეული მცენარეები ადაპტირებული იყვნენ ლოკალურ გარემოსთან.

## 6.10.1 ტრანსგენური მცენარეები ფიტორემედიაციაში

უკანასკნელი ათწლეულის მანძილზე ფიტორემედიაცია კონცეპტუალური, მეთოდოლოგიური მიდგომიდან ეკოლოგიური მნიშვნელობის მქონე კომერციულ ტექნოლოგიად გადაიქცა. განუხრელად მატულობს იმ კომპანიების რიცხვი, რომლებიც ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების პრაქტიკაში დანერგვით არიან დაინტერესებული. შესაბამისად, ფიტორემედიატორული თვისებების მქონე მცენარეებზე სულ უფრო მეტი მოთხოვნილება ჩნდება, რომლის დაკმაყოფილებაც ჩვეულებრივ სელექციურ მეთოდებს აღარ ძალუძთ. ამჟამად საქმეში აქტიურადაა ჩართული გენური ინჟინერიის მეთოდები, რომელთა მიზანსაც ტრანსგენური ფიტორემედიატორი მცენარეების შექმნა წარმოადგენს. ამგვარი პროგრესის საფუძველი გახდა იმ გენების აღმოჩენა, რომლებიც მცენარეების დეტოქსიკაციურ თვისებებს განაპირობებენ.

ფიტორემედიატორი მცენარე, როგორც წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, განსაზღვრული მორფოლოგიური, ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური მახასიათებლებით უნდა გამოირჩეოდეს. გენური ინჟინერიის სამიზნე უპირტესად ის ფერმენტებია, რომლებიც ტოქსიკური ნაერთების მიმართ მცენარის ტოლერანტობას განაპირობებენ და ამ ნაერთების მეტაბოლიზებისა და უტილიზაციის პროცესში მონაწილეობენ. ძალიან ხშირად მცენარის მდგრადობა სწორედ იმ ფერმენტების აქტიურობითაა განპირობებული, რომლებიც ტოქსიკანტის დეგრადაციასა და/ან კონიუგაციაში არიან ჩართული. სწორედ ეს შემთხვევაა განსაკუთრებით ხელმისაწვდომი გენურ-ინჟინრული მიდგომისათვის — საკმარისი ხდება მცენარეში ერთი კონკრეტული ფერმენტის გენის გადატანა ან გაძლიერება, რომ მან ტოქსიკური ნაერთის მაღალ კონცენტრაციებს გაუძლოს და მათი გარემოდან მოცილება ეფექტურად მოახდინოს. ცხადია, რომ გენის გადატანა და ექსპრესია იმ მცენარეებში ხდება, რომლებსაც შესაბამისი მორფო-ფიზიოლოგიური ნიშან-თვისებები გააჩნიათ კარგად განვითარებული ფესვთა სისტემა, სწრაფი ზრდის უნარი, კონიუგატებისა და მძიმე მეტალების დაგროვე-

ბისათვის საკმარისი მოცულობის უჯრედშორისი სივრცე და ა.შ.

მცენარეების ფიტორუმედიაციული თვისებების გაუმჯობესების მიზნით გენურ-ინჟინრული სამუშაოები მხოლოდ ათი წელია მიმდინარეობს და პირველი ტრანსგენური ფიტორუმედიატორი მცენარის საეულე გამოცდა აშშ-ში 2003 წელს ჩატარდა. მიუხედავად ამისა, ეს მიმართულება უადრესად სწრაფი ტემპებით ვითარდება და სადღეისოდ უკვე ასამდე ტრანსგენური მცენარეა შექმნილი. ქვემოთ განვიხილავთ მხოლოდ ზოგიერთი მნიშვნელოვანი კვლევის შედეგებს და რამდენიმე წარმატებით განხორციელებულ პროექტს ტრანსგენური ფიტორუმედიატორების შექმნის სფეროში.

ერთ-ერთი უპირველესი ფერმენტი, რომლის მცენარეებში კლონირებაც საეცილისტებმა მიზანშეწონილად ჩათვალეს, გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზაა. ეს ფერმენტი მონაწილეობს როგორც ნორმალურ მეტაბოლურ პროცესებში, ასევე სტრესული სიტუაციების მიმართ მცენარის თავდაცვით რეაქციებში. ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის მრავალი პროცესი გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზის უშუალო მონაწილეობით მიმდინარეობს, ვინაიდან გლუტათიონთან დაკავშირების რეაქცია მნიშვნელოვანი სტადიაა როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული ტოქსიკური ნაერთების გაუნებელყოფისა და აკუმულაციის პროცესში. ორგანული ნაერთების მნიშვნელოვანი ნაწილი სწორედ გლუტათიონთან კონიუგირდება, ხოლო მძიმე მეტალები ამ ტრიპეპტიდთან უხსნად, ნაკლებად მობილურ ნაერთს წარმოქმნიან და მცენარისათვის უვნებელი ფორმით აკუმულირდებიან. გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზა რამდენიმე იზოფორმის სახით არსებობს და მრავალი კვლევით სამუშაო სწორედ იმის დადგენას მიეძღვნა, თუ რომელი ფორმა მონაწილეობს კონკრეტული ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციაში, რის შემდეგაც შესაძლებელი გახდა გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზის მაღალი შემცველობის მქონე მცენარე-ტრანსფორმანტების მიღება.

ბუნებრივია, გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზის აქტიობა თავისუფალი გლუტათიონის შიდაუჯრედული ფონდით ლიმიტირდება. აქედან გამომდინარე, ტოქსიკური ნაერთის უტილიზაციის პროცესის ინტენსიობაც ამ ტრიპეპტიდზე უნდა იყოს დამოკიდებული. ამის გამო ტრანსგენურ მცენარეების შექმნისას ყურადღება ექცევა არამარტო გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზას, არამედ γ-გლუტამილცილისტინ სინთაზასაც (EC 6.3.2.2), რომელიც გლუტათიონის ბიოსინთეზის ერთ-ერთი საკვანძო ფერმენტი. სწორედ ამ ფერმენტის მაკოდირებელი ბაქტერიული გენის კლონირება მოახდინეს ვერხეში, რომელიც ბევრი ნიშნისთვის, განსაკუთრებით კი მორფოლოგიური და ფიზიოლოგიური მახასიათებლებით საესებით აკმაყოფილებს ფიტორუმედიაციული ტექნოლოგიების ძითათად მოთხოვნებს. საერთოდ, ეს მცენარე ერთ-ერთი პირველია, რომელსაც ფიტორუმედიაციულ ტექნოლოგიებში, კრძოდ მძიმე მეტალების ფიტოექსტრაქციაში იყენებდნენ, ამიტომ ბუნებრივია, რომ გენური ინჟინერიის მანიპულაციებით პირველად ამ მცენარეზე ჩატარდა. მიღებული კლონი შეადარეს ვერხის პიბრიდს და აღმოჩნდა, რომ ტრანსგენური მცენარეები აცეტილენური პერ-



ბიციდებით — მეტოლაქლორითა და აცეტოქლორით დაბინძურებულ ნიადაგებზე ზრდისას ჩვეულებრივ პიბრიდთან შედარებით გაცილებით მეტ ბიომასას წარმოქმნიან. გარდა ამისა, კლონების ფოთლებში  $\gamma$ -გლუტამილციისტიენის ზემაღალი კონცენტრაციები და მნიშვნელოვნად მომატებული გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზის აქტივობაც დაფიქსირდა.

გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზისა და  $\gamma$ -გლუტამილციისტიენ სინთაზას გენების ექსპრესია ან კლონირება წარმატებით გამოიყენება, როგორც ორგანული ტოქსიკანტების, ისე მძიმე მეტალების მიმართ ტოლერანტული და ჰიპერაკუმულატორული თვისებების მქონე მცენარეების მისაღებად.

კიდევ უფრო მეტი წარმატებაა მიღწეული ტრანსგენური მცენარეების შექმნაში, რომლებიც სპეციალურად არის გამიზნული ფეთქებადი ნიტრო-ნაერთებით დაბინძურებული ობიექტების ფიტორემედიაციისათვის. ასეთ მცენარეებში კლონირებულია ბაქტერიული ფერმენტის, პენტაერითროლ-ტეტრანიტრატ-რედუქტაზის (EC 1.6.99.7) გენი. ამის შედეგად მცენარეებში მნიშვნელოვნად იზრდება ნიტრორედუქტაზის აქტივობა, რომელიც უშუალოდ მონაწილეობს TNT-ს და სხვა ფეთქებადი ნაერთების ნიტრო-ჯგუფების აღდგენაში. TNT-ს და ტრინიტროგლიცერინის შემცველ ხსნარებზე ეს ტრანსგენური მცენარეები ინტენსიურად იზრდებიან, დიდი რაოდენობით ტოქსიკანტებს ითვისებენ და მათ დენიტრირებასაც ახდენენ. კლონირებული მცენარეები ძალიან თვალსაჩინოდ განსხვავდებიან საკონტროლო მცენარეებისაგან, რომელთა განვითარება იგივე პირობებში მნიშვნელოვნად ითრგუნება. კლონირებულ მცენარეებს შორის TNT-ს მიმართ მაღალი ტოლერანტობა, ამ ნაერთის განსაკუთრებით დიდი რაოდენობების სწრაფად შთანთქმისა და ასიმილაციის ყველაზე მაღალი უნარი ტრანსგენურ თამბაქოს აღმოაჩნდა. ეს ტრანსფორმანტი მაღალი ეფექტურობით შეიძლება იქნას გამოყენებული სამხედრო პოლიგონებისა და არსენალების ნიადაგების, აგრეთვე სამხედრო ქარხნების ჩამდინარე ტექნიკური წყლების გასასუფთავებლად, სადაც TNT-ით დაბინძურება აქტუალურ ეკოლოგიურ პრობლემას წარმოადგენს.

ფიტორემედიაციაში გენური ინჟინერიის მეთოდების გამოყენებას უდიდესი პერსპექტივები აქვს. მიუხედავად მიღწეული პროგრესისა, შეიძლება ითქვას, რომ მოლეკულური ბიოლოგიისა და გენეტიკის შესაძლებლობები ამ ეტაპზე მხოლოდ უმნიშვნელოდაა რეალიზებული. სადღეისოდ ბევრი კვლევებია მიმართული დიდი ბიომასის მქონე, სწრაფად მზარდი ჰიპერაკუმულატორების შექმნის მიზნით, რის უპირველეს ამოცანასაც იმ გენების გამოლენა წარმოადგენს, რომლებიც მცენარეების ჰიპერაკუმულატორულ თვისებებს განსაზღვრავენ. გენურ-ინჟინერიული მიდგომა ჯერონად არ შეუბია მუანგველ ფერმენტებს, რომლებიც საკვანძოა ქსენობიოტიკების ბიოდეგრადაციაში. მხოლოდ რამდენიმე სამუშაოა ჩატარებული, რომლებიც სხვადასხვა მცენარეში ციტოქრომ P450-ის გენების გადატანას ეხება. მიღებული შედეგების მიხედვით ამკარად ჩანს, რომ ასეთ ტრანსგენურ მცენარეებს პერბიციდების და სხვა ტოქსიკანტების მიმართ მომატებუ-

ლი მდგრადობა და მათი ტრანსფორმაციის მაღალი უნარი გააჩნიათ კიდევ უფრო მცირე რაოდენობით სამუშაოები ეხება პეროქსიდაზების გაძლიერებას მცენარეში, რაც ასევე უდავოდ პერსპექტიულია. მხოლოდ ახლა ყურება საფუძველი ლაკაზისა და ფენოლოქსიდაზის ამ კუთხით შესწავლას. შეიძლება ითქვას, რომ მძლავრი მეთანგველი ფერმენტების მქონე ტრანსგენური მცენარეების შექმნა ფიტორემედიაციას ახალ, ფართო შესაძლებლობებს მიანიჭებს და მის ხვალისდედელ დღეს წარმოადგენს.

## 6.11 საქართველოს ფლორა და ფიტორეგენიაცია

საქართველოში გარემოს ქიმიური დაბინძურების პრობლემას, სამწუხაროდ, ნაკლები ყურადღება ექცევა და იგი ერთ-ერთ უკანა პლანზეა გადაწეული. ამასთან, სრულიად რეალურია საფრთხე, რომ არსებული რთული ეკოლოგიური სიტუაცია მომავალში კიდევ უფრო გამწვავდეს, რადგან მატულობს ქიმიური დაბინძურების წყაროები სატრანსპორტო დერეფნების, სამრეწველო ცენტრების, ნავთობისა და გაზის მაგისტრალების, ნავთობის მოპოვება-გადამუშავების, სასოფლო-სამეურნეო სამუშაოების, სამხედრო სწავლებების და სხვათა სახით. ამდენად, ქიმიური დაბინძურებისაგან თავდაცვის სტრატეგიის შემუშავების აუცილებლობა ეჭვს არ იწვევს. ვფიქრობთ, ამ სტრატეგიაში ორი ძირითადი მიმართულება უნდა გამოიკვეთოს:

1. გარემოს სრულყოფილი მონიტორინგის განხორციელება, რაც ნიადაგში, წყალსა და ჰაერში ტოქსიკური ნაერთების კონცენტრაციის განსაზღვრას და მათ სისტემატურ კონტროლს გულისხმობს. საქართველოში არსებულ ეკოლოგიურ მდგომარეობას ამძიმებს ის გარემოება, რომ გარემოს ქიმიური დაბინძურების შესახებ ინფორმაცია მწირია, ან პრაქტიკულად არ არსებობს. ცხადია, ამის მიზეზს მონიტორინგისათვის საჭირო სათანადო სამეცნიერო-ტექნიკური ბაზის უქონლობა წარმოადგენს. სადღეისოდ მხოლოდ ერთეულ ლაბორატორიებს თუ ხელწიფებათ საერთაშორისო სტანდარტების დონეზე განსაზღვრონ ამა თუ იმ ტოქსიკური ნაერთის კონცენტრაცია გარემოს ობიექტებში.
2. თანამედროვე ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების დანერგვა — ფიტორემედიაციის მიღწევები გარემოს ქიმიური დაბინძურების თავიდან აცილების რეალურ შესაძლებლობას იძლევა. გზატკეცილები, ნავთობისა და გაზის მაგისტრალები, სამხედრო პოლიგონები, სასოფლო-სამეურნეო საეარგოლები, თბოელექტროსადგურები, ნავთობის ტერმინალები, მოქმედი თუ მიტოვებული საწარმოები და ქიმიური დაბინძურების სხვა პოტენციური კერების არსებობა საქართველოში ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების დანერგვის აუცილებლობას მოითხოვს.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ დიდი სიფრთხილვა საჭირო უცხო, თუნდაც მაღალი ეკოლოგიური პოტენციალის მქონე მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების ინტროდუქციებისას, განსაკუთრებით კი ტრანსგენური მცენარეების გამოყენებისას, რათა საფრთხე არ შეექმნას ადგილობრივ ბიომრავალფეროვნებას. გერმანული ანდაზა გვაფრთხილებს: “ვინც ნაძვის ტყე გააშენა, მან იქ სხვა მცენარეები გაანადგურაო”. ამ ანდაზის სიბრძნე სწორედ იმაში მდგომარეობს, რომ ერთი რომელიმე სახეობისათვის ხელსაყრელი პირობების ხელონურად შექმნა მეტად საშიშია სხვა სახეობებისათვის, რამდენადაც მათი განადგურების რისკ-ფაქტორს წარმოადგენს. სწორედ ამიტომ, დროულად უნდა შემუშავდეს საქართველოში ქიმიურად დაბინძურებული გარემოს გაწმენდა-ადგენისა და მისი ხანგრძლივი დაცვის ისეთი სტრატეგია, რომელიც ადგილობრივ ეკოლოგიურ ინტერესებს გაითვალისწინებს და ბიომრავალფეროვნების დაცვას უზრუნველყოფს.

საქართველოში ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების დანერგვის და ახალი, ეფექტური ტექნოლოგიების შემუშავების შესაძლებლობებს არსებული სამეცნიერო ინტელექტუალური ბაზა და, რაც უფრო მთავარია, ჩვენი ქვეყნის უმდიდრესი მცენარეული სამყარო იძლევა. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ბიოქიმიისა და ბიოტექნოლოგიის ინსტიტუტში ამ მიმართულებით — ადგილობრივი მცენარეების ეკოლოგიური პოტენციალის გამოსამქვედვებლად — კვლევა ჯერ კიდევ გასული საუკუნის 60-იან წლებში დაიწყო. ეს კვლევები მსოფლიოს სამეცნიერო წრეების მიერ მცენარეთა ქსენობიოქიმიის პიონერულ შრომებად არის აღიარებული. ამ დარგში მოღვაწე ქართველი მეცნიერები — სერგი ღურმიშიძე, დევი უგრეჭელიძე, მარლენ გორდუზიანი, გიორგი კვესიტაძე და სხვები მაღალი საერთაშორისო ავტორიტეტით სარგებლობენ ქსენობიოქიმიისა და ეკოლოგიური ქიმიის სფეროში. განვლილ პერიოდში გამოვლენილია, რომ საქართველოს ფლორის მრავალ ენდემურ წარმომადგენელს ახასიათებს ისეთი თვისებები, რომლებიც ფიტორემედიაციაში მათი წარმატებით გამოყენების საშუალებას იძლევა (იხ. ცხრილი 6.5). ამის მაგალითად შეიძლება დავასახელოთ თუნდაც ძელქვა — წითელ წიგნში შეტანილი მცენარე, რომლის ფოთლებსაც შეუძლიათ ისეთი საშიში კანცეროგენების შეითვისება და სრულად გაუვნებელყოფა, როგორიცაა არომატული ნახშირწყალბადები — ბენზოლი და ტოლუოლი (ამ მცენარის 1 კგ ფოთოლი დღე-ღამეში რამდენიმე მგ ტოქსიკანტს შთანთქავს).

მრავალწლიანი და მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული მონაცემები დამაჯერებლად მეტყველებენ იმაზე, რომ საქართველოში ფიტორემედიაციას მყარი საფუძველი ექნება მრავალფეროვანი ფლორის სახით. მცენარეული სამყაროს ფართო სპექტრის არსებობას ის ფაქტორი განაპირობებს, რომ ნიადაგობრივ-კლიმატური პირობების მხრივ საქართველო უნიკალური ქვეყანაა — მცირე ტერიტორიის მიუხედავად, ჩვენს ქვეყანაში შეიძლება შევხედეთ დედამიწის ზედაპირზე არსებული ჰაის თითქმის ყველა ზონას, დაწყებული ნოტიო სუბ-

ტროპიკულიდან, დამთავრებული მარადი თოვლისა და მყინვარების ზონით ბუნებრივი პირობების მრავალფეროვნების გამო საქართველოში თითქმის ყველა ტიპის ნიადაგია. გამოიყოფა სამი ნიადაგური ოლქი: დასავლეთის, აღმოსავლეთისა და სამხრეთის. თითოეულ მათგანში ნიადაგთწარმოქმნელი პირობებისა და პროცესების მიხედვით გამოიყოფა ზონები და ქვეზონები, ხოლო ამ უკანასკნელთა ფარგლებში — რაიონები და ქვერაიონები. სულ საქართველოში 49 ნიადაგური რაიონი და 169 ქვერაიონია.

საქართველო სხვადასხვა გენეზისის ფიტოლანდშაფტების შესაყარზე მდებარეობს. მის ტერიტორიაზე ჩამოყალიბებულია ერთმანეთისაგან რადიკალურად განსხვავებული ტიპის ბუნებრივ-ტერიტორიული კომპლექსები (ლანდშაფტები), მაგ.: ნახევარუდაბნო — აღმოსავლეთ საქართველოში, ნოტიო სუბტროპიკული — დასავლეთ საქართველოში და მარადთოვლიან-მყინვარებიანი (გლაციალურ-ნივალური) — ქვეყნის ჩრდილოეთ ნაწილში. საქართველოში, როგორც ძირითადად მთაგორიან ქვეყანაში, სრული სპექტრით არის წარმოდგენილი ბუნებრივი კომპონენტები და შესაბამისად, ლანდშაფტური ზონები, რომლებიც სიმაღლის მიხედვით იცვლება. ამასთან, მთიანეთშორის დადაბლებაში განვითარებულია ნოტიო, ზომიერად ნოტიო და მშრალი სუბტროპიკების, ვაკე-დაბლობებისა და წვრილმთიანეთისათვის დამახასიათებელი სხვადასხვა სახის ბუნებრივ-ტერიტორიული კომპლექსები. საქართველოს ტერიტორიაზე სულ 11 ტიპისა და 27 ქვეტიპის 100-ზე მეტი სახის ლანდშაფტია გავრცელებული, კერძოდ, ამ ლანდშაფტების ტიპებია:

1. კოლხური ნოტიო სუბტროპიკული ვაკე-დაბლობები;
2. ზომიერად მშრალი სუბტროპიკული ვაკე-ეკლიანი სტეპი;
3. მშრალი სუბტროპიკული ვაკე-სტეპი;
4. მშრალი სუბტროპიკული ვაკე-წვრილმთიანეთის სტეპური და მარიდული ტყე-ბუჩქნარები;
5. ზომიერად ნოტიო სუბტროპიკული ვაკე;
6. ნახევრადუდაბნოს ვაკე-დაბლობები;
7. ნოტიო კოლხური ტიპის მთა-ტყე;
8. ზომიერად ნოტიო აღმოსავლეთ ამიერკავკასიური ტიპის მთა-ტყე;
9. მთის სტეპი;
10. მაღალმთის მთა-მდელო;
11. მაღალმთის გლაციალურ-ნივალური.

საქართველოში შედარებით მცირე ტერიტორიებზე განვითარებულია მრავალფეროვანი მცენარეული ფორმაციები — აღმოსავლეთ საქართველოს მშრალი მთისწინეთის ნახევარუდაბნოებიდან და კოლხეთის ამავე სარტყლის ტენიანი, თითქმის სუბტროპიკული კლიმატის დაბურული ტყეებიდან დაწყებული, მაღალი მთების მკაცრი კლიმატის თავისებური მცენარეულობით დამთავრებული. საქართველოში რელიეფის დანაწევრებამ და ქედების რთულმა კონფიგურაციამ განაპირობა ეკოსისტემების გეოგრაფიული და ეკოლოგიური იზოლა-

ცია, რითაც აიხსნება ადგილობრივი ენდემური მცენარეების მრავალფეროვნება. საქართველოში იზრდება კავკასიონის, კოლხეთის, იბერიის, წინა აზიის და სხვა ენდემები. ზოგიერთი მონაცემებით, საქართველოში გვხვდება: 5000-მდე კელური (ან გაველურებული) ფარულ- და შიშველთესლოვანი მცენარე; 8300-მდე სპოროვანი მცენარე, მათ შორის დაახლოებით 75 სახეობის გვიმრანაირი, 600 სახეობის ზაესი, 600 სახეობის მღიერი, 5000 სახეობის სოკო; 2000-მდე სახეობის წყალმცენარე.

მრავალფეროვანია საქართველოში ინტროდუცირებული მცენარეების სპექტრიც, რაშიც უდიდესი წვლილი შეაქვთ ჩვენს ქვეყანაში არსებულ ბოტანიკურ ბაღებს, ნაკრძალებსა და ტყე-პარკებს. მათგან უძველესი — სოხუმის ბოტანიკური ბაღი<sup>4</sup> ჯერ კიდევ 1840 წელსაა დაარსებული. ბოტანიკურ ბაღებს უდიდესი მნიშვნელობა აქვთ მცენარეთა გენეტიკური ბიომრავალფეროვნების შენარჩუნებაში, ეკოსისტემებისა და სახეობების მიზანშეწონილად გამოყენებაში, ინტროდუცირებული მცენარეების ადგილობრივ პირობებთან ადაპტაციის ბიოეკოლოგიური საკითხების შესწავლის, მეურნეობებისათვის პერსპექტიული მცენარეების შერჩევისა და გავრცელების საქმეში, აგრეთვე ძირითადი ეკოლოგიური პროცესების შესწავლაში.

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ცენტრალურ (თბილისის) და ბათუმის ბოტანიკურ ბაღებში ერთობლივად 15 სხვადასხვა ფიტო-გეოგრაფიული განყოფილებაა წარმოდგენილი (ცხრილი 6.6).

ბათუმის ბოტანიკურ ბაღის კოლექცია შედგება მერქნიან მცენარეთა 2037 ტაქსონომიური ერთეულისაგან. მათგან 104 კავკასიური წარმოშობისაა, ხოლო 1900 ტაქსონზე მეტი საზღვარგარეთის სხვადასხვა ფლორის წარმომადგენელია. შედარებით მდიდარია აღმოსავლეთ აზიის განყოფილება, რომელიც 816 ტაქსონომიურ ერთეულს ითვლის. ჩრდილოეთ ამერიკა — 331, ავსტრალია — 110, ხმელთაშუა ზღვის რეგიონი — 56, ჰიმალაი — 54, სამხრეთ ამერიკა — 27, მექსიკა — 22, ახალი ზელანდია — 19, ხოლო სამხრეთი აფრიკა — 4 ტაქსონითაა წარმოდგენილი. ბაღში იზრდება აგრეთვე 111-მდე სხვადასხვა სახეობა და 382 კულტურული ფორმა. ქვემოთ წარმოვადგენთ ზოგიერთ მათგანს.

ბაღში გაშენებულია მარადმწვანე, დიდტანოვანი, ჩრდილო-ამერიკული ვეიშუტის ფიჭვი (*Pinus strobus*), დიდყვავილა მაგნოლია (*Magnolia grandiflora*), იაპონური კამელია (*Camelia japonica*), კორპის მუხა (*Quercus occidentalis*),

<sup>4</sup> სამწუხაროდ, გასაგები მიზეზების გამო, ჩვენ არ გავაჩნია სარწმუნო ცნობები სოხუმის ბოტანიკური ბაღის დღევანდელი მდგომარეობის შესახებ. ავტორები იმედს იტოვებენ, რომ ყველა ჩვენთაგანის სანუკარი ოცნების ახდენით — საქართველოს ტერიტორიული მთლიანობის აღდგენით გამოწვეული სიხარული იმის სტიმულიც გახდება, რომ ეს მონოგრაფია ახალი რედაქციით გამოიცეს და სოხუმის უნიკალური ბოტანიკური ბაღის შესახებ მონაცემებითაც შეივსოს. ასევე იმედი, რომ ამ დროისათვის საქართველოში უკვე დანერგულ ფიტორეპედიაციულ ტექნოლოგიებზეც ვისაუბრებთ.

## ცხრილი 6.6

თბილისისა და ბათუმის ბოტანიკური ბაღების ფიტო-გეოგრაფიული  
(ფლორისტულ-გეოგრაფიული) განყოფილებები

თბილისის	ბათუმის
აღმოსავლეთ აზიის	აღმოსავლეთ აზიის
იაპონია-ჩინეთის	ახალი ზელანდიის
ხმელთაშუა ზღვის	ხმელთაშუა ზღვის
ჩრდილოეთ ამერიკის	ჩრდილოეთ ამერიკის
დასავლეთ საქართველოს	ავსტრალიის
აღმოსავლეთ ამიერკავკასიის	სამხრეთ ამერიკის
პირკანის	მექსიკის
ევროპის	ევროპის
პიმალაის	პიმალაის
შორეული აღმოსავლეთის	ამიერკავკასიის სუბტროპიკული

ჩვენი ფლორის ერთ-ერთი უძველესი რელიქტური მცენარე — აღმოსავლური წიფელი (*Fagus orientalis*), აქვე იზრდება ვაშინგტონია მძლავრი (*Washingtonia robusta*) და აჭარის ფლორის ენდემური მცენარე — ხემარწყვა (*Arbutus andrachne*). ფართოდაა წარმოდგენილი ციტრუსები — ტევანისებრთა (*Rutaceae*) ოჯახი: ფორთოხლის (*Citrus sinensis*), მანდარინის (*Citrus nobilis*), ღიმონის (*Citrus limon*), ციტრონის (*Citrus medica*), ნარინჯის (*Citrus aurantium*), გრეიპფრუტის (*Citrus paradisi*), ყინვაგამძლე იაპონური მანდარინი უნშიუს (*Citrus unshiu*) ნარგავების სახით აქვეა იაპონური მუშმულის (*Eryobotria japonica*) და იაპონური სკიმიის (*Skimia japonica*) ბუჩქები, ჭრელფოთოლა ჭყორის ხე (*Ilex*). საინტერესოა აგრეთვე წიწვოვანი მცენარე ჩინური კუნინგჰამია (*Cunninghamia lanceolata*), ბრაზილიის არაუკარია (*Araucaria brasiliensis*), სხვადასხვა სახეობის ფოთოლმცენი მაგნოლიები (*Magnolia*), კალიკანტუსები (*Calycanthus*), იაპონური კრიპტომერიის (*Cryptomeria japonica*), პალმისებრი (*Acer palmatum*) და ჭრელფოთოლა ამერიკული ნეკერჩხლების (*Acer*) განუმეორებელი ფორმები, პალმები: მარაოსებრი (*Trachycarpus fortunei*), დაბალი პალმა — საბალი (*Sabal glabra*), კანარიის (*Phoenix canariensis*), გლიპტოსტრობუსისებრი მეტასექვოია (*Metasequoia gliptostroboides*), სურნელოვანი და ჭყორფოთოლა ოსმანთუსები (*Osmanthus fragrans*, *Osmanthus heterophyllus*), მარადმწვანე მუხები (*Quercus*), ირმის რქა (*Lagerstroemia indica*), მიხელია (*Michelia*) — ძალზე სასიამოვნო სურნელოვანი ყვავილებით, იაპონური და მთის კამელიები (*Camelia japonica*, *Camelia sasangua*), არყის (*Betula*) მტირალა ფორმები,

ჰიმალაის კედრის (*Cedrus deodara*), აღმოსავლეთის ნაძვის (*Picea orientalis*) და სხვადასხვა სახეობის ფიჭვების მძლავრი, ტანმალალი ხეები.

სამხრეთ ამერიკის განყოფილებაში წარმოდგენილია ფეიპოა (*Acca sellowiana*) შესანიშნავი გემოს მქონე ნაყოფებით, პეუმუს ბოლდო (*Peumus boldus*), ბრაზილიური არაუკარია, კართაგენის მანიჰოტი (*Manihot carthagensis*), შინუსი (*Schinus*), აოკადო (*Persea gratissima*), ფსიდიუმი (*Psidium*), კატის ბრჭყალება ბიგნონია (*Bignonia unguis-cati*), პალმა ბუტია (*Butia capitata*), ბრაზილიის კუილაია (*Quillaya brasiliensis*), დარვინის კონსუერი (*Berberis darwinii*), ტირიფუთოლა თუთუბო (*Rhus viminalis*), ცესტრუმი (*Cestrum*), კამპასის ბალახი (*Cortaderia argentea*) და სხვა ნარგავები.

ახალზელანდიურ განყოფილებაში იზრდება სამხრეთის კორდილინა (დრაკენა) (*Cordyline australis*), ახალზელანდიური სელი (*Phormium tenax*), პიტოსპორუმი (*Pittosporum*), ლეპტოსპერმუმი (*Leptospermum*), შემოდგომა-ზამთარში მოყვავილე ჰებე ანდერსონი (*Hebe andersonii*) და სხვა მცენარეები.

ავსტრალიის განყოფილება მდიდარია ამ ქვეყნისათვის დამახასიათებელი ენდემური მცენარეული სახეობებით, გვარებით და ოჯახებით. აქ გვხვდება ეუკალიპტების (*Eucalyptus*) 50-მდე სახეობის მცენარე, ლეგა აკაცია — მიმოზა (*Acacia*), კალისტემონების (*Callistemon*) ჯგუფის მცენარეები, ტრისტანიას (*Tristania*), ლომაციას (*Lomacia*), კალიტრისის (*Callitris*) და სხვა მცენარეთა სახეობები.

ჰიმალაის განყოფილებაში თავმოყრილია მცენარეთა შემდეგი სახეობები: გრძელწიწვა და მსხვილგირჩა ახრუანი როგსბურგისა და გრიფიტის ფიჭვები (*Pinus roxburgii*, *Pinus griffithii*), კვიპაროსები (*Cupressus*), ჰიმალაური კედრის (*Cedrus deodora*) და ბამბუკების (*Bambusa*) ჯგუფები. აქვე გაშენებულია მურყანი ნეპალის (*Alnus nepalensis*), ინდიგოფერა გერარდის (*Indigofera gerardiana*), კოკულუსი (*Coculus*), ლოურერის დარიჩინი (*Cinnamomum loureri*), ალბიცები (*Albizia*), ჰიმალაის ნაძვი (*Picea morinda*), დიდებული სოჭი (*Abies spectabilis*), ჟაკ-მონტის არყი (*Betula jaquemontiana*), მარტიუსის მარაოსებრი პალმა (*Trachycarpus martiana*), ჩიტავშლები (*Pyracantha*) და სხვა სახეობის მცენარეები.

მექსიკის განყოფილებაში იზრდება მექსიკური ტაქსოდიუმის (*Taxodium mucronatum*) ჯგუფი თავისი მტირალა ფორმებით, გრძელწიწვიანი მონტეცუმას ფიჭვი (*Pinus montezumae*), აოკადო (*Persea*), პალმა ერითეა (*Erythea armata*) და სხვა. აქვე გაშენებულია მექსიკის ცხელი და მშრალი ჰავის მცენარეები, ე.წ. სუკულენტები: იუკა (*Iucca*), აგავა (*Agava*), ალოე (*Aloe*), დაზილირიონი (*Dassilirion*) და სხვ.

აღმოსავლეთ აზიის განყოფილება, ბათუმის ბოტანიკურ ბაღში, ფართობის სიდიდითა და კოლექციის სიმრავლით, ყველაზე მდიდარი განყოფილებაა. აქ იზრდება აღმოსავლეთაზიური წარმოშობის ისეთი სამრეწველო დანიშნულების მცენარეები, როგორცაა: აღმოსავლური ხურმა (*Diospiros kaki*), ჩაი (*Thea*), მანდარინი უნშიუ, ჩინური აქტინიდა (კივი) (*Actinidia chinensis*), ბამბუკები

(*Bambusa*), ტუნგო (*Aleurites*) და სხვა მრავალი. აქვე ხარობს: სწრაფმზარდი იაპონური მხეიარა მცენარე — შებუსეილი პუერარია (*Pueraria hirsuta*). კანარის ფინიკი (*Phoenix canariensis*), მანანის ეკალიპტი (*Eucalyptus viminalis*), პოდოკარპუსი (*Podocarpus*), იაპონური კრიპტომერია (*Cryptomeria japonica*), იაპონური ჭანჭყატი (*Euonymus japonica*) ინდოეთის რაფიოლეპი (*Raphiolepis indica*), ფინიკის პალმა, იაპონური ბანანი (*Musa japonica*), ჩინური ფაციები (*Fatsia papirifera*) და სხვა სახეობების წარმომადგენლები. გაშენებულია მარადმწვანე სეკუიის (*Sequoia sempervirens*), ლავსონის კვიპაროსის (*Chamaecyparis lawsoniana*), დეკორატიული იაპონური ალუბლის — საკურას (*Cerasus serulata*), იაპონური ნეკერჩხლის (*Acer japonicum*), კუდრანიის (*Cudrania*), იაპონური და მთის (ევგნოლის) კამელიების (*Camelia japonica*, *Camelia sasanqua*), ინდური იელის — “აზალიის” (*Rhododendron indicum*) და სხვა მცენარეთა ნარგავები. განყოფილებაში წარმოდგენილია მაღალდეკორატიული მცენარეები: მაგნოლიები (*Magnolia*), მიხელია — (*Michelia*), პაულოვია (*Paulownia*), ძახელი (*Vihurnum*), მარადმწვანე მუხები (*Quercus*), ირმის რქა (*Lagerstroemia indica*), დაფნიფილუმი (*Daphniphyllum*), გინკო (*Gincgo*), ინდური იასამანი (*Syringa indica*), პოენია ყუნწშაქარა (*Howenia dulcis*) — გემრიელი ნაყოფებით, მარაოსებრი პალმები-ტრახიკარპუსი (*Trachycarpus*), წიწვოვანი მცენარეები — კვიპაროსები (*Cupresus*), თუიოპსისი (*Thuyopsis*), მეტასეკუია (*Metasequoia*), ფიჭვები (*Pinus*), სციადოპიტისი (*Sciadopitys*), ნაძვები (*Picea*), იაპონური კრიპტომერია (*Cryptomeria japonica*), კუნინგამია (*Cunninghamia*) და სხვა სახეობები. განყოფილებაში უხვადაა წარმოდგენილი ბამბუკის (*Bambusa*) სხვადასხვა სახეობები.

ჩრდილოეთ ამერიკული განყოფილება წარმოდგენილია წყნარი ოკეანის მთიანი და ამერიკის სამხეთ-დასავლეთ შტატების მცენარეულობით. ამ განყოფილებაში გვხვდება: სხვადასხვა სახეობის მარადმწვანე და ფოთოლმცეკნი მაგნოლიები (*Magnolia*), კალიკანტუსები (*Calycanthus*), ამერიკული ნეკერჩხლები (*Acer*), ამერიკული არყის (*Betula*) და მუხების (*Quercus*) სხვადასხვა სახეობები, ლიქვიდამბარი ანუ ამბრის ხე (*Liquidambar*), კატალპეკი (*Catalpa*), ჩრდილო ამერიკის კაკლონების გვარის — პიკორის (კარიას) (*Carya*) სხვადასხვა სახეობები, ლირიოდენდრონი — ხეტიტა (*Liriodendron*), კალმიები (*Kalmia*). განყოფილებაში მრავლადაა წიწვოვანი მცენარეები: საკმეველის ფიჭვი (*Pinus taeda*), კანადის ცუგა (*Tsuga canadensis*), კვიპაროსები (*Cupresus*), ჰამეციპარისები (*Chamaecyparis*), ჭაობის კვიპაროსი — ტაქსოდოდი (*Taxodium distichum*) — თავისი სასუნთქი (საჰაერო) ფესვებით.

ხმელთაშუაზღვის განყოფილება მდიდარია ზღვისპირა ფიჭვით (*Pinus pinaster*), ბზის (*Buxus*) სახეობებით, ხერკინით (*Parrotia persica*), პალმა პომეროფსით (*Chamaerops humilis*), ქვა მუხის (*Quercus ilex*), წაბლფოთოლა (*Quercus castaneifolia*) და კორპის მუხების (*Quercus suber*) უიშეიათუსი ვებემპლარებით, შებუსეილი ცაცხვით (*Tilia tomentosa*), კეთილშობილი დაფნით (*Laurus*



*nobilis*), ჩვეულებრივი ოლეანდრით (*Nerium oleander*), ტყის წიფლის (*Fagus silvatica*) კულტურული ფორმით, ზეთისხილისა (*Olea europaea*) და სხვა სახეობებით.

ამიერკავკასიის ტენიანი სუბტროპიკების განყოფილება ძალზე მიწმიდგეული და საინტერესოა საქართველოს ფლორის უძველესი და უნიკალური კოლხეთის ტყის მცენარეულობით. იგი წარმოდგენილია მესამეული გეოლოგიური პერიოდის ისეთი რელიქტური სახეობებით, როგორცაა: უნგერნის და პონტოს შქერი (*Rhododendron ungerii*, *Rhododendron ponticum*), იელი (*Rhododendron luteum*), წყავი (*Laurocerasus officinalis*), წყავმაზა (*Phillyrea medwedewii*), მუხები — პართვისის, პონტოს, ჭოროხის (*Quercus hartwissiana*, *Quercus pontica*, *Quercus dschorochensis*), წაბლი (*Castanea*), წიფელი (*Fagus*), რცხილა (*Carpinus*), მურყანი (*Alnus*), ცაცხვი (*Tilia*), კავკასიური ხურმა (*Dyospiros lotus*), კოლხური ჯონჯოლი (*Staphyllea colchica*), ბალამწარა (*Cerasus avium*), თხილის (*Corylus*) სხვადასხვა სახეობები, კოლხური ბზა (*Boxsus colchica*), ფიჭვები: ელდარის, ბიჭვინთის, სოსნოსკის (*Pinus eldarica*, *Pinus pithyusa*, *Pinus Sosnowskyi*). მაღალმთიანი აჭარის წიწვოვანი მცენარეები: აღმოსავლეთის ნაძვი (*Picea orientalis*), ნორდმანის სოჭი (*Abies nordmaniana*), წითელი ღვია (*Juniperus*), ურთხელი-ურთხოარი (*Taxus baccata*) და სხვა. აქ გვხვდება აგრეთვე კავკასიის ფლორისათვის დამახასიათებელი მცენარეული სახეობები: ხერკინა (*Parrotia persica*), ლენქორანის ალბიცია (*Albizzia julibrissin*), სამეფო (*Osmunda regalis*) და სხვა სახეობის გვიმრების საკმაოდ დიდი ჯგუფი, მხვიარა მცენარეები — კოლხური სურო (*Hedera colchica*), ეკალღიჭი (*Smilax excelsa*), მაყვალი (*Rubus*) და მრავალი სხვა საინტერესო სახეობები.

ბოტანიკურ ბაღში შექმნილია საქართველოს იშვიათი და გაქრობის პირას მისული აბორიგენული ხეხილ-კენკროვანი ჯიშების საკოლექციო ნაკვეთი მათი კონსერვაციისა და ფართოდ გავრცელების მიზნით.

თბილისის ცენტრალურ ბოტანიკურ ბაღში 5000-მდე სახეობისა სახესხვაობისაგან შედგენილი ხე-ბუჩქისა და ყვავილოვან მცენარეთა კოლექციაა. აქ ხარობს წიწვოვნები — ესპანური, კილიკიური და ბერძნული სოჭები (*Abies pinsapo* Boiss, *Abies cilicica* Ant et Kotsch'y, *Abies cephalonica* (Endl.) Link.); პიმალაიური, იაპონური და მხხვლექტაი ნაძვები (*Picea morinda* Link., *Picea polita* Cart., *Picea pungens* Englm.); კულტურის, საბინის, პიმალაიური და ბუნგეს ფიჭვები (*Pinus*); სეკვოიადენდრონი — მამონტის ხე (*Sequoiadendron giganteum* Lindl.), ლიბოცედრუსი (*Libocedrus*), ცრუცუგა (*Pseudotsuga*) და სხვ.; ფოთლოვანებიდან — ამბრის ხე (ლიქვიდამბრი) (*Liquidambar styracifina* L.), ვერცხლფოთოლა და გრძელყუნწა ცაცხვები (*Tilia*), იაპონური და ამერიკული ხურმა (*Diospyros*), სტერკულია ანუ ხემაგარა (*Firmiana simplex* WF. Wight.), ხებურა (*Paulownia tomentosa*), იაპონური და პრიალა კვილოები (*Ligustum*), კორპის მუხა (*Quercus occidentalis*), ქვამუხა (*Quercus ilex* L.), ეკომია — გუტაპერჩის ხე (*Eucommia ulmoides* Oliv.), ხეტიტა (ლიროდენდრონი) (*Liriodendron*),

გინკო (*Ginkgo biloba* L.) და სხვ.; ადგილობრივი ძირითადი სამეურნეო მნიშვნელობის ხეებიდან — მუხა (*Quercus*), იფანი (*Fraxinus*), თელა (*Ulmus foliacea* Gilib.), ნეკერჩხალი (*Acer*), ძელქვა (*Zelcova caprinifolia*), უხრაყი (*Ostrya carpinifolia* Scop.) და სხვ.; დეკორატიული ბუჩქები — ჩიტავაშლა (*Pyracantha coccinea* Roem.), ძახველი (*Viburnum*), იაპონური კომში (*Chaenomeles japonica* (Thnb.) Lindl.), ირმის რქა (*Lagerstroemia indica*), უცვეთლა (*Philadelphus caucasicus* Koehne), ჟასმინი (*Jasminium*) და სხვ.

ჩვენი სამშობლოს მცენარეულ სამყაროზე — ამ თვალწარმტაც საგანძურზე ასეთი მშრალი თვალის გადაუღებაც კი გვიჩვენებს, თუ როგორი სიმდიდრე და სილამაზეა ჩვენს ირგვლოვ. მცენარეების გეგმაზომიერი განაშენიანება, მათი მოვლა და მოფრთხილება ჭეშმარიტად ჯანსაღ გარემოში ცხოვრების საშუალებას მოგვცემს.

## ლიტერატურა

- მ. გორდუზიანი, გ. კვესიტაძე. (2000) ეკოლოგიის ქიმიური საფუძვლები. თბილისი. 311 გვ.
- მ. გორდუზიანი, გ. ხატისაშვილი, ე. კირთაძე (2004) ბიოენერგეტიკა და ჟანგეთი პროცესების რეგულაცია. თბილისი. 245 გვ.
- მ. გორდუზიანი, გ. ხატისაშვილი (2005) მემბრანული ქსენობიოქიმია. თბილისი. 281 გვ.
- გ. კვესიტაძე, ე. კვესიტაძე (1999) ბიოტექნოლოგია. თბილისი. 432 გვ.
- ვ. პაპუნიძე, შ. ხიდაშელი, ვ. მემიაძე (1978) იშვიათი და გადაშენებამდე მისული ხეები და ბუჩქები საქართველოში (რუსულ ენაზე). ბათუმი: საბჭოთა აჭარა. 84 გვ.
- ვ. პაპუნიძე (1986) აჭარის ტყეების მრავალფუნქციონალური გამოყენების მეცნიერული საფუძვლები (რუსულ ენაზე). საკავშირო კონფერენცია: მთის ტყეების ეკოლოგიური როლი. ბაბუშკინო. 185—186.
- ვ. პაპუნიძე (1988) აჭარის რელიქტური ფლორა და მისი სახალხო მეურნეობრივი და ეკოლოგიური მნიშვნელობა (რუსულ ენაზე). დენდროლოგთა საერთაშორისო კონგრესი: ბუნებრივი გენოფონდის შენარჩუნების საკითხებზე. სოფია. 296—300.
- ვ. პაპუნიძე, გ. მოროზოვა, თ. ცხიძე, დ. გვიანიძე, ზ. ფერცელიძე, ნ. ბაგრატიშვილი, ლ. ლილუაშვილი (1989) ბათუმის ბოტანიკური ბაღის ხეები და ბუჩქები. შიშველთესლიანები. (რუსულ ენაზე). თბილისი: მეცნიერება. 164 გვ.
- ვ. პაპუნიძე (1998) საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ბათუმის ბოტანიკური ბაღი (ისტორიული ნარკვევი, მეგზური). ბათუმი: მეცნიერება. 154 გვ.
- ვ. პაპუნიძე (2000) აჭარის ტყეების ბიომრავალფეროვნება და მათი ეკოლოგიური როლი (ინგლისურ და ქართულ ენებზე). ეკოლოგიის პრობლემები. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი. 110—131.
- ვ. პაპუნიძე (2003) ბათუმის ბოტანიკური ბაღის როლი ბუნებათმცოდნეობისა და სოფლის მეურნეობის განვითარებაში. ჟურნალი "კვალი". N 4—5, 17—20.
- ვ. პაპუნიძე (2003) აჭარის ზღვის სანაპირო ზონის ინტროდუცირებულ მცენარეთა ფიზიოლოგიური შეგუებისა და ცვალებადობის კანონზომიერება. ბათუმის ბოტანიკური ბაღის მოამბე. N 32, 32—53.
- დ. უგრეხელიძე, ს. დურმიშიძე (1980) ბიოსფეროს ქიმიური გაჭუჭყიანება და მცენარე. თბილისი: მეცნიერება, 94 გვ.
- Арзиани Б.А., Угрехелидзе Д.Ш., Митаишвили Т.И. // Физиол. растений. 1983. Т. 30. С. 1040—1042.
- Арчаков А.И. (1983) Оксигеназы биологических мембран. XXXVII Баховские чтения. М.: Наука, 26 С.
- Бокрис Д.О.М (ред) (1982) Химия окружающей среды. М.: Химия, 1982. 671 С.

- Девдариани Т.В., Дурмишидзе С.В. (1983) Методы биохимических исследований растений. Тбилиси: Мецниереба, 1983. С. 101–124.
- Девдариани Т.В., Кавтарадзе Л.В., Кварцхава Л.Ш. (1979) Растения и химические канцерогены. Тбилиси: Мецниереба, С. 90–95.
- Дурмишидзе С.В., Девдариани Т.В., Кахниашвили Х.А., Буадзе О.А. (1988) Биотрансформация ксенобиотиков в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 287 с.
- Квеситадзе Г.И., Безбородов А.М. (2002) Введение в биотехнологию. М.: Наука, 284 с.
- Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Саденишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. (2005) Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука. (в печати).
- Корте Ф., Бахадир М., Клайн В., Лай Я.П., Парлар Г., Шойнерт И. (1996) Экологическая химия. М.: Мир, 395 с.
- Либберт Э. (1976) Физиология Растений. М.: Мир, 580 с.
- Русин В.Я. (1989) Вредные химические вещества. Л.: Химия, С. 415–436
- Угрехелидзе Д.Ш. (1976) Метаболизм экзогенных алканов и ароматических углеводов в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 223 с.
- Угрехелидзе Д.Ш., Дурмишидзе С.В. (1984) Поступление и детоксикация органических ксенобиотиков в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 230 с.
- Фелленберг Г. (1997) Загрязнение природной среды. М.: Мир, 232 с.
- Чкаников Д.И. (1985) Метаболизм 2,4-Д в растениях. Усп. совр. биол. 1985. Т. 99. С. 212–225.
- Эйхлер В. Яды в нашей пище. М.: Мир, 1985. 213 с.
- Adamia G, Khatishashvili G, Varazashvili T, Pruidze M, Ananiashvili T, Gvakharia V, Adamia T, Gordeziani M (2003) Determination of the type and rate of soil contamination with heavy metals and organic toxicants on the territories of military proving grounds in Georgia. Bull Georg Acad Sci 167: 155–158
- Adamia G, Ghoghoberidze M, Graves D, Khatishashvili G, Kvesitadze G, Lomidze E, Ugrekheldize D, Zaalishvili G (2005) Absorption, distribution and transformation of TNT in higher plants. Ecotoxicol Environ Saf (in Press)
- Adler T (1996) Botanical cleanup crews. Sci News 150: 42–43
- Andersen JK (2003) Paraquat and iron exposure as possible synergistic environmental risk factors in Parkinson's disease. Neurotox Res 5: 307–313
- Anderson TA, Walton BT (1995) Comparative fate of  $^{14}\text{C}$  trichloroethylene in the root zone of plants from a former solvent disposal site. Environ Toxicol Chem 14: 2041–2047
- Archakov AI (1983) Oxygenases of biological membranes (in Russian). XXXVII Bakhovskie Chteniya. Nauka, Moscow, pp 1–26
- ATSDR (2000) Toxicological profile for Arsenic. Final Report. US Department of Health and Human Services, Public Health Service. NTIS Accession No PB2000-

108021 Atlanta

- Banerjee HN, Verma M, Hou LH, Ashraf M, Dutta SK (1999) Cytotoxicity of TNT and its metabolites. *Yale J Biol Med* 72: 1–4
- Best EPH, Sprecher SL, Larson SL, Fredrickson HL, Bader DF (1999) Environmental behavior and fate of explosives from groundwater from the Milan Army Ammunition Plant in aquatic and wetland plant treatments. Uptake and fate of TNT and RDX in plants. *Chemosphere* 39: 2057–2072
- Best EPH, Kvesitadze G, Khatisashvili G, Sadunishvili T (2005) Plant processes important for the transformation and degradation of explosives contaminants. *Z Naturforsch C Biosci* 60 (*in Press*)
- Betsiashvili M, Sadunishvili T, Amashukeli N, Tsulukidze N, Shapovalova N, Dzumakashvili N, Nutsubidze N (2004) Effect of aromatic hydrocarbons on main metabolic and energetic enzymes in maize, ryegrass and kidney bean seedlings. *Bull Georg Acad Sci* 170: 172–174
- Boden TA, Kaiser DP, Sepanski RJ, Stoss FW (1994) Trends '93: a compendium of data on global change. Carbon Dioxide. Information Analysis Center Communications 20: 8–10
- Bond JA, Bradley BP (1997) Resistance to malathion in heat-shocked *Daphnia Magna*. *Environ Toxicol Chem* 16: 705–712
- Brazier M, Cole DJ, Edwards R (2002) O-Glucosyltransferase activities toward phenolic natural products and xenobiotics in wheat and herbicide-resistant and herbicide-susceptible black-grass (*Alopecurus myosuroides*). *Phytochemistry* 59: 149–156
- Bromilow RH, Chamberlain K, Evans AA (1990) Physicochemical aspects of phloem translocation of herbicides. *Weed Sci* 38: 305–314
- Brudenell AJP, Griffiths H, Rossiter JT, Baker DA (1999) The phloem mobility of glucosinolates. *J Exp Bot* 50: 745–756
- Bryant DW, McCalla DR, Leelsma M, Laneuville P (1981) Type I nitroreductases of *Escherichia coli*. *Can J Microbiol* 27: 81–86
- Buadze O, Kvesitadze G (1997) Effect of low-molecular weight alkanes on the cell photosynthetic apparatus. *Ecotoxicol Environ Saf* 38: 36–44
- Buadze O, Sadunishvili T, Kvesitadze G (1998) The effect of 1,2-benzanthracene and 3,4-benzpyrene on the ultrastructure on maize cells. *Int Biodeterior Biodegrad* 41: 119–125
- Bukovac MT, Petracek PD, Fader RG, Morse RD (1990) Sorption of organic compounds by plant cuticles. *Weed Sci* 38: 289–298
- Bunge M, Adrian L, Kraus A, Opel M, Lorenz WG, Andreesen JR, Görtsch H, Lechner U (2003) Reductive dehalogenation of chlorinated dioxins by an anaerobic bacterium. *Nature* 421: 357–360
- Burken JG (2003) Uptake and metabolism of organic compounds: green liver model.

- In: McCutcheon SC, Schnoor JL (eds) *Phytoremediation. Transformation and control of contaminants*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, pp 59–84
- Burken JG, Schnoor JL (1998) Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees. *Environ Sci Technol* 32: 3379–3385
- Chapple C (1998) Molecular-genetic analysis of plant cytochrome P450-dependent monooxygenases. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 49: 311–343
- Chekol T, Vough LR, Chaney RL (2002) Plant-soil-contaminant specificity and phytoremediation of organic contaminants. *Int J Phytoremediation* 4: 17–26
- Chkanikov DI (1985) Metabolism of 2,4-D in plants (in Russian). *Uspekhi Sovremennoi Biologii* 99: 212–225
- Chrikishvili D, Ugrekhelidze D, Mithaishvili T (1977) Products of phenol conjugation in maize (in Russian). *Bull Georg Acad Sci* 88: 173–176
- Chrikishvili D, Sadunishvili T, Zaalishvili G (2005) Benzoic acid transformation via conjugation with peptides and final fate of conjugates in higher plants. *Ecotoxicol Environ Saf* (*in Press*)
- Cohen SM (2001) Lead poisoning: a summary of treatment and prevention. *Pediatr Nurs* 27: 125–130
- Coleman JOD, Mechteld MA, Kalff B, Davies TGE (1997) Detoxification of xenobiotics in plants: chemical modification and vacuolar compartmentation. *Trends Plant Sci* 2: 144–151
- Commoner B (1994) The political history of dioxin. Keynote address at the 2nd Citizens Conf on Dioxin. St. Louis, <http://www.greens.org/s-r/078/07-03.html>
- Cummins I, Edwards R (2004) Purification and cloning of an esterase from the weed black-grass (*Alopecurus myosuroides*), which bioactivates aryloxyphenoxypropionate herbicides. *Plant J* 39: 894–904
- Cunningham SD, Shann JR, Crowley DE, Anderson TA (1997) Phytoremediation of contaminated water and soil. In: Kruger EL, Anderson TA, Coats JR (eds) *Phytoremediation of soil and water contaminants*. ACS Symp Ser No 664. Am Chem Soc, Washington
- Dietz AC, Schnoor JL (2001) Advances in phytoremediation. *Environ Health Perspectives* 109 Suppl 1: 163–168
- Dixon DP, Laphorn A, Edwards R (2002) Plant glutathione transferases. *Genome Biol* 3: 3004.1–3004.10
- Dresback K, Choshal D, Goyal A (2001) Phycoremediation of trichloroethylene (TCE) *Physiol Mol Biol Plants* 7: 117–123
- Durmishidze S, Ugrekhelidze D (1967) Assimilation and translocation of gaseous hydrocarbons by higher plants. In: 7th Int Congr Biochem. Tokyo, Abstr, p J-302
- Durmishidze S, Ugrekhelidze D, Kakhniashvili C (1982) Metabolism of phenoxyacetic acids in plants: conjugation products of phenoxyacetic and 2,4-dichlorophe-

- noxyacetic acids with peptides. In: 5th Int Congr Pestic Chem (JUPAC). Kyoto, Japan, Abstr, p Va-2
- Durst F (1991) Biochemistry and physiology of plant cytochrome P-450. In: Ruckpaul K (ed) *Frontiers in biotransformation*. Academic-Verlag, Berlin, vol 4, pp 191–232
- Eckardt NA (2001) Move it on out with MATEs. *Plant Cell* 13: 1477–1480
- Ellis LBM, Hou BK, Kang W, Wackett LP (2003) The University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation Database: post-genomic data mining. *Nucleic Acids Res* 31: 262–265
- EPA (1991) Air quality criteria for carbon monoxide. EPA, Office of Research and Development, Washington, EPA-600/B-90/045F
- EPA (1997) Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>). Summary report. <http://www.epa.gov/air/airtrends/sulfur.html>
- EPA (2000) Introduction on phyto-remediation EPA/600/R-99/107 [www.epa.gov/swertio1/download/remed/introphyto.pdf](http://www.epa.gov/swertio1/download/remed/introphyto.pdf)
- EPA (2001) Brownfields technology primer: selecting and using phytoremediation for site cleanup. 542-R-01-006, pp 1–24
- Esteve-Núñez A, Caballero A, Ramos JL (2001) Biological degradation of 2,4,6-trinitrotoluene. *Microbiol Mol Biol Rev* 65: 335–352
- Fay M, Donohue JM, De Rosa C (1999) ATSDR evaluation of health effects of chemicals. VI. Di(2-ethylhexyl)phthalate. *Toxicol Ind Health* 15: 651–746
- Fonné-Pfister R, Kreuz K (1990) Ring-methyl hydroxylation of chlortoluron by an inducible cytochrome P450-dependent enzyme from maize. *Phytochemistry* 29: 2793–2796
- French CE, Hosser SJ, DaviesGJ, Nicklin S, Bruce NC (1999) Biodegradation of explosives by transgenic plants expressing pentaerythritol tetranitrate reductase. *Nat Biotechnol* 17: 491–494
- Gordeziani M, Khatisashvili G, Ananiashvili T, Varazashvili T, Kurashvili M, Kvesitadze G, Tkhelidze P (1999) Energetic significance of plant monooxygenase individual components participating in xenobiotic degradation. *Int Biodeterior Biodegrad* 44: 49–54
- Grayson BT, Kleier DA (1990) Phloem mobility of xenobiotics. IV. Modeling of pesticide movement in plants. *Pestic Sci* 30: 67–79
- Guillén F, Gómez-Toribio V, Martýnez MJ, Martýnez AT (2000) Production of hydroxyl radical by the synergistic action of fungal laccase and aryl alcohol oxidase. *Arch Biochem Biophys* 382: 142–147
- Guo YL, Lambert GH, Hsu CC, Hsu MM (2004) Yucheng: health effects of prenatal exposure to polychlorinated biphenyls and dibenzofurans. *Int Arch Occup Environ Health* 77: 153–158
- Hannink N, Rosser SJ, French CE, Basran A, Murray JA, Nicklin S, Bruce NC (2001)

- Phytodetoxification of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase. *Nat Biotechnol* 19: 1168–1172
- Hannink N, Rosser SJ, Bruce NC (2002) Phytoremediation of explosives. *Crit Rev Plant Sci* 21: 511–538
- Harborne JB (1977) Introduction to ecological biochemistry. Natl Acad Press, London New York San Francisco
- Harms H, Bokern M, Kolb M, Bock C (2003) Transformation of organic contaminants by different plant systems In: McCutcheon SC, Schnoor JL (eds) Phytoremediation. Transformation and control of contaminants. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, pp 285–316
- Hamer T, Bidleman TF, Jantunen LMM, Mackay D (2001) Soil-air exchange model of persistent pesticides in the US Cotton Belt. *Environ Toxicol Chem* 20: 1612–1621
- Haynes CA, Koder RL, Miller A-F, Rodgers DW (2002) Structures of nitroreductase in three states. *J Biol Chem* 277: 11513–11520
- Hsu FC, Kleier DA (1990) Phloem mobility of xenobiotics. III. Sensitivity of unified model to plant parameters and application to patented chemical hybridizing agents. *Weed Sci* 38: 315–323
- Hughes JB, Shanks JV, Vanderford M, Lauritzen J, Bhadra R (1997) Transformation of TNT by aquatic plants and plant tissue cultures. *Environ Sci Technol* 31: 266–271
- IARC (1987) IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Overall Evaluations of Carcinogenicity. IARC, Lyon, France
- IPSC (1997) Nitrogen oxides. Environmental Health Criteria 188. 2<sup>nd</sup> edn. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc188.htm#SubSectionNumber:2.3.4>
- Johannes C, Majcherczyk A (2000) Natural mediators in the oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by laccase mediator systems. *Appl Environ Microbiol* 66: 524–528
- Kassel AG, Ghoshal D, Goyal A (2002) Phytoremediation of trichloroethylene using hybrid poplar. *Physiol Mol Biol Plants* 8: 1–8
- Khatisashvili G, Gordeziani M, Kvesitadze G, Korte F (1997) Plant monooxygenases: Participation in xenobiotic oxidation. *Ecotoxicol Environ Saf* 36: 118–122
- Khatisashvili G, Kvesitadze G, Adamia G, Gagelidze N, Sulamanidze L, Ugrekheldze D, Zaalishvili G, Ghoghoberidze M, Ramishvili M (2004) Bioremediation of contaminated soils on the former military locations and proving grounds in Georgia. *J Biol Phys Chem* 4: 162–168
- Kleier DA (1994) Phloem mobility of xenobiotics. V. Structural requirements for phloem-systemic pesticides. *Pestic Sci* 42: 1–11
- Kolattukudy PE (1980) Cutin suberin and waxes. In: Stumpf PK (Ed) The biochemistry of plants: a comprehensive treatise. vol 4. Lipids: Structure and Function.



- Natl Acad Press, New York, pp 571–645
- Korte F, Kvesitadze G, Ugrekhelidze D, Gordeziani M, Khatisashvili G, Buadze O, Zaalishvili G, Coulston F (2000) Review: Organic toxicants and plants. *Ecotoxicol Environ Saf* 47: 1–26
- Kumar P, Moran D (2002) Photochemical smog: mechanism, ill-effects, and control. *J TERI Inform Digest Energy Environ* 1: 445–456
- Kvesitadze G, Gordeziani M, Khatisashvili G, Sadunishvili T, Ramsden JJ (2001) Some aspects of the enzymatic basis of phytoremediation. *J Biol Phys Chem* 1: 49–57
- Kvesitadze G, Khatisashvili G, Sadunishvili T, Ramsden JJ (2005) Biochemical mechanisms of detoxification in higher plants: Basis of phytoremediation. Springer, Heidelberg (*In Press*)
- Marrs KA (1996) The function and regulation of glutathione S-transferases in plants. In: *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 47: 127–158
- Martinova E (1993) An ATP-dependent glutathione-S-conjugate “export” pump in the vacuolar membrane of plants. *Nature* 364: 247–249
- Mayer A (1987) Polyphenoloxidases in plants-recent progress. *Phytochemistry* 26: 11–20
- Morant M, Bak S, Moller BL, Werck-Reichhart D (2003) Plant cytochromes P450: tools for pharmacology, plant protection and phytoremediation. *Curr Opin Biotechnol* 2: 151–162
- Opresko DM (1998) Toxicity summary for 2,4,6-trinitrotoluene. [http://risk.lsd.oml.gov/tox/profiles/2\\_4\\_6\\_trinitrotoluene\\_f\\_VI.shtml](http://risk.lsd.oml.gov/tox/profiles/2_4_6_trinitrotoluene_f_VI.shtml).
- Palazzo AJ, Leggett DC (1986) Effect and disposition of TNT in a terrestrial plant. *J Environ Qual* 15: 49–52
- Paterson S, Mackay D, Tam D, Shiu WY (1990) Uptake of organic chemicals by plants: A review of processes, correlations and models. *Chemosphere* 21: 297–331
- Pesticide chemistry and bioscience. The food–environment challenge. (1999) Brooks GT, Roberts TR (eds) The Royal Society of Chemistry, Cambridge
- Peterson JS, Cairns CB (2003) Toxicity, nitrous dioxide. <http://www.emedicine.com/emerg/topic847.htm>
- Pidwirny M (1996) Formation of acid deposition. <http://royal.okanagan.bc.ca/mpid-wirny/atmosphereandclimate/formaciddep.html>
- Pridham JB (1958) Metabolism of phenolic compounds by the broad bean *Vicia faba*. *Nature* 182: 795–800
- Pruidze GK, Mchedlishvili NI, Omiadze NT, Gulua LK, Pruidze NG (2003) Multiple forms of phenol oxidase from Kolkhida tea leaves (*Camellia sinensis* L.) and *Mycelia sterilia* IBR 35219/2 and their role in tea production. *Food Res Int* 36: 587–595

- Raskin IP, Nanda Kumar BA, Dushenkov S, Blaylock MJ, Salt D (1994) Phytoremediation – using plants to clean up soils and waters contaminated with toxic metals. *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management VI*, ACS Industrial & Engineering Chemistry Division Special Symp. vol 1, Atlanta
- Roberts JR (1999) Metal toxicity in children. In: *Training manual on pediatric environmental health: putting it into practice*. Children's Environmental Health Network. Emeryville, <http://www.cehn.org/cehn/trainingmanual/pdf/manual-full.pdf>
- Robineau T, Batard Y, Nedelkina S, Cabello-Hurtado F, LeRet M, Sorokine O, Didierjean L, Werck-Reichhart D (1998) The chemically inducible plant cytochrome P450 CYP76B1 actively metabolizes phenylureas and other xenobiotics. *Plant Physiol* 118: 1049–1056
- Rodríguez-López JN, Fenoll LG, García-Ruiz PA, Varón R, Tudela J, Thorneley RNF, García-Cánovas F (2000) Stopped-flow and steady-state study of the diphenolase activity of mushroom tyrosinase. *Biochemistry* 39: 10497–10506
- Rodríguez-López JN, Lowe DJ, Hernández-Ruiz J, Hiner ANP, García-Cánovas F, Thorneley RNF (2001) Mechanism of reaction of hydrogen peroxide with horseradish peroxidase: identification of intermediates in the catalytic cycle. *J Am Chem Soc* 123: 11838–11847
- Salaün JP (1991) Metabolization de xenobiotiques par des monooxygenases a cytochrome P-450 chez les plantes. *Oceanis* 17: 459–474
- Salaün JP, Helvig C (1995) Cytochrome P450-dependent oxidation of fatty acids. In: Durts F, O'Keef DP (eds) *Drug metabolism and drug interactions*. Freund Publishing House, England, pp 12–49
- Salt DE, Blaylock M, Nanda Kumar PBA, Dushenkov VP, Ensley BD, Chet I, Raskin I (1995) Phytoremediation: a novel strategy for the environment using plants. *Biotechnology* 13: 468–474
- Salt DE, Smoth RD, Raskin I (1998) Phytoremediation. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol* 49: 643–668
- Samoiloff M (1998) Benzene toxicity. Benzene and derivatives. *Organic chemistry* 3. <http://xnet.rrc.mb.ca/martins/Organic%203/benzene.htm>
- Sánchez-Ferrer A, Rodríguez-López JN, García-Cánovas F, García-Carmona F (1994) Tyrosinase: a comprehensive review of its mechanism. *Biochim Biophys Acta* 1247: 1–11
- Sandermann H (1994) Higher plant metabolism of xenobiotics: the “green liver” concept. *Pharmacogenetics* 4: 225–241
- Schenckman JB, Cinti DL, Moldeus PW (1973) The mitochondrial role in hepatic cell mixed-function oxidations. *Ann NY Acad Sci* 212: 420–427
- Schnoor JL, Dee PE (1997) Phytoremediation. *Technology Evaluation Report TE-98-01*. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. Ser E. Iowa City

- Schnoor JL, Licht LA, McCutcheon SC, Wolfe NL, Carreira LH (1995) Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ Sci Technol* 29: 318A–323A
- Schoenmuth BW, Pestemer W (2004) Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT) Part 2: Fate of radio-labelled TNT in trees. *Environ Sci Pollut Res* 11: 331–339
- Schuler MA (1996) Plant cytochrome P450 monooxygenases. *Crit Rev Plant Sci* 15: 235–284
- Seidel K, Kickuth R (1967) Exkretion von Phenol in der Phyllosphäre von *Scirpus lacustris* L. *Naturwissenschaften* 52: 517–525
- Siegel BZ (1993) Plant peroxidases – an organismic perspective. *J Plant Growth Regul* 12: 303–312
- Sincero APP, Sincero GA (1999) Environmental engineering: a design approach. Prentice-Hall, New Jersey
- Spain JC, Hughes JB, Knackmuss H-J (eds) (2000) Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives. Lewis Publishers, Boca Raton London New York Washington
- Stahl JD, Aust SD (1995) Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. In: Spain JC (ed) Biodegradation of nitroaromatic compounds. Plenum Press, New York, pp 117–134
- Stiborova M, Anzenbacher P (1991) What are the principal enzymes oxidizing the xenobiotics in plants: cytochrome P-450 or peroxidase? *Gen Physiol* 10: 209–216
- Susarla S, Medina VF, McCutcheon SC (2002) Phytoremediation: an ecological solution of organic chemical contamination. *Ecolog Eng* 18: 647–658
- Thompson PL, Ramer LA, Schnoor JL (1998) Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees. *Environ Sci Technol* 32: 975–980
- Tsao DT (2003) Phytoremediation. Advances in biochemical engineering and biotechnology. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Ugrekheldize D, Korte F, Kvesitadze G (1997) Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. *Ecotoxicol Environ Saf* 37: 24–28
- Wetzel A, Sandermann H (1994) Plant biochemistry of xenobiotics: isolation and characterization of a soybean O-glucosyltransferase of DDT metabolism. *Arch Biochem Biophys* 314: 323–328
- Whelton BD, Peterson DP, Moretti ES, Dare H, Bhattacharyya MH (1997) Skeletal changes in multiparous, nulliparous and ovariectomized mice fed either a nutrient-sufficient or -deficient diet containing cadmium. *Toxicology* 119: 103–121
- Wolfe NL, Hoehamer CF (2003) Enzymes used by plants and microorganisms to detoxify organic compounds. In: McCutcheon SC, Schnoor JL (eds) Phytoremediation. Transformation and control of contaminants. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, pp 159–188

- 
- Young P (1996) The new science of wetland restoration. *Environ Sci Technol* 30: 292A–296A
- Zaalishvili G, Khatisashvili G, Ugrekheldze D, Gordeziani M, Kvesitadze G (2000) Plant potential for detoxification (Review). *Appl Biochem Microbiol* 36: 443–451
- Zaalishvili G, Lomidze E, Buadze O, Sadunishvili T, Tkheldze P, Kvesitadze G (2000) Electron microscopic investigation of benzidine effect on maize root tip cell ultrastructure, DNA synthesis and calcium homeostasis. *Int Biodeterior Biodegrad* 46: 133–140
- Zaalishvili G, Sadunishvili T, Scala R, Laurent F, Kvesitadze G (2002) Electron microscopic investigation of nitrobenzene distribution and effect on plant root tip cells ultrastructure. *Ecotoxicol Environ Saf* 52: 190–197

უზროსი კორე:იტორი	სიალა სსოიბე
კორე:იტორები:	მარინე ურუიბე
	მარისა ყურაშვილი
დამკაბალონებელი	ვიორგი აღამია
ოპერატორები:	მარინე მამუჩაძე
	ნანა ხალვაში
	ლარეჯან სინსაძე

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 29.08.2005  
ქალაქის ზომა 60X84 1/16  
ფიზიკური თაბახი 14,5  
შეკე. № 12  
გირაჟი 1000

**ფასი სახელშეკრულებო**

ISBN 99940-21-53-2



9 789994 102153 6

Email: [ajurapub@gol.ge](mailto:ajurapub@gol.ge)

---

ს.ს. «გაერთიანებული აჭარა», ბათუმი, გოგებაშვილის, 24  
ს.ს. «გაერთიანებული აჭარის» პოლიგრაფიული ცენტრი, კოსტავას, 5