

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გია ხუციშვილი

ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობების მდგრადობა-  
არამდგრადობის სტატიკის საკითხები სეისმური ძალების  
გათვალისწინებით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“ შიფრი 0406

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
24 ივლისი, 2015 წელი

საავტორო უფლება © 2015 წელი, გია ხუციშვილი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
სამშენებლო ფაკულტეტი  
ტექნიკური ექსპერტიზის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი ტ. კვიციანი  
რეცენზენტები: სრული პროფესორი დ. ბურდულაძე  
სრული პროფესორი ნ. შავლაყაძე

დაცვა შედგება 2015 წლის ” 24 ” ივლისს, 12.00 საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის  
სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი I, სასწავლო,  
სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია III სართული.  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 68.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭო მდივანი  
სრული პროფესორი

დ. ტაბატაძე

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ხუციშვილი გიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობების მდგრადობა-არამდგრადობის სტატიკის საკითხები სეისმური ძალების გათვალისწინებით“. ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი 24.07.2015

ხელმძღვანელი:

სრული პროფესორი:

ტ. კვიციანი

რეცენზენტი:

სრული პროფესორი

დ. ბურდულაძე

რეცენზენტი:

სრული პროფესორი

ნ. შავლაყაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2015 წელი

ავტორი: ხუციშვილი გია

დასახელება: ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობების მდგრადობა-  
არამდგრადობის სტატიკის საკითხები სეისმური ძალების  
გათვალისწინებით

ფაკულტეტი : სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვან-  
ილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევა-  
ში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება  
მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც  
მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან  
სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი  
ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებე-  
ბით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე  
ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართე-  
ბას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრო-  
მების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

ბუნებრივ მდგომარეობაში მთის ქანების მასივები განიცდიან მუდმივ და ძალიან რთულ ბუნებრივ ფაქტორების ზემოქმედებას. დამატებითი დატვირთვებით: ფილტრაციული, გათხრითი სამუშაოებით (საავტომობილო და სარკინიგზო ტრასების გაყვანა, სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვება და სხვა); სეისმური, აფეთქებითი და დროებითი დატვირთვებით ირღვევა ქანებში დამყარებული ბუნებრივი რეჟიმი, იცვლება დამაბულობის ველი, მასში წარმოიშვება დეფორმაციები და წარმოიქმნება ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობის ჩამონგრევა-ჩამოშვავების საშიშროება.

დისერტაციაში განხილულია სწორედ ეს მეტად აქტიური ამოცანა – მთის ქანების ფერდობის სტატიკური მდგრადობის შესახებ, რომლის შეფასება ხდება ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტის მეშვეობით.

- განხილულია ბუნებრივი ფერდობის, კარიერის ნაყარისა და ბორტების ზღვრული წონასწორობის პირობების შესწავლა დამაბულობი-დეფორმირებული მდგომარეობის მეთოდით;
- განხილულია სხვადასხვა პროფილის მქონე ფერდობის სტატიკურ მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდები;
- დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით გამოყვანილია ფერდოს პრიზმული მასივის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი პირველი რიგის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება;
- გამოკვლეულია პირველი რიგის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება, მიღებულია დაცურების ზედაპირის ამსახველი ზღვრული წონასწორობის მრუდის განტოლება, მრუდის ნებისმიერი მიდამოსათვის სიმრუდის რადიუსისა და სიმრუდის ცენტრის გამოსათვლელი ფორმულები;
- გამარტივებული მეთოდის გამოყენებით მიღებულია კლდოვან წრფივ ფერდოს მქონე ზედაპირზე სამკუთხა და ტრაპეციოდალური განიკვეთის მქონე ნაყარის ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტები;
- გაკეთებულია ფერდობის ჩამონაქცევი მასივის შემთხვევაში ძვრაზე მდგრადობის პირობების შეფასება და შედეგების ანალიზი;

- ერთიან სისტემაშია მოყვანილი სხვადასხვა ქვეყნებში ფერდობის გამაგრებით ღონისძიებებზე გამოყენებული კონსტრუქციები, ასევე ადგილობრივი ბუნებრივი პირობების გათვალისწინებით მეწყერის სტაბილიზაციის პირობები, რაც მეწყერის სტაბილიზაციის უზრუნველსაყოფად ოპტიმალური საინჟინრო ღონისძიებების შერჩევის საშუალებას იძლევა.

## Abstract

Under natural state rock massifs are affected by constant and very difficult natural factors. With additional loads: by filtration, excavation works (construction of road and railway tracks, mining of mineral products and etc), seismic, explosive and temporary loads natural condition in rock is disturbed, tension field is changed, deformations are formed into it and there is hazard of creeping and collapsing of natural and artificial slopes;

Given extremely active task is discussed in thesis – about statical stability of rock slopes of which estimation is done by slide safety factor;

- Studying of natural slopes, carrier bulk and limit equilibrium conditions are discussed according to methods of determining the stress - strain state ;
- Methods for the static stability calculation for different profile slopes are considered;
- Taking into account additional loads, nonlinear first order differential equations reflecting dangerous slide surface of slope prismatic massif is derived;
- nonlinear first order differential equations are studied, limit equilibrium curve equation reflecting slide surface, calculating formulas of curvature radius and curvature center for any curve zone are derived;
- With the use of simplified method, dump slide stability factor having triangular and trapezoid diameter on rocky linear slope surface is accepted;
- Slope avalanche, in case of massif slide stability conditions and analysis of the results are carried out;
- Structures used for slope reinforcement activities in different countries are given in unified system, as well as landslide stabilization conditions taking into account local natural conditions, which gives an opportunity to select optimal engineering measures for ensuring landslide stabilization.

## შინაარსი

ცხრილების ნუსხა .....	10
ნახაზების ნუსხა .....	10

### თავი 1

#### მთის ქანების ფიზიკო-მექანიკური მონაცემები

1.1. მთის ქანების სიმკვრიველი თვისებები .....	23
1.2. გასამაგრებელი ღონისძიებები მეწყერების სტაბილიზაციისთვის .....	25

### თავი 2

#### ფერდოს მდგრადობის გაანგარიშება ზღვრული

#### დაძაბული მდგომარეობით

2.1. მთის ქანები - ფენოვანი დაბზარული გარემო .....	39
2.2. მთის ქანების დეფორმაციული თვისებები .....	42
2.3. მთის ქანების სამთო-ტექნიკური თვისებები .....	47
2.4. ძაბვების დახასიათება .....	51
2.5. მთის ქანების ზღვრული წონასწორობის პირობა .....	57
2.6. მთის ღია სამუშაოების დროს მასივის ქანობის დაძაბული მდგომარეობის ცვლილება .....	66

### თავი 3

#### მეწყერების მექანიკა

3.1. ფერდოს გრუნტის დაცურების ზედაპირების სახეობები და ფერდობის კიდების ჩამოშლა (მეწყერი) .....	70
3.2. დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით ფერდოს ჩამონაქცევი მასის დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა და მისი გამოკვლევა .....	76
3.3. ფერდოს მდგრადობის შეფასება მდოვრე მრუდწირულ ზედაპირზე დაცურების შემთხვევაში .....	92
3.4. ძვრის ბრტყელი ზედაპირები .....	103
3.5. მეწყერ-ჩამონაქცევის წრიულ-ცილინდრული დაცურების ზედაპირები .....	106



3.6. სიბრტყეზე ძვრაზე მდგრადობის გაანგარიშების გამარტივებული მეთოდები .....	108
3.7. სამკუთხა განივი კვეთის მქონე ნაყარი .....	111
3.8. ტრაპეციოდალური განივი კვეთის ნაყარი მდგრადობაზე მარაგის კოეფიციენტი .....	112

#### თავი 4

##### ფერდობების და კარიერების ქანობების გამაგრების

##### ეფექტურობის პირობები

4.1. ფერდობის გამაგრების საშუალებები და მათი გამოყენების პირობები. გამაგრების საშუალებების საერთო დახასიათება .....	116
4.2. ფერდობის გამაგრების მექანიკური საშუალებები .....	119
4.3. ფერდობის განმტკიცება .....	128
4.4. ქანობების გამაგრების კომბინირებული საშუალებები .....	131
4.5. დრენაჟის დანიშნულება ფერდობის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად .....	132
4.6. თავისუფალი ბორტის დრენაჟი .....	135

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.1 .....	25
ცხრილი 4.1 .....	117

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1.1 .....	26
ნახ. 1.2 .....	27
ნახ. 1.3 .....	28
ნახ. 1.4 .....	30
ნახ. 1.5 .....	30
ნახ. 1.6 .....	31
ნახ. 1.7 .....	33
ნახ. 1.8 .....	34
ნახ. 1.9 .....	34
ნახ. 1.10 .....	35
ნახ. 1.11 .....	36
ნახ. 1.12 .....	37
ნახ. 2.1 .....	41
ნახ. 2.2 .....	43
ნახ. 2.3 .....	44
ნახ. 2.4 .....	46
ნახ. 2.5 .....	47
ნახ. 2.6 .....	52
ნახ. 2.7 .....	52
ნახ. 2.8 .....	55
ნახ. 2.9 .....	56
ნახ. 2.10 .....	60
ნახ. 2.11 .....	61
ნახ. 2.12 .....	63

ԲՆԵ. 2.13 .....	63
ԲՆԵ. 2.14 .....	64
ԲՆԵ. 2.15 .....	66
ԲՆԵ. 2.16 .....	68
ԲՆԵ. 2.17 .....	68
ԲՆԵ. 3.1 .....	71
ԲՆԵ. 3.2 .....	72
ԲՆԵ. 3.3 .....	73
ԲՆԵ. 3.4 .....	73
ԲՆԵ. 3.5 .....	75
ԲՆԵ. 3.6 .....	81
ԲՆԵ. 3.7 .....	87
ԲՆԵ. 3.8 .....	87
ԲՆԵ. 3.9 .....	88
ԲՆԵ. 3.10 .....	88
ԲՆԵ. 3.11 .....	89
ԲՆԵ. 3.12 .....	89
ԲՆԵ. 3.13 .....	89
ԲՆԵ. 3.14 .....	89
ԲՆԵ. 3.15 .....	90
ԲՆԵ. 3.16 .....	90
ԲՆԵ. 3.17 .....	92
ԲՆԵ. 3.18 .....	94
ԲՆԵ. 3.19 .....	94
ԲՆԵ. 3.20 .....	95
ԲՆԵ. 3.21 .....	98
ԲՆԵ. 3.22 .....	100
ԲՆԵ. 3.23 .....	102
ԲՆԵ. 3.24 .....	102

ԲՆԵ. 3.25 .....	102
ԲՆԵ. 3.26 .....	102
ԲՆԵ. 3.27 .....	103
ԲՆԵ. 3.28 .....	104
ԲՆԵ. 3.29 .....	105
ԲՆԵ. 3.30 .....	107
ԲՆԵ. 3.31 .....	109
ԲՆԵ. 3.32 .....	111
ԲՆԵ. 3.33 .....	113
ԲՆԵ. 3.34 .....	115
ԲՆԵ. 4.1 .....	118
ԲՆԵ. 4.2 .....	119
ԲՆԵ. 4.3 .....	120
ԲՆԵ. 4.4 .....	123
ԲՆԵ. 4.5 .....	123
ԲՆԵ. 4.6 .....	124
ԲՆԵ. 4.7 .....	125
ԲՆԵ. 4.8 .....	125
ԲՆԵ. 4.9 .....	127
ԲՆԵ. 4.10 .....	127
ԲՆԵ. 4.11 .....	129
ԲՆԵ. 4.12 .....	130
ԲՆԵ. 4.13 .....	130
ԲՆԵ. 4.14 .....	132
ԲՆԵ. 4.15 .....	135
ԲՆԵ. 4.16 .....	136

## შესავალი

მთის რეგიონებისათვის ისეთი, როგორც საქართველოს ტერიტორიის 3/4 ნაწილია, ხშირია მთის ქანების ფერდობის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის დაკარგვის შემთხვევები, რაც იწვევს ფერდობის მეწყერ-ჩამონაქცევების ჩამოსვლას. ასეთ მოვლენებს ხშირად თან ახლავს, როგორც დიდი მატერიალური ზარალი, აგრეთვე შესაძლოა ადამიანთა მსხვერპლიც.

პრობლემატურია მთიანი აჭარის, სვანეთის, ახალციხის და სხვა რეგიონები, სადაც ამ ბოლო პერიოდში მნიშვნელოვნად გააქტიურდა მეწყერ-ჩამონაქცევები, ხშირია ადამიანთა მსხვერპლი. ფერდობის მოწყვეტის საშიშროება არსებობს თითქმის ყველა მთაგორიან რეგიონში და არა მარტო საქართველოში. მოსახლეობის სიმჭიდროვით, ნაგებობებითა და კომუნიკაციათა აღჭურვილობით კავკასიონი და აჭარის მთაგორიანი რეგიონი უპირველესია მათ შორის და აქედან გამომდინარე, ყოველწლიურად ზარალის ალბათობაც.

ხელოვნური და ბუნებრივი ფერდობის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის დაკარგვის შედეგად და მეწყერ-ჩამონაქცევების წარმოშობით მიყენებული ზარალი ძირითადად გამოწვეულია ნაგებობების არასაკმარისი საიმედოობით, დაცვის უუნარობით და მათი განლაგების არა ოპტიმალური შერჩევით. ყოველივე ეს შედეგია არაზუსტი პროგნოზირების და არასაიმედო თეორიული ბაზის. ამასთან ერთად, ფერდობის სტატიკური და დინამიკური გაანგარიშებისას არსებული საანგარიშო რეკომენდაციების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მეწყერ ჩამონაქცევების ჩამოსვლით მძიმე შედეგებზე პასუხისმგებლობის გარკვეული წვლილი შეიძლება დავაკისროთ მისი მახასიათებლების შეფასების აპარატის არასაკმარის სრულყოფილებას, რაც განპირობებულია მათი პრობლემატიკის სამეცნიერო-კვლევითი დამუშავების გარკვეული ჩამორჩენით, ამიტომ ფერდობის მდგრადობის პარამეტრების უფრო სრულყოფილი საანგარიშო მეთოდოლოგიის შექმნა დღესაც ფრიად აქტუალურ პრობლემად რჩება.

ფერდობის სტატიკური მდგრადობა-არამდგრადობის ამოცანების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს მეწყერ-ჩამონაქცევების პროგნოზირებისა-

თვის. ფერდოს მდგრადობის ანალიზი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ჰიდრო-ტექნიკურ და სატრანსპორტო მშენებლობაში. ასეთი ობიექტების ფერდობების ჩამოშლა გამოწვეულია მოძრაობით მიწაყრილში, ბუნებრივ ფერდობში ან ორივე ადგილზე ერთდროულად. დღემდე აქტუალურად რჩება ამოცანები ფერდოს მდგრადობის შეფასების მეთოდების, ფერდობების კონტროლისა და სტაბილიზაციისათვის აუცილებელ ღონისძიებების შემუშავების შესახებ.

**ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა:** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 4 თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის 43 დასახელების ნუსხისაგან. ტექსტის საერთო მოცულობაა 142 გვერდი.

**პირველი თავში** განხილულია მთის ქანების სიმკვრიველი თვისებები, ასევე მეწყერების სტაბილიზაციისთვის გასამაგრებელი ღონისძიებები. მათ შორისაა: ქანობების დაწევა და დატვირთვების მოხსნა; ზედაპირული დრენაჟი; გრუნტის წყლების დრენაჟი; მცენარეების დარგვით მეწყერების შეკავება; კონტრფორსების და საყრდენი კედლების, ხიმინჯოვანი და ანკერული სისტემების გამოყენება, და გრუნტების გამაგრება ქიმიური ან თერმული დამუშევებით.

**მეორე თავში** განხილულია მთის ქანების ბუნებრივი მდგომარეობის მიმოხილვა, მისი დეფორმაციული თვისებები (ძაბვების დეფორმაციებზე დამოკიდებულების გრაფიკი), ასევე სამთო-ტექნიკური თვისებები, ძაბვების დახასიათება ერთ, ორ და სამღერძა კუმშვის დროს. დაწვრილებითაა განხილული მთის ქანების ზღვრული წონასწორობის ანალიზი, და ბოლოს ასევე განხილულია მთის ღია სამუშაოების დროს მასივის ქანობის დამაბული მდგომარეობის ცვლილების შემთხვევები.

**მესამე თავში** გადმოცემულია ფერდოს გრუნტის დაცურების ზედაპირის სახეობების და კიდეების ჩამოშლის (მეწყერის) მიმოხილვა, მეწყერის პროცესების განვითარება დროში. ასევე დაწვრილებითაა გადმოცემული ნაშრომის ძირითადი სიახლე - დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით ფერდოს ჩამონაქცევი მასის დაცურების წირის დიფერენციალური

განტოლების შედგენა და მისი გამოკვლევა, ჩამონაქცევი მასივის  $\bar{G}$  წონის, აფეთქების წნევის  $\bar{P}$  ძალის ჰორიზონტულ მდგენელის და სეისმური  $\bar{P}_s$  ძალის გათვალისწინებით. და მოყვანილია ძვრის ბრტყელი ზედაპირის ქანობებში ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტის განსაზღვრის სამი მარტივი შემთხვევა: 1) უსასრულო ქანობი ძვრის ზედაპირით, რომელიც ფერდოს ზედაპირის პარალელურია; 2) სამკუთხა პროფილის სხეული, რომელსაც გააჩნია ერთადერთი ძვრის ზედაპირი; 3) ტრაპეციოდალური ფორმის სხეული ძვრის ორი ზედაპირით.

**მეოთხე თავში** გადმოცემულია მოცენულია ფერდობების და კარიერების ქანობების გამა-გრების ღონისძიებები, როგორებიცაა: მექანიკური შეკავების პრინციპი; მთის ქანების ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება; ქანობის ზედაპირზე ქანების უზრუნველყოფა საიმედო იზოლაციით; კომბინირებული საშუალებები. ბოლოს მოცემულია ფერდობების მდგრადობის უზრუნველსაყოფად დრენაჟის დანიშნულება.

დისერტაციის ბოლოს მოყვანილია დისერტაციიდან გამომდინარე ძირითადი დასკვნები და ლიტერატურა.

**მეცნიერული სიახლე:** მკვლევართა უმრავლესობა მიიჩნევს, რომ ფერდობების ჩამოშვავებული მასის საშიში დაცურების ზედაპირი წარმოადგენს წრიულ-ცილინდრულს (ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში - წრის რკალს), რაც გლობალურად ნაკლებადაა მოსალოდნელი და იგი ჭეშმარიტი საშიში დაცურების ზედაპირის მხოლოდ უხეში მიახლოებაა. ამასთან, თითქმის ყველა მათგანი ცდილობს პრიზმის მასის წრიულ-ცილინდრული დაცურების ზედაპირი განსაზღვროს გრაფიკული ხერხით.

განხილულია მთის ქანების ფერდობების მდგრადობა-არამდგრადობის ამოცანები, სადაც პირველად არის მოცემული, არსებული ბუნებრივი პირობების მაქსიმალური გათვალისწინებით, ფერდობების მასივების ჩამონაქცევის საშიში დაცურების მრუდწირული ზედაპირის განსაზღვრის ამოცანის სუფთა ანალიტიკური ამოხსნა. შემოთავაზებული მეთოდი არ მოითხოვს ამ ზედაპირის წინასწარ გრაფიკულ აგებას და აზუსტებს ჩამონაქცევის ზედაპირ-

რის გრაფიკულ-ანალიტიკურ მეთოდით მიღებულ შედეგებს, რომელსაც გააჩნია სტატისტიკური მდგრადობის უმცირესი მარაგი.

გამოყვანილია მოვლენის აღმწერი ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებები, რომელთაც აკმაყოფილებს მთის ფხვიერი ქანების ფერდოების ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი ზღვრული წონასწორობის მრუდის განტოლება (ბრტყელი ამოცანის შემთხვევა). კვადრატურებშია ამოწერილი ამ მრუდის განტოლება. ნაშრომში გრუნტების და მთის ქანების მეწყერული მასივი წაროდგენილია, როგორც კვაზიმკვრივი ტანი, რომლის დაძვრისა და დაცურების პირობები პარამეტრულად განისაზღვრება ფხვიერი ტანების ისეთი მექანიკური პარამეტრებით, როგორცაა შინაგანი ხახუნის კუთხე, მოცულობითი წონა და შეჭიდულობა, აგრეთვე დაძვრის სიბრტყისა და მთავარ დამაბულობებს შორის ურთიერთ მიმართების თვისებების ზღვრულ წონასწორობის პირობები. მიღებულია შეჭიდულობის კოეფიციენტის კერძო შემთხვევების და ზოგადი მნიშვნელობებისათვის დაცურების წირის განტოლება და გამოკვლეულია ინტეგრალური წირების ასიმპტოტური თვისებების ყველა შესაძლო შემთხვევისათვის. განხილულია ფერდოების და კარიერის ბორტების დეფორმაციის განვითარების საკითხები, მათი კლასიფიკაცია, წარმოქმნის მიზეზები და მათთან ბრძოლის საშუალებები.

ფერდოებისა და კარიერული ველების დრენირების საკითხის ჩამოყალიბების დროს განიხილება დრენირების პრინციპული სქემები, რომლის დროსაც მინიმალური დანახარჯით მიიღწევა ფერდოების მდგრადობა.

სადისერტაციო ნაშრომში არსებული მეთოდებისაგან განსხვავებით, გათვალისწინებულია ფერდოზე მოქმედი ყველა შესაძლო დატვირთვა (მოდებული ძალები) და გაანგარიშების მკაცრი მეთოდების გამოყენების პირობები. მიღებულია რეალურ გეოლოგიურ პირობებში ფერდოების მდგრადობის გაანგარიშების საკმაოდ ზუსტი და მარტივად გამოყენებადი საინჟინრო მეთოდები.



ჩვენს მიერ შემუშავებულ ფერდობის სტატიკური მდგრადობის გამოთვლის მეთოდებით მიღებული შედეგები შედარებულია სხვა ავტორების მეთოდებით მიღებულ შედეგებთან და ჩატარებულია ურთიერთშედარების ანალიზი.

**ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა და კვლევის ობიექტი:** საქართველოში, როგორც მთაგორიან ქვეყანაში რთულ გეოგრაფიულ პირობებში (დიდი დამრეცობის მქონე, ხშირად დამეწყრილ ფერდობზე) ხდება მრავალი მასშტაბური პროექტის განხორციელება, როგორებიცაა: სარკინიგზო და საავტომობილო მაგისტრალის მშენებლობა; სამთო-სათხილამურო ბაზების მშენებლობა; სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვება; ჰიდროტექნიკური მშენებლობა და სხვ. მაგალითად, ბაქო-თბილისი-ყარსის სარკინიგზო მაგისტრალის საქართველოში მდებარე (ახალქალაქი-ქარწახი) 27კმ-იანი სიგრძის რკინიგზის მშენებლობა ხორციელდება ზღვის დონიდან 1700-2100 მეტრ სიმაღლეზე. ამ მონაკვეთზე ინტენსიურად მიმდინარეობს მეწყერ-ჩამონაქცევების მოვლენები, რაც საფრთხეს უქმნის სარკინიგზო მაგისტრალის უსაფრთხო ფუნქციონირებას. ასევე სვანეთში თეთნულდის მთის კალთებზე ზღვის დონიდან 1900-3200 მეტრ სიმაღლეზე მიმდინარეობს საერთაშორისო დანიშნულების სამთო-სათხილამურო ბაზის მშენებლობა. აქ მისასვლელი გზების მშენებლობა ბევრ ზვავსაშიშ მონაკვეთს შეიცავს. უნდა აღინიშნოს, რომ აჭარის მთიანეთის მეტი ნაწილი დამეწყრილია. ამიტომ, ამ რეგიონიდან მოსახლეობის დიდი ნაწილი იძულებული გახდა სხვა რეგიონში გადასახლებულიყო. საქართველოს რამოდენიმე რეგიონში ხორციელდება სამთო-საბადოების ღია კარიერული დამუშავება სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვების მიზნით. ასევე, ხორციელდება ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობა.

თამამად შეიძლება ითქვას, რომ საქართველოს მასშტაბით, აღნიშნული პრობლემების გადასაწყვეტად თითქმის არ ტარდება სავსე დაკვირვებითი და თეორიული სამეცნიერო კვლევები. სწორედ, აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტა, მეცნიერულ-თეორიული ბაზის შექმნა, აგრეთვე, რეალურ

გეოლოგიურ პირობებში ფერდობების მდგრადობაზე გაანგარიშების საკმაოდ ზუსტი და მარტივად გამოყენებადი საინჟინრო მეთოდების დამუშავება წარმოადგენს კვლევის ობიექტსა და სადისერტაციო ნაშრომის პრაქტიკულ მნიშვნელობას. მდგრადობასთან დაკავშირებული ამოცანების ამოხსნა, სადაც არსებული მეთოდებისაგან განსხვავებით მხედველობაშია მიღებული ყველა შესაძლო დატვირთვა და მაქსიმალურადაა გათვალისწინებული არსებული ბუნებრივი პირობები. გარდა ამისა, დამუშავებულია სხვადასხვა გეომეტრიის მქონე ერთგვაროვანი და არაერთგვაროვანი გრუნტების ფერდოს მდგრადობის გაანგარიშების სხვადასხვა მეთოდები რომელთაც გააჩნიათ დიდი პრაქტიკული ღირებულება.

ავტოგზებზე ან სარკინიგზო მაგისტრალებზე ფერდობების მდგრადობის შესაფასებლად ყოველთვის უნდა მივიღოთ მხედველობაში დროებითი მოძრავი დატვირთვა დამატებითი ვერტიკალური დატვირთვის სახით. სეისმური რეგიონებისათვის გათვალისწინებული უნდა იქნეს სეისმური ზემოქმედება დამატებით იმ ძალებთან, რომლებიც გათვალისწინებულია ამოსავალ ბაზურ გამოსახულებებში (ძალთა ძირითადი შეთანწყობა).

ამგვარად, გადასვლა წონასწორობის მდგომარეობიდან მეწყერის წარმოქმნაზე, სეისმური ზემოქმედების (ბიძგების) და დამატებით დატვირთვების არსებობის შემთხვევაში შეიძლება მოხდეს მხოლოდ და მხოლოდ ფერდოს სიმტკიცის დაქვეითებით. სიმტკიცის დაქვეითება, როგორც წესი ხდება ფერდოს გრუნტის დატენიანებით. განსაკუთრებულ მნიშვნელოვან სიმტკიცის ცვლილებას აქვს ადგილი თიხოვან და თიხნარ გრუნტებში. გრუნტი დატენიანებით მძიმდება, რის შედეგადაც ფერდობის სტატიკური მდგრადობის პირობა ირღვევა და წარმოიშობა მეწყერჩამონაქცევის დაძვრის პირობა. აღნიშნული ამოცანის გამოკვლევა და მეწყერ-ჩამონაქცევის არსებობის კრიტერიალური პირობების დადგენა ასევე წარმოადგენს კვლევის ობიექტს.

**ნაშრომის აპრობაცია და გამოქვეყნებული პუბლიკაციები:** სადისერტაციო ნაშრომის, როგორც ცალკეული ისე ძირითადი შედეგები მოხსენიებული იქნა სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ 2 სემინარზე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. გარდა ამისა სადისერტაციო ნაშრომის მასალების მიხედვით გამოქვეყნებულია 3 სტატია.

**დაცვაზე გამოგვაქვს:** ფერდოს სტატისტიკური მდგრადობის გაანგარიშების მეთოდიკა, როცა ფერდოს მასივზე საკუთარი სიმბიმის ძალის გარდა მოქმედებენ აფეთქებისა და სეისმური ძალები. გამოყვანილია პირველი რიგის არაწრფივი ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლება, რომელსაც დააკმაყოფილებს ფერდოს მასის საშიში დაცურების ზედაპირის აღმწერი განტოლება. მოყვანილია ამ განტოლების ამოხსნა კვადრატურებში, ხოლო ზოგიერთი შემთხვევისათვის – კი ელემენტარულ ფუნქციებში, რაც საშუალებას იძლევა დავადგინოთ ფერდოს მასივის ჩამონგრევის ზონები.

## ლიტერატურის მიმოხილვა

პრობლემის კვლევის თანამედროვე მდგომარეობა. ფერდობის ჩამოშლა დაკავშირებულია გამომწვევი პროცესების მრავალფეროვნებასთან. მათი დაყოფა შეიძლება ფორმის, მოძრავი და უძრავი მასალის სახეობის, ასაკის ან განვითარების სტადიის მიხედვით.

ფერდოს მოძრაობის ტიპებია: ჩამოზვავება (ჩამონგრევა); გადაყირავება; მეწყერ-ჩამონაქცევის დაცურება; მეწყერის გამოწვევა და ღვარცოფული ნაკადები. მეექვსე ჯგუფი – რთული მოძრაობა შეიცავს ზემოთ ჩამოთვლილი ხუთი ტიპიდან ორ ან მეტის კომბინაციას. სახეობის მიხედვით მასალა იყოფა კლდოვან და არაკლდოვან გრუნტებად. ფერდოს მოძრაობის ფორმის გამოკვლევა მნიშვნელოვანია მდგრადობის ანალიზის მეთოდის შერჩევისას.

მდგრადობის გამოთვლის მეთოდებში განვიხილავთ მხოლოდ ყველაზე გავრცელებულს ან ცნობილს. ზოგიერთ მეთოდზე მიმოხილვები მოცემულია ჰოპინგის, ალემის და დინის შრომაში (1975წ). ცნობილია მეთოდები, რომლებიც აკმაყოფილებს მომენტების საერთო წონასწორობას. ამ ჯგუფში შედის ფელენიუსის მეთოდი (1936წ), ბიშოპის გამარტივებული მეთოდი (1955წ),  $\Phi=0$  მეთოდი (ტეილორი 1937წ); ხუანი (1975წ) და ლოგარიტმული სპირალის მეთოდი (ტეილორი 1937წ; ხუანი და ეფერი, 1976).

ფელენიუსის მეთოდი განკუთვნილია მხოლოდ დაცურების წრიულცილინდრული ზედაპირისთვის და მასში განიხილება მხოლოდ მომენტების საერთო წონასწორობა, ფერდოს წახნაგებზე მოქმედი ძალები უგულებელყოფილია. ფორული წნევის არსებობისას გამოიყენება ფელენიუსის მეთოდის მოდიფიცირებული ვერსია, რომელიც დაფუძნებულია წონის განხილვაზე შეტივტივებულ მდგომარეობაში, რომელსაც ეწოდება ნორმალური მეთოდი (ბეილი და კრისტიანი, 1969წ).

ბიშოპის გამარტივებულ მეთოდში დაკმაყოფილებულია საერთო მომენტებისა და ვერტიკალური ძალების წონასწორობები. თუმცა ცალკეულ ნაკვეთურისათვის არ კმაყოფილდება არც მომენტების და არც ჰორიზონტალური ძალების წონასწორობა. მიუხედავად იმისა, რომ წონასწორობის პი-

რობები არასრულად კმაყოფილდება, მეთოდი მაინც რეკომენდებულია პრაქტიკული გამოთვლების ჩასატარებლად, რომლისთვისაც დაცურების ზედაპირი შეიძლება აპროქსიმირებული იქნეს წრით.

$\Phi=0$  მეთოდი განეკუთვნება დაცურების წრიულცილინდრულ ზედაპირებს, იგი გამოიყენება მდგრადობის გრაფიკების შესადგენად სრული დაძაბულობის ანალიზისათვის, ხუანი (1983წ).

ძალების წონასწორობისათვის შემუშავებულია რამოდენიმე მეთოდი, რომლებიც აკმაყოფილებს ვერტიკალურ და ჰორიზონტალური ძალების მხოლოდ საერთო წონასწორობას, აგრეთვე ძალების წონასწორობას ცალკეული ნაკვეთურის ან ბლოკებისათვის.

სრიალა სოლის მეთოდი, რომელშიც ურთიერთქმედების ძალების განსაზღვრისათვის გამოიყენება აქტიური ან პასიური გრუნტის წნევის თეორია, ყველაზე მოხერხებულია გაანგარიშების ხელით ჩასატარებლად. ეს მეთოდიკა გამოიყენა მენდუზმა (1981წ) და საზღვაო დეპარტამენტმა (აშშ, 1981წ). მეორე მეთოდიკაში, რომელიც გამოიყენა სუდმა და სალტენომ (1987წ), ნავარაუდებია რომ დაცურების ზედაპირზე დაძაბულობის მხები არის წანაცვლების სიმტკიცისა და მარაგის კოეფიციენტის გაყოფის ნაშთი. ეს მეთოდი მოითხოვს იტერაციების ჩატარებას, უფრო რთულია და შეიძლება გამოვიყენოთ სიბრტყეზე დაცურების განტოლების გამოსაყვანად.

მომენტის და ძალის წონასწორობის მეთოდები. ამ ჯგუფში შემავალი მეთოდები შემუშავებულია იანზუს (1973, 1984წწ), მორგენშტერნისა და პრაისის (1985წ), აგრეთვე სპენსერის (1987წ) მიერ. იანზუს მეთოდში ნებისმიერად უნდა იყოს მოცემული ურთიერთქმედების ძალთა ნორმალური შემდგენების მდებარეობა ან წნევის ხაზი.

მორგენშტერნისა და პრაისის მეთოდებში შეჰყავთ გამარტივებული დაშვება, რომელიც ეხება ურთიერთქმედების დამოკიდებულებას ძალების მხები და ნორმალური შემდგენებს შორის. ბიშოპი (1965წ) მიუთითებდა, რომ მარაგის კოეფიციენტის თანაბარ ხარისხოვნად მართებული მნიშვნელობების დიაპაზონი შეიძლება საკმაოდ ვიწრო იყოს და რომ ნებისმიერი

დაშვება, რომელიც უზრუნველყოფს მისაღებ განაწილებას და დამაბულობის სიდიდეს, პრაქტიკულად მიგვიყვანს ერთიდაიგივე მარაგის კოეფიციენტთან. უიტმენმა და ბეილიმ (1987წ) ამოხსნენ რამოდენიმე ამოცანა მორგენშტერნისა და პრაისის მიდგომებით, აგერთვე პიშოპის გამარტივებული მეთოდით.

მთის ქანების ფერდობის სტატიკური და დინამიკური მდგრადობა არამდგრადობის გამოკვლევის მიზნით დამუშავდა აგრეთვე მრავალი ცნობილი მეცნიერის ნაშრომი: მ.ნ გერსევანოვი (1970წ), ნ.ა ციტოვიჩი (1981წ), ე.მ სერგეევი (2003წ), მ.ნ გოლდშტეინი (1995წ), ნ.ნ მასლოვი (1989წ), ვ.ვ სოკოლოვსკი (1969წ), ნ.ი დენისოვი (2004წ), ვ.დ ლომთაძე (1982წ), ნ.ნ ფისენკო (1980წ), ა.მ არსენტევი (1992წ), მ.პ საინოვი, ნ.ა კორბიუნკი (2010, 2013წწ), ა.ლ გოდინი, ლ.ნ რასკაზოვი (2011წ), ვ.ნ ბოხირცევი (2013წ), დ.ნ ლონდაძე (1954წ), დ. კერვენი და ჰეფელი (1970წ), ანდრე რომა (1972, 1990წწ), კ.ს ლოსევი (1994წ), ი.რ ოსკალენკო (1976წ), კ.მ შახუნიაიანი (1978, 1993წწ) და სხვა.

ზემოთ მოყვანილი ყველა მეთოდისაგან განსხვავებით, სასრული ელემენტების მეთოდში, დაცურების ზედაპირზე ნორმალური და მხები ძაბვების პოვნა დრეკადი თვისებების გათვალისწინებით ხორციელდება გამომდინარე იუნგის მოდულის და პუასონის კოეფიციენტიდან.

ყველა ნაშრომი და ჩამოთვლილი მეთოდი დეტერმინირებულია, რადგან იგულისხმება, რომ გრუნტის წანაცვლების სიმტკიცე, ფერდოზე მოდებული დატვირთვა და საძიებელი ძვრაზე მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტი ცნობილია. სინამდვილეში კი ადგილი აქვს მნიშვნელოვან ვარირებას წანაცვლების სიმტკიცესთან მიმართებაში და შესაძლოა მასზე ზემოქმედებაშიც. საგრანტო ნაშრომში მოყვანილი იქნება ალბათური მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს ინმფორმაციას ფერდოს ჩამოშვავებისა წარმოქმნის ალბათობის შესახებ.

# 1. მთის ქანების ფიზიკო-მექანიკური მონაცემები

## 1.1. მთის ქანების სიმკვრივეული თვისებები

ქანების სიმკვრივეს განსაზღვრავს დედამიწის მიზიდულობის ველის მოქმედება. ისინი იყოფა საკუთრივ გრავიტაციულ და სტრუქტურულ ნაწილად.

კუთრი წონა  $\gamma_0$  (ნ/მ<sup>3</sup>) - ესაა მყარი ფაზის  $P_0$  წონის ფარდობა  $V_0$  მოცულობასთან, რომელსაც იკავებს ეს ფაზა.

$$\gamma_0 = \frac{P_m}{V_m}. \quad (1.1)$$

რადგან წონა  $P_0 = mg$ , სადაც  $m$  მასაა და  $g$  თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა, განსაზღვრის პუნქტში  $\gamma_0$  დამოკიდებულია თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე და მკაცრი ფიზიკური გაგებით არ შეიცავს ნივთიერების პარამეტრებს. თუმცა ტექნიკურ ანგარიშებში თავისუფალი ვარდნის აჩქარების ცვლილებას თავს არიდებენ, და განიხილავენ კუთრ წონას, როგორც მთის ქანების მუდმივას.

კუთრი მასა - ესაა მთის ქანების მყარი ფაზის  $m_0$  მასის ფარდობა  $V_0$  მოცულობასთან, რომელიც იკავებს ამ მყარ ფაზას

$$\delta_0 = \frac{m_m}{V_m}. \quad (1.2)$$

სიმკვრივე ხასიათდება მთის ქანების საერთო  $m$  მასის (თხევადი, აირადი და მყარი ფაზა) და დაკავებულ  $V$  მოცულობასთან ფარდობით

$$\delta = \frac{m}{V}. \quad (1.3)$$

კუთრი წონისგან განსხვავებით სიმკვრივე წარმოადგენს მუდმივას ნივთიერებისთვის მკაცრი ფიზიკური გაგებით.

ფორიანობის კოეფიციენტი (%-ში) ხასიათდება მთის ქანების ფორების  $V_3$  მოცულობის და ამ ქანებით დაკავებული მთლიანი  $V$  მოცულობის ფარდობით

$$n = \frac{V_f}{V} 100, \quad (1.4)$$

რადგან  $V_g = V - V_a$ ,

$$n = \left(1 - \frac{V_m}{V}\right) 100, \quad (1.5)$$

ან

$$n = \left(1 - \frac{P_m \gamma}{P \gamma_0}\right) 100. \quad (1.6)$$

$$n = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right) 100 = \left(1 - \frac{\delta}{\delta_0}\right) 100. \quad (1.7)$$

უფრო მეტად გავრცელებულია ქანების მახასიათებელი, რომელსაც მასაზე ტენიანობა ეწოდება

$$\omega = \frac{P - P_m}{P_m}. \quad (1.8)$$

სადაც,  $P$  - ტენიანი ნიმუშის მასა (ბუნებრივი ტენიანობა ან ნიმუშის განსაზღვრულ პირობებში გაჩერების შედეგად შეძენილი ტენიანობა), კგ;

$P_m$  - ჰაერზე გამომშრალი ნიმუშის მასა (ე.წ. მუდმივი მასა), კგ.

მუდმივ მასად ითვლება  $105^\circ C$  ტემპერატურაზე გამომშრალი მასა. ამასთან ერთად, ორ შემდგომ აწონვის შორის სხვაობამ არ უნდა გადააჭარბოს აწონვის სამმაგ შეცდომას. ამრიგად, ჰაერზე გამომშრალი ნიმუშის მასა იგივეა, რაც გრუნტის ჩონჩხის მასა. ფორების წყლით ავსების ხარისხის კრიტერიუმს წარმოადგენს წყლით გაჟღენთვის კოეფიციენტი, ან ტენიანობის ხარისხი  $q$ , რომელიც წარმოადგენს მოცემული (მაგალითად, ბუნებრივი)  $\omega$  ტენიანობის მაქსიმალურად შესაძლო (ან სრული)  $\omega_0$  ტენიანობასთან ფარდობას



$$q = \frac{w}{w_0}. \quad (1.9)$$

ტენიანობის ხარისხის მიხედვით განასხვავებენ მშრალ ( $q \leq 0.5$ ), ტენიან ( $0.5 < q \leq 0.8$ ), წყლით გაჟღენთილ ( $q > 0.8$ ) ქანებს. მიწისქვეშა წყლების ქვეშ არსებული ქანები არიან სრულად წყლით გაჟენთილი ( $q = 1$ ).

უფრო მეტად გავრცელებული მთის ქანების სიმკვრივე იცვლება 2,5-დან 4,5 ტ/მ<sup>3</sup>-ის ფარგლებში, ფორიანობა - 0-დან 20%-მდე და ზევით (ცხრილი 1.1).

ცხრილი 1.1

ქანები	$\delta$ , ტ/მ <sup>3</sup>	$n$ , %
გრანიტი	2,5-2,7	1,2
კირი	2,4-2,7	0,5-13,4
მარმარილო	2,4-2,7	0,5-13,0
ქვიშაქვა	2,6-2,7	4,8-28,0
თიხოვანი ფიქალი	2,4-2,7	3,0-4,0
თიხა, თიხნარი	2,5-2,9	35-50
სილა	2,5-2,6	25-30
ხრეში	2,5-2,6	27-38

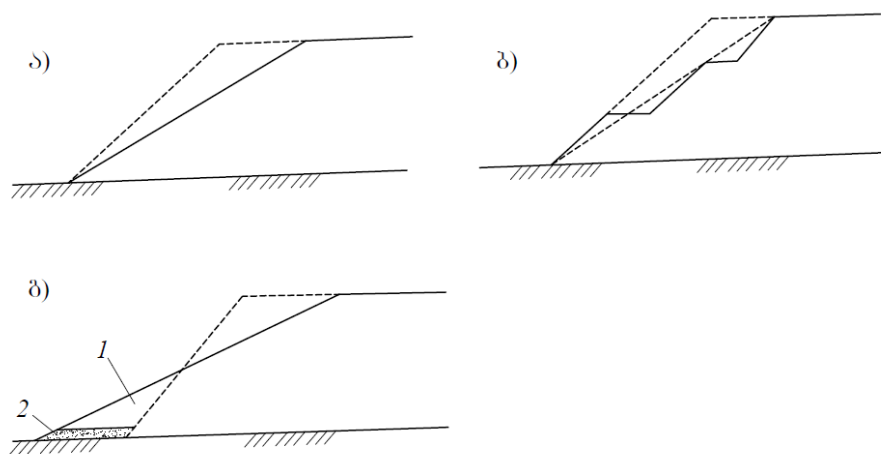
## 1.2. გასამაგრებელი ღონისძიებები მეწყერების

### სტაბილიზაციისთვის

სტაბილიზაციის მეთოდები დაწვრილებით იქნება განხილული მე-4 თავში. აქ მოყვანილია საზღვარგარეთის სხვადასხვა ქვეყნებში განხორციელებულ მეწყერების თავიდან აცილების - ანუ ფერდობის ჩამოშვავებისგან დამცავ ღონისძიებების მოკლე აღწერა.

სტაბილიზაციის მეთოდები შეიძლება იყოს მიმართული ან დამძვრელი ძალების შემცირებისკენ, ან შემკავებელი ძალების გაზრდისკენ. რადგან

მარაგის კოეფიციენტი წარმოადგენს შემკავებელი და დამძვრელი ძალების ფარდობას, დამძვრელის შემცირება ან შემკავებლის გაზრდა გამოიწვევს მარაგის კოეფიციენტის გაზრდას. თუმცა აქ არ გამოიყენება დამძვრელი ან შემკავებელი ძალების ცვლილებაზე დაფუძნებული კლასიფიკაცია. მაგალითად, განვიხილოთ ფილტრაციის ეფექტი. გრუნტების მექანიკით მიდგომის თანახმად, ფილტრაცია მხედველობაში შეიძლება იქნას მიღებული ორი გზით: ან მთლიანი წონის და კონტურული ძალების შეხამებით, ან წონის და ფილტრაციული ძალების კომბინაციით. თუ ზემოთ განხილულში შეგვყავს ფილტრაციული ძალები, მაშინ ისინი წარმოადგენენ დამძვრელს, ხოლო კონტურული ნეიტრალური ძალების განხილვისას - შემკავებელს, რადგან მათთან ერთად იცვლება ძვრის წინააღობა. აქ წარმოდგენილი მაგალითების უმრავლესობა, რომლებითაც ილუსტრირებულია სტაბილიზაციის სხვადასხვა მეთოდები, გამოქვეყნდა სატრანსპორტო კვლევების დეპარტამენტის მიერ (შუსტერი და კრიზევი, 1998).



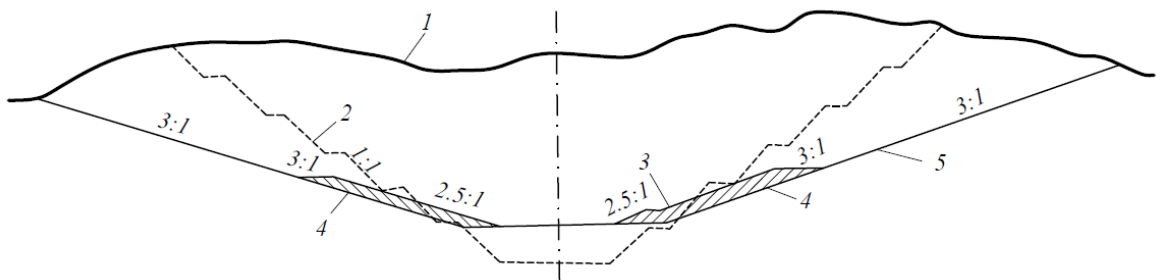
ნახ. 1.1. ქანობების დაწვევის მეთოდები:

ა - ქანობის უპირობო ჩაჭრა; ბ - დაწვევა ბერმის მოწყობით; გ - ქანობების დაწვევა მასალების გადაღებებით; 1 - მასალა იხსნება ზედა ნაწილიდან და აქ დაეწყობა; 2 - შესაძლო დრენაჟი.

**ქანობების დაწვევა და დატვირთვების მოხსნა.** 1.1 ნახაზზე მოცემულია ქანობების დაწვევის სამი მეთოდი: ციცაბოს პირდაპირი შემცირება, დაწვევა ბერმის დახმარებით და დაწვევა მასალის გადაწყობით. მიუხედავად იმისა, რომ მესამე მეთოდი უფრო მეტად ეკონომიურია, აუცილებელია ძირთან

დაწყობილი კარგი ხარისხის მასალის კონტროლის წარმოება. წყლის ზემოქმედების შემცირების აუცილებლობის შემთხვევაში აწობენ დრენაჟს.

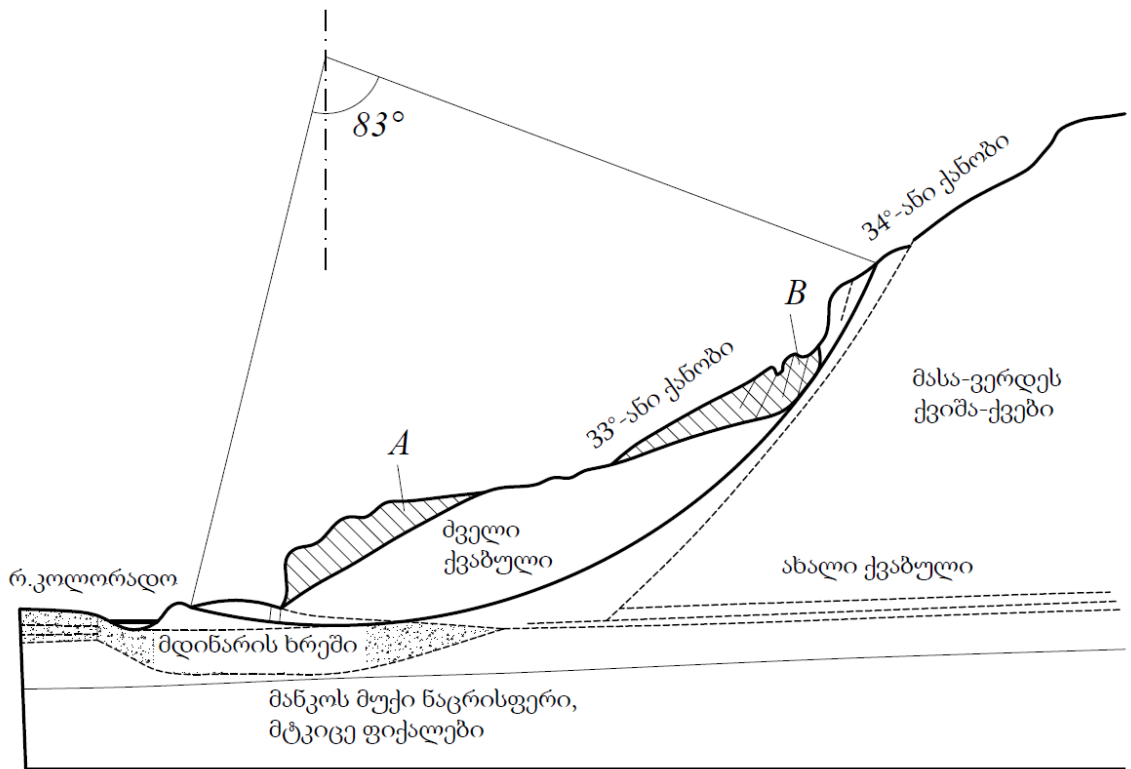
1.2 ნახაზზე გამოსახულია ქანობი, რომლის დაწვევა აღმოჩნდა ეფექტური სამხრეთ-კალიფორნიის საავტომობილო გზის 98 მეტრიანი ამოღების მოსაწყობად (სმიტი და სედერგრანი, 1982). ჩამონგრევა მოხდა ამოღების მოწყობის პროცესში და შედეგად წარმოშობილი 1:1-თ დაქანებული კალთებით, რომლებიც შედგებოდნენ ფიქალურ-ფენებიანი ქვიშაქვებით. გულდასმით შესწავლის და ანალიზის შემდეგ ქანობი შეიცვალა 3:1-მდე, და საბოლოოდ საავტომობილო გზის ზოლი გაიზარდა თითქმის 18 მეტრამდე გრუნტის ბუნებრივი დონის საწინააღმდეგოდ. გარდა ამისა, დამატებითი მდგრადობის უზრუნველსაყოფად მოეწყო საავტომობილო გზის დონიდან 21 მეტრის სიმაღლის მიწის კონტრფორსები.



ნახ. 1.2. მალხოლანდის ამოღების ტიპიური კვეთი საწყისი და შეცვლილი (ქანობის დაწვევა) პროექტები:

1 - მიწის ბუნებრივი ზედაპირი; 2 - ქანობის საწყისი დაპროექტებული პროფილი; 3 - საცალფეხო გზა; 4 - კონტრფორსული ნაყარი; 5 - ქანობის შეცვლილი პროექტის პროფილი.

1.3 ნახაზზე გამოსახულია რკინიგზის ზემოთ კოლორადოს რაიონის ხეობაში კამეოს მეწყერის სტაბილიზაცია დატვირთვების ნაწილობრივი მოხსნის საშუალებით (პეკი და აირლენდი, 1973). მდგრადობის ანგარიშის შედეგად გამოვლინდა, რომ *B* მოცულობის მოშორება უფრო ეფექტურია, ვიდრე მოსალოდნელი *A* მოცულობის.



ნახ. 1.3. კამეოს მეწყერის სტაბილიზაცია ქანობის ზედა ნაწილის ნაწილობრივი მოჭრით

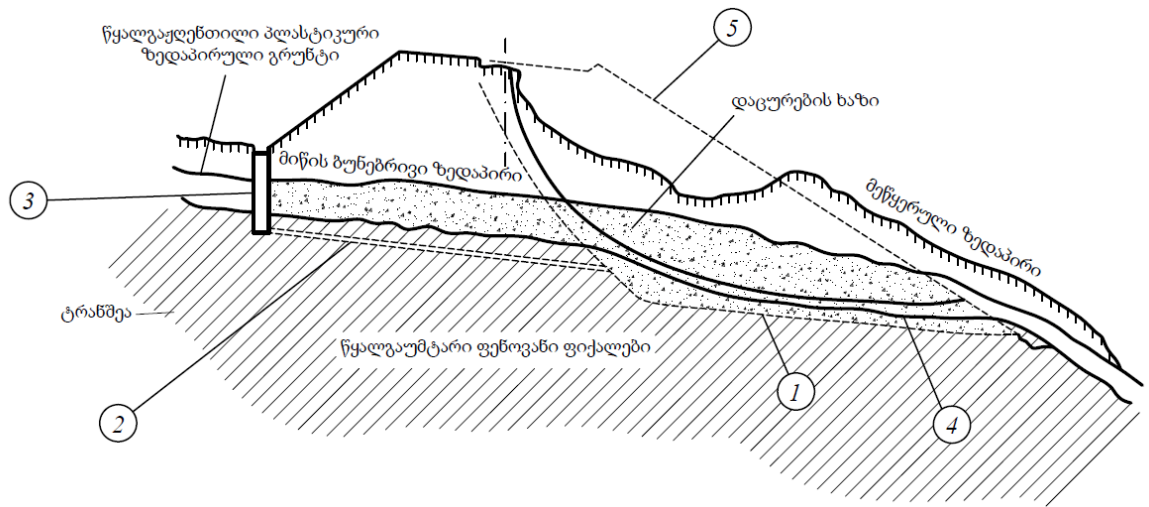
**ზედაპირული დრენაჟი.** მეწყერების სტაბილიზაციის ყველა შესაძლო მეთოდებიდან, სავარაუდოდ, ყველაზე მეტად მნიშვნელოვნად უნდა ჩაითვალოს ზედაპირული წყლის დრენაჟი. სწორად შესრულებული ზედაპირული დრენაჟი ძლიერ რეკომენდებულია, როგორც ნებისმიერი მეწყერის ნაწილის „მკურნალობა“. მთელი ზედაპირული წყალი უნდა მოშორდეს ქანობიდან. მეწყერისკენ მიდრეკილი მონაკვეთის ზედაპირი არასწორი და „მღელვარეა“, ასევე გადაკვეთილია შეუმჩნეველი ბზარებით და ღრმა ნაპრალებით. ამიტომ ჩამოშლის პრიზმის ზედაპირის ფორმის ცვლილება შეიძლება აღმოჩნდეს მეტად მომგებიანი დახურულ ბზარებთან და დადაბლებულ ზედაპირზე დაგროვილი წყლის ლიკვიდაციასთან შედარებით. კერძოდ, ეს სამართლიანია კალთის წახნაგის უკან განლაგებული ბზარებისთვის, საიდანაც წყლის დიდი მოცულობა შეიძლება ჩაიღვაროს რღვევის ზონაში, და ამან სერიოზული შედეგი გამოიწვიოს. თუმცა თვითონ ზედაპირული დრენაჟი იშვიათადაა საკმარისი ფერდობის მოძრაობის შესაჩერე-

ბლად. მან შეიძლება შეძლოს ქანობის შემკრები მასალის გამოშრობა, და ამ სახით მეწყერის სტაბილიზაცია.

**გრუნტის წყლების დრენაჟი.** რადგან გრუნტის წყლები წარმოადგენენ ქანობების არამდგრადობამდე მიყვანის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს, მათი დრენაჟი ითვლება საკმაოდ ეფექტურ ღონისძიებად. გავრცელებული მეთოდები მგომარეობს ჰორიზონტალურ დრენაჟების, ვერტიკალურ სადრენაჟო ღრმულების, სადრენაჟო გვირაბების მოწყობაში. ჰორიზონტალური დრენაჟი წარმოადგენს მცირე დიამეტრის ღრმულს, გაბურღულს ქანობში მიახლოებით 5-10%-იანი დახრით და პერფორირებული მილების დაყენებით. მილებმა უნდა უზრუნველყოს წყლის გამოდევნა უსაფრთხო ადგილას იმისათვის, რომ თავიდან იყოს აცილებული ეროზია. ვერტიკალური სადრენაჟო ღრმული შეიძლება წარმოადგენილი იყოს ან გრავიტაციული დრენაჟის ან იძულებით ამოქაჩვის ღრმულის სახით, გამომდინარე იქიდან არსებობს თუ არა საკუთარი წონის ზემოქმედებისგან წყლის განტვირთვის შესაძლებლობა. ხშირ შემთხვევაში ჰორიზონტალური დრენაჟი შეიძლება გაიბურღოს ისე, რომ გადაიკვეთოს ვერტიკალური ქვედა ნაწილში. სადრენაჟო გვირაბები წარმოადგენენ ღრმა და მსხვილ კონსტრუქციას როგორც წესი სიგანით 1მ-ის და 2 მ-ის სიმაღლით განივ კვეთში, და აიგებიან დიდი რაოდენობის წყლის განტვირთვისთვის. სადრენაჟო გვირაბის ეფექტურობა შეიძლება გაიზარდოს მოკლე ან გრძელი სადრენაჟო ღრმულების განლაგებით გვირაბის ფუძის ან გვერდის კედლებში.

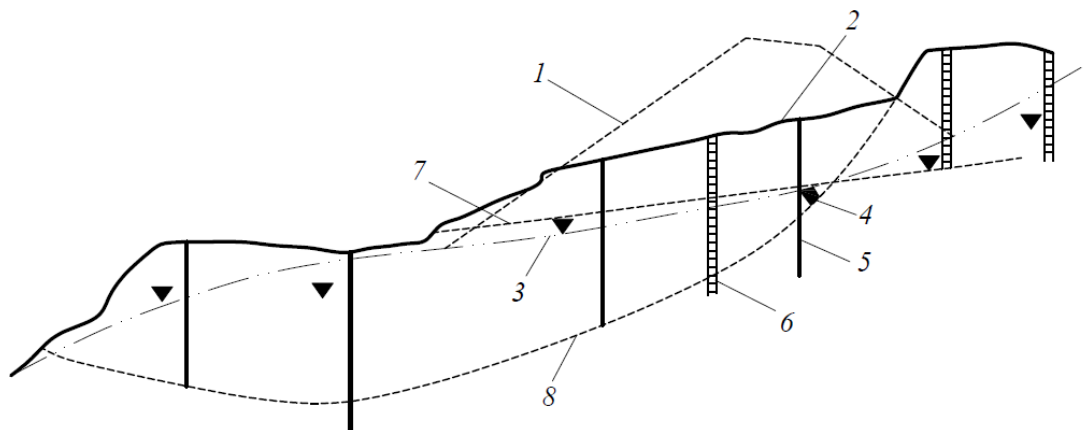
1.4 ნახაზზე მოყვანილია როგორც ზედაპირულ, ასევე გრუნტის წყლების დრენაჟის გამოყენების მაგალითი მეწყერის სტაბილიზაციისთვის კალიფორნიაში (დენისი და ალლანი, 1961). ზედაპირული წყლები ჩაედინება გადამკვეთ არხებში, რომელიც დაკავშირებულია პერფორირებული მილებით ხრეშით დაფარულ დრენაჟთან, რომელიც ასევე გამოიყენება, როგორც საფენი. 1.5 ნახაზზე ნაჩვენებია, როგორც ჰორიზონტალური, ასევე ვერტიკალური დრენაჟების გამოყენების მაგალითები აქტიური მეწყერის სტაბილიზაციისთვის, რომელიც წარმოიშვა სან მარკიოს გადასასვლელზე სანტა ბარ-

ბარასთან ახლოს, კალიფორნიის შტატში (რუტი, 1978). მიახლოებით 1 მ-ის დიამეტრის და 12 მ სიმაღლის ვერტიკალური ჭები ქვედა ნაწილში არიან გაფართოებულნი და ერთმანეთთან შეხებით ქმნიან თითქმის უწყვეტ საფარს. ვერტიკალური დრენაჟის მთელ სიღრმეზე ცენტრებზე ეწყობოდა 20 სმ დიამეტრის პერფორირებული მილები და ივსებოდა შემღწევი მასალით. შემდეგ იბურღებოდა ჰორიზონტალური დრენაჟები ვერტიკალური ჭების გაფართოებული ნაწილის გადაკვეთამდე მათი შემდგომი განტვირთვისთვის.



ნახ. 1.4. კასტაის-ალანოს მეწყერის გამაგრებითი ღონისძიებები:

- 1 - მცოცავი მასის მოშორება; 2 - პერფორირებული მილების დაყენება ჰორიზონტალურ ღრმულებში; 3 - დამჭერი არხების მოწყობა; 4 - ხრეშის დრენაჟის მოწყობა; 5 - ნაყარის აღდგენა.

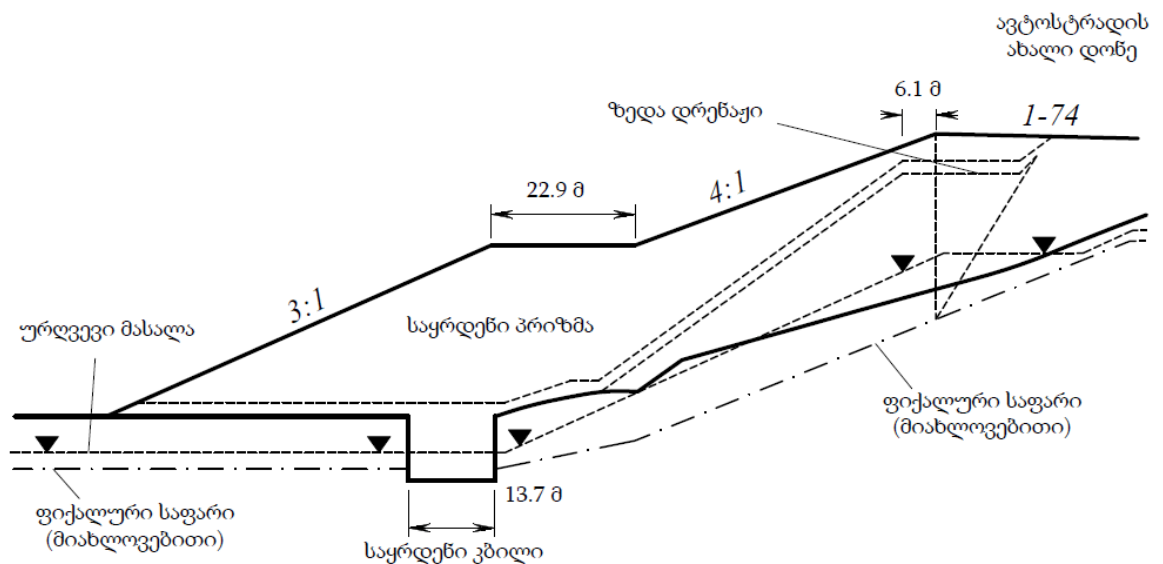


ნახ. 1.5. მეწყერის თავიდან აცილების ღონისძიება

ჰორიზონტალური და ვერტიკალური დრენაჟების დახმარებით:

- 1 - აგებული პროფილი; 2 - მეწყერის შემდგომი პროფილი; 3 - მიწის საწყისი ზედაპირის ხაზი; 4 - დრენაჟის მოწყობამდე გრუნტის წყლების დონე; 5 - გამყოფი ღრმულები; 6 - ვერტიკალური დრენაჟები; 7 - ჰორიზონტალური დრენაჟები; 8 - ცოცვის ზედაპირი.

**მცენარეულობა.** ფერდობების გადაადგილების დროს როგორც წესი ირღვევა მცენარეული საფარი (როგორც მერქანი, ასევე მინდორი). ფერდობზე ტყის მასივების აღდგენა წარმოადგენს სტაბილიზაციის წარმოების მნიშვნელოვან ამოცანას. ეს პროცესი მიმდინარეობს სასრულ სტადიაზე, ყოველ შემთხვევაში მეწყერის დაწვრილებითი სტაბილიზაციის შემდეგ. ხეების დარგვა სასურველია განხორციელდეს მცირე სიღრმის მეწყერებისთვის. ღრმად არსებული დაცურების ზედაპირის მქონე მეწყერების შეკავება შეუძლებელია მცენარეების საშუალებით, თუმცა ასეთ შემთხვევებში მცენარეულობა იძლევა ქანობში ზედაპირული წყლების ინფილტრაციის საშუალებას და ასეთი სახით ირიბად მოქმედებს მეწყერის სტაბილიზაციაზე.



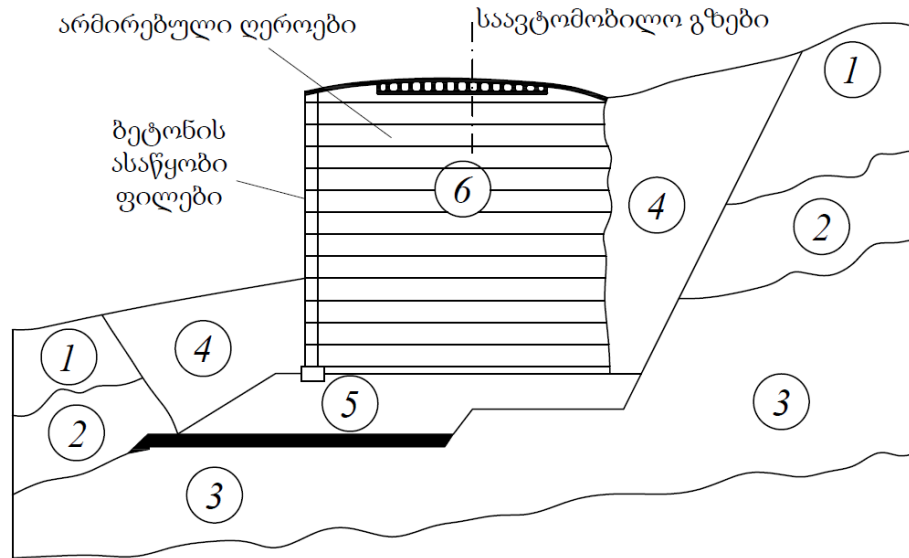
ნახ. 1.6. ფიქალური საყრდენი პრიზმა მეწყერის სტაბილიზაციისთვის ინდიანას შტატში

როგორც წესი ითვლება, რომ ნაყარს ორი ფუნქცია გააჩნია: ამრობს ზედაპირულ ფენას და ამაგრებს მას ფესვების სისტემასთან. რადგან ხეები ფერდობის ზედაპირისგან იკვებებიან მათი ზრდისთვის აუცილებელი წყლით, უფრო მეტად შესაფერისად ითვლება ქანები, რომლებიც ხასიათდებიან წყლის დიდი მოთხოვნით და აორთქლების მაღალი ინტენსიობით. შესაბამისად, მიზანშეწონილია ფოთლოვანი და არა წიწვოვანი ხეები.

**კონტროლის ან საყრდენი კედლები.** 1.6 ნახაზზე გამოსახულია საყრდენი პრიზმის გამოყენება მეწყერის ფიქალებისგან შემდგარი ნაყარის სტაბილიზაციისთვის ინდიანას შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე (ხოგენი და დიმილლოი, 1974). ნაყარის აგებისთვის გამოყენებული კარიერული მასალა შედგებოდა ძირითადად ადგილობრივი ფიქალებისგან, რომლებიც შერეულნი არიან კირთან და ქვიშასთან. ამ ფიქალურმა მასალებმა მათი ნაყარში მოთავსების შემდეგ განიცადეს გამოფიტვა, და საბოლოოდ გამოიწვიეს ნაყარის ჩამონგრევა. ერთ-ერთი მეწყერული მონაკვეთის დაწვრილებითმა საველე გამოკვლევამ აჩვენა, რომ ძვრაზე ფაქტიური სიმტკიცე შემცირდა 1.5-ჯერ მშენებლობის დაწყებამდე კვლევებით მიღებულთან შედარებით. სხვადასხვა ვარიანტების განხილვის შემდეგ საბოლოოდ იქნა მიღებული გრუნტის საყრდენი პრიზმით და კლდოვანი ქანებით შემდგარი კონსტრუქცია.

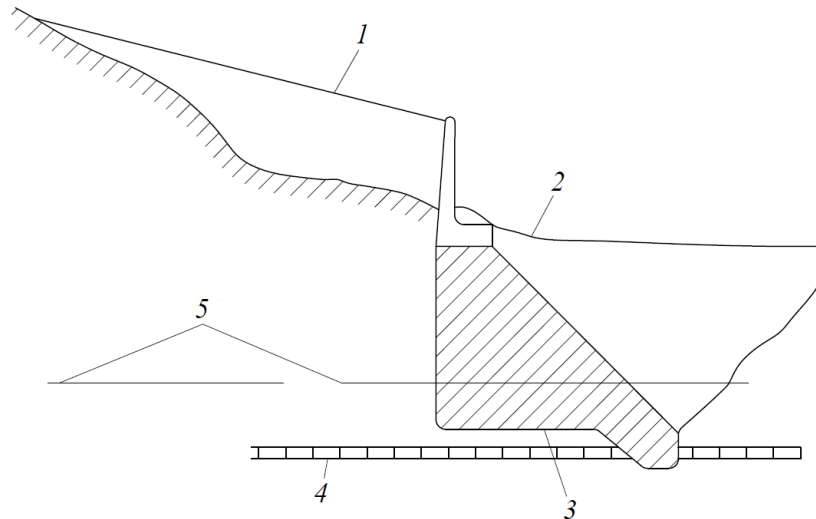
1.7 ნახაზზე გამოსახულია არმირებული გრუნტისგან შემდგარი საყრდენი კედლის გამოყენება დიდი მეწყერის სტაბილიზაციისთვის ტენესის შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე (რაისტერი, 1966). შემკრები ქანობის მასალები წარმოდგენილი იყო მეტწილად კოლიუვალური ნალექების ზედაპირული სქელი ფენით, რომლებიც ქვეშიდან ეგებოდა ელუვიალური თიხებით და ფიქალებით. გრუნტის წყლების დონე განიცდიდა სეზონურ ცვლილებას, მაგრამ როგორც წესი იმყოფებოდა კოლიუვიის და ელუვიის კონტაქტებს ზემოთ. ეს კონკრეტული მეწყერი წარმოიშვა ნაყარის მონაკვეთის გამო დალაგებული ფერდობის დრენირებულ ხევზე და შევსებული კოლიუვიით. მიწისქვეშა წყლების დრენაჟის ბლოკირების და გრუნტების საძირკვლის შესუსტებისას ნაყარი იშლებოდა აგებიდან 4 წელიწადში. საბოლოო პროექტი ითვალისწინებდა ნაყარის ჩამონაცვნი ნაწილის სუფთად მოშორებას მტკიცე გამოუფიტავი ფიქალების ფენის დონემდე, ძლიერშედწეული სადრენაჟო შრის დაწყობას კედლის ფუძის ქვეშ, საყრდენი კედლის აგებას არმირებული გრუნტით, და საბოლოოდ უკან ჩაყრას.



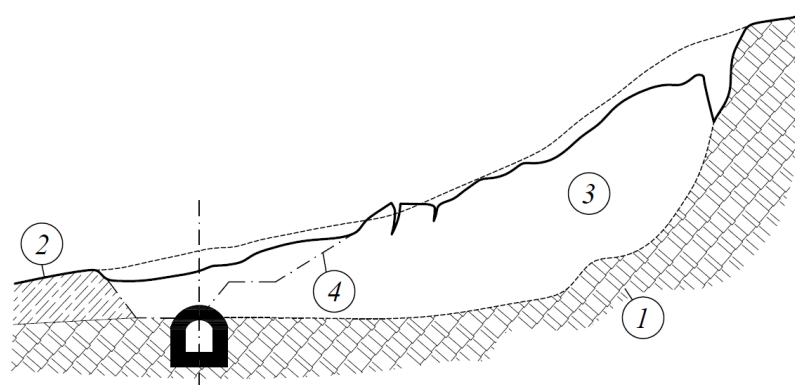


ნახ. 1.7. მეწყერული მონაკვეთის გამაგრებისთვის არმირებული გრუნტით აგებული კედელი ტენესის შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე: 1 - კოლიუვი; 2 - გამოფიტული ფიქალები; 3 - ფიქალები; 4 - დაუხარისხებელი გრუნტის უკან ჩაყრა; 5 - კარგად მფილტრავი მასალა; 6 - დახარისხებული გრუნტის უკან ჩაყრა.

1.8 ნახაზზე გამოსახულია საყრდენი კედლის გამოყენება ამოღების ქანობის მეწყერის სტაბილიზაციისათვის მინისოტას შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე (შენონი და უილსონი, 1968). საყრდენი კედლების გამოყენება ხშირად გამოწვეულია ქანობის მთელ სიგრძეზე განვითარების აუცილებელი სივრცის არქონით. რადგან საყრდენ კედელს გააჩნია დატვირთვების არასასურველი სისტემის საშიშროება, მდგრადობის გაზრდისთვის აუცილებელია განიხილოს მისი დიდი სისქე. თუმცა კედლის ქვემოთ არსებული ქანობის დაცურების ზედაპირის მარაგის კოეფიციენტის პოვნისთვის შეიძლება გამოყენებული იყოს მდგრადობის ანგარიშის ჩვეულებრივი მეთოდები, კედლის პროექტირების დროს მის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელი იქნება სპეციალური განხილვა. განსაკუთრებულად სერიოზული შემთხვევების დროს საყრდენი კედელი შეიძლება აღმოჩნდეს არაეფექტური. ამ შემთხვევაში აუცილებელია გვირაბის აგება, როგორც ეს გამოსახულია 1.9 ნახაზზე მეწყერისთვის, გერმანიაში ერთ-ერთ სარკინიგზო მონაკვეთზე (ზარუბა და მენკლი, 1989).



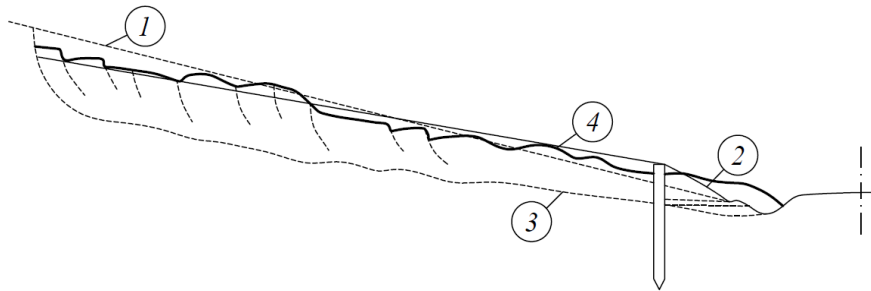
ნახ. 1.8. საყრდენი კედელი მეწყერული მონაკვეთის გასამაგრებლად მინესოტას შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე:  
 1 - სილის უკან ჩაყრა; 2 - გამყარებული მარცვლოვანი მასალის უკანჩაყრა; 3 - კონტრფორსი პორტლანდცემენტის ბეტონისგან; 4 - ფენა კალიუმის ბეტონისგან; 5 - დაცურების ზედაპირი.



ნახ. 1.9. გვირაბი მეწყერულ მონაკვეთზე გერმანიის ერთ-ერთ სარკინიგზო მონაკვეთზე:  
 1 - მერგერული კირები და ქვიშები; 2 - ქანობის მტვრევადი მასალა;  
 3 - მეწყერული სხეული; 4 - მეწყერამდე ამოღების ქანობი.

**ხიმინჯების სისტემა.** მეწყერის შეკავების ან თავიდან აცილების მიზნით ჩასასობი ნომინალური დიამეტრის ლითონის ან ხის ხიმინჯების გამოყენების არსებულმა შემთხვევებმა იშვიათად გაამართლეს. თუ მეწყერი ღრმაა, ასეთ ხიმინჯს არ შეუძლია უზრუნველყოს შესაბამისი ძვრის წინააღობა. მცირე სიღრმის მეწყერებს სტაბილიზირება შესაძლებელია ჩასობილი ხიმინჯების დახმარებით, მისი აუცილებელი სიღრმის რეალობის გათვალისწინებით. საწინააღმდეგო შემთხვევაში ხიმინჯები შეიძლება გადაიხარონ

ვერტიკალური მდგომარეობიდან და გამოიწვიონ შემკვრელი და საფენი მასალების რღვევა ცოცვის ზედაპირი ხიმინჯის ქვედა ბოლოსთან.



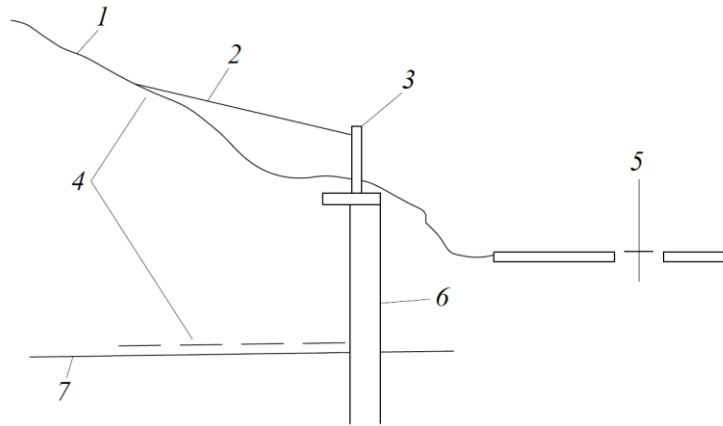
ნახ. 1.10. მეწყერის სტაბილიზაცია ხიმინჯების დახმარებით ჩეხოსლოვაკიაში:

1 - ამოღების ქანობის პროფილი მეწყერამდე; 2 - მეწყერი, 1965წ; 3 - დაცურების ზედაპირი; 4 - თავიდან დაგეგმილი ქანობის ზედაპირი.

1.10 ნახაზზე გამოსახულია ხიმინჯის გამოყენება მცირე სიღრმის მეწყერის სტაბილიზაციისთვის ჩეხოსლოვაკიის ერთ-ერთ სარკინიგზო მონაკვეთზე (ზარუბა და მენკლი, 1979). ამოღებამ მიიღო დახრა 4:1 და შესრულდა გამოფიტვის საშიშროების მქონე დაბზარულ მერგელურ თიხაში. 1975 წლის წვიმიან გაზაფხულის პერიოდში ქანობის ძირზე წარმოიშვა მცირე მეწყერული დაშრევა, რომელიც განვითარდა 50 მეტრის სიგრძეზე და მიაღწია ქანობის თხემს. რადგან მონაკვეთი იყო მიუდგომელი და დიდი მოცულობის გრუნტის მოცილება იყო გართულებული, მეწყერის შემდგომი განვითარების თავიდან ასაცილებლად გამოყენებული იქნა ხიმინჯები. წინასწარ მომზადებული 4 მეტრის სიღრმის გაბურღული ღრმულებში ჩაასვეს 6 მეტრის სიღრმის 42 ხიმინჯი. ხიმინჯებს შორის გრუნტის შერევისგან თავიდან ასაცილებლად მათზე მოხდა რკინაბეტონის ფილების დაყრდნობა. ხიმინჯებს შორის დაშორება შეადგენდა 1-1.5 მეტრს. ფილების გასწვრივ მოეწყო სილის დრენაჟები, რომელთაც წყალი გადაჰყავდათ არხში. ღონისძიებების გატარების შემდეგ ქანობი დაიხარა 5:1-მდე.

1.11 ნახაზზე გამოსახულია ცილინდრული ხიმინჯებისგან შემდგარი კედლის კონსტრუქცია ქანობის ღრმა ნგრევის სტაბილიზაციისთვის მინესოტას შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე (შენონი და უილსონი, 1968). ხიმინჯოვანი კედელი აიგო საყრდენი სისტემის სახით, რისთვისაც საფუძვე-

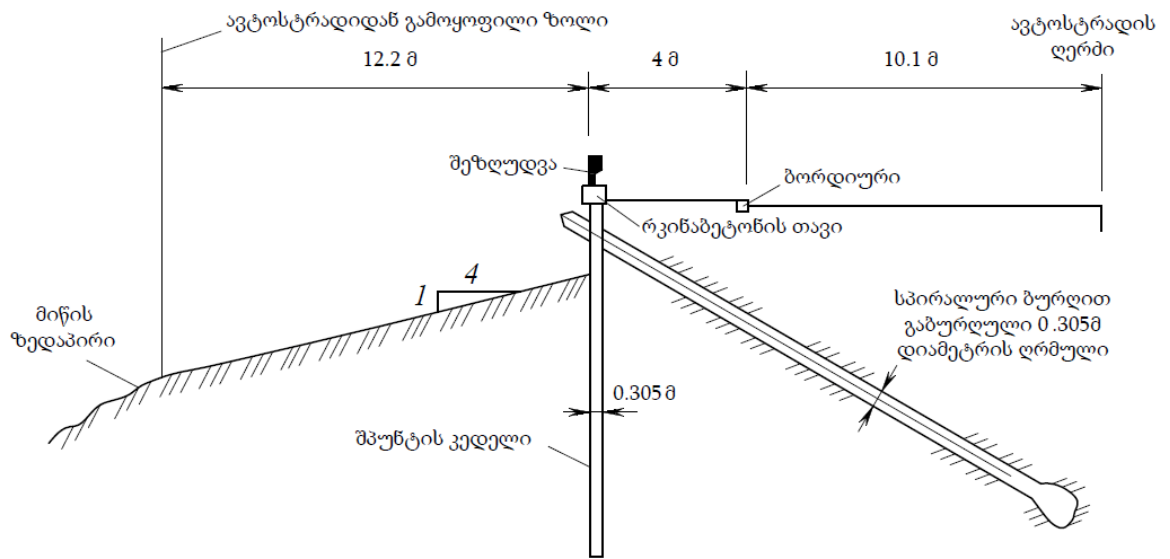
ლში დაწვრილებითი ანგარიშით მოხდა გადაადგილების გამომწვევი ძალების განსაზღვრა. ჩასასობი ხიმინჯები დააპროექტეს, როგორც კონსოლი, რომლებიც ეწინააღმდეგებიან გრუნტის მთლიან ჩამოშლას.



ნახ. 1.11. ცილინდრული ხიმინჯები ღრმა მეწყერის სტაბილიზაციისთვის მინესოტის შტატის ერთ-ერთ მაგისტრალზე:

1 - ამოღების ქანობი; 2 - სილის უკან ჩაყრა; 3 - კონსოლური კედელი (ლოკალური მეწყერების თავიდან ასაცილებლად); 4 - დიდ-ბლოკური ჩამოშლა; 5 - ავტოსტრადის ღერძი; 6 - ცილინდრული ხიმინჯები; 7 - ჩამოშლის ზედაპირი.

**ანკერული სისტემები.** ანკერული სისტემის სახესხვაობათაგან ერთ-ერთია კედელი დამჭიმით, რომელიც იღებს თავის თავზე უკან ჩაყრის დაწოლას დამჭიმი მოწყობილობის დახმარებით, რომელიც გადაანაწილებს მოცემულ დატვირთვას ჩამოშლის პრიზმაზე არსებულ და საკმაო წინააღმდეგობის გამწევ მონაკვეთზე. დამჭიმი მოწყობილობის სახით შეიძლება გამოყენებული იყოს წინასწარ ან შემდგომ დაჭიმული ბაგირები, ღეროები ან წნულეები, ასევე სხვადასხვა სახეობის ანკერული ხიმინჯები და სხვა მოწყობილობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ გრუნტის პასიური დაწოლის განვითარებას. 1.12 ნახაზზე გამოსახულია კედლის ნაწილი მჭიმით მეწყერის გასამაგრებლად ვაშინგტონში, ნიუიორკის ქუჩაზე (ოკალმენი და ტრაიგო, 1970).



ნახ. 1.12. ანკერებიანი შპუნტის კედელი მეწყერული მონაკვეთის გასამაგრებლად ვაშინგტონში, ნიუიორკის ქუჩაზე.

**გრუნტების გამაგრება.** იმ შემთხვევაში, თუ ფერდობზე არსებული წყლის მიწისქვეშა დრენაჟით დაჭერა შეუძლებელია, შეიძლება მიღებული იყოს საძირკველ-მშენებელი ინჟინრების მიერ გამოყენებული გრუნტის გამაგრების მეთოდები. ამ მეთოდებს შორისაა ქიმიური ან თერმული დამუშავება, ელექტროოსმოსი. ქიმიურ დამუშავებისას იყენებენ კირის ან კირი-გრუნტის ნარევის, ცემენტაციას ან იონურ ცვლას. ფართო მეწყერული მონაკვეთის დამუშავების დადებითი შედეგები დამწვარი კირის შეტანით და წინასწარ გაბურღული 1.5 მ ბიჯით და 0.2 მ დიამეტრის ღრმულებით მოყვანილია ხენდის და უილსონის მიერ (1967). წლის განმავლობაში კირი ვრცელდება ღრმულიდან 0.3 მეტრზე. ინგლისში ნაყარის და ამოღების გასამაგრებლად იყენებდნენ ცემენტაციას (ზარუბა და მენკლი, 1969). ცდებიდან ჩანს, რომ ეს მეთოდი იძლევა დადებით შედეგებს მყიფე მასალების მცირე სიღრმეზე არსებობის მეწყერის დროს, ისეთების როგორცაა თიხოვანი ფიქალები, არგილიტები და მაგარი თიხები, რომლებიც ბზარების შედეგად იშლება ბლოკებად. ეს მეთოდი წარმოადგენს ფაქტიურად ქანობების მექანიკურ გამაგრებას ბზარების ცემენტაციით გრუნტის მასის სიმკვრივის ცვლილების გარეშე, რადგან მასში ვერ აღწევს ცემენტის ნარევი. ქანობის გასამაგრებლად მსხვრევადი მასალებში და დელიუვიალურ ნარჩენებში მოხ-

და ინექციით დიდი რაოდენობის ცემენტის ნარევის შეყვანა. იონოცვლადი ტექნოლოგიის შესახებ გვატყობინებენ სმიტი და ფორსიტი (1971).

ელექტროოსმოსური მეთოდი ქმნის ისეთივე სასრულ ეფექტს, როგორც მიწისქვეშა წყლების დრენაჟი, ხოლო მისი განსხვავება მდგომარეობს ელექტრული ველის ზემოქმედების არსებობაში გრავიტაციულ ძალებზე წყლის გადინების დროს. ფორული წყლების რაოდენობის დაკლებას მივყავართ გრუნტის კონსოლიდაციამდე, და შესაბამისად ძვრაზე სიმტკიცის ზრდამდე.

თერმული დამუშავების გამოყენების შესახებ მეწყერის თავიდან ასაცილებლად პირველი შეგვატყობინა ხიპლომ (1934).

## 2. ფერდოს მდგრადობის გაანგარიშება ზღვრული დაძაბული მდგომარეობით

### 2.1. მთის ქანები - ფენოვანი დაბზარული გარემო

საინჟინრო პრაქტიკაში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ისეთი ამოცანების გადაჭრას, როგორცაა, მაგალითად: ბუნებრივი ფერდობების მდგრადობის შემოწმება, გრუნტის მასების ჩამოშვავებისა და მეწყერული ხასიათის მოვლენების წარმოშობის პროგნოზები: დიდი ზომის ქვაბულების, საგზაო ყრილებისა და თხრილების, მიწის კაშხლებისა და დამბების ფერდობების საჭირო ქანობის დანიშვნა; გრუნტის გვერდითი წნევის გაანგარიშება საყრდენ კედლებზე, ზღუდარებზე და სხვა მსგავს ნაგებობებზე.

ასეთი ამოცანების გადაწყვეტას საფუძვლად უდევს გრუნტების ზღვრული დაძაბულობის თეორია, მაგრამ მათ შორის რამდენიმე მარტივი ამოცანა გადაწყვეტილია ზუსტი მათემატიკური მოდელის შედგენით, რაც აიხსნება მეთოდის ზედმიწევნითი სირთულით. რაც შეეხება აღნიშნული ამოცანების უდიდეს ნაწილს, მათ გადასაჭრელად ჯერჯერობით იყენებენ გამარტივებულ ხერხებს, როდესაც გრუნტის გადაადგილების ზედაპირის ფორმა დგინდება არა მკაცრი მათემატიკური სიზუსტით, ზღვრული დაძაბულობის თეორიის მეშვეობით, არამედ წინასწარი გარკვეული დაშვებებით. ასეთ ამოცანებში გრუნტების გადაადგილების ზედაპირის ფორმა ან განსაზღვრულია ბუნებრივი პირობებით, ან დაინიშნება პრაქტიკით მიღებული გამოცდილების საფუძველზე.

მოშიშვლებული მთის ქანების მდგრადობაზე გაანგარიშების დროს ავტორების ერთი ნაწილი მასივის მთის ქანებს განიხილავენ როგორც ერთგვაროვან დრეკად მყარს სხეულს, მეორენი თვლიან, რომ მთის ქანები პლასტიკური ხასიათისაა, სხვებისთვის მთის ქანები ფხვიერია.

ფერდოს მდგრადობის შეფასების მეთოდების უმეტესობა არ ითვალისწინებს ქანობის ბუნებრივ სტრუქტურას (შრეულობა, გამოცალკევება და ბზარიანობა) და მის სიმტკიცის ხასიათს, რის გამოც გაანგარიშების დროს მიიღება დიდი ცდომილება. გამომდინარე პირობებიდან, მთის ქანები

შეიძლება დაირღვეს აგლეჯვით, როდესაც მოქმედებს ნორმალური გამჭიმავი ძაბვები, ან ჭრით, რაც გამოწვეულია მხები ძაბვებით.

მთის ქანების თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ მონოლითური ნიმუშის შემთხვევაშიც კი მისი სიმტკიცე გაჭიმვაზე საგრძნობლად მცირეა, ვიდრე კუმშვაზე ან ჭრაზე.

მთის ქანების მასივს აგლეჯვაზე შეუძლიათ გასწიოს ძალიან მცირე წინააღმდეგობა, რაც აიხსნება მათი შრეული მდგომარეობით და ბზარაინობით.

სიმტკიცის თვალსაზრისით მთის ქანები არ შეიძლება განვიხილოთ არც როგორც ერთგვაროვანი დრეკადი გარემო და არც გარემო, შემდგარი მონოლითური შრეებისგან. საერთო ჯამში, მთის ქანები მასივში აუცილებელია განვიხილოთ, როგორც შრეული დაბზარული გარემო, რომელშიც დაუშვებელია (იშვიათი გამონაკლისის გარდა) გამჭიმავი ძაბვების მოქმედება.

ნაგებობის მდგრადობის ანგარიშის ცნობილ მეთოდებში ამ თვისებებს ფლობს ე.წ. „ფხვიერი გარემო“, რასაც ვ.ვ. სოკოლოვსკი ახასიათებს როგორც გარემოს, რომლისთვისაც დაუშვებელია დიდი გამჭიმავი ძაბვები (რომლებიც ანგარიშის დროს შეიძლება უგულვებელყოთ) განსხვავებით ერთგვაროვანი დრეკადი მყარი სხეულებისგან, რომლებიც ერთნაირად კარგად მუშაობენ, როგორც გამჭიმავ ისე მკუმშავ ძაბვებზე. ხშირად „ფხვიერი გარემო“ გაგებულია გარემო, რომლის მინერალურ ნაწილაკებსაც აბსოლუტურად არ გააჩნიათ ბმულობა და ხასიათდებიან მხოლოდ შიდა ხახუნის კუთხით. სინამდვილეში „ფხვიერ გარემოსთვის“ ასეთი მდგომარეობა წარმოადგენს იშვიათ (კერძო) შემთხვევას.

ფხვიერი გარემოს თეორიაში არ არის გათვალისწინებული წინაღობა აგლეჯვაზე. წინაღობამ კუმშვაზე და ჭრაზე შეიძლება დიდი სიდიდეებს მიაღწიოს. მთის ქანები მასივში ასევე რეაგირებენ ძაბვებზე და ისინი შეიძლება ჩავთვალოთ „ფხვიერ ქანებად“, მაგრამ რადგან ეს ტერმინი არ ასახავს სრულად მთის ქანების ფიზიკურ მდგომარეობას და შეიძლება გამოიწვიოს



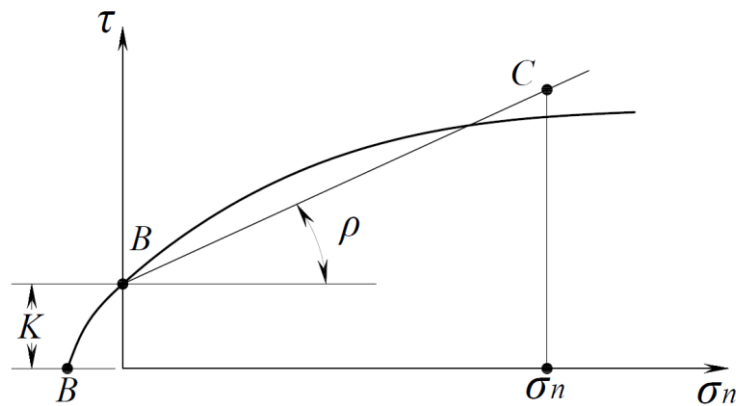
გარკვეული გაუგებრობა, მთის ქანები სჯობს დავახასიათოდ როგორც ფენო-ვანი დაბზარული გარემო და გამოვიყენოთ „ფხვიერი გარემოს“ კანონები.

მთის ქანობის კუთხის და საბოლოო მოხაზულობის განსაზღვრა წარმოადგენს „ფხვიერი გარემოს“ ზღვრული წონასწორობის თეორიის კერძო შემთხვევას.

ზღვრული წონასწორობის ძირითად პირობას მასივის ქანობის (კარიერის ბორტის) ნებისმიერ სიბრტყეზე აქვს შემდეგი სახე:

$$\tau = \varphi(\sigma_n),$$

სადაც,  $\tau$  და  $\sigma_n$  მხები და ნორმალური ძაბვებია მოცემულ სიბრტყეზე.



ნახ. 2.1. მთის ქანების ძვრაზე წინააღმდეგობის გრაფიკი

ეს დამოკიდებულება მთის ნებისმიერი ქანებისთვის ხასითდება მონოტონური მრუდით  $ABC$  (ნახ. 2.1), რომელიც ძაბვების მოცემულ ზღვრებში შეიძლება შეიცვალოს წრფით.

$$\tau = K + f \sigma_n, \tag{2.1}$$

სადაც  $K$  - არის შეჭიდულობა, გამოსახული იგივე ერთეულებში, რაც  $\tau$  და

$\sigma_n$ ;

$f$  - ძაბვების მოცემულ ინტერვალზე შიდა ხახუნის კოეფიციენტის

საშუალო სიდიდე (გაანგარიშებისას მიღებულია იგი შეიცვალოს

შიგა ხახუნის კუთხით  $f = \operatorname{tg} \rho$ ).

## 2.2. მთის ქანების დეფორმაციული თვისებები

განასხვავებენ მთის ქანების დრეკადობას და პლასტიკურობას. მთის ქანების დრეკადობა ნიშნავს მის უნარს შეიცვალოს ფორმა ან მოცულობა გარე ზემოქმედებისას და დაუბრუნდეს საწყის ფორმას ან მოცულობას გარე ზემოქმედების მოხსნის შემდეგ.

მყარი ტანის დრეკად დეფორმაციის მიდამოში მოქმედებს ჰუკის კანონი, რომლის მიხედვითაც სხეულის დეფორმაცია მოქმედი ძალის პროპორციულია

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}, \quad (2.2)$$

სადაც  $\Delta l = l - l_1$  - არის აბსოლუტური დეფორმაცია (ნახ. 2.2.ა);

$l$  - ნიმუშის სიგრძე დეფორმაციამდე, მ;

$l_1$  - ნიმუშის სიგრძე დეფორმაციის შემდეგ, მ;

$P$  - მოქმედი ძალა, ნ;

$F$  - ნიმუშის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

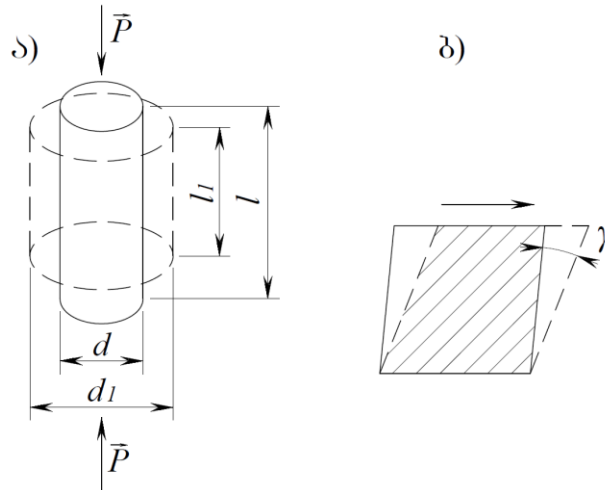
$E$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი.

წრფივი დეფორმაციის აბსოლუტური სიდიდის ფარდობას ნიმუშის სიგრძესთან ფარდობითი გრძივი დეფორმაცია  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  ეწოდება. ჰუკის კანონში პროპორციულობის კოეფიციენტს პირველი გვარის დრეკადობის მოდული ან იუნგის მოდული (ნ/მ<sup>2</sup>) ეწოდება.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.3)$$

როცა  $\varepsilon = 1$ ,  $E = \sigma$ , იუნგის მოდული ძაბვის იმ სიდიდის ტოლია, რომელიც აუცილებელია მოედოს დეფორმირებულ სხეულს, რომ მისი აბსოლუტური დეფორმაცია საწყისი სიგრძის ტოლი აღმოჩნდეს.

ერთდერძა კუმშვის მდგომარეობაში დატვირთვების მოქმედების მიმართულებით სხეულის დეფორმაციას თან ახლავს მისი განივი ზომების ცვლილება.



ნახ. 2.2. დრეკადი დეფორმაციების სქემა:  
 ა - ერთლერძა კუმშვის დროს. ბ - ძვრაზე.

დრეკად არეში ფარდობითი განივი დეფორმაციის ფარდობას გრძივ ფარდობით დეფორმაციასთან პუასონის კოეფიციენტი ეწოდება

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}, \quad (2.4)$$

სადაც  $\varepsilon_1 = \frac{d_1 - d}{d}$  - არის ფარდობითი განივი დეფორმაცია;

$\varepsilon$  - ფარდობითი გრძივი დეფორმაცია;

$d_1$  - ნიმუშის სიგანე დეფორმაციის შემდეგ, მ.

მთის ქანების ქცევა დრეკადობის არეში იუნგის მოდულისა და პუასონის კოეფიციენტის გარდა ხასიათდება ძვრის მოდულით (პა/რად-ში) - ქანებზე მოდებული მხები  $\tau$  ძაბვის ფარდობით  $\gamma$  კუთხესთან (ნახ. 2.2.ბ), რომლის შესაბამისად გადაადგილდებიან ნაწილაკები:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (2.5)$$

ე.ი. ძვრის მოდული არის მხები ძაბვის ის სიდიდე, რომელიც საჭიროა იმისთვის, რომ ძვრის დეფორმაციამ მიაღწიოს 1 რადიანის ( $57^{\circ}17'45''$ ) ტოლ სიდიდეს.

ყველამხრივი კუმშვის მოდული არის პროპორციულობის კოეფიციენტი ყველამხრივ ჰიდროსტატიკურ კუმშვის ძაბვესა და ქანობის ნიმუშის მოცულობის ფარდობით შეკლებას (შემცირებას) შორის

$$\sigma' = K \frac{\Delta V}{V}, \quad (2.6)$$

სადაც  $\sigma'$  - არის ყველამხრივი კუმშვის ძაბვა, პა;

$K$  - ყველამხრივი კუმშვის მოდული, პა;

$\Delta V$  - ნიმუშის მოცულობის აბსოლუტური შეკლება, მ<sup>3</sup>;

$V$  - ქანობის ნიმუშის მოცულობა, მ<sup>3</sup>.

ყველამხრივი კუმშვის ფიზიკური მოდული ახასიათებს ძაბვას, რომლის დროსაც მოცულობის ფარდობითი შეკლება ერთის ტოლია.

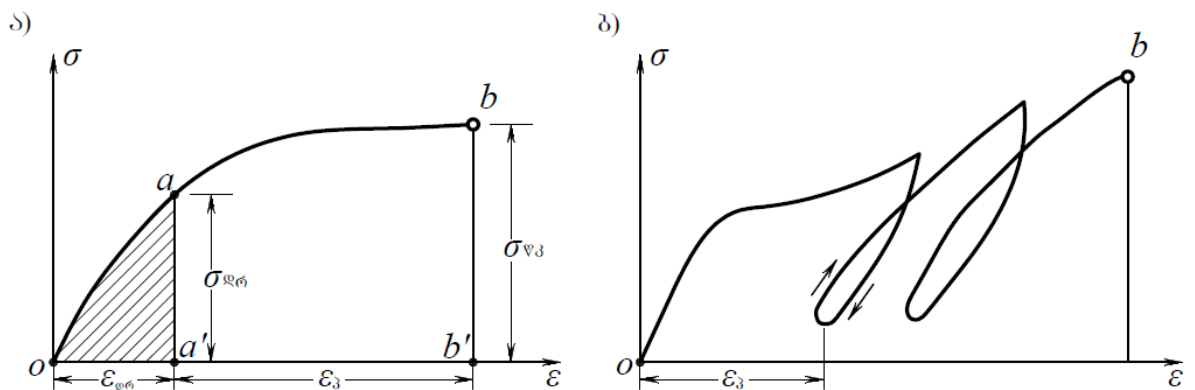
მთის ქანების დრეკადობის მახასიათებლები ერთმანეთთან დაკავშირებულია შემდეგი თანაფარდობით

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (2.7)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}. \quad (2.8)$$

ამიტომ, იმისათვის რომ მივიღოთ ეს მახასიათებლები საკმარისია განისაზღვროს ორი მონაცემი - იუნგის მოდული და პუასონის კოეფიციენტი.

2.3.ა ნახაზზე ნაჩვენებია ერთჯერადი დატვირთვის დროს მთის ქანების რღვევამდე დეფორმაციის დიაგრამა. რიგრიგობითი დატვირთვა-განტვირთვის დიაგრამა კი ნაჩვენებია 2.3.ბ ნახაზზე.



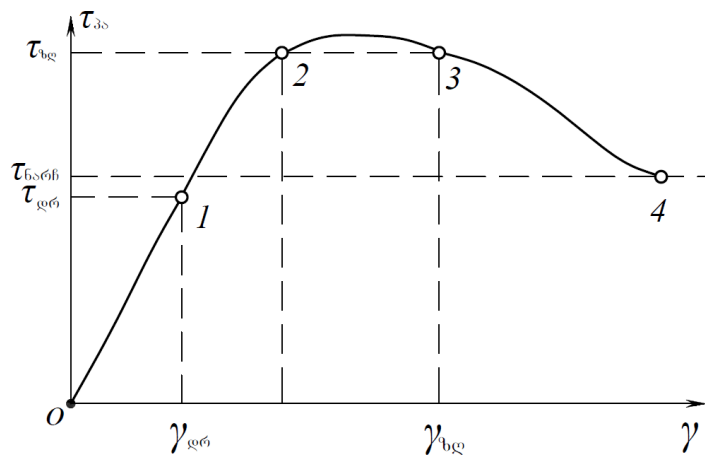
ნახ. 2.3. ძაბვების დეფორმაციებზე დამოკიდებულების გრაფიკი:

$\sigma_{დრ}$ - დრეკადობის ზღვარი;  $\sigma_{წვ}$ - დროებითი წინაღობა კუმშვაზე.

როგორც ამ დამოკიდებულებებიდან ჩანს,  $Oa'$  მონაკვეთი პირობითად შეიძლება ჩაითვალოს აბსოლუტურ დრეკად დეფორმაციის არედ.  $\sigma$ -ს და  $\epsilon$ -ს

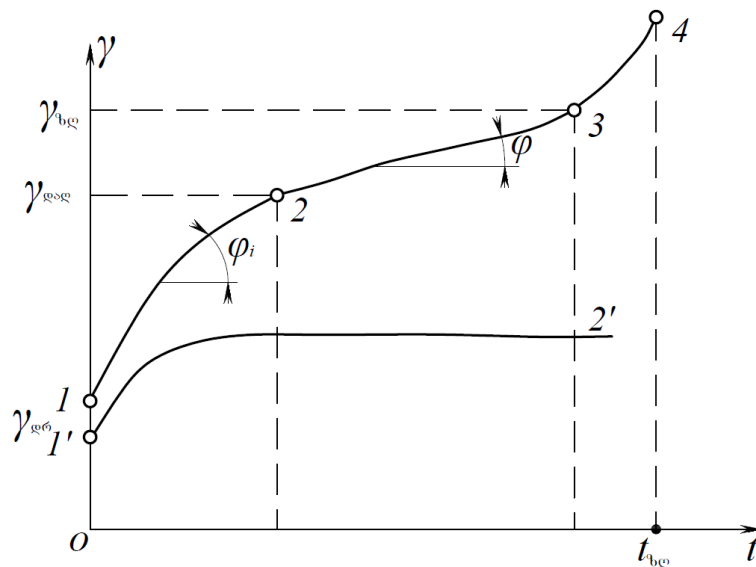
დამოკიდებულება შორის არ არის წრფივი და ამიტომ დრეკადობის მოდული წარმოადგენს ცვლად სიდიდეს. გარდა ამისა, დატვირთვის სხვადასხვა სახეობებს (კუმშვა, გაჭიმვა და ა.შ.) მიყვართ ასევე დრეკადი მახასიათებლების სხვადასხვა სიდიდეებამდე. ისინი მცირდება დიდი გამჭიმავი ძაბვების მოდების დროს და იზრდება მკუმშავი ძაბვების მოდების შემთხვევაში.

რეალურად, დატვირთვის მოხსნის შემდეგ მთის ქანებში ადგილი აქვს ნარჩენ პლასტიკურ დეფორმაციებს  $\epsilon_3$  (ნახ. 2.3.ბ). ნიმუშის განმეორებითი დატვირთვის შემდეგ წარმოიშვება გისტერეზისის მარყუჟი - დეფორმაციის დროს ენერჯის დაკარგვის სიდიდის მახასიათებელი (ნახ. 2.3.ბ). მთის ქანები წარმოადგენს დრეკად-პლასტიკურ სხეულებს. ტემპერატურის მომატების შემთხვევაში ქანების პლასტიკურობა იზრდება. სწრაფი (დარტყმითი) დატვირთვებისას ქანები მყიფედ ირღვევა, ხოლო ნელი დატვირთვებისას ვითარდება პლასტიკური დეფორმაციები. ამრიგად, მთის ქანების დეფორმაციის სიდიდე დამოკიდებულია დროზე. დროში მუდმივი ძაბვების მოქმედებისას ქანების დეფორმაცია არ ინარჩუნებს მუდმივ სიდიდეს, არამედ იზრდება. ამ მოვლენას ცოცვადობა ეწოდება. პლასტიკური ქანებისთვის ცოცვადობის ნიშნები შეიმჩნევა იმ ძაბვების დროს, რომლებიც შეადგენენ მრღვევ ძაბვებს 10-15%-ს სწრაფი დატვირთვის პირობებში. მთის ქანების დეფორმაცია (ძვრის კუთხე  $\gamma$ ) მუდმივი სიჩქარით ნელი დატვირთვის დროს ნაჩვენებია 2.4 ნახაზზე.



ნახ. 2.4. ძვრის დეფორმაცია ნელი დატვირთვის დროს

0-1 მონაკვეთზე შეიმჩნევა პრაქტიკულად წრფივი დამოკიდებულება ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის (დრეკადი დეფორმაცია), ხოლო 1-2 -ზე ნელა ზრდადი დატვირთვის დროს - ნიმუშის პლასტიკური დეფორმაცია. 2-3 მონაკვეთი ხასიათდება ცოცვადობით ე.ი. დეფორმაციის ზრდით უცვლელი დატვირთვების დროს. დეფორმაციის ზღვრული სიდიდემდ ( $\gamma_{ზღ}$ ) მიღწევა იწვევს ქანების რღვევას და ამცირებს ძაბვის სიდიდეს რომელიღაც ნარჩენ  $\tau_{ნარჩ}$  სიდიდემდე. 2.5 ნახაზზე ნაჩვენებია პლასტიკური დეფორმაციების განვითარება დროში. ძაბვების დრეკადობის ზღვრამდე ( $\tau_{დრ}$ ) მიღწევისთვის საკმარისი დატვირთვების მოდებისას დეფორმაციის სიდიდე აღწევს მყისიერად  $\gamma_{დრ}$ -ს (წერტილი 1), რის შემდეგაც იწყება პლასტიკური დეფორმაცია. პლასტიკური დეფორმაციები ხასიათდება მიღევადი ცოცვადობის (1-2) სტადიით, რომელზეც პლასტიკური დეფორმაციების სიჩქარე თანდათანობით იკლებს; ბოლო სტადიაზე (ზღვრული დეფორმაციის სიდიდის მნიშვნელობის  $\gamma_{ზღ}$ -ის მიღწევის შემდეგ) დეფორმაციის სიჩქარე მყისიერად იმატებს და შეიმჩნევა მასალის რღვევა.



ნახ. 2.5. დროში პლასტიკური დეფორმაციების განვითარება

გადაადგილების ძაბვების სიდიდის შემცირებით, შეიძლება მივაღწიოთ ისეთ მდგომარეობას, როცა ქანების დეფორმაციის პროცესი შეჩერდება მიღწეადი ცოცვადობის სტადიაზე (მრუდი 1'-2'). ძაბვების მაქსიმალური სიდიდე, რომელსაც შეესაბამება ასეთი დეფორმაცია ეწოდება ცოცვადობის ზღვარი, ე.ი. იმ ძაბვებს, რომელთა დროსაც დეფორმაციის სიჩქარე ნულისკენ მიისწრაფვის, ხოლო დეფორმაციის სიდიდე, რომელიც სასრულ სიდიდემდე, რომლის დროსაც დატვირთვების მოდების დრო უსასრულოდ იზრდება. არამიღწეადი პლასტიკური დეფორმაციები, ე.ი. ცოცვადობის და პლასტიკური დენადობის დადგენის სტადიაზე გადასვლა შეიძლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ  $\tau > \tau_{\text{ცოც.}}$

### 2.3. მთის ქანების სამთო-ტექნიკური თვისებები

არსებობს მთის ქანების მთელი რიგი თვისებები, რომლებიც ასახავენ მათ გარკვეულ არსებით თვისებურებებს სამთო სამუშაოების ამოღების ტექნოლოგიური პროცესის დროს. მათ შორისაა გაფხვიერება, ჯდომა, ბზარიანობა, სახეცვლილება, გრანულომეტრული შემადგენლობა, სიმტკიცე და სხვა. ყველა ეს თვისება დამოკიდებულია მოცემულ მთის ქანების ფიზიკურ თვისებებზე. თუმცა სამთო-ტექნიკურ და ფიზიკურ თვისებებს შორის დამოკიდებულების დადგენა უმეტეს შემთხვევაში გართულებულია და პრაქტიკული მიზნებისთვის მოსახერხებელია სამთო-ტექნიკური თვისებებით სარგებლობა. მდგრადობის პრობლემების განსაზღვრისთვის აუცილებელია გავითვალისწინოთ მთის ქანების გაფხვიერება და ჯდომა, გრანულომეტრული შემადგენლობა, დაყრის მასა და ხახუნის კოეფიციენტი, ბუნებრივი ქანობის კუთხე და სიმტკიცე.

მკვრივი ქანების გაფხვიერება ნიშნავს გაფხვიერების შედეგად მისი მოცულობის გაზრდას, გაფხვიერებამდე მასივში ქანების მოცულობასთან შედარებით. გაფხვიერება ფასდება გაფხვიერების კოეფიციენტით

$$K_g = \frac{V_g}{V} = \frac{\gamma}{\gamma_g}, \quad (2.9)$$

სადაც  $V_g$ - არის ქანების მოცულობა გაფხვიერების შემდეგ, მ<sup>3</sup>;

$V$  - მასივში ქანების მოცულობა, მ<sup>3</sup>;

$\gamma$  - მასივში ქანების სიმკვრივე, ტ/მ<sup>3</sup>;

$\gamma_g$ - გაფხვიერებული ქანების სიმკვრივე, ტ/მ<sup>3</sup>.

გაფხვიერების კოეფიციენტი დამოკიდებულია ქანების გაფხვიერების ხარისხზე, ტევადობაზე და ჭურჭლის ფორმაზე, ტენიანობაზე და ქანების გაფხვიერებულ მდგომარეობაში ყოფნის დროზე.

გაფხვიერებული ქანები დროთა განმავლობაში მკვრივდებიან რომელი-ღაც მეტნაკლებად მუდმივ სიდიდემდე, რომელსაც გაფხვიერების ნარჩენი კოეფიციენტი  $K_{p.o.}$  ეწოდება. ქანების ჯდომა (გამკვრივება) დროის შუალედში შეიძლება შეფასდეს გამკვრივების კოეფიციენტით

$$i = \frac{V_g - V_g'}{V_g} = 1 - \frac{K_n}{K_g}, \quad (2.10)$$

სადაც  $V_g'$  - გამკვრივების შემდეგ გაფხვიერებული ქანების მოცულობა.

დაყრის მასა ნიშნავს მთის ქანების დაყრილ მასას ერთეულ მოცულობაში. ეს ცნება იგივეა, რაც გაფხვიერებული ქანების სიმკვრივე. დაყრის მასის სიდიდე დამოკიდებულია გრანულომეტრულ შემადგენლობის მასივში ქანების სიმკვრივეზე, გამკვრივების ხარისხზე, ტენიანობაზე და ა.შ.

ქანების გრანულომეტრული შემადგენლობა ნიშნავს მთის ქანებში სხვადასხვა სიდიდის ნაწილაკების ფარდობით შემადგენლობას. ამ მახასიათებელზეა დამოკიდებული ქანების სიმკვრივე და ხახუნის კუთხე, ძვრაზე წინალობის სიდიდე და სხვა ფიზიკო-მექანიკური თვისებები (ფორიანობა, კუმშვადობა, ტენ-ტევადობა და ა.შ.).

სხეულების ერთმანეთის მიმართ (ან მისი ერთი ნაწილის მეორეს მიმართ) გადაადგილებისას წარმოიშობა ხახუნის ძალები, რომლებიც ეწინააღმდეგებიან გადაადგილებას ან მოდებული ძალების არასაკმარისი სიდიდის შემთხვევაში ხელს უწყობენ გადაადგილებას. გადაადგილების დაწყებისთვის აუცილებელი  $\vec{F}$  ძალის სიდიდე მეტი უნდა იყოს ნორმალუ-



რი დაწოლის  $\vec{P}$  ძალის სიდიდეზე. თუ გადაადგილება ნორმალურ ზედაპირზე გამოწვეულია  $\vec{T}$  ძალის მოქმედებით, ხოლო სხეულის  $\vec{N}$  წონა წარმოადგენს ნორმალურ დაწოლის ძალას, მაშინ ხახუნის კოეფიციენტი

$$f_g = \frac{T}{N}. \quad (2.11)$$

თუ გადაადგილების ზედაპირს გააჩნია დახრის კუთხე  $\alpha$  და თუ ეს კუთხე თანდათან იზრდება, მაშინ დადგება მომენტი (დახრის კუთხე  $\alpha=\rho'$ ), როცა სხეული დაიწყებს გადაადგილებას საკუთარი წონის ზემოქმედებით. ამ შემთხვევაში  $F$  ძალის სახით მიღებული იქნება წონის მხები მდგენელი  $T = P \sin \rho'$ , ხოლო ნორმალური დაწნევის ძალის სახით - წონის ნაწილი  $N = P \cos \rho'$ . მაშინ ხახუნის კოეფიციენტი

$$f_g = \frac{\sin \rho'}{\cos \rho'} = \operatorname{tg} \rho'. \quad (2.12)$$

$\rho'$  კუთხეს ხახუნის კუთხე ეწოდება. მისი სიდიდე დამოკიდებულია ქანების ტიპზე და გადამკვეთ ზედაპირების მდგომარეობაზე. მთის ქანების რღვევის დროს შიგა ძალები, რომლებიც ეწინააღმდეგებიან ამ რღვევას, პირობითად იყოფიან ნაწილაკებს შორის შეჭიდულობის და შიგა ხახუნის ძალებად, რომლებიც დამოკიდებულნი არიან ნორმალური წნევის სიდიდეზე და შიგა ხახუნის  $f_s$  კოეფიციენტზე. შიდა ხახუნის  $f_s$  კოეფიციენტი ყველა მახასიათებლით ქანების ურღვევი ზედაპირის ნაწილის ხახუნის კოეფიციენტის ანალოგიურია, ხოლო სიდიდით შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შიდა ხახუნის  $\rho$  კუთხის ტანგენსით. შიგა ხახუნის კუთხის კოეფიციენტი წარმოადგენს დამძვრელი ძალების (მოცემულ  $S$  სიდიდის ფართობზე შეჭიდულობის  $K$  სიდიდეზე დამოკიდებულ შეჭიდულობის ძალების გარდა) ფარდობას ნორმალური წნევის ძალის  $N$  სიდიდესთან.

$$f = \frac{T - ks}{N} = \operatorname{tg} \rho. \quad (2.13)$$

ფხვიერი ქანების ბუნებრივი ქანობის კუთხეს უწოდებენ ამ ქანების ზედაპირის დახრის  $\alpha_0$  კუთხეს ჰორიზონტთან, რომელიც წარმოიშობა

თავისუფალი დაყრის დროს. რადგან ფხვიერ ქანებს არ გააჩნიათ შეჭიდულობა

$$\alpha_0 = \rho = \rho'.$$

ბუნებრივი ქანობის კუთხის სიდიდე დამოკიდებულია ნაწილაკების ფორმებზე, ზომებზე, ტენიანობაზე, სიმკვრივეზე და ა.შ. იგი განისაზღვრება ნაყარი და დაშლილი ქანების მარკშრეიდერული გადაღებების შედეგების შედეგად. აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ, რომ ნაყარზე ქანების დაყრით ქანობის ჯამური კუთხე რამდენადმე ნაკლები იქნება გაზნვის შედეგად ბუნებრივ ქანობის კუთხეზე. ბუნებრივი ქანობის კუთხე დარღვეული სტრუქტურის კლდოვანი და ნახევარკლდოვანი ქანებისთვის შეადგენს 32-37°-ს, თიხოვანი მშრალი ქანებისთვის 27-35°-ს, ტენიანი ქანებისთვის 15-25°-ს, სილებს გააჩნიათ ბუნებრივი ქანობის კუთხე 25-დან 35°-მდე.

მთის ქანების სიმტკიცე ხასიათდება მისი წინააღმდეგობით მექანიკურ ზემოქმედებასთან (გაბურღვა, აფეთქება, ამოღება). პრაქტიკაში უფრო მეტად გავრცელებულია სიმაგრის კოეფიციენტი  $f$ , რომელიც შემოგვთავაზა პროფესორმა მ. მ. პროტოდიაკონოვმა. ის შეადგენს ქანების სიმტკიცის ზღვარს  $\sigma_c$  კუმშვაზე

$$f = \frac{\sigma_c}{9.81 \cdot 10^6}. \quad (2.14)$$

## 2.4. ძაბვების დახასიათება

ძაბვების თეორიაში სხეულზე მოდებული ყველა გარე ძალები იყოფა ზედაპირულ და მოცულობით ძალებად. ფერდოს სტატიკური მდგრადობის შესწავლის დროს მოცულობით ძალებათ ითვლება სიმძიმის ძალა, გრუნტის წყლების ფილტრაციული ნაკადის ჰიდროდინამიკული წნევის ძალა და სეისმური ძალები. ზედაპირულ ძალებს წარმოადგენს გარე დატვირთვები (ყველა აღჭურვილობა და ნაგებობები), ასევე მთის მასივის დაწოლა, განსახილველი მთის ქანების მიდამოში.

მოცემულ სიბრტყეზე მოქმედ განაწილებულ გარე დატვირთვებს ეწინააღმდეგება შიგა ძალები, რომელთაც ეწოდებათ ძაბვები, თუ ამ ძალებს დავიყვანთ ფართობის ერთეულზე.

შიგა ძალები აწონასწორებენ გარე ძალებს, ისინი მოდებული არის გარე ძალების საპირისპიროდ და სტატიკის შემთხვევაში მათი სიდიდეები ტოლია.

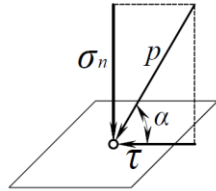
განსახილველ სიბრტყეზე ძალთა წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე შეიძლება მოდებული იყოს მხოლოდ ის გარე ძალები, რომლებსაც მთლიანად აწონასწორებს შიგა ძალები, და მათი მაქსიმალური სიდიდეები მიიღება მასალის (მთის ქანების) სიმტკიცეიდან გამომდინარე. აქედან გამომდინარე, ძაბვების მაქსიმალური (ზღვრული) სიდიდეები, რომლებიც შეიძლება წარმოიშვას მთის ქანების ნებისმიერ წერტილში, დამოკიდებული არის მის სიმტკიცეზე და განსაზღვრავენ ძაბვების სიდიდეს.

მოცემულ სიბრტყეზე მოდებული გარე ძალები, რომლებიც იწვევენ შიგა ძალების (ძაბვების) წარმოშობას, შეიძლება ჰქონდეთ ამ სიბრტყეების მიმართ ნებისმიერი მიმართულება.

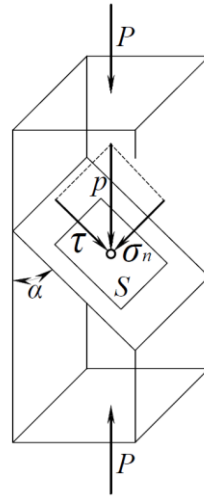
მოცემულ სიბრტყისადმი  $\alpha$  კუთხით დახრილი  $P$  ძაბვა შეიძლება დაიშალოს ნორმალურ  $\sigma_n$  და მხებ  $\tau$  მდგენელად (ნახ. 2.6).

$$\begin{aligned}\sigma_n &= p \sin \alpha; \\ \tau &= p \cos \alpha.\end{aligned}\tag{2.15}$$

თუ განვიხილავთ ძაბვებს ელემენტარულ ბლოკის  $S$  კვეთში, რომელზედაც მოქმედებს ორი ურთიერთ საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალა  $\vec{P}$ , რომელთა მიმართულებაც ემთხვევა ბლოკის ღერძის მიმართულებას (ნახ. 2.7), მაშინ ძაბვა ბლოკის განივ კვეთში ტოლი იქნება



ნახ. 2.6. ძაბვა ელემენტარულ სიბრტყეზე



ნახ. 2.7. ძაბვა ელემენტარულ ბლოკში

$$\sigma_1 = \frac{P}{S}, \quad (2.16)$$

ხოლო  $\vec{P}$  ძაბვა ნებისმიერი სხვა კვეთისთვის, რომელიც დახრილი იქნება ბლოკის ღერძთან  $\alpha$  კუთხით, გამოისახება შემდეგი სახით:

$$p = \sigma_1 \sin \alpha. \quad (2.17)$$

ამ სიბრტყისთვის მხები და ნორმალური ძაბვები ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_1 \sin^2 \alpha; \\ \tau &= \sigma_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (2.18)$$

განსახილველ სხეულზე მოდებულ ძალებს ხასიათის მიხედვით განასხვავებენ: წრფივი დაძაბული მდგომარეობა, როცა ძაბვები წარმოიქმნება ძალებით, რომლებიც მოქმედებენ ერთი წრფის გასწვრივ; ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობა, როცა ძალები მოქმედებენ ერთ სიბრტყეზე მდებარე ორი წრფის მიმართულებით, და მოცულობითი დაძაბული მდგომარეობა, როცა ძალები მოქმედებენ ერთ სიბრტყეზე არმდებარე სამი ან მეტი მიმართულებით. წრფივ დაძაბულ მდგომარეობას ვხვდებით წვრილ გრძელ ღეროებში, ბრტყელს - თხელ ფირფიტებში.

ძაბვების თეორიაში დიდი მნიშვნელობა აქვს მთავარ სიბრტყეების და მთავარი ძაბვების ცნებას. მთავარ სიბრტყეებად მიღებულია ისეთები, რომლებზეც მხები ძაბვები არ არსებობენ. ნებისმიერ დამაბული ველის ყოველ წერტილში შეიძლება ავაგოთ სამი ურთიერთ-მართობული მთავარი სიბრტყე, რომლებზეც მოდებული იქნება მხოლოდ მთავარი (ნორმალური) ძაბვები.

წრფივი დამაბული მდგომარეობის დროს სამი მთავარი ძაბვიდან ორი ნულის ტოლია; ბრტყელი დამაბული მდგომარეობის დროს ერთი მთავარი ძაბვაა ნულის ტოლი; მოცულობითი დამაბული მდგომარეობის დროს არცერთი მთავარი ძაბვა არ უდრის ნულს.

როგორც წესი, მთის ქანები იმყოფებიან მოცულობით დამაბულ მდგომარეობაში - ყველა მხრიდან კუმშვის პირობებში, ამიტომ მკუმშავ ძაბვებს დადებითი ნიშანი აქვს. მაქსიმალური მთავარი ძაბვა აღინიშნება  $\sigma_1$ -ით, მინიმალური  $\sigma_3$ -ით, სიდიდით საშუალო  $\sigma_2$ -ით.

თუ მთის ქანების ელემენტარულ ბლოკს მოვდებთ ღერძულ დატვირთვას  $\sigma_1$  ინტენსივობით, მაშინ ეს დატვირთვა გამოიწვევს კუმშვას  $\sigma_1$ -ის მიმართულებით და გვერდით გაფართოებას სიბრტყეზე, რომელიც მართობული იქნება  $\sigma_1$ -ის მიმართულების მიმართ, მაგრამ თუ გვერდით გაფართოებას ხელს უშლის მთის ქანების სხვა მჭიდროთ მიდგმული ბლოკი, მაშინ ბლოკის გვერდით ზედაპირებზე წარმოიშვება გვერდითი გამბჯენი ძალები  $\sigma_2 = \sigma_3$ , რომელთა სიდიდეები დამოკიდებულია მასალის  $E$  და  $\nu$  დრეკად თვისებებზე, მის  $\sigma_1$ -ზე ერთდერძა კუმშვისას სიმტკიცეზე და  $\sigma_1$ -ის სიდიდეზე

$$\sigma_2 = \sigma_3 = f(\sigma_1; \sigma_1; E; \nu).$$

იმ შემთხვევაში, თუ გვერდითი გამბჯენი ძალები არაა ერთნაირი ე.ი. თუ ბლოკის რომელიმე მხარეს ადგილი აქვს რაიმე დეფორმაციას  $\sigma_2 \neq \sigma_3$ . ე.ი. ძაბვები სხეულში შეიძლება გამოწვეული იყოს როგორც აქტიური ძალებით, ასევე რეაქციებით.

ბუნებრივ პირობებში მთის ქანების მიდამოში და იმ მიდამოში, სადაც მიმდინარეობს სამთო სამუშაოები უმეტეს შემთხვევაში გარე (მოცულობითი) ძალები მოქმედებს ერთი (ვერტიკალური) მიმართულებით, ხოლო მოცულობითი დაძაბული მდგომარეობა წარმოიშვება გვერდითი გამბჯენის ხარჯზე (გამონაკლისია ფილტრაციული, ტექტონიკური და სეისმური ძალები).

მთის ქანების მდგრადი მდგომარეობის განსაზღვრისათვის აუცილებელია მასივის ნებისმიერი სიბრტყეში ძაბვების ცოდნა. იმ სიბრტყეებს, რომლებიც მიმართული არიან ერთ-ერთი მთავარი ძაბვის პარალელურად მთავარი ძაბვის სიდიდეებსა და მხებ და ნორმალურ ძაბვების სიდიდეებს შორის დამოკიდებულება დგინდება შემდეგი მოსაზრებით:

მაგალითად, თუ სიბრტყე ერთ-ერთი მთავარი ძაბვის  $\sigma_2$ -ის პარალელურია, მაშინ ამ სიბრტყესა და  $\sigma_2$ -ს შორის შექმნილი  $\alpha$  კუთხე  $\theta$ -ის ტოლია და (2.18) გამოსახულების თანახმად

$$\sigma_{n2} = 0 \text{ და } \tau_2 = 0.$$

ეს სიბრტყე სხვა ორ მთავარ ძაბვასთან ადგენ  $\alpha$  და  $(90^\circ - \alpha)$ ს კუთხეებს, ხოლო მხები და ნორმალური ძაბვები  $\sigma_1$  და  $\sigma_3$ -თან შეადგენენ:

$$\begin{aligned} \sigma_{n1} &= \sigma_1 \sin^2 \alpha; & \sigma_{n3} &= \sigma_3 \sin^2(90^\circ - \alpha) = \sigma_3 \cos^2 \alpha; \\ \tau_1 &= \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha; & \tau_3 &= \frac{1}{2} \sigma_3 \sin 2(90^\circ - \alpha) = -\frac{1}{2} \sigma_3 \sin 2\alpha. \end{aligned}$$

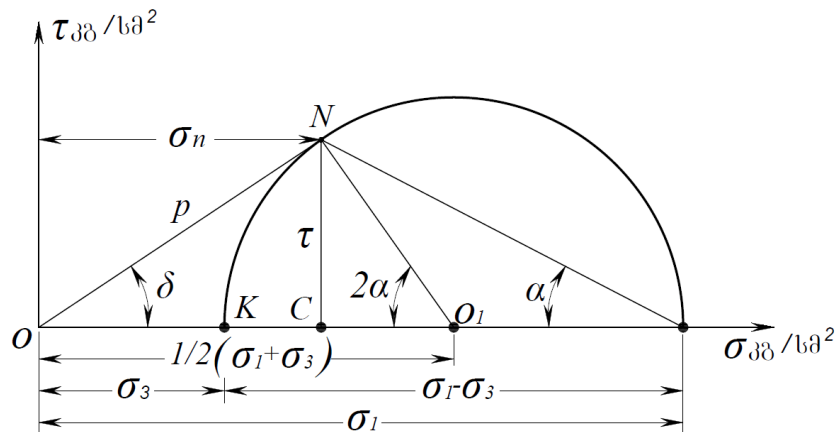
სიბრტყეზე  $\sigma_2$ -ის პარალელურად მიმართული ჯამური მხები და ნორმალური ძაბვები ტოლი იქნება

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha; \quad \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \quad (2.19)$$

ანალოგიურად ჩაიწერება გამოსახულება  $\sigma_n$  და  $\tau$ -ასთვის, სიბრტყეებისთვის, რომლებიც სხვა მთავარი ძაბვების პარალელურია.

ძაბვა სიბრტყეზე, რომელიც ერთ-ერთი მთავარი ძაბვის პარალელურია, ადვილად განისაზღვრება გრაფიკულად ძაბვების წრეების დახმარებით (ე.წ. „მორის წრეები“).

მართკუთხა კოორდინატა სისტემის (ნახ. 2.8) აბსცისთა ღერძზე გადავზომოთ ნორმალური  $\sigma_n$  ძაბვები, ხოლო ორდინატთა ღერძზე  $\tau$  მხები ძაბვები, კოორდინატთა სათავედან შესაბამის მასშტაბში გადაიზომება მთავარი ძაბვების ტოლი მონაკვეთები, და მათ ბოლოებზე, როგორც დიამეტრზე და ცენტრით აბსცისთა ღერძზე აიგება წრეწირი. წრეწირზე აღებული ნებისმიერი  $N$  წერტილის აბსცისა გამოსახავს ნორმალურ ძაბვას, ხოლო ორდინატა კი მხებ ძაბვას, რომელიც დახრილია მთავარი ძაბვის მიმართულებასთან  $\alpha$  კუთხით (გრაფიკზე ეს კუთხე გამოისახება აბსცისთა ღერძსა და იმ მონაკვეთს შორის, რომლის ბოლოები დაკავშირებულია წრის დიამეტრთან და მაქსიმალურ მთავარ ძაბვასთან).  $p$  მონაკვეთი, რომელიც აკავშირებს კოორდინატთა სათავეს და  $N$  წერტილს, ამ სიბრტყის მთლიანი ძაბვის ტოლია ამ სიბრტყეზე და მიმართულია  $\delta$  კუთხით ნორმალთან.



ნახ. 2.8. ძაბვების განსაზღვრა გრაფიკულად.

2.8 ნახაზიდან მივიღებთ, რომ

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha; \quad \sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha.$$

ან, ელემენტარული გარდაქმნით მივიღებთ

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \cos 2\alpha);$$

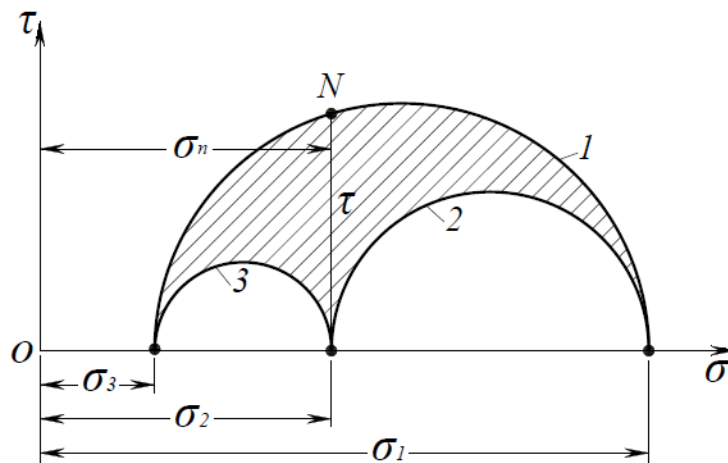
ვისარგებლოთ ფორმულით  $1 - \cos 2\alpha = 2 \sin^2 \alpha$ , გვექნება

$$\sigma_n = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \sin^2 \alpha;$$

ანუ

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha.$$

წერტილები ნახევარ წრეწირის ბოლოებზე, რომლებიც  $\sigma_1$ -ის და  $\sigma_3$ -ის ტოლია, შეესაბამებიან ძაბვებს სიბრტყეებზე, რომლებიც მიმართულნი არიან  $\sigma_2$ -ის პარალელურად; წერტილები ნახევარ წრეწირის ბოლოებზე, რომლებიც  $\sigma_1$ -ის და  $\sigma_2$ -ის ტოლია, შეესაბამებიან ძაბვებს სიბრტყეებზე, რომლებიც მიმართულნი არიან  $\sigma_3$ -ს პარალელურად, ხოლო წერტილები წრეწირის ბოლოებზე, რომლებიც  $\sigma_2$ -ის და  $\sigma_3$ -ის ტოლია, შეესაბამებიან ძაბვებს სიბრტყეებზე, რომლებიც მიმართულნი არიან  $\sigma_1$ -ს პარალელურად. ძაბვა სიბრტყეებზე, რომლებიც კვეთენ ყველა სამი მთავარი ძაბვის მიმართულებას, განისაზღვრება წერტილებით, რომლებიც მდებარეობენ გრაფიკზე ძაბვების წრეებს შორის, აგებული მთავარ ძაბვებზე ( $N$  წერტილი. ნახ. 2.9).



ნახ. 2.9. მთავარ ძაბვების მიმართულებასთან პარალელურ სიბრტყეებზე არსებული ძაბვების გრაფიკული გამოსახვა.  
1, 2, 3 - ძაბვების წირები.

საერთო ჯამში, როდესაც განსახილველ წერტილში ყველა სამი მთავარი ძაბვა არ უდრის ნულს, გვაქვს

$$\sigma_{n \max} = \sigma_1; \quad \sigma_{n \min} = \sigma_3; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

როგორც 2.9 ნახაზზე ვხედავთ, მოცულობით დამაბულ მდგომარეობის პირობებში მაქსიმალური მხები ძაბვა წარმოიშვება სიბრტყეებზე, რომელთა



მიმართულებაც ემთხვევა სიდიდით საშუალო მთავარ ძაბვის მიმართულებას, ხოლო ამ სიბრტყეების პერპენდიკულარული კვეთები დაემთხვა მაქსიმალურ და მინიმალურ მთავარ ძაბვებს შორის არსებულ სიბრტყეს, ამასთან  $\sigma_2$  სიდიდით არ მონაწილეობს  $\tau_{\max}$ -ის განსაზღვრაში. ამასთან დაკავშირებით, გამოზურცულ მთის გამომუშავებული ქანების ირგვლივ ძაბვების ანგარიში შეიძლება დავიყვანოთ ბრტყელ ამოცანამდე და გაანგარიშებაში გამოვიყენოთ მხოლოდ  $\sigma_1$  და  $\sigma_3$ , სიდიდეები რომლებიც არსებობენ მთის ამოზურცული მასივის ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში. ამასთან ერთად აუცილებელია განვასხვაოთ მოცულობითი დაძაბული მდგომარეობის ბრტყელი ამოცანა ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობისგან.

ხშირად ლაბორატორიული ცდებისა და მთის გამომუშავებული ქანების ირგვლივ ორი მთავარი ძაბვა სიდიდით ერთმანეთის ტოლია, ე.ი.  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$  ან  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . ამ შემთხვევაში 2.9 ნახაზზე აღნიშნული ძაბვის მეორე ან მესამე წრე გარდაიქმნება დიდ წრედ, ხოლო მცირე წრე წერტილად გადაიქცევა.

## 2.5. მთის ქანების ზღვრული წონასწორობის პირობა

ნებისმიერ სიბრტყეზე მთის ქანების ზღვრული წონასწორობის ძირითად პირობას წარმოადგენს მძვრელი  $T$  ძალვა, რომელიც ხახუნისა და შეჭიდულობის ძალების ჯამის ტოლია

$$T = fN + KS; \quad (2.20)$$

თუ ამ სიბრტყეზე მოქმედ ძალებს გავყოფთ მის ფართობზე, მაშინ ზღვრული წონასწორობის პირობა მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\tau = f\sigma_n + K.$$

ფხვიერი გარემოს ზღვრული წონასწორობის თეორიაში განიხილება ორი შემთხვევა. ამ ამოცანებს ამოხსნის მეთოდები პრინციპულად განსხვავებულია:

1) როცა ზღვრული დაძაბული მდგომარეობის პირობა კმაყოფილდება მასივის რომელიღაც მიდამოს ნებისმიერ წერტილში;

2) როცა ზღვრული დაძაბული მდგომარეობის პირობა არ კმაყოფილდება მასივის რომელიღაც მიდამოს ყველა წერტილში, კმაყოფილდება მხოლოდ მის შიდა საზღვარზე.

ზოგიერთი მკვლევარი აღნიშნავს, რომ როცა ფხვიერი გარემო ყველა წერტილში იმყოფება ზღვრულ დაძაბულ მდგომარეობაში, საჭიროა განვიხილოთ, როგორც ზოგჯერ შესაძლებელი, კერძო და უკიდურეს შემთხვევაში ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა.

ამიტომ ფხვიერი გარემოს მასივის ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა სჯობს განისაზღვროს როგორც მდგომარეობა, რომლის დროსაც მისი შიდა საზღვარი წარმოადგენს დაცურების ზედაპირს.

შესაბამისად, ფხვიერი გარემოს ზღვრული წონასწორობის ამოცანების გადაწყვეტისას არსებობს ორი დაძაბულობა - ერთი დაკავშირებულია ვ. ფელენიუსის, ვ. ტერცაგის, ნ. მ. გარსევანოვის, ნ. ა. ციტოვიჩის, ლ. ნ. ბერნაცკის და სხვათა სახელებთან, რომლებიც იკვლევდნენ მასივში დაცურების ზედაპირზე ზღვრული წონასწორობის პირობებს თანდათანობით (მიმდევრობით) მიახლოვების მეთოდით, ხოლო მეორე დაკავშირებულია ვ. პენკინის, ლ. პრანდტლის, ფ. კეტერის, ვ. ვ. სოკოლოვსკის, ბ. ი. ნოვოტორცევის, ც. ც. გოლუშკევიჩის და სხვათა სახელებთან, რომლებიც იკვლევდნენ ფხვიერი გარემოს ზღვრული წონასწორობის პირობებს, როცა მოცემული ზღვრული პირობები ქმნიან არეს, დაფარულს დაცურების ზედაპირის ბადით, რომლის ყოველი წერტილი აკმაყოფილებს ზღვრული დაძაბულობის მდგომარეობის (2.1) პირობას. მკვლევარების დიდი ნაწილი განიხილავდა გარემოს, როგორც ერთგვაროვანს და იზოტროპულს, მხოლოდ ლ. ნ. ბერნიცი და ვ. ვ. სოკოლოვსკი ითვალისწინებდნენ ანგარიშში მასივში ზედაპირების შესუსტების არსებობას, რომელთა გამო სიმტკიცის მახასიათებლები  $\rho'$  და  $K'$  საგრძნობლად ნაკლებია, ვიდრე სხვა მიმართულებით.

ვ. ვ. სოკოლოვსკიმ გამოთქვა აზრი, რომ იმ შემთხვევას, როცა განსახილველ წერტილში

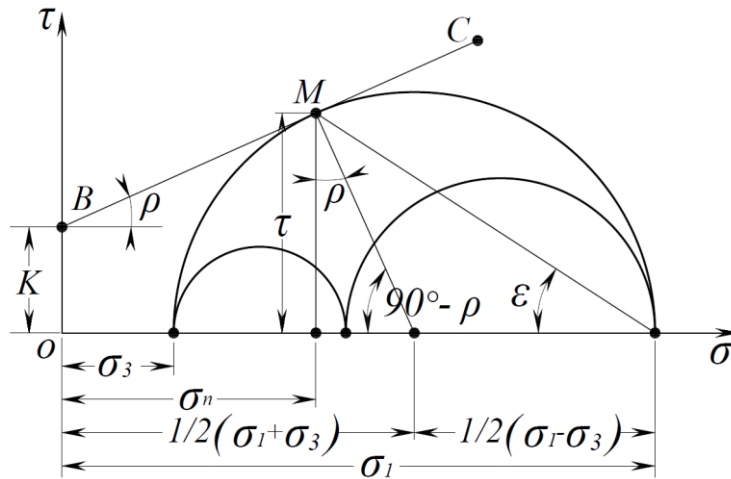
$$\left. \begin{aligned} \tau &= K' + tg\rho'\sigma_n \\ \tau &< K + tg\rho\sigma_n \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

ეწოდოს სპეციალური ზღვრული წონასწორობის პირობა, განსხვავებით არსებული ზღვრული წონასწორობის პირობისაგან, რომელიც აკმაყოფილებს (2.1) პირობას.

ფორმულები (2.17) და (2.18) განსაზღვრავენ ძაბვების  $\sigma_n$ -ს და  $\tau$ -ს განაწილებას სიბრტყეებზე და მთავარი ძაბვების მიმართულებას, რომელნიც მიმართული არიან სხვადასხვა მიმართულებით. თუ  $\sigma_n$ -ს და  $\tau$ -ს მნიშვნელობებს ჩავსვავთ ზღვრული წონასწორობის პირობის (2.1) ტოლობაში, შეიძლება დავრწმუნდეთ, რომ მიმართველი კუთხეების ცვლილების დროს იცვლება მთავარი ძაბვების სიდიდეებიც, რომლის დროსაც კმაყოფილდება ზღვრული წონასწორობის პირობა. თუ  $\sigma_3$ -ს დავტოვებთ უცვლელად, მაშინ სიბრტყეების დახრის კუთხეების ცვლილებისას  $\sigma_1$  ხან იზრდება ხან კლებულობს. ბუნებრივია, რომ მასივში ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობას სწრაფად მიაღწევს ყველაზე სუსტი სიბრტყე, სადაც  $\sigma_1$ -ის სიდიდე მინიმალურია.

ამის ჩვენება ყველაზე ადვილია გრაფიკულად მორის წრეების საშუალებით.

2.10 ნახაზზე  $BC$  წირითა და აბსცისთა ღერძით შემოსაზღვრულია მთის მოცემული ქანებისთვის შესაძლო ძაბვების არე, რომლის ზედა საზღვარი განსაზღვრავს ზღვრულ ძაბვას და რომლითაც განისაზღვრება მთის ქანების ძვრის წინაღობის მახასიათებელი  $\rho$  და  $K$  სიდიდეები.



ნახ. 2.10. ძაბვების ზღვრული წრე

თუ თანდათანობით გავზრდით  $\sigma_1$ -ს ან შევამცირებთ  $\sigma_3$ -ს, მაშინ ძაბვების დიდი წრფე შეეხება  $BC$  წრფეს რომელიღაც  $M$  წერტილში, რომელიც ამ შემთხვევაში გვიჩვენებს სიბრტყის ზღვრულ მდგომარეობას, რომელიც  $\sigma_2$ -ის მიმართულების პარალელურია და  $\sigma_1$ -ს მიმართულებისადმი დახრილია  $\varepsilon = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  კუთხით.

თუ ვცვლით  $\sigma_2$ -ს სიდიდეს  $\sigma_3$ -დან  $\sigma_1$ -მდე საზღვრებში, მაშინ წერტილის შეხების მდებარეობა არ შეიცვლება, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ სანამ უზრუნველყოფილია პირობა  $\sigma_3 \leq \sigma_2 < \sigma_1$  ან  $\sigma_3 < \sigma_2 \leq \sigma_1$ ,  $\sigma_2$ -ს სიდიდე არ მოქმედებს ზღვრულ წონასწორობაზე.

2.10 ნახაზზე გამოყენებული აღნიშვნებით შეიძლება შევადგინოთ მთავარ ძაბვებსა და სიმტკიცის მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულების ანალოგიური გამოსახულება  $M$  სიბრტყის ზღვრული დამაბული მდგომარეობის პირობით:

$$\frac{1}{\cos \rho} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \rho \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = K \quad (2.22)$$

ან

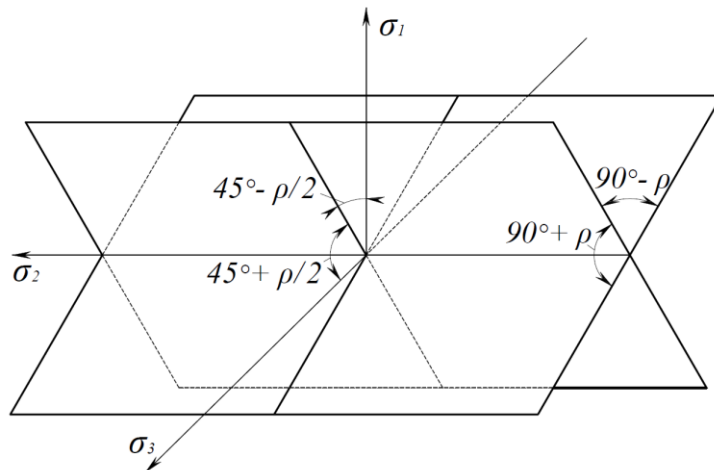
$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) + \sigma_3 \operatorname{ctg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) \quad (2.23)$$

თუ  $\sigma_3 = 0$ , მაშინ

$$\sigma_1 = \sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \quad (2.24)$$

რაც გვიჩვენებს წინააღმდეგობას ერთდერძა კუმშვაზე მთის ქანების ნიმუშების რღვევისას, რომელიც გამოწვეულია ძვრის ძალებით სიბრტყეებზე, რომელზეც დახრილი არიან ნიმუშის ღერძთან  $\varepsilon$  კუთხით.

მთავარ ძაბვების მიმართ დაცურების სიბრტყეების განლაგება (ნახ. 2.11) და დამოკიდებულება მთავარ ძაბვებსა და სიმტკიცის მახასიათებლებს შორის ზღვრული მდგომარეობის დროს, სადაც არ მონაწილეობს  $\sigma_3$ , იძლევა ფხვიერი გარემოს ზღვრული წონასწორობის კვლევის წარმოების შესაძლებლობას  $\sigma_3$  და  $\sigma_1$  სიბრტყეებში, რომლებიც პერპენდიკულარულია მთის ქანების ამოზნექილი ფორმის ღერძის მიმართ.



ნახ. 2.11. დაცურების სიბრტყეების ორიენტაცია მთავარი ძაბვების მიმართ

თუ მთის მასივის ბლოკში, რომელიც იმყოფება მოცულობით დაძაბულ მდგომარეობაში, არსებობს შესუსტებული სიბრტყეები (სიბრტყეები  $\rho'$  და  $K'$  მახასიათებლებით), მაშინ მთავარი ძაბვების მიმართულების მიმართ ამ სიბრტყეების ორიენტაციიდან გამომდინარე შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ზღვრული წონასწორობის შემდეგ სამ შემთხვევას

1. ერთდროულად დაკმაყოფილებულია ჩვეულებრივი და სპეციალური ზღვრული წონასწორობის პირობა

$$\left. \begin{aligned} \tau &= K + tg \rho \sigma_n \\ \tau_t &= K' + tg \rho' \sigma_{n't} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

როგორც 2.12 ნახაზიდან ჩანს, მოცემული ძაბვების ტენზორის შემთხვევაში ზღვრული ძაბვები იქნება  $N$ ,  $M$  და  $L$  სიბრტყეები, ამასთან ერთად  $M$  სიბრტყე, რომელიც იმყოფება ზღვრულ წონასწორობაში,  $\sigma_t$ -თან დახრილია კუთხით

$$\alpha = \varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \quad (2.26)$$

ხოლო სიბრტყეები  $N$  და  $L$  შესაბამისად დახრილია კუთხეებით

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \left\{ \arcsin \left[ \frac{\sin \rho'}{\sin \rho} \left( 1 - \frac{Kctg \rho - K'tg \rho'}{Ktg \rho + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \right) \right] - \rho' \right\}; \quad (2.27)$$

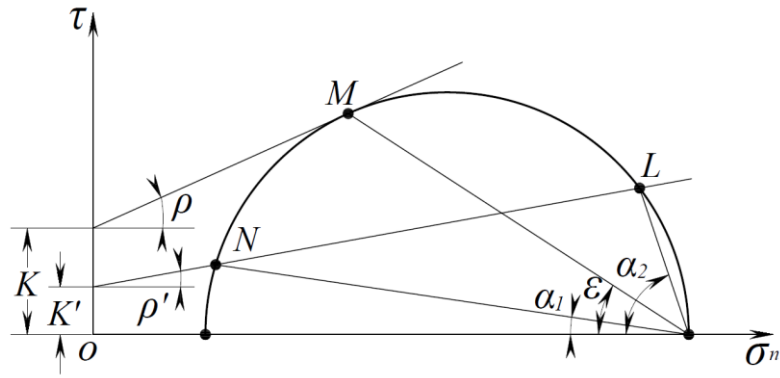
$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left\{ \arcsin \left[ \frac{\sin \rho'}{\sin \rho} \left( 1 - \frac{Kctg \rho - K'tg \rho'}{Ktg \rho + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \right) \right] + \rho' \right\}. \quad (2.28)$$

2. კმაყოფილდება მხოლოდ სპეციალური ზღვრული წონასწორობის პირობა

$$\left. \begin{aligned} \tau &< K + tg \rho \sigma_n \\ \tau_t &= K' + tg \rho' \sigma_m \end{aligned} \right\}, \quad (2.29)$$

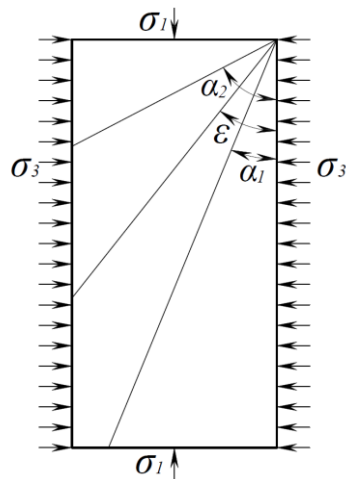
როდესაც შესუსტების სიბრტყეები  $\sigma_t$ -ის მიმართულებასთან შეადგენენ კუთხეს  $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$  (ნახ. 2.12), ძაბვების უდიდესი წრე არ ეხება წირს მახასიათებლებით  $\rho'$  და  $K'$  და მთავარ ძაბვებსა და ძვრის წინაღობის მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულება ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3(tg \rho' \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) + K'}{tg \rho' \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha}. \quad (2.30)$$



ნახ. 2.12. ძაბვების ზღვრული წრე და სიბრტყეების ორიენტაცია, რომლებიც იმყოფებიან ჩვეულებრივ და სპეციალურ ზღვრულ წონასწორობის პირობებში

ეს დამოკიდებულება (2.19)-ის ზღვრული წონასწორობის (2.1)-ში პირობა ჩასმით მიიღება.



ნახ. 2.13. მთის ქანების ბლოკი და ზღვრული სიბრტყეების ორიენტაცია მასში

3. კმაყოფილდება მხოლოდ ჩვეულებრივი ზღვრული წონასწორობის პირობა

$$\left. \begin{aligned} \tau &= K + tg \rho \sigma_n \\ \tau_t &< K' + tg \rho' \sigma_m \end{aligned} \right\}, \quad (2.31)$$

თუ მოცემული ძაბვების ტენზორის შემთხვევაში შესუსტებული ზედაპირები შეადგენენ  $\sigma_1$ -თან კუთხეს  $\alpha > \alpha_2$  ან  $\alpha < \alpha_1$  (ნახ. 2.12 და 2.13).

(2.27) და (2.28) ფორმულების გამოყენების დროს მიღებული დამოკიდებულება

$$H = Kctg\rho \quad (2.32)$$

ფართოდ გამოიყენება ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობის მეთოდით ამოცანების ამოხსნის დროს; ამასთან ერთად  $BC$  წრფეს აგრძელებენ აბსცისთა ღერძთან გადაკვეთის  $O'$  წერტილამდე და  $O'$  წერტილს განიხილავენ, როგორც ძაბვების პირობითი (დაყვანილი) სიდიდეების საწყისად. როგორც 2.14 ნახაზიდან ჩანს კოორდინატთა სათავის  $O'$  წერტილში გადატანა არ ცვლის მხები ძაბვების სიდიდეს, ხოლო ნორმალური ძაბვები  $H$  მონაკვეთით იზრდება. ამოცანის ამოხსნა საგრძნობლად გამარტივდება, თუ ვისარგებლებთ პირობითი (დაყვანილი) ძაბვების საშუალო სიდიდით:

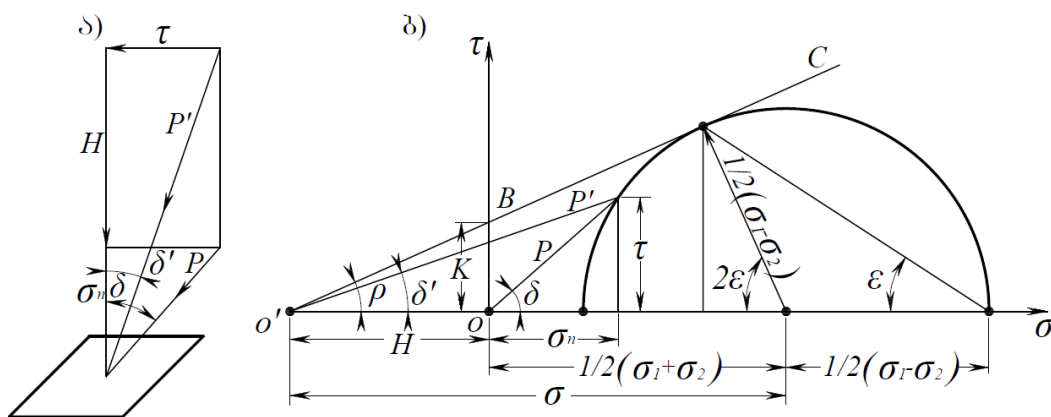
$$\sigma = H + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3); \quad (2.33)$$

ამ შემთხვევაში ზღვრული წონასწორობის პირობა უმარტივეს სახეს მიიღებს

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = \sigma \sin \rho \quad (2.34)$$

ან

$$\tau = \frac{1}{2}\sigma \sin 2\rho. \quad (2.35)$$



ნახ. 2.14. დამოკიდებულება ნამდვილ და პირობით ძაბვებს შორის:  
 ა - პირობითი ძაბვები სიბრტყეზე. ბ - პირობითი ძაბვები გრაფიკზე.

ვ. ვ. სოკოლოვსკი და სხვა მრავალი ავტორი  $H$  მონაკვეთს ყველამხრივ თანაბარი გაჭიმვის დროს დროებით წინაღობას უწოდებენ. სინამდვილეში ექსპერიმენტალური მონაცემები და თეორიული მოსაზრებები აჩვენებს, რომ



მთის ქანებს, რომლებიც წარმოადგენენ მყიფე მასალას, აგლეჯვაზე წინააღმდეგობის ასეთი სიდიდე არ უნდა ჰქონდეს.

მთის ქანების დროებითი წინააღმდეგობა აგლეჯვაზე ერთდერმა ჭიმვის დროს არ განსხვავდება დროებითი წინააღმდეგობისგან ყველაფერი თანაბარ გაჭიმვის შემთხვევისგან. ამაში გამოვლინდება მყიფე მასალების ძირითადი განსხვავება პლასტიკური მასალებისგან. პლასტიკური მასალებისთვის წინააღმდეგობა აგლეჯვაზე უფრო მეტია ვიდრე წინააღმდეგობა ძვრაზე. მყიფე მასალებისთვის პირიქით, წინააღმდეგობა ძვრაზე და კუმშვაზე უფრო მეტია ვიდრე წინააღმდეგობა აგლეჯვაზე.

ამ მიზეზით, პლასტიკური მასალები ერთდერმა ჭიმვის დროს ირღვევა არა აგლეჯვით, არამედ ძვრით, რადგან სიბრტყეების ზღვრული წონასწორობა ძვრაზე, რომელიც ღეროს ღერძის მიმართ დახრილი არის  $45^\circ$ -ით, დგება საკმაოდ მცირე დატვირთვების დროს, ვიდრე საჭიროა ამ მასალების რღვევისთვის აგლეჯვაზე. თუ ამ მასალებს ჩავაყენებთ ყოველფორმით თანაბარ გაჭიმვის პირობებში, მაშინ სხვადასხვა ნიშნის მხები ძაბვები ერთმანეთს გააბათილებენ და რღვევას გამოიწვევს არა ის ძალები, რომლებიც ერთდერმა კუმშვის დროს ნიმუშის რღვევას იწვევენ, არამედ ნორმალური უდიდესი ძაბვებით გამოწვეული აგლეჯვა. მასალის ყველაფერი გაჭიმვა არ იწვევს უდიდეს გამჭიმავ მთავარი ძაბვის სიდიდის ცვლილებას, მაგრამ ამცირებს მხები ძაბვების სიდიდეებს და ხელს უწყობს პლასტიკური მასალების რღვევას აგლეჯვაზე.

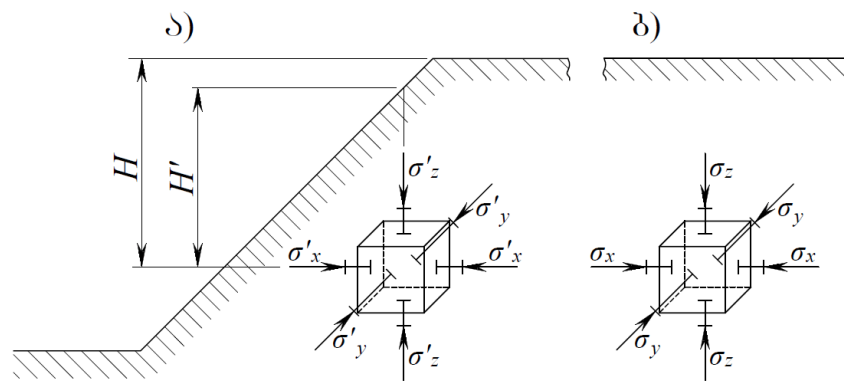
მყიფე მასალები ირღვევიან ერთდერმა კუმშვის დროსაც (და ასევე ძვრით, გამოწვეული უმნიშვნელო სიდიდის ნორმალური ძაბვებითაც) სიბრტყეებზე აგლეჯვით, ნორმალური გამჭიმავი ძაბვების მიმართულებით. გვერდითი გამჭიმავი ძალების გაზრდა არ ზრდის ძაბვებს ამ სიბრტყეებზე და ამიტომაც არ იცვლება  $\sigma_z$  სიდიდე.

## 2.6. მთის ღია სამუშაოების დროს მასივის ქანობის დაძაბული მდგომარეობის ცვლილება

ბუნებრივ მდგომარეობაში მთის ქანები მუდმივად განიცდიან ბუნებრივი ფაქტორების რთულ ზემოქმედებას. ჰაერის ტემპერატურის ცვლილება დღე-ღამის განმავლობაში იწვევს მასივის დეფორმაციას. წლის განმავლობაში გაყინვა და გალღობა, ხეები და ბალახი, და ასევე ქარიც მოქმედებს ქანებზე. ეს პროცესი მიმდინარეობს ძალიან ნელა და მხოლოდ ისეთი ძლიერი მოვლენები, როგორცაა მიწისძვრები ან ვულკანის ამოფრქვევა მკვეთრად აჩქარებს ქანების მასივის თვისებების ცვლილებას.

მთის ქანების ამოღება მკვეთრად არღვევს მთის მასივების ბუნებრივ რეჟიმს, ცვლის ძაბვების ველს. მთის ქანებში წარმოიშობა ღრუები, გამიშვლელური ქანების დამატებითი სიბრტყეები, იწყება გამოფიტვის პროცესი.

ქანების მასივი, რომლებზეც არ მიმდინარეობს სამთო სამუშაოები – იმყოფება მოცულობით დაძაბულ მდგომარეობაში.



ნახ. 2.15. ქანების დაძაბული მდგომარეობა  
ა - ქანობთან ახლოს; ბ - მასივის სიღრმეში;

მოცულობით დაძაბული მდგომარეობის ვერტიკალური მდგენელი (ნახ. 2.15)

$$\sigma_z = \gamma H. \quad (2.36)$$

ჰორიზონტალურ მდგენელებს, როგორც ყოველთვის გააჩნიათ ერთი-დაიგივე მნიშვნელობა:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H,$$

სადაც  $\mu$  - არის პუასონის კოეფიციენტი;

$\gamma$  - ქანობის გასაშუალებული სიმკვრივე, ნ/სმ<sup>3</sup>;

$H$  - შრის განლაგების სიღრმე, მ;

აქედან გამომდინარე, ჩვეულებრივ მდგომარეობაში (სადაც  $0 < \mu < 0.5$ )

$$\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y.$$

პლასტიკურ თიხოვან ქანებს, როდესაც  $\mu \approx 0.5$ , ახასიათებთ ძაბვების განაწილება ჰიდროსტატიკური კანონით.

$$\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y.$$

მთის ქანების ამოღებისას კარიერის გარშემო გარკვეულ არეში ირღვევა მასივის საწყისი დაძაბული მდგომარეობა და იწვევს დაძაბულ მდგომარეობას სხვა არეშიც, რაც დაკავშირებულია არსებული შრის სიძლიერის შემცირებასთან ( $H' < H$ ) და დეფორმაციის შესაძლებლობასთან კარიერის მიმართულებით.

ქანების მდგომარეობა (დრეკად დეფორმაციის ზღვრებში) ქანობის ბრტყელ გეგმაში ხასიათდება ძაბვების შემდეგი მნიშვნელობებით (ნახ. 2.15.ა):

$$\sigma'_z = \gamma H',$$

$$\sigma'_x = \frac{E \varepsilon_x}{1-\mu} + \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H',$$

$$\sigma'_y = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H',$$

სადაც  $E$  - არის იუნგის მოდული;

$\varepsilon_x$  - ფარდობითი დეფორმაცია ქანობის მხარეს.

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ თუ ფერდოს შევხედავთ ამოზნექილ მდგომარეობაში შეიცვლება არამართო  $\sigma_x$ -ის არამედ  $\sigma_y$ -ის მნიშვნელობაც. ჩაზნექილ მდგომარეობაში წარმოიშობა კუმშვის დამატებითი ძაბვები, ხოლო ამოზნექილ მდგომარეობაში გამჭიმავი ძაბვები (ნახ. 2.16).

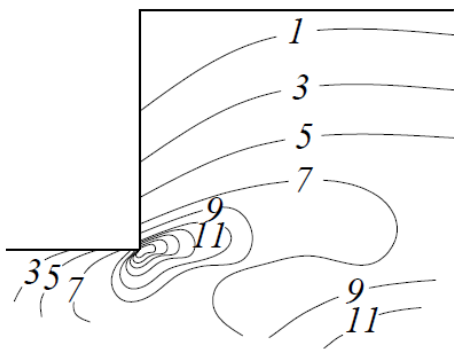
როგორც წესი, ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ძაბვები იზრდება ზედა ბაქნიდან ქვედა ბაქნის მიმართულებით. ზედა ბაქნის სიახლოვეს არსებობს არე, სადაც წარმოიშობა ჰორიზონტალური გამჭიმავი ძაბვები და აქ შეიძლება გაჩნდეს ჩამოშლის ბზარები.

დაძაბულობის ველი დამოკიდებულია სხვა ფაქტორებზეც, რაც დამოკიდებულია ბუნებრივი მდგომარეობის ცვლილებაზე. მაგალითად: ტემპერატურულ ძაბვებზე, რომელთა სიდიდეც იცვლება 343-დან 6200 კპა-მდე, დამოკიდებულია რა ქანობის ტიპზე და ტემპერატურის ცვლილების სიხშირეზე. ტემპერატურის წლიური ცვლილება წარმოშობს ძაბვებს ქანობის ზედაპირიდან 6 - 8 მეტრის სიღრმეზე, ხოლო ტემპერატურის დღე-ღამური ცვლილება 1,2 - 1,5 მეტრ სიღრმეზე. ქანობში ძაბვების გადანაწილება დამოკიდებულია ასევე ქანობში რაიმე გეოლოგიური ცვლილებების არსებობაზე.

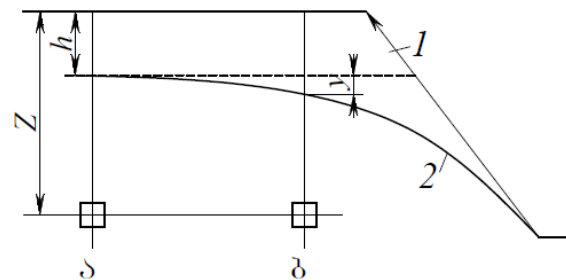
დაძაბულობის ველზე მოქმედებენ გრუნტის წყლებიც. ბუნებრივ პირობებში მიწისქვეშა წყლების არსებობისას (ნახ. 2.17.ა) ძაბვის ვერტიკალური მდგენელი

$$\sigma_z = \gamma_g h + \gamma_w (z - h) .$$

სატრანსპორტო ტრასების გაყვანისა და სამთო სამუშაოების შესრულებისას თხრილების შექმნა იწვევს გრუნტის წყლების საწყისი დონის დადაბლებას და ცვლის ძაბვების ვერტიკალურ მდგენელს (ნახ. 2.17.ბ):



ნახ. 2.16. მაქსიმალური მხები ძაბვების ტრექტორია;



ნახ. 2.17. სქემა გაწყლიერებული ქანობის დაძაბული მდგომარეობის განსაზღვრისათვის;  
1. მიწისქვეშა წყლების საწყისი დონე.  
2. იგივე მთის სამუშაოების შემდეგ.

$$\sigma'_z = \gamma_g (h + y) + \gamma_w (z - y - h) ,$$

სადაც  $\gamma_g$  – არის ქანობის სიმკვრივე მშრალ მდგომარეობაში, კგ/სმ<sup>3</sup>;

$h$  – გრუნტის წყლების ჩაღრმავების საწყისი დონე, მ;

$y$  – გრუნტის წყლების დონის ჩაღრმავება საანგარიშო წერტილამდე,

მ;

$\gamma_w$  – ქანობის სიმკვრივე ჰიდროსტატიკური წონასწორობის

გათვალისწინებით, კგ/სმ<sup>3</sup>;

$z$  – საანგარიშო წერტილის ჩაღრმავება დედამიწის ზედაპირიდან, მ.

ამასთან ერთად.

$$\gamma_w = (\Delta - \Delta_0)(1 - n) \approx \frac{1}{2} \gamma_g,$$

სადაც  $\Delta$  – არის მთის ქანების სიმკვრივეა, კგ/სმ<sup>3</sup>;

$\Delta_0$  – წყლის ქანების სიმკვრივეა, კგ/სმ<sup>3</sup>;

$n$  – მთის ქანების ფორიანობა, %.

მთის ქანების დამუშავებისას დამატებითი ძაბვების გაჩენას ასევე ხელს უწყობს აფეთქებითი სამუშაოების წარმოება, დამხმარე მოწყობილობების მასა, კარიერის კიდეზე და მის სიახლოვეს ყრილის მასა.

კარიერის და დრენაჟული სისტემების გამოყენებით იზრდება მიწისქვეშა წყლების სიჩქარე, რაც იწვევს ჰიდროდინამიური წნევის გაზრდას და ძაბვების გადანაწილებას კარიერის კიდის სიახლოვეს.

მთის ღია სამუშაოების ჩატარება იწვევს მთის ღია ქანების გაშიშვლებას, რომლებიც ადრე იმყოფებოდნენ მასივის სიღრმეში. გაშიშვლების შედეგად იწყება მათი ფიზიკური და ქიმიური გამოფიტვა.

მთის ღია სამუშაოების ჩატარება იწვევს ასევე ქანობის სიმტკიცის თვისებების დარღვევას. ამოღების შედეგად ზედა მოშიშვლებული ფენები ამოიბურცებიან და მათი სიმტკიცე იკლებს. ქანების სიმტკიცეზე ასევე არსებითად მოქმედებს მათი დატენიანება, რომლებიც ადრე იმყოფებოდნენ მშრალ მდგომარეობაში.

### 3. მეწყერების მექანიკა

#### 3.1. ფერდოს გრუნტის დაცურების ზედაპირების სახეობები და ფერდობის კიდეების ჩამოშლა (მეწყერი)

მეწყერი არის მთის ქანების მასის ნელი გადაადგილება, რომელიც ქმნის ქანობს.

დეფორმირებული მასა გადაადგილდება (ჩამოცურდება) უძრავ ნაწილზე (ნახ.3.1. და ნახ. 3.2. *CML* წირი). მეწყერის დამახასიათებელ ნიშანს წარმოადგენს დეფორმაციის ნელი (რამდენიმე წუთიდან რამდენიმე წლა-მდე) განვითარება, რომელსაც თან სდევს დროის რაღაც მომენტისთვის მასივის სწრაფი ჩამოშლა.

მეწყერი თავის ხასიათით შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად:

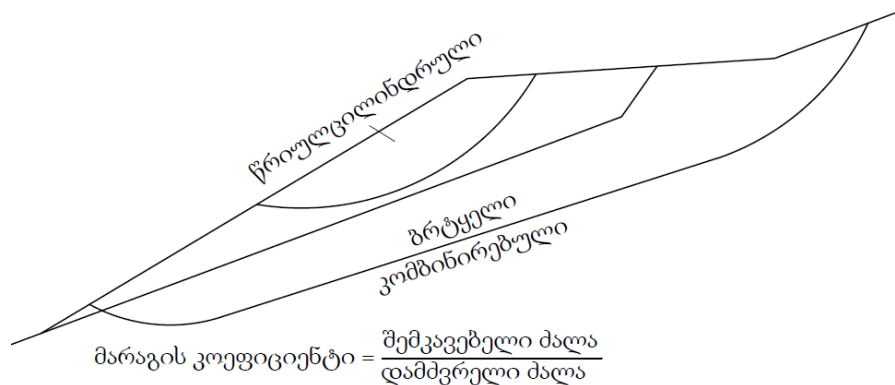
1. კიდეების ჩამოშვება;
2. ნაყარის ჩამოშლა;
3. ბუნებრივი ქანობის ჩამოშვება.

მთის ქანების მეწყერ-ჩამონაქცევი ზედაპირის, მისი სივრცითი მდგომარეობის, მიზეზების და პირობების წარმოშობის და ჩამოშლის მიმდინარეობის განსაკუთრებულობის მიხედვით მეწყერს ყოფენ ასევე რამდენიმე ქვეჯგუფად: კონტაქტური, იზოტროპული მასივები, ღრმა და ფილტრაციული.

ყველა ამ სახეობის მეწყერისთვის დამახასიათებელია დეფორმირებული მასის გადაადგილება დაცურების ზედაპირზე, რომლის მდებარეობას განსაზღვრავს მასივში ქანების სიმტკიცე, რომელსაც თან ახლავს ბზარები და კონტაქტის შესუსტება, წყლის არსებობა, ქანობის კუთხე და მისი სიმაღლე

ფერდობის მდგრადობის ანალიზის მიზანს წარმოადგენს განვსა-ზღვროთ ჩამონაქცევი მასის პოტენციურად საშიში დაცურების ზედაპირის მარაგის კოეფიციენტი. მარაგის კოეფიციენტი გამოისახება შემკავებელი და დამძვრელი ძალების ფარდობის სახით. ამასთან ერთად ამ ძალებიდან ერთი ან მეორე მოდებულია დაცურების ზედაპირის გასწვრივ. როდესაც დამძვრე-ლი ძალა წონით შეესაბამება გამოწვეული ძვრის სიმტკიცის შემკავებელი ძა-

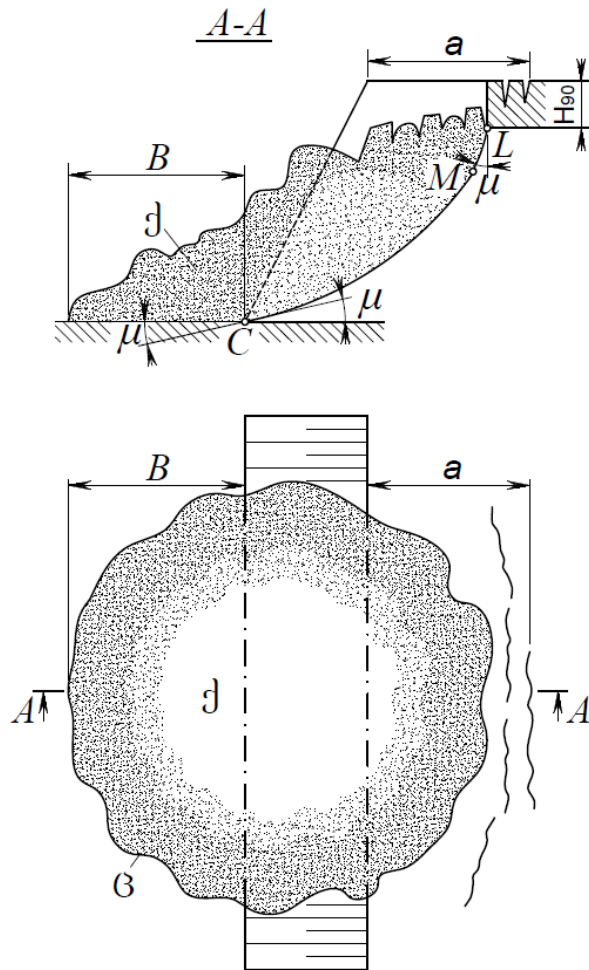
ლას, მარაგის კოეფიციენტი 1-ის ტოლია და არსებობს ჩამონგრევის ალბათობა. 3.1 ნახაზზე მოცემულია დაცურების ზედაპირის რამდენიმე ტიპი.



ნახ. 3.1. დაცურების ზედაპირის სახეობები

დაცურების ზედაპირს შეიძლება ჰქონდეს მნიშვნელოვნად უსწორმასწორო ფორმა არსებული ქანობის მასალის ერთგვაროვნებიდან გამომდინარე. ეს განსაკუთრებით სამართლიანია ბუნებრივი ფერდობებისთვის, რომელთათვისაც ნარჩენი ბზარები და ნატეხები განსაზღვრავენ დაცურების ზედაპირის მდებარეობას. თუ მასალა ერთგვაროვანია და შეიძლება მოხდეს მნიშვნელოვანი ზომების წრის ფორმირება, უფრო მეტად საშიში დაცურების ზედაპირი იქნება წრიულცილინდრულთან მიახლოებული, რადგან წრეს გააჩნია შედარებით მცირე ზედაპირის ფართობი მასის ერთეულზე, ამასთან, პირველი უკავშირდება შემკავებელ ძალას, ხოლო მეორე - დამძვრელს. თუ დიდი წრის წარმოშობის პირობები არ არსებობს, ისე როგორც სიგრძესთან შედარებით მნიშვნელოვნად მცირე სიღრმის უსასრულო ქანობის დროს, შედარებით საშიში ზედაპირი იქნება ქანობის პარალელური სიბრტყე. რამდენიმე შესუსტებული სიბრტყის არსებობის დროს შედარებით საშიში იქნება სუსტ ფენაში გამავალი სიბრტყის გვერდით არსებული ზედაპირი. ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება წარმოიშვას ბრტყელი და წრიულცილინდრული მონაკვეთების კომბინაცია, ასევე მსგავსი შემთხვევითი დაცურების ზედაპირები.

თუ დაცურების ფაქტიურ ზედაპირს გააჩნია მნიშვნელოვნად არასწორი ფორმა, სანამ შევუდგებით მდგრადობის ანალიზს, უნდა მოხდეს მისი აპროქსიმაცია სიბრტყით ან ცილინდრული ზედაპირით.

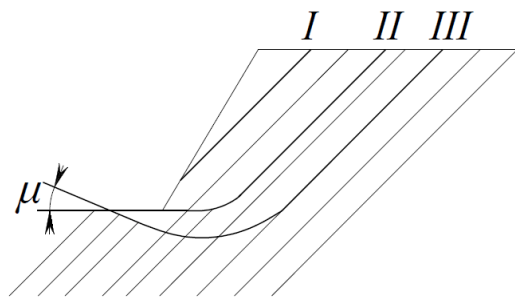


ნახ. 3.2. მეწყერის მორფოლოგია:  
 $\mu$  – ჩამოცვენილი ქანების მასივი;  $C$  – ჩამონაყარი.

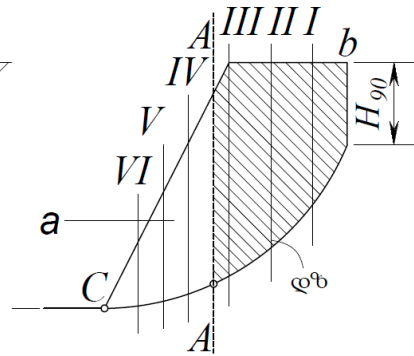
როგორც 3.3 ნახაზზეა ნაჩვენები მეწყერ-ჩამონაქცევის დაცურების ზედაპირი შეძლება იყოს ბრტყელი, თუ ის ემთხვევა კონტაქტურ შრეებს. შრეების, დიდი ბზარების და მასივის სხვა სტრუქტურული სისუსტეების არსებობის შემთხვევაში დაცურების ზედაპირს შეიძლება ჰქონდეს უფრო რთული ფორმა (ნახ. 3.3. II, III). ერთგვაროვან ქანებში დაცურების ზედაპირი წრიულ ცილინდრულთან მიახლოებული ფორმისაა. საერთოდ, დაცურების



ზედაპირი წარმოადგენს წრიულ ცილინდრულთან მიახლოებულ და ბრტყელ ზედაპირების კონზინაციას



ნახ. 3.3. მეწყერ-ჩამონაქცევის დაცურების ზედაპირის შესაძლო მდებარეობები (I, II, III).



ნახ. 3.4. ჩამონაქცევი პრიზმის დაყოფა:  
*a* - საერთო პრიზმა;  
*b* - აქტიური დატვირთვის პრიზმა;  
*აბ* - დაცურების ზედაპირი.

ერთგვაროვან მასივში მეწყერ-ჩამონაქცევის დაცურების ზედაპირის დამახასიათებელია ზედა ნაწილის ვერტიკალური მონაკვეთი სიმაღლით (ნახ. 3.4), რომელიც განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right),$$

(3.1)

სადაც, *K* – არის შეჭიდულობა;

*ρ* – ქანების შიგა ხახუნის კუთხე;

*γ* – კუთრი წონა, ნ/სმ<sup>3</sup>.

ეს მონაკვეთი წარმოიშობა გამჭიმავი ძალების მოქმედების შედეგად, როდესაც ჩამოქცეული მასივი ცდილობს *C* წერტილის გარშემო მობრუნებას (ნახ. 3.4. *C*). ამის შემდეგ დეფორმირებული ქანობის ზედა კუთხეში გაჩნდება ბზარები, რომელთაგან ერთ-ერთი მეწყერის განვითარებასთან ერთად ძლიერ გაიზრდება და ამ ადგილას განვითარდება ფერდოს გრუნტის ჩამოშვავება. ვერტიკალური მონაკვეთის *H<sub>90</sub>*-ის ქვემოთ არსებობს წრფივი მონაკვეთი *LM* (ნახ. 3.2), რომელიც ვერტიკალთან დახრილია  $\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$  კუთხით. შემდეგ ჩამოცურების ზედაპირი იღებს მრუდწირული ზედაპირის

სახეს, როდესაც ფერდოს გადაკვეთს  $\mu = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  კუთხით, ან გადის ფერდოს ფუძეში.

ქანების ჩამოქცეულ მასივს (ნახ. 3.2) ეწოდება მეწყერის ტანი ან ჩამოქცევის პრიზმა. დაცურების ზედაპირამდე (და თვით მასივში) მოქმედებს შემკავებელი  $\sum F_a$  (ხახუნის და შეჭიდულობის ძალების შედეგად) და ძვრის  $\sum F_a$  (ქანების და მოწყობილობების მასა) ძალები. იმ შემთხვევაში თუ შემკავებელი ძალა აჭარბებს ძვრის ძალას, მაშინ ფერდო იმყოფება წონასწორობის მდგომარეობაში. მათი ტოლობის შემთხვევაში დგება ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა. და ბოლოს, როდესაც ძვრის ძალა გადააჭარბებს შემკავებელს იწყება ჩამოშვავება (მეწყერი).

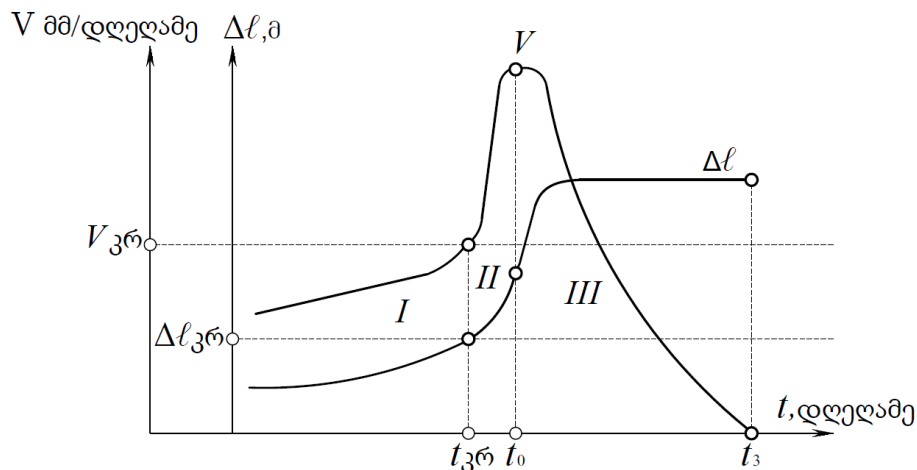
თუ ფერდოს მასივს დავყოთ ვერტიკალურ ბლოკებად (I,II,III და ა.შ. ნახ. 3.4) და ყოველ ბლოკში შევადარებთ მძვრელ და შემკავებელ ძალებს პოტენციურად საშიში დაცურების ზედაპირის გასწვრივ, მაშინ ქანობის ზედა ნაწილში შევნიშნავთ ძვრის ხოლო ქვედა ნაწილში შემკავებელი ძალების თავმოყრას. რომელიღაც კვეთში (მაგ. A-A) შემკავებელი და ძვრის ძალები გაუტოლდებიან ერთმანეთს. ეს კვეთი ყოფს ჩამოშლის პრიზმას ორ ნაწილად:

1. აქტიური დაწოლის პრიზმა (ნახ. 3.4.b), სადაც  $\sum F_a > \sum F_a$ .
2. საყრდენი პრიზმა (ნახ. 3.4.a), სადაც  $\sum F_a < \sum F_a$ .

გეგმაში ჩამოშლილ მასივიდან წარმოიშობა მიწის გროვა.

მეწყერის განვითარების პირველ ფაზაში დაცურების ზედაპირზე ძაბვები გაცდებიან დრეკადობის ზღვარს და იწყება მასის პლასტიკური დეფორმირება. ამასთან ერთად დაცურების შუა ნაწილში ქანების სიმტკიცე იკლებს და დიდი დატვირთვა გადაეცემა მომიჯნავე ზონას. რადგან მძვრელი ძალები წარმოიშობა ზედა ნაწილში ე.ი. აქტიური დაწოლის პრიზმაში, პლასტიკური დეფორმაციის ზონა ვრცელდება მხოლოდ ზედა ნაწილში, მაგრამ ზედაპირზე წარმოიშობა ბზარები და ვითარდება ქანების ჯდომა. ქვედა ნაწილში დეფორმაციები ჯერ არ შეიმჩნევა, ხოლო შუა ნაწილში შეიძლება შევნიშნოთ გადაადგილება (ქანების ამობურცვა).

მეწყერის განვითარებისას დეფორმაცია ქანობის ზედაპირზე იზრდება და საბოლოოდ აღწევს ისეთ სიდიდეს, როცა ქანობის მთლიან (ან თითქმის მთლიან) ზედაპირზე გადალახულია შეჭიდულობის ძალები. აბსოლიტური გადაადგილების ამ სიდიდეს ეწოდება დეფორმაციის კრიტიკული სიდიდე  $\Delta l_{კრ}$  (ნახ. 3.5).



ნახ. 3.5. მეწყერული პროცესების განვითარების დროს სიჩქარის ცვლილება ( $V$ ) და გადაადგილების სიდიდე ( $\Delta l$ ).

აბსოლიტური გადაადგილება გადაყვანილი დროის ერთეულში ე.ი. დეფორმაციის სიჩქარე მეწყერის განვითარების პირველ ფაზაში (ნახ. 3.5.I) უმნიშვნელოა და თანდათან იზრდება. დაცურების ზედაპირზე როცა გადაილახება შეჭიდულობის ძალები დეფორმაციის სიჩქარე მიაღწევს კრიტიკულ სიდიდეს  $V_{კრ}$ . შემდეგ იწყება მეწყერის განვითარების მეორე აქტიური სტადია და ჩამოიშლება ქანების მასივის ნაწილი.

მეწყერის განვითარების მეორე აქტიური ფაზის დასაწყისში, თუ დაცურებულ ზედაპირს დაკავებული აქვს ქანობის ძირი, დაცურების ზედაპირზე დაფიქსირდება ქანების ამობურცვა. ამ პერიოდში ჩამონაცვენი მასის მოძრაობა განისაზღვრება ხახუნით ჩამოცურების ზედაპირის მიმართ.

მეწყერის განვითარებისას პლასტიკურ ქანებში კარგად გამოჩნდება ჩამოშვებული მასის მოძრაობის ტალღისებური ხასიათი - ზედაპირული ნაწილები ჯერ მასის სიღრმეში ჩადიან, შემდეგ კი ისევ ზედაპირზე გამოჩნდებიან. მასივის პოტენციური ენერგია გადადის კინეტიკურში და ენერგიის

ზრდის ხარჯზე ჩამოქცეული მასა საკმაოდ წინ გადაიწევეს, განლაგდება კუთხით, რომელიც 15°-20° გრადუსს არ აღემატება. დატენიანებული ჩამოცვნილი მასა შეიძლება განლაგდეს 12°-14° გრადუსიანი კუთხით.

### 3.2. დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით ფერდოს ჩამონაქცევი მასის დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა და მისი გამოკვლევა

ნაშრომში განხილულია ფერდოს სტატიკური მდგრადობა, როცა ფერდოს მასივზე საკუთარი სიმძიმის ძალის გარდა მოქმედებენ აფეთქებისა და სეისმური ძალები. გამოყვანილია პირველი რიგია არაწრფივი ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლება, რომელსაც დააკმაყოფილებს ფერდოს მასის საშიში დაცურების ზედაპირის აღმწერი განტოლება. მოყვანილია ამ განტოლების ამოხსნა კვადრატურებში, ხოლო ზოგიერთი შემთხვევისათვის – კი ელემენტარულ ფუნქციებში რაც საშუალებას იძლევა დავადგინოთ ფერდოს მასივის ჩამონგრევის ზონები.

ინჟინრულ პრაქტიკაში (საინჟინრო გეოლოგიაში, მთის ქანების მექანიკაში ჰიდროტექნიკურ და გზათა მშენებლობაში, ღია კარიერების დამუშავებაში და სხვა) ყველაზე მეტად გავრცელებულ ამოცანად გვევლინება ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობის სტატიკური მდგრადობა – არამდგრადობის შესწავლა, მიწის კაშხლების და ფერდობების მოწყვეტის (მეწყერ-ჩამონაქცევების) პროგნოზირება, ბორტების და გამონაშვერი ფრაგმენტების მეწყერულ-ჩამონაქცევების წარმოშობის საშიშროების შეფასება დამატებითი დატვირთვების ფილტრაციული, სეისმური, აფეთქების და დროებითი დატვირთვებით გამოწვეული ძალების გათვალისწინებით.

ფერდობის მეწყერ-ჩამონაქცევი, მასის საშიში დაცურების ზედაპირად ლიტერატურაში თითქმის ყველა მკვლევარი მიიჩნევს, რომ იგი წარმოადგენს წრიულ-ცილინდრულს (ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში წრის რკალს), რაც გლობალურად ნაკლებადაა მოსალოდნელი და იგი ჭეშმარიტი

საშიში დაცურების ზედაპირის მხოლოდ უხეში მიახლოებაა. ამასთან, თითქმის ყველა მათგანი ცდილობს პრიზმის მასის წრიულ-ცილინდრული დაცურების ზედაპირი განსაზღვროს გრაფიანალიზური ზერხით.

ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი განტოლება ანალიზურად პირველადაა გამოყვანილ ნაშრომში, როცა ერთგვაროვან ფერდოს მასივზე მძვრელი ძალებიდან მოქმედებს მხოლოდ საკუთარი სიმძიმის ძალა. ქვემოთ მოვიყვანთ ამ ამოცანის ამოხსნის ანალიზურ მეთოდს, როცა ფერდოს მასივზე მოქმედებენ დამატებითი დატვირთვები (მძვრელი ძალები).

ისე, როგორც ყველა მასალა მთის ქანებიც ირღვევა ნორმალური ძაბვებით გამოწვეული გაჭიმვით, ან ჭრაზე მხები ძაბვების გავლენით. ამ სახის ძაბვებით განისაზღვრება მთის ქანების სიმტკიცე.

მთის ქანების სიმტკიცეზე დახასიათების დროს საჭიროა განვასხვავოთ მისი ნაწილების და მთლიანი მასივის, ფენებს შორის, ფენების განლაგების მიმართ კუთხით, ფერდოს ზედაპირის, ცალკეული დასუსტებული ფენების, გაზარული და შრეებიანი მასივში სიმტკიცეები, აგრეთვე სიმტკიცე გაჭიმვაზე, კუმშვაზე და ჭრაზე.

გრუნტის მასივი მთლიანობაში ხასიათდება მის ცალკეულ ნაწილაკების მაღალი სიმტკიცით და უფრო შესუსტებულით მათ კონტაქტებს შორის. გრუნტის ქანების რღვევა და მისი დეფორმაცია ჩამონაქცევის სახით მიმდინარეობს დასუსტებულ ზედაპირებზე, ნაწილაკების კონტაქტებში, ფორებში და ცალკეულ სიბრტყეებში. ამ დროს საჭიროა გავითვალისწინოთ წინაღობა კუმშვაზე და ჭრაზე, რომლებიც განისაზღვრებიან  $K$  შეჭიდულობით და შინაგანი ხახუნის  $\phi$  კუთხით. ეს ორი პარამეტრი წარმოადგენს მთის ქანების სიმტკიცის ძირითად მახასიათებელ სიდიდეს.

მთის ქანების შეჭიდულობა შეიძლება წარმოვადგინოთ სამი შესაკრების სახით:

$$K=K_1+K_y+K_w, \quad (3.2)$$

სადაც  $K_1$  – არის პირველადი შეჭიდულობა (მისი სიდიდე დამოკიდებულია მთის ქანების შემადგენლობაზე და მათ სიმტკიცეზე);

$K_2$  – განმტკიცების შეჭიდულობა (მისი სიდიდე წარმოიშვება მთის ქანებში სხვადასხვა მინერალებით ცემენტაციის დროს);

$K_w$  – კაპილარული დაჭიმულობის შეჭიდულობა (მისი სიდიდე წარმოიშვება, როგორც დამატებითი წინაღობა ჰრაზე ხახუნის ძალების ხარჯზე, რომელიც განვითარდება კაპილარული წნევების დროს, როცა მთის ქანი გაჟღენთილია წყლით ან აქვს მაღალი სიმკვრივე).

სხვადასხვა გრუნტებში აღნიშნული ტიპის შეჭიდულობებს აქვთ სხვადასხვა ფარდობითი სიდიდეები. ასე მაგალითად, მაგარ ქვიშნარებში, რკინაშემცველ ან კაჟმიწიანი ცემენტაციის დროს  $K_2 \gg K_1$ , ხოლო  $K_w \rightarrow 0$ . მკვრივ თიხებში შეჭიდულობის ძირითადი სახეა  $K_1$ , დიდ ფორიანობის და სინოტივის მქონე თიხნარებში მნიშვნელოვანია  $K_w$  შესაკრების ფარდობითი სიდიდე.

შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი დამოკიდებულია ჩამონაქცევი მასის დაცურების ზედაპირის სიგლუვე და განისაზღვრება ქანის გრანულომეტრიული შემადგენლობით.

შევნიშნოთ, რომ ფერდოს მასივის რღვევისას ჩამონაქცევი პრიზმის მასის დაცურება იმ შემთხვევებში ხდება რამე მრუდწირულ ზედაპირზე: როცა ფერდოს მასივი ერთგვაროვანი გრუნტია; როცა ფენები განლაგებულია ჰორიზონტულად და მათი სიმტკიცის ძირითადი მახასიათებლები დიდად არ განსხვავდება ერთმანეთისგან, როცა ფენები განლაგებულია ფერდოს ქანობის საწინააღმდეგოდ.

3.6 ნახაზზე მოყვანილია აღნიშნული ტიპის მთის ქანების საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი განტოლების მისაღებად საანგარიშო სქემა. ფერდოს გრუნტი ხასიათდება შინაგანი ხახუნის  $\varphi$  კუთხით,  $K$  შეჭიდულობით და მოცულობითი  $\gamma$  წონით.

ფხვიერი გარემოს თეორიის თანახმად ერთგვაროვან მთის ქანების მასივში წარმოიქმნება დაცურების ე.წ. "მოედნები"(მცირე ბაქნები), მხოლოდ იმ ძაბვებისათვის, რომელთა სიდიდე აღემატება  $\sigma_0$  -ს.

$$\sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}). \quad (3.3)$$

აღნიშნული "მოედნები" განლაგებულია უდიდესი მთავარი ნორმალური ძაბვის მიმართ  $\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$  კუთხით (ნახ. 3.6). ამავე დროს მთის ქანების მასივში მთავარ ნორმალურ დამაბულობებს აქვთ ვერტიკალური მიმართულება, ხოლო ფერდოს ზედაპირთან მიახლოებისას ვერტიკალიდან ისინი გადაიხრებიან ფერდოს ზედაპირის მხარეს.

ერთგვაროვან მასივებში მეწყერ-ჩამონაქცევის დაცურების ზედაპირისათვის დამახასიათებელია მის ზედა ნაწილში ვერტიკალური სიბრტყის (ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში მონაკვეთის, ნახ.3.6-ზე  $AQ=H_{90}$ ) არსებობა და ეს სიმაღლე განისაზღვრება თეორიული დამოკიდებულებით (3.1).

ვერტიკალური მონაკვეთი წარმოიქმნება გამჭიმავი ძაბვების მოქმედების შედეგად, რომლებიც მიისწრაფიან ჩამონაქცევი მასა მოაბრუნონ  $O$  წერტილის გარეშე (ნახ. 3.6). შედეგად დერფორმირებული მასივის ზედა ნაწილში გაჩნდება ვერტიკალური ბზარი, რომელიც  $H_{90}$ -ზე სიმაღლეზე ვრცელდება.  $H_{90}$  მონაკვეთის გაგრძელებაზე ქვევით წარმოიშობა ვერტიკალთან  $\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$  კუთხით დახრილი სიბრტყე - წრფივი  $AB$  მონაკვეთი. შემდეგ ჩამონაქცევი მასა მოძრაობს  $BO$  მრუდწირულ ზედაპირზე, რომელიც ფერდოს ცილინდრულ ზედაპირს გადაკვეთს  $\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$  კუთხით, ან ჩადის ფერდოს ფუძეში (როცა  $\varphi < 13^\circ$ ).

(3.1) და (3.2) ფორმულების შედარებიდან ცხადია, რომ დაუტვირთავ ფერდობებში დაცურების "მოედნები" წარმოიქმნება მხოლოდ განსაზღვრულ სიღრმეში:

$$\sigma = \gamma \cdot H_{90}. \quad (3.4)$$

აღნიშნულიდან გამომდინარე ვასკვნით, რომ  $AB$  მონაკვეთის მარჯვნივ დაცურების "მოედნები" ვერტიკალთან დახრილია  $\beta$  კუთხით, ხოლო მის ქვევით მათი მიმართულებები ემთხვევა დაცურების  $ODB$  წირის მხებს.

დაცურების ზედაპირზე (და საერთოდ მასივში) მოქმედებენ  $\sum \bar{F}_i$  დამჭერი (ხახუნის და შეჭიდულობის) და მძვრელი  $\sum \bar{P}_i$  (ქანის მასის წონა, დროებითი და მუდმივი მოწყობილობების წონა, აფეთქების, სეისმური ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური) ძალები. თუ ამ ძალებს დავაგეგმილებთ  $z=z(x)$  წირის  $l$  მხებზე, მაშინ ადგილი ექნება შემდეგს (ნახ. 3.6): როცა  $\sum F_i > \sum P_i$  ფერდო სტატიკურ წონასწორობაშია; როცა  $\sum F_i = \sum P_i$  – ფერდო ზღვრულ სტატიკურ წონასწორობაშია; როცა  $\sum F_i < \sum P_i$ , მაშინ ფერდოს მასივი იწყებს ჩამოქცევას (დეფორმაციას). ნახ. 3.6-ზე  $OMB$  წირის ზემოთ და მის ქვემოთ ადგილი აქვს შესაბამისად უტოლობებს:  $\sum P_i < \sum F_i$ ;  $\sum P_i > \sum F_i$ .

3.6 ნახაზზე მოყვანილია ფერდოს მასის საშიში დაცურების ზედაპირის (წირის) განსასაზღვრავი საანგარიშო სქემა, როცა გრუნტი ერთგვაროვანია, მშრალია და ხასიათდება შინაგანი ხახუნის  $\varphi$  კუთხით,  $K$  შეჭიდულობის და მოცულობითი  $\gamma$  წონით. ამასთან მძვრელი ძალებიდან ვითვალისწინებთ  $\bar{G}$  ჩამონაქცევი მასივის წონას,  $\bar{P}$  აფეთქების წნევის ძალის ჰორიზონტულ მდგენელს და  $\bar{P}_s$  სეისმური ძალას.

ფერდოს ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზედაპირის აგება უნდა მოხდეს შემდეგი მიმდევრობით. ჯერ განისაზღვრება  $a$  რიცხვი, რომელიც შემდეგი ფორმულით მოიცემა:

$$a = \frac{2H \left[ 1 - \operatorname{ctg} \theta \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\theta + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{tg} \left( \frac{\theta + \varphi}{2} \right)}, \quad (3.5)$$

სადაც  $H$  – არის ფერდოს სიმაღლე, მ;

$\theta - g(x) = cx + b$  წრფის ფერდოს ჰორიზონტთან დახრის კუთხე;

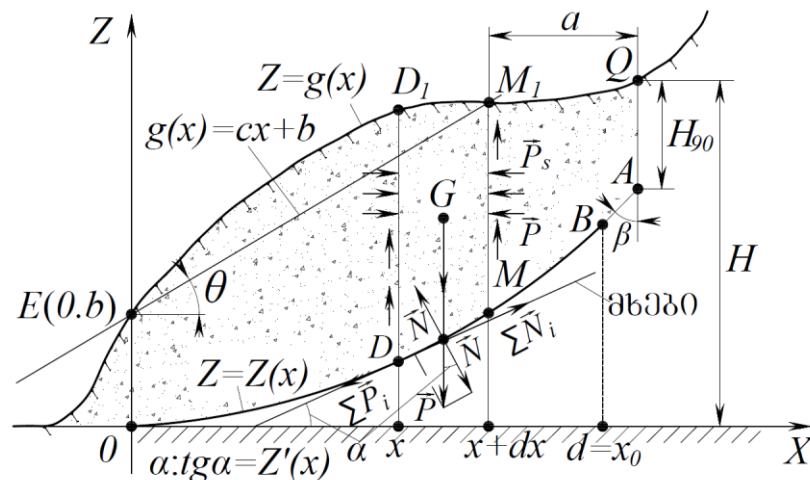
$\varphi$  – შიგა ხახუნის კუთხე, გრად.



$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2}).$$

სადაც  $\gamma$  - არის მოცულობითი წონა, ნ/სმ<sup>3</sup>.

$H_{90}$  – სიმაღლის ქვედა  $A$  წერტილზე გავატარებთ ვერტიკალთან  $\beta$  კუთხით დახრილ  $AB$  წრფეს; შევადგენთ დიფერენციალურ განტოლებას, რომელსაც დააკმაყოფილებს ფერდოს ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების წირის  $z=z(x)$  განტოლება;  $z=z(x)$  წირის და  $AB$  წრფის გადაკვეთა მოგვცემს დაცურების ზედაპირის  $|AB|$  წრფივ მონაკვეთს (ნახ. 3.6).



ნახ. 3.6. მთის ქანების საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი განტოლების მისაღები საანგარიშო სქემა

საანგარიშო სქემაზე  $ED_1Q:z=g(x)$ ,  $0 \leq x \leq d + l \sin \beta$ , უბან-უბან გლუვი მოცემული წირია. მიწის კაშხლების და ბუნებრივი ფერდოს ცილინდრული ფორმის შემთხვევაში  $z=g(x)=cx+b$ .  $ODB:z=z(x)$ ,  $0 \leq x \leq d$  – ფერდოს მასივის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი წირია.

უსასრულო მცირე  $[x, x+dx]$  მონაკვეთზე გამოვყოთ ფერდოს პრიზმის ის  $DD_1M_1M$  ნაკვეთური, რომელიც მოთავსებულია ამ მონაკვეთის ზემოთ, სადაც  $D=D[x, z(x)]$ ,  $D_1=D_1[x, g(x)]$ ,  $M_1=M_1[x+dx, g(x+dx)]$ ,  $M=M[x+dx, z(x+dx)]$ .

დავუშვათ, რომ  $z=z(x)$  წირი გლუვია, მას ყოველ წერტილში გააჩნია უწყვეტად ცვლადი მხები.  $DD_1M_1M$  ფიგურის ფართობი და  $L=L(DM)$  რკალის

სიგრძეზე მაღალი რიგის უსასრულო მცირე სიდიდის სიზუსტით, ვიდრე  $dx$ , მოიცემა ფორმულებით:

$$S = |DD_1| \cdot dx = (g(x) - z(x)) \cdot dx, \quad (3.6)$$

$$L = \sqrt{1 + [z'(x)]^2} \cdot dx. \quad (3.7)$$

გამოყოფილი ელემენტარული  $DD_1M_1M$  ნაკვეთურის ზღვრული სტატიკური წონასწორობის განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$\bar{G} + \bar{P} + \bar{P}_s + f\bar{N} + \bar{K}L = 0. \quad (3.8)$$

**შენიშვნა 1:** უმეტეს შემთხვევაში დამატებითი დატვირთვების არსებობა იწვევს გრუნტის წონის ნორმალური მდგენელის შემცირებას და მხები მდგენელის გაზრდას, რაც იწვევს ფერდოს მდგრადობის პირობების გაუარესებას. მიუხედავად იმისა, რომ ჩამონაქცევი პრიზმის წონა 1-2 რიგით მეტია, ვიდრე დამატებითი დატვირთვები, მათ მოქმედებას არსებითი მნიშვნელობა აქვს ფერდოს გარკვეული ნაწილების მდგრადობისათვის, მაგრამ არა მთლიანი ფერდოს მასივისთვის.

**შენიშვნა 2.**  $DD_1M_1M$  ელემენტარული ნაკვეთურის  $DD_1$  და  $M_1M$  წახნაგებზე მოქმედი ხახუნის და მთის ქანების წნევები ერთმანეთს აწონასწორებენ, ამიტომ მათ მხედველობაში არ მივიღებთ.

ახლა დავაგეგმილოთ (3.8) განტოლება  $L$  რკალის სიმძიმის ცენტრზე გავლებულ მხებზე, (ნახ. 3.6) გვექნება:

$$G \sin \alpha + P \cos \alpha + P_s \cos \alpha - Gf \cos \alpha - KL = 0. \quad (3.9)$$

(3.6) ტოლობის შესაბამისად  $DD_1M_1M$  ელემენტარულ ბლოკზე მოქმედი სიმძიმის ძალის სიდიდე ტოლია:

$$G = \gamma \cdot s \cdot l = \gamma [g(x) - z(x)] \cdot dx. \quad (3.10)$$

ფერდოს მასივზე მოქმედი აფეთქების ძალის სიდიდე შეიძლება შევაფასოთ შემდეგი ფორმულით:

$$P = 0,36 \cdot \frac{Q^2}{R^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{u \cdot E^5}{\gamma}} = m \cdot G. \quad (3.11)$$

მიწისძვრის შედეგად აღძრული სეისმური  $\bar{P}_s$  ძალის სიდიდე გამოითვლება ფორმულით:

$$P_s = C_s \cdot G, \quad (3.12)$$

სადაც  $Q$  – არის ერთდროულად აფეთქებული მუხტის მასა;

$R$  – მანძილი აფეთქების ცენტრიდან მასივის განსახილველ წერტილამდე;

$u$  – აფეთქების ხვედრითი ენერგია;

$E$  – იუნგის მოდული;

$\gamma$  – ქანის სიმკვრივე;

$m$  – აფეთქების წნევის ძალის ჩამონაქცევი მასის წონასთან პროპორციულობის კოეფიციენტი;

$C_s$  – სეისმურობის კოეფიციენტი, რომელიც ზონებისა და ფერდოს გრუნტის დაზიანების ხარისხის მიხედვით 0,03÷0,27 ფარგლებში იცვლება;

$f = \operatorname{tg} \alpha$  – სრიალის ხახუნის კოეფიციენტი.

(3.7), (3.10), (3.11) და (3.12) გამოსახულებების გათვალისწინებით (3.9) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\gamma [g(x) - z(x)] dx \frac{z'(x)}{\sqrt{1+z'^2(x)}} + \gamma(m_a + c_s - f)[g(x) - z(x)] dx \cdot \frac{1}{\sqrt{1+z'^2(x)}} - K \sqrt{1+z'^2(x)} dx = 0. \quad (3.13)$$

$K=K(h)$  – განსახილველი ფერდოს შეჭიდულობა დამოკიდებულია შემდეგ  $h(x)=g(x)-z(x)$  ცვლადზე.

**შენიშვნა 3.** მთის ქანების ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გამოკვლევით დადგენილია, რომ  $K$  შეჭიდულობა  $h$  სიღრმის ფუნქციაა. ასე მაგალითად, თუ აგრელიტებში და ალევროლიტებში 15-20 მეტრ სიღრმეში სიმკვრივე 60-70%-ს შეადგენს და შეჭიდულობა 0,2-2,0 კმ/სმ<sup>2</sup>-ია, მაშინ 70-100 მეტრ სიღრმეზე ისინი შესაბამისად აღწევენ 80-85%-ს და 20-30 კგ/სმ<sup>2</sup>-ს. ქვიშარებში კი შეჭიდულობა 1,8-2,0-დან იზრდება 40-45 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ (3.6), (3.7) და (3.10) ტოლობები სრულდებიან მაღალი რიგის უსასრულო მცირის სიზუსტით, ვიდრე დახრილ, ფერდოს მასივის დაცურების ზედაპირის  $z=z(x)$  მრუდის განსასაზღვრავად (3.13)-დან მივიღებთ პირველი რიგის შემდეგ არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებას:

$$K(h) \cdot z'^2(x) - \gamma[g(x) - z(x)] \cdot z'(x) - \gamma(m_a + c_s - f)[g(x) - z(x)] + K(h) = 0. \quad (3.14)$$

თუ (3.14) განტოლებას ამოვხსნით, როგორც კვადრატულს  $z'(x)$ -ის მიმართ, მივიღებთ:

$$z'_{1,2}(x) = \frac{\gamma[g(x) - z(x)] \pm \sqrt{\gamma^2[g(x) - z(x)]^2 - 4K(h)\{K(h) - \gamma(m + c_s - f)[g(x) - z(x)]\}}}{2K(h)}. \quad (3.15)$$

**შენიშვნა 4.** ქვემოთ ჩვენ შემოვისაზღვრებით მხოლოდ (3.15) ფორმულით განსაზღვრული  $z'_1(x)$  ფესვის „+“ ნიშნის შემთხვევით, თუმცა  $z'_2(x)$  ფესვის „-“ ნიშნის შემთხვევაც განიხილება ფესვზე ჩატარებული კვლევის ანალოგიურად.

(3.15) განტოლება  $h(x) = g(x) - z(x)$  ფუნქციის მიმართ მიიღებს სახეს:

$$h'(x) = g'(x) - \frac{\gamma h(x) + \sqrt{\gamma^2 h^2(x) - 4K(h)[K(h) - \gamma(m + c_s - f) \cdot h(x)]}}{2K(h)}. \quad (3.16)$$

ამასთან, იმის ძალით, რომ  $z(0)=0$  (ნახ. 3.6), ამ განტოლების  $h(x)$  ამონახსნი აკმაყოფილებს შემდეგ საწყის პირობას:

$$h(0)=g(0).$$

(3.17)

მაშასადამე  $h=h(x)$  ფუნქცია წარმოადგენს (3.16), (3.17) კოშის ამოცანის ამონახსნს  $[0, d]$  სეგმენტზე.

მექანიკური მოსაზრებიდან გამომდინარე და ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე  $K=K(h)$  ფუნქცია წარმოადგენს თავისი  $h \geq 0$  არგუმენტის უწყვეტ, მონოტონურად ზრდად ფუნქციას. ამასთან

$$K(0)=0.$$

(3.18)

(3.18)-ის ძალით და იმის გამო, რომ  $K(h)$  შედის (3.16) განტოლების მარჯვენა მხარის მნიშვნელში, ეს განტოლება საზოგადოდ შეიცავს სინგულარულ წევრს.

(3.16) განტოლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$h' = F(x, h), \quad (3.19)$$

სადაც

$$F(x, h) = g'(x) - \frac{\gamma h + \sqrt{\gamma^2 h^2 + 4\gamma K(h) \cdot h(m + c_s - f) - 4K^2(h)}}{2K(h)}. \quad (3.20)$$

ქვემოთ ცხადი მოსაზრების გამო ვიგულისხმობთ, რომ

$$g(x) > 0, \quad g'(x) \geq 0, \quad \text{როცა} \quad 0 < x \leq d + l \sin \beta. \quad (3.21)$$

**შენიშვნა 5.** რადგან  $g(x) \geq z(x)$ , ჩვენთვის საინტერესო იქნება მხოლოდ (3.19), (3.17) ამოცანის არაუარყოფითი  $h(x) = g(x) - z(x) \geq 0$  ამონახსნი. ამასთან აქედან გამომდინარე (3.15)-ის ძალით  $z'(x) \geq 0$ , ე.ი.  $z = z(x)$  ფუნქცია წარმოადგენს მონოტონურად არაკლებად ფუნქციას და რადგან  $z(0) = 0$ , გვექნება, როცა  $x \geq 0$ .

განვიხილოთ შემთხვევა, როცა ფერდოს ზედაპირი არის წრფივი, რომლის განტოლებაა  $g(x) = cx + b$ , სადაც  $c$  და  $b$  მოცემული დადებითი რიცხვებია.

ამ შემთხვევაში (3.20) ფორმულით მოცემული  $F(x, h)$  ფუნქცია არ არის დამოკიდებული  $x$  ცვლადზე და აქვს შემდეგი სახე:

$$F(h) = c - \frac{\gamma h + \sqrt{\gamma^2 h^2 + 4\gamma h K(h)(m + c_s - f) - 4K^2(h)}}{2K(h)}, \quad h > 0. \quad (3.22)$$

ამიტომ (3.13) დიფერენციალური განტოლება ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$h' = F(h). \quad (3.23)$$

ხოლო იმის გამო, რომ  $g(x)=cx+b$ , (3.17) საწყისი პირობა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$h(0)=b. \quad (3.24)$$

ახლა დავადგინოთ  $F(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე, რისთვისაც შემოვიღოთ შემდეგი ახალი ფუნქციები:

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)}, \quad h > 0, \quad (3.25)$$

$$\Phi(v) = c - \frac{1}{2} \left( \gamma v + \sqrt{\gamma^2 v^2 + 4\gamma(m + c_s - f)v - 4} \right), \quad v > 0. \quad (3.26)$$

ცხადია, რომ

$$f(h) = \Phi(v), \quad v = K_1(h). \quad (3.27)$$

(3.26) გამოსახულებით განსაზღვრული  $\Phi(v)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე მოიცემა შემდეგი უტოლობებით:

$$\begin{cases} \gamma^2 v^2 + 4\gamma \cdot A \cdot v - 4 \geq 0 \\ v > 0 \end{cases} \Leftrightarrow v \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2 + 1} - A}{\gamma}, \quad (3.28)$$

სადაც  $A = m + c_s - f$ .

(3.25)-(3.28)-ის ძალით  $f(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე მოიცემა შემდეგი უტოლობით (ნახ. 3.7. დაშტრიხული სეგმენტები):

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)} \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2 + 1} - A}{\gamma}$$

(3.29)

აღსანიშნავია, რომ შეჭიდულობის ამსახველი  $K=K(h)$  ფუნქცია აკმაყოფილებს შემდეგ პირობას (ნახ. 3.8)

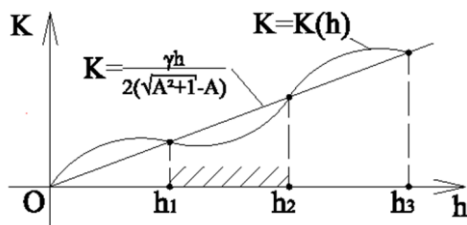
$$K(h) > \frac{\gamma h}{2[\sqrt{A^2 + 1} - A]},$$

$h > 0$ .

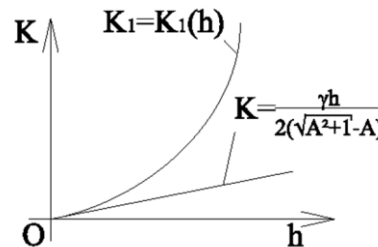
(3.30)

მაშინ (3.29)-ის თანახმად  $F(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე წარმოადგენს ცარიელ სიმრავლეს და მაშასადამე ამ შემთხვევაში ფერდო სტატიკურად მდგრადია და მეწყერ-ჩამონაქცევის მოვლენას ადგილი არ ექნება.

აღვნიშნოთ  $K_1(h)$  ფუნქციის მნიშვნელობათა არე  $I$ -თი. როდესაც  $h$  არ-გუმენტი იცვლება  $(0, +\infty)$  შუალედში. ჩვენ შემოვისაზღვრებით შემთხვევით, როდესაც  $K_1(h)$  ფუნქცია მონოტონურია და  $I=(0, +\infty)$ .



ნახ. 3.7



ნახ. 3.8

ახლა შევნიშნოთ, რომ  $\sqrt{A^2+1}-A > 1$ , როცა  $A < 0$ . განვიხილოთ შემთხვე-ვა, როცა  $c \leq 1$ , მაშინ ცხადია, რომ

$$\frac{2(\sqrt{A^2+1}-A)}{\gamma} > \frac{2c}{\gamma}$$

და მაშასადამე, როდესაც  $v$  ეკუთვნის  $\Phi(v)$  ფუნქციის განსაზღვრის არეს, ე.ი.

(3.24)-ის ძალით გვექნება:

$$c - \frac{1}{2}\gamma v = \frac{1}{2}\gamma \left( \frac{2c}{\gamma} - v \right) < \frac{1}{2}\gamma \left( \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma} - v \right) < 0, \text{ ანუ } c < \frac{1}{2}\gamma v.$$

მაშინ (3.26)-დან მივიღებთ, რომ

$$\Phi(v) = c - \frac{1}{2}\gamma v - \frac{1}{2}\sqrt{\gamma^2 v^2 + 4\gamma A v - 4} < 0,$$

ე.ი.  $\Phi(v) < 0$ , როდესაც

$$v \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma}. \quad (3.31)$$

(3.25)-(3.27), (3.29) და (3.31) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ  $f(h) < 0$ , როცა

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)} \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma}. \quad (3.32)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$\sigma_1 = 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2 + 1} - A}{\gamma}. \quad (3.33)$$

ა) განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც  $K_1(h)$  ფუნქცია მონოტონურად კლებადია და მისი მნიშვნელობათა არე არის  $I=(0,+\infty)$  (ნახ. 3.9 და 3.10).

რადგან  $I=(0,+\infty)$  და  $K_1=K_1(h)$  ფუნქცია მონოტონურად კლებადია, ამიტომ ანალიზიდან ცნობილი თეორემის თანახმად

$$K_1(h)=\sigma_1. \quad (3.34)$$

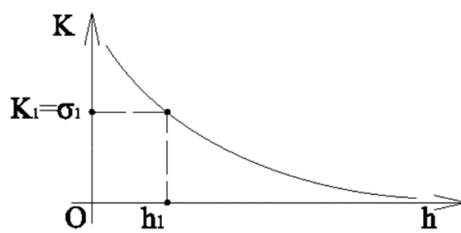
სადაც  $\sigma_1$  მოცემულია (3.33) ტოლობით, გააჩნია მხოლოდ ერთი  $h=h_1>0$  ამონახსნი (ნახ. 3.9). აქედან გამომდინარე

$$K_1(h) \geq \sigma_1, h > h_1 \Leftrightarrow 0 < h \leq h_1, \quad (3.35)$$

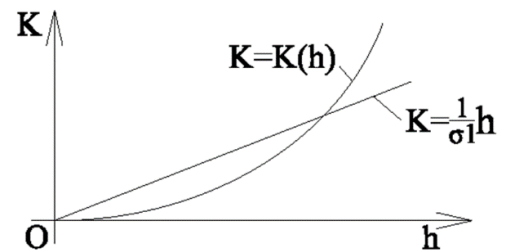
ე.ი. (3.29)-ის ძალით  $F(h)$  ფუნქციის არე მოიცემა (3.35) ინტერვალით, სადაც (3.32) უტოლობიდან გამომდინარე ეს ფუნქცია უარყოფითია.

(3.35) უტოლობის თანახმად, როდესაც  $0 < b \leq h_1 - (0, b)$  წერტილზე გადის (3.23) ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლების ერთადერთი ინტეგრალური წირი (ე.ი. (3.23), (3.24) კოშის ამოცანის  $h=h(x)$  ამონახსნის გრაფიკი), რომელიც აღიწერება შემდეგი განტოლებით:

$$x = \int_b^h \frac{1}{f(\xi)} d\xi. \quad (3.36)$$



ნახ. 3.9



ნახ. 3.10

რადგან  $f(h)<0$ , როცა  $0 < h \leq h_1$ , ამიტომ (3.23) განტოლების ინტეგრალური წირი, რომელიც აღიწერება (3.36) განტოლებით წარმოადგენს მონოტონურად



კლებადი ფუნქციის გრაფიკს, რომლისთვისაც  $Ox$  ღერძი იქნება ჰორიზონტალური ასიმპტოტი, მხოლოდ შემდეგი

$$\int_b^0 \frac{1}{f(\xi)} d\xi, \quad (3.37)$$

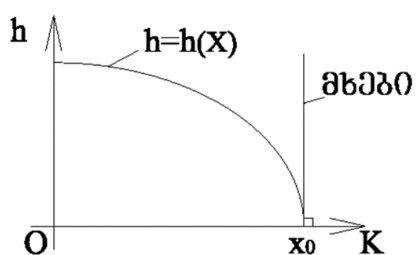
ინტეგრალის განშლადობის შემთხვევაში. ადვილად მტკიცდება, რომ (3.37) ინტეგრალი კრებადია და (3.36) განტოლებით მოცემული ინტეგრალური წირი  $Ox$  ღერძს გადაკვეთს სასრულ  $h_0 > 0$  წერტილში, რომელიც მოიცემა განტოლებით:

$$x_0 = \int_b^0 \frac{1}{f(\xi)} d\xi$$

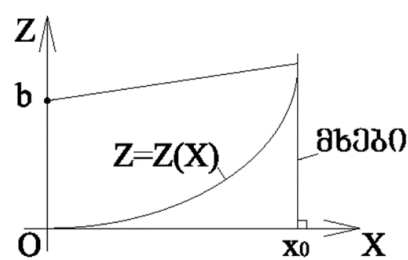
(3.38)

ზემოთქმულიდან გამომდინარე  $h=h(x)$  და  $z=z(x)=g(x)-h(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს აქვთ 3.11 და 3.12 ნახაზებზე წარმოდგენილი სახე:

**შენიშვნა 6.** რადგან  $F(h)$  განსაზღვრის არე, მოიცემა  $0 < h \leq h_1$  შუალედით, ამიტომ, როდესაც  $b > h_1$ , მაშინ (3.23), (3.24) კომის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი და მაშასადამე  $O$  წერტილზე არ გადის ფერდოს ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი  $z=z(x)$  წირი.

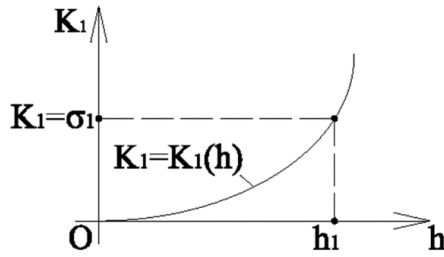


ნახ. 3.11

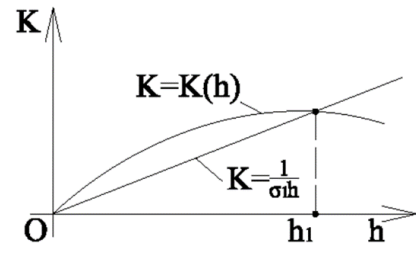


ნახ. 3.12

ბ) ახლა განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც  $K_1(h) = \frac{h}{K(h)}$  ფუნქცია მონოტონურად ზრდადია და მისი მნიშვნელობათა არე  $I=(0, +\infty)$  (ნახ. 3.13 და 3.14).



ნახ. 3.13



ნახ. 3.14

ამ შემთხვევაში ანალოგიურად ზემოთ განხილულის  $K_1(h)=\sigma_1$  განტოლებას გააჩნია მხოლოდ ერთი  $h=h_1>0$  ამონახსნი (ნახ. 3.13) და

$$K_1(h) \geq \sigma_1, \quad h > 0, \quad \Leftrightarrow \quad h_1 \leq h < +\infty, \quad (3.39)$$

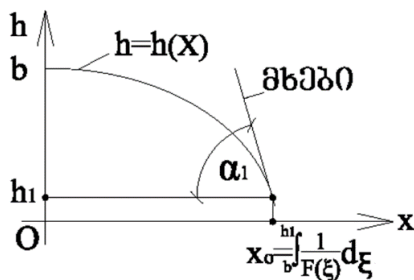
ე.ი. (3.29)-ის ძალით  $F(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე მოიცემა  $(h_1, +\infty)$  ინტერვალით, სადაც (3.32) უტოლობიდან გამომდინარე ეს ფუნქცია უარყოფითია.

(3.39)-ის თანახმად, როცა  $b > h_1$ , მაშინ  $(0, b)$  წერტილზე გადის (3.23) დიფერენციალური განტოლების ერთადერთი ინტეგრალური წირი, რომელიც მოიცემა (3.36) განტოლებით. (3.39) და (3.32)-ის ძალით ეს ინტეგრალური წირი წარმოადგენს მონოტონურად კლებადი ფუნქციის გრაფიკს და განსაზღვრულია მხოლოდ  $h_1 \leq h \leq b$  შუალედში. რადგან  $\nu = \sigma_1$  წარმოადგენს  $\gamma^2 \nu^2 - 4\gamma A \nu - 4 = 0$  განტოლების ამონახსნს, ამიტომ (3.26), (3.27) და (3.34)-ის ძალით

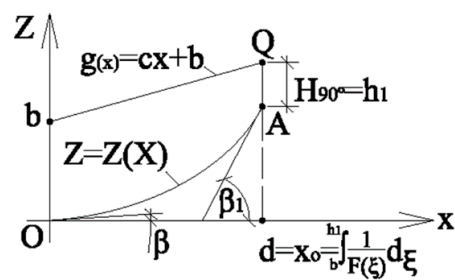
$$F(h_1) = \Phi(K_1(h_1)) = \Phi(\sigma_1) = c - \frac{1}{2} \gamma \sigma_1. \quad (3.40)$$

აქედან გამომდინარე  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ

3.15 და 3.16 ნახაზებზე მოყვანილი სახე:



ნახ. 3.15



ნახ. 3.16

ამასთან  $h=h(x)$  ფუნქციის გრაფიკის მხეები  $(x_0, h_1)$  წერტილში  $Ox$  ღერძთან ადგენს  $\alpha_1$  კუთხეს (ნახ. 3.15), რომლის ტანგენსი (3.40)-ის ძალით გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = -\Phi(\sigma_1) = \frac{1}{2} \gamma \sigma_1 - c.$$

ანალოგიურად

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{1}{2} \gamma \sigma_1, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{2} \left( K_1(b) + \sqrt{\gamma^2 K_1^2(b) - 4\gamma A K_1(b) - 4} \right).$$

**შენიშვნა 7.**  $h=h(x)$  ფუნქცია (3.39)-ის ძალით განსაზღვრულია მხოლოდ

$0 \leq x \leq x_0 = \int_b^{h_1} \frac{1}{F(\xi)} d\xi$  შუალედში. ამიტომ  $z=z(x)$  ფერდოს მასის დაცურების

წირიც განსაზღვრული იქნება მხოლოდ  $0 \leq x \leq x_0$  შუალედში და მამასადამე ამ შემთხვევაში  $x_0=d$ , (ნახ. 3.6 და 3.16). ანალოგიურად მე-6 შენიშვნისა, როდესაც  $H_0=h_1$ , მაშინ (3.23), (3.24) კოშის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი.

ახლა განვიხილოთ  $K=K(h)$  ფუნქციის ყოფაქცევის შემთხვევა კონკრეტულ მაგალითზე, როდესაც  $K(h)=K_0 h^2$ ,  $K_0=\text{const}$ , (3.23), (3.24) კოშის ამოცანის  $h=h(x)$  ამონახსნის გრაფიკი აღიწერება შემდეგი განტოლებით:

$$x = \frac{c}{c+1} \left[ h - b + \left( \frac{\gamma}{K_0} \cdot \frac{c-A}{c^2+1} - \frac{\gamma}{2K_0 c} \right) \cdot \ln \left| \frac{h - \frac{\gamma}{K_0} \frac{c-A}{c^2+1}}{b - \frac{\gamma}{K_0} \frac{c-A}{c^2+1}} \right| \right] - \frac{1}{2K_0} G \left( h + \frac{\gamma f}{2K_0}; m, l \right) - \frac{1}{2K_0} G \left( b + \frac{\gamma A}{2K_0}; m, l \right), \quad (3.41)$$

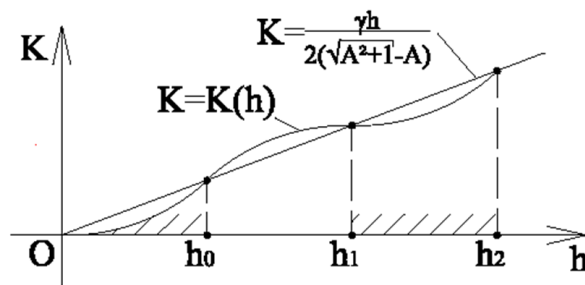
$$\text{სადაც } m = \frac{\gamma^2(1+A^2)}{4K_0^2}, \quad l = \frac{\gamma c(1+cA)}{2K_0(c^2+1)},$$

$$G(x, m, l) = \sqrt{m^2 - l^2} \ln \left| \frac{1}{x-m} - \frac{m}{m^2 - l^2} + \sqrt{\left( \frac{1}{x-d} - \frac{m}{m^2 - l^2} \right)^2 - \frac{m^2}{(m^2 - l^2)^2}} \right| - l \cdot \arcsin \frac{x}{m} + \sqrt{m^2 - x^2}, \quad l < m.$$

**შენიშვნა 8.** ზოგად შემთხვევაში  $K=K(h)$  ფუნქციის გრაფიკს შეიძლება ჰქონდეს 3.7 ან 3.17 ნახაზებზე მოყვანილი სახე, სადაც დამტრიხული  $[h_1, h_2]$ ,

$[h_3, h_4], \dots$  სეგმენტებზე 3.17 ნახაზიდან და  $[0, h_0], [h_1, h_2], [h_3, h_4], \dots$  სეგმენტებზე 3.7 ნახაზიდან განსაზღვრულია  $F(h)$  ფუნქცია. როდესაც  $b$  ეკუთვნის ერთ-ერთ დაშტრიხული  $[h_{2k-1}, h_{2k}], k=1, 2, \dots$  სეგმენტს (გარდა  $[0, h_0]$  სეგმენტისა 3.17 ნახაზიდან), მაშინ  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ 3.15 და 3.16 ნახაზებზე მოყვანილი სახე, რომლებშიც  $h_1$  შეიცვლება  $h_{2k-1}$ -ით, ხოლო როდესაც  $b \in [0, h_0]$  (ნახ. 3.17), მაშინ  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ 3.11 და 3.12 ნახაზებზე მოყვანილი სახე.

როცა  $b$  არ ეკუთვნის დაშტრიხულ სეგმენტებს, მაშინ (3.23), (3.24) კოშის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი და მაშასადამე  $O$  წერტილზე არ გადის ჩამონაქცევი მასის დაცურების ზედაპირის ამსახველი  $z=z(x)$  წირი.



ნახ. 3.17.

### 3.3. ფერდოს მდგრადობის შეფასება მდოვრე მრუდწირულ ზედაპირზე დაცურების შემთხვევაში

ამ პარაგრაფში შეფასებულია ფერდოს მდგრადობა იმ დაშვების საფუძველზე, რომ ფერდოს ჩამონაქცევი მასის შესაძლო დაცურების ზედაპირი მდოვრე მრუდწირულია. ფერდოს მდგრადობის ხარისხი ფასდება მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტით (დაცურების წირის სიმრუდის ცენტრის მიმართ დამჭერი ძალების მომენტების ალგებრულ ჯამთან). დაცურების წირის ყოველი წერტილის მცირე მიდამოსთვის მოცემულია მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულა განსახილველი წერტილის სიმრუდის რადიუსისა და ცენტრის კოორდინატების საშუალებით.

ბუნებრივ მდგომარეობაში მთის ქანების მასივები განიცდიან მუდმივი და ძალიან რთული ბუნებრივი ფაქტორების ზემოქმედებას. დღეღამის განმავლობაში ჰაერის ტემპერატურის ცვლილება იწვევს მასივის დეფორმაციას. წლის განმავლობაში გაყინვა და გაღობა, მზის სხივები, წყალი, ნაპრალებში წყლის ჟონვა, ხეები და ბალახი, აგრეთვე ქარები ზემოქმედებენ ქანებზე. ეს პროცესი მიმდინარეობს ძალიან ნელა და მხოლოდ ძლიერი მოვლენები, როგორცაა მიწისძვრები და აფეთქებები, მკვეთრად აჩქარებენ მასივში ქანების თვისებების ცვლილებებს.

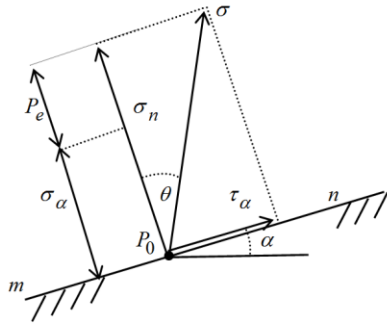
ფერდობებზე გზების გაყვანის და სხვა გათხრითი სამუშაოების შესრულებისას ირღვევა ქანებში დამყარებული ბუნებრივი რეჟიმი, იცვლება დამაბულობის ველი, წარმოიქმნება ღრუები, ქანების გამიშვლელი ზედაპირები, ჩქარდება ქანების გამოფიტვის პროცესი.

ფერდოს მდგრადობის დაკარგვის შედეგად ჩამონაქცევის მახასიათებელი ნიშანია ნელი (რამდენიმე წუთიდან რამდენიმე წლამდე) განვითარება და შემდგომ მასივის უეცარი რღვევა. ასეთი სახის დეფორმაცია წარმოადგენს მსხვილ ჩამონაქცევს, რომელიც მოიცავს ფერდოს გრუნტის მასივის დიდ ნაწილს, და ხშირ შემთხვევაში იწვევს გზების, ხიდების, საცხოვრებელი, სამრეწველო და სხვა ნაგებობების მნიშვნელოვან ნგრევას. ამიტომ გრუნტის მასივების მდგრადობის ანალიზს დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს მიწის ნაგებობების (ნაყარების, ღრმა ქვაბულების, ჯებირების, მიწის კაშხლების და სხვა მსგავსი ნაგებობების) პროექტირების დროს

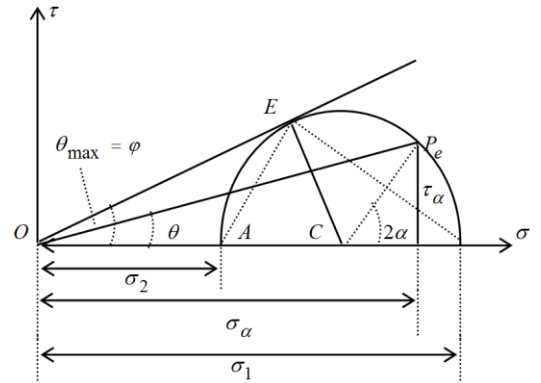
გრუნტის ზღვრული დამაბული მდგომარეობის ზოგადი თეორიის კერძო ამოცანას წარმოადგენს ფერდოს გრუნტის მასივის მდგრადობა, მაგრამ მას აქვს განსაკუთრებული თავისებურებები, რაც განპირობებულია მდგრადობის დაკარგვის შედეგად გამოწვეული სპეციფიკური მოძრაობით.

ბუნებრივი ფერდოს მასივზე დატვირთვების მოქმედების შედეგად მასში წარმოიშვება დეფორმაციები ე.ი. მოძრაობა დროში. ეს მოძრაობა განპირობებულია დამაბულობებით. მართლაც დატვირთვების მოქმედების

შედეგად გრუნტის ნებისმიერ  $P_0$  წერტილზე გატარებული ჰორიზონტისა-  
დმი  $\alpha$  კუთხით დახრილი  $mn$  მოედნის (მცირე ბაქნის) მიმართ აღიძვრება  
ნორმალური  $\sigma_n = \sigma_\alpha + P_e$  და მხები  $\tau_\alpha$  დაძაბულობები (ნახ. 3.18). აქ  
 $P_e = K / \operatorname{tg} \phi$  სიდიდით ფასდება ჯამური შეჭიდულობები;  $K$ -შეჭიდულობა,  
 $\phi$ - გრუნტის შინაგანი ხახუნის კუთხე.



ნახ. 3.18. დაძაბულობის სქემა  
მოცემულ წერტილში



ნახ. 3.19. ფხვიერი გრუნტის  
ძვრის მრუდი

$\alpha$  კუთხის ცვლილებისას  $\sigma$  ძაბვის მდგენელებიც შეიცვლება, და თუ  
მხები (მძვრელი) დაძაბულობები მიაღწევენ ნორმალური დაძაბულობის  
განსაზღვრულ წილს, მაშინ მოხდება გრუნტის ერთ-ერთი მასის დაცურება  
მეორეზე.

მაშასადამე, გრუნტის მოცემულ წერტილში ზღვრული წონასწორობის  
პირობა იქნება  $\tau_\alpha \leq f(\sigma_\alpha + P_e)$  ან  $\tau_\alpha / (\sigma_\alpha + P_e) \leq f$ . მეორეს მხრივ (ნახ. 3.18).

რადგან მოცემულ  $P_0$  წერტილზე შეიძლება მრავალი "მოედნები"  
გავატაროთ, ამიტომ საჭიროა მოიძებნოს ყველაზე არახელსაყრელი მოედანი,  
რომლისთვისაც იარსებებს გადახრის კუთხის მაქსიმალური მნიშვნელობა  
 $\theta_{\max}$ . მაშინ  $\operatorname{tg} \theta_{\max} \leq f$ .

ძვრის დიაგრამის (ნახ. 3.19) თანახმად, გადახრის კუთხის მნიშვნელობა  
იქნება მაქსიმალური, როდესაც  $OE$  მომვლელი იქნება ზღვრული დაძაბუ-  
ლობის წრის მხები. ხოლო ფხვიერი ქანების ზღვრული წონასწორობის  
განტოლება იქნება  $\sigma_2 / \sigma_1 = \operatorname{tg}^2 (45^\circ \mp \phi / 2)$ , სადაც  $\sigma_1$  და  $\sigma_2$  მთავარი ძაბვებია.

ფრჩხილებში ნიშანი მინუსი შეესაბამება ე.წ. აქტიურ წნევებს, ხოლო პლუსი – ფხვიერი ქანების წინააღმდეგობას.

განვიხილოთ ერთგვაროვანი ფხვიერი (მშრალი) გრუნტის სტატიკური მდგრადობის ამოცანა, როცა მასზე საკუთარი წონის  $\bar{F}$  ძალის გარდა მოქმედებენ დამატებითი დატვირთვები: სეისმური ძალა  $\bar{P}$ , და აფეთქების წნევის ძალა  $\bar{P}$ . გრუნტი ხასიათდება ბუნებრივი ქანობის  $\rho$  კუთხით,  $K$  შეჭიდულობით და მოცულობითი  $\gamma$  წონით.

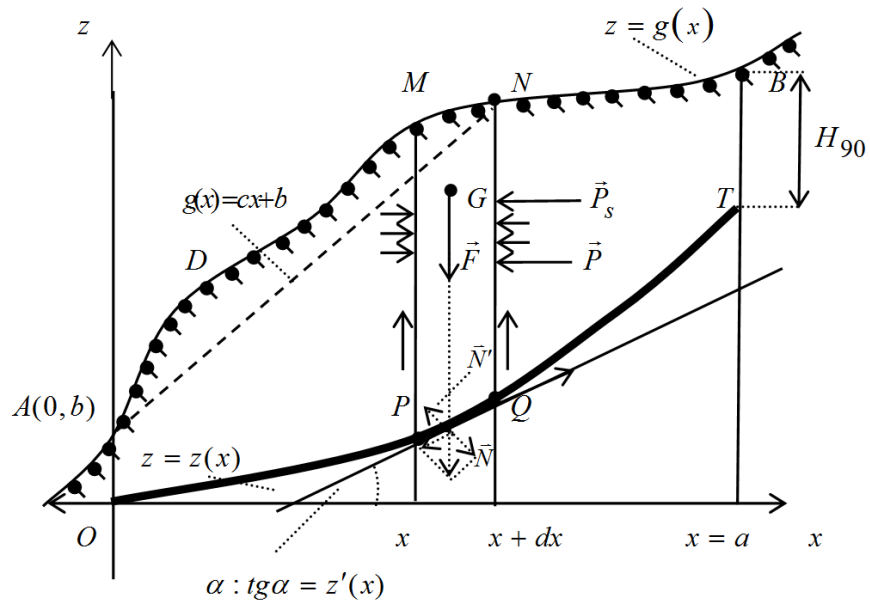
3.20 ნახაზზე მოყვანილია ფერდოს მდგრადობის და ჩამონაქცევის საშიში დაცურების ზედაპირის საანგარიშო სქემა. აქ  $AMB: z = g(x)$ ,  $0 \leq x \leq a$ , მოცემული უბან-უბან გლუვი წირია,  $OPT: z = z(x)$ ,  $0 \leq x \leq a$ , ჩამონაქცევი პრიზმის (მასის) დაცურების ზედაპირის ამსახველი წირია, რომლის გამოკვლევა შესრულებულია ნაშრომში.

დავუშვათ  $z = z(x)$  წირი გლუვია, ე.ი. მას ყოველ წერტილში გააჩნია უწყვეტად ცვალებადი მხები. უსასრულო მცირე  $[x, x + dx]$  მონაკვეთზე გამოვყოთ ჩამონაქცევი ტანის  $PMNQ$  ელემენტარული ბლოკი.  $PMNQ$  ფიგურის ფართობი  $S$ ,  $z = z(x)$  მრუდის  $L = L(PQ)$  რკალის სიგრძე და ბლოკის სიმძიმის ძალის სიდიდე  $F$  უმცირესი რიგის უსასრულო მცირე სიდიდის სიზუსტით, ვიდრე  $dx$  გამოითვლება ფორმულებით:

$$S(PMNQ) = |PM|dx = [g(x) - z(x)]dx, \quad (3.42)$$

$$L(PQ) = \sqrt{1 + z'^2(x)}dx, \quad (3.43)$$

$$F = \gamma \cdot 1 \cdot S = \gamma [g(x) - z(x)]dx. \quad (3.44)$$



ნახ. 3.20.

ელემენტარულ ბლოკზე მოვდოთ ჰორიზონტული  $\vec{P}_s$  და  $\vec{P}$  ძალები (ნახ. 3.20), რომელთა სიდიდეები შეიძლება შევავსოთ (3.44) და (3.45) ფორმულებით:

$$P_s = C_s \cdot F, \quad (3.45)$$

$$P = 0.3 \frac{Q^{1/2}}{R^{3/2}} \sqrt{\frac{UE^5}{\gamma}} = mF, \quad (3.46)$$

სადაც  $C_s$  - არის სეისმურობის კოეფიციენტი (ქანების მდგომარეობისა და ზონების მიხედვით იცვლება 0.03-0.27 ფარგლებში);

$Q$  - ერთდროულად აფეთქებული მუხტის მასა, კგ;

$R$  - მანძილი აფეთქების ცენტრიდან განსახილველ წერტილამდე, მ;

$E$  - იუნგის მოდული, პა;

$U$  - აფეთქების ხვედრითი ენერგია, ჯ/კგ;

$\gamma$  - ქანის სიმკვრივე, ტ/მ<sup>3</sup>;

$m$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი.

ფერდობის მდგრადობაზე გაანგარიშებისას, როგორც ხშირად გვხვდება, არსებულ ლიტერატურაში გავრცელებულია ე.წ. ძვრის წრიული



ცილინდრული ზედაპირების მეთოდი, რომლის თანახმად ძვრის ზედაპირი წარმოდგენილია წრის რკალის სახით, რაც გლობალურად საზოგადოდ ნაკლებადაა მოსალოდნელი. ამავე დროს ლოკალურად, ე.ი. ძვრის  $\ell: z = z(x)$ ,  $0 \leq x \leq a$ , წირის (ნახ. 3.21) ფიქსირებული  $P_o(x_o, z(x_o))$  წერტილის რაიმე საკმარისად მცირე მიდამოში მაღალი რიგის უსასრულო მცირე სიდიდის სიზუსტით (თუ წირს გააჩნია უწყვეტად ცვალებადი სიმრუდე) ეს წირი წარმოადგენს მისი სიმრუდის წრეწირს, რომლის ცენტრი  $C(x_c, z_c)$  და  $R$  რადიუსი მოიცემა (3.46) ფორმულით:

$$x_c = x_o - \frac{z'(x_o)[1+z'^2(x_o)]}{z''(x_o)}, \quad z_c = z(x_o) + \frac{1+z'^2(x_o)}{z''(x_o)}, \quad R = \frac{[1+z'^2(x_o)]^{3/2}}{|z''(x_o)|}.$$

ახლა ძვრის მარაგის კოეფიციენტზე გავაკეთოთ რამდენიმე შენიშვნა:

**შენიშვნა 1.** ქანობების მდგრადობის ანალიზის დროს პროექტირებისას გათვალისწინებული ბევრი ფაქტორების მიღება შეუძლებელია. ამიტომ კონსტრუქციის მისაღებათ აუცილებელია რისკების ხარისხის შეფასება. ამ მოთხოვნილებას პასუხობს მარაგის კოეფიციენტი. მან უნდა გაითვალისწინოს არამარტო პროექტირებისას საწყისი მონაცემების განუსაზღვრელობები. იმ შემთხვევებში, როცა ნგრევის შედეგები უმნიშვნელოა, შეიძლება უფრო მეტი რისკის გაწევა ან მარაგის კოეფიციენტის შემცირება.

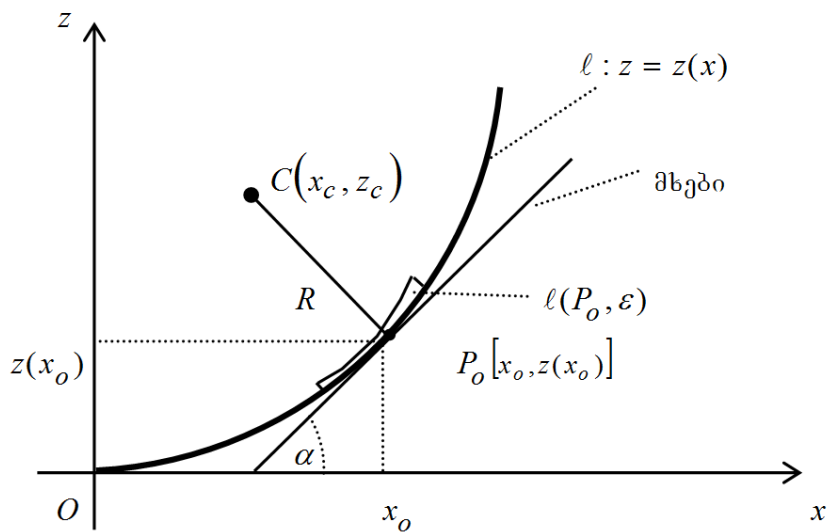
**შენიშვნა 2.** ავარიის პოტენციური საფრთხე დამოკიდებულია სხვადასხვა ფაქტორებზე. საცხოვრებელი მშენებლობის ზემოთ ან მის სიახლოვეს განლაგებული ფერდობებზე ღია სამუშაოები წარმოადგენს უფრო დიდ საფრთხეს, ვიდრე მაღალი მოშორებულ რაიონში ანალოგიური სამუშაოები. ხშირად უფრო მეტად პოტენციურად საშიში ნგრევის სახეობები დაკავშირებულია გრუნტებთან, რომლებიც მიდრეკილნი არიან ენერჯის მოულოდნელ წარმოქმნასთან წინასწარ საფრთხის მომცველი ნიშნების გარეშე. ეს მართებულია გაფართოების თვისებების მქონე გრუნტების მიმართ, და რომელთაც გააჩნიათ ნარჩენ და პიკური სიმტკიცეთა ფარდობის მცირე სიდიდე.

**შენიშვნა 3.** ურღვევი და ერთგვაროვანი გრუნტებით შემდგარი მიწის ქანობებისთვის, როცა სიმტკიცის პარამეტრები მიღებულია კარგი ლაბორა-

ტორიული ცდების საფუძველზე და შესრულებულია ფორული წნევის დაწვრილებითო პროგნოზი, როგორც წესი მარაგის კოეფიციენტი მიიღება ყველაზე ცოტა 1.5-ის ტოლი. დაბზარული თიხების და არაერთგვაროვანი გრუნტების არსებობის შემთხვევაში როგორც წესი წარმოიშობა დიდი განუსაზღვრელობა და აუცილებელია დიდი სიფრთხილე.

ახლა საშიში დაცურების წირის მოცემულ მიდამოში შევადართო მარაგის კოეფიციენტი.  $l$  წირის მცირე  $l(P_o, \varepsilon) = l \cap \{P \in R^2 : |P - P_o| < \varepsilon\}$  უბანზე ჩვენ შეგვიძლია ფერდოს ჩამონაქცევისათვის ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტი შევაფასოთ შემდეგი ფარდობით:

$$K_{l(P_o, \varepsilon)}^Z = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} F_{i, \varepsilon}^- \cdot r_{i, \varepsilon}^-}{\sum_{i=1}^{m_2} F_{i, \varepsilon}^+ \cdot r_{i, \varepsilon}^+}, \quad (3.47)$$



ნახ. 3.21.

სადაც  $F_{i, \varepsilon}^-$  და  $r_{i, \varepsilon}^-$ , როცა  $i = 1, \dots, m_1$  წარმოადგენენ შესაბამისად  $l(P_o, \varepsilon)$  უბანზე მოქმედ დამჭერ ძალას და მის მხარს  $C(x_c, z_c)$  წერტილის მიმართ; ანალოგიურად,  $F_{i, \varepsilon}^+$  და  $r_{i, \varepsilon}^+$ , როცა  $i = 1, \dots, m_2$  წარმოადგენენ შესაბამისად ამ უბანზე მოქმედ მძვრელ ძალას და მის მხარს  $C(x_c, z_c)$  წერტილის მიმართ, ე.ი. ეს კოეფიციენტი წარმოადგენს  $l(P_o, \varepsilon)$  უბანზე დამჭერი ძალების

$C(x_c, z_c)$  წერტილის მიმართ მომენტების ალგებრული ჯამის შეფარდებას მძვრელი ძალების მომენტების ალგებრულ ჯამთან იმავე წერტილის მიმართ, იგივე უბანზე.

როგორც ცნობილია  $K_{\ell(P_o, \varepsilon)}^{ZV}$  მიღებული მნიშვნელობებიდან მხოლოდ მინიმალური წარმოადგენს ფერდოს სტატიკური მდგრადობის ნამდვილ საზომს განხილულ უბანზე და მდგრადობის შემთხვევაში

$$K_{\ell(P_o, \varepsilon)}^{ZV} \geq 1. \quad (3.48)$$

თუ (3.47)-ში გადავალთ ზღვარზე, როდესაც  $\varepsilon \rightarrow 0$ , მაშინ (3.48) - ის ძალით მივიღებთ ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტს უშუალოდ  $P_0$  წერტილში, ე.ი.

$$K^{ZV}(P_0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{m_1} F_{i,\varepsilon}^- \cdot r_{i,\varepsilon}^- / \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{m_2} F_{i,\varepsilon}^+ \cdot r_{i,\varepsilon}^+ \geq 1. \quad (3.49)$$

თუ ჩვენს მიერ განხილული ფიზიკო-მექანიკური თვისებების მქონე ფერდოს შემთხვევაში  $P_0$  წერტილის შესაბამისი  $PMNQ$  ელემენტარულ ბლოკზე მოქმედი მძვრელ და დამჭერ ძალებს დავაგეგმილებთ  $\ell(P_o, \varepsilon)$  რკალის  $P_0$  წერტილზე გავლებულ მხებზე (ნახ. 3.20 და 3.21), გვექნება:

$$\sum_{i=1}^{m_1} F_{i,\varepsilon}^- \cdot r_{i,\varepsilon}^- = R \left[ \gamma \frac{g(x_0) - z(x_0)}{\sqrt{1 + z'^2(x_0)}} + K \sqrt{1 + z'^2(x_0)} \right] dx, \quad (3.50)$$

$$\sum_{i=1}^{m_2} F_{i,\varepsilon}^+ \cdot r_{i,\varepsilon}^+ = R \gamma \left[ g(x_0) \frac{z'(x_0)}{\sqrt{1 + z'^2(x_0)}} + (m + C_s) \frac{g(x_0) - z(x_0)}{\sqrt{1 + z'^2(x_0)}} K \right] dx, \quad (3.51)$$

(3.49), (3.50) და (3.51)-დან, თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ  $1/\sqrt{1 + z'^2(x_0)} = \cos \alpha$ ,  $z'(x_0)/\sqrt{1 + z'^2(x_0)} = \sin \alpha$ , და, როცა  $\varepsilon \rightarrow 0$ , მაშინ  $dx \rightarrow 0$ , გარკვეული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$K^{ZV}(P_0) = \frac{f + \frac{1}{\gamma} \frac{K(h)}{h} (1 + tg^2 \alpha)}{tg \alpha + m + C_s}, \quad (3.52)$$

სადაც  $h = g(x_0) - z(x_0)$ .

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნებს

$$S = tg \alpha + S_0, \quad S_0 = m + C_s,$$

$$\lambda(h) = \frac{1}{\gamma} \frac{K(h)}{h}, \quad (3.53)$$

მაშინ (3.52) ტოლობა მიიღებს სახეს:

$$K^{zv}(P_0): \tau(S) = \frac{f + \lambda(h)[1 + (S - S_0)^2]}{S}. \quad (3.54)$$

რადგან იგულისხმება, რომ  $\alpha$  კუთხე იცვლება  $[0, \pi/2[$  ინტერვალში, ამიტომ (3.53)-ის ძალით  $S$  სიდიდე იცვლება  $[S_0, +\infty[$  ინტერვალში. ახლა ვნახოთ, თუ რა მნიშვნელობებს ღებულობს  $\tau(S)$  ფუნქცია  $[S_0, +\infty[$  ინტერვალში.

იმის გათვალისწინებით, რომ

$$\tau(S) = \lambda(h) \cdot S + \frac{f + \lambda(h) + S_0^2 \lambda(h)}{S} - 2S_0 \cdot \lambda(h)$$

(3.55)

გვექნება

$$\tau'(S) = \lambda(h) - \frac{f + \lambda(h) + S_0^2 \lambda(h)}{S^2}, \quad S_0 \leq S < \infty$$

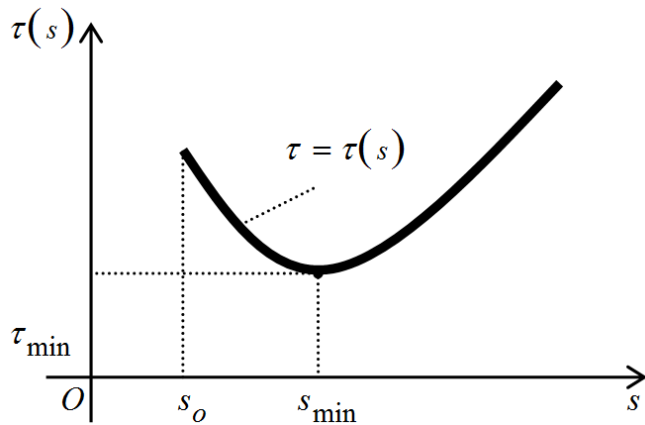
(3.56)

აქედან გამომდინარეობს, რომ  $\tau(S)$  ფუნქცია ღებულობს თავის მინიმუმს  $S = S_{\min}$  წერტილში, სადაც ანუ

$$S_{\min} = \sqrt{f / \lambda(h) + S_0^2 + 1},$$

(3.57)

თუ რასაკვირველია (3.57)-ით განსაზღვრული  $S_{\min} > S_0$ , რასაც ცხადია ადგილი აქვს (ნახ. 3.22).



ნახ. 3.22.

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას

$$K_0(h) = \frac{1}{\lambda(h)} = \gamma \frac{h}{K(h)},$$

(3.58)

მაშინ (3.57) ტოლობა (3.53)-ის გათვალისწინებით მიიღებს შემდეგ სახეს

$$S_{\min} = \sqrt{fK_0(h) + (m + C_s)^2 + 1}.$$

(3.59)

(3.55) და (3.59)-ეს ძალით ფუნქციის მინიმალური მნიშვნელობა ტოლია

$$\tau_{\min} = \tau(S_{\min}) = \frac{1}{K_0(h)} \sqrt{fK_0(h) + S_0^2 + 1} + \frac{f + \frac{1}{K_0(h)}(1 + S_0^2)}{\sqrt{fK_0(h) + S_0^2 + 1}} - 2 \frac{1}{K_0(h)} S_0. \quad (3.60)$$

ახლა (3.49)-ის შესაბამისად ცვლადის მიმართ განვიხილოთ შემდეგი უტოლობა:

$$\tau_{\min} = \tau(S_{\min}) \geq 1.$$

(3.61)

(3.61)-ე უტოლობა ახალი ცვლადის მიმართ მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\frac{f\omega + S_0^2 + 1 + f\omega + 1 + S_0^2}{\omega \sqrt{f\omega + S_0^2 + 1}} \geq 1 + 2 \frac{S_0}{\omega}$$

ანუ

$$\frac{2\sqrt{f\omega + S_0^2 + 1}}{\omega} \geq 1 + 2 \frac{S_0}{\omega},$$

(3.62)

რაც ტოლფასია  $\omega$ -ს მიმართ შემდეგი კვადრატული უტოლობის

$$\omega^2 + 4(S_0 - f)\omega - 4 \leq 0. \quad (3.63)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ  $\omega = K_0(h) \geq 0$ , (3.63) უტოლობიდან  $h$  ცვლადის მიმართ ვღებულობთ

$$K_0(h) \leq 2(f - S_0) + 2\sqrt{(f - S_0)^2 + 1},$$

ანუ (3.53) და (3.58)-ის გათვალისწინებით

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)} \leq \frac{2}{\gamma} \left( \sqrt{(f - m - C_5)^2 + 1} + f - m - C_5 \right).$$

(3.64)

**შენიშვნა.** აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ დამატებითი დატვირთვების (სეისმური და აფეთქების) არ არსებობისას ე.ი. როცა  $m = C_5 = 0$ , მაშინ (3.64) - დან მივიღებთ შედეგს, რომელიც ადასტურებს კვლევის უტყუარობას.

შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$n = \left[ \frac{2}{\gamma} \left( \sqrt{(f - m - C_5)^2 + 1} + f - m - C_5 \right) \right]^{-1},$$

მაშინ (3.64) უტოლობა გადაიწერება შემდეგი სახით

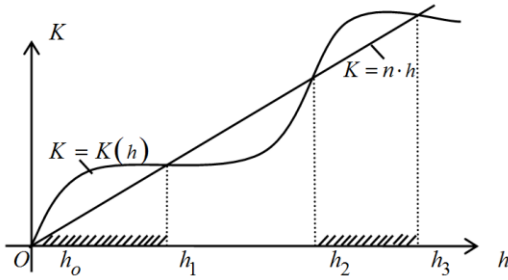
$$K(h) \geq n \cdot h.$$

(3.65)

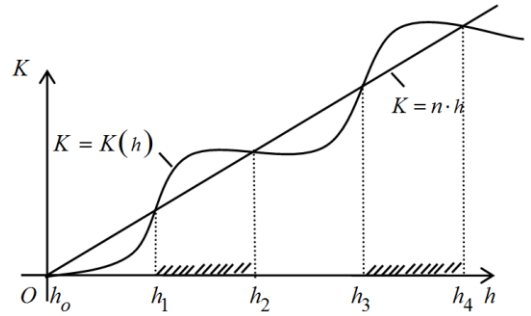
როგორც ვიცით  $K(0) = 0$ , ამიტომ (3.65) უტოლობის ამოხსნა გრაფიკულად მოიცემა დაშტრიხული ინტერვალებით (ნახ. 3.23) ან (ნახ. 3.24), სადაც  $h_0, h_1, h_2, \dots$  სიდიდეები წარმოადგენენ  $K(h) = n \cdot h$ . განტოლების ფესვებს.

ჩატარებული თეორიული კვლევების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ: (3.49), (3.52) და (3.61) -დან გამომდინარეობს, რომ თუ სიდიდე აკმაყოფილებს (3.65) უტოლობას, მაშინ ფერდოს ნებისმიერ  $P_0$  წერტილზე, რომელიც მისი ზედაპირიდან ვერტიკალური მიმართულებით დაშორებულია  $h$  სიდიდით, ე.ი. წერტილები, რომელთა კოორდინატებია  $(x_0, g(x_0) - h)$ , სადაც  $z = g(x_0)$  - ფერდოს ზედაპირის განტოლებაა (ნახ. 3.20) ვერ გაივლის დაცურების ზედაპირის ამსახველი ვერც ერთი წირი, რადგან ამ შემთხვევაში (3.65) უტოლობა სამართლიანია აღნიშნულ წერტილზე გამავალი ნებისმი-

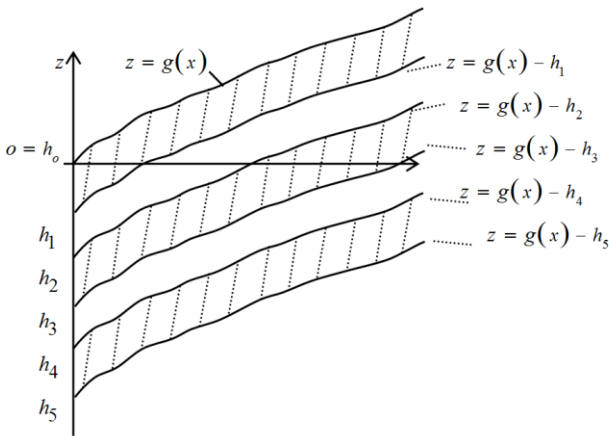
ერი  $z'(x) = \operatorname{tg} \alpha$  კუთხური კოეფიციენტის მქონე  $z = z(x)$  წირისათვის. აქედან გამომდინარე, 3.23 და 3.24 ნახაზების შესაბამისად, ფერდოს ის უბნები (ფენები), სადაც ადგილი აქვს მდგრადობას (ჩამოქცევისათვის არა საშიშ მივლენას) მოყვანილია (3.25) და (3.26) ნახაზებზე.



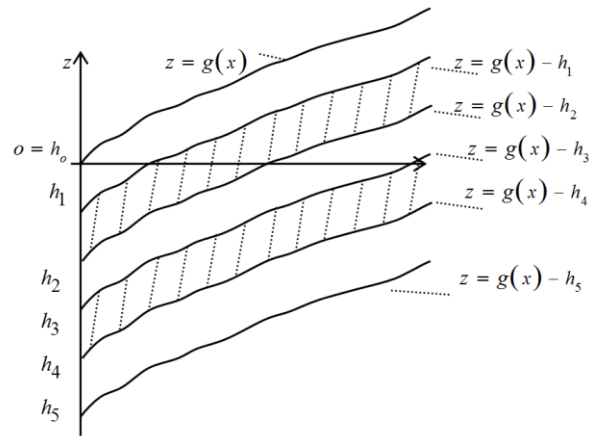
ნახ. 3.23



ნახ. 3.24



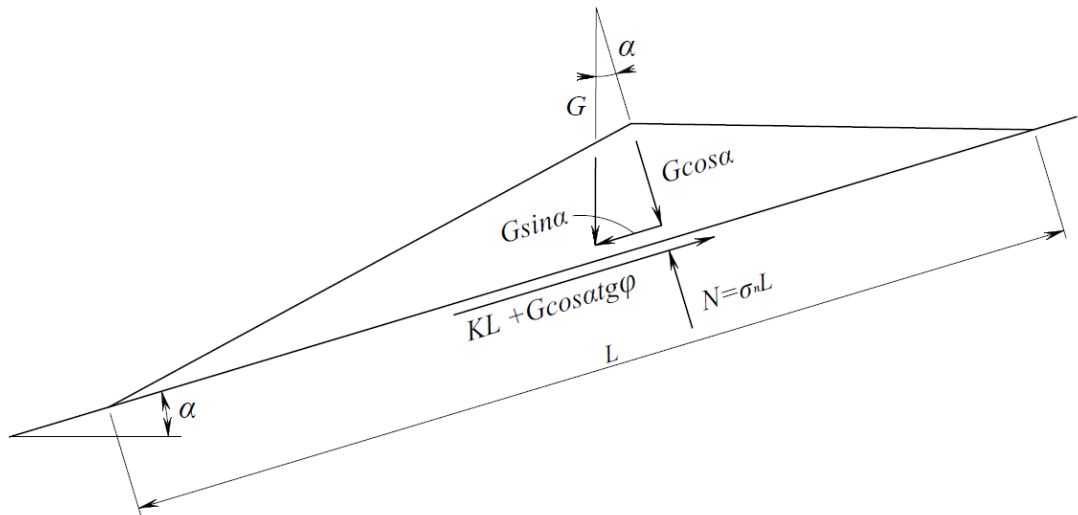
ნახ. 3.25



ნახ. 3.26

### 3.4. ძვრის ბრტყელი ზედაპირები

3.27 ნახაზზე ნაჩვენებია ფერდობზე ნაყარის ფუძეზე გამავალი ძვრის ბრტყელი სიბრტყე. სიბრტყეზე ძვრის წარმოშობა გამოწვეულია იმ მიზეზით, რომ ქანობის ბუნებრივი ზედაპირი არ გაიწმინდა სათანადოდ და ფუძეში შემორჩა სუსტი მასალის ფენა.



ნახ. 3.27. ძვრის სიბრტყეზე - მარტივი შემთხვევა

ძვრის ზედაპირზე მოქმედი შემკავებელი ძალა შეიძლება განისაზღვროს მორი-კულონის პირობით, შემდეგი განტოლებით:

$$S = K + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (3.66)$$

სადაც,  $S$  - ძვრის სიმტკიცე ან ძვრის წინაღობა;

$K$  - შეჭიდულობის ძალა;

$\sigma_n$  - ნორმალური ძაბვა ძვრის სიბრტყეზე;

$\phi$  - შიგა ხახუნის კუთხე.

უნდა აღინიშნოს, რომ  $K$  და  $\phi$  წარმოადგენენ ძვრის ზედაპირის გრუნტის სიმტკიცის პარამეტრებს.  $L$  სიგრძის და ერთეულოვანი სიგანის ძვრის ზედაპირის შემკავებელი ძალა ტოლია

$$KL + G \cos \alpha \operatorname{tg} \phi,$$

სადაც,  $G$  - ძვრის ზედაპირის ზემოთ გრუნტის წონა;

$\alpha$  - ბუნებრივი ქანობის კუთხე;

უნდა აღინიშნოს, რომ  $G \cos \alpha$  არის წონის ნორმალური მდგენელი ძვრის სიბრტყის მიმართ, ხოლო წონის  $G \sin \alpha$  მდგენელი წარმოადგენს დამძვრელ ძალას ძვრის ზედაპირის გასწვრივ. თუ მეწყერ-ჩამონაქცევის ზედაპირი წარმოადგენს სიბრტყეს, მაშინ ძვრაზე  $K_{\alpha}$  მარაგის კოეფიციენტი,

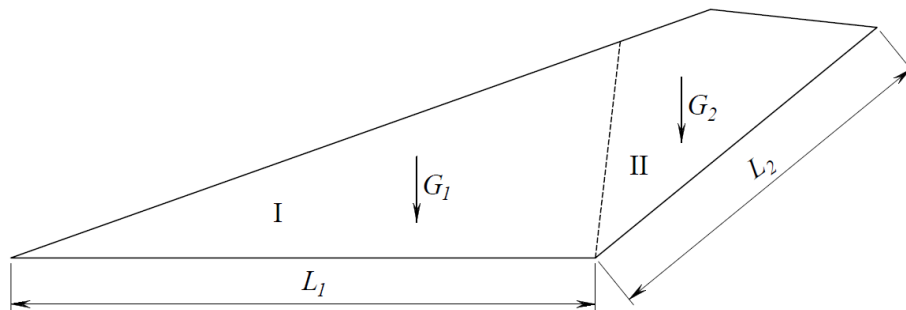


როგორც ცნობილია, განისაზღვრება შემკავებელ ძალის დამძვრელ ძალასთან ფარდობით:

$$K_{zv} = \frac{KL + G \cos \alpha \operatorname{tg} \phi}{G \sin \alpha} \quad (3.67)$$

თუ დაცურების ზედაპირი შედგება ორი ან მეტი სიბრტყისგან, ასეთი შემთხვევაში ძვრის კოეფიციენტის გამოთვლა მნიშვნელოვნად რთულდება.

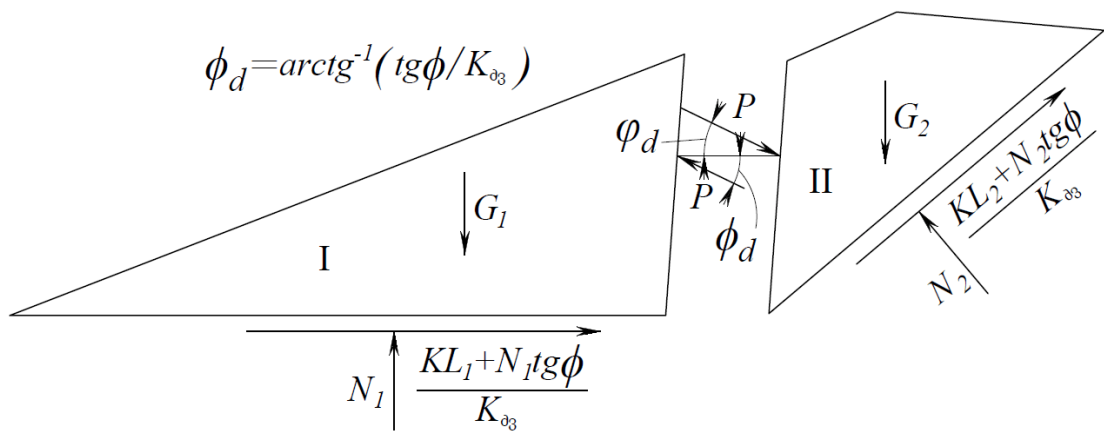
3.28 ნახაზზე ნაჩვენებია ორი სხვადასხვა სიბრტყისგან შემდგარი საშიში დაცურების ზედაპირი. ამ შემთხვევაში ჩამოშვავებული პრიზმა შეიძლება დავყოთ ორ ბლოკად. ყოველ სიბრტყეზე როგორც ნორმალური, ასევე მძვრელი ძალები დამოკიდებული არის ბლოკებს შორის ურთიერთქმედების ძალებზე და ისინი შეიძლება განისაზღვრონ მხოლოდ ბლოკების ერთიან განხილვისას. საანგარიშო სქემის შესადგენათ წარმოდგენით გავყოთ სხეული ორ I და II ბლოკად და მოვდოთ თითოეულ ბლოკზე მოქმედი ძალები. I ბლოკის წონა  $G_1$ -ით და ძვრის სიბრტყის სიგრძე  $L_1$ -ით, ხოლო II ბლოკს წონა  $G_2$ -ით და სიბრტყის სიგრძე  $L_2$ -ით ავღნიშნოთ.



ნახ. 3.28. სიბრტყეზე ძვრა - რთული შემთხვევა

3.29 ნახაზზე ნაჩვენებია დანაწევრებული I და II ბლოკების ელემენტების სქემა. დაცურების სიბრტყის გასწვრივ მოქმედი მძვრელი ძალა ტოლია ამ ორ ბლოკზე მოდებულ მარაგის ძვრის ზღვრული წინაღობა გაყოფილი მარაგის კოდეფიციენტზე. დანაწევრებულ ბლოკებზე მოდებულია ოთხი უცნობი ძალა:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $P$  და  $K_{\alpha}$ , სადაც,  $N_1$  და  $N_2$  - ძვრის სიბრტყის მიმართ შესაბამისად I და II ბლოკების ნორმალური ძალები;  $P$  - I და II ბლოკების შიგა

ძალა, შიგა ძალები მოდულით ტოლია და მიმართულია ურთიერთსაპირისპიროთ;  $K_{ა3}$  - ძვრის მარაგის კოეფიციენტი. წონასწორობის პირობებიდან გამომდინარე მივიღებთ ოთხ განტოლებას. თუ I და II ბლოკზე მოდებულ ძალებს დავაგეგმილებთ ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ მიმართულებებზე და მათ ალგებრულ ჯამს გავუტოლებთ ნულს, მივიღებთ ოთხ განტოლებას ოთხი უცნობით. რადგან ოთხი უცნობის არსებობის შემთხვევაში გვაქვს ოთხი განტოლება, შეიძლება განისაზღვროს საძიებელი ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტი.



ნახ. 3.29. ჩამოშვავებულ პრიზმის ცალკეულ ბლოკებზე მოდებული ძალების საიულუსტრაციო სქემა.

თუ შესუსტებული ზედაპირები უწყვეტია ან დაცურების სახიფათო სიბრტყეების განლაგება არაა მოცემული, აუცილებელია შესრულდეს შემოწმება სხვადასხვა ძვრის სიბრტყეებისთვის მანამდე, სანამ არ მოიძებნება მინიმალური მარაგის კოეფიციენტი.

### 3.5. მეწყერ-ჩამონაქცევის წრიულ-ცილინდრული დაცურების ზედაპირები

მკვლევართა უმეტესობა მეწყერ-ჩამონაქცევი პრიზმის დაცურების ზედაპირს განიხილავენ, როგორც წრიულ-ცილინდრულს. ჩამონაქცევი მასის ზედაპირი თუ წარმოადგენს წრიულ-ცილინდრულს, მაშინ ძვრის

მარაგის კოეფიციენტის მინიმალური მნიშვნელობის განსასაზღვრავათ, ე.ი. დაცურების ყველაზე საშიში ზედაპირის გამოსავლენათ საჭიროა აიგოს დიდი რაოდენობის წრეები. 3.30 ნახაზზე ნაჩვენებია მრავალ წრეთაგან ერთ-ერთი, რომლისთვისაც განისაზღვრება მარაგის კოეფიციენტი. სხვადასხვა მკვლევართა მიერ გამოყვანილი ეს მეთოდი ჩვენთვის საინტერესოა იმ თვალსაზრისით, რომ მოვახდინოთ ზემოთ ჩვენს მიერ მეთოდებით მიღებული შედეგების ანალიზი და მნიშვნელობათა შედარებები. ამ მეთოდით ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტის განსასაზღვრავათ ჩამოშვავებულ პრიზმას წრეებით ყოფენ  $n$  ნაწილად.  $i$ -ური ბლოკის წონაა  $G_i$ , დაცურების ზედაპირის სიგრძე –  $L_i$ , დახრის კუთხე –  $\theta_i$  და ნორმალური ძალა –  $N_i$ . მარაგის კოეფიციენტი შემკავებელი ძალების ჯამის მძვრელ ძალების ჯამზე ფარდობის ტოლია. მორი-კულონის პირობის თანახმად,  $i$ -ური ბლოკის შემკავებელი ძალა ტოლია:  $KL_i + N_i \operatorname{tg} \phi$ , რომელიც დამოკიდებულია ბლოკის ორივე წახნაგზე მოქმედ ძალებზე. ამოცანა სტატიკურად განუსაზღვრელია, თუ გამარტივებისთვის რაიმე დაშვება არ იქნება გამოყენებული. ძვრელი ძალა, რომელიც დაცურების ზედაპირზე წონის მდგენელს წარმოადგენს,  $G_i \sin \theta_i$ -ის ტოლია. მძვრელი ძალა არ არის დამოკიდებული ბლოკის ორივე წახნაგზე მოდებულ ძალების ურთიერთქმედებისგან, რადგან ერთ-ერთ წახნაგზე მოდებული ძალა შეესაბამება ძალას, რომელიც სიდიდით ტოლია და მიმართულია საწინააღმდეგოდ მეორე წახნაგისკენ, რის გამოც მათი მოქმედება ურთიერთგაწონასწორებულია. ამ შემთხვევაში ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტი შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად

$$K_{zv} = \frac{\sum_{i=1}^n (KL_i + N_i \operatorname{tg} \phi)}{\sum_{i=1}^n (G_i \sin \theta_i)} . \quad (3.68)$$

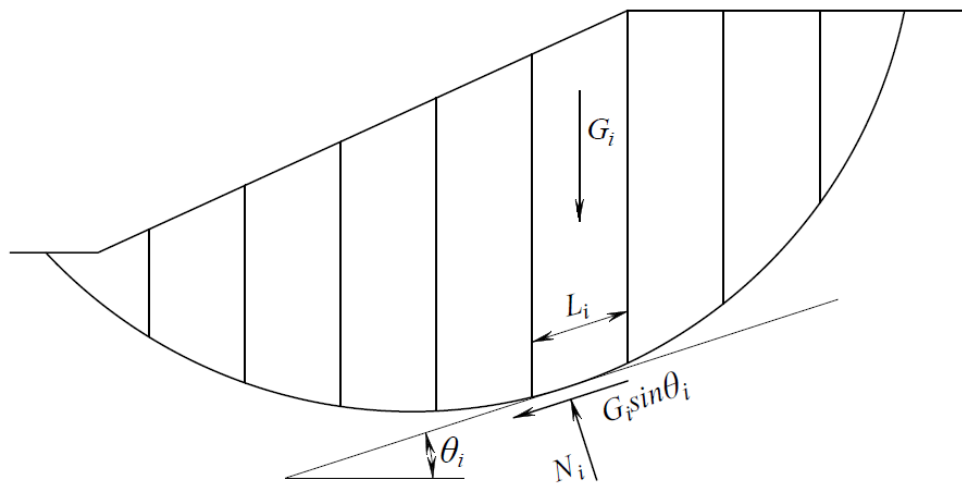
წრიულცილინდრული დაცურების ზედაპირის მარაგის კოეფიციენტი შეიძლება განისაზღვროს როგორც ორ მომენტს შორის ფარდობა (3.47). იმის გათვალისწინებით, რომ (3.68) განტოლებაში როგორც მრიცხველი, ისე

მნიშვნელი შეიძლება გამრავლდეს ერთიდაიგივე სამომენტო მხარზე, ჩვენს შემთხვევაში (3.48)-ით განსაზღვრულ  $R$ -ზე, რომელიც წარმოადგენს წრის სიმრუდის რადიუსს. თუ დაცურების ზედაპირი წარმოადგენს წრიულ ცილინდრულს, მაშინ არ არსებობს არანაირი განსხვავება გამოყენებული იქნება ძალების ფარდობა თუ მომენტების. ფელენიუსის მეთოდით წარმოდგენილია, რომ ბლოკის ორივე წახნაგზე მოქმედი ძალები დაცურების ზედაპირის პარალელურია ბლოკის ძირში, ამიტომ ისინი არ ზემოქმედებენ მათზე მოქმედ ნორმალურ ძალაზე, ანუ

$$N_i = G_i \cos \theta_i. \quad (3.69)$$

შედეგად, (3.68) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს

$$K_{ZV} = \frac{\sum_{i=1}^n (KL_i + G_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \phi)}{\sum_{i=1}^n (G_i \sin \theta_i)}. \quad (3.70)$$



ნახ. 3.30. მეწყერ-ჩამონაქცევის საშიში დაცურების წრიულცილინდრული ზედაპირი

### 3.6. სიბრტყეზე ძვრაზე მდგრადობის გაანგარიშების

#### გამარტივებული მეთოდები

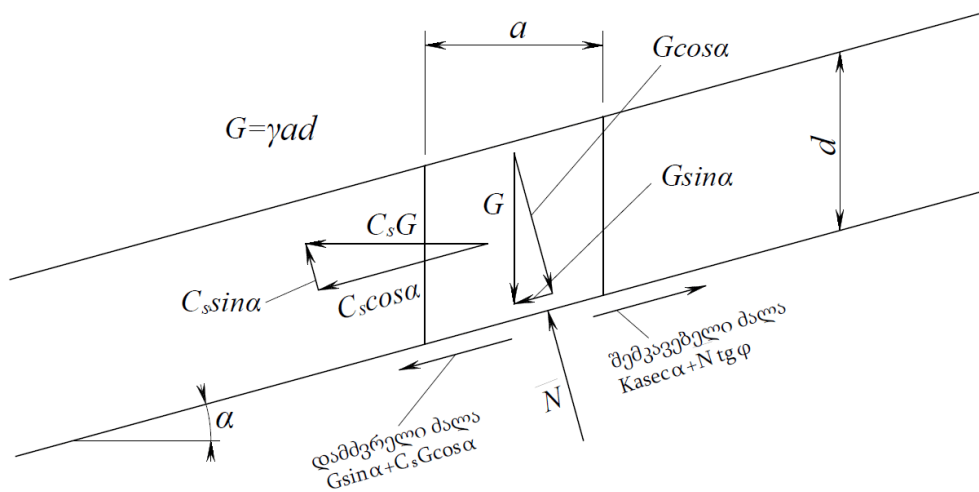
ამ პარაგრაფში მოყვანილია ძვრის ბრტყელი ზედაპირის ქანობებში ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტის განსაზღვრის რამდენიმე მარტივი განტოლება. განვიხილოთ მხოლოდ სამი მარტივი შემთხვევა: 1) უსასრულო ქანობი ძვრის ზედაპირით, რომელიც ფერდოს ზედაპირის პარალელურია; 2)

სამკუთხა პროფილის სხეული, რომელსაც გააჩნია ერთადერთი ძვრის ზედაპირი; 3) ტრაპეციოდალური ფორმის სხეული ძვრის ორი ზედაპირით .

3.31 ნახაზზე გამოსახულია უსასრულო ფერდო კლდის ზედაპირის საგებით, რომელიც ჰორიზონტისადმი  $\alpha$  კუთხითაა დახრილი. ფედროს ქანობი ითვლება უსასრულოდ, რადგან მისი სიგრძე ბევრად აღემატება გრუნტის  $d$  სიღრმეს. თუ გამოვყოფთ  $a$  სიგანის ელემენტს, მაშინ მის ვერტიკალურ წახნაგებზე ორივე მხრიდან მოქმედი ძალები ერთნაირია, რადგან უსასრულო ქანიში ყოველი სიბრტყე ითვლება იდენტურად. იმის გამო, რომ აღნიშნული გვერდითი ძალები მოდულის ტოლია და მიმართულია ურთიერთსაპირისპიროდ, ისინი ერთმანეთს აბათილებენ, ამიტომ განხილვას ექვემდებარება მხოლოდ  $G$  წონა და სეისმური ძალა  $C_s G$ . ლიტერატურაში არსებობს სეისმურად აქტიურ ზონებად დაყოფილი რუკები. მოცემულია თითოეული ზონის სეისმურობის კოეფიციენტი. მათ განსაზღვრისთვის სარგებლობენ ფორმულით, რომელიც ეფუძვნება იმას, რომ ეპიცენტრიდან საშუალო დაშორება 24 კმ-ს შეადგენს. ამ ნაშრომის მიხედვით სეისმურობის კოეფიციენტი  $C_s$  განისაზღვრება ფორმულით:

$$C_s = \frac{\lg^{-1}[0.267 + (mm-1)0.308]}{980} \quad (3.71)$$

სადაც  $m$  აღნიშნავს მოდიფიცირებულ შკალაზე ინტენსივობას.



ნახ. 3.31. უსასრულო ფერდოს სქემა

წრიულცილინდრული ხასიათის ჩამონგრევასთან განსხვავებით მხედველობაში მიიღება სეისმური დატვირთვის ზემოქმედება დაცურების ზედაპირის ნორმალურ ძალაზე, და შესაბამისად ძვრის წინააღმდეგობაზე. ყველა ქვემოთ მოყვანილი დასკვნები დაეფუძვნება მხოლოდ ეფექტური ძაბვების ანალიზს. ეს განტოლებები ასევე შეიძლება გამოყენებული იქნას სრული ძაბვების ანალიზის დროს სიმტკიცის შესაბამისი პარამეტრებით უბრალო შეცვლით.

მარაგის კოეფიციენტი განისაზღვრება დაცურების ზედაპირის გასწვრივ ძვრაზე გრუნტის სიმტკიცით უზრუნველყოფილი შემკავებელი ძალების ფარდობა ჩამოქცევის პრიზმის წონასთან დაკავშირებულ დამძვრელ ძალებთან. შემკავებელი ძალა შედგება ორი ნაწილისგან. ერთი მათგანი განისაზღვრება შეჭიდულობით და ტოლია  $\bar{c} a \sec \alpha$ , ხოლო მეორე - ხახუნით და ტოლია  $\bar{N} \operatorname{tg} \varphi$ , სადაც  $\bar{N}$  - ძვრის სიბრტყის მიმართ ნორმალური ეფექტური ძალაა.  $r_u$  ფორული წნევის კოეფიციენტის გათვალისწინებით გვაქვს

$$\bar{N} = G[(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha]. \quad (3.72)$$

დამძვრელი ძალა ყოველთვის წონის და სეისმური დატვირთვის მდგენელის ტოლია და პარალელურია დაცურების ზედაპირის ანუ  $G \sin \alpha + C_s G \cos \alpha$ , დამოუკიდებლად იმისა, არსებობს ფილტრაცია თუ არა. შესაბამისად, მარაგის კოეფიციენტი შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$K_z = \frac{\bar{K} a \sec \alpha + G[(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi}{G(\sin \alpha + C_s \cos \alpha)}. \quad (3.73)$$

სადაც გამოყოფილი  $a$  სიგანის ელემენტის  $G$  წონა შვეცვალთ  $G = \gamma a d$  სიდიდით.  $\gamma$  - ჩამოშვავებული პრიზმის გრუნტის კუთრი წონაა. მივიღებთ

$$K_z = \frac{(\bar{K} / \gamma d) \sec \alpha + G[(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi}{G(\sin \alpha + C_s \cos \alpha)}. \quad (3.74)$$

(3.74) განტოლება გამოიყენება შეჭიდულობის და შიდა ხახუნის კუთხის მქონე უსასრულო ქანობისთვის. მარაგის კოეფიციენტი მცირდება  $d$ -ს

გაზრდით, ამიტომ ყველაზე კრიტიკული სიბრტყე დაემთხვევა კლდის ზედაპირს.

შეჭიდულობის ( $K=0$ ) არარსებობის დროს (3.79) განტოლებიდან გვაქვს

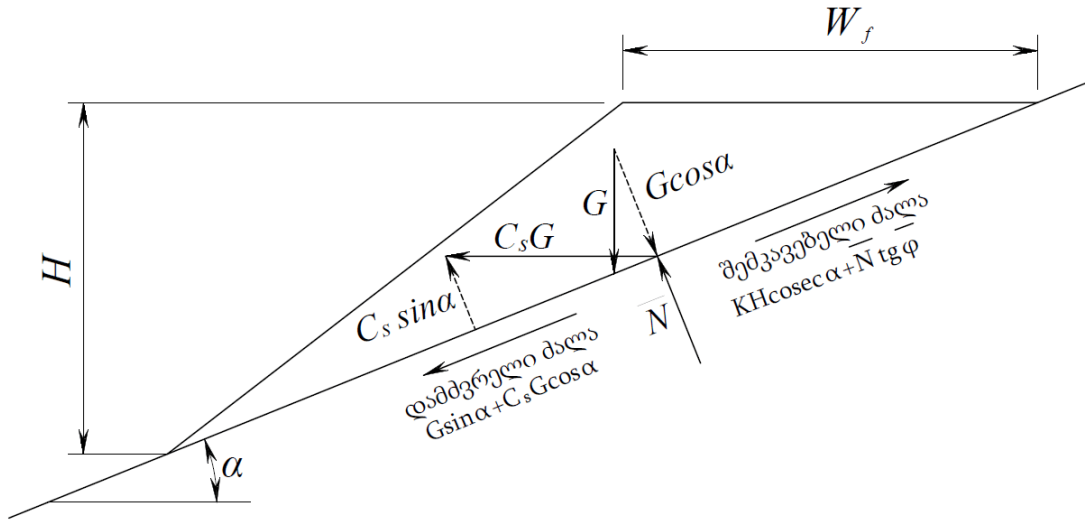
$$K_{zv} = \frac{[(1-r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi}{\sin \alpha + C_s \cos \alpha}. \quad (3.75)$$

(3.75) განტოლება მიუთითებს იმაზე, რომ შეჭიდულობის არმქონე მასალის მარაგის კოეფიციენტი არაა დამოკიდებული  $d$ -ზე. ამიტომ ქანობის პარალელური ნებისმიერი სიბრტყე კრიტიკულია და ხასიათდება ერთი და იგივე მარაგის კოეფიციენტის სიდიდით. ძვრა წარმოიშვება ქანობის ზედაპირიდან, რომლიდანაც გრუნტის ნაწილაკები ქვევით იწყებენ დაგორებას. თუ არ არსებობს სეისმური დატვირთვა, (3.75) განტოლება შეიძლება გამარტივდეს:

$$K_{zv} = \frac{(1-r_u) \operatorname{tg} \bar{\varphi}}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (3.76)$$

### 3.7. სამკუთხა განივი კვეთის მქონე ნაყარი

3.32 ნახაზზე გამოსახულია დახრილ ზედაპირზე სამკუთხა პროფილის ნაყარი. ვარაუდობენ, რომ ზვრის ზედაპირი გაივლის ნაყარის ძირზე. ასეთი პირობების მსგავს მაგალითი არის ღია დამუშავების ნაყარი, რომელთა გრუნტის ბუნებრივი ზედაპირი სათანადოდ არაა გაწმენდილი და ნაყარის ძირში არსებობს სუსტი ფენები. ვერტიკალურად მოქმედ წონასთან ერთად დამატებით მოდებულია ჰორიზონტალური სეისმური ძალა, რომელიც  $C_s G$ -ის ტოლია.



ნახ. 3.32. სამკუთხა ფორმის ნაყარის სიბრტყეზე ძვრა

(3.73) განტოლების ანალოგიურად უსასრულო ქანობისთვის იმის გარდა, რომ ძვრის სიბრტყის სიგრძე შეადგენს  $H \operatorname{cosec} \alpha$  მაგივრად  $a \sec \alpha$ , მარაგის კოეფიციენტი ტოლია:

$$K_{zv} = \frac{\bar{K}H \operatorname{cosec} \alpha + G[(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \bar{\varphi}}{G(\sin \alpha + C_s \cos \alpha)}, \quad (3.77)$$

ხოლო

$$G = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\sin \alpha - \sin \beta), \quad (3.78)$$

სადაც,  $\gamma$  - გრუნტის კუთრი წონა;

$\beta$  - ნაყარის ქანობის კუთხე.

G-ს (3.83) განტოლებიდან (3.82) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ

$$K_{zv} = \frac{2 \sin \beta \operatorname{cosec}(\beta - \alpha) (\bar{K} / \gamma H) + [(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \bar{\varphi}}{\sin \alpha + C_s \cos \alpha}. \quad (3.79)$$

აღსანიშნავია, რომ მარაგის კოეფიციენტის განსაზღვრისთვის  $K$ ,  $\gamma$  და  $H$  შეიძლება დავაჯგუფოთ ერთი პარამეტრის სახით. თუ  $H$  სიმაღლის მაგივრად მოცემულია ნაყარის სიგანე  $G_f$ , მაშინ მივიღებთ

$$K_{zv} = \frac{\bar{K} W_f \sin \beta / \sin(\beta - \alpha) + G[(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \bar{\varphi}}{G(\sin \alpha + C_s \cos \alpha)}. \quad (3.80)$$

სადაც,



$$G = \frac{1}{2} W_f^2 \sin \alpha \sin \beta / \sin(\beta - \alpha) . \quad (3.81)$$

(3.81) განტოლებიდან (3.80) განტოლებაში  $G$ -ს ჩასმით მივიღებთ

$$K_z = \frac{2 \operatorname{cosec} \alpha (\bar{K} / \gamma W_f) + [(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] \operatorname{tg} \bar{\varphi}}{\sin \alpha + C_s \cos \alpha} . \quad (3.82)$$

(3.82) განტოლება მიუთითებს იმაზე, რომ მარაგის კოეფიციენტი არაა დამოკიდებული ნაყარის ქანობის  $\beta$  დახრის კუთხეზე, თუ პროექტირებისას კრიტერიუმად მიღებულია ნაყარის სიგანე  $G_f$ , რადგან  $\beta$ -ს ცვლილებით ერთნაირი პროპორციით იცვლება როგორც დამჭერი, ასევე დამძვრელი ძალები.

### 3.8. ტრაპეცოიდალური განივი კვეთის ნაყარი მდგრადობაზე მარაგის კოეფიციენტი

3.33 ნახაზზე გამოსახულია ტრაპეცოიდალურ პროფილის ნაყარზე მოქმედი ძალები. ასეთი სახის პროფილს ხშირად ღებულობს ღია დამუშავებისას წარმოქმნილი ნაყარი. როცა დამუშავება მიმდინარეობს ძალიან დახრილ ფერდობზე, ცარიელ ქანებს არ შლიან, ყრიან ქვევით და დაზვინება იზრდება. იმის მაგივრად ის შეიძლება გამოყენებული იყოს დამუშავებული კალთის დასაწყობად, ხოლო ნარჩენებს განალაგებენ ძველ ნამუშევარში, სადაც ფუძის ზედაპირი ძალიან დამრეცილია. ნაყარის ქვეშ ფაქტიური გრუნტის ზედაპირი შეიძლება უსწორმასწორო იყოს, მაგრამ გაანგარიშების მიზნით ხდება ჰორიზონტალური წირის და ჰორიზონტთან  $\alpha$  კუთხით დახრილი წირის აპროქსიმაცია. გრუნტის ბუნებრივი ზედაპირის ჩამომლის მიმართ მარაგის კოეფიციენტის განსასაზღვრავათ ნაყარს პირობითად ყოფენ ორ ბლოკად. ორ ბლოკს შორის ურთიერთქმედების შიგა  $P$  ძალა ჰორიზონტალურია და დამძვრელ ძალას გააჩნია მარაგის კოეფიციენტი  $K_{ფ}$ . ოთხი  $P$ ,  $K_{ფ}$ ,  $N_1$  და  $N_2$  უცნობის გამოსათვლელად, სტატიკის პირობებიდან გამომდინარე, შეიძლება შევადგინოთ ოთხი განტოლება (ორ-ორი ყოველი ბლოკისთვის),

სადაც  $N_1$  და  $N_2$  ძვრის სიბრტყის მიმართ ეფექტური ნორმალური ძალებია. დადგენილია, რომ  $P$ -ს ჰორიზონტალურ მიმართულებით დაშვებას ან ორ ბლოკს შორის ხახუნის უარყოფას ყოველთვის მივყავართ უფრო მცირე მარაგის კოეფიციენტამდე.

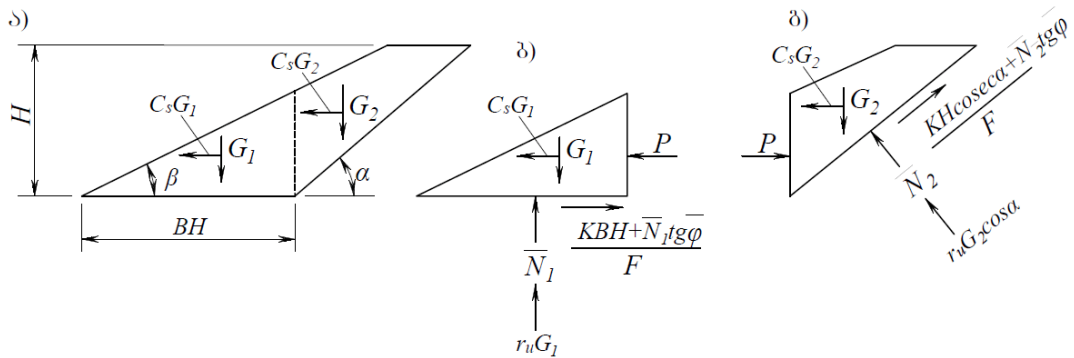
ყოველი ბლოკის ძალთა წონასწორობის პირობიდან, როგორც 3.33.ბ ნახაზზეა გამოსახული, გვაქვს:

$$\bar{N} = (1 - r_u)G_1; \quad (3.83)$$

$$P + C_s G_1 = (\bar{K}BH + \bar{N}_1 \operatorname{tg} \bar{\varphi}) / K_{Zv}, \quad (3.84)$$

სადაც,  $G_1$  - ქვედა ბლოკის წონა;

$B$  - ფუძის სიგანის და სიმაღლის ფარდობა.



ნახ. 3.33. ტრაპეციოიდალური ფორმის ნაყარის ძვრა სიბრტყეებზე:

ა - ორი ბლოკი; ბ - ქვედა ბლოკი; გ - ზედა ბლოკი.

(3.83) განტოლების (3.84) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ

$$P = [\bar{K}BH + (1 + r_u)G_1 \operatorname{tg} \bar{\varphi}] / K_{Zv} - C_s G_1. \quad (3.85)$$

ძალთა წონასწორობის პირობა ზედა ბლოკისთვის გვაძლევს

$$\bar{N}_2 = P \sin \alpha + (1 - r_u)G_2 \cos \alpha - C_s G_2 \sin \alpha, \quad (3.86)$$

$$G_2 \sin \alpha + C_s G_2 \cos \alpha = P \cos \alpha + (\bar{K}H \operatorname{cosec} \alpha + \bar{N}_2 \operatorname{tg} \bar{\varphi}) / K_{Zv}, \quad (3.87)$$

სადაც,  $G_2$  - ზედა ბლოკის წონა.

(3.90) და (3.91) განტოლების (3.92) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ კვადრატულ განტოლებას, რომელიც შეიძლება ამოიხსნას მარაგის კოეფიციენტის მიმართ

$$a_1 K_{Zv}^2 + a_2 K_{Zv} + a_3 = 0, \quad (3.88)$$

სადაც

$$a_1 = a_4 \sin \alpha + C_s (a_4 + a_5) \cos \alpha ; \quad (3.89)$$

$$a_2 = -\left\{ \frac{\bar{K}}{\gamma H} (B \cos \alpha + \operatorname{cosec} \alpha) + [(1 - r_u) \cos \alpha - C_s \sin \alpha] (a_4 + a_5) \operatorname{tg} \bar{\varphi} \right\} ; \quad (3.90)$$

$$a_3 = -B \sin \alpha \operatorname{tg} \bar{\varphi} \left[ \frac{\bar{K}}{\gamma H} + (1 - r_u) \frac{a_5}{B} \operatorname{tg} \bar{\varphi} \right] . \quad (3.91)$$

არასწორი ფორმის გარე ქანობისთვის მოცემული  $G_1$  და  $G_2$ -თვის გვაქვს

$$a_4 = G_2 / \gamma H^2 ; \quad (3.92)$$

$$a_5 = G_1 / \gamma H^2 ; \quad (3.93)$$

3.34.ა ნახაზზე გამოსახული  $I$  ტიპის სწორი ქანობისთვის

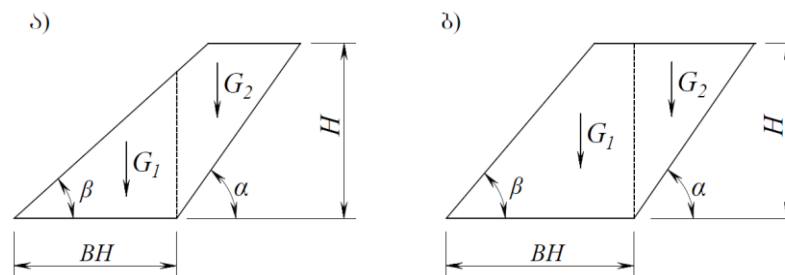
$$a_4 = -\frac{1}{2} [\operatorname{ctg} \alpha - (1 - B \operatorname{tg} \beta)^2 \operatorname{ctg} \beta] ; \quad (3.94)$$

$$a_5 = -\frac{1}{2} B^2 \operatorname{tg} \beta . \quad (3.95)$$

3.34.ბ ნახაზზე გამოსახული  $II$  ტიპის ნაყარისთვის

$$a_4 = -\frac{1}{2} \operatorname{ctg} \alpha ; \quad (3.96)$$

$$a_5 = B - \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \beta . \quad (3.97)$$



ნახ. 3.34. ნამუშევარში განლაგებული ნაყარის ორი ტიპი:

ა - ტიპი  $I$ ; ბ - ტიპი  $II$ .

აღვნიშნოთ, რომ (3.92) და (3.93) განტოლებების გამოყენებისას არასწორი ფორმის ქანობებისთვის, წონები  $G_1$  და  $G_2$  გაიანგარიშება განივი კვეთის ფართობის გამოთვლით. თუ სწორი კონფიგურაციის ქანობი, ისეთი როგორც 3.34 ნახაზზეა ნაჩვენები, მაშინ საჭიროა გამოყენებული იყოს ან (3.94) და (3.95)

ან (3.96) და (3.97) განტოლებები, გამომდინარე იქიდან ნაყარი ეკუთვნის  $I$  თუ  $II$  ტიპს.  $I$  ტიპის ნაყარი, რომლისთვისაც  $B \leq ctg \beta$ , გააჩნია სამკუთხა ფორმის ქვედა ბლოკი, ამავდროულად  $II$  ტიპის ნაყარი, რომლისთვისაც  $B > ctg \beta$ , აქვს ტრაპეციოდალური ფორმის ქვედა ბლოკი.

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ გამარტივებული განივი კვეთის გამოყენების მიზანი იმაში მდგომარეობს, რომ მივიღოთ განტოლება, რომლის გადაწყვეტა შესაძლებელი იქნება ხელით ან ჯიბის კალკულატორით, ამასთან მიღებული შედეგი არის რეალური სურათის კარგი მიახლოება.

#### 4. ფერდობის და კარიერების ქანობების გამაგრების ეფექტურობის პირობები

##### 4.1. ფერდობის გამაგრების საშუალებები და მათი გამოყენების პირობები. გამაგრების საშუალებების საერთო დახასიათება

გამაგრებულ მასივზე ზემოქმედების პრინციპით კარიერებზე ქანობების, ჰიდროტექნიკურ და სპეციალურ მშენებლობაში გამაგრების საშუალებები იყოფა ოთხ ძირითად ჯგუფად (ცხრილი. 4.1):

- 1) გამოყენებული მექანიკური შეკავების პრინციპი (საინჟინრო ან მექანიკური);
- 2) მთის ქანების ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება;

3) ქანობის ზედაპირზე ქანების უზრუნველყოფა საიმედო იზოლაციით გარე ფაქტორების ზემოქმედებისგან (ქანების იზოლაცია);

4) კომბინირებული საშუალებები.

არამდგრადი ქანობების გამაგრების მექანიკური პრინციპი (ნახ. 4.1) ეფუძვნება მთის ქანების მასივში ძაბვების გადანაწილებას. მიიღებენ რა გამაგრებული კონსტრუქციები და ნაგებობები ჩამოშლის პრიზმისგან გამოწვეულ დაწოლას, გადასცემენ ძვრისარმქონე ზონაში მასივის მდგრად ნაწილს. ქანობის ფუძეში ან დაცურების (ან ზონის) ზედაპირის გარეთ მტკიცე და მდგრადი მასივის უზრუნველყოფის პირობას წარმოადგენს ქანობების მექანიკური საშუალებებით გამაგრების გამოყენების აუცილებლობა.

არსებობს ქანობების მექანიკური გამაგრების სახვადასხვა საშუალება. ესენია: ცალკეული კონსტრუქციები (ხიმინჯები, შპონები, ძელები, ბაგირული საჭიმები) და მთლიანი ნაგებობები (საყრდენი და დამცავი კედლები, კონტრფორსები). კლდოვან და ნახევრადკლდოვან ქანობების გამაგრებისთვის ძირითადად გამოიყენებენ პირველ მეთოდს, ხოლო ზვავების გაფრთხილების, თიხოვანი ქანების და ფილტრაციული ქანობებისთვის - მეორეს.

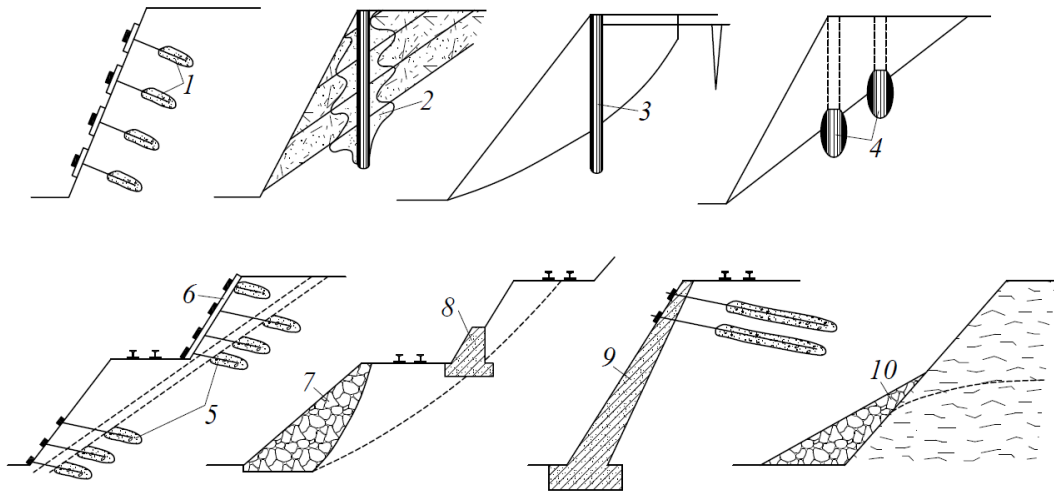
ცხრილი 4.1.

საშუალებათა ჯგუფები	გამოყენების პირობები
<b>I. მექანიკური გამაგრება:</b>	
რკინაბეტონის ხიმინჯები და შპონები	მასივები სუსტად განვითარებული ბზარებით, ქვედაკვეთიანი ზედაპირული შესუსტებით, გამონაშვერ სივცრეში 20-50°-იანი კუთხით ჩამოვარდნილნი
ძელები და მოქნილი ბაგირული საჭიმები	მსხვილბლკოვანი ნაკლებად გამოფიტული მასივები, ამოდების მხარეს 20-50°-იანი კუთხით დაცემული ფიქალური ფენილური მაგარი ქანები
დამცავი კედლები	ძლიერდაბზარული, ადვილად გამოსაფიტი, კლდოვანი და ნახევრადკლდოვანი ქანები
რკინაბეტონის საყრდენი კედლები და კონტრფორსები	ფენაცვლილ ქანებიანი რთული სტრუქტურის დარღვეული მასივები, ფხვიერი ტენიანი ქანები, ჩამოცვენისკენ მიდრეკილნი
<b>II. ქანების განმტკიცება:</b>	

პოლიმერული მასალებისგან შემდგარი გასამაგრებელი ნარევიტ დაჭირხვნა	დაბზარული კლდოვანი ქანები თიხოვანი მასალებისგან თავისუფალი ბზარებით, მსხვილმარცვლოვანი და წვრილმარცვლოვანი ქვიშები
სილიკატიზაცია და ელექტროსილიკატიზაცია	სილოვანი და ლიოსისებრი ქანები ფილტრაციის კოეფიციენტით 0.1-5 მ/დღელამე.
ელექტრო-ქიმიური დამუშავება	თიხოვანი წყალგაჟღინთული ქანები არანაკლები ფილტრაციის კოეფიციენტით 0.01 მ/დღელამე.
თერმული დამუშავება	თიხნარი და თიხოვანი ქანები ჰერგამტარიანობის კოეფიციენტით 0.2-0.4 სმ/წმ.
აფეთქების ენერგიით გამაგრება	თიხოვანი, ქანები ფორიანობის კოეფიციენტით 0,1
<b>III. მაიზოლირებელი და დამცავი საფარი:</b>	
ლითონის ბადეზე მისაფრქვევი ბეტონი, სმოლიზაცია, აგრომელიორაციული ღონისძიება	ინტენსიური გამოფიტვისკენ მიდრეკილი ძლიერდაბზარული ქანები; სილოვანი და გრავიული ქანობები, სილა-თიხოვანი ქანობები
<b>IV. ქანების კომბინირებული გამაგრება:</b>	
ქანების მექანიკური გამაგრებით გამტკიცების ან იზოლაციის შეხამება	რთული საინჟინრო-გეოლოგიური პირობა

მთის ქანების მასივის გამტკიცება ხორციელდება დაბზარულ მთის ქანებში დარღვეული სტრუქტურული კავშირების აღსადგენად ან ფხვიერ ქანებში ახალი დამატებითი კავშირების შესაქმნელად.

მეორე ცხრილში მოყვანილ ქანების გამტკიცების საშუალებებმა საკმაოდ ფართო გამოყენება ჰპოვა მშენებლობაში. ღია სამთო სამუშაოების პრაქტიკაში მათი გამოყენება ჯერ-ჯერობით შეზღუდულია. ყველაზე მეტად გავრცელებულია დაბზარული კლდოვანი ქანების ცემენტიზაციის მეთოდი, მაგრამ ისიც გამოიყენება კავშირების გამაგრებასა და ძელების მექანიკურ საშუალებებთან კომბინაციაში.



ნახ. 4.1. ქანობების გამაგრების მექანიკური საშუალებები:

- 1 - რკინაბეტონის ძელები; 2 - რკინაბეტონის ხიმინჯები და ცემენტიზაცია;
- 3 - დიდი დიამეტრის მილის ხიმინჯი; 4 - რკინაბეტონის შპონები;
- 5 - ბაგირული საჭიმები; 6 - რკინაბეტონის ჩამოსაკიდი კედელი;
- 7 - კონტრფორსი კლდოვანი ქანისგან; 8 - რკინაბეტონის საყრდენი კედელი;
- 9 - რკინაბეტონის დამცავი კედელი; 10 - სადრენაჟო მასალისგან დატვირთვა.

ქანობის ზედაპირების დაფარვა მაიზოლირებელი საშუალებებით ხორციელდება ღია ქანობების ინტენსიური გამოშრობის შემდეგ. დაფარვის კონსტრუქცია არ განიხილება როგორც დატვირთვა. ძირითადი მისი დანიშნულებაა - მთის ქანების იზოლირება გარე ფაქტორების ზემოქმედებისგან.

რთულ საინჟინრო-გეოლოგიურ პირობებში, როდესაც გამაგრების ერთი მეთოდი ვერ უზრუნველყოფს შესუსტებულ მასივის ხანგძლივ მდგრადობას, ხორციელდება კომპლექსური გამაგრება.

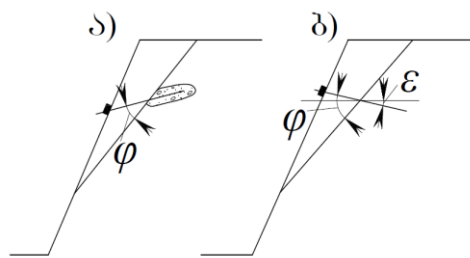
#### 4.2. ფერდობების გამაგრების მექანიკური საშუალებები

ძელური გამაგრება გამოიყენება მიწისქვეშა სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვებისას მთის ამონაღები მასის შესაკავებლად. ღია მთის სამუშაოებისას მისი გამოყენება მიზანშეწონილია მსხვილბლოკური, ფენოვანი და ფიქალური სტრუქტურის მქონე მცირედ-გამოფიტული მყარი მთის ქანებით შემდგარი ქანობების გასამაგრებლად. ასეთი ტიპის გამაგრების უპირატესობას წარმოადგენს მისი გამოყენების სიმარტივე, მცირე თვითღირებულება, მუშა-

ობაში მაღალი საიმედოობა და ეფექტურობა, გამოყენებული პირობების ფართო დიაპაზონი.

მუშაობის ხასიათის მიხედვით განასხვავებენ ჭიმვაზე და ჭრაზე მომუშავე ძელებს. უკანასკნელნი დაცურების ზედაპირის მიმართ ნორმალის მიმართულებით დგებიან, გააჩნიათ გადიდებული დიამეტრი და მზადდებიან მასალებისგან, რომელთაც ჭრაზე გაზრდილი წინააღმდეგობა გააჩნიათ.

გაჭიმვით დეფორმაციაზე ნაანგარიშები ძელები და ბაგირული საჭიმები სავარაუდოდ დაგრძელებიან ან მათი დაყენებისთანავე (დაგრძელება მიიღება სპეციალური მექანიზმებით შემდგარი კონსტრუქციით), ან მასივის დეფორმირების შემდეგ (თვითდაგრძელება). ბოლო შემთხვევის დროს, ძელები და ბაგირული საჭიმები ძვრის ზედაპირების მიმართ შესაძლო მინიმალური  $\varphi$  კუთხით უნდა დამაგრდნენ (ნახ. 4.2.ა), თუმცა ამასთან ერთად იზრდება საბურღი მოცულობა, იმატებს საბურღი სამუშაოების, ღრმულების ჩაცემენტების და არმატურების დაყენების შრომატევადობა. ძელების ჰორიზონტალურად ან ჰორიზონტის მიმართ  $\varepsilon=10\pm 15^\circ$ -იანი კუთხით დახრისას (ნახ. 4.2.ბ) სამუშაოთა წარმოება მარტივდება, მაგრამ ამასთან ერთად ძელებს მიეცემათ საწყისი დაგრძელება.

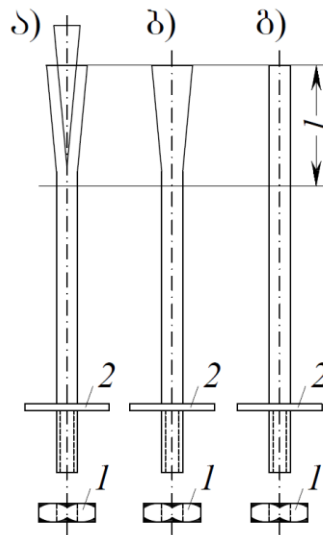


ნახ. 4.2. შესუსტებული ზედაპირების მიმართ ძელების ორიენტირების სქემა

სხვადასხვა ტიპის ძელების ძირითად განსხვავებად ითვლება საკეტი ნაწილის კონსტრუქცია. ის უზრუნველყოფს ძელების მუშაობის საიმედოობას. არსებობს სხვადასხვა ტიპის საკეტური კონსტრუქციები: სოლისებრი, კონუსური, ფეთქებადი და სხვა. თვითდამჭერ საკეტიანი ძელები არ არსებობენ. რადგან პერიოდული პროფილის არმატურებს და ღრმულების კედლებს შორის მთელი თავისუფალი სივრცე ბეტონით ივსება, ძელებს მთელ სიგრძეზე მჭიდროდ ეკვრიან ქანები და მათთან შეჭიდულობაში იმყოფებიან. ძე-



ლებს შეიძლება მიენიჭოს საწყისი ძაბვები, და ამისათვის თავიდან ბეტონით ივსება მხოლოდ ღრმულების სიგრძის ნაწილი (ძვრის ზონის გარეთ), ხოლო ძელის გაჭიმვის შემდეგ - მთელი ღრმული. ძელების რამდენიმე ტიპი ნაჩვენებია მე-4.3 ნახაზზე.



ნახ. 4.3. ძელის სახეობები:

- ა - სოლური საკეტი; ბ - კონუსური საკეტი;
- გ - სპეციალური საკეტის გარეშე (პერიოდული პროფილის არმატურა);
- 1 - ჭანჭიკი; 2 - ლითონის სადები; 1 - ძელის საკეტი.

სამრეწველო პოლიმერული მასალები, როგორც მაკავშირებლები უფრო და უფრო მეტ გამოყენებას პოულობს სამთო სამუშაოებში სხვადასხვა ჩამაგრებების და სინთეტიკური შეფისვის სახით. ძელები, რომელთა მონტაჟის დროს გამოიყენება ეს მასალები, მიიღეს დასახელება - ლითონპოლიმერული. კონსტრუქციული მოსაზრებით ისინი რკინაბეტონებისგან არ განსხვავდებიან.

მოქნილი ბაგირული საჭიმის მონტაჟის დროს ბაგირი საკეტის ნაწილში იშლება, ხოლო ბეტონსა და ბაგირს შორის შეხების დიდი ზედაპირის გამო წარმოიშვება მტკიცე საკეტი.

ბოლო წლებში ლიტერატურაში დასახელების - „ძელური სამაგრი“ მაგივრად მეტწილად გამოიყენება ტერმინი - „ანკერული სამაგრი“. გავითვალისწინებთ რა ამას და ასევე ერთი ტერმინით სარგებლობის სიმართლევს, ისეთი ცნებების გასაერთიანებლად, როგორცაა ლითონის ძელები,

რკინაბეტონის ძელები, ლითონპოლიმერული ძელები, მოქნილი ბაგირული საჭიმები, შემდეგისთვის გამოყენებული იქნება ჩამაგრების ამ სახეობების განზოგადებული სახელწოდება - ანკერული ჩამაგრება.

ქანობების ანკერული ჩამაგრებით ჩამაგრებისას დამჭერად რეკომენდებულია გამოყენებული იყოს: საყრდენი რკინაბეტონის ფილები, ყოველი ანკერისთვის ცალ-ცალკე ან შემაერთებელი „კონები“ შემდგარი ორი ან სამი ანკერისგან, ყოველი რიგის ანკერების შემაერთებელი ხის ან ლითონის ჩამჭერები, ანკერებს შორის სივრცის შემაერთებელი ლითონის ბადე, ლითონის ბადის ტორკრეტ-ბეტონი და ასე შემდეგ.

ჩამჭერის აუცილებლობა და ტიპი დგინდება ადგილზე, გამომდინარე ბლოკის ზომებისგან, გამოვარდნის შესაძლებლობისგან და ქანების გამოფიტვისკენ მიდრეკილებისგან. ამასთან, ხის ან ლითონის ჩამჭერებს გამოიყენებენ ამოღების მომსახურების მცირე დროის განმავლობაში (3-5 წლამდე). თუ ამოღება მიმდინარეობს მცირე დროის განმავლობაში, მაშინ ჩამჭერებს ამზადებენ რკინაბეტონის ფილებისგან ან ახდენენ ქანობის ზედაპირის ტორკრეტირებას ანკერებით დამაგრებულ ლითონის ბადით.

რკინაბეტონის ხიმინჯები წარმოადგენენ მაგარი მთის ქანებით, შესუსტებული ბზარებით, ტექტონიკური რღვევებით (და სხვა) შემდგარი კალთების მონაკვეთების ჩამაგრების საიმედო საშუალებას.

ხიმინჯური სამაგრების ძირითად დამსახურებად ითვლება:

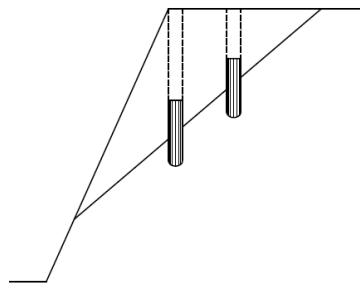
ა) ხიმინჯის მაღალი მზიდუნარიანობა (განსაკუთრებით ხისტი არმატურით), რომელმაც ჭრაზე ხიმინჯის მხები დატვირთვის მუშაობის დროს შეიძლება მიაღწიოს 100-150 ტონას;

ბ) ხიმინჯის აგების სიმარტივე; სამუშაო მოედნად გამოიყენება კალთის ზედა სიბრტყე, რაც ამარტივებს ჩამაგრების დროს გამოყენებულ დამხმარე მოწყობილობების და მასალების ტრანსპორტირებას; ბერმის სიგანე, რაზეც წარმოებს ჩამაგრებითი სამუშაოები, 6-7 მეტრზე ნაკლები არ უნდა იყოს;

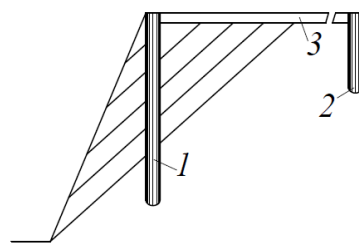
გ) სამუშაოების მთლიანი მექანიზირება, რაც გამაგრებითი სამუშაოების მაღალი მწარმოებლობის და თვითღირებულების შემცირების მიღწევის საშუალებას იძლევა;

დ) მნიშვნელოვანი განფენილობის და დიდი სიმძლავრის ღრმად არსებული დაცურების ზედაპირის მონაკვეთების გამაგრების შესაძლებლობა იმ პირობით, რომ შესაძლო ჩამოშლის პრიზმა შედგება მონოლითურად მაგარი ქანებისგან, ხოლო შესუსტების ზონას გააჩნია უმნიშვნელო სიმძლავრე.

დეფორმირებული მასივის მუშაობის ხასიათის მიხედვით განასხვავებენ ჭრის და ღუნვის დეფორმაციაზე მომუშავე ხიმინჯებს. ჭრაზე მომუშავე ხიმინჯებს გააჩნიათ შევსებული განივი კვეთი. რაც მეტია ასეთი ხიმინჯების არმირების პროცენტი, მით უკეთესად ეწინააღმდეგებიან ჭრას. და ამან განსაზღვრა მძიმე ტიპის P-43 და P-50 ლიანდაგებით შემდგარი ჩასასობი ხიმინჯების უპირატესი გამოყენება. ასეთი ხიმინჯები შპონების მსგავსია, ამიტომ ზოგიერთ შემთხვევაში მასალების ეკონომიისთვის მიზანშეწონილია ხიმინჯების მაგივრად რკინაბეტონის შპონების გამოყენება (ნახ. 4.4). ღრმულზე დიდი დიამეტრის შპონის გამოყენების აუცილებლობის შემთხვევაში ღრმულის გაფართოება შეიძლება აფეთქებით ან ღრმულების გამაფართოებლების დახმარებით.



ნახ. 4.4. ღრმულების გაგანიერების გარეშე მათში ჩაყენებული რკინაბეტონის შპონები



ნახ. 4.5. ღუნვადი რკინაბეტონის ხიმინჯების ჩაანკვრების სქემა: 1 - ხიმინჯი; 2 - ანკერი; 3 - ანკერის მჭიმო.

მღუნავ ხიმინჯებს უნდა გააჩნდეთ ხიმინჯის მასალის დრეკადობის მოდულის პროპორციული შესაძლო დიდი სიხისტე და მის კვეთის ინერციის მომენტი. ხიმინჯების ღუნვაზე წინააღმდეგობის გაზრდისთვის

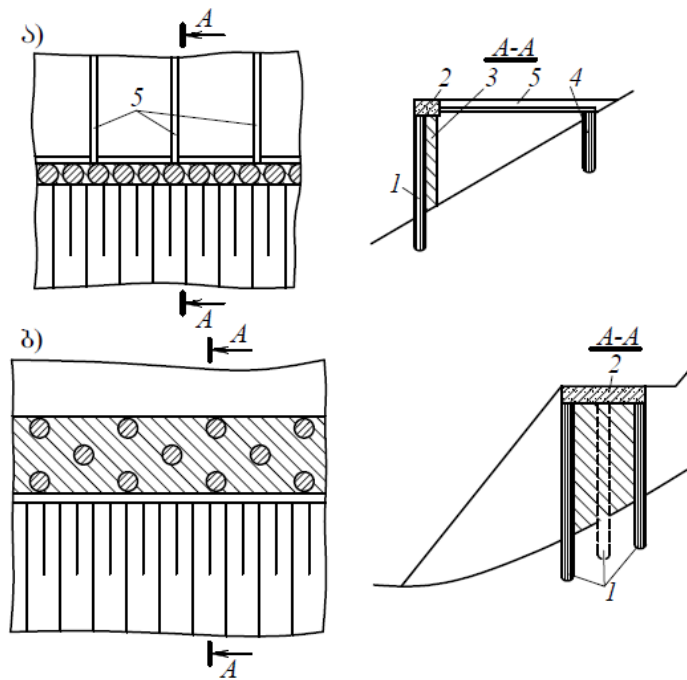
მათი ზედა ბოლოები ურღვევ მასივში ანკერებით ჩამაგრდებიან (ნახ. 4.5). იმასთან დაკავშირებით, რომ ლუნვის დროს კონსტრუქციის განივ კვეთებში მოქმედ ნორმალურ ძაბვებს ზედაპირზე გააჩნიათ მაქსიმალური სიდიდე და კონსტრუქციის ნეიტრალური ღერძის გასწვრივ ძაბვების სიდიდე ნულის ტოლია, მიზანშეწონილია მილისებრი კვეთის ხიმინჯების გამოყენება.

გამომდინარე ქანობების დეფორმაციის ხასიათიდან, ქანების ფიზიკო-მექანიკური მახასიათებლებიდან და გამოყენებული ხიმინჯების დიამეტრიდან, ხიმინჯები აიგება ერთ ან რამდენიმე რიგად.

ხიმინჯების ერთმანეთს შორის მცირე მანძილებით დაშორებით ერთ რიგში აგების დროს (ნახ. 4.6.ა) წარმოიშვება შპუნტოვანის ანალოგიური მთლიანი ხიმინჯოვანი კედელი. ასეთი კედლები გამოყენებას ჰპოვებენ ხელოვნური ბერძის დამჭერი ნაგებობების შემთხვევაში.

თუ ხიმინჯები აიგებიან ორ-სამ რიგად (ნახ. 4.6.ბ), წარმოიშვება პირველ და ბოლო რიგს შორის  $m$  მანძილის სიგანის საყრდენის კედლის მსგავსი. იმისათვის, რომ ყველა ხიმინჯმა იმუშაოს როგორც ერთ მთლიანმა, მათ ზედა ბოლოებს აერთებენ რკინაბეტონის როსტვერკით.

ჰიდროტექნიკურ, საგზაო და სპეციალურ მშენებლობებში გამოყენებული მასიური საყრდენი კედლების ღია სამთო სამუშაოებში გამოყენება შეზღუდულია შემდეგი ნაკლოვანებების გამო:



ნახ. 4.6. ხიმინჯების აგების სქემები:

ა - ერთ რიგად; ბ - რამდენიმე რიგად: 1 - ხიმინჯი; 2 - რკინაბეტონის როსტვერკი;  
3 - დამჭიმავი; 4 - ანკერი; 5 - ანკერული მჭიმი.

ა) ასეთი ნაგებობების აგების შრომატევადობა, სამუშაო ძალების და მასალების დიდი ხარჯი;

ბ) გამაგრების დიდი თვითღირებულება;

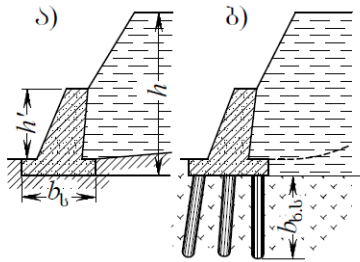
გ) კედლის მასის და სიგანის პირდაპირპროპორციული მცირე ზიდვის უნარი; ეს იმას ნიშნავს, რომ დიდი ზიდვის უნარის მქონე კედლების აგება მნიშვნელოვნად იქნება გართულებული, რადგან საჭირო გახდება ბერმის სიგანის გაზრდა, რაზედაცაა აუცილებელი საყრდენი კედლების აგება;

დ) ქვემოთ არსებულ კალთებზე დამატებითი დატვირთვის შემქმნელი დიდი მასა.

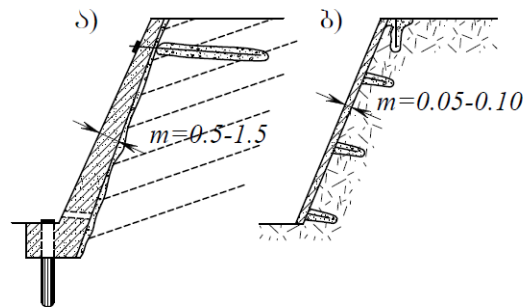
რკინაბეტონის საყრდენ კედლებს ანგარიშობენ ძვრაზე და გადაყირავე-ბაზე. შესაბამისად, კედლის კონსტრუქციამ უნდა დააკმაყოფილონ შემდეგი მოთხოვნები:

ფუძის მიმართ უნდა გააჩნდეთ ძვრაზე წინალობის საკმაო უნარი; ამ მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად საყრდენ კედლებს აგებენ მტკიცე კლდო-

ვან და ნახევრადკლდოვან ფუძეზე (ნახ. 4.7.ა) ან ხიმინჯოვან საძირკველზე (ნახ. 4.7.ბ).



ნახ. 4.7. საყრდენი კედელი მტკიცე კლდოვან ფუძეზე და ხიმინჯოვან საძირკველზე:  
 $h$  - კალთის სიმაღლე;  
 $h'$  - კედლის სიმაღლე;  
 $b_s$  - საძირკვლის სიგანე;  
 $b_{bs}$  - საძირკვლის ხიმინჯის ჩასობის სიღრმე.



ნახ. 4.8. რკინაბეტონის კედლები:  
 ა - საძირკველზე დამცავი;  
 ბ - ზრვევადი ცამოსაკიდი.

უნდა იყოს მდგრადი გადაყირავების მიმართ, ე.ი. ფუძის სიგანე კედლის სიმაღლის შესაბამისი უნდა იყოს.

მეწყერულ დაწოლას გაუწიოს წინააღმდეგობა ნებისმიერ განივ კვეთში, ე.ი. გააჩნდეს საკმარისი სიმტკიცე.

მასიური რკინაბეტონის საყრდენი კედლებისგან განსხვავებით დამცავ კედლებს გააჩნიათ მცირე სისქე (0.5-1.5 მ). ისინი გამოიყენებიან ქანობებში ინტენსიურად გამოფიტული ქანებისგან შემდგარი შეზღუდული მოცულობის ჩამონგრევის და ჩამონაცვენის ლოკალური გამოცვენის თავიდან ასაცილებლად.

დამცავი კედლების მდგრადობა უზრუნველყოფილია საძირკველის ჩაშენებით გამაგრებული კალთის ფუძეში და კედლის ზედა ნაწილის ჩაანკერებით (ნახ. 4.8.ა). შუალედური ანკერები ყენდება მალეების შესამცირებლად დიდი მღუნავი მომენტების წარმოშობის საფრთხის არსებობის შემთხვევაში. ჩაანკერება ხდება ლითონის ძელების ან ბაგირული საჭიმების საშუალებით (გამომდინარე ანკერის სიგრძისგან). ამ ტიპის დამცავი კედლე-

ბით დაბზარული კლდოვანი და ნახევრადკლდოვანი ქანებისგან შემდგარი კალთები მაგრდება.

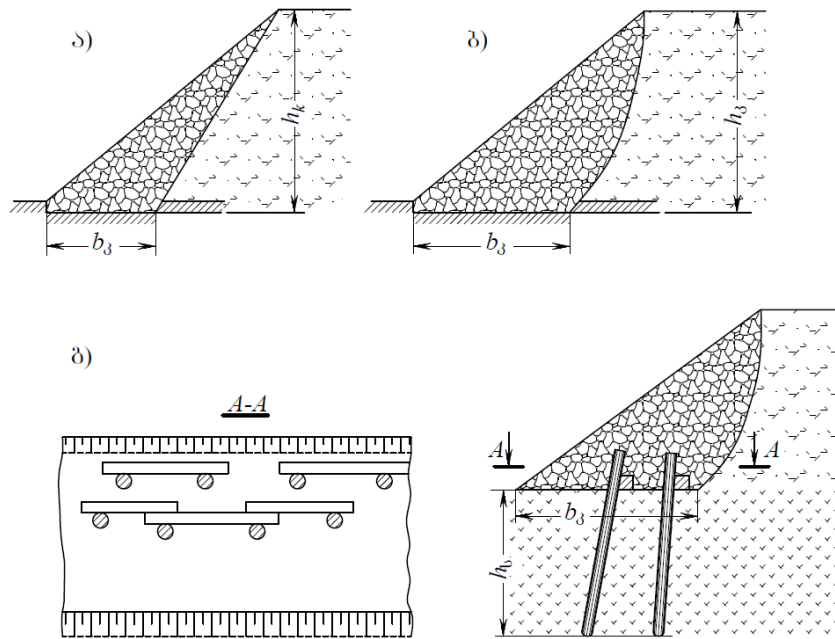
თხელი 0.05-0.10 მ სისქის საკიდი კედლები იგება ჩამოცვენის თავიდან ასცილებლად (ნახ. 4.8.ბ). მათ სამირკველი არ გააჩნიათ. ლითონის ბადე ჩამოიკიდება ერთმანეთთან წინასწარ განსაზღვრული მანძილით დაშორებულ 1.5-2.5 მეტრ სიგრძის ძელებზე. შემდეგ ქანობის ზედაპირი იფარება მიფრქვევით. ეს კედლები ქანობის ზედაპირების მაიზოლირებელ საფარის ჯგუფს განეკუთვნება.

საკიდ კედლის ერთერთ ვარიანტს წარმოადგენს ქანობის ზედაპირის ასაწყობი რკინაბეტონის ფილებით დაჭერა.

კონტრფორსებს გააჩნიათ იგივე ფუნქცია, რაც საყრდენ კედლებს, მაგრამ საყრდენი კედლებისგან განსხვავებით, შედარებით იაფ ნაგებობებს წარმოადგენენ. მათ გააჩნიათ ნაკლოვანებებიც: დიდი საკუთარი წონა და დიდი ფართობები, რომელიც ითხოვს მნიშვნელოვანი სიგანის ბერმს (ნახ. 4.9.ა).

ბერმის სიგანის შესანარჩუნებლად წარმოებს ფხვიერი ქანების ნაწილობრივი ამოღება და კლდოვანით ჩანაცვლება (ნახ. 4.9.ბ).

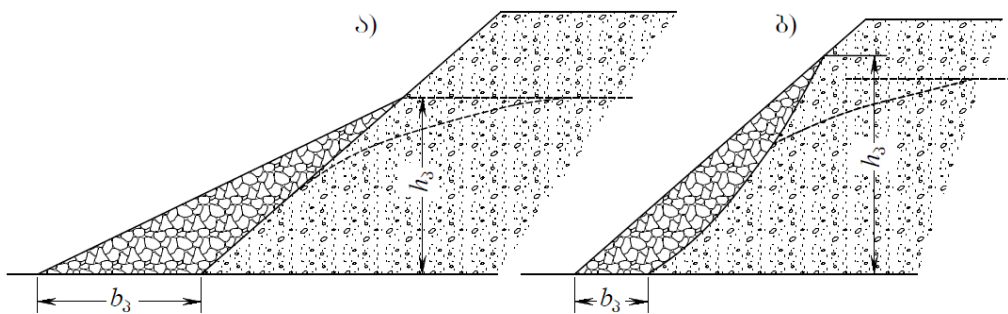
როგორც წესი კონტრფორსებს არ გააჩნიათ სამირკველები ამ სიტყვის პირდაპირი გაგებით, მიუხედავად ამისა დაიყრებიან სპეციალურად მომზადებულ ფუძეზე. თუ მეწყერის ფუძეში არიან განლაგებულნი კლდოვანი ან ნახევრად-კლდოვანი ქანები, მაშინ 1-1.5 მეტრზე მათ აფხვიერებენ ბურღფეთქებადი სამუშაოებით. გადაადგილებას დაქვემდებარებულ სუსტი ქანების არსებობის შემთხვევაში, ახდენენ ამოღებას ისეთ სიღრმეზე, რომ კონტრფორსის ფუძე არ დაემთხვეს დაცურების ზედაპირს. კონტრფორსის ფუძეში ძვრის თავიდან ასაცილებლად კონტრფორსს დაყრთან სპეციალურად მომზადებულ ხიმინჯოვან სამირკველზე. სამირკველი წარმოადგენს ვერტიკალურ ხიმინჯების რიგს, კალთის ფუძეში ჩასობილს ნაწილობრივ. 2-2.5 მეტრზე ამომვერილი ხიმინჯების ზედა ბოლოები შეერთდებიან რკინაბეტონის რიგელებით. ამ ფუძეზე წარმოებს კლდოვანი ქანების დაყრა (ნახ. 4.9.გ).



ნახ. 4.9. კლდოვანი ქანების კონტრფორსები:

ა და ბ - მტკიცე კლდოვან ფუძეზე დაყრილი; გ - ხიმინჯოვან საძირკველზე დაყრილი;  
 $h_3$ ,  $b_3$ - კონტრფორსის ფუძის სიმაღლე და სიგანე;  $h_0$  - საძირკველის ხიმინჯის ჩასობის სიღრმე.

ფილტრაციული მასალის დაყრა შეიძლება მოხდეს კალთის ზედაპირზე ფხვიერი ქანების ამოღების გარეშე. ამ შემთხვევაში განივ კვეთში დატვირთვას სამკუთხა პრიზმის ფორმა გააჩნია (ნახ. 4.10.ა). ფხვიერი ქანების ნაწილის ამოღების და ფილტრაციული მასალებით ჩანაცვლების დროს კალთის ქანობის კუთხე ხშირად მასალის ბუნებრივი ქანობის კუთხის ტოლია. საიდანაც მოიხსნება დატვირთვა (ნახ. 4.10.ბ).



ნახ. 4.10. ქანობების დრენირებული მასალებით დატვირთვა:

$h_3$ ,  $b_3$ - დამტვირთავი პრიზმის ფუძის სიმაღლე და სიგანე.

### 4.3. ფერდობების განმტკიცება



განმტკიცების მეთოდებს შორის ყველაზე მეტი გავრცელება ჰპოვა ცემენტაცია. მისი გამოყენების არე - მასივია, რომელსაც გააჩნია შეწოვის უნარი, რომლის კუთრი ხარჯი არანაკლებ 0.01ლ/წმ-ის ტოლია. ასეთი ქანები ძლიერ ბზარიანი კლდოვანი ქანებიდან დაწყებული მსხვილმარცვლოვან ქვიშებამდე.

ცემენტაციის საუკეთესო ეფექტი მიიღწევა დაბზარულ ქანებში (ქვიშოვანი, თიხოვანი და ქვიშოვანი ფიქალები, კირშემცველი, გრანიტები, ალგორიტები, ალევროლიტები და სხვა) ბზარების თიხებით შევსების არარსებობის შემთხვევაში.

ბორტის შესუსტებული მონაკვეთების ცემენტაცია ჰიდრომშენებლობაში ცემენტაციისგან განსხვავდება როგორც თავის დანიშნულებით, ასევე შესრულების პირობებით. ეს განსხვავება შემდეგნაირად გამოიყურება:

1. ბორტის მონაკვეთის ცემენტაციის დროს მისი მდგრადობის გასაზრდელად აუცილებელია თავიდან იყოს აცილებული ჰიდროსაიზოლაციო საფარების წარმოშობა. აუცილებელია ზომების მიღება იმისთვის, რომ ცემენტირებული მონაკვეთების გარეთ არ შეიქმნას მიწისქვეშა წყლების ჰიდროსტატიკური წნევის გაზრდის პირობა. საწინააღმდეგო შემთხვევაში, მასივის მხრიდან გამაგრებულ მონაკვეთზე იმოქმედებს ჰიდროსტატიკური წნევა, რაც ბუნებრივია გამაგრების ეფექტს შეამცირებს.

2. გამაგრებას დაქვემდებარებული ბორტის მონაკვეთი ზღვრულ მდგომარეობაში ქანების საკუთარ წონის გარდა არავითარ დატვირთვით ზემოქმედებას არ განიცდის. ამით განსხვავდება კარიერებში ცემენტაციის დანიშნულება კაშხლის გასწორის მომიჯნავე ფერდობის გამაგრებისგან. ფერდოს გასამაგრებელი ნარევების ინიცირებისთვის საკმარისია ფერდოს მდგრადობის უზრუნველყოფა შესუსტებული მონაკვეთების მიდამოში კუთხით, რომელიც გამაგრებას დაუქვემდებარებელი ბორტის მომიჯნავე მონაკვეთების ქანობის კუთხის ტოლი იქნება. ამ მიზნით, არ არის აუცილებელი ცემენტაციის ის ხარისხი, რაც რეგლამენტირებულია ჰიდროტექნიკურ მშენებლობა-

ში. საკმარისია ბზარების ნაწილობრივი შევსება ცემენტით ბლოკის კონტაქტებს შორის შეჭიდულობის გაზრდისთვის.

კარიერებში გამაგრებითი ცემენტაციის ეს განსაკუთრებულ თვისებები საერთოდ მიღებულ ტექნიკურ პირობებთან და ნორმებთან შედარებით მის ტექნოლოგიის გამარტივების საშუალებას იძლევა.

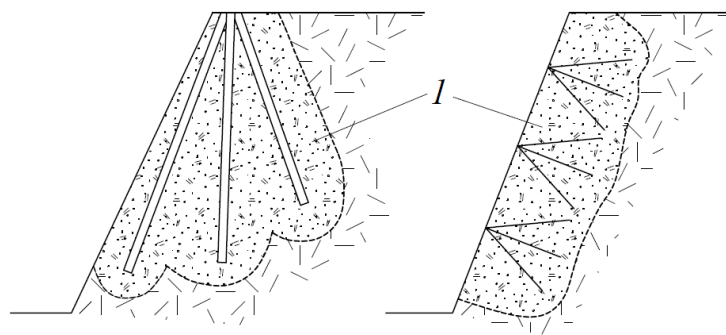
ცემენტის ხსნარის დაჭირხნა წარმოებს კალთის ზედა ბაქანზე ან ფერდოს ზედაპირზე გაბურღული 50-200 მმ-იან ღრმულების მარაოს გავლით (ნახ. 4.11). ცემენტური ნარევის დაჭირხნის შემდეგ ღრმულებში შეყავთ ლითონის არმატურები. ეს გამაგრების ეფექტს აძლიერებს.

სილიკატიზაცია ზრდის გამაგრებული ფხვიერი ქანების სიმტკიცეს და წყალგაუმტარებლობას.

სილიკატიზაციის პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ სილიკატური ნარევისგან სილოვანი ქანების დამუშავების დროს ისინი მომეტებულ მექანიკურ სიმტკიცეს, წყალგაუმტარებლობას და წყალმედევობას იძენენ.

გამოიყენება ერთ და ორნარევიანი სილიკატიზაცია.

ორნარევიანი სილიკატიზაცია გამოიყენება მსხვილ და საშუალომარცვლოვანი სილების გასამტკიცებლად, ფილტრაციის კოეფიციენტით - 2-80 მ/დღელამე. ის მდგომარეობს სილიკატის ნარევის ნატრიით (თხევადი მინა) და ქლოროვანი კალციით თანმიმდევრულ დაჭირხნაში.



ნახ. 4.11. ცემენტირებული ღრმულების განლაგების სქემა:

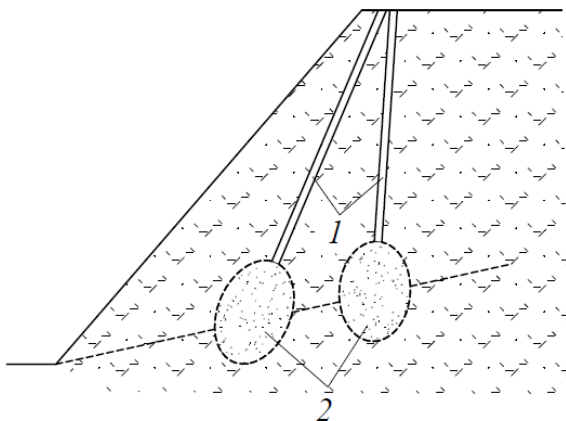
1 - ცემენტაციის ზონა.

0.5-5.0 მ/დღელამიან ფილტრაციის კოეფიციენტის მქონე წვრილი და მტვროვანი სილების, და ასევე 0.1-2.0 მ/დღელამიან ფილტრაციის კოეფიცი-

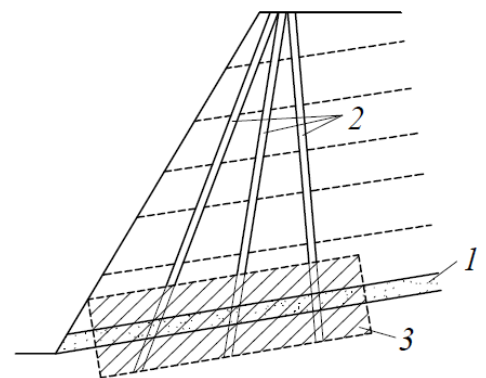
ნტის მქონე ლიოსისებრი ქანების გასამტკიცებლად გამოიყენება ერთნარევიანი სილიკატიზაცია, რომელიც მდგომარეობს ქანების თხევადი მინით და ფოსფორის მჟავიანი ან გოგირდის მჟავით და გოგირდმჟავა ამონიანი თხევადი მინით დაჭირხნაში.

სილიკატიზაციის მეთოდით ქანების განმტკიცების ეფექტურობა დამყარებულია  $pH$  გრუნტის წყლებზე. ორნარევი სიკიკატიზაციის დროს გრუნტის წყლების  $pH$  9-ზე ნაკლები უნდა იყოს, ხოლო ერთნარევიანის დროს - 7.2-ზე ნაკლები.

საინტერესოა ფერდოს ქანების (თიხები, თიხნარები, ლიოსები) აფეთქებით გამაგრების მეთოდი. ფერდოს მონაკვეთის გამაგრებისთვის ერთმანეთისგან 2-3 მეტრის დაშორებით იბურღება ღრმულების რიგი და წარმოებს ყოველი ღრმულის გაბურღვა შიდა აფეთქება. აფეთქების დროს წარმოიშვება ქვაბული, ხოლო ღრმულის კედლების მიმდებარე ქანების ზონა გამკვრივდება, რაც ზრდის მათ მექანიკურ სიმტკიცეს და მდგრადობას. ღრმულების უფრო მეტად ეფექტური გამოყენებისთვის მათში აფეთქების შემდეგ ჩაუშვებენ ლითონის არმატურას და ბეტონით ავსებენ (ნახ. 4.12).



ნახ. 4.12. აფეთქებისგან წარმოშობილი და ბეტონით შევსებული ღრუები:  
1 - ღრმულები; 2 - ბეტონით შევსებული ღრუები.



ნახ. 4.13. სუსტი ფენის დაშლის და ქანების შერევის ღრმულების განლაგების სქემა:  
1 - სუსტი ფენა; 2 - ღრმულები;  
3 - დაშლილი ქანების ზონა.

შედეგად, ყოველი ღრმულის გარშემო წარმოიშვება გამკვრივებული ქანების ზონა, რაც ღრმულებს შორის დაშორების სწორედ შერჩევის დროს

თავიდან აგვაცილებს გამკვერივებული ზონების ქანებით გარშემორტყმას და უზრუნველყოფს ფერდობის მდგრადობას.

ცნობილია აფეთქების ენერგიის გამოყენების სხვა ვარიანტებიც. თუ არსებობს კონტაქტი სუსტ და მაგარ ქანებს შორის და მათ შორის შეჭიდულობა და ხახუნი უმნიშვნელოა, ასეთი კონტაქტების დატენიანებისას დაფარული მეწყერები. ასეთი მეწყერების სტაბილიზირება შეიძლება შესუსტებულ ზონაში განლაგებულ ქანების აფეთქების და შერევის გზით. გამაგრების ეფექტი შეიძლება გავზარდოთ გაფხვიერებულ ზონაში გამამაგრებელი ნარევის დაჭირხნით (ნახ. 4.13).

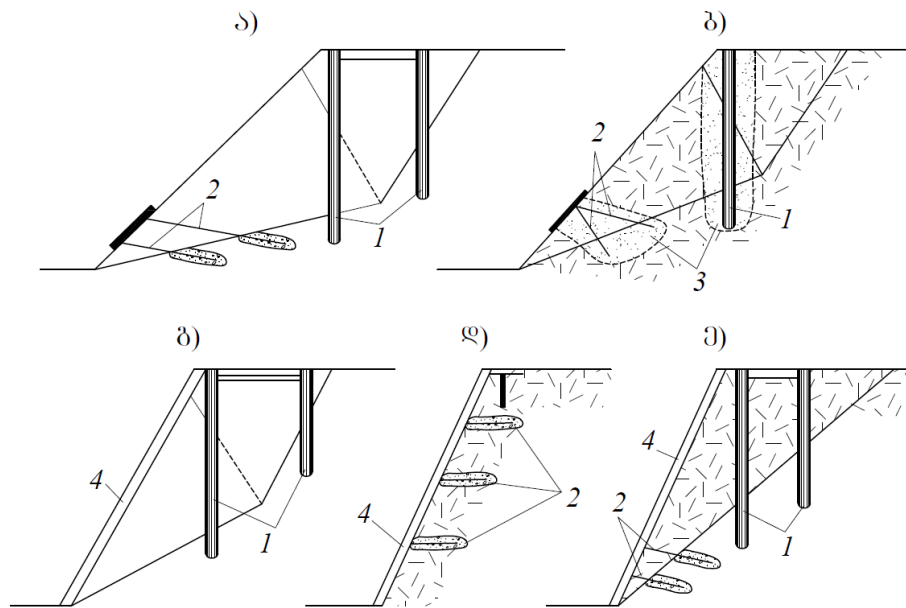
#### 4.4. ქანობების გამაგრების კომბინირებული საშუალებები

რთულ საინჟინრო-გეოლოგიურ პირობებში კალთების გამაგრების არცერთი ზემოთ ჩამოთვლილ საშუალებათაგანს არ მივყავართ სასურველ შედეგამდე. ამიტომ პრაქტიკაში როგორც წესი გამოიყენება გამაგრების სხვადასხვა საშუალებების კომბინაცია: რკინაბეტონის ხიმინჯები ძელებით ან ბაგირული საჭიმები, დაბზარული ქანების ცემენტაციის მექანიკური საშუალებები ან ან ქანობის ზედაპირის იზოლაცია.

მთის ღია სამუშაოების პრაქტიკაში გამაგრების საშუალებების შემდეგი კომბინაციები გამოიყენება:

რკინაბეტონის ხიმინჯები ძელებით ან ბაგირული საჭიმებით (ნახ. 4.14.ა); რკინაბეტონის ხიმინჯები ან ძელები ქანების ცემენტაციით (ნახ. 4.14.ბ); რკინაბეტონის ხიმინჯები (ნახ. 4.14.გ) ან ძელები (ნახ. 4.14.დ) ქანობის ზედაპირის იზოლაციით; რკინაბეტონის ხიმინჯები ძელებით და ქანობის ზედაპირის იზოლაციით (ნახ. 4.14.ე).

შესაძლებელია გამაგრების სხვადასხვა საშუალებების სხვა შეხამება.



ნახ. 4.14. ფრდობის გამაგრების კომბინირებული სქემები:  
 1 - რკინაბეტონის ხიმინჯები; 2 - ანკერები; 3 - ცემენტაციის ზონა;  
 4 - საკიდი რკინაბეტონის კედელი.

#### 4.5. დრენაჟის დანიშნულება ფერდობის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად

ბორტების მდგრადობის გაუმჯობესების თვალსაზრისით დრენაჟის ძირითად დანიშნულებას წარმოადგენს ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური ძალების შემცირება: დრენაჟი საკმაოდ ეფექტურია, თუ იწვევს დაწნევის შესამჩნევ შემცირებას „შესამლო ჩამოშლის პრიზმის“ ზღვრებში.

ყველაზე მეტად უნდა გავიხსენოთ კარიერები, რომელთა ბორტებში ან ძირში გროვდებიან წყალდამწნევი ეკრანებისგან განსხვავებული დამწნევი წყალგადამტარი კომპლექსები. სხვა შემთხვევებში ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური ძალების ზემოქმედება ბორტის საერთო მდგრადობაზე მცირეა, რადგან დრენაჟის მუშაობის შედეგად ამ ძალების შემცირებამ ტექნიკო-ეკონომიური თვალსაზრისით აზრი დაკარგა.

განვიხილოთ დრენაჟის დანიშნულება კალთების მდგრადობის უზრუნველსაყოფად.

სილა-თიხოვანი ქანებისგან შემდგარი არამუშა მდგომარეობაში მყოფი კალთებისთვის მნიშვნელოვანია შიდაკარიერული წყლის გაწოვის ორგანიზება.

კალთების სიბრტყეებზე წყლის დაგროვების თავიდან აცილება ამცირებს ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ ძალებს, ამცირებს კალთების დაღობვას და ზედაპირულ ჩარეცხვას, ასევე ქანების გაჯირჯვებას. გაჯირჯვული ქანები, როგორც წესი, ისე ცუდად გამოყოფენ წყალს, რომ პრაქტიკულად ისინი შეიძლება ჩაითვალოს არადრენირებად ქანებად. მართალია გაჯირჯვებასთან შესაძლებელია ბრძოლა კონტაქტურ და წყალშემცველ თიხოვან ქანების დრენირებით, თუმცა მათი მთლიანი გამოშრობა შეუძლებელია და წყალშემცველ შრეში წყლის რაოდენობა, თუნდაც ძალიან მცირე, საკმარისია იმისთვის, რომ მოხდეს ქვემოთ არსებული თიხების სრული გაჯირჯვება.

უნდა აღინიშნოს, რომ სილოვანი თიხების გაჯირჯვება, რომლებშიც ეფექტური გაჯირჯვების ძაბვები არ აჭარბებენ 50-100 კპა-ს, შეიძლება თავიდან აცილებული იყოს ქანობის ფენების მსხვილ-მარცვლოვანი მასალით დატვირთვით, რომელთა სიმკვრივე თიხებში ძაბვების ზრდას უზრუნველყოფს.

სილოვან ქანებში კალთების მდგრადობის უზრუნველსაყოფად, ამ ქანებთან მიერთებულ წყალშემცველ ჰორიზონტის დრენაჟთან და შიდაკარიერულ ქანობის ორგანიზებასთან ერთად (ეს ღონისძიება იძლევა ფილტრაციული დეფორმაციის და ქანობის კალთების ზედაპირების ეროზიული რღვევის შემცირების ან აღმოფხვრის საშუალებას), შეიძლება წარმატებით გამოყენებული იყოს ქანობის ფილტვრადი ნაწილის მსხვილმარცვლოვანი მასალით დატვირთვა (სადრენაჟო პრიზმა).

ძირითადი მოთხოვნები წაყენება მარულშემცველი ქანებით შემდგარ კალთებს. ამ შემთხვევაში აუცილებელია მიწისქვეშა წყლების მთლიანი დაჭერა და ქანობიდან მოშორება, და ატმოსფერული წყლების ქანობის კალთებიდან ეფექტური გადადინება.

ნაყარის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად ქანების ფუძეში (ქანობის ახლოს) წყლის დონე უნდა იყოს ნაყარის ძირზე დაბლა სიდიდით, რომელმაც არ უნდა გადააჭარბოს ამ ქანების კაპილარული აწევის სიმაღლეს (0.5-1 მ).

აუცილებელია, შეძლებისდაგვარად, ნაყარის ქანებში ატმოსფერული წყლების ჩადინების შეზღუდვის ღონისძიების გატარება, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მოულოდნელი ჩამოშლა-ჩამორეცხვისკენ მიდრეკილი მტვროვან-ქანებიანი ნაყარისთვის.

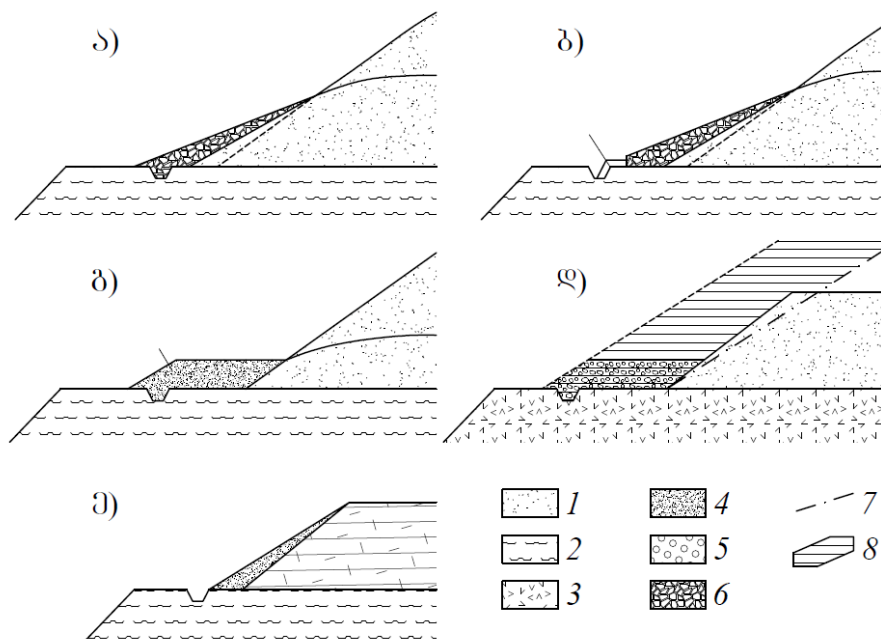
თიხოვანი ქანებით შემდგარ მაღალი ნაყარისთვის, რომელშიც ვითარდება ჭარბი ფორული წნევა, შეიძლება წარმოიშვას მათი გაფანტვის სიჩქარის გაზრდისკენ მიმართული სპეციალური ღონისძიებების (მაგალითად, ფენებზე სილის პერიოდული დაყრა) ჩატარების აუცილებლობა.

ჰიდრონაყარზე აუცილებელია დამბის ქანობის დრენაჟის წარმოება მისი ფილტრაციული დეფორმაციის შემცირებისთვის. დასასრულს უნდა აღინიშნოს, რომ ღია მთის სამუშაოების პრაქტიკაში ხშირია შემთხვევები, როცა ქანობების დეფორმაციები უსაფუძვლოდ ბრალდება მიწისქვეშა წყლების მოქმედებას, რასაც მივყავართ დიდი მოცულობის წყლის ამოქაჩვამდე საგრძნობი ეფექტის გარეშე. ამისათვის მნიშვნელოვანია ბუნებრივი და სამთო-ტექნიკური პირობებს შორის განსხვავების გათვალისწინება, რის შედეგადაც შეიძლება ეფექტური დრენაჟის მიღწევა.

განსაკუთრებით აუცილებელია აღინიშნოს ქანების მრავალი ღია დრენაჟის წარმოშობის განხილვის და ერთ-ერთი შესაძლო რაციონალური გამოშრობის ვარიანტის შერჩევის მიზანშეწონილობა. გარდა ამისა, ხშირად, დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად მიზანშეწონილია ღრმა დრენაჟის სხვა ღონისძიებით შეცვლა: კალთების დამუშავების რიგის შეცვლა, კარიერის ბორტის დახრის კუთხის შემცირება, ქანობის დატვირთვა ფილტვრადი მასალებისგან და სხვა.

#### 4.6. თავისუფალი ბორტის დრენაჟი

ჰორიზონტალური შრეების დროს თავისუფალი ბორტის დრენაჟის ძირითადი ამოცანას წარმოადგენს ფილტრაციული დეფორმაციების აღმოფხვრა მიწისქვეშა წყლების გამოდევნის და დამცავი და სატრანსპორტო ბერმიდან დინების უზრუნველყოფის შუალედების ზღვრებში. თავისუფალი კალთების მდგრადობის შენარჩუნების უნივერსალურ საშუალებას წარმოადგენს ჰორიზონტალური ბორტსგარე დრენაჟი (ნახ. 4.15.ა.ბ.გ) - ადგილობრივ შიდაკარიერულ წყალშემკრებთან დახრილად გამავალ წყალმიმღებ არხთან მიერთებული შებენ-ხრემის პრიზმა. არხში განლაგდება სადრენაჟო მილები. ზამთრის დაბალი ტემპერატურის მქონე რაიონებში დრენაჟზე ეწყობა დამატებითი გამათბობელი სილის ფენა.



ნახ. 4.15. ჰორიზონტალური ბორტსგარე დრენაჟის სქემა:

- 1 - დამტვირთავი გრუნტი; 2 - წყალსაყრდენი; 3 - სასარგებლო წიაღისეული;  
 4 - დამტვირთავი პრიზმის სილა; 5 - შებენო-ხრემის მასალა; 6 - მსხვილ-მტვრევადი მასალა; 7 - ბორტის გენერალური ხაზი; 8 - მიწის სამუშაოების მოცულობის გაზრდა დატვირთვის ხარჯზე.

სადრენაჟო მასალა უნდა ჩალაგდეს წინასწარ დაცულ ქანობში. გაწმენდა შეიძლება მოხდეს მშენებლობის დროს მომუშავე მსუბუქი ნემსო-ფილტრული მოწყობილობით ან წყალდამწვევი ღრმულებით.



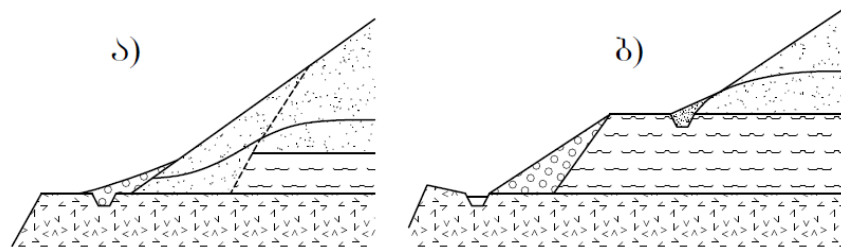
თუ ღია ქანებს შორის მოიძებნება საშუალო ან მსხვილ-მარცვლოვანი სილები, მაშინ შესაძლებელია მათი როგორც დამტვირთავი მასალის გამოყენება. ამ შემთხვევაში დატვირთვა წარმოებს სხვა სახით (ნახ. 4.15.დ.ე); დატვირთვის ასეთი ფორმა შეიძლება იყოს მიზანშეწონილი:

როცა ძნელია ქანობის დაცვა (დამტვირთავი მასალა შეიძლება ჩამოიყაროს უშუალოდ ჩამორეცხილ ქანობზე);

როცა ქანობი წყლის გამოდევნის შუალედის ზღვრებში იტვირთება ნაყარით;

როცა აუცილებელია ბერმის გამავალი ნაწილის გადიდება.

დაბალი წყალგამტარიანობის თიხნარი ქანების შემთხვევაში ბორტსგარე დრენაჟის სქემა მარტივდება: კალთა იტვირთება 1-2 მეტრის სისქის სილის ან შებენის ფენით, რომელიც იცავს ქანებს ჩამორეცხვისა და მეწყერისგან (ნახ. 4.16.ბ). სუსტად შემწოვი ქანების მცირე სიმძლავრის შემთხვევაში დატვირთვა შეიძლება შესრულდეს ზემოთ არსებული სილების ხარჯზე (ნახ. 4.16.ა).



ნახ. 4.16. თავისუფალი კალთების დაბალშემწოვი ქანებით დატვირთვის სქემა

ადგილზე სადრენაჟო პრიზმის მოსაწყობი მასალის უქონლობის შემთხვევაში, ასევე წყალსაყრდენი სახურავის ნიშნულების დიდი შუალედით ცვლილებისას, როცა გამწვანებულია თვითდინება, ბორტსგარე დრენაჟი შეიძლება შეიცვალოს ჰორიზონტალური ღრმულებით. 30-40 მეტრი და მეტი სიგრძის ღრმულები შეიძლება გაიხვრიტონ როგორც ბორტის განფენილობის წირის პერპენდიკულარულად, ასევე კუთხით მის მიმართ; ღრმულებს შორის დაშორება მიახლოებით მათი სიგრძის ტოლია.

წყალშემცველი ჰორიზონტებისთვის, როდესაც დიდი დინების გამო ქანობის დაცვა გაძნელებულია, უფრო მეტად რაციონალურს წარმოადგენს ბორტს-გარე დრენაჟის და ჰორიზონტალური ღრმულების შეხამება.

აუცილებელია აღინიშნოს მთის სამუშაოების პროექტირებასთან დაკავშირებული ორი მნიშვნელოვანი მომენტი:

1) იმის გამო, რომ თავისუფალ ბორტზე საიმედო დრენაჟი ხორციელდება როგორც წესი უფრო ადვილად და იაფად, ვიდრე მუშა ბორტზე, საჭიროა, შეძლებისდაგვარად, თავისუფალი ბორტი განლაგდეს წყლის ძირითადი ნაკადის მხარეს:

2) დრენაჟის და წყალგადამგდების ორგანიზაცია თავისუფალ ბორტზე მნიშვნელოვნად მარტივდება, წყალშემცველი ჰორიზონტის ძირის ნიშნულები ემთხვევა თავისუფალი ბერმის ნიშნულებს.

## ძირითადი დასკვნა

- 1) განხილულია გრუნტის ერთ, ორ და სამღერძა დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობა, გამოყვანილია ნორმალური და მხები ძაბვების შესაბამისი ფორმულები და მოცემულია გრაფიკულად - „მორის წრეების“ საშუალებით.
- 2) ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდოს სტატიკური მდგრადობა-არამდგრადობის ამოცანის შესწავლისას პირველადაა მოცემული ფერდოს ცილინდრულ ზედაპირზე ფერდოს მასივის სახიფათო დაცურების ზედაპირზე ჩამონაქცევის ამოცანის წმინდა ანალიზური ამოხსნა დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით, რაც არ მოითხოვს გრაფიკულ აგებს და იძლევა თანხვედრას ჩამონაქცევის ზედაპირის გრაფიკულად ანალიზურ მეთოდთან, რომელსაც გააჩნია სტატიკური მდგრადობის უმცირესი მარაგი.
- 3) შედგენილია ჩვეულებრივი პირველი რიგის დიფერენციალური განტოლება, რომელსაც აკმაყოფილებს მთის ქანების ფერდოს ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზღვრული წონასწორობის ზედაპირის ამსახველი მრუდის განტოლება, რომელშიც გათვალისწინებულია შეჭიდულობის კოეფიციენტი, ბუნებრივი ქანობის კუთხე, მოცულობითი წონა, აფეთქების წნევა და სეისმური ძალა. ამ პარამეტრების გარკვეული თანმიმდევრობისთვის დადგენილია ძვრის მარაგის კოეფიციენტი. კვადრატურებშია ამოწერილი ფერდოს მასის საშიში დაცურების ამსახველი მრუდის განტოლება.
- 4) გამოკვლეულია პირველი რიგის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება, მიღებულია დაცურების ზედაპირის ამსახველი ზღვრული წონასწორობის მრუდის განტოლება, მრუდის ნებისმიერი მიდამოსათვის სიმრუდის რადიუსისა და სიმრუდის ცენტრის გამოსათვლელი ფორმულები.
- 5) გამარტივებული მეთოდის გამოყენებით მიღებულია კლდოვან წრფივ ფერდოს მქონე ზედაპირზე სამკუთხა და ტრაპეციოდალური განიკვეთის მქონე ნაყარის ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტები.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Цытович. Механика грунтов. Изд. Высшая Школа. М.1993.
2. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Наука. 1979.
3. Петровский И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Наука. 1970.
4. გ. ხუციშვილი, ტ. კვიციანი, გ. გედენიძე. ფერდოს მდგრადობის შეფასება მდოვრე მრუდწირულ ზედაპირზე დაცურების შემთხვევაში. ჟურნალი „შრომები“. 2008.
5. გ. ხუციშვილი, ტ. კვიციანი, ვ. ფაჩულია, თ.გარდაფხაძე. ფერდოს ჩამონაქცევი პრიზმის საშიში დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა, ძალთა გარკვეული შეთანწყობის პირობებში. ჟურნალი „მშენებლობა“, 2008.
6. გია ხუციშვილი, ტარიელ კვიციანი, თამაზ გარდაფხაძე. ფერდოს ჩამოშვავებული მასის დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა და მისი გამოკვლევა დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით. „წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული“, 2009.
7. კვიციანი ტ. ფერდობის მდგრადობის გაანგარიშებისას საშიში დაცურების წირის ანალიზური განსაზღვრა. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების პროექტირების, მშენებლობისა და ექსპლუატაციისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სიმპოზიუმის შრომები. თბილისი. 2000.
8. Арсентьев А.И. Букин И.Ю. Мироненко В.А. Устойчивость бортов и осушение карьеров. Недра. 1992.
9. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. Стойиздат. 1998.
10. კვიციანი ტ. ფერდოს მდგრადობა და ზვავისებრი ნაკადები. ტექნიკური უნივერსტეტი. თბილისი. 2000.
11. Гидрогеологические исследования в горном деле. Недра, 1976.

12. Голицын В. В. Нахождение параметров открытой разработки с обрушением пород моделированием. Горный журнал. 1964.
13. Демин А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. Недра. 1973.
14. Ермаков Я. И. О влиянии кривизны борта на его устойчивость. Труды. 1964.
15. Звонарев И. К. Методика обоснования величины коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров. Труды. 1972.
16. Кобранова В. Н., Лепарская И. Д. Определение физических свойств горных пород. Гостоптехнздат. 1957.
17. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Недра. 1970.
18. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. Госэнсргопздат. 1955.
19. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. Стройиздат. 1968.
20. Маслов Н. И. Механика грунтов в практике строительства. Стройиздат. 1977.
21. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. ВНИМИ. 1972.
22. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом. ВНИМИ. 1965.
23. Методическое руководство по искусственному укреплению откосов скальных и полускальных пород на карьерах. ВПИЛА. 1967.
24. Мироненко В. Л., Шестаков Б. М. Основы гидрогеомеханики. Недра. 1974.
25. Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учалов В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Недра. 1980.
26. Мюллер Л. Инженерная геология. Мир. 1971.
27. Нурок Г. А. Гидромеханизация горных работ. Недра. 1965.
28. Определение главных параметров карьера / А. И. Арсентьев, О. В. Шпанский, Г. П. Константинов. Недра. 1976.

29. Основы управляемого обрушения уступов на открытых разработках / М. Г. Новожилов, Б. И. Тартаковский, В. Д. Кпрнлюк и др. Киев, Наукова думка, 1967.
30. Падуков Б. А. Методы прогноза устойчивости бортов карьеров.— В кн.: Физические процессы юркого производства. ЛГИ. 1979.
31. Писанец Е. П., Мироненко В. А. Волопокижение на карьерах КМА. М., Недра, 1908.
32. Пустовойтова Т. К-, Пашкевич А. В. К расчету предельной высоты отвалов на неустойчивом основании. Труды ВНИМИ. 1962.
33. Руководство по определению оптимальных углов наклона Портов карьеров и откосов отвалов. ВНИМИ. 1962.
34. Сапожников В. Т. Исследование и разработка методов расчета устойчивости бортов карьеров и отвалов в сложных горно-геологических условиях. Свердловск. ВНИМИ. 1973.
35. Сапожников В. Т. Расчет бортов погашения выпуклого профиля для открытых разработок полезных ископаемых. Горный журнал. 1960.
36. Соколовский В. В, Статика сыпучей среды. Фпзматгиз. 1960.
37. Справочное руководство гидрогеолога. Недра. 1967.
38. Турчанинов И. А., Медведев В. В., Панин В. П. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. Недра. 1967.
39. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Недра. 1965.
40. Фисенко Г. Л., Голицын В. В., Ириков С. П. Использование оползней при отработке вскрышп. Материалы совещания но вопросам изучения устойчивости откосов па карьерах. ВИОГЕМ. 1967.
41. Фисенко Г. Л., Мироненко В. А. Дренаж карьерных полей. Недра. 1972.
42. Фисенко Г. Л., Ревазов М. А., Галцстьян Э. Л. Укрепление откосов в карьерах. Недра. 1974.
43. Цытович И. А. Механика грунтов. Высшая школа. 1968.

## დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია

### შემდეგ ნაშრომებში:

1. ტ. კვიციანი, გ. გედენიძე, გ. ხუციშვილი. „ფერდოს მდგრადობის შეფასება მდოვრე მრუდწირულ ზედაპირზე დაცურების შემთხვევაში“. ჟურნალი „შრომები“(№ 4(470) 2008).
2. ტ. კვიციანი, ვ. ფაჩულია, თ.გარდაფხაძე, გ. ხუციშვილი. „ფერდოს ჩამონაქცევი პრიზმის საშიში დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა, ძალთა გარკვეული შეთანწყობის პირობებში“. ჟურნალი „მშენებლობა“ (№ 3(10) 2008).
3. ტარიელ კვიციანი, თამაზ გარდაფხაძე, გია ხუციშვილი. „ფერდოს ჩამოშვავებული მასის დაცურების წირის დიფერენციალური განტოლების შედგენა და მისი გამოკვლევა დამატებითი დატვირთვების გათვალისწინებით“. „წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული“ (№ 64 2009).
4. 83-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი 2015.