

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გია ხუციშვილი

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

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“ შიფრი 0406

თბილისი 2015 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში,  
სამშენებლო ფაკულტეტზე,  
სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობის დეპარტამენტში.

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი ტარიელ კვიციანი

რეცენზენტები: პრ. დ. ბურდულაძე  
პრ. ნ. შავლაყაძე

დაცვა შედგება 2015 წლის 24 ივლისს 12 საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის  
სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, I სასწავლო კორპუსი,  
სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია III სართული.  
მისამართი: თბილისი 0175, კოსტავას 72.

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

სადისერტაციო საბჭოს

სწავლული მდივანი:

სრული პროფესორი დ.ტაბატაძე

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალურობა:** მთის რეგიონებისათვის ისეთი, როგორც საქართველოს ტერიტორიის 3/4 ნაწილია, ხშირია მთის ქანების ფერდობების სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის დაკარგვის შემთხვევები, რაც იწვევს ფერდობების 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. ფერდობების 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 ფერდობების 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, ფერდობების 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 ფერდობების მდგრადობის პარამეტრე-

ბის უფრო სრულყოფილი საანგარიშო მეთოდოლოგიის შექმნა დღესაც ფრიად აქტუალურ პრობლემად რჩება.

ფერდოების სტატიკური მდგრადობა-არამდგრადობის ამოცანების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს მეწყერ-ჩამონაქცევების პროგნოზირებისათვის. ფერდოს მდგრადობის ანალიზი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ჰიდრო-ტექნიკურ და სატრანსპორტო მშენებლობაში. ასეთი ობიექტების ფერდოების ჩამოშლა გამოწვეულია მოძრაობით მიწაყრილში, ბუნებრივ ფერდოში ან ორივე ადგილზე ერთდროულად. დღემდე აქტუალურად რჩება ამოცანები ფერდოს მდგრადობის შეფასების მეთოდების, ფერდოების კონტროლისა და სტაბილიზაციისათვის აუცილებელ ღონისძიებების შემუშავების შესახებ.

პრაქტიკაში გავრცელებულ ამოცანად გვევლინება ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდოების სტატიკური და დინამიკური მდგრადობა-არამდგრადობის შესწავლა, მიწის კაშხლების და ფერდოების მოწყვეტის (მეწყერ-ჩამონაქცევების) პროგნოზირება, ბორტების და გამონაშვერი ფრაგმენტების ჩამონგრევა-ჩამოშვავების წარმოშობის საშიშროების შეფასება დამატებითი დატვირთვების ფილტრაციული, სეისმური, აფეთქებითი და სხვა დროებითი დატვირთვებით გამოწვეული ძალების გათვალისწინებით. ნაშრომში განიხილება ისეთი აქტუალური საკითხები, როგორცაა მთის ქანების ფერდოების მდგრადობა-არამდგრადობის ამოცანები.

ცხადია, რომ ყველა შემთხვევაში საინჟინრო პრაქტიკაში პირველ ადგილზე დგას მეწყერების წარმოშობის შესაძლებლობის პროგნოზირება, ე.ი. ფერდოების მდგრადობა-არამდგრადობის წინხედვა.

**სამუშაოს მიზანი:** დამუშავებული იქნეს ფერდოების მდგრადობის გაანგარიშების ახალი სრულყოფილი, პროექტირებაში მარტივად გამოყენებადი მეთოდები, რომლებიც დაფუძნებულია ფერდოს დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრაზე, გრუნტის ამა თუ იმ მათემატიკური მოდელის გამოყენებაზე ყველა მოქმედი ძალის მკაცრი გათვალისწინებით, ასევე გრუნტის თვისებების მაჩვენებელთა ცვალებადობის გათვალისწინე-

ბით და დაცურების სავარაუდო ზედაპირების ფორმისა და მდებარეობის პოვნით.

კვლევის მიზანს წარმოადგენს დამუშავებული ახალი მეთოდიკის საფუძველზე ადგილობრივი ბუნებრივი (ტოპოგრაფიული, გეოლოგიური, ჰიდროლოგიური, კლიმატური, სეისმური და სხვ.) პირობების გათვალისწინებით განხორციელდეს მეწყერ-ჩამონაქცევების სტაბილიზაციის უზრუნველსაყოფად ოპტიმალური საინჟინრო ღონისძიებები.

ნაშრომში პირველადაა განხილული და გაანალიზებული ყველა პრაქტიკაში გამოყენებული ფერდობების მდგრადობის დაკარგვით გამოწვეული მეწყერ-ჩამონაქცევების წარმოშობის საწინააღმდეგო საინჟინრო ღონისძიებების გამოყენების სფერო.

**ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა და კვლევის ობიექტი:** საქართველოში, როგორც მთაგორიან ქვეყანაში რთულ გეოგრაფიულ პირობებში (დიდი დამრეცობის მქონე, ხშირად დამეწყრილ ფერდობზე) ხდება მრავალი მამტაბური პროექტის განხორციელება, როგორებიცაა: სარკინიგზო და საავტომობილო მაგისტრალების 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 მ 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 დამეწყრილ მონაკვეთს შეიცავს. უნდა აღინიშნოს, რომ აჭარის მთიანეთის მეტი ნაწილი დამეწყრილია. ამიტომ, ამ რეგიონიდან მოსახლეობის დიდი ნაწილი იძულებული გახდა სხვა რეგიონში გადასახლებულიყო. საქართველოს რამოდენიმე რე-

გიონში ხორციელდება სამთო-საბადოების ღია კარიერული დამუშავება სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვების მიზნით. ასევე, ხორციელდება ჰიდრო-ტექნიკური ნაგებობების მშენებლობა.

თამამად შეიძლება ითქვას, რომ საქართველოს მასშტაბით, აღნიშნული პრობლემების გადასაწყვეტად თითქმის არ ტარდება სავსე დაკვირვებითი და თეორიულ-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 მაგისტრალზე ფერდობების მდგრადობის შესაფასებლად საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ 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 მიმდებარე, რის შედეგადაც ფერდობის სტატიკური მდგრადობის პირობა ირღვევა და წარმოიშობა მეწყერ-ჩამონაქცევის 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.

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

## ნაშრომის შინაარსი

**პირველი თავში** განხილულია მთის ქანების სიმკვრივეული 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.

სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვების თუ სატრანსპორტო მაგისტრალების და ჰიდროტექნიკური ნაგებობის მშენებლობის დროს საქმე გვაქვს მთის ქანებთან, რომელთა თვისებებიც საგრძნობლად მოქმედებენ მთის სამუშაოების ეფექტურობაზე და უსაფრთხოებაზე.

კარიერში ხალხის და აღჭურვილობის უსაფრთხო მუშაობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია მის კიდეებსა და კალთებს მიეცეს ისეთი დახრის კუთხე და ფორმა, რომელიც უზრუნველყოფს მის მდგრადობას.

იმ შემთხვევაში, თუ არ ხერხდება ბუნებრივი ქანობის მდგრადობის უზრუნველყოფა, აუცილებელია გამოყენებული იქნას მის გასამაგრებლად ხელოვნური საშუალებები.

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

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



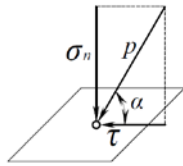
საინჟინრო პრაქტიკაში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ისეთი ამოცანების გადაჭრას, როგორცაა, მაგალითად: ბუნებრივი ფერდობების მდგრადობის შემოწმება, გრუნტის მასების ჩამოშვებისა და მეწყერული ხასიათის მოვლენების წარმოშობის პროგნოზები: დიდი ზომის ქვაბულების, საგზაო ყრილებისა და თხრილების, მიწის კაშხლებისა და დამბების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

ასეთი ამოცანების გადაწყვეტას საფუძვლად უდევს გრუნტების ზღვრული დამაბულობის 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 დამაბულობის თეორიის მეშვეობით, არამედ წინასწარი გარკვეული დაშვებებით. ასეთ ამოცანებში გრუნტების გადაადგილების ზედაპირის ფორმა ან განსაზღვრულია ბუნებრივი პირობებით, ან დაინიშნება პრაქტიკით მიღებული გამოცდილების საფუძველზე.

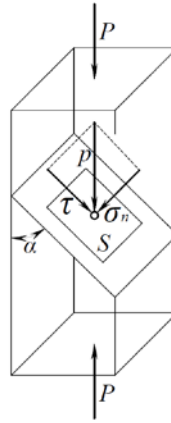
განვიხილოთ 1 ნახაზზე მოყვანილი მოდელი. მოცემულ სიბრტყისადმი  $\alpha$  კუთხით დახრილი  $P$  ძაბვა შეიძლება დაიშალოს ნორმალურ  $\sigma_n$  და მხებ  $\tau$  მდგენელად.

$$\begin{aligned}\sigma_n &= p \sin \alpha; \\ \tau &= p \cos \alpha.\end{aligned}\tag{1}$$

თუ განვიხილავთ ძაბვებს ელემენტარულ ბლოკის  $S$  კვეთში, რომელზედაც მოქმედებს ორი ურთიერთ საწინააღმდეგოდ მიმართული  $\vec{P}$  ძალა, რომელთა მიმართულებაც ემთხვევა ბლოკის ღერძის მიმართულებას (ნახ. 2), მაშინ ძაბვა ბლოკის განივ კვეთში ტოლი იქნება



ნახ. 1. ძაბვა ელემენტარულ სიბრტყეზე



ნახ. 2. ძაბვა ელემენტარულ ბლოკში

$$\sigma_1 = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

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

$$p = \sigma_1 \sin \alpha. \quad (3)$$

ამ სიბრტყისთვის მხები და ნორმალური ძაბვები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_1 \sin^2 \alpha; \\ \tau &= \sigma_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

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.

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  $\sigma_0$ -ზე ერთდერძა კუმშვისას სიმტკიცეზე და  $\sigma_1$ -ის სიდიდეზე

$$\sigma_2 = \sigma_3 = f(\sigma_0; \sigma_1; E; \nu).$$

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.

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 (4) გამოსახულების თანახმად

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

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

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

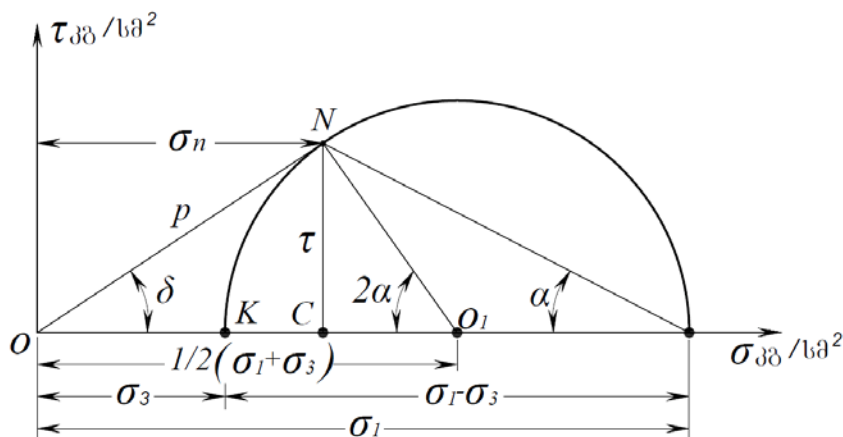
სიბრტყეზე  $\sigma_2$ -ის პარალელურად მიმართული ჯამური მხები და ნორმალური ძაბვები ტოლი იქნება

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha; \quad \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \quad (5)$$

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. „შორის წრეები“).

მართკუთხა კოორდინატა სისტემის (ნახ. 3) აბსცისთა ღერძზე გადავზომოთ ნორმალური  $\sigma_n$  ძაბვები, ხოლო ორდინატა ღერძზე  $\tau$  მხები ძაბვები, კოორდინატა სათავიდან 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 კოორდინატა სათავეს და  $N$  წერტილს, ამ სიბრტყის მთლიანი ძაბვის ტოლია ამ სიბრტყეზე და მიმართულია  $\delta$  კუთხით ნორმალთან.



ნახ. 3. ძაბვების განსაზღვრა გრაფიკულად.

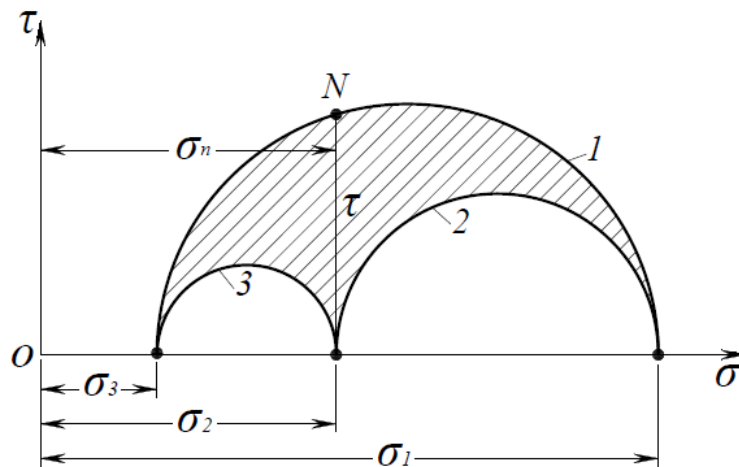
3 ნახაზიდან მივიღებთ:

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

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, აგებულ მთავარ ძაბვებზე ( $N$  წერტილი. ნახ. 4).

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

$$\sigma_{n \max} = \sigma_1; \quad \sigma_{n \min} = \sigma_3; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (6)$$



ნახ. 4. მთავარ ძაბვების მიმართულებასთან პარალელურ სიბრტყეებზე არსებული ძაბვების გრაფიკული გამოსახვა.  
1, 2, 3 - ძაბვების წირები.

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

$$T = fN + KS ; \quad (7)$$

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

$$\tau = f\sigma_n + K . \quad (8)$$

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

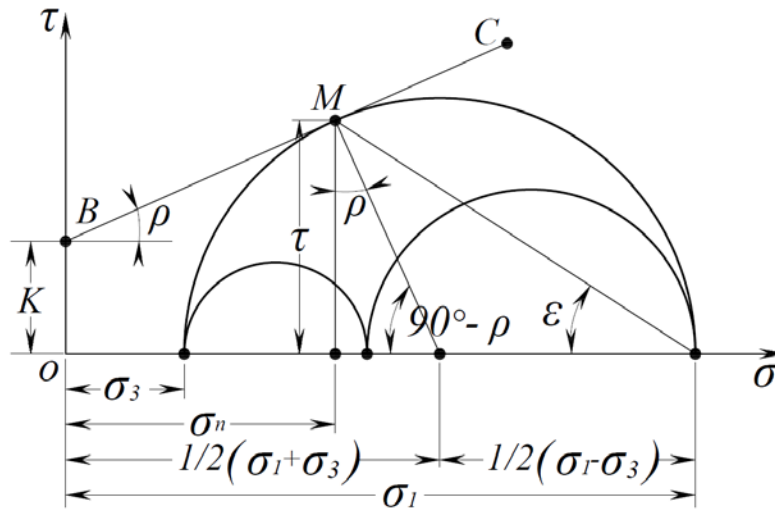
1) როცა ზღვრული დაძაბული მდგომარეობის პირობა კმაყოფილდება მასივის რომელიღაც მიდამოს ნებისმიერ წერტილში;

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.

5 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 წინააღობის მახასიათებელი  $\rho$  და  $K$  სიდიდეები.



ნახ. 5. 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.

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

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + \sigma_3 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) \quad (9)$$

თუ  $\sigma_3 = 0$ , მაშინ

$$\sigma_1 = \sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \quad (10)$$

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

**მესამე თავში** მოყვანილია ფერდოს გრუნტის დაცურების ზედაპირის სახეობების და კიდეების ჩამოშლის (მეწყერის) მიმიხილვა, 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  $\bar{P}$  წნევის ძალის ჰორიზონტულ მდგენელს 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.

მე-6 ნახაზზე მოყვანილია ფერდოს მასის საშიში დაცურების ზედაპირის (წირის) განსაზღვრავი 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 (ნახ. 6), რომელიც შემდეგი ფორმულით მოიცემა:

$$a = \frac{2H \left[ 1 - \operatorname{ctg} \theta \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\theta + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{tg} \left( \frac{\theta + \varphi}{2} \right)}, \quad (11)$$



სადაც  $H$  – არის ფერდოს სიმაღლე, მ;

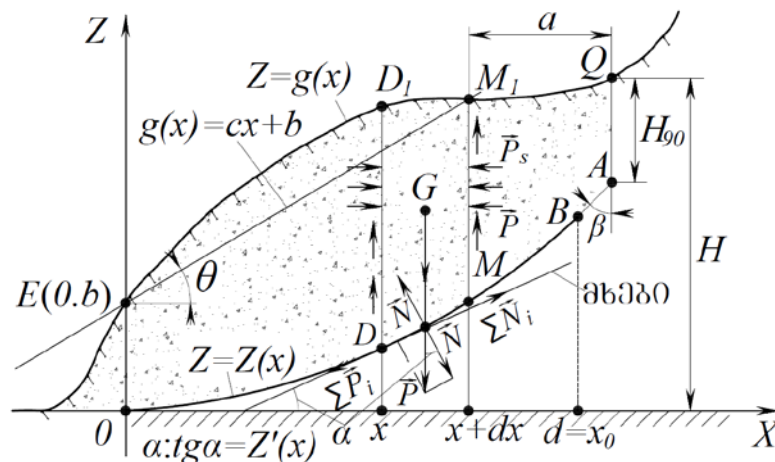
$\theta - g(x)=cx+b$  წრფის ფერდოს ჰორიზონტთან დახრის კუთხე;

$\varphi$  – შიგა ხახუნის კუთხე, გრად.

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

სადაც  $\gamma$  - არის მოცულობითი წონა, ნ/სმ<sup>2</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. 6).



ნახ. 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:

$$S = |DD_1| \cdot dx = (g(x) - z(x)) \cdot dx, \quad (12)$$

$$L = \sqrt{1+[z'(x)]^2} \cdot dx. \quad (13)$$

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

$$\bar{G} + \bar{P} + \bar{P}_s + f\bar{N} + \bar{K}L = 0. \quad (14)$$

**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 (14) განტოლება  $L$  რკალის სიმძიმის ცენტრზე გავლებულ მხებზე, (ნახ. 6) გვექნება:

$$G \sin \alpha + P \cos \alpha + P_s \cos \alpha - Gf \cos \alpha - KL = 0. \quad (15)$$

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

$$G = \gamma \cdot s \cdot 1 = \gamma[g(x) - z(x)] \cdot dx. \quad (16)$$

ფერდოს მასივზე მოქმედი აფეთქების ძალის სიდიდე შეიძლება შევაფასოთ შემდეგი ფორმულით:

$$P = 0,36 \cdot \frac{Q^2}{R^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{u \cdot E^5}{\gamma}} = m \cdot G. \quad (17)$$

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

$$P_s = C_s \cdot G, \quad (18)$$

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.

(13), (16), (17) და (18) გამოსახულებების გათვალისწინებით (15) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\gamma [g(x) - z(x)] dx \frac{z'(x)}{\sqrt{1+z'^2(x)}} + \gamma (m_s + c_s - f) [g(x) - z(x)] dx \cdot \frac{1}{\sqrt{1+z'^2(x)}} - K \sqrt{1+z'^2(x)} dx = 0. \quad (19)$$

$K=K(h)$  – 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. ქვიშნარებში კი შეჭიდულობა 1,8-2,0-დან იზრდება 40-45 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ (12), (13) და (16) ტოლობები სრულდებიან მაღალი რიგის უსასრულო მცირის სიზუსტით, ვიდრე დახრილ, ფერდოს მასივის დაცურების ზედაპირის  $z = z(x)$  მრუდის განსასაზღვრავად (19)-დან მივიღებთ პირველი რიგის შემდეგ არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებას:

$$K(h) \cdot z'^2(x) - \gamma [g(x) - z(x)] \cdot z'(x) - \gamma(m + c_s - f)[g(x) - z(x)] + K(h) = 0. \quad (16)$$

თუ (16) განტოლებას ამოვხსნით, როგორც კვადრატულს  $z'(x)$ -ის მიმართ, მივიღებთ:

$$z'_{1,2}(x) = \frac{\gamma [g(x) - z(x)] \pm \sqrt{\gamma^2 [g(x) - z(x)]^2 - 4K(h) \{K(h) - \gamma(m + c_s - f)[g(x) - z(x)]\}}}{2K(h)}. \quad (20)$$

**შენიშვნა 4.** ქვემოთ ჩვენ შემოვისაზღვრებით მხოლოდ (20) ფორმულით განსაზღვრული  $z'_1(x)$  ფესვის „+“ ნიშნის შემთხვევით, თუმცა  $z'_2(x)$  ფესვის „-“ ნიშნის შემთხვევაც განიხილება ფესვზე ჩატარებული კვლევის ანალოგიურად.

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

$$h'(x) = g'(x) - \frac{\gamma h(x) + \sqrt{\gamma^2 h^2(x) - 4K(h) [K(h) - \gamma(m + c_s - f) \cdot h(x)]}}{2K(h)}. \quad (21)$$

ამასთან, იმის ძალით, რომ  $z(0) = 0$  (ნახ. 4), ამ განტოლების  $h(x)$  ამონახსნი აკმაყოფილებს შემდეგ საწყის პირობას:

$$h(0) = g(0). \quad (22)$$

მაშასადამე  $h = h(x)$  ფუნქცია წარმოადგენს (21), (22) 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

$$K(0) = 0. \quad (23)$$

(23)-ის ძალით და იმის გამო, რომ  $K(h)$  შედის (21) განტოლების მარჯვენა მხარის მნიშვნელში, ეს განტოლება საზოგადოდ შეიცავს სინგულარულ წევრს.

(21) განტოლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$h' = F(x, h), \quad (24)$$

სადაც

$$F(x, h) = g'(x) - \frac{\gamma h + \sqrt{\gamma^2 h^2 + 4\gamma K(h) \cdot h(m + c_s - f) - 4K^2(h)}}{2K(h)}. \quad (25)$$

ქვემოთ ცხადი მოსაზრების გამო ვიგულისხმობთ, რომ

$$g(x) > 0, g'(x) \geq 0, \text{ როცა } 0 < x \leq d + l \sin \beta. \quad (26)$$

**შენიშვნა 5.** რადგან  $g(x) \geq z(x)$ , ჩვენთვის საინტერესო იქნება მხოლოდ (24), (22) ამოცანის არაუარყოფითი  $h(x) = g(x) - z(x) \geq 0$  ამონახსნი. ამასთან აქედან გამომდინარე (20)-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 (25) ფორმულით მოცემული  $F(x, h)$  ფუნქცია არ არის დამოკიდებული  $x$  ცვლადზე და აქვს შემდეგი სახე:

$$F(h) = c - \frac{\gamma h + \sqrt{\gamma^2 h^2 + 4\gamma h K(h)(m + c_s - f) - 4K^2(h)}}{2K(h)}, h > 0. \quad (27)$$

ამიტომ (19) დიფერენციალური განტოლება ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$h' = F(h). \quad (28)$$

ხოლო იმის გამო, რომ  $g(x) = cx + b$ , (22) საწყისი პირობა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$h(0) = b. \quad (29)$$

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

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)}, h > 0, \quad (30)$$

$$\Phi(v) = c - \frac{1}{2} \left( \gamma v + \sqrt{\gamma^2 v^2 + 4\gamma(m + c_s - f)v - 4} \right), v > 0. \quad (31)$$

ცხადია, რომ

$$f(h) = \Phi(v), v = K_1(h). \quad (32)$$

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

$$\begin{cases} \gamma^2 v^2 + 4\gamma \cdot A \cdot v - 4 \geq 0 \\ v > 0 \end{cases} \Leftrightarrow v \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2 + 1} - A}{\gamma}, \quad (33)$$

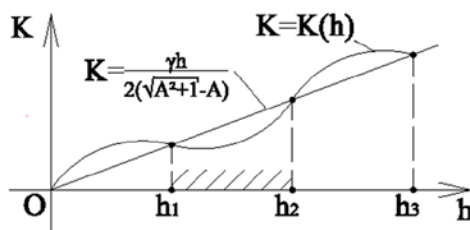
სადაც  $A = m + c_s - f$ .

(30)-(33)-ის ძალით  $f(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე მოიცემა შემდეგი უტოლობით (ნახ. 7. დაშტრიხული სეგმენტები):

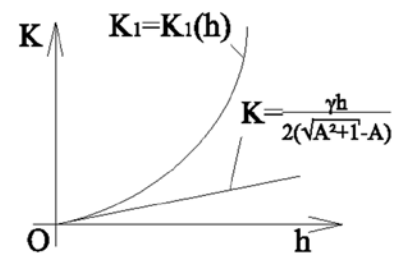
$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)} \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2 + 1} - A}{\gamma}. \quad (34)$$

აღსანიშნავია, რომ შეჭიდულობის ამსახველი  $K=K(h)$  ფუნქცია აკმაყოფილებს შემდეგ პირობას (ნახ. 8)

$$K(h) > \frac{\gamma h}{2[\sqrt{A^2 + 1} - A]}, h > 0. \quad (35)$$



ნახ. 7



ნახ. 8

მაშინ (34)-ის თანახმად  $F(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე წარმოადგენს ცარიელ სიმრავლეს და მაშასადამე ამ შემთხვევაში ფერდო სტატიკურად მდგრადია და მეწყერ-ჩამონაქცევის მოვლენას ადგილი არ ექნება.

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

ახლა შევნიშნოთ, რომ  $\sqrt{A^2+1}-A > 1$ , როცა  $A < 0$ . განვიხილოთ შემთხვევა, 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. (29)-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 (31)-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

$$v \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma}. \quad (36)$$

(30)-(32), (34) და (36) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ  $f(h) < 0$ , როცა

$$K_1(h) = \frac{h}{K(h)} \geq 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma}. \quad (37)$$

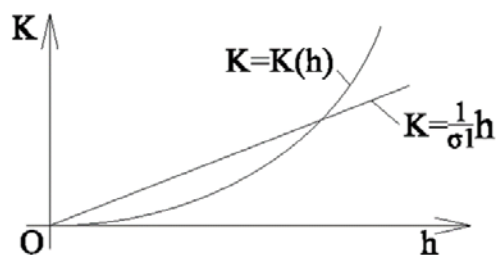
შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$\sigma_1 = 2 \cdot \frac{\sqrt{A^2+1}-A}{\gamma}. \quad (38)$$

ა) განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც  $K_1(h)$  ფუნქცია მონოტონურად კლებადია და მისი მნიშვნელობათა არე არის  $I=(0, +\infty)$  (ნახ. 9 და 10).



ნახ. 9



ნახ. 10

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

$$K_1(h)=\sigma_1. \quad (39)$$

სადაც  $\sigma_1$  მოცემულია (38) ტოლობით, გააჩნია მხოლოდ ერთი  $h=h_1 > 0$  ამონახსნი (ნახ. 9). აქედან გამომდინარე

$$K_1(h) \geq \sigma_1, h > h_1 \Leftrightarrow 0 < h \leq h_1, \quad (40)$$

ე.ი. (34)-ის ძალით  $F(h)$  ფუნქციის არე მოიცემა (40) ინტერვალით, სადაც (37) უტოლობიდან გამომდინარე ეს ფუნქცია უარყოფითია.

(40) უტოლობის თანახმად, როდესაც  $0 < b \leq h_1 - (0, b)$  წერტილზე გადის (28) ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლების ერთადერთი ინტეგრალური წირი (ე.ი. (28), (29) კომის ამოცანის  $h=h(x)$  ამონახსნის გრაფიკი), რომელიც აღიწერება შემდეგი განტოლებით:

$$x = \int_b^h \frac{1}{f(\xi)} d\xi. \quad (41)$$

რადგან  $f(h) < 0$ , როცა  $0 < h \leq h_1$ , ამიტომ (28) განტოლების ინტეგრალური წირი, რომელიც აღიწერება (41) განტოლებით წარმოადგენს მონოტონურად კლებადი ფუნქციის გრაფიკს, რომლისთვისაც  $Ox$  ღერძი იქნება ჰორიზონტალური ასიმპტოტი, მხოლოდ შემდეგი

$$\int_b^0 \frac{1}{f(\xi)} d\xi, \quad (42)$$

ინტეგრალის განშლადობის შემთხვევაში. ადვილად მტკიცდება, რომ (42) ინტეგრალი კრებადია და (41) განტოლებით მოცემული ინტეგრალური

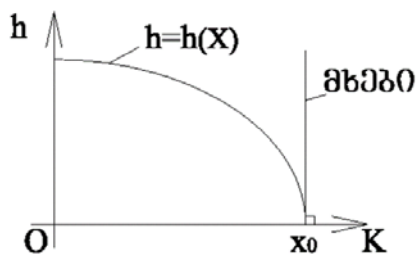


წერი  $Ox$  ღერძს გადაკვეთს სასრულ  $h_0 > 0$  წერტილში, რომელიც მოიცემა განტოლებით:

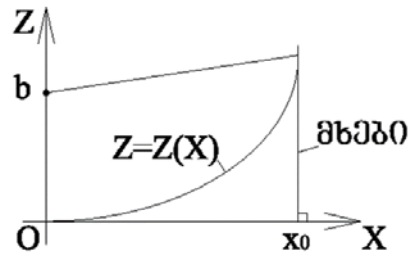
$$x_0 = \int_b^0 \frac{1}{f(\xi)} d\xi. \quad (43)$$

ზემოთქმულიდან გამომდინარე  $h=h(x)$  და  $z=z(x)=g(x)-h(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს აქვთ 11 და 12 ნახაზებზე წარმოდგენილი სახე:

**შენიშვნა 6.** რადგან  $F(h)$  განსაზღვრის არე, მოიცემა  $0 < h \leq h_1$  შუალედით, ამიტომ, როდესაც  $b > h_1$ , მაშინ (28), (29) კოშის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი და მაშასადამე  $O$  წერტილზე არ გადის ფერდოს ჩამონაქცევი მასის საშიში დაცურების ზედაპირის ამსახველი  $z=z(x)$  წერი.

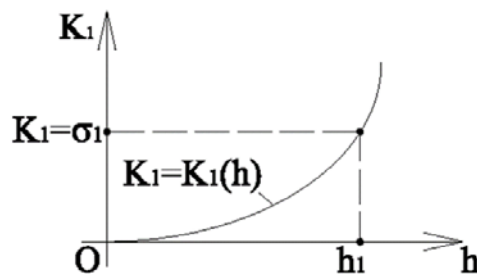


ნახ. 11

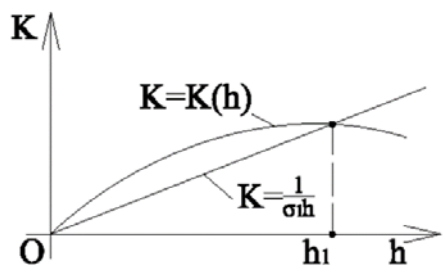


ნახ. 12

ბ) ახლა განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც  $K_1(h) = \frac{h}{K(h)}$  ფუნქცია მონოტონურად ზრდადია და მისი მნიშვნელობათა არე  $I=(0,+\infty)$  (ნახ. 13 და 14).



ნახ. 13



ნახ. 14

ამ შემთხვევაში ანალოგიურად ზემოთ განხილულის,  $K_1(h)=\sigma_1$  განტოლებას გააჩნია მხოლოდ ერთი  $h=h_1 > 0$  ამონახსნი (ნახ.13) და

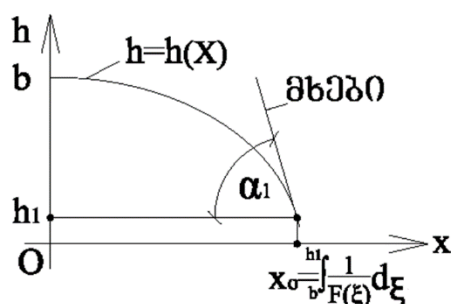
$$K_1(h) \geq \sigma_1, \quad h > 0, \quad \Leftrightarrow \quad h_1 \leq h < +\infty, \quad (44)$$

ე.ი. (34)-ის ძალით  $F(h)$  ფუნქციის განსაზღვრის არე მოიცემა  $(h_1, +\infty)$  ინტერვალით, სადაც (37) უტოლობიდან გამომდინარე ეს ფუნქცია უარყოფითია.

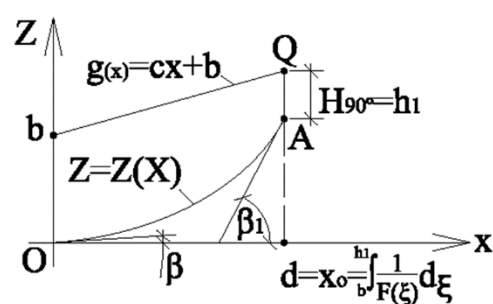
(44)-ის თანახმად, როცა  $b > h_1$ , მაშინ  $(0, b)$  წერტილზე გადის (28) დიფერენციალური განტოლების ერთადერთი ინტეგრალური წირი, რომელიც მოიცემა (41) განტოლებით. (44) და (37)-ის ძალით ეს ინტეგრალური წირი წარმოადგენს მონოტონურად კლებადი ფუნქციის გრაფიკს და განსაზღვრულია მხოლოდ  $h_1 \leq h \leq b$  შუალედში. რადგან  $v = \sigma_1$  წარმოადგენს  $\gamma^2 v^2 - 4\gamma A v - 4 = 0$  განტოლების ამონახსნს, ამიტომ (31), (32) და (39)-ის ძალით

$$F(h_1) = \Phi(K_1(h_1)) = \Phi(\sigma_1) = c - \frac{1}{2} \gamma \sigma_1. \quad (45)$$

აქედან გამომდინარე  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ 15 და 16 ნახაზებზე მოყვანილი სახე:



ნახ. 15



ნახ. 16

ამასთან  $h=h(x)$  ფუნქციის გრაფიკის მხები  $(x_0, h_1)$  წერტილში  $Ox$  ღერძთან ადგენს  $\alpha_1$  კუთხეს (ნახ. 15), რომლის ტანგენსი (45)-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 (44)-ის ძალით განსაზღვრულია მხოლოდ

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

წირიც განსაზღვრული იქნება მხოლოდ  $0 \leq x \leq x_0$  შუალედში და მაშასადამე ამ შემთხვევაში  $x_0=d$ , (ნახ. 6 და 16). ანალოგიურად მე-6 შენიშვნისა, როდესაც  $H_{90}=h_1$ , მაშინ (28), (29) კოშის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი.

ახლა განვიხილოთ  $K=K(h)$  ფუნქციის ყოფაქცევის შემთხვევა კონკრეტულ მაგალითზე, როდესაც  $K(h)=K_0 h^2$ ,  $K_0=\text{const}$ , (28), (29) კოშის ამოცანის  $h=h(x)$  ამონახსნის გრაფიკი აღიწერება შემდეგი განტოლებით:

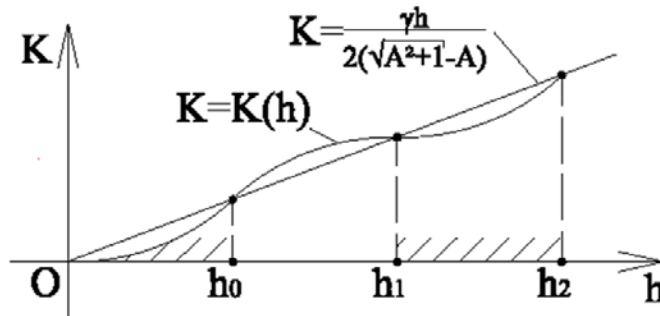
$$x = \frac{c}{c+1} \left[ h - b + \left( \frac{\gamma}{K_0} \cdot \frac{c-A}{c^2+1} - \frac{\gamma}{2K_0 c} \right) \cdot \ln \left| \frac{h - \frac{\gamma}{K_0} \frac{c-A}{c^2+1}}{b - \frac{\gamma}{K_0} \frac{c-A}{c^2+1}} \right| \right] - \frac{1}{2K_0} G \left( h + \frac{\gamma f}{2K_0}; m, l \right) - \frac{1}{2K_0} G \left( b + \frac{\gamma A}{2K_0}; m, l \right), \quad (46)$$

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

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

**შენიშვნა 8.** ზოგად შემთხვევაში  $K=K(h)$  ფუნქციის გრაფიკს შეიძლება ჰქონდეს 7 ან 17 ნახაზებზე მოყვანილი სახე, სადაც დაშტრიხული  $[h_1, h_2]$ ,  $[h_3, h_4]$ , ... სეგმენტებზე 15 ნახაზიდან და  $[0, h_0]$ ,  $[h_1, h_2]$ ,  $[h_3, h_4]$ , ... სეგმენტებზე 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 17 ნახაზიდან), მაშინ  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ 15 და 16 ნახაზებზე მოყვანილი სახე, რომლებშიც  $h_1$  შეიცვლება  $h_{2k-1}$ -ით, ხოლო როდესაც  $b \in [0, h_0]$  (ნახ. 17), მაშინ  $h=h(x)$  და  $z=z(x)$  ფუნქციების გრაფიკებს ექნებათ 11 და 12 ნახაზებზე მოყვანილი სახე.

როცა  $b$  არ ეკუთვნის დაშტრიხულ სეგმენტებს, მაშინ (28), (29) კოშის ამოცანას არ გააჩნია ამონახსნი და მაშასადამე  $O$  წერტილზე არ გადის ჩამონაქცევი მასის დაცურების ზედაპირის ამსახველი  $z=z(x)$  წირი.



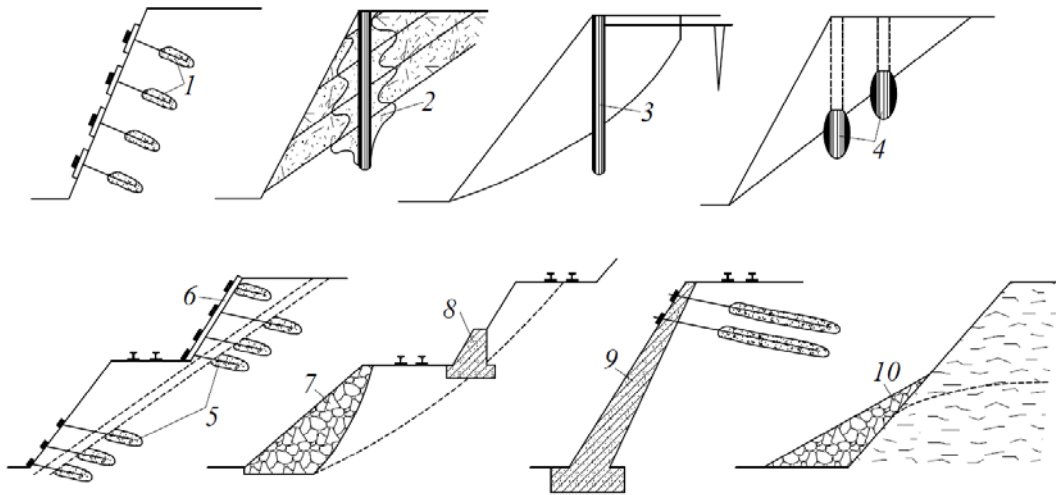
ნახ. 17.

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

გამაგრებულ მასივზე ზემოქმედების პრინციპით კარიერებზე ქანობების, ჰიდროტექნიკურ და სპეციალურ მშენებლობაში გამაგრების საშუალებები იყოფა ოთხ ძირითად ჯგუფად:

- 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 ეფუძვნება მთის ქანების მასივში ძაბვების გადანაწილებას (ნახ. 18). მიიღებენ რა გამაგრებული კონსტრუქციები და ნაგებობები ჩამოშლის პრიზმისგან გამოწვეულ დაწოლას, გადასცემენ ძვრისარმქონე ზონაში მასივის მდგრად ნაწილს.



ნახ. 18. 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.

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 მეწყერების გაფრთხილების, თიხოვანი ქანების და ფილტრაციული ქანობებისთვის – მეორეს.

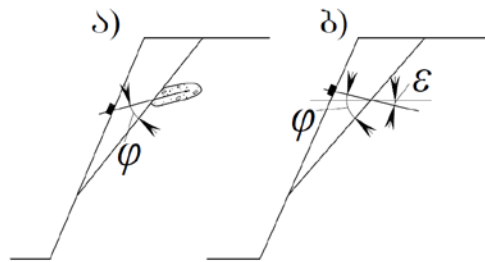
ყველაზე მეტად გავრცელებულია დაბზარული კლდოვანი ქანების ცემენტიზაციის მეთოდი, მაგრამ ისიც გამოიყენება კავშირების გამაგრებასა და ძელების მექანიკურ საშუალებებთან კომბინაციაში.

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

მუშაობის ხასიათის მიხედვით განასხვავებენ ჭიმვაზე და ჭრაზე მომუშავე ძელებს. უკანასკნელნი დაცურების ზედაპირის მიმართ ნორმალის მიმართულებით დგებიან, გააჩნიათ გადიდებული დიამეტრი და მზადდ-

ბიან 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. 19.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. 19.ბ) სამუშაოთა წარმოება მარტივდება, მაგრამ ამასთან ერთად ძელებს მიეცემათ საწყისი დაგრძელება.



ნახ. 19. შესუსტებული ზედაპირების მიმართ ძელების ორიენტირების სქემა

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 - ლითონ-პოლიმერული. კონსტრუქციული მოსაზრებით ისინი რკინაბეტონებისგან არ განსხვავდებიან.

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

ხიმინჯური სამაგრების ძირითად დამსახურებად ითვლება:

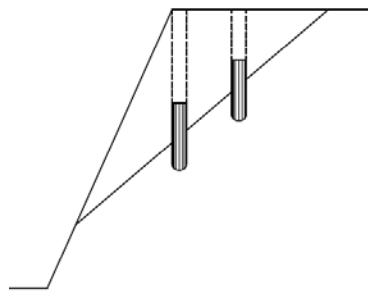
ა) ხიმინჯის მაღალი მზიდუნარიანობა (განსაკუთრებით ხისტი არმატურით), რომელმაც ჭრაზე ხიმინჯის მხები დატვირთვის მუშაობის დროს შეიძლება მიაღწიოს 100-150 ტონას;

ბ) ხიმინჯის აგების სიმარტივე;

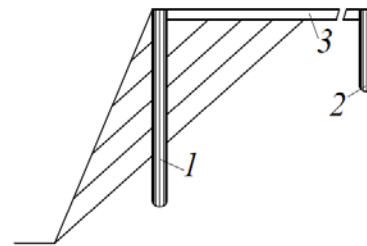
გ) სამუშაოების მთლიანი მექანიზირება, რაც გამაგრებითი სამუშაოების მაღალი მწარმოებლობის და თვითღირებულების შემცირების მიღწევის საშუალებას იძლევა;

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. ზოგიერთ შემთხვევაში მასალების ეკონომიისთვის მიზანშეწონილია ხიმინჯების მაგივრად რკინაბეტონის შპონების გამოყენება (ნახ. 20).



ნახ. 20. ღრმულების გაგანიერების გარეშე მათში ჩაყენებული რკინაბეტონის შპონები

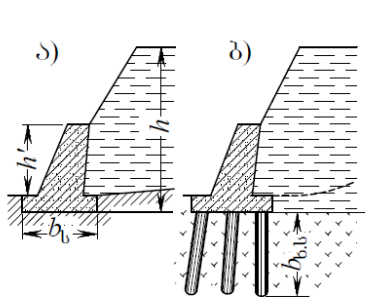


ნახ. 21. ღუნვადი რკინაბეტონის ხიმინჯების ჩაანკერების სქემა: 1 - ხიმინჯი; 2 - ანკერი; 3 - ანკერის მჭიმი.

მღუნავ ხიმინჯებს უნდა გააჩნდეთ ხიმინჯის მასალის ღრეკადობის მოდულის პროპორციული შესაძლო დიდი სიხისტე და მის კვეთის ინერციის მომენტი. ხიმინჯების ღუნვაზე წინააღმდეგობის გაზრდისთვის მათი ზედა ბოლოები ურღვევ მასივში ანკერებით ჩამაგრდებიან (ნახ. 21).

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. 22.ა) ან ხიმინჯოვან საძირკველზე  
(ნახ. 22.ბ).



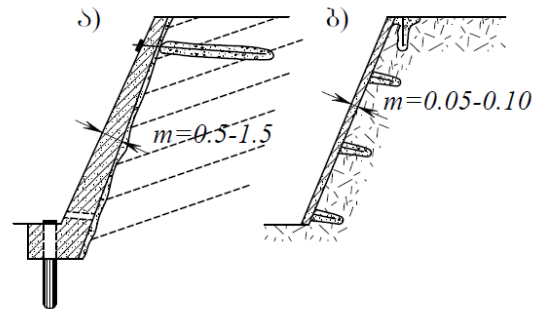
ნახ. 22. საყრდენი კედელი  
მტკიცე კლდოვან ფუძეზე  
და ხიმინჯოვან  
საძირკველზე;

$h$  - კალთის სიმაღლე;

$h'$  - კედლის სიმაღლე;

$b_s$  - საძირკვლის სიგანე;

$b_{b.s}$  - საძირკვლის ხიმინჯის  
ჩასობის სიღრმე.



ნახ. 23. რკინაბეტონის კედლები:

ა - საძირკველზე დამცავი;

ბ - ზრვევადი ცამოსაკიდი.

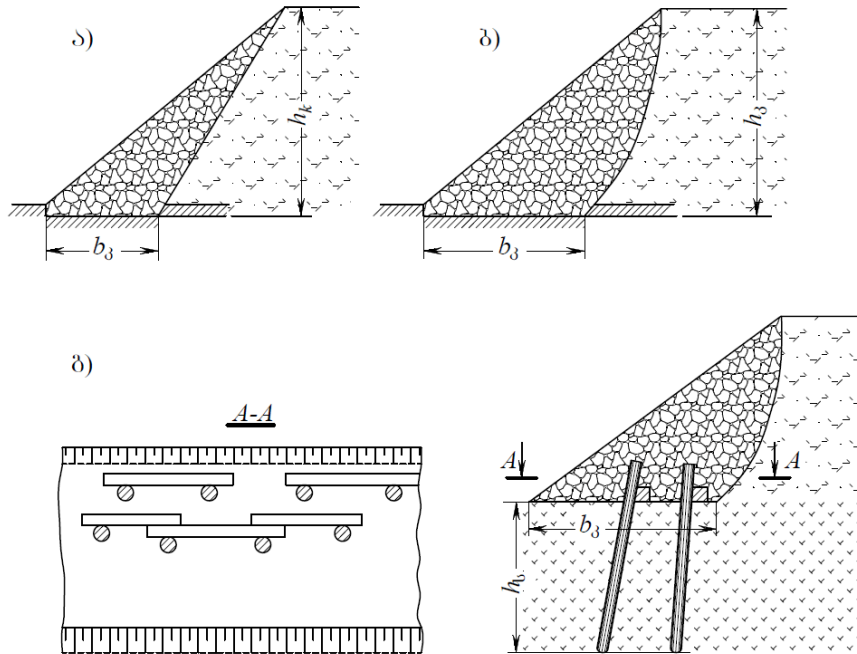
მასიური რკინაბეტონის საყრდენი კედლებისგან განსხვავებით დამცავ  
კედლებს გააჩნიათ მცირე სისქე (0.5-1.5 მ). ისინი გამოიყენებიან ქანობებში  
ინტენსიურად გამოფიტული ქანებისგან შემდგარი შეზღუდული მოცულო-  
ბის ჩამონგრევის და ჩამონაცვენის ლოკალური გამოცვენის თავიდან ასაცი-  
ლებლად.

დამცავი კედლების მდგრადობა უზრუნველყოფილია საძირკველის  
ჩაშენებით გამაგრებული კალთის ფუძეში და კედლის ზედა ნაწილის ჩაან-  
კერებით (ნახ. 23.ა).

თხელი 0.05-0.10 მ სისქის საკიდი კედლები იგება ჩამოცვენის თავიდან  
ასცილებლად (ნახ. 23.ბ).



კონტროლსებს გააჩნიათ იგივე ფუნქცია, რაც საყრდენ კედლებს, მაგრამ საყრდენი კედლებისგან განსხვავებით, შედარებით იაფ ნაგებობებს წარმოადგენენ (ნახ. 24.ა).



ნახ. 24. კლდოვანი ქანების კონტროლსები:

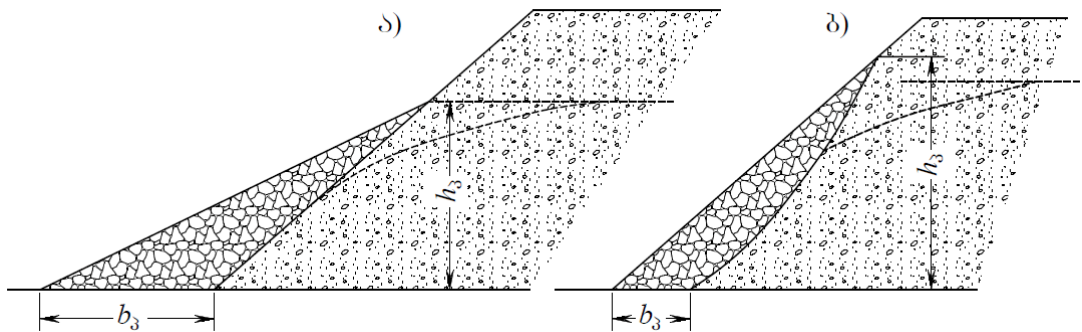
ა და ბ - მტკიცე კლდოვან ფუძეზე დაყრილი; გ - ხიმინჯოვან საძირკველზე დაყრილი;  
 $h_3, b_3$ - კონტროლსის ფუძის სიმაღლე და სიგანე;  $h_0$  - საძირკველის ხიმინჯის ჩასობის სიღრმე.

სიგანის შესანარჩუნებლად ახდენენ ფხვიერი ქანების ნაწილობრივი ამოღებასა და კლდოვანით ჩანაცვლებას (ნახ. 24.ბ).

როგორც წესი კონტროლსებს არ გააჩნიათ საძირკვლები ამ სიტყვის პირდაპირი გაგებით, მიუხედავად ამისა დაიყრებიან სპეციალურად მომზადებულ ფუძეზე. თუ მეწყერის ფუძეში განლაგებულია კლდოვანი ან ნახევრად-კლდოვანი ქანები, მაშინ 1-1.5 მეტრზე მათ აფხვიერებენ ბურღ-ფეთქებადი სამუშაოებით. გადაადგილებას დაქვემდებარებულ სუსტი ქანების არსებობის შემთხვევაში, ახდენენ ამოღებას ისეთ სიღრმეზე, რომ კონტროლსის ფუძე არ დაემთხვეს დაცურების ზედაპირს. ძვრის თავიდან ასაცილებლად კონტროლსის ფუძეში კონტროლსს დაყრიან სპეციალურად მომზადებულ ხიმინჯოვან საძირკველზე. საძირკველი წარმოადგენს ვერტიკალურ ხიმინჯების რიგს. კალთის ფუძეში ჩაასობენ ნაწილობრივ 2-

2.5 მეტრზე ამოშვერილი ხიმინჯებს, ზედა ბოლოებს შეაერთებენ რკინაბეტონის რიგელებით. ამ ფუძეზე წარმოებს კლდოვანი ქანების დაყრა (ნახ. 24.გ).

ფილტრაციული მასალის დაყრა შეიძლება მოხდეს კალთის ზედაპირზე ფხვიერი ქანების ამოღების გარეშე. ამ შემთხვევაში განივ კვეთში დატვირთვას სამკუთხა პრიზმის ფორმა აქვს (ნახ. 25.ა). ფხვიერი ქანების ნაწილის ამოღების და ფილტრაციული მასალებით ჩანაცვლების დროს კალთის ქანობის კუთხე ხშირად მასალის ბუნებრივი ქანობის კუთხის ტოლია. საიდანაც მოიხსნება დატვირთვა (ნახ. 25.ბ).



ნახ. 25. ქანობების დრენირებული მასალებით დატვირთვა:

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

## დასკვნა

- 1) განხილულია გრუნტის ერთი, ორი და სამღერძა დაძაბული 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.

**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.

## **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 static 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.