

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მამული სულაძე

„ნატანებ ჰესის“ გაანგარიშება რღვევის მექანიკის  
მეთოდების გამოყენებით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „მშენებლობა“

შიფრი 0406

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თვე, 2019 წელი

საავტორო უფლება © წელი, სულაძე მამული

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით სულაძე მამულის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ნატანებ ჰესის“ გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელები:

პროფესორი

დ. გურგენიძე

პროფესორი

ლ. კახიანი

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წელი

ავტორი: სულაძე მამული

დასახელება: „ნატანებ ჰესის“ გაანგარიშება რღვევის მექანიკის  
მეთოდების გამოყენებით

ფაკულტეტი : სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორის აკადემიური ხარისხი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ  
ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის  
შემთხვევაში 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  
უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა  
ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ  
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია  
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს  
პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

საქართველოში ჰიდროენერგეტიკის განვითარება არის ქვეყნის სტრატეგიული მნიშვნელობის ამოცანა. ჩვენი ამოცანაა რეგიონის ენერგეტიკულ სექტორში საქართველოს ენერგოსისტემის ლიდერად ჩამოყალიბება. ჰიდროენერგეტიკის განვითარებას უდიდესი გავლენა აქვს სოციალურ სფეროსა და საქართველოს მოსახლეობის კეთილდღეობაზე.

მსოფლიოს მრავალი რეგიონისათვის ძალიან მნიშვნელოვანია სათბობის გამოყენების გარეშე იაფი ელექტროენერჯის მიღება. ამ შემთხვევაში მნიშვნელოვანია გამოყენებულ იქნას მდინარეების ჰიდროენერგეტიკული რესურსი, როგორც ენერჯის განახლებადი წყარო, ამიტომ ჰიდროელექტროსადგურების მშენებლობა არის ერთ-ერთი ოპტიმალური გადაწყვეტა ენერგეტიკული უზრუნველყოფისათვის. საქართველოს მთის მდინარეები გამოირჩევიან წყლის ვარდნის დონეთა სხვაობის დიდი მნიშვნელობებით და ისინი ფლობენ დიდ ჰიდროენერგეტიკულ პოტენციალს.

ახლო მომავალში საქართველოს მრავალ რეგიონში იგეგმება ახალი ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობა, რომელთა ტექნოლოგიურ სქემაში შემავალი ჰიდრონაგებობები რკინაბეტონისაა.

საქართველოს ტერიტორია სეისმურად რთულ რეგიონს წარმოადგენს. სეისმური თვალსაზრისით მიწისძვრები დიდ საფრთხეს უქმნის ქვეყნის მოსახლეობას, იწვევს დიდ ეკონომიკურ ზარალს.

საქართველოს მთიანი რეგიონები 9 ბალიანია, სადაც ბევრი ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობა იგეგმება. ჰიდროელექტროსადგურები საკმაოდ რთულ ნაგებობებს წარმოადგენენ. ისინი იმყოფებიან წყლის მუდმივი ზემოქმედების ქვეშ. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს გააჩნიათ კონსტრუქციული სირთულე. მათი ტექნოლოგიური სქემა საკმაოდ რთულია.

სეისმურ რეგიონებში ჰიდროტექნიკური ნაგებობების რკინაბეტონის კონსტრუქციების სწორად გაანგარიშება სიმტკიცეზე, ხანგამძლეობაზე, ბზარმდეგობაზე, მეტად აქტუალურია და დიდი მნიშვნელობა აქვს ქვეყნისათვის.

სადისერტაციო ნაშრომში განხილული თემა „ნატანები ჰესის“ რკინაბეტონის ჰიდრონაგებობათა გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით“ მეტად აქტუალურია და დიდი მნიშვნელობა აქვს საქართველოს მთიან რაიონებში ჰიდროსადგურების რკინაბეტონის ჰიდრონაგებობათა სწორად დაპროექტებისა და უსაფრთხო ექსპლოატაციისათვის.

შემოთავაზებული თემა „ნატანები ჰესის“ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა შემადგენლობის რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ რკინაბეტონის ელემენტებში ბზარის სიგრძე, სიგანე, სიმტკიცე, სიხისტე, დეფორმაციულობა და ხანგამძლეობა.

**დისერტაციის მიზანს შეადგენს** ჰიდროსადგურებში გამოყენებული რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშებებში, რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენება, რღვევას თავისებურებების შესწავლა.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს გააჩნიათ ბევრი თავისებურება მუშაობის პერიოდში. აღნიშნულ ნაგებობებს მუშაობა უხდებათ ძალიან რთულ პირობებში, ისინი იმყოფებიან მდგარ ან მოძრავ წყალში; რომელიც მათზე ახდენს მექანიკურ, ფიზიკურ-ქიმიურ და ბიოლოგიურ მოქმედებას (წყალში არსებული ორგანიზმების მოქმედებით გამოწვეული ხის ლპობის, ქვის დაშლის პროცესები, ბაქტერიული კოროზიის მოვლენა და სხვა).

წყლის მექანიკური მოქმედება ნაგებობებზე ვლინდება ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების სახით, რომლებიც მათ ძირითად დატვირთვებს წარმოადგენენ. მნიშვნელოვანია ქართ წარმოშობილი წყლის ტალღების, ჰიდრავლიკური დარტყმის, ნატანის წნევების და მიწისძვრის დროს წყლის სეისმური წნევა, ინერციული ძალები.

წყლის ფიზიკურ-ქიმიური ზემოქმედება ვლინდება ჰიდრონაგებობების მასალისა და წყალშედწევად გრუნტზე. ასე, მაგალითად, დიდი სიჩქარით მოძრავი წყალი, განსაკუთრებით თუ მას მოაქვს ფსკერული ნატანი ხეხავს ნაგებობებთანაა ზედაპირს და ზოგჯერ მოკლე დროში უვარგისს ხდის მას. ანგრევს მდინარის კალაპოტს მაშინაც კი, როდესაც ის კლდოვანია და სხვა. წყლის ზემოქმედებით კოროზიას განიცდის ნაგებობათა ლითონის ნაწილები, რის გამოც მათი სისქე თანდათანობით მცირდება.

ბეტონის ნაგებობებში გაჟონილი (ფილტრაციული) წყლის, როგორც ფიზიკურ, ისე ქიმიურ ზემოქმედებას შეუძლია გამოიწვიოს ნაგებობათა ტანში დარჩენილი ქიმიურად დაუკავშირებელი ჩამქრალი კირის გამორეცხვა და ბეტონის თანდათანობით დაშლა (დეზინტეგრაცია). ბეტონში არსებული ყველა ფორები, შეიძლება განვიხილოთ, როგორც სტრუქტურის ბზარწარმოქმნელი დეფექტები, რომლის მეშვეობით შეგვიძლია დავადგინოთ ფორების წვერზე დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და ძაბვების ინტენსივობა.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რკინაბეტონის კონსტრუქციების ყოველივე ზემოთ მოკლედ აღწერილი ექსპლოატაციის რთული პირობები უფრო კარგად წარმოაჩენს სადისერტაციო ნაშრომის მიზანის მაღალ პასუხისმგებლობას.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების („ნატანები“ ჰესის) რთული ექსპლოატაციის პირობების სრული გათვალისწინებით მისი შემადგენელი ჰიდრონაგებობათა რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშება ერთ-ერთ ურთულეს ამოცანას წარმოადგენს. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების დროს დიდი მნიშვნელობა აქვს გაანგარიშების მეთოდის შერჩევას

სადისერტაციო ნაშრომში ჩვენს მიერ შერჩეულია მეთოდი ჰიდროტექნიკური ნაგებობების („ნატანები ჰესის“) რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით, იძლევა საშუალებას დატვირთვების

ზემოქმედებისას განვსაზღვროთ ბზარმდეგობა, ბზარის სიგრძე, ელემენტის სიმტკიცე, სიხისტე, დეფორმაციულობა და ხანგამძლეობა.

რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით ჰიდროსადგურების რკინაბეტონის კონსტრუქციების („ნატანები ჰესის“) გაანგარიშება ამაღლებს მის ბზარმდეგობას, სიმტკიცეს და ხანგრძლივობას. უფრო სრულყოფილს გახდის მის კონსტრუირებას.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშება სიმტკიცეზე და ბზარმდეგობაზე ერთ-ერთ ურთულეს ამოცანას წარმოადგენს. რამდენადაც უფრო სწორად არის განსაზღვრული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, რკინაბეტონის კონსტრუქციების სიმტკიცე, იმდენადაც უფრო მეტი წლის განმავლობაში არ დაემორჩილება რღვევას.

სადისერტაციო ნაშრომში პირველადაა განხილულია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა, „ნატანები ჰესი“ , შემადგენელი რკინაბეტონის ჰიდრონაგებობათა გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით.

თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევებისას დაგროვილმა გამოცდილებამ, საშუალება მისცა მრავალი ქვეყნის ინჟინრებს გამოეყენებინათ რკინაბეტონის უდიდესი შესაძლებლობები ჰიდრო-მშენებლობაში.

ჩვენს ქვეყანაში არსებობს ჰიდროენერგეტიკის მრავალწლიანი განვითარების პროგრამა, რომლის მიხედვით საქართველოს მთიან რაიონებში გათვალისწინებულია ახალი ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობა.

ზემოთ ჩამოთვლილი ნაგებობები (სხვადასხვა საინჟინრო, სამრეწველო ჰიდროტექნიკური) და მათი შემადგენელი რკინაბეტონის კონსტრუქციები ჩვენს მიერ არჩეული სადისერტაციო თემის გამოყენების არეს წარმოადგენს.

## Abstract

Development of hydropower engineering in Georgia is a strategic task of the country aiming to make the energy system of Georgia the leader in the energy sector of the region. The development of power engineering influences the social sector and welfare of Georgian population.

The economic power without using fuel is very important for many regions of the world. In view of this it is important to use the hydropower resource of rivers as the renewable energy source, and construction of hydropower plants is one of the optimal solutions for energy security. The Georgian mountain rivers are characterized with big water level differences and high hydropower potential.

In the nearest future, of Georgia construction of new hydropower plants is planned in many regions, which technological design includes reinforced concrete hydraulic structures.

The territory of Georgia is located in the seismically complex region. From the seismic aspect, earthquakes create a great threat to the population of the country causing a large economic loss.

The seismicity of mountainous regions of Georgia where construction of many hydropower plants is planned, is 9-magnitude. Hydropower plants are rather complex structures. They are under the constant impact of water. Hydraulic engineering works have constructive complexity. Their technological scheme is rather complex.

The correct calculation of reinforced concrete structures of the hydraulic engineering works on strength, endurance, crack resistance in seismic regions is very actual and important for the country.

The subject of the thesis research “Calculation of Reinforced Concrete Hydraulic Structures of the Natanebi HPP Using the Fracture Mechanics Methods” is very actual and important for the correct design and safe operation of the reinforced concrete structures of hydraulic engineering works in the mountainous regions of Georgia.

The proposed theme of calculation of reinforced concrete elements of hydraulic structures of the Natanebi HPP using the fracture mechanics methods enables to determine the length, width, strength, stiffness, deformation and life of cracks in the reinforced concrete elements.

**Our goal** is the thesis is to use the fracture mechanics methods in the calculation of the reinforced concrete structures used in the hydropower plants, to study the fracture peculiarities.

Hydraulic engineering works have many peculiarities in operation. They are to operate in very complex conditions, in still or moving water, which exercises mechanical, physicochemical and biological impact on them (the processes of timber dotting and stone degradation caused by living organisms in the water, bacterial corrosion effect and other).

The mechanical impact of water on the structures is exposed in kind of hydrostatic and hydrodynamic pressures which represent their main loads. The water seismic pressure during an earthquake, water waves generated by wind, water hammer, drift pressure and inertial forces are noteworthy.

The physicochemical impact of water is exposed on the material of hydraulic structures and pervious subsoil. For example, the water moving with large speed, especially if it carries the bottom sediments, abrades the surface of structures and sometimes makes it worthless in a short time; it destroys the river bed even when it is rocky and so on. By the water impact, the metal parts of the structures suffer corrosion thus gradually reducing their thickness.

The physical and chemical impact of the leaked (filtration) water in the concrete structures can cause washout of chemically unbound slake lime remained in the body of structures and gradual disintegration of concrete. All pores existing in concrete can be considered as crack-forming defects of a structure by which we can determine the strain-stress distribution and intensity or stress on the pore edge.

All the shortly described above complex conditions of operation of reinforced concrete structures of hydraulic engineering works better expose the high responsibility of the goal of the thesis research.

Taking into account the complex operation conditions of the hydraulic engineering works (of Natanebi HPP), the calculation of the reinforced concrete structures of its hydraulic engineering works is one of the more difficult problem for today. When calculating the reinforced concrete structures of hydraulic engineering works the great importance is given to the selection of calculation method.

The method we have selected in the thesis of research is the fracture mechanics method of calculation of reinforced concrete structures of hydraulic engineering works (Natanebi HPP), which enables us to determine the crack resistance, crack length, element strength, endurance, deformation and life during the impact of loads.

Using the fracture mechanics methods in calculation of the reinforced concrete structures of hydropower plants (Natanebi HPP) increases their crack resistance and life, makes their design more perfect.

Calculation of hydraulic engineering works on strength and crack resistance is one of the most complex problem as the better the strength of reinforced concrete structures of hydraulic engineering works is determined, the more time they will resist fracture.

For the first time, the thesis of research discusses the calculation of reinforced concrete structures of hydraulic engineering works (Natanebi HPP) using the reinforced concrete fracture mechanic methods which enable to determine the crack length, width, strength, endurance, deformation and life and to provide the correct design thereof.



The accumulated experience of theoretical and experimental studies has enabled the engineers of many countries to use the great opportunities of reinforced concrete in construction of hydraulic engineering works.

Our country has the long-term program of development of hydropower engineering according to which construction of new hydropower plants is stipulated in mountainous regions of Georgia.

The above listed works (various engineering, industrial, power engineering) and their reinforced concrete components are the field of use of the subject of the thesis chosen by us.

## შინაარსი

შესავალი .....	14
1. ლიტერატურის მიმოხილვა .....	19
1.1. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კვლევების არსებული ისტორიული მიმოხილვა .....	19
1.2. ბეტონისა და რკინაბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის მეთოდების კვლევების მიმოხილვა .....	23
1.2.1. ბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის კვლევების არსებული მიმოხილვა .....	23
1.2.2. რკინაბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის არსებული კვლევების მიმოხილვა .....	29
1.3. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სიმტკიცეზე გაანგარიშების არსებული მეთოდები .....	34
1.4. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების არსებული მეთოდები .....	44
1.5. თაღოვანი კაშხლები .....	58
1.6. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლები. გრავიტაციული კაშხლები .....	72
თავი 2. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშება სიმტკიცეზე	95
2.1. საკვლევი არეალი .....	101
2.2. „ნატანებ ჰესის“ გაანგარიშება სიმტკიცეზე .....	107
2.3. ჰესის ინფრასტრუქტურული ობიექტების აღწერა. პრაქტიკული ღირებულება .....	109
თავი 3. „ნატანებ ჰესის“ რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით .....	121
3.1. რეზერვუარის კედლის გაანგარიშება და კონსტრუირება ბზარმდეგობაზე .....	121
3.2. „ნატანებ ჰესის“ წყლის გადამყვანი ღიობის გაანგარიშება და კონსტრუირება .....	137
3.3. სამანქანო ნაწილში მოთავსებული გადახურვის რკინაბეტონის კოჭის გაანგარიშება და კონსტრუირება .....	144
დასკვნა .....	156
გამოყენებული ლიტერატურა .....	160

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა საანგარიშო სეისმურობა	47
ცხრილი 2. სეისმურობის $K_b$ კოეფიციენტის მნიშვნელობები .....	49
ცხრილი 3. $R$ – უგანზომილებო სიდიდე $\frac{x}{H}$ ფარდობის შესაბამისად .....	53
ცხრილი 4. $B$ კოეფიციენტი მნიშვნელობა .....	83
ცხრილი 5. რთული გეოლოგიური პირობების ქანების დახასიათება	84
ცხრილი 6. $x_i$ და $\xi_i$ კოორდინატების ფუნქციის $G(4,2;x_i;\xi_i)$ მნიშვნელობა .....	140
ცხრილი 7. ნორმატიული სიდიდე. ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტები ბეტონისა და არმატურის კლასის მიხედვით .....	145
ცხრილი 8. „ნატანებ ჰესის“ რკინაბეტონის კონსტრუქციების თეორიული გაანგარიშების შედეგების შედარება .....	158

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. მრავალი თავისუფლების ხარისხის მქონე ნაგებობის დინამიკური საანგარიშო სქემა .....	50
ნახ. 2. თაღოვან კაშხალზე მოქმედი სეისმური ინერციული ძალებისა და წყლის ინერციული წნევის ინტენსიურობის განსაზღვრის სქემა .....	56
ნახ. 3. თაღოვანი კაშხლების დამახასიათებელი პროფილები .....	63
ნახ. 4. მაღალი ყრუ გრავიტაციული კაშხალის პროფილი კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში .....	73
ნახ. 5. მაღალი წყალსაშვები გრავიტაციული კაშხალის პროფილი კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში .....	73
ნახ. 6. კაშხლის სამკუთხოვანი პროფილის საანგარიშო სქემა	77
ნახ. 7. კაშხლების ძვრაზე მდგრადობის საანგარიშო სქემები. ა. ფუძეში ჩაუმაგრებელი კაშხალი ჰორიზონტალური ძირით; ბ. ფუძეში ჩამაგრებული კაშხალი კბილით .....	82
ნახ. 8. 60 მ სიმაღლის კაშხლისა და მისი ფუძის დეფორმაციები სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში. ა – კაშხლის დეფორმაციები; ბ – კაშხლის ფუძეზე მოსული დატვირთვების ეპიურები .....	85
ნახ. 9. ბზარმდეგობის პარამეტრების ცვლილება დროში .....	98
ნახ. 10. საქართველოს ფიზიკური რუკა .....	101
ნახ. 11. აჭარა-გურიის რეგიონის გეოლოგიური რუკა .....	103
ნახ. 12. საქართველოს ჰიდროგეოლოგიური რუკა .....	104
ნახ. 13. საქართველოს ტერიტორიის ტექტონიკური დანაწევრების სქემა .....	105
ნახ. 14. საქართველოს სეისმური რუკა .....	106
ნახ. 15. ნატანებ ჰესის სიტუაციური გენგეგმა .....	108
ნახ. 16. სეისმური რუკა .....	109
ნახ. 17. „ნატანებ ჰესის“ წყალშემკრები გეგმა (I ვარიანტი) .....	111
ნახ. 18. „ნატანებ ჰესის“ წყალშემკრები გეგმა (II ვარიანტი) .....	112
ნახ. 19. „ნატანებ ჰესის“ ძირითადი ნაგებობების განლაგების გეგმა	114
ნახ. 20. „ნატანებ ჰესის“ გრძივი და განივი ჭრილი .....	115
ნახ. 21. „ნატანებ ჰესის“ სადერივაციო გვირაბის განივი ჭრილი .....	116
ნახ. 22. „ნატანები“ ჰესის სადაწნეო აუზის კედლის ბზარმდეგობის გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით .....	117
ნახ. 23. „ნატანებ ჰესის“ ძალური კვანძის გეგმა .....	118
ნახ. 24. „ნატანებ ჰესის“ ჭრილი ა-ა .....	119
ნახ. 25. „ნატანებ ჰესის“ ჭრილი ბ-ბ .....	120
ნახ. 26. სადაწნეო რეზერვუარის გეგმა .....	122
ნახ. 27. სადაწნეო რეზერვუარის გეომეტრიული ზომები $T_0$ და $M$ ეპიურები .....	124

ნახ. 28. სადაწნევო რეზერვუარის ჭრილი 1-1 .....	125
ნახ. 29. რეზერვუარის კედლის კონსტრუქცია .....	127
ნახ. 30. გაანგარიშების სქემა .....	137
ნახ. 31. წყლის გადამყვანი მილის ღიობის კონსტრუქცია .....	143
ნახ. 32. წყლის გადამყვანი მილის ღიობის დაარმატურება ბ-1 და ბ-2-ით .....	143
ნახ. 33. გადახურვის კოჭის გეომეტრიული ზომები .....	144
ნახ. 34. სუფთა ღუნვის არე .....	148
ნახ. 35. ნორმალური და განივი ძვრის ბზარი ღუნვად ელემენტში .....	150
ნახ. 36. რკინაბეტონის ორქანობიანი კოჭის კონსტრუქცია .....	155

## შესავალი

**თემის აქტუალობა.** საქართველო პოტენციური ჰიდროენერგეტიკული რესურსებით მდიდარ ქვეყანას წარმოადგენს. პოტენციური ჰიდროენერგეტიკული რესურსი ელექტროენერჯის წარმოების განახლებად წყაროდ არის ცნობილი, რაც მის განსაკუთრებულ ღირებულებად ითვლება.

საქართველოს ეკონომიკის განვითარებისათვის უდიდესი მნიშვნელობა აქვს სათბობის გამოყენების გარეშე იაფი ელექტროენერჯის მიღებას. იაფი ელექტროენერჯის მისაღებად მნიშვნელოვანია გამოყენებული იქნას ჩვენი ქვეყნის მდინარეების ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი.

საქართველოს მთიანი რეგიონები 9 ბალიან სეისმურ ზონაში მდებარეობს, სადაც ბევრი ჰიდროელექტროსადგურია აშენებული. ახლო მომავალში იგეგმება ახალი ჰიდროელექტროსადგურების მშენებლობა, რადგან მთის მდინარეები წყლის ვარდნის დონეთა სხვაობის დიდი მნიშვნელობებით გამოირჩევიან და ფლობენ დიდ ჰიდროენერგეტიკულ პოტენციალს.

თითოეული ჰიდროელექტროსადგური უნიკალური ობიექტია კონსტრუქციული გადაწყვეტით და ადგილმდებარეობით. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების თავისებურებებია: ტექნოლოგიური სქემის სიგრძე, რომელმაც შეიძლება მიაღწიოს რამოდენიმე კილომეტრს, ნაგებობების წონა, რომელიც წყლის საცავშია მოთავსებული.

სეისმურ რეგიონებში ჰიდროსადგურების, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების (მაღალი კაშხლები, სადაწნო აუზები, მაღალი საყრდენი კედლები) რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშებას სიმტკიცეზე, ხანგამძლეობაზე, ბზარმდეგობაზე და სეისმომდეგობაზე დიდი მნიშვნელობა აქვს. მათ უნდა გაუძლონ ისეთ მიწისძვრებს, რომელიც ერთხელ არის მოსალოდნელი.

საქართველოს რეგიონებში დაგეგმილია ახალი ჰიდროელექტროსადგურების მშენებლობა, რომელთა ტექნოლოგიურ სქემებში შემავალი ჰიდრონაგებობები რკინაბეტონისაა.

ჩვენს მიერ არჩეული სადისერტაციო თემა „ნატანებ ჰესის“ გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით“, გულისხმობს რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშებას „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით, რომლის საშუალებითაც მიიღწევა ბზარმედევობის, სიმტკიცისა და ხანგამძლეობის ამაღლება. თუ განვიხილავთ საქართველოს პოტენციური ჰიდროტექნიკური რესურსების სიმრავლეს დავრწმუნდებით სადისერტაციო თემის აქტუალობაში.

საქართველოს პოტენციური ჰიდროენერგეტიკული რესურსები შეფასებული იყო გასულ საუკუნეში მრავალჯერ. 1938 წელს ჩატარებული შეფასების შედეგად დადგინდა, რომ საქართველოს მდინარეების ჯამურმა სიმძლავრემ 9,87 მლნ. კვტ, ხოლო წლიურმა გამომუშავებამ 86.36 მლრდ.კვტ-სთ შეადგინა. 1960 წლის მონაცემებით საქართველოს პოტენციური ჰიდროენერგეტიკული რესურსი 11.12 მლნ. კვტ. სიმძლავრით ან 97,4 მლრდ კვტ.სთ გამომუშავებით განისაზღვრებოდა.

შემდგომში ელექტროენერჯის მოხმარების მკვეთრმა ზრდამ მოითხოვა საქართველოს როგორც დიდი, ასევე პატარა მდინარეების ჰიდროენერგეტიკული რესურსების მონაცემების დაზუსტება. ამდენად, აუცილებელი გახდა მდინარეების ახალი დაზუსტებული ჰიდროლოგიური და ტოპოგრაფიული მონაცემების გათვალისწინებით საქართველოს მდინარეების პოტენციალური ჰიდროენერგეტიკული რესურსების ხელახალი გაანგარიშება. საქართველოს 356 მდინარიდან 319 მდინარეა გამოყენებული პოტენციალური ჯამური სიმძლავრეების შესაფასებლად.

ამჟამად, საქართველოს ენერჯეტიკის დადგენილი სიმძლავრე 3535 მგვტ-ია. აქედან მარეგულირებელი ჰესების სიმძლავრეა 1990 მგვტ. სეზონური ჰესების სიმძლავრე 810 მგვტ, 110 მგვტ აირტურბინების, თბოელექტროსადგურების 620 მგვტ. ჯამური დადგმული სიმძლავრის დაახლოებით 80% მოდის ჰესებზე, მარეგულირებელი ჰესების წილი შეადგენს დაახლოებით დადგმული სიმძლავრის 56%-ს.

2025 წლისათვის საქართველოს ჯამური სიმძლავრე გაიზრდება 7550 მგვტ-მდე. აქედან 4672 მგვტ იქნება მარეგულირებელი ჰესების სიმძლავრე.

2042 მგვტ სეზონური ჰესების, 110 მგვტ აირტურბინების, ხოლო 730 მაღალი ეფექტურობის მქონე კომბინირებული თბოელექტროსადგურების სიმძლავრე.

მომავალში ჰიდროსადგურების ჯამური სიმძლავრე 2025 წლისათვის საერთო სიმძლავრეებთან იქნება 90%-მდე.

ჰიდროენერგეტიკა არის ეკონომიკის მნიშვნელოვანი ნაწილი, რომელსაც უდიდესი გავლენა აქვს ქვეყნის სოციალური სფეროსა და მოსახლეობის ცხოვრების დონის ამაღლებისათვის. ამიტომ ჰიდროენერგეტიკის განვითარება არის ქვეყნის სტრატეგიული მნიშვნელობის ამოცანა. ჩვენი ამოცანაა რეგიონის ენერგეტიკულ სექტორში საქართველოს ენერგოსისტემის ლიდერად ჩამოყალიბება.

საქართველოს ელექტროენერჯის დადგმული სიმძლავრის ზრდა მიგვანიშნებს, რომ 2025 წლამდე ჩვენს ქვეყანაში ჰიდროსადგურების მშენებლობის ბუმია მოსალოდნელი.

ჰიდროსადგურების მშენებლობის მოსალოდნელი ზრდა, ქვეყნის ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის სწორად გამოყენება, ხაზს უსვამს, რომ სადისერტაციო თემა: „ნატანებ ჰესის გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით“ ახალი ჰიდროსადგურების პროექტებისას დროს კიდევ უფრო აქტუალური გახდება.

**სამუშაოს მიზანი.** ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციები ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობაში დიდი მოცულობით გამოიყენება, რადგან აქვს დიდი სიმტკიცე, ჟამგამძლეობა, ცეცხლგამძლეობა და წყალგაუმტარობა. მისგან შეიძლება დამზადდეს სხვადასხვა ფორმის კონსტრუქციები, არ საჭიროებს მნიშვნელოვან საექსპლოატაციო ხარჯებს.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს მუშაობის პერიოდში გააჩნიათ ბევრი თავისებურებები. მუშაობა უხდებათ ძალიან რთულ პირობებში, იმყოფებიან შეგუბებულ ან მოძრავ წყალში, რომელიც ახდენს მექანიკურ, ფიზიკურ-ქიმიურ და ბიოლოგიურ მოქმედებას.

წყლის მექანიკური მოქმედება ნაგებობებზე ვლინდება ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების სახით, რომლებიც



ძირითად დატვირთვებს წარმოადგენენ. აქვე უნდა აღინიშნოს ქარით წარმოშობილი წყლის ტალღების ჰიდრავლიკური დარტყმის, ნატანის წნევების და მიწისძვრის დროს წყლის სეისმური წნევის, ინერციული ძალების მოქმედების შესახებ, ტემპერატურის ცვლილების, ნატანის დაჯახებისაგან და მრავალი სხვა.

ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ რკინაბეტონის ელემენტს გამყარებისას (წყალში, ხმელეთზე) უჩნდება მრავლობითი ტექნოლოგიური ჯდენის ბზარები. არსებულ ბზარებში, წყლის განუწყვეტელი მოძრაობისას, (ფილტრაციული) როგორც ფიზიკურ, ისე ქიმიურ ზემოქმედებას შეუძლია გამოიწვიოს ნაგებობათა ტანში დარჩენილი ქიმიურად დაუკავშირებელი ჩამქრალი კირის გამორეცხვა და ბეტონის თანდათანობით დაშლა. ჩამქრალი კირის გამორეცხვის პროცესის დროს, ცხადია ადგილი აქვს ფიზიკურ კოროზიას, ხოლო ქიმიურ კოროზიას იწვევს ჩამქრალ კირზე სხვადასხვა სახის მჟავების ან მარილების ზემოქმედება. რის შედეგად წარმოიქმნება ახალი ქიმიური შენაერთები, რომლებიც ადვილად იშლებიან წყლის მოქმედებით ან კრისტალებიან ცემენტის ქვიშაში მოცულობის საგრძნობი გადიდებით, უკანასკნელი წარმოქმნის შიგა ძაბვებს, რაც იწვევს ბეტონის დაშლას.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ბეტონის კოროზიის მოვლენა შეიძლება განვითარდეს იმ წყლების მოქმედებით, რომლებიც შეიცავენ აგრეთვე აგრესიულ ნახშირმჟავებს, სულფატებს, მაგნიუმის მარილებს, დიდი რაოდენობით თავისუფალ მჟავებს და სხვა.

როგორც ზემოთ აღწერილიდან ირკვევა ბზარი ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რკინაბეტონის კონსტრუქციისათვის დაუშვებელია, სადისერტაციო ნაშრომში შერჩეული იქნა მაღალი კლასის ბზარმედეგი ბეტონები და არმატურა; რკინაბეტონის კონსტრუქციების ბზარმედეგობის ასამაღლებლად გამოყენებულია „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ გაანგარიშების მეთოდები, დადგენილია ბზარის გავრცელების კინეტიკა, სიგრძე, სიგანე, ნორმალური, განივი დახრილი და გრძივი ჰორიზონტალური ბზარებისათვის.

რკინაბეტონის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კონსტრუქციები გაანგარიშებული რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით უფრო უსაფრთხო და ბზარმედეგია.

**პრაქტიკული ღირებულება.** ჰიდროტექნიკური ნაგებობები თავისებურ გავლენას ახდენს, როგორც მომიჯნავე ტერიტორიებზე, ისე ახლო მდებარე რაიონებზე, რადგან ზოგჯერ დიდი ჰიდროჰესების მიერ შექმნილი შეტბორვა, ვრცელდება დიდ ფართობებზე და იწვევს ათეული და ასეული ჰექტარი მიწების დატბორვას, გრუნტის წყლების დონის აწევას და სხვა. მეცნიერული კვლევებისაგან გამომდინარე მცირე ჰესების მშენებლობა ძალზედ აქტუალურია, მიღებული ენერჯის საფასური 2,0÷2,5-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე დიდი ჰესების ენერჯის საფასური.

საქართველოში ბევრო წყალუხვი მდინარეა, ამდენად მნიშვნელოვანია გამოყენებული იქნას მდინარეების ჰიდროენერგეტიკული რესურსი, როგორც ენერჯის განახლებადი წყარო.

ასეთი მდინარეა ოზურგეთის რაიონში მდინარე ნატანები, რომელიც გამოირჩევა წყლის ვარდნის დონეთა სხვაობის დიდი მნიშვნელობებით, სადაც დაპროექტებული იქნა „ნატანები ჰესი“, რომელიც წარმოადგენს მცირე ჰესს.

ჩვენი მიზანია გავიანგარიშოთ „ნატანები ჰესის“ რკინაბეტონის კონსტრუქციები ბზარმედეგობაზე „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით და მოვახდინოთ მისი სწორი კონსტრუქცია.

ჰიდროსადგურებში რკინაბეტონის რღვევის თავისებურებების დასადგენად სადისერტაციო ნაშრომში გაანგარიშებულია სადაწნევო რეზერვუარი, წყლის გადამყვანი მილი და რკინაბეტონის ორქანობიანი კოჭა, შემოწმებულია მათი ბზარმედეგობა, რომელიც აამაღლებს მშენებლობის ხარისხს, კონსტრუქციების სიმტკიცეს, ბზარმედეგობას და ხანგამძლეობას.

# 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

## 1.2.. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კვლევების არსებული ისტორიული მიმოხილვა

ძველი დროის წყალსახოპავ ბორბლებს და წყლის წისქვილებს აღწერს ჩვენს წელთაღრიცხვამდე I საუკუნის რომაელი მწერალი მარკ ვიტრუვი პოლიონი თავის წიგნებში არქიტექტურაზე. რომის სახელმწიფოს არსებობის დროს VI-III საუკუნეებში ჩვენს წელთაღრიცხვამდე აშენდა წყალსადენის გრანდიოზული სისტემები აკვედუკების სახით, რომლებიც დღესაც იწვევენ აღტაცებას. საზღვაო ნავსადგურმშენებლობა ფართოდ იყო განვითარებული ფინიკიელებსა და კართაგენელებში რამდენიმე ასეული წლის წინათ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე. პირველი სანაოსნო რაბები აშენებული იქნა ლეონარდო და ვინჩის მიერ XV საუკუნეში.

საყოველთაოდ ცნობილია რომაელების მიერ აგებული დამბა „კორნალო ესტრემადურა“ ესპანეთში I-II საუკუნეებში. წყლის დონის ამალღების კაშხლების მშენებლობის ხელოვნებაზე საუბრობს ჰეროდოტე. აბუ-ლ-ფიდა იუწყება კაშხლის შესახებ, რომელიც პერსებმა ააგეს. მისი დანიშნულება იყო წყლის აცილება ქალაქ ტოსტარასათვის. შახმა აბას I-მა ააშენა ქვის კაშხალი ქალაქ კაშანასთან სიგრძით 36 მეტრი, სიმაღლით 16 მეტრი და კედლების სისქით 10 მეტრი.

ძველ საუკუნეებში დიდი კაშხლების მშენებლობის მიზანი იყო წყალდიდობებისაგან დასახლებული ადგილების დაცვა. არაბების მიერ აშენებული კაშხალი ჩვენი წელთაღრიცხვით II საუკუნით თარიღდება. აბუ-ლ-ფიდის ჩანაწერებიდან ცნობილია, რომ მსგავსი ნაგებობები აგებულია ალექსანდრე მაკედონელის მიერ, სირიის ქალაქ ემასთან.

ყველაზე ძველი კაშხლის მშენებლობა დათარიღებულია 3000 წლით ჩვენს წელთაღრიცხვამდე. ქალაქ ამანასთან, 4,5 მეტრის სიმაღლის და 1 მეტრიანი კედლის სისქით.

2800-2600 წლებში ჩვენს წელთაღრიცხვამდე 25 კილომეტრში კაიროდან

აშენდა კაშხალი სიგრძით 102 მეტრი. III საუკუნის შუა წლებში კაშხალთა მთელი სისტემა აშენდა ინდოეთში ქალაქ დხოლავირასთან.

რომაელების მიერ აშენებული ყველაზე მაღალი კაშხალი 50 მეტრი სიმაღლით. მან იარსება 1305 წლამდე.

მანუფაქტურული მრეწველობის განვითარებამ და საფაბრიკო მრეწველობაზე გადასვლამ კაპიტალიზმის დროს წარმოშვა ჯერ უმარტივესი, ხოლო შემდგომ უფრო სრულყოფილი მექანიზმები, რომლებიც მოძრაობაში მოჰყავდა მდინარის ენერჯიას. ამ მიზნისათვის აგებდნენ კაშხლებს, წყალსადენის სისტემებს და წყლის ძრავებს. ცხადია წარმოების სწრაფმა ზრდამ გამოიწვია ვაჭრობის გაძლიერება, რამაც თავის მხრივ, ბიძგი მისცა საზღვაო და სამდინარო ტრანსპორტის განვითარებას.

მეფის რუსეთში XIX საუკუნის მიწურული და XX საუკუნის დასაწყისი აღინიშნა ჰიდროტექნიკის დარგის გამოცოცხლებით. იწყება რეკონსტრუქციისა და მოდერნიზაციის სამუშაოები ვოლგაზე, დნეპრზე, კაშხლებისა და რაბების მშენებლობა ზემო ოკაზე და სხვა. გარდა ამისა შავ, აზოვისა და ბალტიის ზღვებზე იწყება ახალი საზღვაო ნავსადგურების მშენებლობა და ძველის გაფართოება. ჰიდროტექნიკური მშენებლობის გაფართოებას დიდად შეუწყო ხელი იმ დროის გამოჩენილმა მოღვაწეებმა და მკვლევარებმა: მ. სერდიუკოვმა, ვ. როდევიჩმა, ნ. ბოგუსლავსკიმ, ნ.პუზირევსკიმ, დ.ნეულოვმა, გ. და მ. გარსევანოვებმა (გარსევანიშვილებმა), ვ. ტიმონოვმა, ვ. ლოხტინმა, ნ. ლელიავსკიმ და სხვებმა. მათმა ფუნდამენტალურმა ნაშრომებმა წყლის გზების, კაშხალმშენებლობის საზღვაო ნაგებობებისა და სხვათა შესახებ დიდი როლი ითამაშეს არა მარტო იმ პერიოდში, არამედ შემდგომშიც.

საქართველოს სამართლიანად უწოდებენ „თეთრი ქვანახშირის ქვეყანას“ წყლის ენერგეტიკული მარაგის თვალსაზრისით. ის მნიშვნელოვნად უსწრებს ევროპის ბევრ სახელმწიფოს, წყლის უდიდესი ტექნიკური პოტენციალის ხვედრითი წონით საქართველოს მსოფლიოში ერთ-ერთი პირველი ადგილი უკავია. ჩვენი ქვეყნის მდინარეების

ტექნიკური პოტენციალი 15,5 მილიარდი კილოვატია. ეს კი ნიშნავს, რომ მათ წელიწადში 135,7 მილიარდი კვტ.სთ ელექტროენერჯის გამოიმუშავება შეუძლით. საქართველოს მდიდარი ჰიდროელექტროსადგურების გამოყენებაზე ფიქრი პირველად დიდმა პუბლიცისტმა და საზოგადო მოღვაწემ ნიკო ნიკოლაძემ დაიწყო. ამ მიზნით მან თავისი შვილიც კი გამოიწვია პეტერბურგიდან საქართველოს მდინარეებზე პროფესიული ანალიზის ჩასატარებლად საბოლოოდ ყურადღება ენგურზე შეაჩერეს და მისი შესწავლა გადაწყვიტეს. ნიკო ნიკოლაძემ მოიწვია ცნობილი ინჟინერები ფიოდორ რონი და ბორის ბასმეტევი პეტერბურგიდან. მათი რჩევით ჰიდროელექტროსადგურის ასაშენებლად ენგური აირჩიეს. ნიკო ნიკოლაძემ ენგურის ჰიდროელექტროსადგურის აგებისათვის ბრძოლას 20 წელი შეაღია.

1913-14 წლებში იტალიელმა სპეციალისტებმა გამოთქვეს აზრი ენგურზე ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობის შესახებ.

**კაშხლების ტიპების არჩევა მასალების მიხედვით** (შეიძლება იყოს გრუნტის, ბეტონის, ლითონის, ქსოვილოვანი, ხის, რკინაბეტონის, გაბიონური).

ჰიდროტექნიკის ისტორია დაკავშირებულია ადამიანის მიერ წყლის გამოყენების დასაწყისთან. კაშხლებსა და არხებს აშენებდნენ რამდენიმე ათასი წლის წინათ. ჩვენს წელთაღრიცხვამდე და უფრო ადრე დაიწყო ადამიანმა მდინარის წყლის ენერჯის გამოყენება.

აღსანიშნავია, რომ საქართველოში უძველესი დროიდან ცნობილია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სხვადასხვა სახეობანი: ჯებირები, კაშხლები სარწყავი სისტემებისთვის, წყალსადენები, არხები, XII საუკუნეში აგებულია „თამარის არხი“ ალაზნის ველზე.

საქართველოში ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობისა და განვითარების ძირითადი პერიოდი დაიწყო 1946 წლიდან. დასახელებული პერიოდის შემდეგ ჩვენს ქვეყანაში მრავალმა მეცნიერმა გამოაქვეყნა თავისი შრომები და კვლევები ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებთან დაკავშირებით.

1970 წელს ნ. მოწონელიძემ, ი. ლუდუშაურმა, ა. კაკუშაძემ გამოსცეს

წიგნი: „მასიურთავებიანი კონტრფორსული კაშხლების ანგარიში ფუძის დრეკადობის გათვალისწინებით“ [20, 21, 23].

დასახელებულ ნაშრომში განხილულია შემდეგი: მასიურთავებიანი კონტრფორსული კაშხლების დაძაბული მდგომარეობის დროს ჩვეულებრივად მიიღება დაშვება იმის შესახებ, რომ კაშხლის სექციის ჰორიზონტალურ კვეთში ნორმალური ძაბვები განაწილებულია წრფივი კანონით. ექსპერიმენტები გვიჩვენებენ, რომ მაღალკონტრფორსულ კაშხლებში ეს დაშვებები არ შეესაბამება სინამდვილეს, რადგან კონტრფორსების ძაბვით მდგომარეობაზე დიდ გავლენას ახდენს ფუძის დრეკადობა და კონტაქტური ძაბვები, რომლებიც წარმოიშვებიან კონტრფორსის თავსა და კედელს შორის.

აღნიშნული ნაშრომის მიზანი იყო ამ ორი ფაქტორის გათვალისწინება პროექტირებისას გავლენა კაშხლის ძაბვით დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ამოცანის არსი გამოიხატება იმაში, რომ კონტრფორსს, როგორც სტატიკურად ურკვევ სისტემას განიხილავენ ორ ელემენტად კონტრფორსი და კედელი.

1963 წელს ალექსანდრე ლოსაბერიძემ გამოსცა წიგნი: „დაწნევითი გვირაბების ერთფენიანი მოპირკეთების გეგმარება და გაანგარიშება“. განხილულია დაწნევითი გვირაბების სამი მთავარი ტიპი [20]:

I. ერთფენიანი მოპირკეთება

1. ბეტონი უარმატუროდ;
2. რკინაბეტონის მხოლოდ შინაგანი არმატურით;
3. რკინაბეტონის შინაგანი და გარეგანი არმატურით.

II. ორფენიანი მოპირკეთება ბეტონის გარეგან ფენაზე.

4. რკინა ტორკრეტი ბეტონის გარეგან ფენაზე.
4. რკინა ტორკრეტი რკინაბეტონის გარეგან ფენაზე.

III. ორფენიანი მოპირკეთება რკინის პერანგის გამოყენებით.

6. რკინის პერანგი ბეტონის გარეგან ფენაზე.
7. რკინის პერანგი რკინაბეტონის გარეგან ფენაზე.

1982 წელს გამოიცა წიგნი „ჰიდროტექნიკური ნაგებობები“.

ავტორები: პროფ. ბ. ჩაკვაშვილი, ხუბერიანი, ა. სახვაძე.

დასახელებული ნაშრომი განხილულია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა მოკლე აღწერა [22]:

განხილულია აგრეთვე, ერთგვაროვანი მიწის კაშხლის ანგარიში (დრენაჟის გარეშე) წყალგაუმტარ ფუძეზე ნ. პავლოვსკის მეთოდით.

ერთგვაროვანი მიწის კაშხლის ანგარიში (დრენაჟის გარეშე) წყალგაუმტარ ფუძეზე ე. ზამარინის მეთოდით.

ბირთვიანი და ეკრანიანი კაშხლების ფილტრაციული ანგარიში გრუნტის მდგრადობის შემოწმება.

1963 წელს გამოცემულ შრომაში: „Методы расчета конструирования перекрытой подземных и надземных гидротехнических сооружений“.

განხილულია რკინაბეტონის კონსტრუქციებით ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა გადახურვის თავისებურებანი; მიწის ქვეშ და მიწის ზემოთ, როგორც მონოლითური, ასევე ანაკრები კონსტრუქციების შემთხვევაში.

## 1.2. ბეტონისა და რკინაბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის მეთოდებით კვლევების მიმოხილვა

### 1.2.1. ბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის კვლევების არსებული მიმოხილვა

ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა ბეტონისა და რკინაბეტონის ელემენტების ხარისხს. მისი ფართოდ გამოყენების თვალსაზრისით, ბეტონი გახლავთ მშენებლობის ყველა სფეროში გამოყენებული საშენი მასალა, მიუხედავად გაჭიმვაზე მისი დაბალი წინააღობისა, დიდი რაოდენობის დეფექტებისა და ძაბვების კონცენტრაციისა მის კვეთში, რომელიც არსებით გავლენას ახდენს სიმტკიცეზე და ბზარმდეგობაზე.

მკვლევარების დიდი ინტერესი გამოიწვია ბეტონის რღვევის მექანიზმის შესწავლამ. ლიტერატურიდან ცნობილია ბეტონის დამზადების

და გამყარების პროცესისას კვეთში წარმოიქმნება სიცარიელები, ტექნოლოგიური ბზარები ჯდენისაგან; დატვირთვის ზემოქმედებისას ადგილი აქვს ძაბვების კონცენტრაციას და ახალი ბზარების წარმოქმნას.

ბეტონის რღვევის შესწავლა ამ პროცესების გათვალისწინებით არის მეცნიერებისათვის უპირველესი ამოცანა, რადგან შესაძლებელი გახდეს ბეტონის წინასწარ შედგენილი შემადგენლობით დავაპროექტოთ ხანგამძლე მტკიცე და ბზარმედეგი ელემენტები.

ყოველივე ამის შესასწავლად ჩატარებულია მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტები, ჩვენთან და ჩვენი ქვეყნის ფარგლებს გარეთ [10, 11, 13].

ასეთი ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზით გაირკვა, რომ მიღებული სიდიდეები მკვეთრად განსხვავდება, ერთმანეთისაგან, რომელიც შეიძლება აიხსნას კვლევის ერთიანი მეთოდის არ არსებობის გამო, ძაბვის ინტენსივობის  $K_c$  და ბზარების პარამეტრების გამოთვლა განსხვავებულია, მაგალითად, სიმტკიცე არის ბეტონის ალბათური მახასიათებელი; მისი ცდებით მიღებული სიდიდე დამოკიდებულია ელემენტის ზომაზე, დატვირთვის სიჩქარეზე, ტემპერატურაზე, ტენიანობაზე და სხვა.

ცნობილია, რომ ბეტონის სიმტკიცე დამოკიდებულია ბევრ ფაქტორთან, როგორცაა მისი შემადგენლობა, გამყარების პროცესი (შემკვრელის, შემავსებლის, წყლის რაოდენობა და სხვა).

მრავალი მკვლევარის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები მკვეთრად განსხვავებულია, რაც ადასტურებს, რომ კვლევის გაგრძელება აუცილებელია.

ბეტონი წარმოადგენს ანიზოტროპულ მასალას, მისი შემადგენელი ელემენტების უმრავლესობა, ქვიშა, მსხვილი შემავსებელი, წყალი, ბუნებაში თავისუფლად მოიპოვება, ამიტომ ის იაფი სამშენებლო მასალაა და მისი ყოველმხრივი გამოკვლევა საშუალებას მოგვცემს ავაგოთ ხანგამძლე, მტკიცე და სეისმომედეგი ნაგებობები.

ბეტონის რღვევის პროცესი ხანგრძლივი დატვირთვის ზემოქმედებისგან შესწავლილი არ არის ისე, როგორც ხანმოკლე



დატვირთვების ზემოქმედებისას. ამ შემთხვევაში  $R_b(t) = (0,2 \div 0,85)R_b$  მერყეობს. აქ სიძნელეს წარმოადგენს, ის რომ ხანმოკლე დატვირთვისას  $K_{IC}$  ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი მიღებულია, როგორც მუდმივი სიდიდე, არ არის გათვალისწინებული ბეტონის ასაკის ცვლილებასთან მისი ცვლილება. ხანგრძლივი დატვირთვის ზემოქმედებისას ხანგრძლივი სიმტკიცის თანაფარდობა ი.ვ. ზაიცევის ნაშრომში გამოისახება ფორმულით [14]

$$\frac{R(t; \tau)}{R(\tau)} = \eta(t; \tau) = \frac{m(t; \tau)R(t)}{R(\tau)} \sqrt{\frac{E(\tau)}{E(t) + E(\tau)C(A; \tau)}}, \quad (1)$$

სადაც  $m(t; \tau)$  – მამრავლი, რომელიც ითვალისწინებს მომდევნო დატვირთვისას ბეტონის ხანმოკლე დატვირთვის შეცვლას;

$C(t, \tau)$  – ბეტონის ცოცვალობის საზომი;

$E(\tau)$  და  $R(\tau)$  – შესაბამისად დრეკადობის მოდული და ხანმოკლე სიმტკიცე დატვირთვისას.

$E(t)$  და  $R(t)$  – შესაბამისად დრეკადობის მოდული და ხანგრძლივი სიმტკიცე, ხანგრძლივი დატვირთვის მოდების დასრულების მომენტისათვის  $\tau$  და  $t$  დროში. ნაშრომში არ არის მოცემული  $K_{IC}$  -ს სიდიდე ხანგრძლივი დატვირთვის ზემოქმედებისას.

მ.ი. ლეონოვის და პ.ვ. პანასუკის [6] ნაშრომში განხილულია, რომ ბეტონის რღვევა ხდება, ორ თანმიმდევრულ ფაზაში; პირველ ფაზაში ელემენტი გადადის შუალედურ მდგომარეობაში, ხოლო მეორე ფაზაში ხდება მისი რღვევა. ბზარის გავრცელების კრიტერიუმი წარმოადგენს რღვევის მომენტში ბზარის წვერზე ძაბვის დასაშვებ სიდიდეზე მეტად გაზრდას. ბზარის ირგვლივ არსებული მიკრო ბზარები, სიცარიელები და სხვა არ აღემატება მასალის სიმტკიცეს რღვევაზე  $\sigma_0$ , ძაბვები და კონცენტრული დეფორმაციები დაკავშირებულია ჰუკის კანონთან, ბზარის წვერზე ძალური ზემოქმედება უგულვებელყოფილია, არსებობს ძაბვა ბზარებს შორის რომელიც ტოლია  $\sigma_0$  -ის.

ტრაპეზნიკოვის ლ.პ. ნაშრომში [7] განხილულია ბეტონის რღვევის მოდული, რომელშიდაც გათვალისწინებულია ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია და სტრუქტურული არაერთგვაროვნება.

დაშვებულია, რომ რღვევის პროცესი, მაკროსტრუქტურის დონეზე შედგება შემდეგი სიდიდეებისაგან. რღვევის წინა არე, რღვევის წინა არის გაზრდა განსაზღვრულ დონეზე, მსხვილი შემავსებლის ზომის სიდიდე, მაკრობზარის წარმოქმნა, მისი თანმიმდევრული გაზრდა. რღვევის წინა არის შექმნა დაკავშირებულია გამჭიმ ძალებთან  $\sigma_{\alpha\alpha}(t)$  და მთლიან (ნორმალურ და იძულებით) დეფორმაციასთან

$$A^\alpha(t) = \int_{t_0}^t \sigma_{\alpha\alpha}^+(\tau) \frac{\partial [\varepsilon_{\alpha\alpha}(\tau) - \varepsilon_{\alpha\alpha}^0(\tau)]}{\partial \tau} d\tau, \quad (2)$$

სადაც  $\varepsilon_{\alpha\alpha}(\tau)$  – მთლიანი დეფორმაცია;

$\varepsilon_{\alpha\alpha}^0(\tau)$  – იძულებითი დეფორმაცია;

$A^\alpha(t)$  – გარე ძალების მოდების დრო.

$\sigma_{\alpha\alpha}^+(\tau) = \sigma_{\alpha\alpha}(\tau)$  თუ  $\sigma_{\alpha\alpha}(\tau) > 0$  და  $\sigma_{\alpha\alpha}^+(\tau) > 0$ , თუ  $\sigma_{\alpha\alpha}(\tau) < 0$ , მაშინ რღვევის წინა ზონა აღიძვრება, თუ  $A^\alpha(t)$  გამოთვლილი ცოცვადობის მეთოდით, რომელიც არის მუდმივი გარკვეული ასაკის ბეტონისათვის.

ბზარის წარმოქმნის კრიტერიუმად მიღებულია რღვევის წინა არე, როდესაც  $m_0$  ტოლია ზღვრული მნიშვნელობის, რომელიც წარმოადგენს მასალის სტრუქტურას; მისი სიდიდე შეესაბამება სტრუქტურაში შემავალი მსხვილი შემავსებლის სიდიდეს, ასეთ შემთხვევაში ბზარის გავრცელების კრიტერიუმს წარმოადგენს პირობა  $l_0 \geq m_0$ ; თუ  $m \geq m_0$ , სადაც  $m_0$  – მსხვილი შემავსებლის სიდიდეა. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ფარდობითი ხანგრძლივი სიმტკიცე ღერძული გაჭიმვისას გამოითვლება ფორმულით:

$$\eta(t; \tau) = \frac{R(t; \tau)}{R(\tau)} = \frac{R_{At}(t)}{R_{bt}(\tau)} \frac{1}{\sqrt{\frac{E(t)}{E(\tau)} + 2C(t; \tau)E(t)}}. \quad (3)$$

პერესიპკინის ე.ნ. ნაშრომში [8] განხილულია ხანგრძლივი სიმტკიცე დატვირთვის ხანგრძლივი ზემოქმედებისაგან,  $\eta(t, \tau)$  გამოითვლება ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტების საშუალებით

$$\eta(t, \tau) = \frac{K_{IC}(t)}{K_{IC}(\tau)}. \quad (4)$$

ექსპერიმენტული მონაცემები ბეტონის ხანგრძლივი სიმტკიცის შესასწავლად ჩატარებული აქვთ მრავალ მეცნიერს, რომლებმაც აღმოაჩინეს, რომ თუ დატვირთვა ნაკლებია ხანგრძლივ სიმტკიცეზე, ბზარები ვრცელდება ფორების და სიცარიელების ან „მატრიცა-შემავსებლის“ საზღვარზე.

თუ ხანგრძლივი სიმტკიცე ტოლია  $(0,85R_b)$ , მაშინ ბზარის განსაზღვრისათვის შემოთავაზებულია კვლევები, რომელიც ამტკიცებს, რომ რღვევა ხდება, როდესაც მიკრობზარი მიაღწევს კრიტიკულ ფორმას, შემოთავაზებულია ემპირიული დამოკიდებულება ძაბვისა  $\sigma_b$  და რღვევის დროს  $t_R$  შორის, რომელიც გამოითვლება შემდეგნაირად

$$\log \sigma_b = -0,014 \log t_R + 1,98, \quad (5)$$

სადაც  $\sigma_s$  – აღებულია ხანმოკლე სიმტკიცის პროცენტი და სამართლიანია მხოლოდ გარკვეული კლასის და შემადგენლობის ბეტონებისათვის, რადგანაც ის დამოკიდებულია ცოცვადობის გავლენაზე, რომელიც თავის მხრივ დამოკიდებულია ტექნოლოგიურ და დეფორმაციულ მახასიათებლებზე. ამ მოვლენის დასადგენად ჩატარებულია ცდები და თეორიული გამოთვლები. მიღებულმა შედეგებმა გამოავლინა დამაკმაყოფილებელი თანხვედრა.

ბეტონის რღვევას ასევე იწვევს დატვირთვის ხანგრძლივი პროცესისას დაღლილობისაგან გამოწვეული ბზარები, რომლებიც ექსპერიმენტალური კვლევების მიხედვით გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{dl}{dN} = -\beta \left[ \frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{K_c^2} + \ln \left( \frac{K_c^2 - K_{\max}^2}{K_c^2 - K_{\min}^2} \right) \right], \quad (6)$$

სადაც  $\beta$  – მუდმივია, რომელიც მიღებულია ექსპერიმენტით;  $K_{\min} = 0$  და  $K_{\max}/K_c = 0,5$ .

აღსანიშნავია, რომ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტის  $K_c$ -ს მნიშვნელობა მიღებულია ციკლური დატვირთვის ზემოქმედებისას, რომელიც განსხვავდება სტატიკური დატვირთვის ექსპერიმენტისაგან მიღებული სიდიდეებისაგან.

საზღვარგარეთ ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგად მიღებული დამოკიდებულება დალილობით გამოწვეული ბზარის სიგრძის გაზრდაზე გამოსახება ფორმულით

$$\frac{dl}{dN} = \frac{A(\Delta K)^n}{(1-\rho)K_c - \Delta K}, \quad (7)$$

სადაც  $\rho$  – ციკლური დატვირთვის ასიმეტრია;

$A$  – მუდმივი მატრიცა;

$\Delta K$  – ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის ცვლილების დიაპაზონი.

როგორც ექსპერიმენტების შედეგად მიღებული სიდიდეების ანალიზი გვიჩვენებს, განსხვავება შედეგებს შორის დიდია, რაც გამოწვეულია დრეკადი მასალების გამოყენებით, რომელთაც არ ახასიათებს ცოცვადობის და დამკვლევის თვისება.

ციკლური დატვირთვის მოქმედებისას აუცილებელია დადგინდეს ციკლის რაოდენობა რღვევამდე მოცემული დატვირთვებით და შესაბამისი ამპლიტუდებით, რომლის დროს ციკლის რიცხვის დადგომამდე არ ხდება ელემენტის რღვევა. ამოცანის ამოხსნა ხდება ფორმულით

$$N - N_0 = \int_{l_0}^l \frac{dl}{C(\Delta K)^n}, \quad (8)$$

სადაც  $N_0$  -ციკლის რაოდენობაა, რომელიც გამოიწვევს ბზარს  $l_0$ -ს, რაც საკმარისია დალილობის გამოსაწვევად, მას შეიძლება ეწოდოს დალილობის ბზარის კრიტიკული სიგრძე.

ელემენტების ციკლური დატვირთვაზე, ხანგამძლეობაზე გაანგარიშებისას, შემუშავებულია (ციკლური დატვირთვის გავლენით) სპეციალური მეთოდი, რომლის მიხედვით შეგვიძლია დავადგინოთ ციკლური ხანგრძლივობა

$$N = \frac{l_0}{C(\Delta K)^n(n-2)} \left[ 1 - \left( \frac{l_0}{l} \right)^{\frac{n}{2}-1} \right]. \quad (9)$$

როდესაც  $n \neq 2$  და

$$N = \frac{l_0}{C(\Delta K)^n} \ln \frac{l}{l_0}, \text{ როდესაც } n = 2. \quad (10)$$

ციკლის რაოდენობა ბზარის გაჩენამდე შემოთავაზებული მუსხელიშვილის ნ. მიერ გამოითვლება ფორმულით

$$10^3 N_i = 1,42 N_f^{1,42},$$

სადაც  $N_f$  – ციკლის რაოდენობაა რღვევამდე;

$N_i$  – ციკლის რაოდენობა ბზარის გაჩენამდე.

ფორმულები (8), (9) და (10) მიღებულია ერთგვაროვანი მასალისათვის, ბეტონში რომელიც არის არაერთგვაროვანი მასალა, რომლის კვეთებში მრავლად არის სიცარიელები, ფორები, ასევე ტექნოლოგიური ბზარები და საწყისი ბზარების გაჩენის მოლოდინი  $N$  ძალით გამოწვეული ამპლიტუდით. ამგვარად მიღებული ფორმულები შეიძლება ჩაითვალოს ელემენტის რღვევის ზედა ზღვრად. მიუხედავად ამისა კოეფიციენტი  $C$ -ს ცვლილებით შეიძლება  $N$ -ის განსაზღვრა შემდეგი ფორმულით:

$$N = f[\Delta\sigma(AK)]. \quad (11)$$

მრავლობითი ექსპერიმენტების შედეგად მკვლევარები მივიდნენ დასკვნამდე, რომ ძაბვების ცვლილება მნიშვნელოვან გავლენას არ ახდენს მასალის ხანგამძლეობაზე.

განხილული მეცნიერული კვლევები საშუალებას იძლევა ბეტონისა ელემენტების გაანგარიშება შევასრულოთ რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით.

### 1.2.2. რკინაბეტონის ელემენტების რღვევის მექანიკის არსებული კვლევების მიმოხილვა

რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით 80 წლებიდან დაიწყო. მოსკოვსა და თბილისში, ღუნვადი ელემენტი განიხილებოდა, როგორც ბლოკები ბზარებს შორის.

შემოთავაზებული თეორია ექსპერიმენტის შედეგებზე იყო დაფუძნებული. ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტის  $K_I$  სიდიდე დამოკიდებულია ბზარის გახსნის სიდიდეზე, ბზარებს შორის მანძილზე და სხვა პარამეტრებზე. კვლევებით დადგინდა, რომ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი  $K_{IC}$  რკინაბეტონისათვის არ არის ბზარმდებლობისათვის მუდმივი პარამეტრი.

რკინაბეტონისა და ბეტონის რღვევის მექანიკის კვლევა, ერთდროულად დაიწყო მოსკოვის ცენტრალურ სამეცნიერო საკვლევ ინსტიტუტში ი. ზაიცევის და ა. გუზეევის, კ. პირადოვის და თბილისში ა. პირადოვის, ლ. გველესიანის, გ. გაბუნიას და სხვათა მეცნიერების მიერ. საქართველოს ენერგეტიკის სამეცნიერო საკვლევ ინსტიტუტში.

პარალელურად საზღვარგარეთ მკვლევარები ექსპერიმენტების შედეგად აზუსტებდნენ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკულ კოეფიციენტებს, რკინაბეტონის ღუნვადი ელემენტის შეკუმშული ბეტონის დეფორმაციას და რღვევის ენერგიის სიდიდის დადგენას შემდეგი ფორმულით:

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_{bc}}{E_b} + \frac{G_0}{4f_c} + \left(1,5 \frac{G_0}{R_b} + \frac{W_0}{L_A}\right) \left(1 + \frac{\sigma_{bs}}{f_c}\right), \quad (12)$$

სადაც  $W_c$  – ბეტონის დეფორმაცია;  $W_c = 0,5$  მმ მძიმე ბეტონისათვის;

$L_d$  – საშიში ზონის სიგრძე (მოსალოდნელი ბზარების);

$\sigma_{bc}, \sigma_{bs}$  – შესაბამისად შეკუმშული და გაჭიმული ბეტონის საანგარიშო წინაღობა;

$a$  – დამცავი შრე;

$E_b$  – ბეტონის დრეკადობის მოდული;

$f_c$  – ძაბვა შეკუმშულ არმატურაში;

$\sigma_s A_s$  – ძაბვა გაჭიმულ არმატურაში.

რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის განვითარებას მიეკუთვნება სამუშაოები, რომელიც ჩაატარა გ.გ. მგელაძემ [9], კ.ა. პირადოვმა [5, 10, 11, 12, 13, 14, 15] და სხვებმა, სადაც განხილულია ემპირიული დამოკიდებულება

მაზვის ინტენსივობის კრიტიკულ კოეფიციენტებს შორის  $K_{IC}^r$  და  $K_{IC}^b$ , მიღებულია ფორმულები რკინაბეტონის ღუნვად ელემენტებში ბზარის დასადგენად. გ.შ. გაბუნას [16] ნაშრომში მოცემულია არმატურის კვეთის ფართობის დადგენა მაზვების კონცენტრაციის ადგილებში, კერძოდ ჰიდროტექნიკური ნაგებობების წყლის გადამყვანი ღიობის ირგვლივ; შემოთავაზებულია ბზარის გახსნის სიდიდის დადგენა, ჩატარებულია ექსპერიმენტები. დამუშავებულია გაანგარიშების მეთოდი დატვირთვისაგან გამოწვეული ბზარის გახსნის სიდიდის დასადგენად და შედარებულია ექსპერიმენტით მიღებულ სიდიდეებთან, გამოვლინდა კარგი დამთხვევა.

ა.ბ. პირადოვის [17, 18] და სხვების ნაშრომებში შემოთავაზებულია რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშების მეთოდი დატვირთვის ხანგრძლივი, ხანმოკლე და ნიშანცვლადი სიდიდის მოქმედებისას. გაანგარიშების მეთოდი ემყარება  $K_{IC}^r/K_{IC}^b$  ფარდობას, ე.ი. მაზვას გაჭიმულ არმატურასა და ბეტონში; ემპირიული კოეფიციენტები, რომლებიც შემოთავაზებულია გაანგარიშების მეთოდში დადგენილია ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით. გამოცდილია ფილა წრიული ღიობით, რომელიც დაარმატურებულია ცალფა არმატურით ღიობის ორივე მხარეს.

კ.ა. პირადოვის [12, 13, 15] ნაშრომში მოცემულია კვლევები  $K_{IC}^r$ -ის რკინაბეტონის მაზვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტის, რომელიც წარმოადგენს რღვევის მექანიკის ძირითად ძალისმიერ მუდმივას. იგი საკმაო სიზუსტით აღწერს ბზარების გაჩენის და მისი განვითარების პროცესს.  $K_{IC}^r$ -ის ზუსტი მნიშვნელობის გარეშე ან  $G_s$ -ის გარეშე რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის მეთოდებს პრაქტიკულ გაანგარიშებებში არ გამოიყენება.

$K_{IC}^r$ -ის დასადგენად კ.ა. პირადოვის [19] და სხვების მიერ ჩატარებულია კვლევები კოჭებზე. ექსპერიმენტის შედეგების ანალიზით დადგინდა, რომ გრძივი არმატურა პრაქტიკულად არ ახდენს გავლენას  $K_{IC}^r$ -სიდიდეზე.

ზოგი მკვლევარი თვლის, რომ არმატურის რაოდენობა ბზარის გაჩენას ეწინააღმდეგება და გვთავაზობს ბზარის სიგრძის გამოთვლას შემდეგი ფორმულით:

$$l_{crc} = K_{IC}^2 / \tau \cdot R_{bt}^2. \quad (13)$$

ასევე ბზარის სიგანის დასადგენ ფორმულას:

$$a_{crc} = \delta_1 \phi_c \mu_s (1 - \nu^2) K_{IC}^b \cdot l_{crc} K_r / (\lambda_b E_b \Delta N_s), \quad (14)$$

სადაც  $\delta_1$ ,  $\phi_c$  – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს დატვირთვის სახეს და შიგა ძალების მოდების ხანგრძლივობას;

$\mu_s$  – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს არმატურის პროფილს;

$\nu$  – პუასონის კოეფიციენტი;

$K_r$  – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ბზარის წვერზე არაწრფივი დეფორმაციის განვითარებას, რომელიც ტოლია

$$K_r = 1,15 + 0,01R_b,$$

$\lambda_b$  – ბეტონის დრეკადობის კოეფიციენტი;

$\Delta N_s$  – ძაბვების ნაზრდი არმატურაში  $A_s$  და  $A_{sp}$ .

ბზარებს შორის მანძილის გამოსათვლელად შემოთავაზებულია ფორმულა:

$$h_{crc} = \frac{d\mu}{6\mu}, \quad (15)$$

სადაც  $d$  – ღეროს დიამეტრია;

$\mu$  – არმირების პროცენტი.

სხვადასხვა მკვლევარების მიერ შემოთავაზებული ფორმულები განსხვავდება, ნორმებში მოცემული ფორმულებისაგან, სადაც ბზარის გახსნის სიდიდეს, ბზარის სიგრძესა და ბეტონის ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტს შორის დამოკიდებულება მრავალ ემპირიულ კოეფიციენტებთან არის დაკავშირებული.

რღვევის მექანიკის მეთოდებით ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგად (რკინაბეტონის კოჭზე) დამუშავებულია ხანგრძლივობის



პროგნოზირების მეთოდი არმატურაში და ბეტონში დაგროვილი დაზიანების გათვალისწინებით.

დაზიანების საზომად მიღებულია კოეფიციენტი  $\psi$ , რომელიც არის ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის ფუნქცია და  $N$  ძალის ზემოქმედებისას მისი ცვლილება გამოითვლება ფორმულით:

$$K_I(N) = K_I N^{a/2} \sqrt{\frac{E_N}{E_0}}, \quad (16)$$

სადაც  $E_0$  და  $E_N$  – ბეტონის დრეკადობის მოდული დატვირთვის მოდებისას და განმეორებითი დატვირთვისას

$$a = \ln(E_0 K_{IC}^2 / E_N K_I) / \ln N_{cr}, \quad (17)$$

სადაც  $N_{cr}$  – დატვირთვის ციკლის რაოდენობაა რღვევისას.

მეცნიერები კვლევის ანალიზის შემდეგ მივიდნენ იმ დასკვნამდე, რომ რღვევისას კოეფიციენტი  $\psi = 0$  მიღებულია დამოკიდებულება კონსტრუქციის ექსპლოატაციის შესაძლებლობის, რომლის სიდიდე წარმოადგენს  $K_I$ -ს ფუნქციას. ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის სიდიდე, რომელიც გამოითვლება (16) იზრდება დატვირთვის გაზრდისას, დაახლოებით 2-ჯერ, ამას გარდა დაზიანებად წარმოადგენილია ბზარის გახსნის სიდიდე არმატურის შემაკავებელი ფაქტორის გარეშე. ამდენად, რკინაბეტონის ელემენტის მთლიანი ექსპლოატაციის შესაძლებლობა არ შეესაბამება რეალურს.

მიუხედავად იმისა, რომ რკინაბეტონის ელემენტის რღვევის მექანიკის მეთოდებით გაანგარიშებისას ადგილი აქვს ემპირიული კოეფიციენტების სიმრავლეს, მიღებული თეორიული გაანგარიშებები ძალიან ახლოს არის ექსპერიმენტით დადგენილ სიდიდეებთან. იგი იძლევა ბევრი ისეთი საკითხების გადაწყვეტის შესაძლებლობას, რაც ცნობილი გაანგარიშების მეთოდებით შეუძლებელია, მაგალითად, ჰიდროტექნიკის ნაგებობებში წყლის გადამგდები ხვრელის (ლიობის) ირგვლივ ძაბვების კონცენტრაციის დადგენას, მის დაარმატურებას, ფანჯრების ლიობის არმირებას როცა მოცემულია ლიობის სიგრძე და სიგანე, ტექნოლოგიური

ხვრელებისას ძაბვების დადგენა და შესაბამისად მის კონსტრუირებას და სხვა.

წინამდებარე კვლევები არის საფუძველი რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის ერთიანი გაანგარიშების თეორიის განვითარების, სრულყოფის, რომელიც აზუსტებს ამტანუნარიანობას და დეფორმაციას, რკინაბეტონის ელემენტების ბზარწარმოქმნის ფიზიკურ პროცესს, დაზიანებას ბეტონსა და არმატურაში,  $K_{lc}$  და  $G_c$  – ენერგეტიკული კრიტერიუმების დადგენას.

### **1.3. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სიმტკიცეზე გაანგარიშების არსებული მეთოდები**

#### **ა) კაშხლების გაანგარიშების არსებული მეთოდები**

ამჟამად თაღოვანი კაშხლების გაანგარიშების მეთოდები, რომლებიც ითვალისწინებენ ნაგებობის სივრცულ მუშაობას, იმდენადაა დამუშავებული, რომ მათი გამოყენებისათვის სიძნელეები პრაქტიკულად დაძლეულია, სათანადო საპროექტო ორგანიზაციების განკარგულებაშია ზოგიერთი ძირითადი მეთოდის (განსაკუთრებით საცდელი დატვირთვების მეთოდის) დეტალურად დამუშავებულია ალგორითმები და პროგრამები ელექტრონული გამოითვლილი მანქანებისათვის.

#### **1. თავისუფლად დაყრდნობილი თხელი წრიური თაღის გაანგარიშება**

განსახილველი ხერხი, რომელიც გამოყენებულ იქნა გასული საუკუნის ბოლოს აგებული პირველი თაღოვანი კაშხლებისათვის, უმარტივესია. სიმტკიცეზე გაანგარიშებისათვის თაღოვან კაშხალს ყოფენ სიმაღლეზე ჰორიზონტალური კვეთებით ერთეული (ჩვეულებრივ 1 მ) სიმაღლის დამოუკიდებლად მომუშავე თაღებად, რომელთა დატვირთვას შეადგენს თანაბრად განაწილებული ჰორიზონტალური წნევა; მიღებულია დაშვება იმის შესახებ, რომ თითოეული საანგარიშო თაღი ქუსლებით თავისუფლად ეყრდნობა საყრდენებს, რომლებზედაც მას შეუძლია უხახუნოდ სრიალი. ასეთი გამარტივებული სასაზღვრო პირობების გამო ნორმალური ძაბვა

თაღის ნებისმიერ რადიალურ კვეთაში მუდმივია და ტოლია საყრდენი რეაქციისა  $N=R=PT_3$ , სადაც  $P$  კვეთის ჰიდროსტატიკური ინტენსივობაა, ხოლო  $R$  – თაღის გარე რადიუსი.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, ნორმალური მკუმშავი ძაბვა თაღის ნებისმიერ რადიალურ კვეთში:

$$\sigma = \frac{N}{F} \frac{Pr_3}{e}. \quad (18)$$

აქედან საანგარიშო თაღის საძიებელი სისქე:

$$e = \frac{Pr_3}{[\sigma]}, \quad (19)$$

სადაც  $[\sigma]$  ბეტონზე დასაშვები ძაბვა კუმშვის დროს.

მიღებული უმარტივესი (19) ფორმულა, რომელსაც ცილინდრულ ანუ „საქვაბე“ ფორმულას უწოდებენ, თეორიულად მართებულია უსასრულოდ მცირე სისქის თაღებისათვის და ამიტომ სქელი თაღის შემთხვევაში იგი იძლევა უხეშ მიახლოებით შედეგებს იმის გამო, რომ (19) ფორმულა ვერ ითვალისწინებს ჩამაგრების, ტემპერატურის, ბეტონის შეკლების, თაღის საკუთარი წონის გავლენას და ცალკეული თაღოვანი სარტყლების ერთობლიობას, ბეტონზე დასაშვები მკუმშავი ბმების სიდიდეს ღებულობენ შემცირებულს  $[\sigma]=40\div 50$  კგ/სმ<sup>2</sup> ზედა თხელი თაღებისათვის და  $[\sigma]=30\div 25$  კგ/სმ<sup>2</sup> – ქვედა სქელი თაღებისათვის.

**ქუსლებით ხისტად ჩამაგრებული მუდმივი სისქის თხელი წრიული თაღის გაანგარიშება:** ზოგად შემთხვევაში ქუსლებით ხისტად ან დრეკადად ჩამაგრებული თაღი წარმოადგენს სამჯერ სტატიკურად ურკვევად სისტემას, მაგრამ კონსტრუქციულად სიმეტრიულ და სიმეტრიულად დატვირთული თაღოვანი კაშხლიდან ამოჭრილი ერთეული სიმაღლის ნებისმიერი თაღოვანი სარტყელი წარმოადგენს ორჯერ სტატიკურად ურკვევად სისტემას, რადგან თაღის სიმეტრიის კვეთში განივი ძალა ნულის ტოლია; ამგვარად, ზედმეტი უცნობებია მღუნავი მომენტის  $X_1=M_0$  და განბრჯენი  $X_2=H_0(X_3=V_0=0)$  სტატიკურად ურკვევი სიდიდეების განსაზღვრა შეიძლება ჩატარდეს სამშენებლო მექანიკის ძალთა მეთოდის გამოყენებით.

$X_1$  და  $X_2$  სტატიკურად ურკვევად სიდიდეთა განსაზღვრა შეიძლება მნიშვნელოვნად გამარტივდეს. ღრეკადი ცენტრის მდებარეობა განისაზღვრება % კოორდინატით, რომელიც მოიძებნება პირობიდან  $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$ .

რადგან პირობის თანახმად  $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$ , ამიტომ კანონიკური განტოლებანი მარტივდება და სტატიკურად ურკვევადი სიდიდეები განისაზღვრება გამოსახულებებიდან:

$$\begin{aligned} X_1 = Me &= -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}, \\ X_2 = He &= -\frac{\Delta_{2P}}{\delta_{22}}. \end{aligned} \tag{20}$$

განსაზღვრულია რა ზედმეტი უცნობები საჭიროა მათი გათვალისწინება. თალის სიმტკიცეზე გაანგარიშება ჩატარდეს შემდეგი მიმართულებით:

**1. დატვირთვების და ძალების გამოთვლა:** წყლის თანაბარი წნევისას, ტემპერატურის თანაბარი ცვალებადობისას და ა.შ განისაზღვროს  $M_0$  მღუნავი მომენტი და  $N_0$  ნორმალური ძალა სტატიკურად სისტემის ნებისმიერ კვეთში;

მიღებული  $M_0$  და  $N_0$  მნიშვნელობები ჩაისვას ფორმულებში და მათი მრიცხველების ინტეგრების შემდეგ, განისაზღვროს სტატიკურ ურკვევადი  $M_0$  და  $N_0$  სიდიდეები;

თალის რიგ კვეთში, ქუსლებში და კლიტეში, განისაზღვროს  $M$  მღუნავი მომენტი და  $N$  ნორმალური ძალა;

სქელი თაღების შემთხვევაში საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას კვეთებში ძაბვების მრუდწირული კანონით განაწილება.

**2. წყლის თანაბარ წნევაზე გაანგარიშება** სტატიკურად რკვევად სისტემაში წყლის თანაბარი წნევით გამოწვეული მღუნავი მომენტი და ნორმალური ძალა ტოლია სათანადოდ  $M_0=0$  და  $N_0=Pr_0$ , სადაც  $P$  ჰიდროსტატიკური წნევის ინტენსივობაა, ხოლო  $r_0$  თალის გარეთა რადიუსი.

### 3. ტემპერატურის თანაბარ ცვლილებაზე გაანგარიშება:

თაღის ტემპერატურული დეფორმაციების დროს გარე დატვირთვა არ არსებობს, ამიტომ ამ დატვირთვებისაგან გამოწვეული  $M_0$  მღუნავი მომენტი და  $N_0$  ნორმალური ძალა ნულის ტოლია. წარმოიშობა მხოლოდ  $N_0$  ტემპერატურული განმბრჯენი დრეკად ცენტრში და შესაბამისი ტემპერატურული ძაბვები, რომლებიც ისევე იქნება განაწილებული თაღში, როგორც წყლის თანაბარი წნევის მოქმედების დროს.

$H$  განმბრჯენი შეიძლება განისაზღვროს:  $X_2 = He = -\frac{\Delta_2}{\delta_{23}}$  ფორმულის გამოყენებით.

თუ მასში  $\Delta_{2p}$  შეიცვლება  $\Delta_{21}$  სიდიდით, რომელიც ტოლია  $\Delta_{21} = \int \delta t \cos \delta ds$

$$H_1 = -\frac{\Delta_{21}}{\delta_{12}}$$

### 4. ტემპერატურის არათანაბარ ცვლილებაზე გაანგარიშება:

როდესაც თაღის წახნაგებზე არსებობს სხვადასხვა  $t_1^{\circ}$  და  $t_2^{\circ}$  ტემპერატურა, მაშინ ასეთი ტემპერატურული რეჟიმი გამოიწვევს წახნაგებზე და თაღის შიგნით ბოჭკოების სხვადასხვა სიდიდით დაგრძელებას, თუ დავუშვებთ, რომ ტემპერატურის ვარდნა  $t_1^{\circ}$ -დან  $t_2^{\circ}$ -მდე წარმოებს წრფივი კანონით, მაშინ ეს შემთხვევა შეიძლება დავიყვანოთ წინა შემთხვევაზე, ამისათვის საჭიროა განვიხილოთ თაღის  $ds$  ელემენტის დეფორმაცია ტემპერატურის საშუალო ცვლილების -  $t_{საშ} = 0,5(t_1 + t_2)$  დროს, რომელზეც დამატებით იმოქმედებს  $\Delta t = t_1 - t_2$  ტემპერატურათა სხვაობით წარმოქმნილი მომენტი.

იმ წახნაგზე, რომელზედაც ტემპერატურა მეტია გვაქვს  $+\frac{\Delta t}{2}$  და მკუმშავი ძაბვები, ხოლო მოპირდაპირე წახნაგზე  $-\frac{\Delta t}{2}$  და გამჭიმი ძაბვები, აღნიშნულ ძაბვებს ადგილი აქვს თაღის ნებისმიერ კვეთში, ამიტომ განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მათი გათვალისწინება კვეთებში, სადაც ისინი არახელსაყრელ გავლენას ახდენენ ჯამურ ძაბვებზე.

თაღის საერთო სიმტკიცის შეფასებისათვის საჭიროა შეჯამდეს სხვადასხვა დატვირთვებისაგან გამოწვეული  $\sigma$  ძაბვები და შესაბამისად არჩეულ იქნას კაშხლის ბეტონის კლასის, ცხადია ჯამურმა ძაბვებმა არ უნდა გადააჭარბოს შერჩეული კლასის ბეტონის დასაშვებ ძაბვას.

#### **5. სუფთა თაღების გაანგარიშების მეთოდები.**

თაღების გაანგარიშების თეორია საკმაოდ ღრმად არის დამუშავებული, რეკომენდებულია რიგი მეთოდებისა, რომლებიც მოცემულია სამშენებლო მექანიკის სხვადასხვა კურსში და სპეციალურ გამოკვლევებში. ცვლადი სისქისა და ცვლადი რადიაუსის თაღების გაანგარიშების მეთოდი ზოგადი სახით მოყვანილი აქვს ე. კარიაგინს [13], წრიული თაღები საკმარისად მარტივად გაიანგარიშება ჰიდროტექნიკურ წნევასა და ტემპერატურულ ზემოქმედებაზე. ნ. მელუშჩენკოვსა და ა. მოჟევიტინოვის [11] ხერხით; შედარებით მარტივი ხერხი დამუშავებული აქვს ალ. ლოსაბერიძეს. სქელი თაღებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნას სპეციალური გრაფიკები, რომლებიც ითვალისწინებენ განივ ძალებს და ბრტყელი კვეთების კანონს, რომელიც გულისხმობს ნორმალური ძაბვების განაწილებას ჰიპერბოლური ეპიურით.

#### **თაღოვანი კაშხლების, როგორც სივრცული სისტემების გაანგარიშების მეთოდები:**

1. გ. რიტერ-ვ. სკრილნიკოვის მეთოდი: განსახილველ მეთოდში თაღოვანი კაშხალი წარმოდგენილია ჰორიზონტალური თაღებისა და ფუძეში ჩამაგრებული ვერტიკალური კედელ-კონსოლების სისტემით. ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედების შედეგად აღნიშნული ელემენტები განიცდის დეფორმაციებს (გადაადგილებებს), ცხადია საერთო წერტილში თაღებისა და კონსოლების დეფორმაციები ტოლია, მაშინ კაშხალზე მოსული ჰიდროსტატიკური დატვირთვა იყოფა ორ ნაწილად, ერთი გამოიწვევს თაღების ჩაღუნვებს, ხოლო მეორე – კონსოლების ტოლ ჩაღუნვებს.

განსახილველ მეთოდში დეფორმაციების ტოლობა წარმოებს ერთ ცენტრალურ ვერტიკალურ კვეთში, რომ დეფორმაციების ასეთი ტოლობა, უზრუნველყოფილია სხვა ვერტიკალურ კვეთებშიც. ამ შემთხვევაში კაშხლის ვერტიკალური კვეთი იყოფა ჰორიზონტალური სიბრტყეებით მონაკვეთებად, ხოლო თვით კაშხალი – ერთნაირი სიმაღლის თაღებად.

მიუხედავად რიტერ-სკრილნიკოვის („ცენტრალური კონსოლის“) ზემოაღნიშნული მეთოდის გადამუშავებისა, სადაც გათვალისწინებულ იქნა ტემპერატურის თანაბარი და არათანაბარი გავლენა, თაღების ქუსლების დრეკადი ჩამაგრება, ქუსლებით სახსრულად დამაგრება, გადაადგილებათა ტოლობა ტანგენციალური მიმართულებით, მგრები მომენტის გავლენა და სხვ. განხილული მეთოდი დასმულ ამოცანას სრულად ვერ წყვეტს.

## **2. საცდელი დატვირთვების მეთოდი:**

ეს მეთოდი წარმოადგენს წინა მეთოდის განზოგადებას და მას საფუძვლად უდევს გადაადგილებათა ტოლობა. ანგარიშისათვის თაღოვან კაშხალს ყოფენ ორ ჰორიზონტალურ თაღებად და ვერტიკალურ კონსოლებად, განიხილება თაღებსა და კონსოლებს შორის დატვირთვის განაწილება და ცნობილი მეთოდებით გამოითვლება თაღებისა და კონსოლების ჩაღუნვა მათი გადაკვეთის ადგილებში, თუ ჩაღუნვებს შორის განსხვავება 10 %-ს აღემატება, მაშინ ხდება დატვირთვის ეპიურების გასწორება. იმეორებენ ჩაღუნვების გამოთვლას, მანამდე, სანამ თაღებისა და კონსოლების ჩაღუნვებს შორის განსხვავება შესაბამის წერტილებში არ შემცირდება 10%-ზე ნაკლებ სიდიდემდე.

გამოთვლითი სამუშაოების შემცირების მიზნით რეკომენდებულია ვისარგებლოთ ანალოგიის მეთოდით და გაანგარიშებული კაშხლებისათვის დავნიშნოთ თაღებსა და კონსოლებს შორის დატვირთვის განაწილების შესაფერისი მრუდები, ამ წესმა შეიძლება ყველაზე სწრაფად მიგვიყვანოს სასურველ შედეგებამდე.

## **3. ქ. განეგის გამოკვლევები:**

თაღოვანი კაშხლების, როგორც სივრცული სისტემების, სტატიკური გაანგარიშების თეორიის განვითარების ახალი ეტაპი დაიწყო ქ. განეგის

მიერ ჩატარებული გამოკვლევებით. აღნიშნული მეთოდის კვლევის შედეგებმა თავისი გამოხატულება ჰპოვა უკვე აგებულ და მშენებარე თაღოვანი კაშხლების ტექნიკური პროექტების დოკუმენტაციებში.

ქ. განეგის მიერ შემოთავაზებულ იქნა თაღოვანი კაშხლების, როგორც სივრცული სისტემების გაანგარიშების სამი სქემა.

**პირველი სქემა** ემყარება იმ დაშვებას, რომ შესაძლებელია თაღოვანი კაშხლის დანაწევრება რიგ ჰორიზონტალურ თაღებად, რომლებიც წარმოადგენენ რიგი კედელ-კონსოლების საგებს („ვინკლერის ფუმეს“). საგების კოეფიციენტი  $n$  წერტილში წარმოადგენს იმავე წერტილში თანაბრად განაწილებულ ერთეულს ჰორიზონტალური დატვირთვით გამოწვეული თაღის ჩალუნვის შებრუნებულ სიდიდეს.

**მეორე სქემა** წარმოადგენს პირველის განვითარებას, რადგან ითვალისწინებს არა მარტო რადიალურ ჩალუნვებს, არამედ კონსოლების ელემენტების ბრუნვასაც, ე.ი. მგრეხ მომენტებს.

**მესამე სქემა** წარმოადგენს პირველი და მეორე სქემის განზოგადებას; ამ სქემის მიხედვით თაღოვანი კაშხალი განიხილება, როგორც დრეკად ფუმეზე მდებარე ფილა, რომელსაც გააჩნია ცვალებადი დრეკადობის კოეფიციენტი.

ქ. განეგის მიერ შემოთავაზებულ გაანგარიშებათა მეთოდებიდან საპროექტო პრაქტიკაში გამოყენებულ იქნა პირველი და მესამე სქემა.

#### **4. შერეული ვარიაციულ-ღეროვანი მეთოდი:**

განსახილველი მეთოდი დამუშავებულ იქნა პროფ. ვ. ხუბერიანის [22] მიერ საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში, იგი ემყარება თაღოვანი კაშხლის ღეროვან საანგარიშო მოდელსა და ამოცანის გადაწყვეტის ვარიაციულ მეთოდს. ეს მეთოდი ატარებს შერეულ ხასიათს, ახლო ამოცანამდე დაყვანას, რომელიც იძლევა რიცხვითი გადაწყვეტის საშუალებას, მექანიკური მოდელისა და ფუნქციონალურ განტოლებათა ერთობლივი დისკრეტიზაციის გამოყენებას. ეს მეთოდი დაფუძნებულია კაშხლის საანგარიშო მოდელზე,



რომელიც პრინციპულად არ განსხვავდება საცდელი დატვირთვების ცნობილი მეთოდების საანგარიშო მოდელებისაგან. იგი წარმოადგენილია უსასრულოდ მცირე სიმაღლის თაღების და მცირე საგნის კონსოლების უსასრულო სიმრავლით. საცდელი დატვირთვების მეთოდისაგან განსხვავებით, მოდელი ინტერპრეტირებულია, როგორც ორფენიანი. უკანა ფენა, რომელიც შედგება თაღებისაგან, კონსოლებისათვის განიხილება როგორც დრეკადი ფუძე. გარე ძალოვანი დატვირთვები და წონის დატვირთვა მოდებულია უშუალოდ კონსოლზე, ტემპერატურის ცვალებადობას განიცდის მოდელის ორივე ფენა – კაშხლის მასა თანაბრად ნაწილდება ორივე ფენას შორის.

ვარიაციულ-ღეროვან მეთოდში ძირითად უცნობ ფუნქციებს წარმოადგენს სისტემის გადაადგილებანი. ამ მეთოდში სპეციალური ხერხის და გადაადგილებათა ერთობლიობის პირობების დახმარებით ამოცანა დაიყვანება ერთგანზომილებიან განტოლებათა სისტემაზე, რომელიც აღწერს კაშხლის გადაადგილებებს.

##### **5. ფაქტიური „ორთოტროპიული“ სისტემების შერწყმის მეთოდი.**

ეს მეთოდი, რომელიც პროფესორმა ი. ღუდუშაურმა დაამუშავა [21] საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში, ითვალისწინებს თაღოვანი კაშხლის იმ მთავარ თავისებურებას, რომ იგი წარმოადგენს გარსის ტიპის უწყვეტ სივრცულ სისტემას, რომლის გაანგარიშება მიზანშეწონილია მოხდეს გარსების თეორიით. მაგრამ გარსების არსებული თეორიების უშუალო გამოყენება დაკავშირებულია მათემატიკური ხასიათის განსაკუთრებულ სიძნელებთან, ამიტომ ამოცანის გასამარტივებლად ი. ღუდუშაურის მიერ რეკომენდებულია ახალი საანგარიშო წნევა, რომლის თანახმად თაღოვანი კაშხალ-თაღის გარსის მუშაობა წარმოადგენილია ორი ფაქტიური სისტემის „ორთოტროპიული“ გარსების ერთობლივი მუშაობით. ამ გზით დაძლეულია ზემოხსენებული მათემატიკური სიძნელები, რადგან კერძო წარმოებელიან დიფერენციალურ განტოლებათა ამოხსნა დაიყვანება ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ამოხსნამდე, უზრუნველყოფილია პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტე.

## **6. გაანგარიშების არაგამჭოლი ღეროვან დისკრეტული სქემა:**

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის ინსტიტუტში, პროფესორ ან. ლოსაბერიძის [20] მიერ დამუშავებულ იქნა თაღოვანი კაშხლების სიმტკიცეზე გაანგარიშების მეთოდიკა, რომლის თანახმად თაღოვანი კაშხალი წარმოდგენილია, როგორც არაგამჭოლი სასრული სიგანის თაღებისა და კონსოლებისაგან შემდგარი პირობით: ღეროვანი სისტემა, ურთიერთქმედებს უცნობი შეყურსული კვანძური ძალებით. ეს ძალები იშლება სამი-რადიალური, ტანგენციალური და ვერტიკალური მიმართულებით და ამის შედეგად ყველა კვანძურ წერტილში მიიღება რეაქციის სამი ძალა და ამდენივე რეაქტიული მომენტი სათანადო ღერძების მიმართ.

თაღოვანი კაშხლების გაანგარიშების ეს სქემა იძლევა სამშენებლო მექანიკის კლასიკური მეთოდების გამოყენების საშუალებას, კერძოდ, გამოყენებულია ცნობილი ძალთა მეთოდი, რომლის საფუძველზე ყველა კვეთში განიხილება განუწყვეტლობის ძირითადი განტოლება ერთობლივად უცნობი ძალების ან გადაადგილებების ყველა მიმართულებით, ხოლო შემდგომ წარმოებს მიღებულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა.

## **7. გაანგარიშების დისკრეტულ-კონტინუალური მეთოდი:**

თაღოვანი კაშხლების გაანგარიშების ეს მეთოდი დაამუშავა პროფესორმა ა. კაკუშაძემ [23] საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის მასალათა გამძლეობისა და დრეკადობის თეორიის კათედრაზე. ამ მეთოდის მიხედვით თაღოვანი კაშხალი განიხილება, როგორც სივრცული სისტემა, რომლის ტანი წარმოდგენილია ორი სისტემის – ცვლადი კვეთის სწორხაზოვანი (კონსოლების) და მუდმივი კვეთის წრიული ღეროების (თაღების) ერთობლიობით.

ცალკეული თაღები განიხილება, როგორც განზოგადებულ დრეკად ფუძეზე მდებარე, რომელიც განისაზღვრება ექვსი დრეკადი მახასიათებლით. ამ მეთოდში დრეკადი ფუძის როლს ასრულებს კონსოლები.

## **8.თაღოვანი კაშხლების, როგორც თხელი გარსების გაანგარიშება.**

თაღოვანი კაშხალი თავისი გეომეტრიული პარამეტრებით უახლოვდება გარსს, მაგრამ სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობაში გამოყენებული გარსებისაგან განსხვავებით მისი სასაზღვრო პირობები, გეომეტრია, მოქმედი დატვირთვები და სხვა იმდენად რთულია, რომ სიმტკიცის ამოცანის ზუსტი გადაწყვეტა გარსების თეორიის საფუძველზე ურთულეს ამოცანას წარმოადგენს.

უცხოელი მკვლევარებიდან თაღოვანი კაშხლის, როგორც თხელი გარსის ზოგადი ამოცანის მიახლოებითი კერძო ამონახსნები მიღებული აქვთ ტოლკეს ლომბარდს და ჰერცოგს, რომლებმაც განიხილეს სწორკუთხოვან და ციკაბოფერდობებიან ტრაპეციულ ცილინდრული გარსები.

## **9. ზღვრული მდგომარეობის მეთოდით გაანგარიშება.**

ზღვრული მდგომარეობის მეთოდის დამუშავების ხაზით ძალიან დიდი სიმძნელებით არის დაკავშირებული, რადგან იგი მოითხოვს ფართო მასშტაბის უზუსტესი ექსპერიმენტული გამოკვლევების ჩატარებას – „სუფთა თაღის“ განხილვის ჩარჩოებში. პირველი ნაბიჯები ამ მიმართულებით გადაიდგა მხოლოდ რამდენიმე სამეცნიერო კვლევით დაწესებულებაში.

## **10. ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდი:**

რადგან თაღოვანი კაშხლების სიმტკიცის არსებული თეორია ვერ უზრუნველყოფს ძაბვისა და დეფორმაციული მდგომარეობის ზუსტი სურათის გამოვლინებას, პრაქტიკაში ფართოდ დაინერგა თაღოვანი კაშხლების მოდულური გამოკვლევების მეთოდები. ამჟამად ასეთი გამოკვლევები მიმდინარეობს მსხვილი მასშტაბების მოდელებზე, მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში.

ექსპერიმენტის ჩატარების გაზომვების თანამედროვე ტექნიკური დონე საშუალებას იძლევა ნაგებობის მოდელებზე მიღებული ძაბვისა და დეფორმაციების საკმარისად საიმედო მონაცემები. ამჟამად არ გეგმარდება არც ერთი თაღოვანი კაშხალი, რომელთა ტექნიკურ დოკუმენტაციას

საფუძვლად არ ედოს, ანალიზური გაანგარიშება და ექსპერიმენტულ-მოდულურ გამოკვლევათა შედეგები.

#### 1.4. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების არსებული მეთოდები

მიწისძვრა ბუნებრივ კატასტროფებს შორის ერთ-ერთი ყველაზე საშიში მოვლენაა, რომელსაც დიდ მასშტაბებში გამოვლენისას ხშირ შემთხვევაში თან ახლავს ნგრევა, მსხვერპლი და დიდი რაოდენობით მატერიალური ზარალი. მიწისძვრას იწვევს დედამიწის წიაღში მიმდინარე პროცესები, რაც შესაძლოა იყოს ვულკანის მოქმედებით გამოწვეული, კარსტული ჩაქცევები, აფეთქებები და სხვა, მაგრამ ხშირ შემთხვევაში ამ პროცესის მთავარი გამომწვევი მიზეზი ის ტექტონიკური პროცესებია, რომელიც დედამიწის ლითოსფეროა და ზედა მანტიაში ხდება. მიწისძვრები წლის განმავლობაში რამოდენიმე ათასჯერ ხდება. მაგრამ სხვადასხვა სიმძლავრით და შესაბამისად, ამათგან ზოგიერთი დამანგრეველია, ზოგიერთი ადამიანისათვის საერთოდაც შეუმჩნეველი.

საქართველოს ტერიტორია მდებარეობს სეისმურად აქტიურ რეგიონში, რომლის ტერიტორიის ბალიანობაც ბოლო პერიოდში 7; 8; 9 ბალით შეიცვალა.

მიწისძვრას ხშირად თან სდევს სხვა სტიქიური მოვლენები, როგორცაა: ცუნამი, მეწყერი, ზვავი, ღვარცოფი, ხანძარი და სხვა.

საქართველოს ტერიტორია, როგორც კავკასიის რეგიონის განუყოფელი ნაწილი, ალპურ-ჰიმალაურ სეისმოაქტიურ სარტყელს მიეკუთვნება.

მაღალი აქტიურობით ჯავახეთის ვულკანური მთიანეთი და კავკასიონია გამორჩეული.

სეისმური ძალის სიდიდე გამოვლენა მშენებლობის ტერიტორიაზე ხდება სეისმური რუკის მიხედვით, რომელიც შედგენილია სათანადო კვლევითი ორგანიზაციების მიერ და მიღებულია ნორმატიული მასალის სახით. სეისმური ძალის ინტენსივობა მიწის ზედაპირზე შეფასებულია

მაქსიმალური გრუნტის აჩქარებით, რომელიც შეესაბამება 0,1...0,2 და 0,4-ს მოედნის სეისმურობის შესაბამისად 7; 8; 9 ბალი.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები არიან ისეთი საინჟინრო ნაგებობებს, რომლებიც სისტემატურად ან პერიოდულად იმყოფებიან წყლის რესურსების ზემოქმედების ქვეშ. მათი სეისმომდეგობა არის ქვეყნისათვის უპირველესი ამოცანა.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს გააჩნიათ ბევრი თავისებურებანი მუშაობის პერიოდში. ნაგებობები შენდება სხვადასხვა გეოლოგიურ, ჰიდროლოგიურ და კლიმატურ პირობებში, ამიტომ მათი ტიპები და კონსტრუქციები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან. დღეს ითვლება ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა 100 ტიპზე მეტი.

ადგილმდებარეობის განთავსების მიხედვით ისინი იყოფა: მდინარის, ზღვის, ტბების, შიგასასისტემო და მიწისქვეშა ნაგებობებად.

ფუნქციური თვისებების მიხედვით, რომლებსაც ისინი ასრულებენ:

- ა) წყალშემაკავებელი (კაშხალი, დამბა);
- ბ) წყალგამტარი (არხები, გვირაბები, მილგაყვანილობები);
- გ) წყალშემკრები;
- დ) წყალსაგდები – ზედმეტი წყლის გასაშვებად;
- ე) მარეგულირებელი – ნაპირსამაგრი, სამდინარო წყლების სარეგულირებელი (გამათანაბრებელი);
- ზ) შიგასასისტემო – მელიორაციული დანიშნულების.

გამოყენების პირობების მიხედვით ჰიდროტექნიკური ნაგებობები იყოფა მუდმივ და დროებით ნაგებობებად.

კაპიტალურობის მიხედვით ყველა მუდმივი დანიშნულების ჰიდროტექნიკური ნაგებობები იყოფა I კლასიდან IV კლასად. დროებითი ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მიეკუთვნება V კლასს. სახალხო სამეურნეო დანიშნულებიდან გამომდინარე. ის ასევე დამოკიდებულია მის სიმაღლეზე და ექსპლოატაციის ვადაზე და ფუძის გრუნტის ტიპზე.

ჰიდროტექნიკური ობიექტების კლასზეა დამოკიდებული საძიებო-საპროექტო სამუშაოების შემადგენლობა და მოცულობები. ასევე კლასზეა

დამოკიდებული სიმტკიცისა და მდგრადობის გაანგარიშების დროს რეზერვის კოეფიციენტები. მის მნიშვნელობის მიხედვით განისაზღვრება წყლის ხარჯის საანგარიშო მნიშვნელობები. ირჩევა მშენებლობის პროცესში გამოყენებული მასალების სახეობა და ხარისხი.

ცალკეული ჰიდროტექნიკური ნაგებობები კლასიფიცირდება სიმაღლის და კონსტრუქციულობის ნიშნის მიხედვით. ასევე სამშენებლო მასალის მიხედვით.

სპეციალურ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს ეკუთვნის ჰიდრო-ელექტროსადგურები.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სეისმომდეგობაზე გაანგარიშებისას მიუხედავად მისი სახეობისა და კლასისა გამოიყენება ანგარიშის სამი მეთოდი. ესენია: დინამიკური თეორია, ხაზოვან-სპექტრალური და სტატიკური.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სეისმომდეგობის შეფასებისათვის საჭიროა განსაკუთრებული შეთანაწყობა დატვირთვებისა და ზემოქმედებებისა, რომელიც მოიცავს დატვირთვებისა და ზემოქმედებების ძირითად შერწყმას და სეისმური ზემოქმედებისას განსაკუთრებულ დატვირთვებს.

მიწისძვრის დროს ფუძის სეისმური რხევების გავლენით ნაგებობებში წარმოიქმნება ინერციული ძალები, რომელთაც სეისმურ ძალებს უწოდებენ.

აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ სეისმურ რაიონში მშენებლობისათვის საჭიროა დასაგეგმარებელი ჰიდრონაგებობანი, გარდა ჩვეულებრივი დატვირთვებისა (ნაგებობისა და მასზე მოთავსებულ მოწყობილობათა საკუთარი წონა, წყლის ჰიდროსტატიკური წნევა, ტალღების ნატანის, ყინულის წნევები და სხვა) გაანგარიშდეს სეისმური ძალების ზემოქმედებაზე, რომლებიც ქმნის დამატებით ძაბვით მდგომარეობას (სეისმურ ძაბვით მდგომარეობას).

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა გეგმარების დროს გათვალისწინებულია სივრცეში სეისმური ძალების ნებისმიერი მიმართულება, ამიტომ

განგარიშების დროს განიხილება, როგორც გრძივი, ისე განივი ღერძების მიმართულებით მოქმედი ჰორიზონტალური ძალები. ამასთანავე, ორივე მიმართულებით სეისმური ძალების მოქმედება გაითვალისწინება ცალ-ცალკე.

მშენებლობის რეგიონში მიწისძვრის ძალა ფასდება სეისმურობით, რომელიც სკალის შესაბამისად გამოისახება ბალოებით და აიღება ქვეყნის ტერიტორიის სეისმური დარაიონების რუკის მიხედვით.

მშენებლობის პუნქტის სეისმურობის დაზუსტება წარმოებს ქალაქების დაბებისა და სამრეწველო საწარმოთა ტერიტორიების სეისმური მიკროდარაიონების რუკების საფუძველზე, რომლებიც დგება სპეციალური ინსტრუქციის შესაბამისად.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა საანგარიშო სეისმურობა აიღება ცხრილის მიხედვით.

ცხრილი 1

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა საანგარიშო სეისმურობა

ჰიდროტექნიკური ნაგებობათა კლასები	ნაგებობათა საანგარიშო სეისმურობა, როდესაც მშენებლობის პუნქტის სეისმურობა ხასიათდება ბალოებით			
	6	7	8	9
I აგრეთვე IV კლასის ძირითადი ნაგებობანი	7	8	9	–
II და III კლასის	6	7	8	9
IV კლასის მეორეხარისხოვანი ნაგებობანი	6	7	7	8

**ინერციული ძალები.** ინერციული ანუ სეისმური ძალა წარმოადგენს მოცულობითს, მოდებულია ნაგებობის (ან მისი ელემენტების) სიმძიმის ცენტრში და განისაზღვრება ფორმულით

$$S = 1,5QK_{\nu},$$

სადაც  $Q$  არის დატვირთვა, რომელიც წარმოქმნის ინერციის ძალას (ნაგებობების ელემენტების და მასზე მოთავსებულ მოწყობილობათა საკუთარი წონა);

$K_{\nu}$  – სეისმურობის კოეფიციენტი, რომელიც აიღება ცხრილი 2-დან ნაგებობის საანგარიშო სეისმურობის შესაბამისად.

სეისმურობის  $K_b$  კოეფიციენტის მნიშვნელობები

საანგარიშო სეისმურობა ბალონით	7	8	9
$K_b$ კოეფიციენტის მნიშვნელობანი	0,025	0,05	0,1

ნაგებობის ელემენტარულ მოცულობაზე მოქმედი სეისმურობა განისაზღვრება ფორმულით

$$S_k = Q_k K_b \left( 1 + 0,5 \frac{X_k}{X_0} \right),$$

სადაც  $Q_k$  არის ელემენტის მოცულობის საკუთარი წონა და მასზე მოქმედი ვერტიკალური დატვირთვა  $k$  წერტილში;

$X_k$  – მანძილი ნაგებობის ძირიდან განსახილველი ელემენტის სიმძიმის ცენტრამდე;

$X_0$  – მანძილი ძირიდან ნაგებობის სიმძიმის ცენტრამდე.

არსებული ნორმებითა და ტექნიკური პირობებით ნებადართულია საყრდენი კედლების ტიპის ნაგებობისა და მიწისქვეშა ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისათვის (ე.ი. ხისტი ნაგებობებისათვის) საანგარიშო სეისმური ძალა განისაზღვროს ფორმულით:

$$S_k = Q_k K_b,$$

რომელიც რეკომენდებულია სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიით.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობანი (მაღალი კაშხლები, წყალსაწევი და გამთანაბრებელი კოშკები, მაღალი საყრდენი კედლები და სხვა), რომელთა საანგარიშო სეისმურობა 7 ბალია და უფრო მეტი, საჭიროა გაანგარიშდეს სეისმომედეგობის თანამედროვე დინამიკური თეორიის საფუძველზე, რომელიც უფრო რთულია, მაგრამ ამასთანავე უფრო ზუსტიც, რადგან იგი ითვალისწინებს ნაგებობის ინდივიდუალურ თავისებურებებს – სიხისტეს, მასების განაწილებას, საკუთარი რხევის სიხშირეებს (პერიოდებს), მილევადობის მახასიათებლებს და საკმარისი სისრულით აღწერს ნაგებობის სეისმური რხევების პროცესს.

დინამიკური მეთოდის თანახმად საანგარიშო სეისმური ძალა



ნაგებობის რომელიმე  $k$  წერტილში, სადაც შეყურსულია მასა  $Q$  წონით, შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს როგორც სისტემის რხევის ყველა მთავარი მიმართულებით მოქმედი ძალების ჯამი

$$S_k(t) = \sum_1^n S_{ik}(t) = \sum_1^n Q_k K B_i(t) \eta_{ik},$$

სადაც  $S_{ik}(t)$  არის  $k$  წერტილში მოქმედი დროში ცვალებადი სეისმური ძალა, რომელიც შეესაბამება  $i$ -ურ მთავარ მიმართულებას (თავისუფალი რხევის  $i$ -ურ ფორმას).

$Q_k$  – ინერციული ძალის გამომწვევი ვერტიკალური შეყურსული დატვირთვა  $K$  წერტილში (ნაგებობის საკუთარი წონის ნაწილი);

$K_b$  – სეისმურობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა აიღება ცხრილი 3-დან.

$B_i(t)$  გასაანგარიშებელი ნაგებობის თავისუფალი რხევის  $i$ -ური ფორმის შესაბამისი დინამიკური კოეფიციენტი, რომელიც ცვალებადია დროში.

$\eta_{ik}$  – კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ნაგებობის დეფორმაციის ფორმაზე მისი თავისუფალი რხევის  $i$ -ური ფორმის დროს და  $Q_k$  დატვირთვის მდებარეობაზე (ნახ. 7). იგი განისაზღვრება ფორმულით

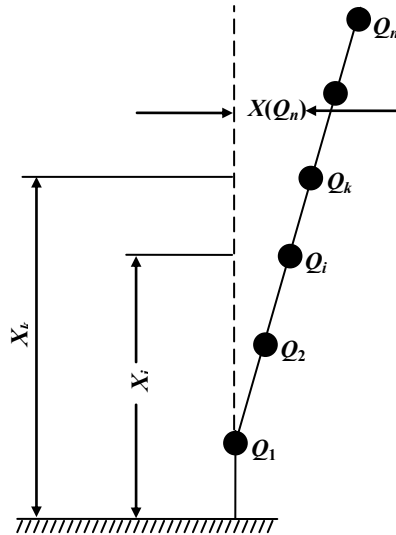
$$\eta_{ik} = \frac{X_i(x_i) \sum_1^n Q_i X_i(x)}{\sum_1^n Q_i X_i^2(x)},$$

სადაც  $X_i(x_k)$  და  $X_i(x)$  ნაგებობის გადაადგილება თავისუფალი რხევის დროს განსახილველ  $k$  წერტილში და ყველა  $i$  წერტილში, სადაც საანგარიშო სქემის შესაბამისად შეყურსული მასებია განლაგებული. ამასთანავე ადგილი აქვს ტოლობას:

$$\sum_1^n \eta_{ik} = 1.$$

ნაგებობის თავისუფალი რხევის რომელიმე  $i$ -ური ტონის შესაბამისი საანგარიშო სეისმური დატვირთვის მაქსიმალური მნიშვნელობა განისაზღვრება ფორმულით

$$S_{ik} \approx Q_k K_b B_i \eta_{ik},$$



ნახ. 1. მრავალი თავისუფლების ხარისხის მქონე ნაგებობის დინამიკური საანგარიშო სქემა

სადაც  $B_i$  არის  $B_i(t)$  დინამიკურობის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომელიც დამოკიდებულია  $T_i$  პერიოდზე და რხევების მიღებაზე.

$B_i$  მნიშვნელობა განისაზღვრა ზემოთხსენებულ ნორმებში მოცემულ სპექტრალური გრაფიკის მიხედვით ან შემდეგი ფორმულით

$$B_i = \frac{1}{T_i},$$

სადაც  $T_i$  არის ნაგებობის თავისუფალი რხევის პირველი ფორმის პერიოდის რიცხვითი მნიშვნელობა.

ამ შემთხვევაში  $B_i$  მნიშვნელობა აიღება არანაკლებ 0,8 და არაუმეტეს 3.

ასეთ ნაგებობათა გაანგარიშებისას, რომელთა დეფორმაცია რხევების დროს განისაზღვრება უმთავრესად კონსტრუქციის ჩალუნვით. გეგმაში მცირე ზომის მაღალი ნაგებობის (კაშხალების კონტრფორსები განივი მიმართულებით, გამთანაბრებელი კოშკები, ანძები და სხვა) გაანგარიშებისას რხევათა შედარებით მცირე მიღების გამო  $B_i$  კოეფიციენტი აიღევა 1,5-ჯერ.

კიდევ უფრო მიზანშეწონილია ასეთი ნაგებობებისა და კონსტრუქციებისათვის გამოვიყენოთ ფორმულა:  $B_i = \frac{2}{\sqrt{T_i}}$ .

ცალკე შემთხვევაში (მცირე სიმაღლის ბეტონის მასიური გრავიტაციული კაშხლები, მასიური საანკერო საყრდენები და სხვა) დასაშვებია გავითვალისწინებოთ მხოლოდ ძირითადი ფორმის რხევები, მაშინ ფორმულაში  $B_i$  და  $\eta_{ik}$  კოეფიციენტები შეესაბამება ნაგებობის თავისუფალი რხევის პირველ ფორმას ( $i=1$ ).

მსგავს შემთხვევებში დასაშვებია დინამიურობის კოეფიციენტისათვის ავიღოთ მნიშვნელობა  $B_1=3$ , ხოლო  $\eta_{ik}$  კოეფიციენტი გამოვთვალოთ გამარტივებული ფორმულით

$$\eta_{ik} = \frac{X_k \sum_i^n Qx_i}{\sum_i^n Qx^2};$$

სადაც  $X_k$  და  $x_i$  – სიმაღლეებია ნაგებობის ფუძიდან განსახილველ  $k$  წერტილამდე და ყველა  $i$  წერტილამდე, რომელშიც ნაგებობის მასა შეყურსულადაა მიჩნეული.

მაღალი ნაგებობანი (გრავიტაციული და კონტრფორსული კაშხლების სექციები, თაღოვანი კაშხლები, კოშკები, ანძები და სხვა). აგრეთვე კარკასული ნაგებობანი (ჰესის შენობები), რომელთა ძირითადი ფორმის რხევის პერიოდი აღემატება 0,3 წმ, საჭიროა გავიანგარიშოთ თავისუფალი რხევის მაღალი ფორმების გათვალისწინებით (ჩვეულებრივ ხუთი ფორმის გათვალისწინებით).

თავისუფალი რხევის მაღალი ფორმების გათვალისწინებისას რეკომენდებულია საანგარიშო ძაღვები ნაგებობაში გაანგარიშდეს როგორც საშუალო კვადრატული მნიშვნელობა ძაღვებისა, რომელიც შეესაბამებინან რხევის ყველა გათვალისწინებულ ფორმას, ამასთანავე აღებულ კვეთში მოქმედი ძაბვა, გარდა მაქსიმალურისა, აიღება 0,7 კოეფიციენტით:

$$N_b = \sqrt{N_{\max}^2 + 0,5 \sum_i^n N_i^2},$$

სადაც  $N_i$  სეისმური დატვირთვით გამოწვეული ძაღვის (მღუნავი მომენტის, განივი ძალის და სხვა ძაღვების) საანგარიშო მნიშვნელობა განსაზღვრულ კვეთში;

$N_{\max}$  – განსახილველი კვეთის ძალვის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომელიც განისაზღვრება რხევის ცალკეული ფორმის შესაბამისი სეისმური ძალებით გამოწვეული ძალვათა ეპიურების შედარებით;

$N_i$  – სხვა ეპიურებით განსაზღვრული ძალების მნიშვნელობანი იმავე კვეთში; შეჯამება წარმოებს მოცემული ძალვის ყველა ეპიურის მიხედვით, გარდა იმ ეპიურისა, რომელსაც შეესაბამება ძალვის მაქსიმალური მნიშვნელობა  $N_{\max}$ .

**წყლის ჰიდროდინამიკური (სეისმური) წნევა.** კაშხლებისა და წყლის წნევის ქვეშ მყოფ სხვა ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა გაანგარიშების დროს, გარდა სეისმური ინერციული ძალებისა, გათვალისწინებულია წყლის სეისმური (ჰიდროდინამიური) წნევა.

სეისმური წნევის ინტენსიურობის განსაზღვრისათვის გამოყენებულია იქნას პ. კულმაშის ფორმულები, რადგან როგორც სათანადო ანალიზმა აჩვენა, დახრილი სადაწნეო ზედაპირების შემთხვევაში მოქმედი ნორმებით რეკომენდებული ფორმულის გამოყენება დაკავშირებულია საგრძნობ ცდომილებასთან.

ამგვარად ვსარგებლობთ დამოკიდებულებით:

$$P = \bar{P}_0 \bar{B},$$

სადაც  $P$  არის წნევის ორდინატები დახრილი სადაწნეო ზედაპირის შემთხვევაში.

$\bar{P}_0$  – წნევის ორდინატები, ვერტიკალური სადაწნეო ზედაპირის შემთხვევაში;

$\bar{B}$  – კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ვერტიკალთან სადაწნეო ზედაპირის დახრილობის  $\alpha$  კუთხეზე; მისი მნიშვნელობანი შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულებით:

$$\bar{B} = \left(1 - \frac{\alpha}{153,6}\right) \cos \alpha, \text{ როდესაც } 0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ;$$

$$\bar{B} = \cos^2 \alpha, \text{ როდესაც } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ.$$

$P_0$  – ორდინატების განსაზღვრისათვის გვაქვს ფორმულა

$$P_0 = K_v \nu \frac{8H}{\pi^2} R.$$

სადაც  $K_v$  სეისმურობის კოეფიციენტი;

$\nu$  – წყლის მოცულობითი წონა, ტ/მ<sup>3</sup>;

$H$  – წყლის სიღრმე სადაწნეო გადახურვასთან;

$R$  – უგანზომილებო სიდიდე, რომლის მნიშვნელობანი მოცემულია ცხრილი 4-ში.  $\frac{x}{H}$  ფარდობის შესაბამისად (სადაც  $x$  არის გადახურვის წყლის თავისუფალი ზედაპირი).

წყლის სეისმური (ჰიდროდინამიკური) წნევა გათვალისწინებულია არამარტო ნაგებობის სიმტკიცისა და მდგრადობის შემოწმებისას, არამედ აგრეთვე მისი სეისმური რხევების სიხშირეთა (პერიოდების) გაანგარიშების დროსაც, როგორც ინერციული მასა. ამ ფაქტორის გათვალისწინებლობამ შეიძლება გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი ცდომილებანი გაანგარიშებისას, რადგან დადგენილია, რომ წყლის სეისმური წნევა მნიშვნელოვნად ამცირებს ნაგებობის რხევათა სიხშირეებს ზრდის პერიოდებს. რხევის პერიოდების გადიდებით მცირდება დინამიური კოეფიციენტი და ნაგებობაზე მოქმედი ინერციული (სეისმური) ძალები.

ცხრილი 3

$R$  – უგანზომილებო სიდიდე  $\frac{x}{H}$  ფარდობის შესაბამისად

$\frac{X}{H}$	$R$	$\frac{X}{H}$	$R$
0,00	0,000	0,55	0,786
0,05	0,164	0,60	0,815
0,10	0,283	0,65	0,838
0,15	0,368	0,70	0,859
0,20	0,446	0,75	0,886
0,25	0,517	0,80	0,891
0,30	0,575	0,85	0,901
0,35	0,626	0,90	0,911
0,40	0,676	0,95	0,915
0,45	0,717	1,00	0,916
0,50	0,742	–	–

თუ რაბის, არხისა და მათ მსგავს ნაგებობათა კედლებს ან ფერდოებს შორის მანძილი აღემატება წყლის  $h$  სიღრმეს სამჯერ უფრო ნაკლებად, მაშინ წყლის სეისმური წნევის ინტენსიურობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$P' = 8P,$$

სადაც  $P$  გამოითვლება  $P = P_0 \bar{B}$  ფორმულით.

8 არის კოეფიციენტი, რომელიც აიღება ცხრილი 3-დან  $\frac{b}{h}$  ფარდობის მიხედვით, სადაც  $b$  მანძილია, რაბის, არხის ან სხვა ნაგებობათა კედლებს (ფერდობებს) შორის  $\frac{h}{3}$  დონეზე.

ცხრილი 4

$B$  კოეფიციენტი მნიშვნელობა

$\frac{h}{n}$	$\lambda$
0,5	0,4
1,0	0,7
1,5	0,8
2	0,7
3 და მეტი	1

მიწის რხევის ცვლილება სეისმური წნევის დროს. საყრდენი კედლების გაანგარიშების დროს, გარდა ინერციული სეისმური ძალებისა, რომელიც გამოითვლება ფორმულებით, საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას გრუნტის სეისმური წნევა.

მიწის აქტიური და პასიური წნევათა სიდიდენი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით

$$q = (1 + 2K_i \operatorname{tg} \varphi) P;$$

$$q' = (1 - 2K_i \operatorname{tg} \varphi) P',$$

სადაც  $P$  და  $P'$  არის შესაბამისად, მიწის აქტიური და პასიური წნევები, სეისმური ზემოქმედების გათვალისწინებლად.

$\varphi$  – გრუნტის შინაგანი ხახუნის კუთხე.

სეისმური ძალების განსაზღვრა თაღოვანი კაშხლებისა და ზოგიერთი სხვა ნაგებობებისათვის.

მოქმედი ნორმების თანახმად, თაღოვან კაშხლის გაანგარიშებისას მისი შუა ზედაპირის ერთეულ ფართობზე მოსული სეისმური ინერციული ძალა, რომელიც განპირობებულია კაშხლისა და მასზე მოთავსებულ

მოწყობილობათა საკუთარი წონით და მიმართულია ხეობის გრძივად შეიძლება გაანგარიშდეს ფორმულით:

$$S = d v_1 K_b \left[ 1 + 0,5 \frac{x}{x_0} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right) \right], \left[ 1 + 0,5 \frac{X}{X_0} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right) \right]$$

სადაც  $d$  არის კაშხალის სისქე განსახილველ კვეთში (ნახ.2);

$v_1$  – კაშხალის მასალის მოცულობითი წონა ტ/მ<sup>3</sup>=ში.

$x$  და  $x_3$  – შესაბამისად, მანძილები ფუძიდან განსახილველ კვეთამდე და ნაგებობის სიმძიმის ცენტრამდე;

$\varphi_0$  – თალის ცენტრალური კუთხის ნახევარი;

$\varphi$  – განსახილველ წერტილში გამავალი მსახველის კუთხური კოორდინატი.

ხეობის განივად მოქმედი სეისმური ძალების გათვალისწინების შემთხვევაში სეისმური ძალა გამოითვლება ფორმულით:

$$S = d v_1 K_b .$$

### წყლის სეისმური წნევის ინტენსივობა.

თაღოვან კაშხალზე მოქმედი წყლის სეისმური წნევის ინტენსიურობა განისაზღვრება ფორმულით

$$P = \alpha P_0 ,$$

სადაც  $P_0$  წყლის სეისმური წნევის ინტენსივობა ვერტიკალურ ბრტყელ სადაწნეო წახნაგზე, ტ/მ<sup>2</sup>, განისაზღვრება ფორმულით;

$\alpha$  – კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია განსახილველი წერტილის კუთხურ კოორდინატზე და განისაზღვრება: ხეობის გრძივი მიმართულებისათვის ფორმულით:

$$\alpha = 0,5 + \frac{\varphi}{2\varphi_0} .$$

ხეობის განივი მიმართულებისათვის ფორმულით:

$$\alpha = \frac{\varphi}{2\varphi_0} .$$

სამშენებლო ნორმებიდან მითითებანი ასაგები კაშხლებისა და ფერდობის მდგრადობის შემოწმებისას საანგარიშოდ აიღება ჩამომეწყერების

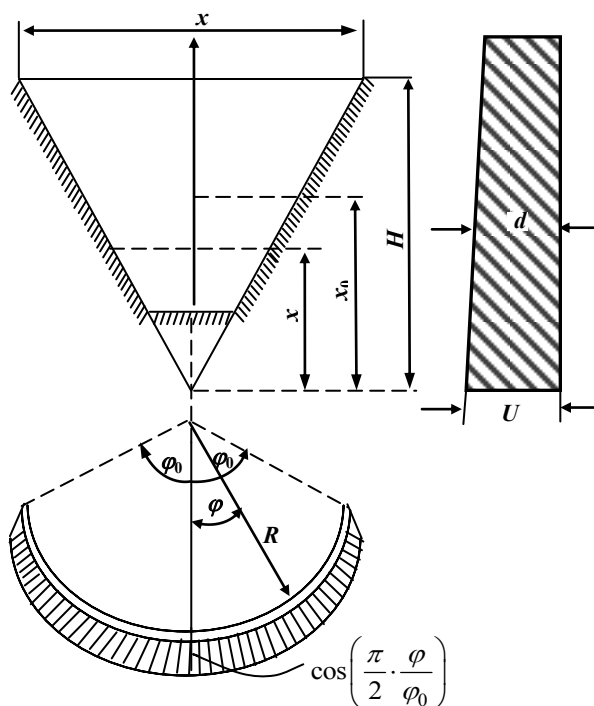
ის ზედაპირები, რომელთა დროს ფერდობის მდგრადობის კოეფიციენტი ძირითადი დატვირთვების მოქმედებისას იქნება მინიმალური.

ფორმულებით სეისმური ინერციული ძალების განსაზღვრის დროს კაშხალის ტანის გრუნტის ან ქვაცილის ერთეული მოცულობის წონა განსაზღვრება ამ მოცულობაში არსებული წყლის წონის გათვალისწინებით. გვირაბებისა და წნევის ქვეშ მომუშავე სხვა მიწისქვეშა წყალსატარების სიმტკიცეზე შემოწმებისას გაანგარიშების დროს გათვალისწინებულია სეისმური ზემოქმედებით გამოწვეული წყლის დამატებითი დაწნევა, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით

$$H_b = \frac{K_b}{\pi} vVT_0,$$

სადაც  $V$  გრძივი სეისმური ტალღების გავრცელების სიჩქარე მთის ქანში (გრუნტში), მ/წმ;

$T_0$  – ქანის (გრუნტის) ნაწილაკების სეისმური რხევის საანგარიშო პერიოდი, რომელიც მიიღება 0,5 წმ ტოლი.



ნახ. 2. თაღოვან კაშხალზე მოქმედი სეისმური ინერციული ძალებისა და წყლის ინერციული წნევის ინტენსიურობის განსაზღვრის სქემა



მთის სამაგრზე მოქმედი ფხვიერი გრუნტის სეისმური წნევა (სეისმური სამთო წნევა გვირაბებში და მათ მსგავს მიწისქვეშა ნაგებობებში) განისაზღვრება ფორმულების გამოყენებით, თუ ჩავთვლით, რომ მათში  $P$  და  $P_i$  შესაბამეა სამთო წნევას, რომელიც გამოთვლილია სეისმური ზემოქმედების გაუთვალისწინებლად.

### **ნაგებობათა დინამიკური სიხისტე.**

ნაგებობათა დინამიკიდან ცნობილია, რომ თუ ჰარმონიული რხევის დროს მოქმედი ძალის სიხშირე (პერიოდი) გაუტოლდება სისტემის თავისუფალი რხევის სიხშირეს, წარმოიშობა რეზონანსის მოვლენა, რომლის დროს სისტემის რხევის ამპლიტუდები განუსაზღვრელად იზრდება. მართალია ნაგებობების სეისმური რხევების დროს ადგილი არა აქვს ჰარმონიულ რხევებს, მაგრამ შეიძლება განვითარდეს რეზონანსის მაგვარი მოვლენა. ეს მოხდება ანალოგიურ შემთხვევაში, ე.ი. როდესაც ნაგებობის თავისუფალი რხევის  $T_0$  პერიოდი ახლოსაა ან ემთხვევა სეისმური რხევის  $T$  პერიოდს. ამის შედეგად ნაგებობაში წარმოქმნილმა სეისმურმა ინერციის ძალებმა შეიძლება რამდენჯერმე გადააჭარბოს გაანგარიშებით მიღებულ ძალთა სიდიდეს და გამოიწვიოს ნაგებობის დანგრევა.

ნაგებობას ეწოდება დინამიკურად ხისტი, თუ მისი თავისუფალი რხევის პერიოდი მნიშვნელოვნად ნაკლებია სეისმური რხევის პერიოდზე; უკანასკნელი დაახლოებით ტოლია  $T = 1$  წმ-ის, ამიტომ რეზონანსის მსგავსი მოვლენის თავიდან აცილების მიზნით დინამიკურად ხისტ ნაგებობათა თავისუფალი რხევის პერიოდი ნაკლები უნდა იყოს  $T_0 \approx 0,5 \div 0,6$  წმ. სიდიდის.

ნაგებობებს, რომელთა თავისუფალი რხევის პერიოდი  $T_0 > 1$  წმ უწოდებენ დინამიკურად მოქნილ ნაგებობებს. ამავე მოსაზრების გამო ასეთ ნაგებობათა თავისუფალი რხევის პერიოდი მნიშვნელოვნად უნდა აღემატებოდეს სეისმური რხევის პერიოდს  $T_0 \geq 1,5 \div 2$  წმ.

## 1.5. თაღოვანი კაშხლები

### ზოგადი ცნობები თაღოვანი კაშხლების შესახებ

თაღოვანი კაშხლები წარმოადგენს გეგმაში მრუდწრიული მოხაზულობის შემტბორავ ნაგებობებს, რომლებიც გადასცემენ ჰორიზონტალური დატვირთვების დიდ ნაწილს მთლიანად ხეობის კლდოვან ნაპირებს ან სპეციალურად აგებულ საყრდენ ბურჯებს, ასეთ კაშხლებს ჩვეულებრივ აგებენ ვიწრო და ღრმა ხეობებში, რომლებშიც განლაგებულია სათანადო სიმტკიცის კლდოვანი ქანები. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ თაღოვანი კაშხლების განხორციელება შესაძლებელია საკმაოდ განიერ კალაპოტებშიც; ამას ადასტურებს თაღოვანი კაშხლების მშენებლობის ის გამოცდილება, რომელიც დაგროვდა ევროპის ქვეყნებში (იტალია, საფრანგეთი, პორტუგალია, შვეიცარია).

თაღოვანმა კაშხლებმა, როგორც ეკონომიურად ხელსაყრელებმა და ექსპლოატაციაში საიმედო ნაგებობებმა, დიდი ხანია მიიპყრო ყურადღება არსებული ცნობებით პირველი თაღოვანი კაშხალი, რომელიც აშენდა იტალიაში 1611 წელს (პონტე ალტოს კაშხალი) იყო ხსნარზე წყობით 5 მეტრი სიმაღლისა და 15 მეტრი რადიუსით; შემდეგ კი ამ კაშხლის სიმაღლეს თანდათანობით ზრდიდნენ 38 მეტრამდე (1886 წ.) XIX საუკუნეში აშენებდნენ მცირე სიმაღლის თაღოვან კაშხლებს ევროპასა და აშშ-ში, მაგრამ ამ კაშხლების მშენებლობა განსაკუთრებით ფართოდ დაინერგა XX საუკუნეში. დღეისათვის მსოფლიოში უკვე განხორციელებულია 300-ზე მეტი თაღოვანი კაშხალი, რომელთა სიმაღლე 30 მეტრზე მეტია. მათ შორის ყველაზე უფრო მაღალია ტანის კაშხალი საფრანგეთში. (180 მეტრი) მოვუაზენისა შვეიცარიაში (237 მ) და ვაიონტისა იტალიაში (266 მეტრი).

უნიკალური სიმაღლისაა (271,5 მეტრი) ენგურის თაღოვანი კაშხალი საქართველოში.

განასხვავებენ საკუთრივ თაღოვან კაშხლებს, რომელთა სისქე ფუძეში შეადგენს სიმაღლის 5-15%-დან 35%-მდე და თაღოვან-გრავიტაციულ კაშხლებს, რომელთა ფუძის სისქისა და სიმაღლის ფარდობა შეადგენს

დაახლოებით 35-65%. შედარება გვიჩვენებს, რომ თაღოვანი კაშხლების სისქე 2-4-ჯერ, ხოლო ზოგჯერ 6-8-ჯერ და კიდევ უფრო მეტჯერ ნაკლებია, ვიდრე შესაბამისი სიმაღლის მასიური გრავიტაციული კაშხლებისა. მაგრამ რამდენადაც გეგმაში მრუდწირული თაღოვანი კაშხლების სიგრძე უფრო მეტია, ვიდრე სწორხაზოვანი გრავიტაციული კაშხლებისა, ბეტონის მოცულობა თაღოვან კაშხლებში მიიღება მხოლოდ 1,2-4-ჯერ უფრო ნაკლები, ვიდრე გრავიტაციულში. ფულადი დაბანდების ეკონომია წყობის ეკონომიაზე რამდენადმე უფრო ნაკლებია, რადგან თაღოვანი კაშხლების ბეტონი 10-15%-ით ძვირია, ვიდრე გრავიტაციულისა.

თაღოვანი კაშხლის ფარდობითი სისქე ანუ ეგრეთ წოდებული დაყვანის კოეფიციენტი  $\left(K = \frac{B}{H}\right)$  ( $B$  – კაშხლის სიგანე ძირში,  $H$  – მისი უდიდესი სიმაღლე) კაშხლის სიმაღლე დამოკიდებული ხეობის განივი კვეთის ფორმაზე, რომელიც ხასიათდება გასწორის კოეფიციენტით  $n = \frac{L}{H}$ , სადაც  $L$  გასწორის სიგანეა კაშხლის თხემის სიმაღლეზე.

**გეოლოგიური და ტოპოგრაფიული პირობები.** ეკონომიურად ხელსაყრელი თაღოვანი კაშხლები შეიძლება აშენდეს მხოლოდ შესაფერის გეოლოგიურ და ტოპოგრაფიულ პირობებში.

კაშხლის ფუძის გეოლოგიურმა პირობებმა უნდა უზრუნველყოს მნიშვნელოვანი დატვირთვების მიღების შესაძლებლობა. ამ მხრივ დიდი მოთხოვნილებანი წაეყენება ხეობის ნაპირებს, ხოლო მნიშვნელოვნად უფრო ნაკლები ხეობის ფსკერს. ასეთ პირობებს აკმაყოფილებს მხოლოდ კლდოვანი ქანები, რომელთაგან მოითხოვება მონოლითურობა, მცირე დეფორმაციულობა, წყალშეუღწეობა და მაღალი მექანიკური სიმტკიცე. თაღოვანი კაშხლების ფუძეებად დიდი უპირატესობით სარგებლობს ამოფრქვეული ქანები-გრანიტები, პორფირიტები, ბაზალტები დიაბაზები და სხვა. მაგრამ ამასთანავე გათვალისწინებული უნდა იქნეს, რომ ხშირად ეფუზიური ქანები (ბაზალტები, დიაბაზები, პორფირიტები და სხვა მსგავსი წარმოშობის ქანები). მიუხედავად იმისა, რომ ეუფლებიან მაღალ

სიმტკიცეს, ხასიათდებიან მნიშვნელოვანი ფორიანობით და ბზარებით, რაც მოითხოვს სპეციალურ ღონისძიებათა ჩატარებას (ცემენტაციას). თაღოვანი კაშხლების ფუძეებად დასაშვებია, ისეთი მსგავსი დანალექი ქანებიც, როგორცაა ქვიშაქვები და კირქვები. არახელსაყრელია შემთხვევა, როდესაც ფუძის ქანები ჰორიზონტალურ ფენებადაა განლაგებული, ანდა ფენები დაქანებული ქვედა ბიეფისაკენ.

უკანასკნელ წლებში ფუძეების გამაგრების ტექნიკის განვითარებამ მნიშვნელოვნად გააფართოვა თაღოვანი კაშხლებისათვის გამოსადეგ ფუძეთა დიაპაზონი. ამის შედეგად მრავალი ქანები, რომლებიც ადრე უარყოფილი იყო გეოლოგიური მოსაზრებებით, მიჩნეულია თაღოვანი კაშხლების მშენებლობისათვის საყრდენ გრუნტად. ამჟამად თაღოვანი კაშხლებს აგებენ აგრეთვე გეოლოგიური აგებულებით ჭრელ, შედარებით დამყობ კლდოვან ფუძეებზეც, ფართოდ იყენებენ რა მათი გამაგრების ღონისძიებებს, საექსპლოატაციო გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ზოგჯერ კლდის დეფორმაცია 5-10-ჯერ აღემატება ბეტონის დეფორმაციას. როსენის კაშხალი შვეიცარიაში, რომლის სიმაღლე 83 მეტრია, აგებულია ძლიერ დეფორმირებად ანიზოტროპიულ ქვიშაქვებზე და ქვიშამერგელოვან ფიქლებზე, რომელთა დრეკადობის მოდული შეადგენს ბეტონის დრეკადობის მოდულის  $\frac{1}{10} \div \frac{1}{15}$ -ს.

მოვუაზენის კაშხალი შვეიცარიაში, აგრეთვე აგებულია კაჟოვანი ფიქლებზე, რომლებიც მონაცვლეობენ თიხოვან-ნახშირშემცველ ფიქლების ფენებთან. ამ კაშხლის ფუძეში არის ტექტონიკური დარღვევები და გადიდებული ბზარების ზონები. სალამონდის 78 მ სიმაღლის, ფუძეში 6,35 მეტრი სისქის თაღოვანი კაშხალი პორტუგალიაში აგებული იქნა 1953 წელს ბზარების შემცველ გრანიტებზე, რომლებიც გადაკვეთილი იყო მრავალრიცხოვანი ღია ბზარებით.

თაღოვანი კაშხლების მშენებლობამ ფრიად რთულ გეოლოგიურ პირობებში მოითხოვა მათი გულდასმით გათვალისწინება ნაგებობათა კონსტრუქციებში და სპეციალურ სამშენებლო ღონისძიებათა ჩატარება.

ფუძეებისა და ხეობათა ბორტების გასამაგრებლად ფართოდ გამოიყენება ცემენტაცია. ასე, მაგალითად მოვიაზენის კაშხლის ფუძეში საცემენტაციო ჭაბურღილების სიგრძემ 10000 მეტრს მიაღწია, ამასთან ცალკეული ჭაბურღილების სიგრძე 200 მეტრზე აღწევდა, ხოლო დასამუშავებელი ზონის საერთო ფართობი 240000 მ<sup>2</sup> შეადგენდა. მნიშვნელოვანი ცემენტაციის სამუშაოები ჩატარდა ტინის კაშხლის ფუძეში, სადაც ადგილი ჰქონდა წყლის გადინების საშიშროებას ქვედა ბიეფისაკენ, დახრილ მტკიცე, მაგრამ ძლიერ ბზაროვან კვარციტებში. კლდოვანი ფუძეების გასაუმჯობესებელ ღონისძიებებს მიეკუთვნება ბზარების (ნაპრალების) ბეტონით დატამპონება (ჩატენა) და არასაიმედო კლდოვანი უბნების დაარმატურება. ჩვენთან დაარმატურება გამოყენებული იყო გერგებილის კაშხლის მშენებლობის დროს.

დიდი ყურადღება უნდა მიექცეს ფუძის დეფორმაციის შესწავლას ნატურალურ პირობებში (განსაკუთრებით კაშხლის საყრდენ ნაპირებთან შეერთების ადგილებში). ცემენტაციამდე და ცემენტაციის შემდეგ, დრეკადობის მოდულის განსაზღვრას ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებით და სხვა მნიშვნელოვანი საანგარიშო მახასიათებლების დადგენას.

თაღოვანი კაშხლების ეკონომიურობის საკითხში არსებით როლს ასრულებს გასწორის ტოპოგრაფიული პირობები. გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება  $n$  გასწორის კოეფიციენტს. რომელიც უკანასკნელ დრომდე აუცილებლობად იყო მიჩნეული, მისი მნიშვნელობა არ უნდა ყოფილიყო  $3 \div 3,5$ -ზე მეტი, ხოლო თაღოვანი კაშხლებისათვის 1,5 და 2-ზე მეტი. ამჟამად აგეგმარებენ და აშენებენ საკმაოდ ეკონომიურ კაშხლებს ისეთ ხეობებშიც, რომელთა გასწორის  $n$  კოეფიციენტი 7-8-მდე აღწევს. ამ თვალსაზრისით ფრიად საყურადღებოა პიევე დი კადორეს კაშხალი იტალიაში, რომლის ზედა ნაწილში  $n = 7,45$ . თაღოვანი კაშხლები შეიძლება აღმოჩნდეს ეკონომიური უფრო განიერ ხეობებში, კერძოდ, როდესაც  $n$  ცვალებადობს  $9 \div 11$ -მდე.

გასწორის კვეთის ფორმა შეიძლება იყოს სხვადასხვაგვარი: დაახლოებით სწორკუთხოვანი, ტრაპეციოდალური და სამკუთხოვანი: გვხვდება ისეთი ფორმის ხეობებიც, რომელთაც აქვთ ამობურცული ფერდობები.

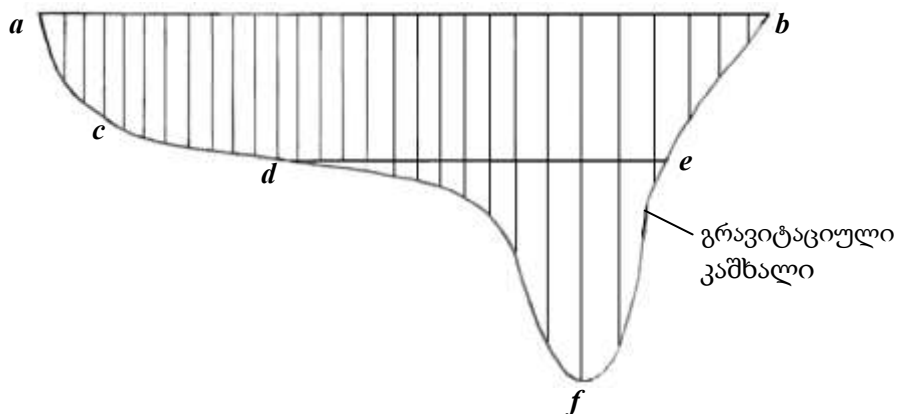
თაღოვანი კაშხალის ასაგებად ყველაზე უფრო მიზანშეწონილია ხეობის ისეთი ფორმები, რომლებიც უახლოვდებიან სამკუთხედს. ამ შემთხვევაში კაშხალის ქვედა ჰორიზონტალურ კვეთებს, რომლებიც განიცდიან დიდ ჰიდროსტატიკურ წნევას, გააჩნიათ უფრო მცირე ძალები, რაც საშუალებას იძლევა, ისინი შესრულდეს მცირე კვეთის მქონე, ვიდრე გასწორის სწორკუთხოვანი და ტრაპეციოდალური ფორმის კვეთის შემთხვევაში, თაღების ძალები მუდმივია ან მცირედ ცვალებადობს სიმაღლეზე. ასეთ პირობებში, ცხადია ფუძისაკენ ჰიდროსტატიკური წნევის გადიდებასთან ერთად თაღის კვეთების სისქეც უნდა გაიზარდოს.

ფრიად საყურადღებოა აგრეთვე თაღოვანი კაშხალის ფორმა გეგმაში. ყველაზე უფრო ხელსაყრელია მისი მოთავსება, აგება ხეობის უფრო შევიწროებული ნაწილის წინ. რადგან ამ შემთხვევაში კაშხალის მხრები (ქუსლები) დაეყრდნობა ხეობის ფერდობებს. თუ მდინარე მიედინება ჩაღრმავებულ კალაპოტში, ველის ფერდობები საკმარისად დამრეცია, მაშინ უბნებს გადალობავენ გრავიტაციული კაშხლებით, რომლებიც შეასრულებენ კალაპოტში თაღოვანი კაშხალის მისაბრჯენების როლს. კაშხალის აღნიშნული გრავიტაციული ნაწილები თაღოვანი კაშხლისაგან გამოყოფილი უნდა იყოს დეფორმაციული ნაკერებით.

კაშხალის ნორმალური მუშაობის უზრუნველსაყოფად, მასში ძაბვათა ხელსაყრელი განაწილებისათვის, უპირატესობა ენიჭება ხეობის სიმეტრიულ ფორმას, არასიმეტრიული კვეთების შემთხვევაში წარმოიშობა ადგილებრივი ძაბვები, რომლის დროსაც შესაძლებელია გასწორის  $ab$  ნაწილში მოეწყოს გრავიტაციული კაშხალი, რომელიც შეასრულებს თაღოვანი კაშხალის მისაბრჯენის მოვალეობას. ამავე პირობებში შეიძლება გამოყენებულ იქნას თაღოვანი კონტრფორსული კაშხლების კომბინაცია, რომლის დროსაც

თაღოვანი კაშხალით გადაიხურება ხეობის ყველაზე ღრმა, ხოლო კონტრფორსული ხეობის მკვეთრად გაგანიერებული ნაწილი.

აღნიშნულ შემთხვევაში კაშხალის აგების საკითხი შეიძლება სხვაგვარად გადაწყდეს, მაგალითად, მოცემულ ნახაზზე ნაჩვენებ შემთხვევაში აწყობენ თითქოს და ორ თაღოვან კაშხალს *abcde* და *def*, რომლებიც მნიშვნელოვანწილად მუშაობენ დამოუკიდებლად, რადგან ისინი გამოყოფილია ჰორიზონტალური ნაკერებით. ცალკეულ შემთხვევაში ქვედა *def* ნაწილი შეიძლება შესრულდეს გრავიტაციული ან თაღოვანი, ხოლო ზედა *abcde* ნაწილი-კონტრფორსული კაშხალის სახით (მაგალითად, თაღოვანი კონტრფორსულით).



ნახ. 3. თაღოვანი კაშხლების დამახასიათებელი პროფილები

თაღოვანი კაშხლების ყველაზე უფრო დამახასიათებელი ტენდენციებია: თაღოვანი კაშხლების სიმაღლის მნიშვნელოვანი გაზრდა; კონსტრუქციის სიმსუბუქე და მოხდენილობა – აგებულია დიდი რაოდენობა კაშხლებისა, რომელთა სისქის ფარდობა სიმაღლესთან 0,15-ზე ნაკლებია; მათ შორის არის რამდენიმე კაშხალი, რომელთა მიყვანილობის

$K = \frac{B}{H}$  კოეფიციენტი 0.09-ზე ნაკლებია; მკვეთრად გამოსახულია

მისწრაფება ორმაგი სიმრუდის თაღოვანი კაშხლების მშენებლობისაკენ (ვალ-გალინას; ლუმიეის, ვაიონტის და სხვა კაშხლები). გარდა ამისა დასახულია თაღოვანი კაშხლების მშენებლობა არასიმეტრიულ ხეობებშიც, მაგრამ ცენტრალური ვერტიკალური სიბრტყის მიმართ კაშხლის სიმეტრიულობის უზრუნველსაყოფად საჭიროა გამოყენებულ იქნეს

სპეციალური ხერხები. ამ მიზნით ჭრიან ხეობის ნაპირებს. აგებენ ბეტონის გრავიტაციულ მისაბრჯენებს და აწყობენ ბალიშ-საცობებს. დამახასიათებელია, რომ აგებულ მრავალ თაღოვან კაშხალს მოწყობილი აქვს პერიმეტრული ნაკერი, რომლითაც კაშხალი მოჭრილია ფუძისაგან.

მრავალი მეცნიერი თვლის, რომ ნაკერებიან კაშხლებს აშკარა უპირატესობანი გააჩნიათ. გარდა სუფთა თაღოვანი კაშხლებისა აგებენ აგრეთვე თაღოვან-გრავიტაციულ კაშხლებს ფართო კალაპოტებში.

### **კაშხლის ჩახაზვა გასწორში**

თაღოვანი კაშხლის აგებისას კლდის ზედაპირის ჰორიზონტალური ფორმის შემთხვევაში ხდება კაშხლის გეგმისა და მისი პროფილის ფორმის თანდათანობით დაზუსტების გზით. გასწორის არასიმეტრიული განივკვეთის შემთხვევაში და როდესაც მათ გააჩნიათ მკვეთრად გარდატეხის ადგილები, განივკვეთის შესაბამის უბანზე აგებენ მასიურ გრავიტაციულ კაშხალს, რომელიც ასრულებს თაღების ქუსლების მისაბრჯენის მოვალეობას. ასეთ შემთხვევაში ზოგჯერ ქუსლებისათვის აწყობენ სპეციალურ მასიურ ბურჯს, რომელსაც უერთდება მიწის შემაერთებელი ჯებირი.

გეგმაში თაღოვანი კაშხლის დაგეგმარების დროს ითვალისწინებენ, რომ თაღების ქუსლები უნდა ეყრდნობოდეს ბუნებრივ მტკიცე ან ხელოვნურად საიმედოდ კლდეს. ამის შედეგად, აგრეთვე გასწორის ტოპოგრაფიულ თავისებურებათა გამო, კაშხლის დაყრდნობის კონტურს შეიძლება ჰქონდეს არასწორი ფორმა. ამიტომ უკანასკნელ ხანებში თაღოვან კაშხლებში აწყობენ ეგრეთწოდებულ კონტურულ ანუ პერიმეტრულს ნაკერს, რომლითაც საკუთრივ კაშხლის ტანი გამოყოფილია უშუალოდ კლდეში ჩამაგრებული საძირკვლის ნაწილისაგან („უნაგირისაგან“) პერიმეტრული ნაკერი აუმჯობესებს თაღოვანი კაშხლის ძაბვათა მდგომარეობას.

პერიმეტრული ნაკერი კეთდება მდოვრე მოხაზულობის, რაც ქმნის იმის საშუალებას, რომ თაღები დავტვირთოთ უფრო თანაბრად და თავიდან ავიცილოთ ადგილობრივი ძაბვები. კაშხალი ნაკერში ეყრდნობა ბეტონის



ბალიშს, კლდეზე გადაცემული ძაბვების შემცირების მიზნით მისი სიგანე შეიძლება იყოს კაშხალის სისქეზე მეტი. პერიმეტრული ნაკერის მოწყობის შემთხვევაში მცირდება გამჭიმი ძაბვები კაშხალის ქუსლებთან სადაწნეო მხარეზე და ბზარების წარმოშობის შესაძლებლობა, მარტივდება კაშხლების ეკონომიური კონსტრუქციების დაპროექტება.  $\frac{L}{H}$  ფარდობის დიდი მნიშვნელობისას, კონსოლები, ვერტიკალური ელემენტები, განიტვირთვებიან ქვედა ნაწილში, დატვირთვის დიდ ნაწილს გადასცემენ თაღებს (ჰორიზონტალურ ელემენტების).

### **ვერტიკალური სიმრუდისა და სისქის როლი**

თაღოვან კაშხლებს აგებენ ცალმაგი და ორმაგი სიმრუდით გუმბათოვანს, რაც უფრო დიდია ვერტიკალური სიმრუდე, მით მაღალია კაშხალის ზიდვის უნარი, მაგრამ მით უფრო რთულია სამუშაოთა წარმოება. ასეთ შემთხვევაში, ცხადია ოპტიმალურად მიჩნეული უნდა იქნას ყველაზე ეკონომიური გადაწყვეტა.

თაღოვანი კაშხალის მუშაობაში დიდ როლს ასრულებს მისი სისქე, რაც უფრო მცირეა იგი და რაც უფრო დიდია სიმრუდე, მით უკეთესად მუშაობს კაშხალი, როგორც სივრცული კონსტრუქცია. თანამედროვე თაღოვან კაშხლებში აღიძვრება მაღალი ძაბვები; მკუმშავი 100-130 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე; გამჭიმი – 25-30 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე, ტემპერატურული რყევის გათვალისწინებით. ცალკეულ ყველაზე დამაბულ ადგილებში გამოიყენება დაარმატურებას. შესაბამისად თაღოვან კაშხლებში იყენებენ უფრო მაღალი – B25; B30, B46 და უფრო მეტი კლასის ბეტონებს, ვიდრე გრავიტაციულში.

მიუხედავად იმისა, რომ თაღოვან კაშხლებს ახასიათებს მცირე სისქე, ძალიან მაღალი სიმაღლის შემთხვევაშიც კი ისინი წარმოადგენენ სავსებით საიმედო დრეკად კონსტრუქციებს. კაშხლების მოდელების გამოცდების ანალიზი ადასტურებს, რომ მათი მრღვევი დატვირთვები რამდენჯერმე (3-10-ჯერ) აღემატება ნორმატიულს. ასეთი კაშხლების რღვევა კონსტრუქციის თაღოვანი ფორმის მიზეზით, მიუხედავად იმისა, რომ მათ ხშირად ძალიან გაბედული ფორმა აქვთ ჯერ კიდევ არ არის რეგისტრირებული.

თაღოვანი კაშხლების ექსპლოატაციის გამოცდილებით დასტურდება, რომ ამ კაშხლებს აქვთ სიმტკიცის ძალიან დიდი მარაგი, ვიდრე სხვა ტიპის კაშხლებს. მათ უნარი შესწევთ აიტანონ დიდი შემთხვევითი დატვირთვა, რაც მოსალოდნელია მაგალითად, მიწისძვრის, კატასტროფული დატვირთვის დროს.

### **მასალა და კონსტრუქციული დეტალები**

თაღოვანი კაშხლების მშენებლობისათვის ფართოდ გამოიყენება ბეტონი, რომელიც თავისი თვისებებით უნდა აკმაყოფილებდეს თითქმის იგივე პირობებს, რასაც გრავიტაციული კაშხლებისათვის. აქ განსაკუთრებით დიდ როლს ასრულებს ბეტონის სიმტკიცე, მნიშვნელოვანია აგრეთვე წყალშეუღწეობა და კოროზიისადმი მედეგობა კუმშვაზე. ბეტონის მონოლითურობას, მას არ წაეყენება მკაცრი მოთხოვნილება, რადგან კონსტრუქციის თაღის ფორმის გამო მასში ბზარების წარმოშობა უფრო ნაკლებადსაშიშია, ვიდრე გრავიტაციული კაშხალში.

სადაწნეო წახნაგზე, ხშირად ქუსლებთან და ქვედა წახნაგზე, კლიტეში, ბზარების წარმოშობის შემთხვევაში თაღში წარმოიქმნება მცირე რადიუსის მქონე „მეორადი“ თაღი, რომელშიც ძაბვები უკეთესადაა განაწილებული.

ისე როგორც გრავიტაციული კაშხლებში, აქაც გამოიყენება ზონალური ბეტონი; მაგალითად, სადაწნეო მხარეზე – არანაკლებ 1,5-1 მ სისქის ბეტონის მოსაპირკეთებელი მკვრივი ფენა დაახლოებით 250 კგ/მ<sup>3</sup> ცემენტის შემცველობით. დანარჩენ ნაწილში ცემენტის ხარჯი ბეტონში შეადგენს 200 კგ/მ<sup>3</sup>-მდე. მაღალი თაღოვანი კაშხლების შემთხვევაში პროფილის ქვედა ნაწილში იყენებენ ბეტონს, რომლის შემადგენლობაში 300 კგ/მ<sup>3</sup>-მდე ცემენტი შედის.

ბეტონის თაღოვანი კაშხლების სისქე თავში ძალიან მცირეა (1,5-დან – 2-4 მ-მდე). ამიტომ კაშხალზე გზის მოწყობა მოითხოვს სპეციალურ კოჭოვან-კონსოლური ტიპის გაფართოებულ ნაწილს. წყალშეუღწეობის უზრუნველსაყოფად კაშხალის სადაწნეო წახნაგს ფარავენ ტორკრეტით ანდა ლეზავენ ბიტუმით; ქვედა წახნაგს ხშირად მოპირკეთების გარეშე

ტოვებენ, კაშხალის ტანში ტემპერატურის რყევის შემცირების მიზნით ჩრდილოეთის ქვეყნებში (მაგალითად, ნორვეგიაში) თაღოვან კაშხალს ქვედა ბიევის მხრიდან უკეთებენ თხელ საიზოლაციო კედელს, რომელიც კაშხალისაგან გამოყოფილი ჰაერის შუა შრითაა.

გეგმარების დროს საჭიროა მნიშვნელოვანი ყურადღება მიექცეს წყალსაგდების მოწყობის საკითხს. საპროექტო და საექსპლუატაციო გამოცდილება გვიჩვენებს, რომ თაღოვანი კაშხლის ტანში მოწყობილი წყალსაშვები ნაწილი წარმოადგენს უფრო ეკონომიურ გადაწყვეტას, ვიდრე ნაპირებში მოწყობილი წყალსაგდებები.

გადასაგდები წყლის მცირე ხარჯის დროს მუდმივ რადიუსიან კაშხლებში შესაძლებელია ბეტონის დამატებითი ხარჯის გარეშე შევქმნათ წყალსაშვები წახნაგი. ცვალებადრადიუსიან კაშხლებში, პროფილების თავისებურებათა გამო, წესიერი მრუდწირული წყალსაშვები ზედაპირების შექმნა თაღების კედლის სისქის მნიშვნელოვან გაზრდას მოითხოვს. ამიტომ თაღოვან კაშხლებში უფრო მიზანშეწონილია მოეწყოს თავისუფლად ვარდნილი ჭავლების პრინციპზე მომუშავე წყალსაშვებები. ამასთან ცხადია წყალსაშვების თავი უნდა იყოს თავისებური ფორმის, რათა ნაკადის შორს გადაგდებით თავიდან ავიცილოთ ჭავლის დარტყმები კაშხლის ტანზე. წყალსაშვებზე გადადინებული ფენის სისქე განისაზღვრება 2-4 მეტრით, საჭიროების შემთხვევაში ჭავლის დაცემის ადგილში კაშხლის ფუძეს ამაგრებენ ბეტონით ან ქვის ლოდების დალაგებით; ამ მიზნით ზოგჯერ ქმნიან კაშხლის უკან დამაწყნარებელ აუზს. მსგავსი აუზი გაკეთებულია ლაჯანურის კაშხალზე. თაღოვან კაშხლებში აწყობენ აგრეთვე სიღრმით კვეთებს, ანუ ეგრეთწოდებულ წყალჩამოსაშვებებს. თუ ისინი გათვალისწინებულია თხელ და ძლიერ დამაბულ კაშხლებში, მაშინ საჭიროა წყალჩამოსაშვები მილების ირგვლივ ბეტონი ძლიერ დაარმატურდეს.

თაღოვანი კაშხლების ფუძეების მომზადება წარმოებს, ისე როგორც მასიური კაშხლების ფილტრაციის საწინააღმდეგოდ. ზოგჯერ აწყობენ კბილს, ცემენტაციის ფარდას, რომელიც ნაპირებშიც გრძელდება, განსაკუთრებით გულდასმით ხდება კაშხალის დაკავშირებას ნაპირებთან,

აცილებენ დაშლილ კლდეს, ცემენტაციას უკეთებენ ბზარებს. წყლის ჭავლითა და ქვიშით წმენდნენ კლდის ზედაპირს, რის შემდეგ იწყებენ დაბეტონებას.

ფილტრაციულ წნევას თაღოვანი კაშხლის ფუძეში და ტანში თითქმის არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს მისი მდგრადობისა და სიმტკიცისათვის, ამიტომ ფუძისა და კაშხლის დრენაჟი არსებითად არ არის საჭირო. მიუხედავად ამისა, ზოგიერთ კაშხლებში იგი ეწყობა, რაც გამოწვეულია კლიმატური პირობებით.

ტემპერატურული შეკლება-გაფართოების მოვლენების შედეგად ბზარების თავიდან აცილების მიზნით, მშენებლობის დროს თაღოვან კაშხლებს ყოფენ ბლოკებად განივი რადიალური, ან ვერტიკალური ნაკერებით.

ვერტიკალური ტემპერატურულ-ჯდენის ნაკერები შეიძლება მოეწყოს ვიწრო და განიერი. ვიწრო, ეგრეთ წოდებული ცემენტირებადი ნაკერების კონსტრუქცია გრავიტაციული კაშხლების ნაკერების ანალოგიურია.

ცემენტირებადი ნაკერების ღირსება იმაში მდგომარეობს, რომ დიდი წნევის ცემენტის ხსნარის ჭირხვნის დროს თაღები შეიძლება წინასწარ შეკუმშოთ, რომელიც ამცირებს გამჭიმ ძაბვებს კაშხალში ექსპლოატაციის დროს. განიერი, დაბეტონებული, ნაკერების სიგანე იცვლება 0,7 მ-დან 1,2 მ-მდე. მათ ათავსებენ განსაკუთრებული მკვრივი ბეტონით.

ორივე აღნიშნული ტიპის ნაკერის ღირსებებით ხასიათდება ეგრეთ წოდებული კომბინირებული ტიპის ნაკერები, რომლებსაც ჯერ აბეტონებენ, ხოლო შემდეგ სპეციალურად ჩატანებული მილების მეშვეობით უკეთებენ ცემენტაციას.

კაშხალის ტემპერატურულ ნაკერებს შორის მანძილი აიღება 10-დან 20 მეტრამდე. უკანასკნელ ხანებში ამ მანძილს ღებულობენ 7-10 მეტრის ტოლს.

თაღოვანი კაშხლების მშენებლობაში გამოყენების სიმრავლე დადგენილია შემდეგი მოსაზრების მიხედვით:

ა) კომბინირებული კაშხალი, რომელიც შედგება ქვედა თაღოვანი ნაწილისაგან, რომელზედაც იგება ზედა გრავიტაციული ნაწილი;

ბ) თაღოვანი ან გუმბათოვანი კაშხალი, რომელიც წინასწარ არის შეკუმშული და ფუძეში ანკერების მეშვეობით არის ჩამაგრებული;

გ) კონტრფორსებიანი თაღოვანი კაშხალი, ამ ტიპის კაშხალის წარმოშობით ფართოვდება თაღოვანი კაშხლების გამოყენების არე განიერ კალაპოტებში;

დ) გუმბათოვანი კაშხალი, რომლის შექმნა ნაკარნახებია მისწრაფებებით, სადაც სრულად იქნეს გამოყენებული ბეტონის მუშაობა კუმშვაზე არა მარტო ერთ, არამედ მრავალ სიბრტყეში.

პრაქტიკაში გვხვდება აგრეთვე კომბინირებული კაშხლების სხვა სახეობები, მაგალითად, თაღოვანი მრავალთაღოვანთან და სხვა.

საქართველოში პირველი თაღოვანი კაშხალი ლაჯანურჰესის კაშხალია, რომლის მშენებლობა 1960 წელს დამთავრდა.

ენგურის კაშხალი წარმოადგენს მსოფლიოში ყველაზე მაღალ კაშხალს.

ენგურის თაღოვანი კაშხალის პროექტის დასაბუთებისათვის ჩატარებულ იქნა მრავლობითი კვლევითი სამუშაოები.

### **თაღოვანი კაშხალების სიმტკიცის კვლევების მეთოდების შესახებ**

ზოგად შემთხვევაში თაღოვან კაშხალზე შეიძლება მოქმედებდეს: საკუთარი წონაა წყლისა და ნატანის წნევები, ფილტრაციული უკუწნევა, ყინულის საფარის წნევა, ტემპერატურული ძაღვები, ბეტონის შეკლებით და გაჯირჯვებით წარმოშობილი ძაღვები, სეისმური (ინერციული) ძაღვები.

გეგმაში თაღოვანი კაშხალი წარმოადგენს მრუდწირული მოხაზულობის წყალშემტბორავ სივრცით კონსტრუქციას, რომელიც მუშაობს, როგორც გუმბათი ან გარსი და მასზე მოსულ დატვირთვებს ქუსლებით გადასცემს ხეობის ნაპირებს.

თაღოვანი კაშხლების კლასიფიკაცია წარმოებს სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით:

მოყვანილობის კოეფიციენტით, რომელიც ახასიათებს კაშხლის ფარდობით სისქეს  $K = \frac{h}{H}$  (კაშხლის სისქე ფუძეში) ( $h$  – კაშხლის

მაქსიმალური სიმაღლე), თაღოვანი კაშხლები ფარდობითი სისქის მიხედვით იყოფა:

- ა) თხელი ( $K < 0,2$ );
- ბ) სქელი ( $K = 0,2 - 0,35$ );
- გ) თაღოვან-გრავეიტაციული ( $K = 0,35$ ).

$K$  მოყვანილობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ხეობის კვეთის ფორმაზე ანუ კაშხალის გასწორზე და  $n = \frac{L}{H}$  ფარდობაზე, რომელსაც გასწორის კოეფიციენტი ეწოდება. აქ  $L$  კაშხალის თხემის სიგრძეა, ზოგჯერ მის ნაცვლად იღებენ გასწორის სიგანეს კაშხლის თხემის სიმაღლეზე (ქორდას  $L$ )  $K$  და  $n$  კოეფიციენტებს შორის დამოკიდებულებას.

- 1 – საშუალო კაშხლებისათვის;
- 2 – 80 მ-ზე მაღალი კაშხლებისათვის;
- 3 – 80 მ-მდე კაშხლებისათვის.

თაღოვანი ნაწილის მოხაზულობის (გეომეტრიის მიხედვით) განასხვავებენ:

- ა) მუდმივ ცენტრალურ კუთრიანს;
- ბ) სადაწნეო წახნაგის მუდმივრადიუსიან ან ცილინდრულს;
- გ) ორმაგსიმრუდიანს ან გუმბათოვანს.

კაშხლის ნაპირებთან და ფუძესთან შეუღლებისა და კონსტრუქციული თავისებურებების მიხედვით განასხვავებენ:

- ა) ქუსლების დრეკადი ჩამაგრებით;
- ბ) კონტურული ან პერიმეტრული ნაკერებით;
- გ) ჩაჭრილი ნაკერებით;
- დ) ორ ან სამსახსრიანი თაღებით;
- ე) სანაპირო ბურნებით;
- ვ) საყვინთო ზედა თაღებით (საყვინთი თხემით);
- ზ) სპეციალური კედლებით.

სიმაღლის მიხედვით:

- ა) დაბალი  $H \leq 25$  მ;

ბ) საშუალო  $25 \leq H \leq 75$  მ;

გ) მაღალი  $75 \leq H \leq 150$  მ;

დ) ზემადალი  $H > 150$  მ.

წყლის გამწვების ხერხის მიხედვით თაღოვანი კაშხლები იყოფა:

ა) ყრუ;

ბ) წყალსაგდები-წყალსაშვიანი და სიღრმული ხვრეტებით.

მასალის მიხედვით:

ა) ქვის;

ბ) ბეტონის;

გ) რკინაბეტონის.

ზოგადი მოხაზულობის თაღოვანი კაშხლების სიმტკიცეზე გაანგარიშება ზუსტი თეორიული მეთოდებით მისი შუა ზედაპირის რთული გეომეტრიისა და მუშაობის პირობების გათვალისწინებით ურთულესი ამოცანაა, მიუხედავად მრავალგზის ცდისა, თაღოვანი კაშხლის სიმტკიცის ამოცანის მკაცრი თეორიული გადაწყვეტა ჯერ კიდევ არაა მიღებული, მიუხედავად ამისა უკანასკნელ 25-30 წლის განმავლობაში მსოფლიოში დაგროვდა მდიდარი გამოცდილება თაღოვანი კაშხლების კვლევის, დაპროექტების და ექსპლოატაციის საქმეში. ამჟამად თაღოვანი კაშხლების დამაბუღ-დეფორმირებული მდგომარეობის სურათის დასადგენად დამუშავებული მეთოდები საშუალებას იძლევა ნებისმიერი კონსტრუქციის თაღოვანი კაშხლები გაანგარიშდეს პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტით.

ზოგადად თაღოვანი კაშხლების გაანგარიშების მეთოდები იყოფა ორ ჯგუფად:

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება ე.წ. „სუფთა თაღის“ მეთოდები, რომლებიც განიხილავენ თაღოვანი კაშხლიდან ჰორიზონტალური სიბრტყეებით ამოჭრილ ერთეული სიმაღლის თაღებს ჰორიზონტალური დატვირთვების მოქმედების და სხვადასხვა ხასიათის დაყრდნობის პირობებში;

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნებიან მეთოდები, რომლებიც თაღოვანი კაშხლებს განიხილავენ, როგორც ჰორიზონტალური და ვერტიკალური

დატვირთვების ქვეშ მომუშავე სივრცულ სისტემას. თაღოვანი კაშხლის, როგორც სივრცითი სისტემის გაანგარიშების მეთოდები (საანგარიშო სქემიდან გამომდინარე) შეიძლება დაჯგუფდეს შემდეგნაირად: „ცენტრალური კონტროლის მეთოდი“, ფაქტიურად ორთოტროპული სისტემების შერწყმის მეთოდი, ვარიაციულ-ღეროვანი მეთოდი, სასრულ გადამკვეთი ღეროების მეთოდი, გარსებისა და დრეკადობის თეორიაზე დაფუძნებული მეთოდები. ამოცანების რეალიზაციისათვის თითოეულ მეთოდში გამოიყენება სხვადასხვა მათემატიკური აპარატი.

## **1.6. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლები. გრავიტაციული კაშხლები**

### **ზოგადი ცნობები გრავიტაციული კაშხლების შესახებ**

გრავიტაციული კაშხლები წარმოადგენს მასიურ წყალშემტბორავ ნაგებობებს, რომლებიც წინაღობას უწევენ ჰორიზონტალურ მძვრელ ძალებს ძირითადად საკუთარი წონის მოქმედებით ფუძეში წარმოშობილი ხახუნისა, ხოლო კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში აგრეთვე შეჭიდულობის ძალებით.

ამჟამად გრავიტაციულ კაშხლებს ძირითადად აშენებენ ბეტონის ქვაბეტონისა და არმობეტონისაგან, ხოლო უფრო იშვიათად – ფლეთილი ქვის წყობით. ბეტონის კაშხლები პრაქტიკაში შემოვიდა გასული საუკუნის დასაწყისში და ფართოდ გავრცელდა მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში, მათი დიდი უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ბეტონის მომზადებისა და წყობის პროცესები სრულდება თანამედროვე ფართო მექანიზაციის გამოყენებით, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის მშენებლობის ტემპს. მათი ძირითადი ნაკლია დიდი მოთხოვნილება შედარებით დეფიციტურ მასალაზე – ცემენტზე.

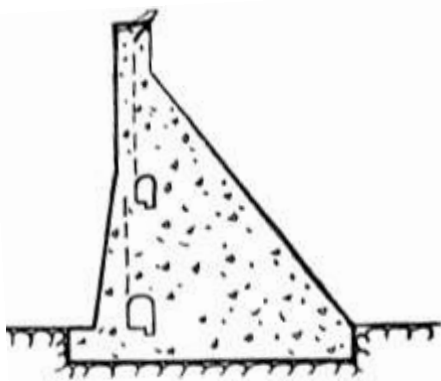
გრავიტაციული კაშხლებიდან მსოფლიოში ყველაზე მაღალია გრანდ დიკსანსის კაშხალი შვეიცარიაში (284 მ), რომლის მშენებლობა დამთავრდა 1961 წელს. მნიშვნელოვანი სიმაღლისა და დიდი მოცულობისაა ბოულდერის



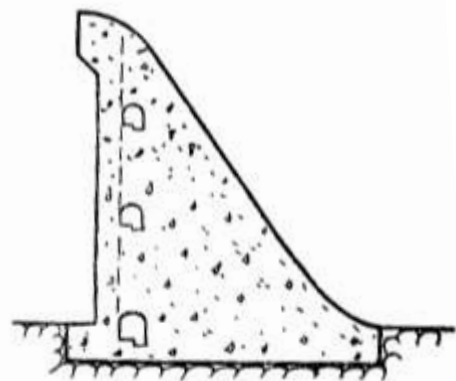
(222 მ) გრენდ-კულის (170 მ) და შასტას (180 მ) კაშხლები აშშ-ში, რომლებიც აშენდა 1935-1944 წლებში პოსტ საბჭოურ სივრცეში ცნობილი კაშხლებია – ვოლხოვის, დნეპრის ვოლგის, უსტ-კამენ-გორკის, ბუხტარმის, ბრატსკის, კრასნოიარსკიასა და სხვა წარმოადგენენ გრავიტაციულს. მათგან ყველაზე მაღალია ბრატსკის ჰესის ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი (126 მ).

პროფილები ქვის გრავიტაციული კაშხლებისა, ას წელზე მეტი ხნის წინათ, იყო ძალიან მძიმე, თითქმის სწორკუთხოვანი ფორმისა. შემდგომში სტატიკური ანგარიშის თეორიის დამუშევების საფუძველზე წარმოიშვა უფრო ეკონომიური პროფილები, რომელთაც მრუდწირული ან პოლიგონალური მოხაზულობა ჰქონდათ. თანამედროვე სრულყოფილმა ანგარიშებმა აჩვენა, რომ ზოგად შემთხვევაში გრავიტაციული კაშხლის თეორიულ პროფილს წარმოადგენს დახრილგვერდებიანი, ხოლო კლდოვან ფუძეების შემთხვევაში სწორკუთხოვანი სამკუთხედები.

გრავიტაციულ კაშხლებს აშენებენ როგორც ყრუს, ასევე წყალსაშვებანს. ყრუ გრავიტაციული კაშხლის განივკვეთი მოგვაგონებს სამკუთხედს (ნახ. 4), ხოლო წყალსაშვები კაშხლისა – ტრაპეციას, რომლის ქვედა წახნაგს აქვს თავისუფლად გადადინებული ჭავლის მოხაზულობა (ნახ. 5).



ნახ. 4. მაღალი ყრუ გრავიტაციული კაშხლის პროფილი კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში



ნახ. 5. მაღალი წყალსაშვები გრავიტაციული კაშხლის პროფილი კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში

წყობის დიდი მოცულობის გამო გრავიტაციული კაშხლების ღირებულება საკმაოდ დიდია, ამიტომ დიდი სადაწნეო ფრონტის შემთხვევაში მიზანშეწონილია ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი გამოყენებული იქნას მხოლოდ როგორც წყალსაშვები ნაგებობა.

ჩვეულებრივ გრავიტაციულ კაშხლებს გეგმაში აქვთ სწორხაზოვანი ფორმა, ხოლო შედარებით იშვიათად – მრუდწირული. პირველ შემთხვევაში კაშხლის ასაგებად საჭიროა უფრო ნაკლები რაოდენობის მასალა და ამიტომ ასეთი ფორმა მიზანშეწონილი და გავრცელებული, ხოლო კაშხლის მრუდწირული ფორმა გამართლებულია მაშინ, როდესაც მდინარის კალაპოტი არასაკმარისი სიგანისაა და იგი ვერ უზრუნველყოფს წყალსაგდები ფრონტის საჭირო სიგრძეს. ცალკეულ შემთხვევაში ასეთი მოხაზულობა შეიძლება განპირობებული იყოს ფუძის ქანების განლაგების პირობებით ანდა განსაკუთრებით საპასუხიმგებლო კაშხლებისათვის მდგრადობის მნიშვნელოვანი მარაგის შექმნის მიზნით. (ბოულდერის მაღალი კაშხალი აშშ-ში). გეგმაში მრუდწირული ფორმის გრავიტაციული კაშხლის მაგალითს წარმოადგენს დნეპრჰესის კაშხალი, რომელიც მოხაზულია წრის რკალზე 600 მ-ის ტოლი რადიუსით. მისი ასეთი მოხაზულობა ნაკარნახები იყო კალაპოტის კვეთში ქანების განლაგების თავისებური პირობებით.

გრავიტაციული კაშხლები შეიძლება ვაშენოთ როგორც კლდოვან, ასევე ნახევრად კლდოვან და არაკლდოვან ფუძეებზე. მათ ფუძეებად სასურველია მტკიცე, მონოლითური, სუსტად გაბზარული, წყალმდეგი და ყინვამდეგი კლდოვანი ქანები, რომლებიც ამასთანავე ხელსაყრელად იქნებიან განლაგებული მძვრელი ძალების წინააღმდეგ. მაგრამ ასეთი კარგი ღირსების მქონე კლდოვანი ქანები ძალიან იშვიათად გვხვდება; ჩვეულებრივ კლდოვანი ქანები ბზარებიანია, ამიტომ მათი განმტკიცებისათვის საჭიროა ცემენტაციის სამუშაოთა ჩატარება ჰიდრომშენებლობის გამოცდილების საფუძველზე დადგენილია, რომ ნახევრად კლდოვან ფუძეებზე შეიძლება ვაშენოთ მხოლოდ 25-30 მ-მდე გრავიტაციული კაშხლები.

გრავიტაციული ბეტონის კაშხლები, მათი კონსტრუქციული სიმარტივიდან და საიმედოობიდან გამომდინარე გავრცელებულია საკმაოდ ფართოდ. მსოფლიოში სამ უდიდეს ჰესს: „სამი ხეობა“ „იტაიპუ“, „გური“ აქვთ ასეთი კაშხლები.

სახელწოდებიდან გამომდინარეობს ორი ძირითადი თავისებურება ამ სახის კაშხლების: ისინი ეწინააღმდეგებიან წყლის წნევას წყალსაცავის მხრიდან საკუთარი წონის ხარჯზე და მზადდება ბეტონისაგან.

ყველა გრავიტაციული ბეტონის კაშხლები, შეიძლება დავყოთ ორ დიდ ჯგუფად: წყალსაგდებიანი კაშხლები სხვადასხვა ტიპის ფუძეზე და კაშხლები კლდოვან ფუძეზე.

წყალსაგდებიანი კაშხლები სხვადასხვა ტიპის ფუძით შედიან წყალუხვი მდინარეების ყველა დაბლობიან ჰიდროკვანძებში.

გრავიტაციული კაშხლები ბეტონის სხვადასხვა ტიპის ფუძეზე კიდევ უფრო მასშტაბურია ისინი შენდება, როგორც დაბლობში მდინარეებზე, ასევე მთიან მდინარეებზე და აღწევენ 200 მეტრზე მეტ სიმაღლეს. რეკორდი ეკუთვნის კაშხალს მდინარე „გრანდ დიკსენს“ შვეიცარიაში – 285 მეტრი.

**ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუირება კლდოვან ფუძეზე.**

გრავიტაციული კაშხლის ტიპის შერჩევა ხდება:

1. პლატინის დანიშნულებიდან გამომდინარე;
2. ვარიანტების ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების შედარებით;
3. საინჟინრო გეოლოგიური მონაცემებიდან გამომდინარე;
4. კლიმატური პირობებიდან გამომდინარე.

მასიური ტიპის გრავიტაციული კაშხლის მშენებლობის პროცესში ბეტონის სიმტკიცე გამოიყენება არასრულად. ამიტომ მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ გრავიტაციული კაშხლების შემსუბუქებული ტიპები. გაფართოებული ნაკერებით, ფუძესთან დაანკერებით, ბეტონის შიგა ზონის ადგილობრივი მასალებით შეცვლით.

როდესაც გრავიტაციული კაშხლის სიმაღლე მცირეა ან საშუალო ამ შემთხვევაში ირჩევენ პლატინის ტიპს ფუძესთან დაანკერებით. ფუძესთან

დაანკერება ზრდის პლატინის მდგრადობას. აუმჯობესებს ძაბვების გადანაწილებას, რაც ამცირებს მოწყობის მოცულობებს.

გრავიტაციული კაშხლებისათვის განივი გაფართოებული ნაკერებით, ხელსაყრელია ფუძეები კლდოვანი და წყალმდევი. კაშხლის ასეთი ტიპის შემთხვევაში მცირდება ნაგებობის ფუძეზე უკუწნევა. უმჯობესდება კაშხლის ფუძისა და კაშხლის დრენაჟი, მცირდება ბეტონის მოცულობა.

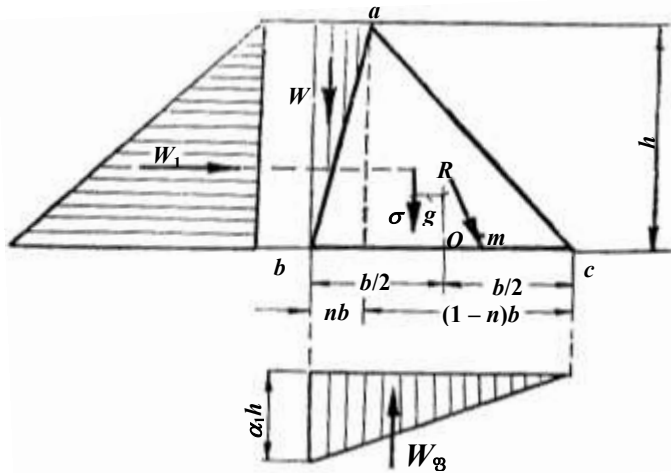
## გრავიტაციული კაშხლის პროფილის ზომების დადგენა

### 1. სიგანის გაანგარიშება სიმტკიცის პირობის მიხედვით

სათანადო გამოკვლევებით დადგენილია, რომ ზოგად შემთხვევაში გრავიტაციული კაშხლის თეორიულ პროფილს წარმოადგენს სამკუთხედი ზედა და ქვედა დახრილი წახნაგებით. განვიხილოთ ასეთი პროფილის მქონე კაშხლის ერთეული სიგრძის (1 მ) უბანი და განვსაზღვროთ მისი ფუძის  $b$  სიგანე, იმ პირობით, რომ პროფილის სადაწნეო წახნაგებზე არ წარმოიქმნას გამჭიმვი ძაბვები. ეს პირობა გამომდინარეობს მოსაზრებით, რომ ბეტონი ნაკლებ წინააღმდეგობას უწევს გაჭიმვას, რის გამოც მასში შეიძლება წარმოიქმნას ბზარები და განვითარდეს ფილტრაცია, რომელიც საზიანოა კაშხლის მასალის სიმტკიცისა და ხანგამძლეობისათვის.

კაშხალზე მოქმედებს საკუთარი  $G$  წონა, მაქსიმალური ჰიდროსტატიკური წნევა ზედა ბიეფიდან  $W_1$  ჰორიზონტალური და  $W_2$  ვერტიკალური მდგენელებით. ფილტრაციული  $W_{ფ}$  წნევა, რომელიც  $\alpha_1 h$  სიმაღლის სამკუთხოვანი ეპიურით გამოისახება, სადაც  $h$  წყლის სიღრმეა ზედა ბიეფში (იგულისხმება, რომ წყალსაცავი ავსებულია კაშხლის ქიმამდე, და ამასთან ქვედა ბიეფის წყალი არ არის), ხოლო  $\alpha_1$  – ფილტრაციული წნევის შემამცირებელი კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე კაშხლის ძირის მოცემული სიგანის დროს დამოკიდებულია ცემენტაციური ფარდის სიღრმეზე და დაახლოებით იცვლება 0,2 – 0,6 ფარგლებში.

კაშხლის ზედა წახნაგის ქვედებულის სიგანე, რომლითაც ხასიათდება მისი დახრილობა, აღვნიშნოთ  $nb$ -თი, სადაც  $n < 1$  (ნახ. 6), მაშინ ზემოთ აღნიშნულ ძალთა მნიშვნელობა შემდეგნაირად ჩაიწერება:



ნახ. 6. კაშხლის სამკუთხოვანი პროფილის საანგარიშო სქემა

$$W_1 = \frac{1}{2}vh^2; W_2 = \frac{1}{2}vnbh; W_3 = \frac{1}{2}\alpha_1vbh; G = \frac{1}{2}v_1bh, \quad (21)$$

სადაც  $v$  – წყლის მოცულობითი წონაა, ხოლო  $v_1$  – კაშხლის მასალის მოცულობითი წონა ტ/მ<sup>3</sup>-ში.

პირობა, (21) რომელიც სადაწნეო წახნაგზე კრძალავს გამჭიმი დაბევის წარმოშობას, ნიშნავს, რომ სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში მინიმალური მკუმშავი დაბვა იმავე წახნაგზე შეიძლება იყოს ნულის ტოლი ე.ი. ნორმალურ მკუმშავ დაბვათა ეპიურა კაშხალის ქვეშ იქნება სამკუთხოვანი ამ შემთხვევაში საჭიროა კაშხალზე მოქმედი ყველა აქტიური ძალის  $R$  ტოლქმედი გადიოდეს ფუძის  $b$  სიგანის შუა მესამედის საზღვარზე  $m$  წერტილში. დავწეროთ (ნახ. 6) ტოლქმედის შემადგენელ ძალთა მომენტების ჯამი ნულის ტოლია  $m$  წერტილის მიმართ:

$$W \cdot \frac{h}{3} + W_3 \cdot \frac{b}{3} - W_2 \cdot \frac{b(2-n)}{3} - G_1 \cdot \frac{1}{3}(1-n)b = 0, \quad (22)$$

ჩავსვამთ ძალთა მნიშვნელობები (21)-ში გვექნება:

$$\frac{vh^2}{2} \cdot \frac{h}{3} + \alpha_1 \frac{bh}{2} \cdot \frac{b}{3} - v \frac{nbh}{2} \cdot \frac{b(2-n)}{3} - v_1 \frac{bh}{2} \cdot \frac{1}{3}(1-n)b = 0, \quad (23)$$

(23) განტოლებიდან ვპოულობთ კაშხლის საძიებელ სიგანეს  $b$  -ს:

$$b = \frac{h}{\sqrt{\frac{v_1}{v}(1-n) + n(2-n) - \alpha_1}}. \quad (24)$$

კაშხალის მინიმალური (ეკონომიური) სიგანე მიიღება მაშინ, როდესაც ფორმულის (24) ფესვებში გამოსახულება აღწევს მაქსიმუმს, მის პირველ წარმოებულს ვუტოლებთ ნულს

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{v_1}{v} (1-n) + n(2-n) - \alpha_1 \right] = -\frac{v_1}{v} + 2 - 2n = 0 \quad (25)$$

საიდანაც

$$n = \frac{2 - \frac{v_1}{v}}{2} . \quad (26)$$

ადვილად შეიძლება დავრწმუნდეთ რომ  $n$ -ის ამ მნიშვნელობის დროს ფუნქცია აღწევს მაქსიმუმს. მართლაც ბეტონისა და ქვაყორის წყობისათვის საშუალოდ  $\frac{v_1}{v} \approx 2,4$ ; მაშასადამე  $n = -0,20$ . ეს ნიშნავს, რომ კაშხალის სადაწნეო წახნაგს უნდა ჰქონდეს შებრუნებული ქანობი. ე.ი. იყო ჩაკიდებული მაგრამ ასეთი პროფილის კაშხალი სამშენებლო სამუშაოთა წარმოების თვალსაზრისით მიუღებელია, ამიტომ აიღება  $n$ -ის უახლოესი მნიშვნელობა  $n=0$ . ამგვარად, (21) პირველი პირობიდან გამომდინარე, რომელიც კრძალავს გამჭიმი ძაბვების წარმოშობას სადაწნეო წახნაგზე, გრავიტაციული კაშხალის ეკონომიურ პროფილს წარმოადგენს სწორკუთხოვანი სამკუთხედი ვერტიკალური სადაწნეო წახნაგით.

კაშხალის პროფილის ეკონომიური სიგანე შესაბამისად იქნება

$$b = \frac{h}{\sqrt{\frac{v_1}{v} - \alpha_1}} , \quad (27)$$

ჩვეულებრივ, როცა  $v_1 = 2,4$  ტ/მ<sup>3</sup> და  $\alpha_1 = 0,5$ , მაშინ

$$b = \frac{h}{\sqrt{1,9}} \approx 73h . \quad (28)$$

როდესაც ფუძეში მოხსნილია ფილტრაციული წნევა დრენაჟისა და სხვა ღონისძიებების საშუალებით, მაშინ  $\alpha = 0$  ფორმულები მარტივდება. ამ შემთხვევაში ფორმულიდან ვღებულობთ

$$b = \frac{h}{\sqrt{\frac{v_1}{v}}} . \quad (29)$$

მაშასადამე როდესაც  $\gamma_1 = 2,4 \text{ ტ/მ}^3$  და  $\alpha_1 = 0$  კაშხალის სიგანე

$$b = \frac{h}{\sqrt{2,4}} = 0,65h. \quad (30)$$

### სიგანის გაანგარიშება ძვრაზე მდგრადობის პირობის მიხედვით

კაშხალის ძვრას ფუძის სიბრტყეში წინაღობას უწევს ხახუნისა და შეჭიდულობის ძალები. თუ მდგრადობის მალული მარაგის გარანტიისათვის მხედველობაში არ მივიღებთ კაშხალსა და ფუძის გრუნტს შორის შეჭიდულობას, კაშხალის მდგრადობა ძვრაზე შეიძლება შემოწმდეს ფორმულით

$$K_{\text{ძვრ}} = \frac{f \cdot V}{W_1}, \quad (31)$$

სადაც  $K_{\text{ძვრ}}$  – ძვრაზე კაშხალის მარაგის კოეფიციენტი;

$f$  – კაშხალისა და ფუძის შორის ხახუნის კოეფიციენტი;

$V$  – კაშხალზე მოქმედი ვერტიკალური ძალების ჯამი.

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$V = G + W_2 - W_3 = \frac{bh}{2}(v_1 + vn + \alpha_n v), \quad (32)$$

მაშინ ფორმულაში სათანადო მნიშვნელობათა ჩასმით გვექნება

$$K_{\text{ძვრ}} = \frac{f \cdot \frac{bh}{2}(v_1 + vn - \alpha_1 v)}{\frac{vh^2}{2}} = f \left( \frac{v_1}{v} + n - \alpha_1 \right) \frac{b}{h}. \quad (33)$$

(33) ფორმულიდან მივიღებთ კაშხლის საძიებელ სიგანეს

$$b = K_{\text{ძვრ}} \frac{h}{f \left( \frac{v_1}{v} + n - \alpha_1 \right)}. \quad (34)$$

კლდოვანი ფუძეებისათვის, როდესაც  $f = 0,7$ ;  $n = 0$ ;  $v = 2,4 \text{ ტ/მ}^3$ ;  $\alpha = 0,5$  და  $K_{\text{ძვრ}} = 1$  ფორმულა (29)-დან  $b = 0,73h$ , ხოლო როდესაც ფილტრაციული უკუწნევა არ მოქმედებს ( $\alpha_1 = 0$ )  $b = 0,6h$ , ე.ი. ახლოსაა  $b = 0,65h$ -თან, რომელიც ადრე იყო მიღებული სიმტკიცის პირობიდან ფორმულა (30).

მიზანშეწონილია აღინიშნოს, რომ მცირე და საშუალო სიმაღლის ბეტონის გრავიტაციულ კაშხლებში დასაშვები ძაბვები კუმშვაზე არ არის

მთლიანად გამოყენებული და რომ დატვირთვები კლდოვან და ნახევრადკლდოვან ფუძეებზე ვერ აღწევს დასაშვებ სიდიდეებს, მაშინ როდესაც მაღალი კაშხლების ბეტონში და კლდოვან ფუძეებში დასაშვებ ძაბვათა სიდიდეებმა შეიძლება განაპირობოს პროფილის ფორმა.

თანამედროვე ტექნოლოგიის საფუძველზე მაღალი მარკის ბეტონების გამოყენებამ შესაძლებლობა შექმნა პირობები იმისა, რომ ბეტონის გრავიტაციულ კაშხლებში დასაშვებ მთავარ მკუმშავ ძაბვათა სიდიდენი აღებულ იქნეს 50-60 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე ნაცვლად 20-25 კგ/სმ<sup>2</sup>, რომელთაც ადრე ღებულობდნენ.

ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების ერთ-ერთი ძირითადი მოთხოვნილებაა, რომ არ დავუშვათ გამჭიმი ძაბვები სადაწნეო წახნაგსა და ფუძეში. დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში კი შეიძლება დაშვებულ იქნას ეს ძაბვები ფუძეში ქვედა წახნაგთან და ისიც არაა უმეტეს 1-2 კგ/სმ<sup>2</sup>-ისა.

დასმულ საკითხთან დაკავშირებით შეიძლება აღინიშნოს, რომ ზოგიერთ მასიურ კაშხლებში სადაწნეო წახნაგებზე დასაშვებია გარკვეული სიდიდის გამჭიმი ძაბვები.

ჩატარებული ცდების თანახმად, მიუხედავად იმისა, რომ დაწნევითი ფილტრაციის ქვეშ ბეტონის გაჭიმული ზონები მუშაობს არახელსაყრელ პირობებში მაინც მას შეუძლია აიტანოს გამჭიმი ძაბვები.

თუ გავითვალისწინებთ კაშხლის არახელსაყრელ მუშაობის პირობებს სადაწნეო წახნაგთან და ყველა იმ ფაქტორის ერთობლიობას, რომელიც ხელს უწყობს გაანგარიშებაში ძნელად გასათვალისწინებელი დეფორმაციებისა და ბზარების წარმოქმნას, ძირითად გაანგარიშებებში არ უნდა დავუშვათ ფაქტორები, რომლებიც ითვალისწინებენ ფუძის დეფორმაციების გავლენას და ტემპერატურული შეკლებით ძაბვებს, ზედა წახნაგთან ფუძეში სავსე წყალსაცავის დროს შეიძლება დაშვებულ იქნას მცირე სიდიდის გამჭიმი ძაბვები (2-4 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე).

კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე (ფუძის ზემოთ) გამჭიმი ძაბვები შეიძლება დაშვებულ იქნას ძირითად საანგარიშო შემთხვევაშიც, კონსტრუქციულ ღონისძიებებში.



დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში კაშხალის ქვედა წახნაგზე შეიძლება დაშვებულ იქნას გამჭიმვი ძაბვები 3-4 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე. თუ ამასთანავე გაითვალისწინება ტემპერატურულ-შეკლებითი მოვლენები.

დასასრულ უნდა შევნიშნოთ, რომ ნახევრად კლდოვან ან არაკლდოვან ფუძეებზე გრავიტაციული კაშხლების გეგმარების დროს ითვალისწინებენ რა ქანების გეოლოგიური თვისებების არაერთგვაროვნებას, აკმაყოფილებენ მოთხოვნილებას ძაბვების თანაბრად განაწილების შესახებ. ჩვეულებრივ თიხნარიდან ან ქვიშა-თიხოვან გრუნტებზე ძაბვათა ზღვრული უთანაბრობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა არ უნდა აღემატებოდეს 1,5-2,5-ს. კაშხალის კატასტროფულ დატვირთვაზე შემოწმების დროს კი ძაბვათა უთანაბრობის კოეფიციენტს არავითარი შემზღვევითი პირობები არ წაეყენება.

### **გრავიტაციული კაშხლების მდგრადობა**

გარდა სიმტკიცისა, კაშხალი უნდა აკმაყოფილებდეს მდგრადობის პირობებს ე.ი. უნდა იყოს წონასწორობაში მისი მუშაობის ყოველგვარ პირობებში. უფრო მეტიც მას უნდა გააჩნდეს მდგრადობის გარკვეული მარაგი გარე ძალთა არახელსაყრელი ზემოქმედების პირობებშიც.

ზოგად შემთხვევაში კაშხალზე შეიძლება მოქმედებდეს ჰორიზონტალური და აგრეთვე ვერტიკალური ზემოდან ქვემოთ და ქვემოდან ზემოთ მომქმედი ძალები.

ზემოთ ჩამოთვლილი ძალთა ჯგუფის მოქმედებით კაშხალმა შეიძლება განიცადოს წონასწორობის დარღვევის სამი შემთხვევა:

1. ძვრა ფუძის კონტაქტის სიბრტყეში;
2. ატივტივება;
3. გადაყირავება ქვედა წიბოს მიმართ.

წონასწორობის შესაძლო დარღვევის სახეობათა შესაბამისად წარმოებს კაშხალის მდგრადობის შემოწმება ძვრაზე, ატივტივებასა და გადაყირავებაზე.

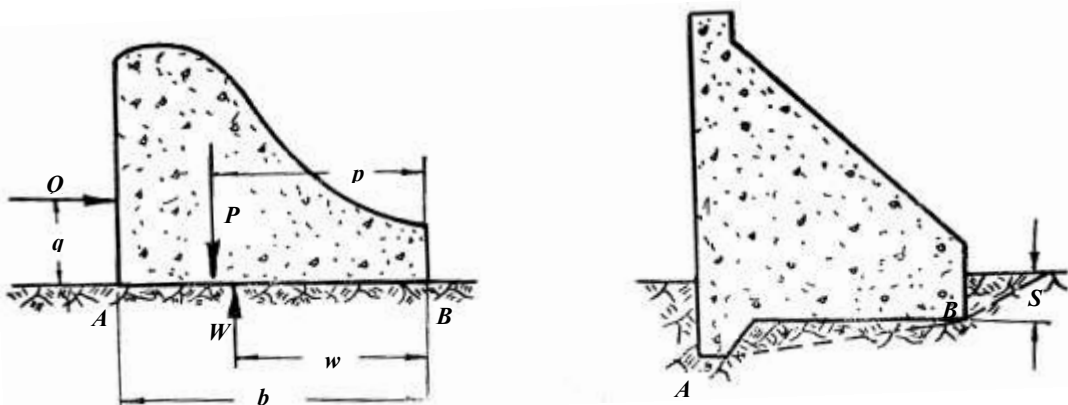
### **კაშხლის შემოწმება ძვრაზე კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში**

თანამედროვე სამშენებლო ნორმებისა და წესების შესაბამისად ნაგებობათა მუშაობას არეგულირებს სამი ზღვრული მდგომარეობა: 1) ზიდვის

უნარის დაკარგვა; 2) გადაჭარბებული დეფორმაციების წარმოქმნა და 3) ადგილობრივ დაზიანებათა წარმოქმნა.

ფუძის სიბრტყით კაშხლების მოსალოდნელი ძვრის საწინააღმდეგო გაანგარიშებანი შეესაბამებთან პირველი ზღვრული მდგომარეობის გათვალისწინებას. ფუძის გადაჭარბებული დეფორმაციები (მეორე ზღვრული მდგომარეობა) გარკვეულ როლს ასრულებს მხოლოდ არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში.

გაანგარიშებისას განიხილება კაშხალის 1 მეტრი სიგრძის მონაკვეთი, რომელზედაც მოქმედებს  $Q$  ჰორიზონტალური,  $P$  – ვერტიკალური ზემოდან ქვემოთ და  $W$  ვერტიკალური ქვემოდან ზემოთ მიმართული ძალები (ნახ. 7). კაშხალის ძვრას ეწინააღმდეგება ხახუნის ძალა კაშხალსა და ფუძეს შორის და შეჭიდულობის (კლდოვანი ფუძის უსწორმასწორობის გამო) ძალები.



ნახ. 7. კაშხლების ძვრაზე მდგრადობის საანგარიშო სქემები.  
 ა. ფუძეში ჩაუმაგრებული კაშხალი ჰორიზონტალური ძირით;  
 ბ. ფუძეში ჩაუმაგრებული კაშხალი კბილით

თანახმად მოქმედი სამშენებლო ნორმების და წესებისა, კაშხალის ძვრაზე მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტი განისაზღვრება ფორმულით:

$$N_{\text{ფ}} = \frac{f(P-W) + cF}{Q}, \quad (35)$$

სადაც  $f$  არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, ანუ ძვრის პარამეტრი, რომელიც დამოკიდებულია ფუძის გრუნტის თვისებებსა და მდგრადობაზე (ცხრ. 5);

$c$  – ხვედრითი შეჭიდულობა, ტ/მ<sup>2</sup>;

$F$  – კაშხლის ძირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

რთული გეოლოგიური პირობების შემთხვევაში მაღალი კაშხლებისათვის რეკომენდირებულია  $f$  და  $c$  სიდიდეები დადგინდეს ცდებით უშუალოდ მშენებლობის ადგილზე. სუსტი კლდოვანი ქანებისათვის (მერგელები, თიხოვანი ფილები, ოპოკები და სხვა)  $f$  სიდიდეს იღებენ 0,3±0,5 ზღვრებში.

ცხრილი 5

რთული გეოლოგიური პირობების ქანების დახასიათება

ფუძის ქანების დახასიათება	$f$	$c$ ტ/მ <sup>2</sup>
კლდოვანი ქანები (გრანიტები, სიენიტები, ქვიშაქვები და სხვა) პრაქტიკულად გამოუფიტავი, ძლიერ სუსტი ბზარებით 400 კგ/სმ <sup>2</sup> მეტი წინაღობით;	0,75	40
კლდოვანი ქანები საშუალო ბზარებით, სუსტად გამოფიტული, დროებითი წინაღობა კუმშვაზე >400 კგ/სმ <sup>2</sup> .	0,7	30

$K_{\text{დგრისა}}$  იღება ნაგებობის კლასის და ძალოვანი ზემოქმედების დამოკიდებულებით. ძალთა ძირითადი შეხამების შემთხვევაში I, II და III კლასის ნაგებობებისათვის რეკომენდირებულია  $K_{\text{დგრისა}}$  აღებული იქნას შესაბამისად 1,3; 1,2 და 1,15 და 1,15; დამატებითი თანწყობის შემთხვევაში – 1,1; I და II კლასებისათვის და 1,05 – III კლასისათვის.

ძვრაზე კაშხლის მდგრადობის საიმედოობის კოეფიციენტის დასადგენად შეიძლება გამოყენებულ იქნას აგრეთვე ჭრაზე ნაკერის ხვედრითი წინაღობის ფორმულა, რომელიც მრავალი მკვლევარის მიერ ჩატარებული ცდების მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შეიმუშავა ვ.შჩელკანოვმა. იგი ერთნაირად გამოსადეგია, როგორც ბეტონისა და კლდის კონტაქტის, ასევე ძველი და ახალი ბეტონის ნაკერებისათვის აღნიშნულ ფორმულაში:

$$\tau = c + 2\sigma^{\frac{3}{4}}, \quad (36)$$

სადაც  $\tau$  – ნაკერის ხვედრითი წინაღობა ჭრაზე;

$c$  – ბეტონის ხვედრითი შეჭიდულობა ფუძესთან;

$\sigma$  – ნორმალური ძაბვა ნაკერში.

თუ  $\sigma$  ცვალებადობს შედარებით მცირე ფარგლებში, მაშინ ამ ფორმულით აგებული  $\tau$  მრუდი ძალიან ახლოს იქნება სწორ ხაზთან.

ამგვარად კაშხალის ძირის ნაკერის სიმტკიცის პირობის მიხედვით ძვრაზე მდგრადობა შეიძლება შემოწმდეს ფორმულით:

$$[\tau] = \frac{c}{R_1} + \frac{2\sigma^{3/4}}{R_2}. \quad (37)$$

აქ  $[\tau]$  ზღვრული დასაშვები ჭრის ძაბვა;

$R_1$  და  $R_2$  – საიმედოობის კოეფიციენტები:  $R_1=3-4$  (საიმედოობა შეჭიდულობის შეფასებაში);  $R_2=1,3$  (საიმედოობა  $\sigma$  სიდიდის შეფასებაში).

კაშხალის ძვრაზე მდგრადობა უზრუნველყოფილი იქნება თუ ანგარიშით განსაზღვრული საშუალო ამხლეჩი ძაბვის სიდიდე ნაკერის სიბრტყეში

$$\tau \leq [\tau].$$

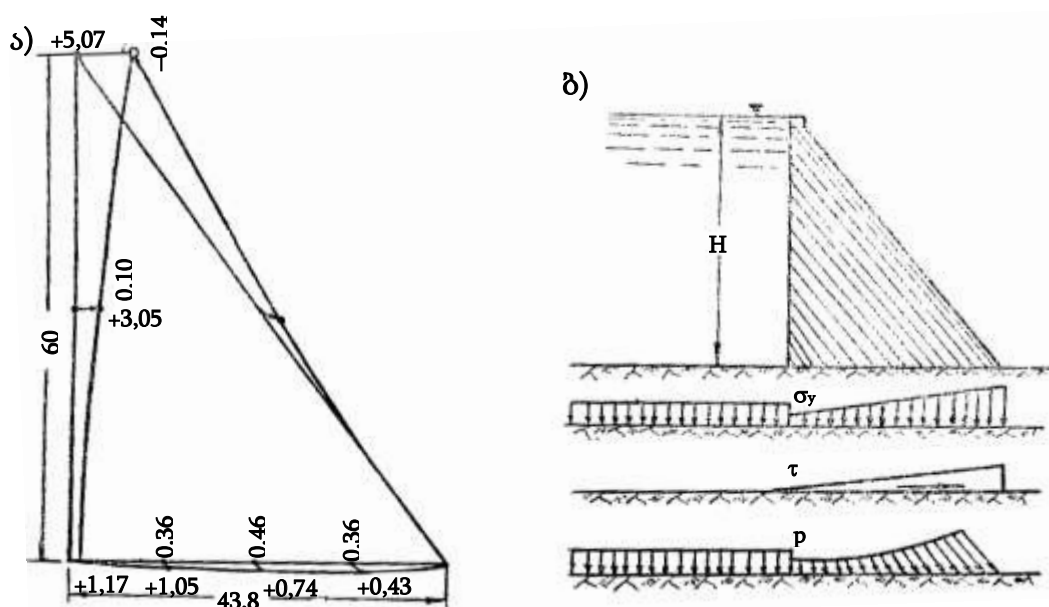
როდესაც კაშხალს გააჩნია კბილი ან იგი ჩამაგრებულია ფუძეში  $S$  სიღრმით (ნახ. 7, ბ). მაშინ ძვრისადმი წინაღობა კიდევ უფრო იზრდება. გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ფუძეში ჩამაგრებული კაშხალის ძვრაზე წინაღობა იზრდება ჭრაზე კბილის წინაღობის სიდიდით  $C_{კბ}$ . შემდეგი ფორმულით:

$$K_{კვ} = \frac{f(P-W) + cF + C_{კბ}}{Q}. \quad (38)$$

ცდებით დადგენილია, რომ თუ კაშხალს გააჩნია კბილი, მაშინ მისი პროფილი შეიძლება დაგეგმარდეს უფრო ეკონომიურად, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც კბილი არ გაითვალისწინება. ასევე თუ ქანის წინაღობა  $AB$  ხაზის გასწვრივ ახლეჩაზე და  $B$  წახნაგთან მისი პრიზმის ამოგლეჯაზე ნაკლებია  $C_{კბ}$  წინაღობაზე, მაშინ ძვრა მოხდება დაახლოებით  $ABC$  ხაზის გასწვრივ (ნახ. 7, ბ).

## გრავიტაციული კაშხლის ფუძის დეფორმაციები

გრავიტაციულ კაშხალზე მოქმედი დატვირთვების შედეგად, მისი ტანი ფუძე განიცდის დეფორმაციებს, როგორც ჰორიზონტალური, ისე ვერტიკალური მიმართულებით. ეს დეფორმაციები საერთოდ უმნიშვნელოა, მაგრამ ცალკეულ შემთხვევებში შეიძლება რამდენადმე საგრძნობი გახდეს. დეფორმაციების ხასიათი ძირითადი დატვირთვების მოქმედებისას კარგად ჩანს ქვემოთ მოყვანილ ნახაზზე, სადაც გადაადგილებანი მოცემულია მილიმეტრებში, ხოლო კაშხლის ზომები მეტრებში. დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში ადგილი აქვს შებრუნებულ სურათს ე.ი. კაშხლის სადაწნეო წახნაგი გადაადგილდება ზედა ბიეფისაკენ, ისე რომ ქიმი ღებულობს ორივე სახის დეფორმაციას, მათგან ვერტიკალურს უფრო მეტს, ვიდრე სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში.



ნახ. 8. 60 მ სიმაღლის კაშხლისა და მისი ფუძის დეფორმაციები სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში.

ა – კაშხლის დეფორმაციები; ბ – კაშხლის ფუძეზე მოსული დატვირთვების ეპიურები

ფუძის დეფორმაცია წარმოებს კაშხლისაგან გადაცემული დატვირთვის და ზედა ბიეფის შემავსებელი წყლის წონისაგან (ნახ. 8, ბ). ეს დატვირთვა ნახაზზე  $p$  დაბვათა ეპიურით არის წარმოდგენილი ტოლია კაშხლის

ძირის კვეთში  $\sigma_y$  ვერტიკალურ ნორმალურ და  $\tau$  ამხლეჩ ძაბვათა გეომეტრიული ჯამისა, ხოლო ზედა ბიეფში – თანაბარგანაწილებული წყლის წნევისა. ერთგვაროვანი ფუძის შემთხვევაში დაძაბული მდგომარეობა შეიძლება გაანგარიშდეს დრეკადობის თეორიის მიხედვით, როგორც დრეკადი უსასრულო ნახევარსიბრტყის ამოცანა.

ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევებით დადგენილია, რომ კაშხლისაგან გადაცემული დატვირთვისა და ზედა ბიეფის შემავსებელი წყლის წონისაგან, ფუძე განიცდის უფრო მეტ დეფორმაციას, ვიდრე კაშხალის ძირის კვეთი. მიუხედავად იმისა, რომ წყლის მოქმედებით ფუძე ღებულობს შებრუნებულ დეფორმაციას (ამოიბურცება) ეს სურათი ძალაში რჩება კაშხლისა და ფუძის გრუნტის დრეკადობის მოდულების  $\frac{F_d}{F_{ფ}}$  ფარდობის ყველა პრაქტიკულად შესაძლო

მნიშვნელობისათვის. სურათი ნაწილობრივ იცვლება ძალიან მტკიცე ფუძეების შემთხვევაში, რომელსაც თეორიულად  $\frac{F_d}{F_{ფ}} = 0$  ( $E_{ფ} = \infty$ ) ცხადია,

რომ  $\frac{F_d}{F_{ფ}}$  ფარდობის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს უზრუნველყოფილი

უნდა იქნას კაშხალსა და ფუძეს შორის მტკიცე კონტაქტი, რომლის დროს შეუძლებელი იქნება საკონტაქტო წერტილების გადაადგილება. აღნიშნულ გადაადგილებათა გასათანასწორებლად საჭიროა დამატებითი შინაგანი ძალები, რომლებიც გამოიწვევენ ძაბვათა ცვლილებას კაშხლის ფუძესთან მახლობელ არეებში, რაც ცხადია გამოიწვევს ძაბვათა წრფივი განაწილების დარღვევას. მაგალითის სახით განვიხილოთ კაშხალი რომლის  $H = 60$  მ,

$\frac{b}{h} = 0,73$  და  $\nu_1 = 2,3$  ტ/მ<sup>3</sup>. გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ძირის კვეთში ძაბვათა

ჩვეულებრივი ტრაპეციოიდალური ეპიურა ძლიერ მახინჯდება. დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში წარმოებს  $\sigma_y$  ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების თავმოყრა სადაწნეო წახნაგთან და ამასთან მით უფრო მეტად, რაც

უფრო მეტია  $\frac{F_d}{F_{ფ}}$  ფარდობა;  $\tau$  ამხლეჩი ძაბვები მიმართულია ძირის კვეთის

შუისაკენ და წარმოქმნის  $\sigma_x$  ჰორიზონტალურ მკუმშავ ძაბვებს, რომლებიც საერთოდ ხელსაყრელია კაშხალისათვის, რადგან კუმშვის შედეგად იხურება ბეტონში წარმოქმნილი ბზარები.

### **კაშხლის შემოწმება ძვრაზე არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში**

მოქმედი ნორმების შესაბამისად არაკლდოვანი ფუძეების გაანგარიშებას აწარმოებენ ორი ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით: 1) საანგარიშო დატვირთვების (რათა უზრუნველყოფილ იქნეს ფუძის ზიდვის უნარი) მიხედვით. ვინაიდან ჯერ კიდევ არ არის განსაზღვრული დატვირთვის ერთგვაროვნებისა და მუშაობის პირობების კოეფიციენტთა მნიშვნელობანი, ამიტომ ნებადართულია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ფუძეების ზღვრული მდგომარეობის გაანგარიშების დროს გამოყენებულ იქნეს საერთო მდგრადობის კოეფიციენტი და ნორმატიულის ტოლი საანგარიშო დატვირთვები.

ერთგვაროვანი ფუძეების ზიდვის უნარიანობისა და მათზე ასაგებ ხისტ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა მდგრადობის გამოკვლევების დროს განასხვავებენ ფუძის დეფორმაციის სამ სახეობას და მათ შესაბამისად ნაგებობის ძვრის სამ საანგარიშო შემთხვევას.

1) ბრტყელი ძვრა, რომელიც წარმოებს უშუალოდ ნაგებობის დაყრდნობის ზედაპირის გასწვრივ.

2) შერეული ძვრა, რომლის დროს საძირკვლის ძირის ნაწილზე ძვრა წარმოებს უშუალოდ ძირის ზედაპირის გასწვრივ, ხოლო დანარჩენ ნაწილზე ფუძის გრუნტის ამობურცვით.

3) სიღრმული ძვრა, რომლის დროს წარმოებს ფუძის გრუნტის ამობურცვა საძირკვლის მთელი ძირის ქვეშ.

### **გრავიტაციული კაშხლები კლდოვან ფუძეებზე**

1. კლდოვანი ფუძეების სახეობები, რომლებზედაც მოთხოვნილებანი. გრავიტაციულ კაშხლებს აშენებენ, გრუნტების მახასიათებლები, როგორც კლდოვან ისე არაკლდოვან ფუძეებზე. მაღალი კაშხლების

მშენებლობისათვის გამოსადეგია მხოლოდ კლდოვანი ფუძეები, რადგან მათ ახასიათებთ დიდი ხვედრითი დატვირთვებისას დიდი წინაღობა.

კლდოვან ქანებს, რომლებზედაც გათვალისწინებულია აიგოს გრავიტაციული კაშხალი ან სხვა შემტბორავი ნაგებობა, უნდა ჰქონდეს საკმარისი სიმტკიცე, ამასთანავე სასურველია, ნაგებობის ფუძის მთელ ფართობზე ისინი ხასიათდებოდნენ დეფორმაციებისა და ფილტრაციული სიმტკიცის ერთგვაროვნებით, აგრეთვე მონოლითური აგებულებით. მაგრამ უნდა შევნიშნოთ, რომ ამ პირობებს იშვიათად აკმაყოფილებს მთის ქანები. ხშირ შემთხვევაში მათ შეიძლება ჰქონდეთ ამა თუ იმ სახის დეფექტი, რომლის სალიკვიდაციოდ საჭიროა ჩატარდეს სპეციალური სამუშაოები. თუ რა სახით უნდა იყოს ეს სამუშაოები, ამისათვის წინასწარ აწარმოებენ საინჟინრო გეოლოგიურ გამოკვლევებს.

კლდოვან ქანებს მიეკუთვნება ამორფული, მეტამორფული და დანალექი ქანები, რომლებსაც წყლით გაჯერებულ მდგომარეობაში აქვთ არანაკლებ 50 კგ/სმ<sup>2</sup> სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე. ყველა ამ ქანის მოკლე დახასიათება მოცემულია სახელმძღვანელოში.

გრავიტაციული კაშხლები შეიძლება ვაშენოთ აგრეთვე სუსტ კლდოვან გრუნტებზე (მათ შორის ნახევრადკლდოვან ქანებზეც), მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ ეს ქანები გამოირჩევა მნიშვნელოვანი დამყოლობით, ძვრაზე დაქვეითებული წინაღობით, წყლისაგან დარბილების უნარით და სხვა. მათ მიეკუთვნებიან სხვადასხვა თიხოვანი დანალექები ძლიერ გამკვრივებული თიხებიდან (არგილიტებიდან) თიხნარებიდან, ალევრიტებიდან და კაჟოვანი თიხებიდან დაწყებული ოპოკებამდე და მერგელებამდე ჩათვლით.

კაშხალის მშენებლობის დაწყების წინ საჭიროა მომზადდეს მისი ფუძე. ამისათვის აუცილებელია მოცილებულ იქნას ზედა ფენები – მეოთხეული დანალექი ან საერთოდ ფენები, რომლებმაც გამოფიტვის შედეგად განიცადეს დაშლა. ამ სამუშაოთა ჩასატარებლად შეიძლება საჭირო გახდეს დიდ სიღრმეზე ჩასვლა, რომელიც ზოგჯერ ათეული მეტრობით ითვლება. მაგალითად, შვეიცარიაში შრეს კაშხალის ძირი მოთავსებულია მდინარის



კალაპოტის ფსკერიდან 44,5 მ. სიღრმეზე, ხოლო აშშ-ებში პარკერის კაშხალის ძირი დაახლოებით 70 მეტრ სიღრმეზე.

როდესაც კლდოვან ფუძეში გამოვლინებულია დასუსტებული ქანების სიღრუეები და ბუდეები, განიერი ბზარები და ნაპრალები, მაშინ აუცილებელია წყლის ჭავლით, შეკუმშული ჰაერით ან სხვა საშუალებებით მოცილებულ იქნეს მათი შემავსებელი რბილი მასალა, ხოლო შემდეგ გაწმენდილი სიცარიელები დაბეტონდეს.

თანამედროვე სამშენებლო ტექნიკის პირობებში, არც თუ ისე იშვიათად წარმოებს ნაგებობათა ფუძეების ხელოვნური განმტკიცება სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებით. ძლიერ დაბზარული და დასუსტებული კლდოვანი ფუძეების განმტკიცებისათვის ფრიად ეფექტური საშუალებაა მთლიანი ანუ ფართობრივი ცემენტაცია. იგი წარმოებს ჭაბურღილების ქსელის საშუალებით, რომლითაც თანაბრად იფარება კლდის მთელი ფართობი კაშხალის საძირკვლის ქვეშ. ცემენტის ხსნარის ჭირხვნა წარმოებს კაშხალის საძირკვლის ნაწილის ბეტონის ფენიდან, რომელიც წინასწარ ეწყობა ფუძეზე. ჭაბურღილის სიღრმე დამოკიდებულია ბზარების გავრცელების სიღრმეზე, რომელიც ჩვეულებრივ ცვალებადობს 5-15 მეტრის ფარგლებში. ფართობრივი ცემენტაცია მაშინ არის მიზანშეწონილი, თუ იგი უფრო იაფი ჯდება, ვიდრე დასუსტებული კლდის მოცილება.

კაშხალისა და კლდოვანი ფუძის საიმედო დაკავშირების უზრუნველსაყოფად საჭიროა დაბეტონების წინ ფუძე გაიწმინდოს წყლის ან ქვიშანარევი წყლის ჭავლის (ზოგჯერ შეკუმშული ჰაერის) და ლითონის ჯაგრისების დახმარებით. ბუნებრივია, რომ კლდოვანი ფუძის ზედაპირი უნდა იყოს ჯანსაღი არ გააჩნდეს ბზარები და მსხვილი შვერილები. ამ მიზნით კლდის თხრილის უკანასკნელი ფენა (0,6-0,8 მ) მოცილებული უნდა იქნეს არა აფეთქებით, არამედ ხელის იარაღების გამოყენებით.

როდესაც ნაგებობათა ფუძეები წარმოდგენილია ფიქლებით, ოპოკებით არგილიტებით ან სხვა ანალოგიური ქანებით, მაშინ მათი დამუშავება უნდა მოვახდინოთ გარკვეული წესის დაცვით, გახსნის შემდეგ ეს ქანები სწრაფად იშლება ჰაერზე, ამიტომ მათი გახსნა უნდა მოხდეს უშუალოდ

კაშხალის დაბეტონების წინ. ასევე უნდა გაიწმინდოს ქანები გადახლართული კირქვებთან და ქვიშა ქვებთან. დაბეტონების დაყოვნების შემთხვევაში, ცხადია გაშიშვლებული ქანები დროებით უნდა დავიცვათ რაიმე საშუალებით, მაგალითად, ასფალტის ფენის მოწყობით.

### გრავიტაციული კაშხლების მასალები

ჰიდრომშენებლობაში ბეტონის გამოყენებამდე (მე-20 ს. დასაწყისამდე) გრავიტაციული კაშხლების მშენებლობას აწარმოებდნენ ქვის ყორული წყობით ცემენტის ხსნარზე. თანამედროვე გრავიტაციული კაშხლების ძირითად მასალას წარმოადგენს ბეტონი, რომელიც ზოგჯერ ნაწილობრივ არმირდება. ბეტონს მრავალი უპირატესობა გააჩნია: იგი საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნეს სამუშაოთა ფართო მექანიზაცია და მის საფუძველზე განხორციელდეს მშენებლობის მაღალი ტემპი, შესრულდეს სხვადასხვაგვარი ფორმის ნაგებობანი და სხვა.

კაშხალმშენებლობაში გამოყენებული ბეტონის უარყოფით მხარეებად უნდა ჩაითვალოს ცემენტის გაცილებით მეტი ხარჯი და ფილტრაციული წყლის გავლენით დეზინტეგრაციული (დაშლის) შესაძლებლობა, რომელიც განსაკუთრებით ძლიერდება შეკლებისა და ტემპერატურული ბზარების გაჩენის შემთხვევაში.

გრავიტაციული კაშხლებში ბეტონი უნდა იყოს ა) საკმარისი სიმტკიცის; ბ) პრაქტიკულად შესაძლო წყალშეუღწევი, გ) მონოლითური და დ) ხანგამძლე, ე.ი. მრღვევი (დამშლელი) ფაქტორებისადმი – ყინვის, წყლის ქიმიური მოქმედების გამოფიტვისა და გაცვეთისადმი მედეგი. ამ მოთხოვნილებათა დაკმაყოფილება შეიძლება მიღწეულ იქნას ბეტონის შედგენილობის სათანადო შერჩევით და მისი დამზადებისა და წყობის წესების დაცვით.

ბეტონის წყალშეუღწეობას და ყინვამედეგობას აღწევენ ხისტი ბეტონის დამზადებით, რომლის მისაღებად იყენებენ საკმარისი რაოდენობის შესაბამისი მარკის ცემენტებს. წყალცემენტის ფარდობის (წ/ც) მცირე მნიშვნელობის დროს. სასურველია, რომ კაშხალის წყალქვეშა ნაწილებისათვის

წ/ც სიდიდის მნიშვნელობა, არ აღემატებოდეს  $0,55 \pm 0,60$ , ხოლო გარე ნაწილებისათვის  $0,50-0,55$ .

მოთხოვნილება, მონოლითურობის ე.ი. ბეტონში ბზარების არ არსებობის შესახებ ყველაზე მეტად კმაყოფილდება მცირე რაოდენობის ცემენტის გამოყენებით, მისი დაბალი და საშუალო აქტიურობით, აგრეთვე მცირე ეგზოთერმულობით, როდესაც ამასთანავე დაცულია დაბეტონების სპეციალური ტექნოლოგია.

**ჰიდროტექნიკური ბეტონის სახეობები.** მოქმედი ნორმებითა და ტექნიკური პირობებით ბეტონებისათვის დადგენილია შემდეგი კლასები:

1. კუმშვაზე ნიმუშის სიმტკიცის ზღვარის მიხედვით ( $\text{კგ/სმ}^2$ ) რვა კლასის: 75; 100; 150; 200; 250; 300; 400 და 500; დაბალი კლასის ბეტონები გამოიყენება ნაკლებ საპასუხისმგებლო ნაგებობაში და კონსტრუქციებში. როგორც წესი სიმტკიცის მიხედვით კლასს ადგენენ ბეტონის 180 დღის გავლის შემდეგ.

2. წყალშეუღწევადობის მიხედვით – ხუთი კლასის: B-2; B-4; B-6; B-8; B-12, რომლებიც დადგენილია 180 დღის ბეტონის ნიმუშებისათვის (ციფრები გვიჩვენებენ წყლის მაქსიმალურ წნევას  $\text{კგ/სმ}^2$ -ში, რომლის დროს ჯერ კიდევ არ შეიმჩნევა გაჟონვა ბეტონის ნიმუშში).

3. ყინვამდეგობის მიხედვით – ხუთი კლასის: MP3 50; MP3 100; MP3 150; MP3 200; MP3 300 (აქ ციფრებით ხასიათდება 28 დღის ხნოვანების ბეტონის ნიმუშების გაყინვისა და გაღობის ციკლების დაყოვნების რაოდენობა, რომელთა განმავლობაში მათი სიმტკიცე მცირდება არაუმეტეს 25 %-ისა).

**ბეტონების შედგენილობა.** ჰიდროტექნიკური ბეტონის დასამზადებლად გამოიყენება სხვადასხვა სახეობის ცემენტი. კაშხალის იმ ნაწილებისათვის, რომლებიც მუდმივად იმყოფებიან წყალქვეშ ან წყლით გაჯერებულ მდგომარეობაში, საჭიროა პირველ რიგში გამოყენებულ იქნეს პუცოლანიანი პორტლანდ ცემენტი ან წიდაპორტლანდცემენტი, ბეტონისათვის, რომელიც იმყოფება ცვალებადი დატენიანების ზომაში – სულფატომედეგი ან პლასტიფიცირებული ანდა ჰიდროფობური პორტლანდცემენტი;

ბეტონისათვის, რომელიც მუდმივად იმყოფება წყლის ზემოთ – პლასტიფიცირებული და ჰიდროფობური პორტლანდცემენტი.

პლასტიფიცირებული ცემენტების დამზადება წარმოებს პორტლანდ-ცემენტის კლინკერის, თაბაშირის და მაპლასტიფიცირებელი დანამატის – სულფატ-სპირტის კონცენტრატის ერთობლივი დაფქვით.

გრავიტაციულ კაშხლებში, რომელთა კონსტრუქციების სისქე ჩვეულებრივ დიდია (2,5 მ-ზე მეტი). ცემენტს წაყენება სითბოს მცირე რაოდენობით გამოყოფის მოთხოვნილება. არაუმეტესი 50 კალ/გ, 3 დღის და 60 კალ/გ – 7 დღის განმავლობაში.

ბეტონის გამაგრების დროს სითბოს გამოყოფის (ეგზოთერმიის) შემცირების მიზნით, საჭიროა მისი ნარევების დაპროექტებისას მიღებული იქნას ცემენტის მინიმალურ ხარჯი. ამჟამად ბეტონის კაშხლებისათვის დადგენულია ცემენტის ხარჯის შემდეგი ზღვრები: შავი ზონებისათვის 160 კგ/მ<sup>3</sup>; სამირკვლის ნაწილებისათვის 230 კგ/მ<sup>3</sup>; ყრუ კაშხლების კედლებისათვის 240 კგ/მ<sup>3</sup>. წყალსაგდები კაშხლების გარე ზონებისა და თხემისათვის 260 კგ/მ<sup>3</sup> და წყლის დონის ცვალებადი ზონებისათვის – 275 კგ/მ<sup>3</sup>.

გრავიტაციული კაშხლების მშენებლობის დროს გამოიყენება აგრეთვე ციკლოპური ბეტონები (ხდება დიდი მოცულობა ქვების შეტანა – 4 მ<sup>3</sup>-მდე. წყობის მთელი მოცულობის 60-70%). ასეთი წყობა მნიშვნელოვნად ამცირებს როგორც ცემენტის (100 კგ/მ<sup>2</sup>-მდე) და ღორღის ხარჯს. ასევე ეგზოთერმულ მოვლენებსაც.

კაშხალის პროფილის ცალკეულ ნაწილებში ბეტონი განიცდის სხვადასხვა ფიზიკურ მექანიკურ ზემოქმედებას და იმყოფება დაძაბულ მდგომარეობაში, ამიტომ ცემენტის ეკონომიისათვის საჭიროა მასში გავითვალისწინოთ სხვადასხვა კლასის ბეტონის ზონალური განლაგება. სადაწნეო წახნაგის მხარეზე, ფუძესთან ეწყობა წყალშეუღწევი ბეტონი. ქვედა წახნაგზე და თხემზე – ყინვამედეგი. წყალსაშვებ ზედაპირზე – ცვეთაზე მედეგი ბეტონი. სიმტკიცის მიხედვით კაშხლის პროფილის ზედა

ზონაში ეწყობა უფრო დაბალი კლასის ბეტონები, ხოლო ქვედა ზონაში – უფრო მაღალი კლასის – დამაბულობის მდგომარეობის შესაბამისად.

ბზარების წარმოქმნის საწინააღმდეგო ღონისძიებებიდან შემუშავებულია და პრაქტიკაში დანერგილია ბლოკებად დაყოფის სამი ხერხი:

- ა) ვერტიკალური გრძივი ნაკერების გადაბმით;
- ბ) სვეტოვანი;
- გ) სექციური.

### **გრავიტაციული კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე**

გრავიტაციული კაშხლის არაკლდოვანი ფუძე შეიძლება წარმოდგენილი იქნას შეუკვრელი და შეკრული გრუნტებისაგან. უკანასკნელ შემთხვევაში გრუნტები ხასიათდება ნაწილებს შორის შეჭიდულობით.

შეუკვრელ (კენჭნარ: ხრეშიან, ქვიშიან და მათ ნარევ) გრუნტებს აქვს ისეთი ზიდვისუნარიანობა, რომელიც საკმარისია მათზე 20-40 მ-მდე ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების ასაგებად.

შეკრულ გრუნტებს მიეკუთვნება სხვადასხვა სიმკვრივის თიხები, თიხნარები და ლამები.

ფუძის გრუნტსა და გრავიტაციული კაშხლის ბეტონს შორის არ დაიშვება ფილტრაციის შემსუბუქებული გზები. ამიტომ ნაგებობის ქვეშ არ უნდა გაკეთდეს ღორღის ან ხრეშია საგები. ამავე თვალსაზრისით საჭიროა მუდმივი გამჭოლი დეფორმაციული ნაკერების ისეთნაირი დაკონსტრუირება, რომ მეზობელი სექციების არაერთნაირი დაჯდომის დროს არ წარმოიქმნას კონტაქტური ფილტრაცია.

გრავიტაციული კაშხლის ფუძის მომზადების ხასიათის არჩევა წარმოებს გრუნტების გვარეობის, გრუნტის წყლების არსებობის და სამუშაოთა წარმოების პირობების შესაბამისად.

გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუქციული თავისებურებანი არაკლდოვან ფუძეზე არის ის, რომ ამ ტიპის კაშხლები არის წყალსაშვიანი, საშვების ყრუ ნაწილს ადგილობრივი მასალისაგან აგებენ. წყალსაშვების მოხაზულობას განსაზღვრავენ ძვრაზე კაშხლის მდგრადობის პირობები და საკეტების ტიპი მნიშვნელოვნად ეკონომიური პროფილი მიიღება მაშინ,

როდესაც კაშხალს აქვს ვერტიკალური სადაწნეო წახნაგი და ზემოთ ბიეფისაკენ განვითარებული საძირკვლის ფილა. რაც უზრუნველყოფს ამ ფილის მიტვირთვას წყლის წონით და ამასთანავე ბეტონის მოცულობის შემცირებასაც.

საქართველოში ყველაზე სრულყოფილი ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი წარმოდგენილია გუმათის ჰიდროელექტროსადგურის ენერგეტიკულ ჰიდროკვანძში.

## თავი 2. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშება სიმტკიცეზე

ჰიდროტექნიკური ნაგებობათა გაანგარიშება სიმტკიცეზე, ერთ-ერთ ურთულეს ამოცანას წარმოადგენს. რამდენადაც უფრო სწორად არის განსაზღვრული მასალის ან კონსტრუქციის სიმტკიცე, იმდენად უფრო მეტი დროის განმავლობაში არ ემორჩილება რღვევას. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სიმტკიცეზე გაანგარიშების დროს დიდი მნიშვნელობა აქვს გაანგარიშების მეთოდის არჩევას.

სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა შემადგენლობის რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით, რომელიც იძლევა საშუალებას დატვირთვების ზემოქმედებისას დავადგინოთ ბზარის სიგრძე, სიგანე, სიმტკიცე, სიხისტე, დეფორმაციულობა და ხანგამძლეობა.

ნებისმიერი კონსტრუქციის ბზარმედევობისა და ხანგამძლეობის ამაღლება არის უპირველესი ამოცანა, ამდენად ჰიდრონაგებობები, როგორც მეტად საპასუხისმგებლო, აუცილებლად უნდა იქნას შემოწმებული ბზარმედევობის პირობების დაცვით.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები გაანგარიშებულ უნდა იქნეს დატვირთვებისა და ზემოქმედების ძირითად და განსაკუთრებულ შეხამებაზე. ძირითად შეხამებაში შედის მუდმივი, დროებითი, ხანგრძლივი და ხანმოკლე დატვირთვები და ზემოქმედებები. განსაკუთრებულ შეხამებაში შედის მუდმივი, დროებითი ხანგრძლივი, ხანმოკლე და ერთი განსაკუთრებული დატვირთვა ან ზემოქმედება.

დატვირთვა ან ზემოქმედება მიღებულია ყველაზე არახელსაყრელი, მაგრამ განსახილველი საანგარიშო შემთხვევისათვის რეალური შეხამება ცალცალკე სამშენებლო და ექსპლოატაციის პერიოდებისა და საანგარიშო სარემონტო შემთხვევისათვის.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში რკინაბეტონი ძირითად სამშენებლო მასალას წარმოადგენს. მას აქვს მაღალი სიმტკიცე, ექსპლოატაციის

ხანგრძლივობა, ის კარგად მუშაობს აგრესიულ გარემოში მყარდება წყლის ქვეშ, ტემპერატურამდეგია. შესაძლებელია დამზადდეს სხვადასხვა ტიპის კონსტრუქციები და სხვა მრავალი.

რკინაბეტონის ელემენტების და შენობა-ნაგებობების რღვევის პროგნოზირებისას: ა) პროექტირების სტადიაში გადაიჭრა გამოყენებული მასალების ხანგამძლეობა, შეირჩა მასალები განსაკუთრებული თვისებებით და ბ) დადგინდა კონსტრუქციების რღვევის მომენტის დრო, ე.ი. ხანგამძლეობის შესაძლებლობა, უფრო გასაგები რომ იყოს დადგინდა რღვევის ალბათური დროის ინტერვალი.

რკინაბეტონის ელემენტების რღვევის პროგნოზირება დამყარებულია რღვევის პროცესის რიცხობრივ ანალიზზე, რომელშიაც გათვალისწინებულია კონსტრუქციული და საექსპლოატაციო ფაქტორები, ასევე მიკრო და მაკრო ბზარების გავრცელების კინეტიკა.

ბეტონში არსებული ყველა ფორები შეიძლება განვიხილოთ, როგორც სტრუქტურის ბზარწარმომქმნელი დეფექტი, რომლის მეშვეობით შესაძლებელია დავადგინოთ ფორების წვერზე დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და ძაბვების ინტენსივობა.

როგორც აღვნიშნეთ რკინაბეტონის ელემენტების და შენობა-ნაგებობების რღვევის მთავარი მიზეზია დრო; დატვირთვა არ წარმოადგენს პრიორიტეტს რღვევისას, ფიზიკური დასაბუთებით დროის კრიტერიუმები არის მთავარი ანუ ელემენტის რღვევა დამოკიდებულია დროსთან.

კონსტრუქციების სიმტკიცე წარმოდგენილია როგორც სიდიდე რომელიც დროის პერიოდში უზრუნველყოფს მის უსაფრთხო ექსპლოატაციას, რომლის დროსაც უწყვეტად მიმდინარეობს მომზადება ბეტონის მთლიანობის დარღვევისათვის, სტრუქტურის მაკრო დეფექტების გავრცელებისათვის, რაც შესაძლებელს ხდის დროის გარკვეული მონაკვეთის შემდეგ კონსტრუქციის მთლიან რღვევას.

ბეტონისა და რკინაბეტონის რღვევა მიმდინარეობს საკმაოდ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, მაქსიმალურ დატვირთვაზე ბევრად ნაკლები ზემოქმედებისას. ეს პროცესი შეიძლება დავახასიათოდ, როგორც



ბეტონის დაძველება, რომელსაც მივყავართ რღვევამდე. ე.ი. დროის განმავლობაში ბზარის სიგრძე საწყისი  $l_{crc}$ -დან მიაღწევს კრიტიკულ სიდიდეს  $l_{crc}^{cr}$ -ს.

ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ რკინაბეტონის ელემენტების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა დამოკიდებულია ბეტონსა და არმატურაში ძაბვის სიდიდეზე. ელემენტის კვეთში წარმოიქმნება ნორმალური, კვეთის მართობულად და განივი ძვრის ბზარები, რომელიც დომინირებულ გავლენას ახდენენ ამტანუნარიანობაზე და იწვევს მის რღვევას.

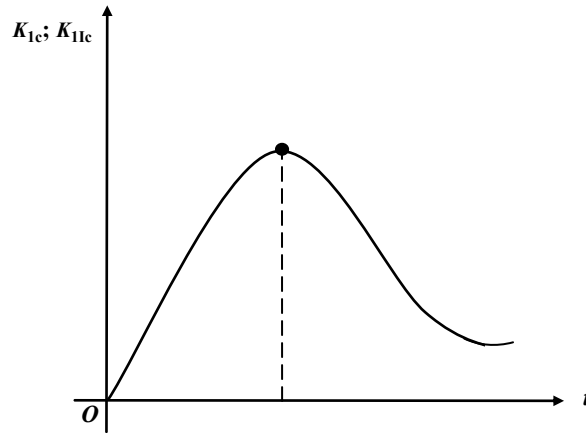
ასევე ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ბეტონის სიმტკიცე დროში იზრდება, მაგრამ პრაქტიკულად არ ახდენს გავლენას ხანგამძლეობაზე. ცდებით დადგენილია, რომ კონსტრუქციის ხანგრძლივი სიმტკიცე მცირეა ხანმოკლეზე, ეს აიხსნება იმით, რომ ბზარმდეგობის მახასიათებლები  $K_{Ic}$ ;  $K_{IIc}$  მცირდება დროში, რაც გამოწვეულია რელაქსაციით. ბეტონის გამყარების პირველ პერიოდში ხდება ბეტონის სტრუქტურის სტაბილიზაცია, ჩნდება ტექნოლოგიური ბზარები და ფორები, რომლის წვერზე ხდება ძაბვების კონცენტრაცია, ძაბვები აღწევენ კრიტიკულ სიდიდეს, ბზარმდეგობის პარამეტრები კი ზღვრულ მნიშვნელობას, იწყება რღვევა.

ხანგამძლეობის გაანგარიშების ძირითად კრიტერიუმს წარმოადგენს წამური ბზარმდეგობის პარამეტრები დროში:

$$K_c = \sqrt{(K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2)}.$$

რკინაბეტონი განიხილება, როგორც დრეკადი ორკომპონენტიანი არე, რომელიც შედგება ცემენტის, წყლის, ქვიშის და მსხვილი შემავსებლისაგან, სიცარიელების, კაპილარული ბზარების და ფორებისაგან, რომლის წვერზე ხდება ძაბვების კონცენტრაცია, ბზარის გაზრდას ხელს უწყობს  $G_{II}$  ენერგია და ძაბვების ინტენსივობის კოეფიციენტი  $K_{II}$ , რომელიც ტოლია

$$K_{II} = \sqrt{G_{II} \cdot E_{II}}.$$



ნახ. 9. ბზარმედგობის პარამეტრების ცვლილება დროში

რკინაბეტონის ელემენტების ბზარმედგობის მახასიათებლად, როდესაც კვეთში წარმოიქმნება მაგისტრალური ბზარები, მიღებულია ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი  $K_{11c}(\tau)$ , რომელიც განიხილება, როგორც ალგებრული ჯამი ბზარის სიცარიელების დონეზე.

ბეტონის და რკინაბეტონის ხანგრძლივობაზე გავლენას ახდენს, ასევე ტემპერატურული, ტენიანი და კოროზიული გარემოს ხანგრძლივი ზემოქმედება. ისინი ქმნიან ძაბვების კონცენტრაციის არეს ბზარის წვერზე. გაანგარიშებაში. ეს ზემოქმედება მიღებულია (39) ფორმულით

$$K_{1c} = K_{1c}(\tau_2) \cdot D, \quad (39)$$

სადაც  $D$  – ითვალისწინებს ელემენტებზე გარემოს გავლენის ზემოქმედებას ბეტონის დაძველების თეორიის მიხედვით.

ბეტონისა და რკინაბეტონის ბზარიანი ელემენტების რღვევის პროცესი განიხილება, როგორც განზოგადოებული დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა, რომელიც დამახასიათებელია, როგორც კომპოზიტის დრეკადპლასტიკური თვისება, დადასტურებულია მრავალი ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების ანალიზით, სხვადასხვა ზომის ნიმუშების გამოცდისას.

ბეტონისა და რკინაბეტონის ელემენტებისათვის დეფორმაციისა და სიმტკიცის მახასიათებლები გამოითვლება გამოსახულებით:

$$\sum N_{ac1} - \sum N_{reac1} = R_1,$$

სადაც  $\sum N_{ac1}$  – შიგა ძალებით წარმოქმნილი ძაბვა;

$\sum N_{reac1}$  – გარემოს გავლენით (ტემპერატურა, ტენიანობა, კოროზია-მედეგობა) შექმნილი ძაბვა;

$R_1$  – საწყისი ძაბვის სიდიდე.

მე მინდა კიდევ ერთხელ ხაზი გავუხვა ჩვენს მიერ არჩეული თემის მიზანს, რომელიც გულისხმობს ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რკინაბეტონის ელემენტების ხანგამძლეობის დადგენას, გაანგარიშება დაპროექტებისას, რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით.

მრავალი ჩატარებული ექსპერიმენტიდან ირკვევა, რომ ჰიდროტექნიკური ნაგებობების რღვევის ძირითადი მიზეზი არის კონსტრუქციების კვეთებში არსებული დეფექტები (ბზარები) და დრო.

ყოველივე ზემოთნათქვამიდან გამომდინარე შეგვიძლია დავასკვნათ შემდეგი:

1. ჰიდროტექნიკური შენობა-ნაგებობების ხანგრძლივობის დადგენა უნდა მოხდეს კონსტრუქციებში არსებული ბზარების, ბზარის სიგრძის და მისი გავრცელების კინეტიკის გათვალისწინებით.
2. მკაცრად უნდა იქნას დაცული პირობა რკინაბეტონის შემადგენელი ნაწილების ბეტონის და არმატურის ბზარმედეგობაზე გაანგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით.
3. დაცული უნდა იქნას ბეტონის შემადგენლობა, შემკვრელი, წყალი, წვრილი და მსხვილი შემავსებლის რაოდენობა, წყალ-ცემენტის ფარდობა.

ზემოთჩამოთვლილი პუნქტების გათვალისწინება საშუალებას მოგვცემს დავაპროექტოთ და ავაშენოთ ხანგამძლე და საიმედო ჰიდროტექნიკური ნაგებობები.

თემის ძირითად მიზანთან ერთად განხილულია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა გაანგარიშება-შესწავლა მისი განვითარების სხვადასხვა ეტაპზე.

ცნობილია, რომ ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მუშაობენ რთულ ბუნებრივ პირობებში შეგუბებულ ან მდინარის წყლის დინების ზემოქმედებაზე, რომელიც მათზე ახდენს ფიზიკურ-ქიმიურ, მექანიკურ და ბიოლოგიურ მოქმედებას.

წყლის მექანიკური მოქმედება ნაგებობებზე ვლინდება ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების სახით და ძირითად დატვირთვებს წარმოადგენენ.

ცალკეულ შემთხვევებში ნაგებობები გაანგარიშებულია იმ დატვირთვებზე, რომელთაც ადგილი აქვს მშენებლობის პერიოდში, შეკეთების დროს, ნაგებობათა გამოცდისა და ექსპლოატაციის პერიოდში. ხშირად საჭირო ხდება ნაგებობათა შემოწმება მოსალოდნელი გაუთვალისწინებელი წყლის წნევის ზემოქმედებაზე, რომელიც ექსპლოატაციის დროს შეიძლება შეიქმნას.

რკინაბეტონის თეორია საანგარიშო შეფასებას იძლევა დაგეგმილ ვადაში კონსტრუქციების გამოყენებას დატვირთვების ნებისმიერ ზემოქმედებაზე, მდგომარეობის შეფასებას, რომელსაც საფუძვლად უდევს ექსპერიმენტული და თეორიული გამოკვლევები.

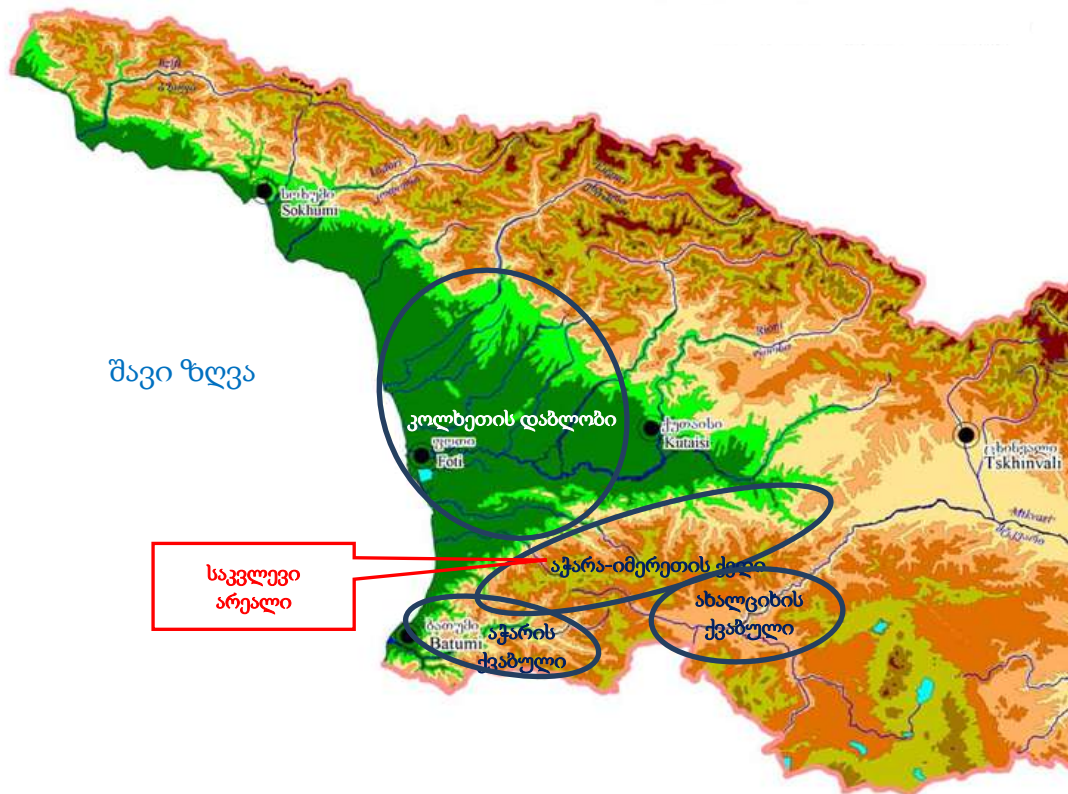
საინჟინრო ჰიდროტექნიკური კონსტრუქციები მიეკუთვნება ნაგებობებს, რომელთა გეომეტრიული ზომები განსაზღვრულია გაანგარიშებით სიმტკიცეზე, მდგრადობაზე, ბზარმდეგობასა და დეფორმაციაზე და გათვალისწინებულია სხვადასხვა სახის დატვირთვების ზემოქმედებაზე.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციები ძირითად სამშენებლო მასალას წარმოადგენს სხვადასხვა სახის საინჟინრო, სამრეწველო და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობისას. რადგან აქვს დიდი სიმტკიცე, ხანგანძლეა, ცეცხლგამძლე და წყალგაუმტარია. მისგან შეიძლება დამზადდეს სხვადასხვა ფორმის კონსტრუქციები და არ საჭიროებს მნიშვნელოვან საექსპლუატაციო ხარჯებს.

ჩვენს მიერ არჩეული თემის მიხედვით: „რღვევის მექანიკის თეორიის გამოყენებით“ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების მაგალითებს სადისერტაციო ნაშრომის შემდეგ თავებში განვიხილავთ.

## 2.1. საკვლევი არეალი

ფიზიკურ-გეოგრაფიული დარაიონების მიხედვით საკვლევი არეალი განლაგებულია აჭარა-იმერეთის ქედის ჩრდილო ფერდობის დასავლეთი ნაწილის (იხ. რუკა (ნახ. 10)).



ნახ. 10. საქართველოს ფიზიკური რუკა

### გეომორფოლოგიური პირობები

აჭარა-იმერეთის ჩრდილო ფერდობის რაიონის ფიზიკურ-გეოგრაფიული თავისებურება მდგომარეობს საშუალომთიან ეროზიულ რელიეფში, ლოკალური ძველი გამყინვარების ნიშნებით; უხვ ატმოსფერულ განესტიანებაში (განსაკუთრებით დასავლეთ ნაწილში).

#### მდ. ნატანების ხეობის გეომორფოლოგია

მდ. ნატანები სათავეს იღებს აჭარა-იმერეთის ქედის ჩრდილო კალთაზე 2560 მ სიმაღლეზე და შავ ზღვის ერთვის სოფ. შეკვეთილთან. წყალშემკრები აუზი განლაგებულია აჭარა-იმერეთის ქედის ჩრდილო

ფერდობის დასავლეთ ნაწილში და შემოსაზღვრულია მდ. სუფსის წყალშემკრები აუზით ჩრდილოეთის მხრიდან და მდ. კინტრიშის წყალშემკრები აუზით სამხრეთის მხრიდან. აუზის ფორმა ასიმეტრიულია, სიგრძით 63 კმ, სიგანით 22 კმ, აუზის საშუალო სიმაღლე 830 მ-ს შეადგენს.

აუზის ზედა ნაწილი მთიანი ხასიათისაა, მაღალ სიმაღლეებზე განლაგებული მოვაკებული ზედაპირებით და მრავალრიცხოვანი შენაკადების ღრმად ჩაჭრილი ხევებითა და ხეობებით. აჭარა-იმერეთის წყალგამყოფი ქედის თხემური ხაზი მაღალ სიმაღლეებზეა განლაგებული (აღსანიშნავია მწვერვალები ხინო – 2599 მ, თაგინაური – 2668 მ, საყორნია – 2755 მ). ქედები მკვეთრად დაქანებულია მდინარის ხეობისაკენ ზ.დ. 400-600 მ-მდე. ფერდობების მნიშვნელოვანი დაქანება განაპირობებს მდ. ნატანების და მისი შენაკადების მაღალ ვარდნას და მღვრიე დინებას.

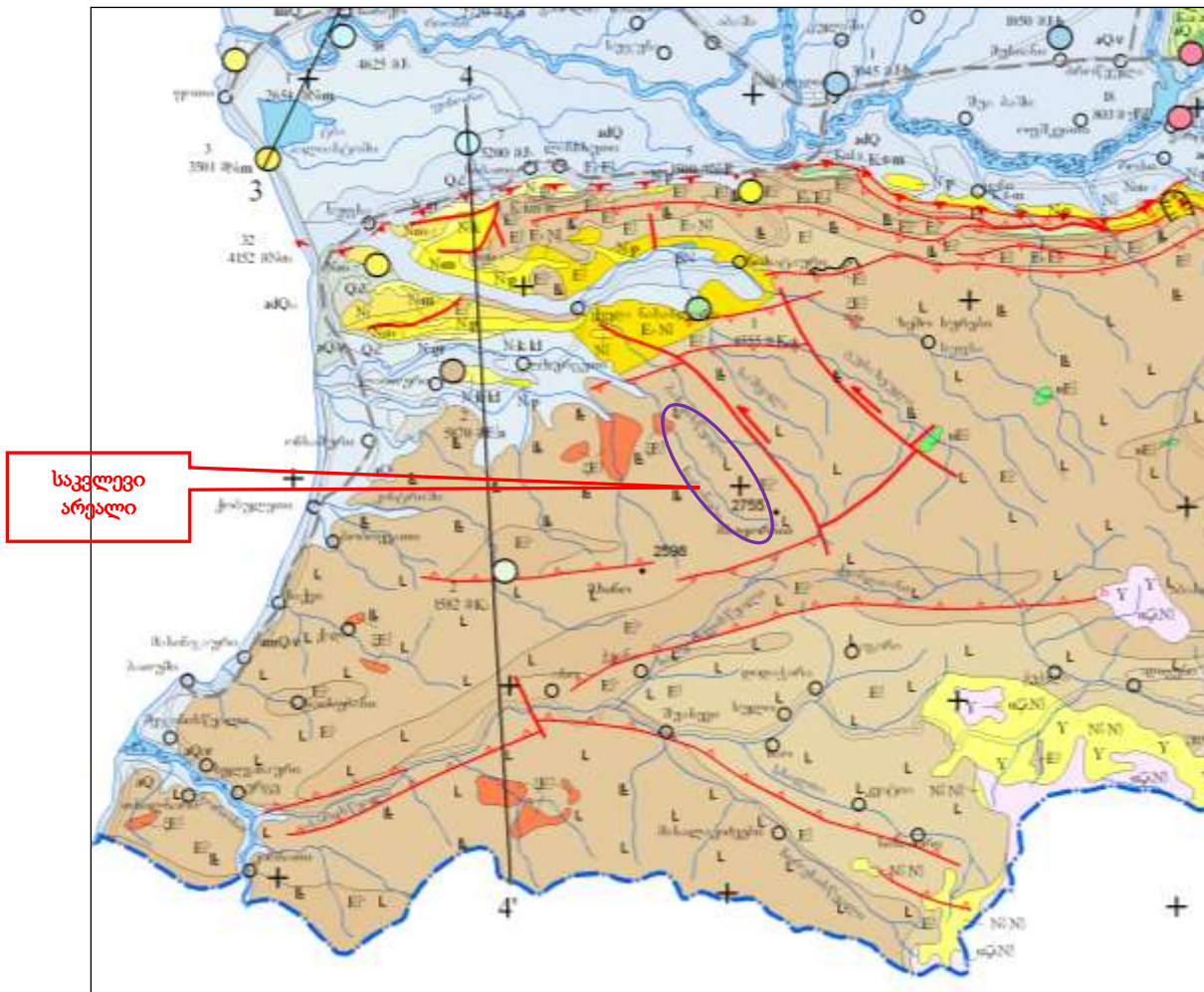
სოფ. ვაკიჯვრის ქვემოთ მდინარე მოედინება ნატანების მთისწინა ქვაბულში, რომელსაც დაჭაობებული ზედაპირი გააჩნია. მდინარის ხეობა მის მთელ სიგრძეზე იცვლის ფორმას და უმეტესად ტრაპეციულია. მისი სიგანე 250 მ-დან 1,5 კმ-მდე აღწევს. ტერასები კარგად არის გამოხატული, გაუყვებიან მდინარის ორივე ნაპირს და სიგანე შეადგენს 400-1000 მ-ს. საფეხურების სიმაღლე 2,5-5 მ-ია, ზედაპირი სწორი. ნაპირების სიმაღლეა 0,2-0,8 მ.

### **გეოლოგიური აგებულება**

აჭარა-იმერეთის ქედის ჩრდილო ფერდობის ფიზიკურ-გეოგრაფიული რაიონი უმთავრესად აგებულია პალეოგენური წყებებით, ვულკანოგენური წარმოშობისაა. რაიონის თითქმის მთელ სიგრძეზე ფართო ზოლად გავრცელებულია მტკიცე ქანები, რომელიც აჩენს კლდოვან რელიეფს და მიდრეკილია კლდეზვავებისაკენ.

ჩაქვი-სუფსის ფარგლებში გვხვდება ცარცული კირქვები, რომელიც ნატანებისა და ბჟუჟის ხეობებში, ეროზიის მიერ არის გაშიშვლებული სოფ. ვაკიჯვრის ზემოთ.

საკვლევი არეალის ზოგადი გეოლოგიური რუკა მოცემულია ნახაზზე 11.



ნახ. 11. აჭარა-გურიის რეგიონის გეოლოგიური რუკა

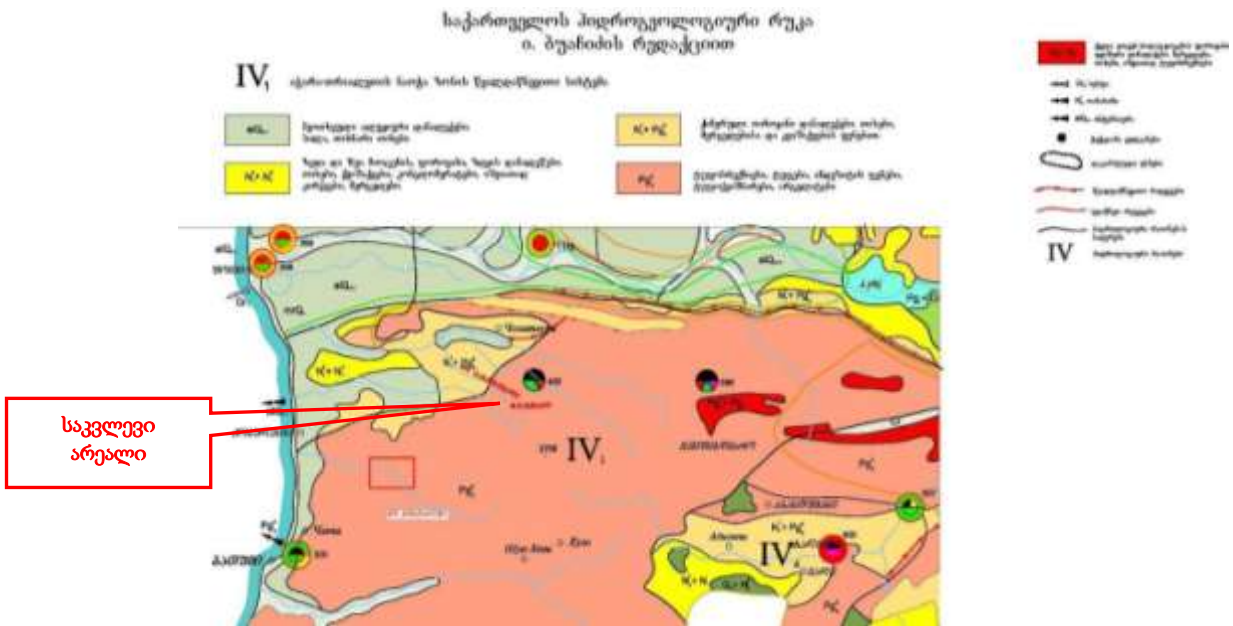
### მდ. ნატანების ხეობის გეოლოგიური აგებულება

მდ. ნატანების წყალშემკრები აუზის გეოლოგიურ აგებულებაში მონაწილეობას იღებს სიენიტები, დიორიტები და ანდეზიტ-ბაზალტური ლავები. აღნიშნული ნალექები შედარებით ფართო გავრცელებით სარგებლობენ ხეობის მთიან ნაწილში. ხეობის ქვედა ნაწილში ძირითადად გავრელებულია ალუვიური ნატანი, რომლებიც შედგება კაჭარის, თიხის, ქვიშისა და შლამისაგან.

### ჰიდროგეოლოგიური პირობები

ჰიდროგეოლოგიური დარაიონების მიხედვით (ი.მ. ბუაჩიძე) საკვლევი არეალი მიეკუთვნება აჭარა-იმერეთის ქედის ნაპრაღური

წყლების წყალწნევიან სისტემას (იხ. ნახ. 12), სადაც გაბატონებული გავრცელებით სარგებლობენ არალრმა ცირკულაციის ნაპრალორი გრუნტის წყლები.



ნახ. 12. საქართველოს ჰიდროგეოლოგიური რუკა

მათი წყალუხვობა დამოკიდებულია შემცველი ქანების ნაპრალიანობის ხარისხზე. მიწისქვეშა წყლების ფორმირება ძირითადად ხდება საშუალომთიან ზონაში. მიწისქვეშა ნაპრალოვანი წყლების კვება ძირითადად ატმოსფერული ნალექების და კონდენსაციის ხარჯზე ხდება. მათი დებიტი 0,01-0,3 ლ/წმ შეადგენს. ქიმიური შემადგენლობის მხრივ წყლები ძირითადად ჰიდროკარბონატულ-კალციუმ-ნატრიუმიანია; მინერალიზაცია 0,35 გ/ლიტრი. წყლები არააგრესიულია.

ეს წყლები მტკნარია, ხასიათდებიან დაბალი მინერალიზაციით და კარგი სასმელი თვისებებით.

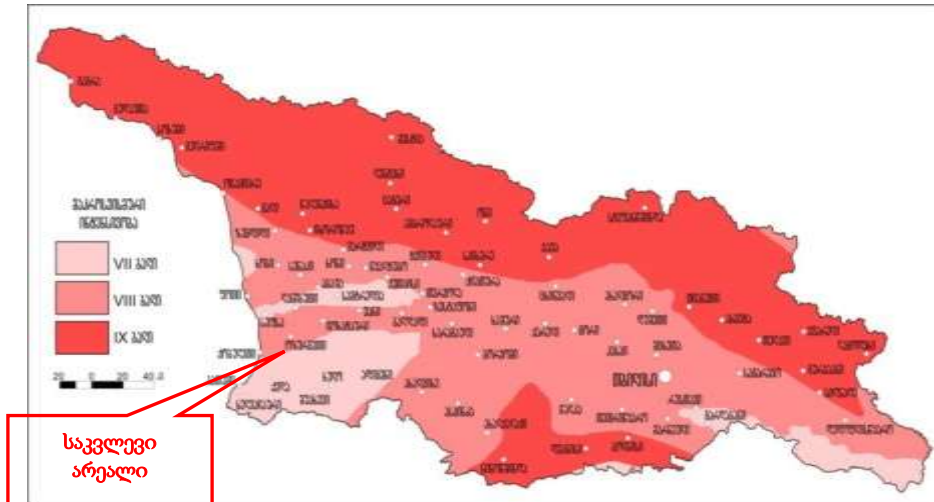
### ტექტონიკა

თანამედროვე ტექტონიკური დანაწევრების სქემის მიხედვით საკვლევი არეალი მიეკუთვნება მცირე კავკასიონის (ანტიკავკასიონი) ნაოჭა სისტემის ჩრდილოეთ ქვეზონას (იხ. ნახ. 13).





ნახ. 14). სოფ. ვაკიჯვარისთვის მიეკუთვნება 8 ბალიან (MSK64) ზონას სეისმურობის უგანზომილებო კოეფიციენტი – A შეადგენს 0,13-ს.



ნახ. 14. საქართველოს სეისმური რუკა

### საკვლევ არეალში გავრცელებული საშიში გეოლოგიური პროცესების ზოგადი მიმოხილვა

საშიში გეოლოგიური პროცესების გამოვლინების, ინტენსიურობის და მათგან გამოწვეული ზარალის სიდიდისა და სახეობების მიხედვით გურიის რეგიონი მიეკუთვნება დაბალი და საშუალო მთიანეთს, სადაც გეოდინამიკური ფონის შექმნაში მონაწილეობენ ეროზიულ გრავიტაციული მოვლენები, ღვარცოფები, მეწყრები და თოვლის ზვავები, რომლებიც მნიშვნელოვან ზიანს აყენებენ ადგილობრივ ინფრასტრუქტურას.

საგრძნობი ზიანი მოაქვს მდინარეთა გვერდით ეროზიას, ღვარცოფებს კლდეზვავებსა და ქვათაცვენას, რომელიც თავმოყრილია ჩოხატაური ბახმაროსა და ჩოხატაური სერების საავტომობილო გზების გასწვრივ.

ბოლო პერიოდში მდინარეების სუფსისა და ნატანების კალაპოტებში შეიმჩნევა ნატანის ინტენსიური დაგროვება, რომელიც ქმნის ე.წ. „მკვდარ“ უბნებს მეანდრებისა და კუნძულების სახით. იწვევს ნაპირების დეფორმაციის პროცესს.

## 2.2. ნატანებ ჰესი გაანგარიშება სიმტკიცეზე

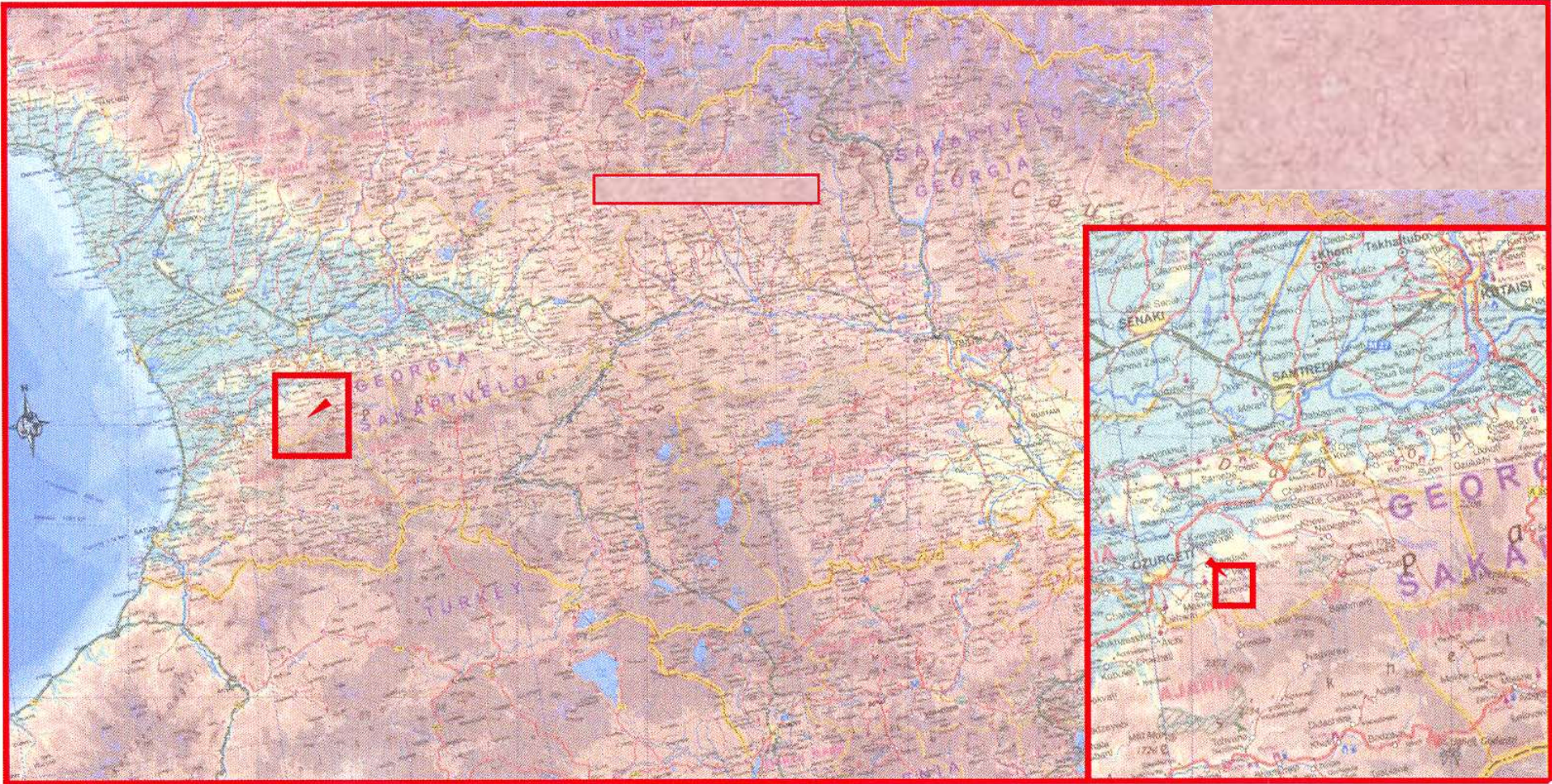
პროექტის მიზანს წარმოადგენს გურიის რეგიონის ოზურგეთის მუნიციპალიტეტში მდ. ნატანებზე მცირე სიმძლავრის (8,4 მგვტ) ჰიდროელექტროსადგურის „ნატანებ ჰესის“ მშენებლობა და ექსპლოატაცია.

ექსპლოატაციაში შესვლის შემდეგ ჰესი ელექტროენერჯის გამომუშავებს მდ. ნატანების წყლის ბუნებრივი ჩამონადენის და საპროექტო სათავე კვანძსა და ძალურ კვანძს შორის არსებული სიმაღლეთა სხვაობის (დაწნევის) გამოყენებით, გამომუშავებული ელექტროენერჯია ჩაერთვება სახელმწიფო ელექტროსისტემაში.

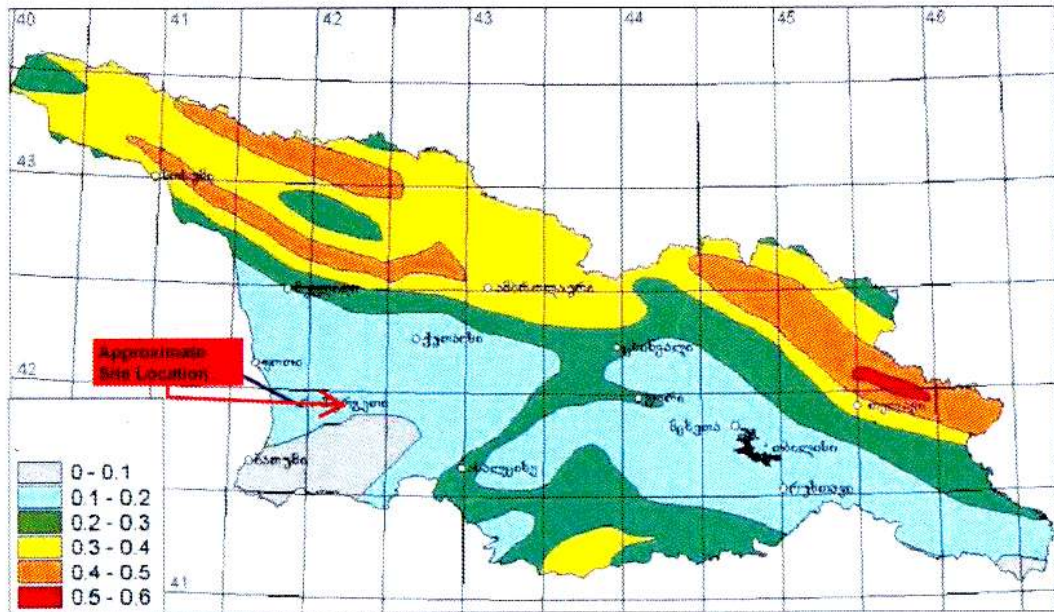
ჰესის მიერ გამომუშავებული ელექტროენერჯის მნიშვნელოვანი ნაწილი განსაკუთრებით დეფიციურ სეზონზე (ზამთრის თვეებში) დიდი ალბათობით ჰიდრორესურსებით ქვეყანაში არსებული მოთხოვნის დაკმაყოფილებას.

ნატანები ჰესი იქნება არარეგულირებადი (წყალსაცავის გარეშე) ბუნებრივ ჩამონადენზე მომუშავე ჰიდროელექტროსადგური. მიუხედავად ამისა, რომ მსგავსი ტიპის ჰესები ელექტროენერჯის მაღალი წლიური გამომუშავებით არ გამოირჩევიან, დიდ კაშხლიან, წყალსაცავიან ჰესებთან შედარებით, მნიშვნელოვანი გარემოსდაცვითი უპირატესობა (ნაკლები ზემოქმედება მიწის საკუთრებასა და გამოყენებაზე, ადგილობრივ კლიმატურ პირობებზე, ბიოლოგიურ გარემოზე, ფიზიკური და ეკონომიკური განახლების დაბალი რისკები და ა.შ.) გააჩნიათ.

გამომდინარე აღნიშნულიდან პროექტი შეგვიძლია მივიჩნიოთ ენერგეტიკულ სექტორში, საქართველოს მთავრობის გრძელვადიანი პოლიტიკის ჰარმონიულ ნაწილად. იგი არ ხასიათდება გარემოზე განსაკუთრებით მაღალი შეუქცევადი ზემოქმედებით. ცალკეულ შემთხვევებში, შესაბამისი შემარბილებელი და საკომპენსაციო ღონისძიებების ეფექტურად გატარების პირობებში, შესაძლებელი იქნება ნეგატიური ზემოქმედების შეფასება.



ნახ. 15. ნატანების ჰესის სიტუაციური გეგმა



ნახ. 16. სეისმური რუკა

დასკვნის სახით შეიძლება ითქვას, რომ იმ შემთხვევაში თუ ჰესის მშენებლობა და ოპერირება განხორციელდა შესაბამისი პირობების მაქსიმალური დაცვით, ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელი იქნება ბუნებრივ გარემოზე მოსალოდნელი ნეგატიური ზემოქმედებების და გავრცელების არილის მინიმუმამდე დაყვანა, რაც თავის მხრივ გაზრდის მოსალოდნელი დადებითი შედეგების ეფექტიანობას, რაც მნიშვნელოვან სოციალურ-ეკონომიკურ სარგებელს მოიტანს.

ნახ. 15-ზე მოცემულია ნატანებ ჰესის სიტუაციური გენგეგმა, ნახ. 16-ზე სეისმური რუკა.

### 2.3. ჰესის ინფრასტრუქტურული ობიექტების აღწერა. პრაქტიკული ღირებულება

ჰესის მშენებლობა იგეგმება გურიის რეგიონში, ოზურგეთის მუნიციპალიტეტის სოფელ ვაკიჯვართან მდ. ნატანების ხეობის 650-415 მ. ნიშნულებს შორის. ბუნებრივ ჩამონადენზე მომუშავე ჰესის წყლის საანგარიშო ხარჯი შეადგენს 4,4 მ<sup>3</sup>/წმ; დადგმული სიმძლავრე – 8,4 მგვტ, ელექტროენერჯის საშუალო წლიური გამომუშავება 59 გვტ.სთ.

სათავე კვანძი მოწყობა მდინარის კალაპოტის 650 მ. ნიშნულზე მიახლოებითი კოორდინატებით: X – 266294 : Y – 4639721;

საპროექტო მონაკვეთში (ზ.დ. დაახლოებით 400±650 მ. ნიშნულებს შორის) მდ. ნატანების კალაპოტის კონფიგურაცია ისეთია, რომ სადერივაციო სისტემის მოწყობა შედარებით ხელსაყრელი იქნება მარჯვენა სანაპირო ფერდობზე. სადერივაციო სისტემის მარცხენა სანაპირო ფერდობზე მოწყობის გადაწყვეტილების მიღების შემთხვევაში აღნიშნული ჰიდროტექნიკური ნაგებობის სიგრძე თითქმის 1,5-ჯერ მეტია. ამასთან ერთად ამ მონაკვეთში მდ. ნატანებს გააჩნია უფრო წყალუხვი მარცხენა შენაკადები, ვიდრე მარჯვენა შენაკადები. აღნიშნულის გათვალისწინებით, მარცხენა სანაპირო ფერდობზე სადერივაციო სისტემის მოწყობა ზრდის სამშენებლო სამუშაოების მოცულობას და ხანგრძლივობას, შესაბამისად გარემოზე ზემოქმედებას. მიღებულ იქნა სადერივაციო სისტემის მარჯვენა სანაპიროს ფერდობზე მოწყობის გადაწყვეტილება.

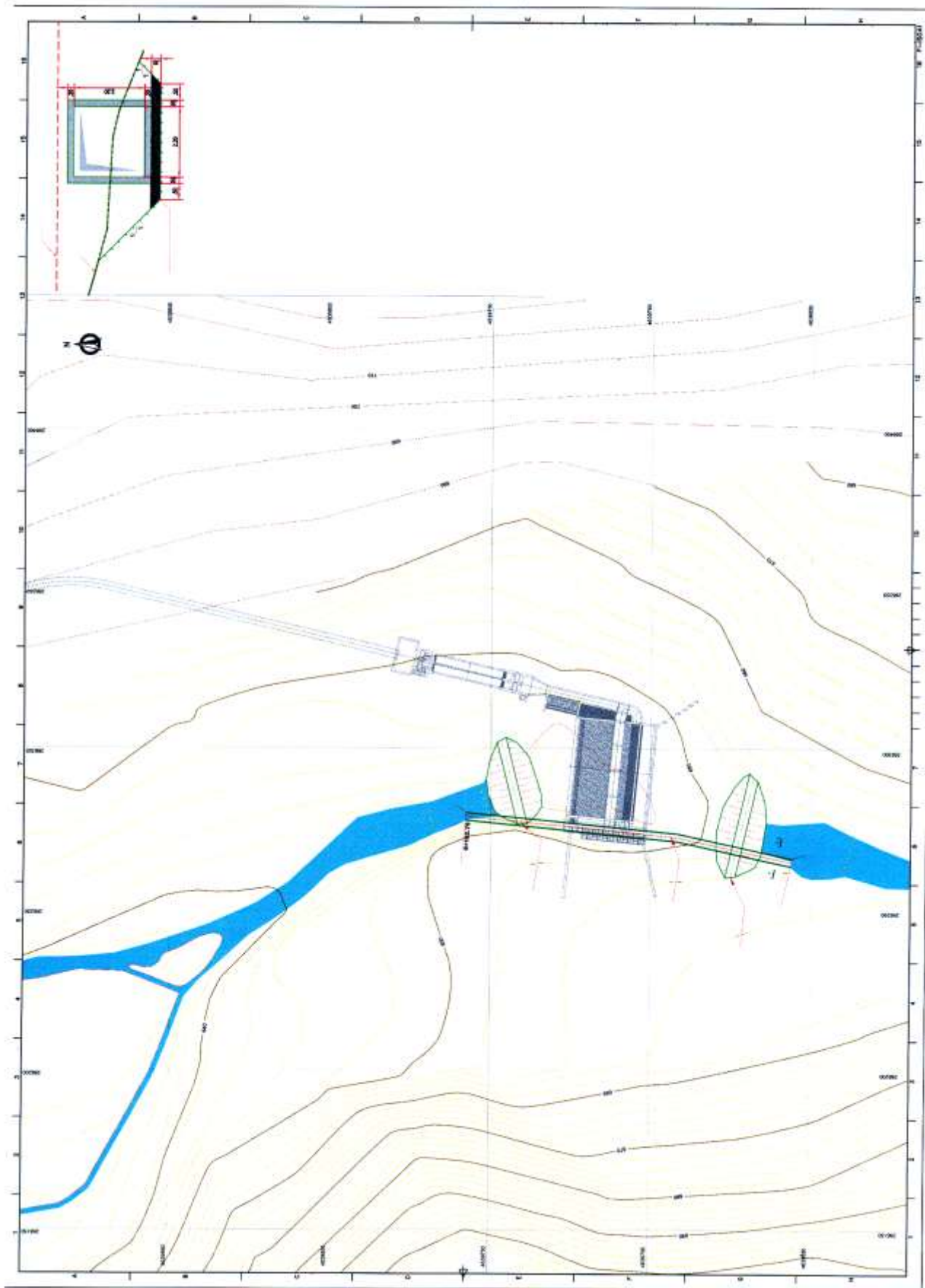
წყალგამტარი, ანუ დაბალწნევიანი გვირაბი გაივლის მდ. ნატანების მარჯვენა სანაპირო ფერდობში. მისი სიგრძე იქნება 2.4 კმ. სადერივაციო გვირაბი წყალს სათავე კვანძიდან მიაწვდის სადაწნეო აუზს.

სადაწნეო აუზიდან იწყება სადაწნეო მილსადენი, სიგრძით 1,3 კმ. იგი წყალს მიაწვდის ზ.დ. 415 მ. სიმაღლეზე განლაგებულ მიწის ზედა ჰესის შენობას, მიახლოებითი კოორდინატებით: X – 264490; Y – 4642869; ჰესის შენობაში დამონტაჟდება ჰელტონის ტიპის ორი ვერტიკალური ჰიდროტურბინა. ჰესის ნამუშავარი წყალი გამყვანი არხის მეშვეობით ჩაშვებულ იქნება მდ. ნატანებში, ზ.დ. 412,7 მ ნიშნულზე.

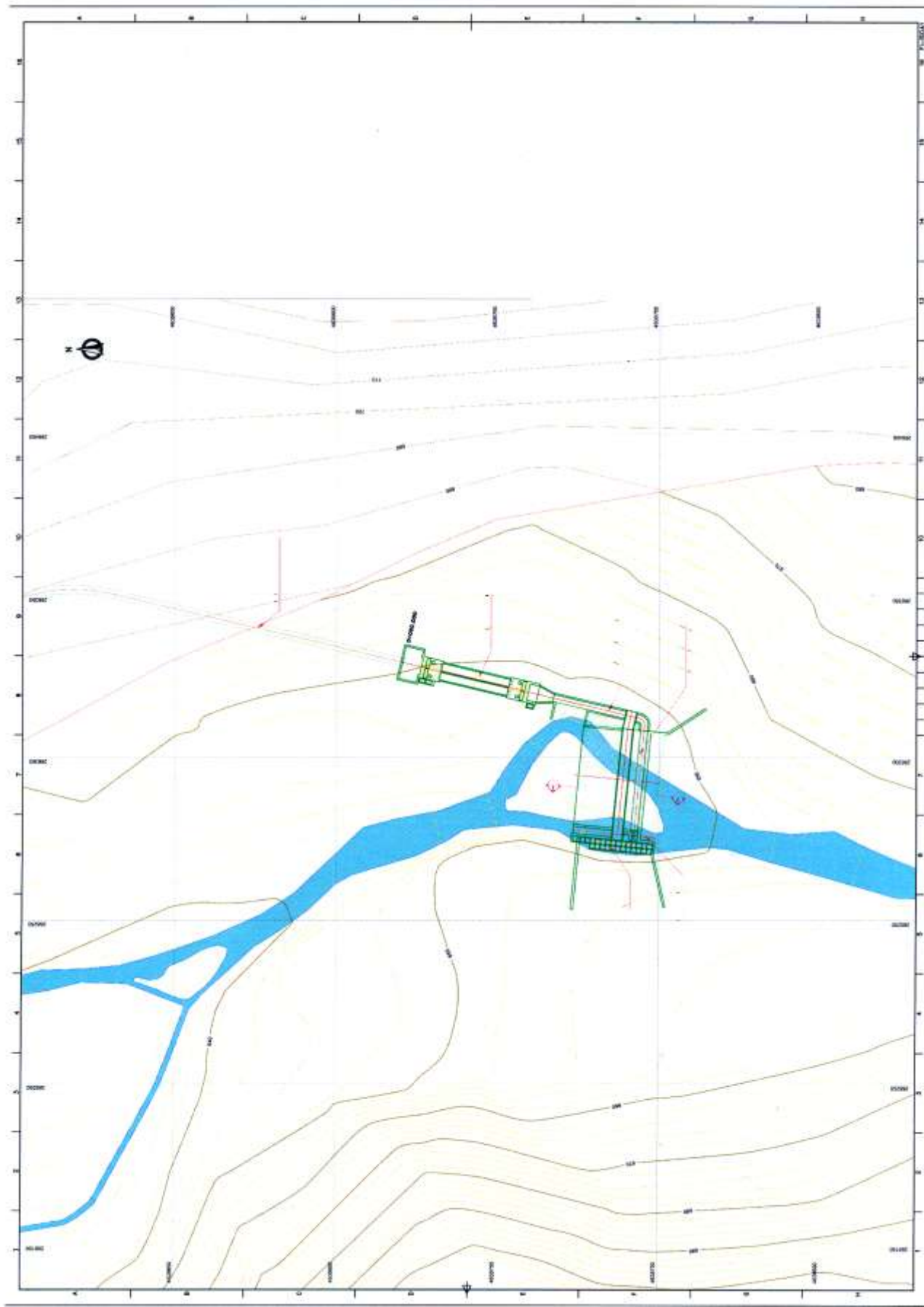
ნახ. 17, 18 მოცემულია „ნატანებ ჰესის“ წყალშემკრების გეგმა (I და II ვარიანტი)

„ნატანები ჰესის“ შემადგენელი ძირითადი ობიექტებია:

- სათავე კვანძი;
- სადერივაციო სისტემა გვირაბი;
- სადაწნეო სისტემა (სადაწნეო აუზი და მილსადენი);
- ძალური კვანძი (ჰესის შენობა და ქვესადგური).



ნახ. 17. „ნატანებ ჰესის“ წყალშემკვრები გეგმა (I ვარიანტი)



ნახ. 18. „ნატანებ ჰესის“ წყალმომცვერი გეგმა (II ვარიანტი)



## სათავე კვანძი

„ნატანები ჰესის“ სათავე კვანძი მოეწყობა ზ.დ. 650 მ ნიშნულზე, შემოთავაზებული იქნება 8.2 მ სიმაღლის ბეტონის ნაგებობა. მარცხენა მხარეს მოწყობილი წყალგამშვები წარმოადგენს ნაგებობებს, რომლებიც საშუალებას იძლევა ზედმეტი წყალი გავიდეს ნაგებობის დაზიანების გარეშე. კაშხალის ზედაპირი ზღვის დონიდან 652, 8 მ-ს, ხოლო წყალგამშვების ზედაპირი ზღვის დონიდან 649,8 მეტრზე.

სათავე კვანძის ტიროლის ტიპის წყალმიმღებიდან წყალი გადადის მარჯვენა ნაპირზე მოწყობილ ღია ტიპის სალექარში, რომელიც აღჭურვილი იქნება ავარიული წყალსაგდებით და გამრეცხი ნაგებობით. სალექარის შემდგომ წყალი გადადის სადერივაციო გვირაბში.

სათავე კვანძის განთავსების ადგილის ხედი მოცემულია ნახ. 19-ზე.

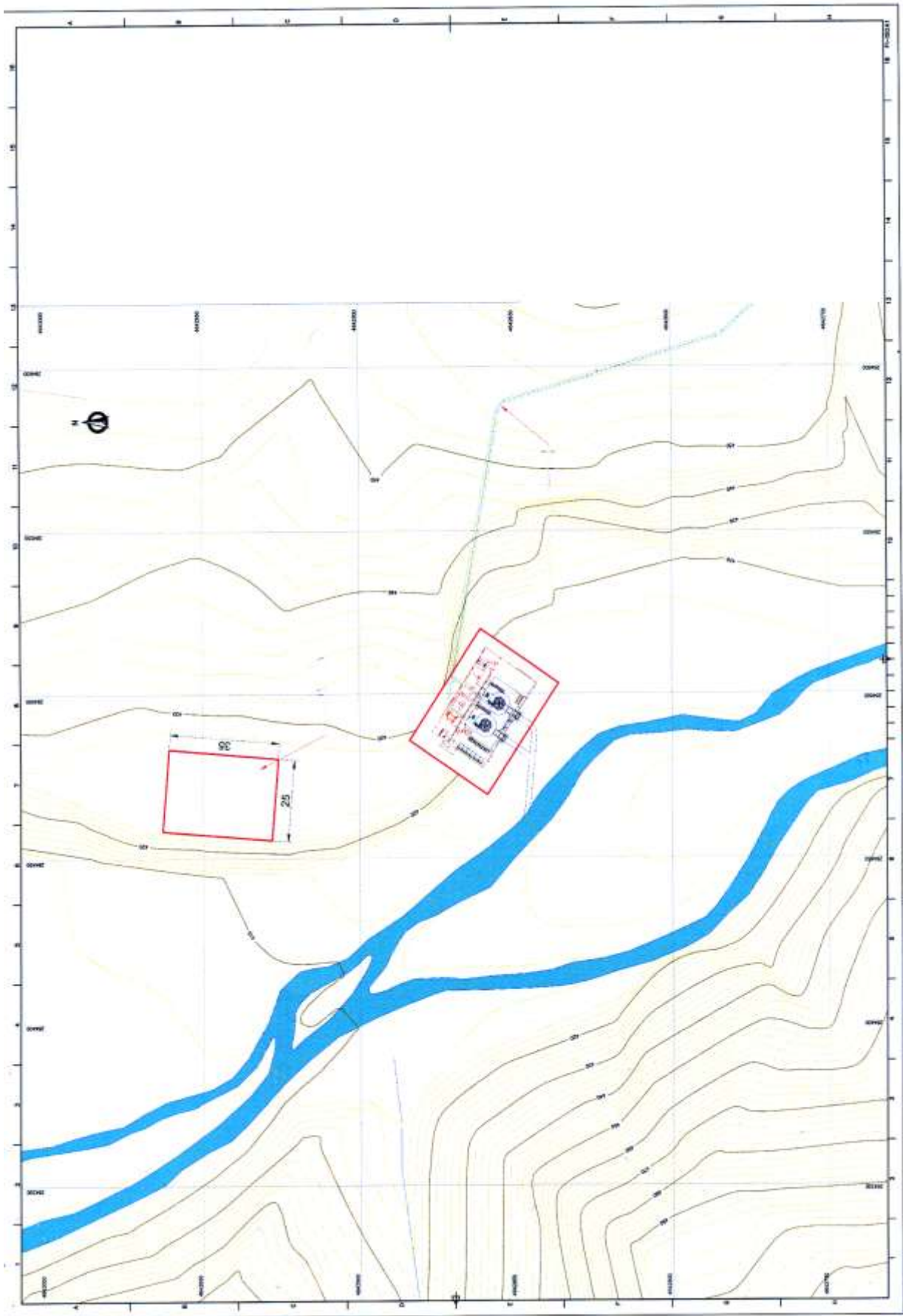
### სადერივაციო გვირაბი:

წყალგადამცემი (სადერივაციო) გვირაბის შიდა დიამეტრია 2,5 მ. გვირაბის მთლიანი სიგრძე დაახლოებით 2,4 კმ-ია და იგი განთავსდება მდინარის მარჯვენა ნაპირზე.

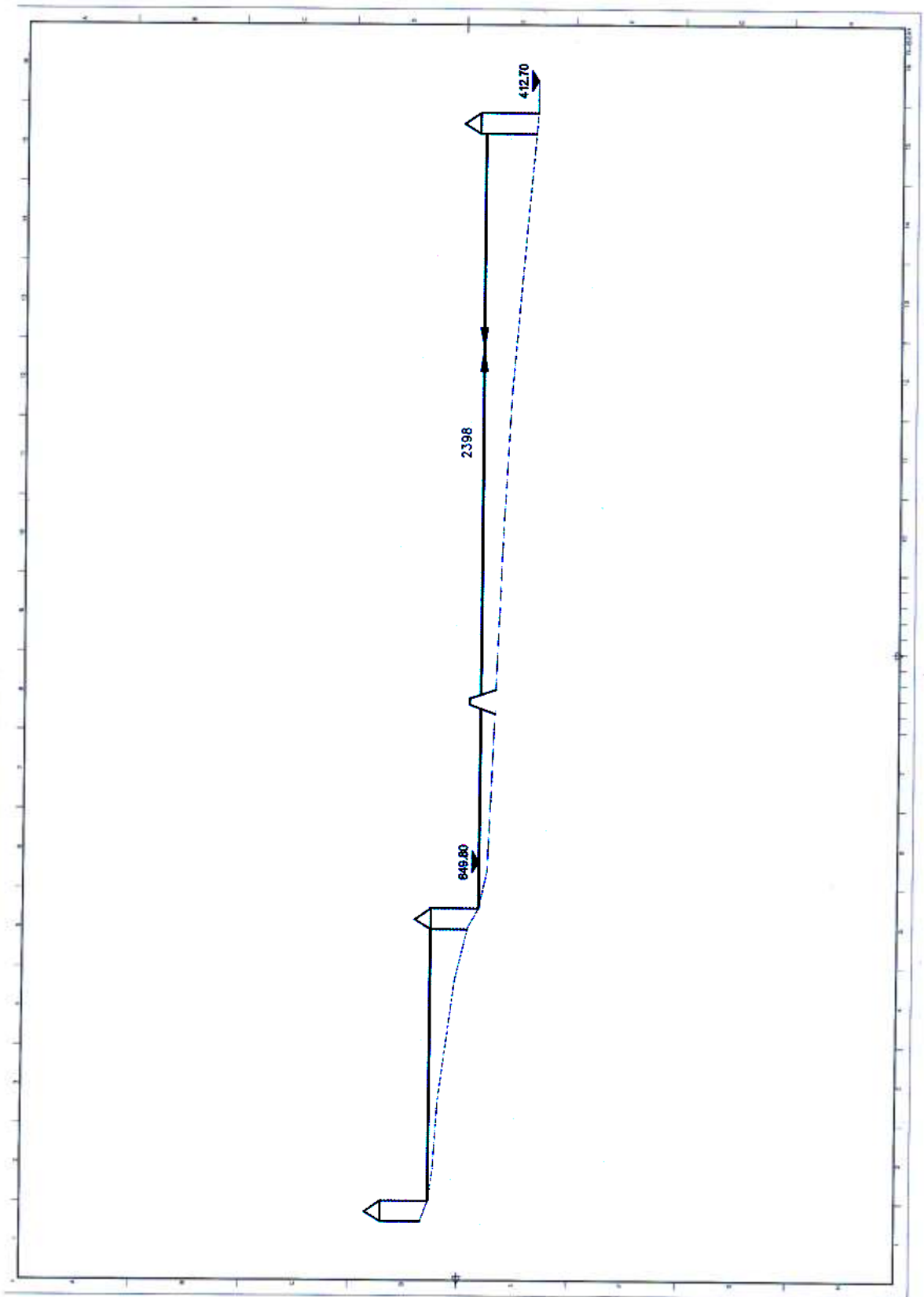
საპროექტო სადერივაციო გვირაბის განივი ჭრილი.

### სადაწნეო სისტემა:

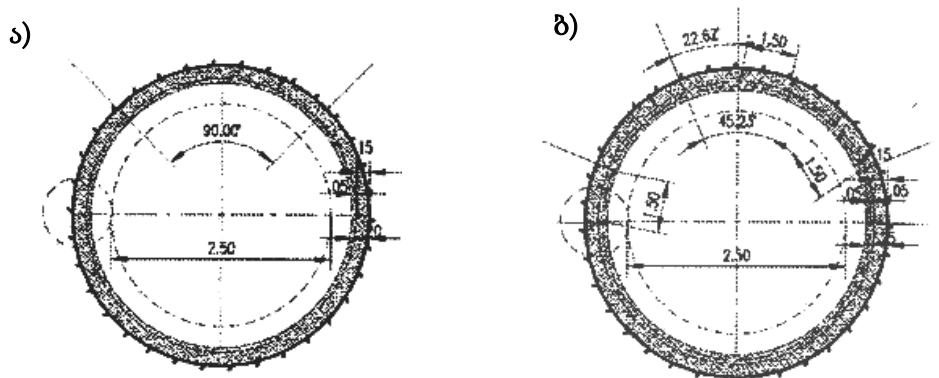
სადერივაციო გვირაბიდან წყალი გადადის სადაწნეო აუზში, რომლის ზომების (24.2× 10,8) მ; დაახლოებით 1,3 კმ სიგრძის სადაწნეო მილსადენი განთავსდება მდინარის მარჯვენა ნაპირზე, რათა უზრუნველყოფილი იქნას სადაწნეო აუზიდან მიმდინარე ნაკადის ელექტროსადგურამდე მიწოდება. სადაწნეო ძალის დენი იქნება მიწისქვეშა ჰესის შენობაში შესვლამდე მოხდება მისი განშტოება.



ნახ. 19. „ნატანებ ჰესის“ ძირითადი ნაგებობების განლაგების გეგმა



ნახ. 20. „ნატანებ ჰესის“ გრძივი კრილი



ნახ. 21. „ნატანებ ჰესის“ სადერივაციო გვირაბის განივი ჭრილი

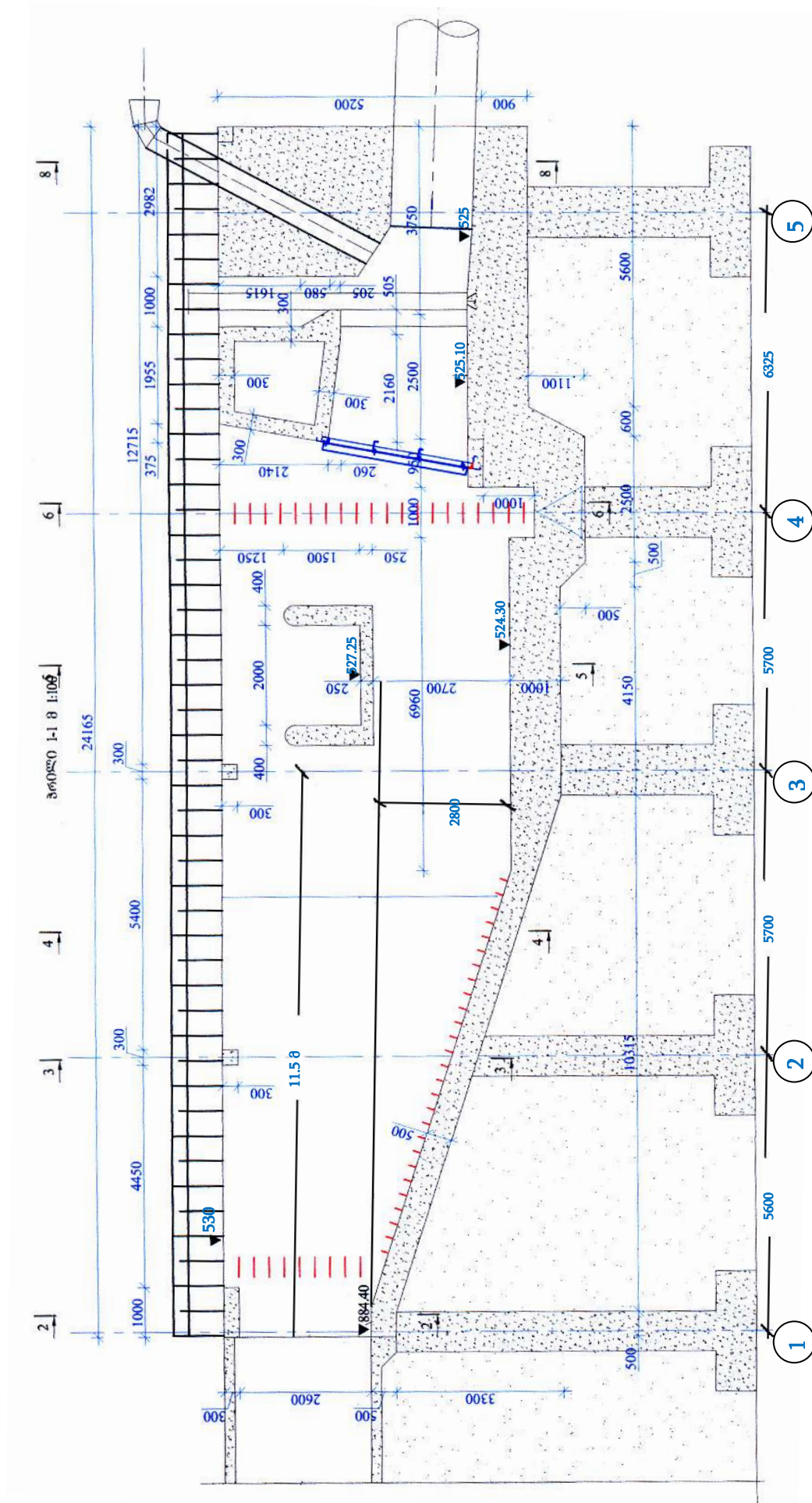
**ძალური კვანძი:**

ძალური კვანძის შემადგენლობაში იქნება ჰესის მიწისზედა შენობა და ღია ელექტროსადგური.

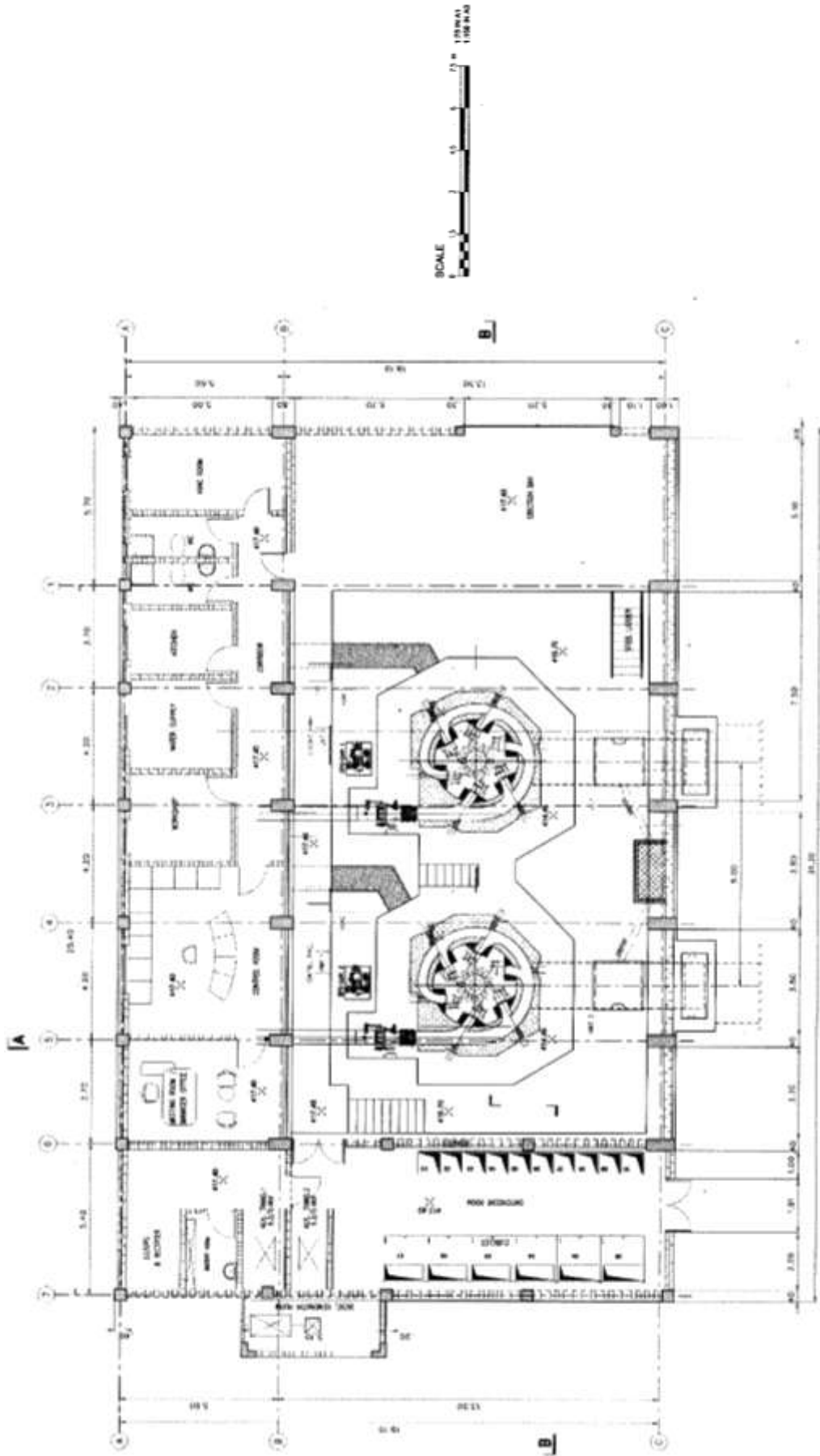
შემოთავაზებული შენობა წარმოადგენს 31×19 მ გაბარიტის მქონე რკინაბეტონის ნაგებობას. იგი მოეწყობა დაახლოებით 415 მ ნიშნულზე. ელექტროსადგურის შენობა განკუთვნილი იქნება ორი ჰელტონის ტიპის ვერტიკალური ჰიდროაგრეგატის დამონტაჟებისა და ექსპლოატაციისათვის.

ჰესიდან წყალი გადაედინება მდინარე ნატანებში. ძალური კვანძის საერთო გეგმა მოცემულია და ჰესის შენობის გეგმა მოცემულია ნახ. 16 .

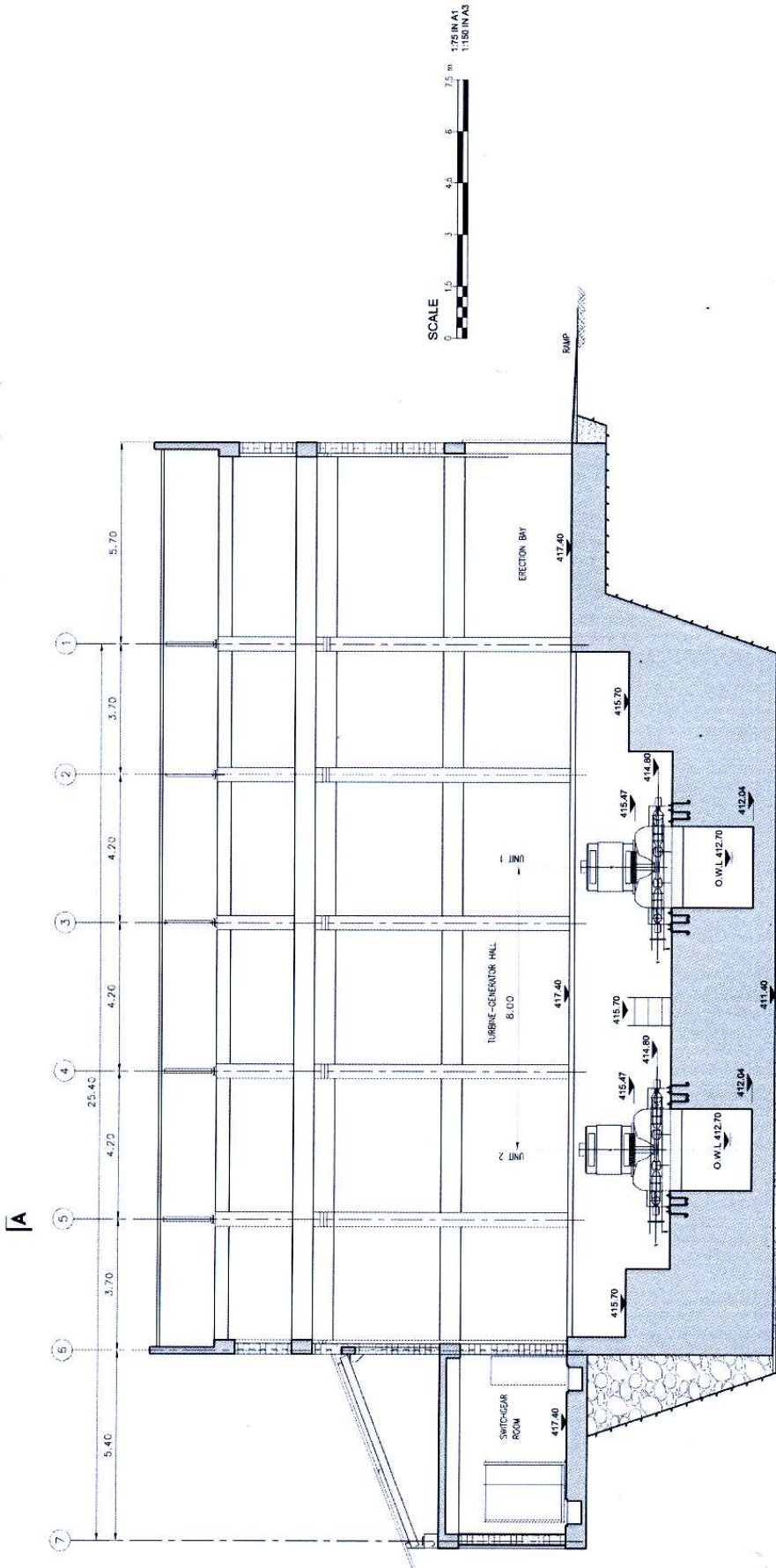
ჰესის შენობის ჩრდილოეთით მდ. ნატანების მარჯვენა ნაპირზე მოეწყობა ღია ტიპის 110 კვ. ძაბვის ქვესადგური.



ნახ. 22. „ნატანები“ ჰესის სადაწნო აუზის კედლის ბზარმედგობის განგარიშება რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით

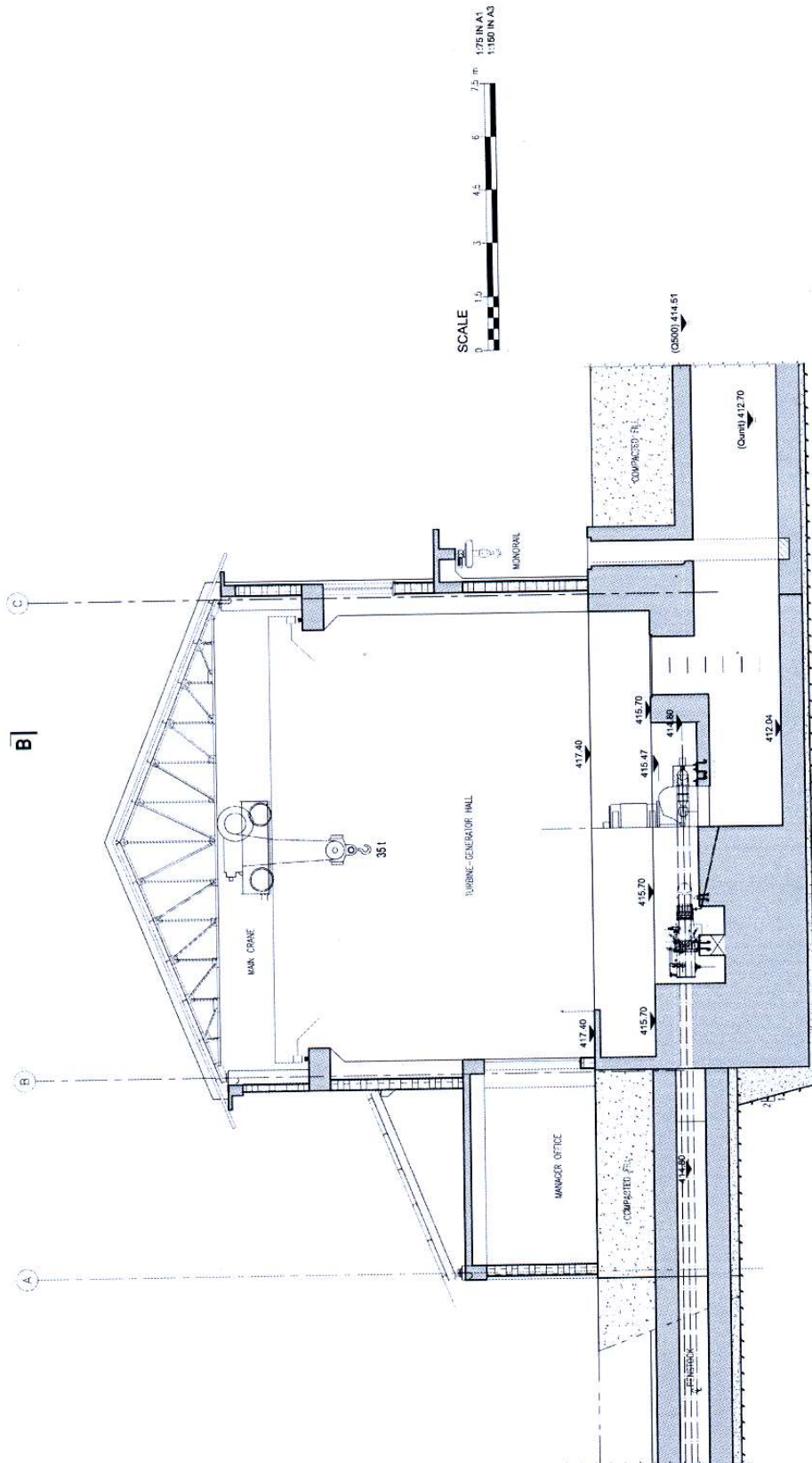


ნახ. 23. „ნატანებ ჰესის“ ბალუერი კვანძის გეგმა



A SECTION B-B  
1/75

ნახ. 24. „ნატანგზ ჰესის“ კრილი ა-ა



ნახ. 25. „ნატანგებ ჰესის“ კრილი ბ-ბ



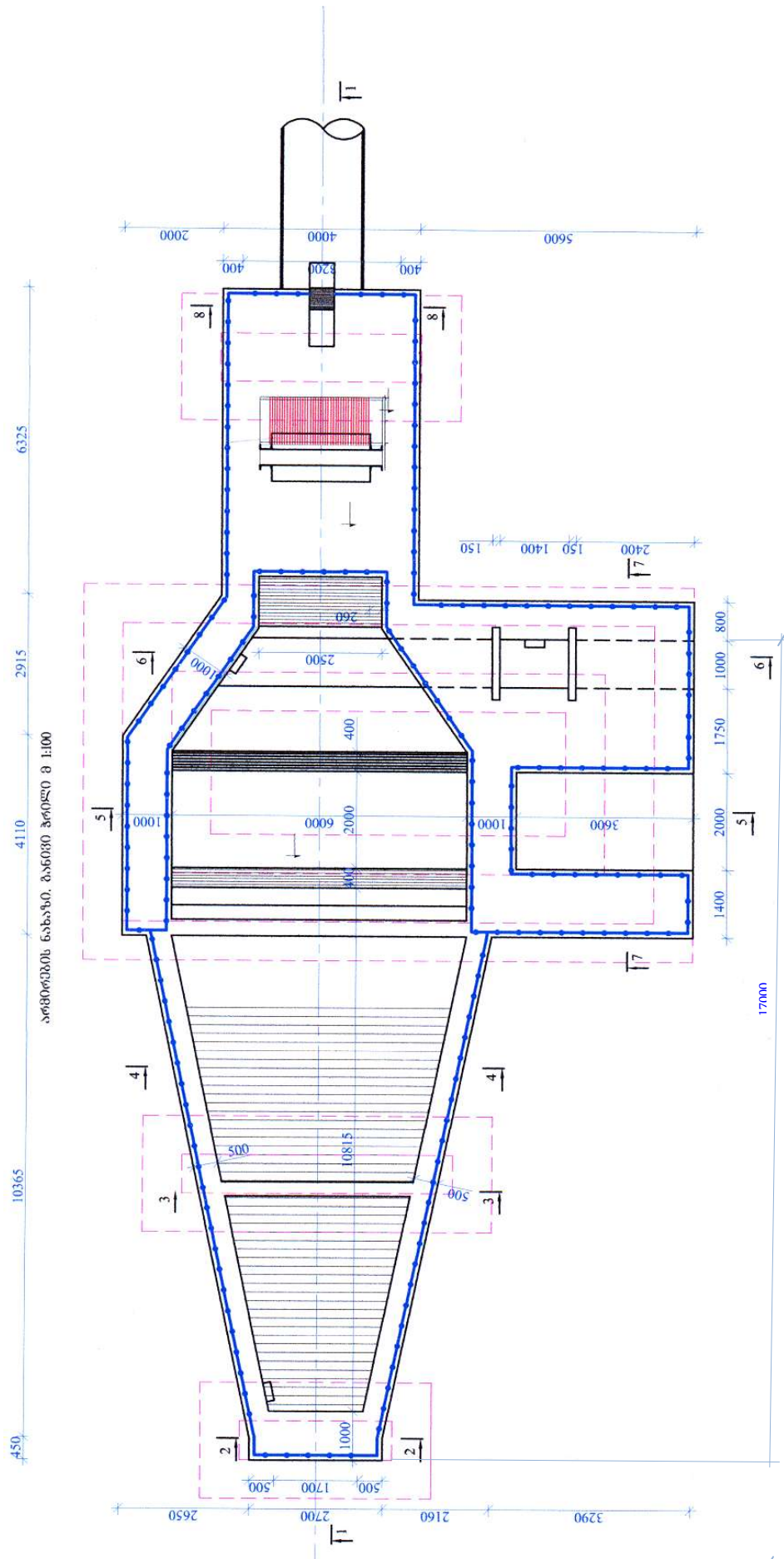
**თავი 3. „ნატანებ ჰესის“ რკინაბეტონის ელემენტების  
გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“  
მეთოდების გამოყენებით**

**3.1. სადაწნევო რეზერვუარის კედლის გაანგარიშება და  
კონსტრუირება ბზარმედეგობაზე**

ლიტერატურიდან არის ცნობილი, რომ რკინაბეტონი დღეისათვის ყველაზე ფართოდ არის გამოყენებული სამშენებლო ინდუსტრიაში; საჭირო ხდება ყურადღების გამახვილება მის სიმტკიცეზე, რომელიც გაჭიმვაზე ძალზე დაბალია, აქვს დიდი რაოდენობის ტექნოლოგიური დეფექტები, ხდება ძაბვების კონცენტრაცია არსებულ დეფექტებთან (ბზარებთან), ასევე მის მოცულობაში არსებულ სიცარიელებთან; ყოველივე ეს დიდ გავლენას ახდენს მის სიმტკიცეზე და ბზარმედეგობაზე. დატვირთვა მასში არსებულ დეფექტებზე (ბზარებს) იწვევს ძაბვების კონცენტრაციის ზრდას, ასევე ახალი ბზარების წარმოქმნას და გაზრდას. ბეტონის რღვევის თავისებურებების შესწავლა ზემოთ მოყვანილი პროცესებიდან გამომდინარე არის უმნიშვნელოვანესი ამოცანა, რათა შეიქმნას რკინაბეტონის კონსტრუქციები ხანგამძლე, მტკიცე და ბზარმედეგი.

რკინაბეტონის ელემენტების ბზარმედეგობაზე გაანგარიშებისას გავლენას ახდენს ძაბვების კონცენტრაციის კრიტიკული კოეფიციენტი  $K_c$  და ენერგია  $G_c$ , ბეტონის სტრუქტურა, გამყარების პირობები, ტემპერატურა, ტენიანობა და მრავალი სხვა ფაქტორები, რომელიც განხილულია და შესწავლილია მრავალი მეცნიერის მიერ [10, 11, 12].

გასაანგარიშებელი რეზერვუარი წარმოადგენს (ნახაზზე ნაჩვენების მიხედვით) კაშხლის წინამდებარე რეზერვუარს (ნახ. 26), სადაც გროვდება წყლის დიდი მასა, რომელიც შემდეგ მიეწოდება კაშხლის ტურბინებს. რეზერვუარის კედელი ცვალებადი სიმაღლისაა, დასაწყისში აბსოლუტური ნიშნული ჭრილი 1-1-ის მიხედვით არის 887,3 მ, რეზერვუარის ჰორიზონტალურ უბანზე, სადაც გათვალისწინებულია რეზერვუარის კედლის გაანგარიშება ბზარმედეგობაზე რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით, ნიშნული 881,6 მ-ია.



ნახ. 26. სადაწვევო რეზერვუარის გეგმა

განგარიშებისათვის საჭიროა კედლის სისქის დადგენა მასზე მოქმედი ნორმატიული ჰიდროტექნიკური წნევისაგან. როგორც ცნობილია წნევა იზრდება წრფივად სიღრმის გაზრდასთან ერთად  $P^\sigma$ . დავადგინოთ  $H$  სიღრმე, რომელიც 5,7 მ-ია, აბსოლუტური ნიშნულის მიხედვით  $(887,3-881,6)\text{მ} = 5,7\text{ მ}$ .

ნორმატიული ჰიდროტექნიკური წნევა

$$P^\sigma = \gamma \cdot H, \quad (40)$$

სადაც  $\gamma$  წყლის მოცულობითი წონა;  $\gamma = 1,0\text{ კნ/მ}^3$ .

$H$  – რეზერვუარის კედლის სიმაღლე  $h = 5,7\text{ მ}$ .

საანგარიშო ჰიდროტექნიკური წნევა მიიღება თუ ნორმატიულ სიდიდეს  $P^\sigma$  გავამრავლებთ საიმედოობის კოეფიციენტზე, რომელიც  $n = 1,1$  ტოლია,  $P^\sigma = 5,7\text{ კნ/გრ.მ}$ .

$$P = P^\sigma \cdot n = 5,7 \cdot 1,1 = 6,27\text{ კნ/გრ.მ}$$

რეზერვუარის კედელში აღიძვრება გამჭიმი ძალვა  $T_0^\sigma$ , რომელიც გამოითვლება ჰიდროტექნიკური წნევის თანაბრადგანაწილებული ზემოქმედებით რეზერვუარის კედელზე და ტოლია  $T_0^\sigma = P^\sigma \cdot l_{\text{კედ}}$ . თუ ჩავსვამთ  $P^\sigma$  -ის მნიშვნელობას

$$T_0^\sigma = \gamma H \cdot l_{\text{კედ}}. \quad (41)$$

სადაც  $l_{\text{კედ}} = 17,0\text{ მ}$  კედლის სიგრძე.

საანგარიშო გამჭიმი ძალვა

$$T_0 = n \cdot \gamma H l_{\text{კედ}} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 5,7 \cdot 17,0 = 106,6\text{ კნ/გრ.მ}$$

მღუნავ მომენტს და განივ ძალას აქვს დიდი ზემოქმედება რეზერვუარის ძირთან და მცირდება სიმაღლის მატებასთან ერთად.

გამჭიმი ძაბვა კედელში

$$T^\sigma = T_0^\sigma - T_{\text{max}}^\sigma \cdot l \left[ \eta_1 + \eta_2 \left( 1 - \frac{1}{mH} \right) \right], \quad (42)$$

სადაც  $T_0^\sigma$  – გამჭიმავი ძაბვა კედელში რეზერვუარის ძირთან შეერთების ადგილას;

$l$  – კედლის სიგრძე;

$P^\sigma$  – ჰიდროტექნიკური ნორმატიული წნევა რეზერვუარის ძირის და კედლის შეერთების ადგილას;

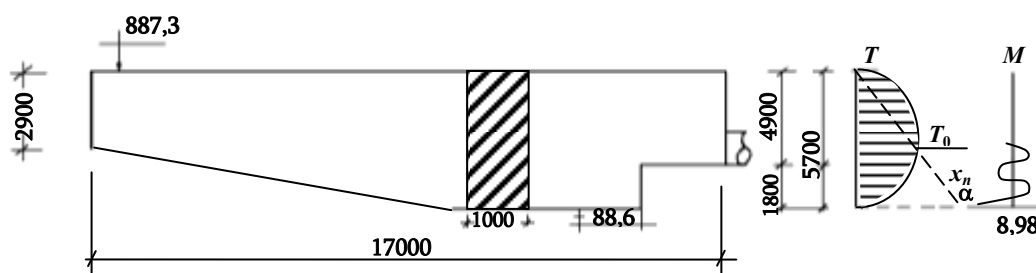
$m$  – კედლის სიხისტის მახასიათებელი, რომელიც გამოითვლება:

$$m = \frac{1,3}{\sqrt{l \cdot \delta}};$$

$\delta$  – რეზერვუარის კედლის სისქე, რომელიც ინიშნება წინასწარ

$$\delta = 0,5 \cdot l \cdot H,$$

$\eta_1$  და  $\eta_2$  – კოეფიციენტი, რომელიც გამოიყენება კონსტრუქციების გაანგარიშებისას დრეკად ფუძეზე და აიღება ცხრილებიდან  $\varphi = mx$ , მიხედვით, სადაც  $x$  არის მანძილი ძირიდან განსახილველ კვეთამდე.



ნახ. 27. სადაწნეო რეზერვუარის გეომეტრიული ზომები  $T_0$  და  $M$  ეპიურები

დავნიშნოთ კედლის სისქე  $\delta$  ისე, როგორც პროექტშია მიღებული  $\delta = 500$  მმ = 50 სმ.

მღუნავი მომენტი ნებისმიერ კვეთში ძირიდან  $x$  მანძილზე გამოითვლება ფორმულით:

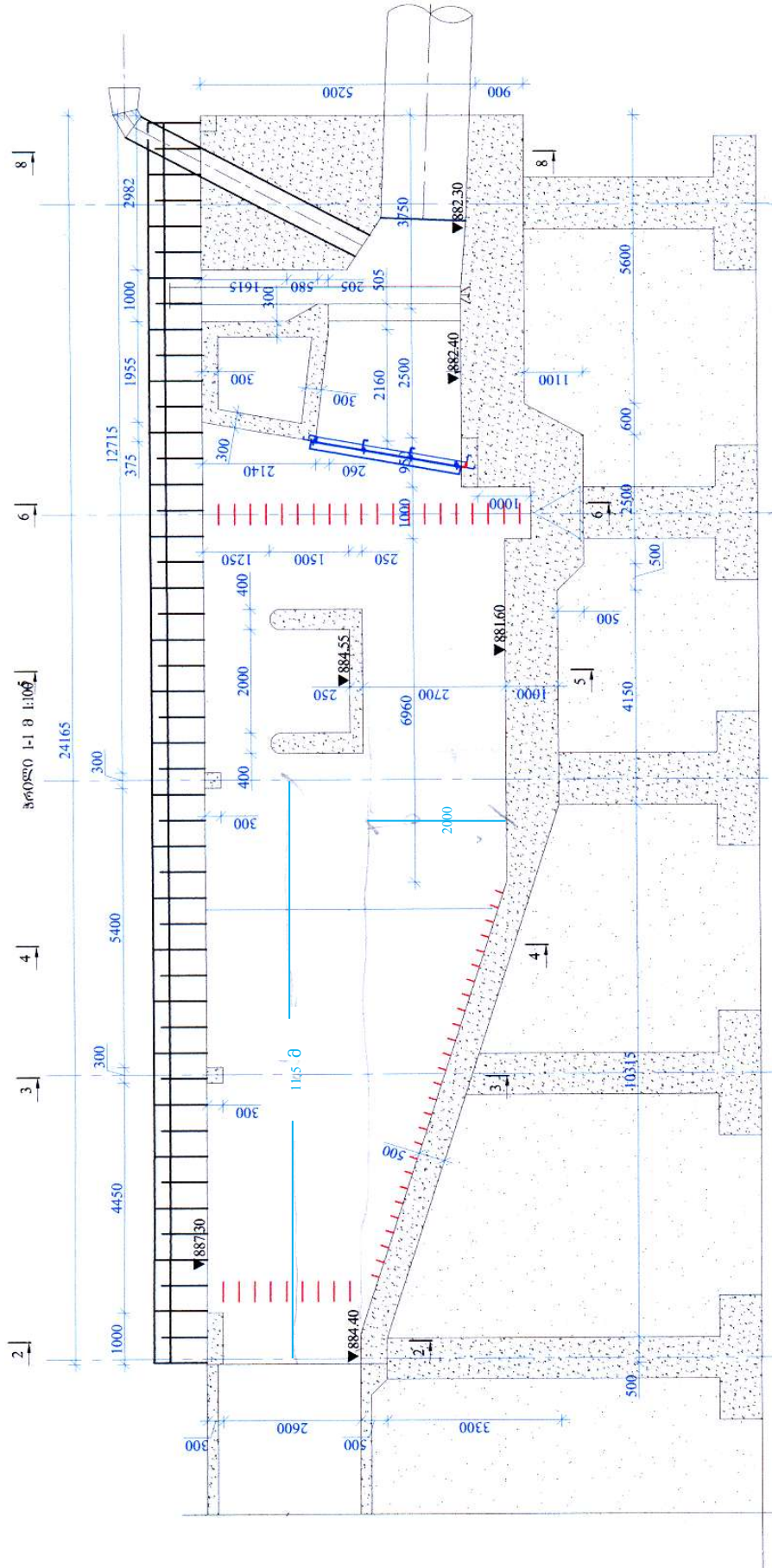
$$M^\sigma = \frac{P_{\max}^\sigma}{2m^2} \left[ \left( 1 - \frac{1}{mH} \right) \eta_1 - \eta_2 \right]. \quad (43)$$

მაქსიმალური მომენტი არის რეზერვუარის ძირთან, სადაც  $x = 0$ ;  $\varphi = m \cdot x = 0$ ;  $\eta_1 = 1$ ;  $\eta_2 = 0$ ; შესაბამისად ფორმულა (42) მიიღებს სახეს:

$$M^\sigma = \frac{P_{\max}^\sigma}{2m^2} \left( 1 - \frac{1}{m \cdot H} \right) = \frac{5,7}{2 \cdot 0,44^2} \left( 1 - \frac{1}{0,44 \cdot 5,7} \right) = 14,72 \cdot 0,6$$

$$M^\sigma = 8,98 \text{ კნ.მ}$$

სადაც  $m = \frac{1,3}{\sqrt{17 \cdot 0,5}} = \frac{1,3}{2,9} = 0,44$ .



ნახ. 28. სადაწნეო რეზერვუარის ქრილი 1-1

საანგარიშო მლუნავი მომენტი  $M = 1,1 \cdot 8,98 = 10,978$  ჯ. სადაც  $n = 1,1$  – საიმედოობის კოეფიციენტია  $M$ -ის მიხედვით საჭიროა გამოვთვალოთ არმატურის ფართობი, ბზარის სიგრძე, ბზარის გახსნის სიგანე, რეზერვუარის კედლის სიმტკიცე, ბზარწარმომქმნელი მომენტის სიდიდე, დავადგინოთ რეზერვუარის კედლის რღვევის ასაკი.

რეზერვუარის კედლის სიმაღლეში გამოვყოთ 1 მ-ის ზოლის კედელი  $b \times h = 100 \times 50$  სმ. რეზერვუარის კედელი დაყოფილია სიმაღლეში 1 მ-ის ზოლებად.

1) გამოვთვალოთ რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით არმატურის საჭირო ფართობი რეზერვუარის 1 მ-ის სიგანის და ძირიდან 1 მ-ის სიმაღლის ზოლისათვის.

დავადგინოთ მასალის მახასიათებლები: B40 კლასის ბეტონისათვის  $R_b = 22$  მგპ;  $R_{bt} = 1,4$  მგპ;  $E_b = 36 \cdot 10^3$  მგპ; A500 კლასის არმატურისათვის

$R_s = 520$  მგპ,  $E_s = 19 \cdot 10^4$  მგპ. ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი აიღება ბეტონის და არმატურის კლასის მიხედვით:

B40 კლასისათვის  $K_{1c}^b = 0,42$ ;  $K_{11c}^b = 4,86$

A500 კლასისათვის  $K_{1c}^{st} = 27,5$ ;  $K_{11c}^{st} = 41,1$ .

განვსაზღვროთ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი

$$K_1 = M \cdot \gamma(a_1) m^2, \quad (44)$$

სადაც  $a_1 = a/h$ ;  $a = 5$  სმ - დამცველი შრე;  $h = 50$  სმ კედლის სისქე

$$a_1 = 0,05/0,5 = 0,1,$$

$$\gamma(a_1) = 0,93/\sqrt{1-a_1} + 1/\sqrt{1-a_1^2} - 0,93 =$$

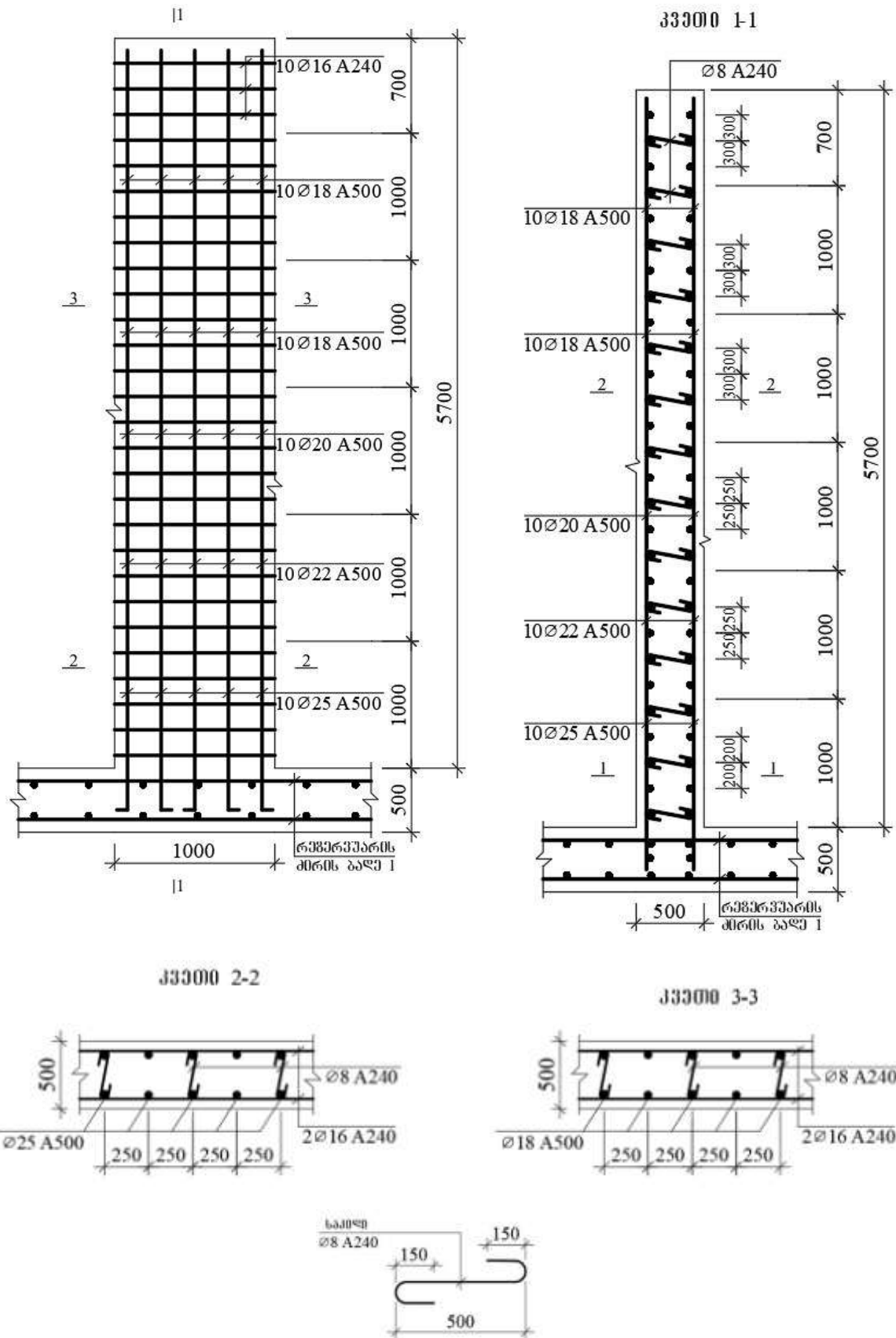
$$= 0,93/0,894 + 1/0,994 - 0,93 = 1,04 + 1,006 - 0,93 = 0,896,$$

$m$  – მამრავლია, რომელიც ითვალისწინებს ძაბვის განაწილებას ბზარის წვერზე მლუნავი მომენტის მაღალი მნიშვნელობისათვის  $M < 400$  კნ.მ

$m = 1$ ; ჩვენს მაგალითში  $M < 400$ ; მაშინ  $m = 1$ ,

$$K_1 = 10,978 \cdot 1,0 \cdot 0,1 = 8,046 \text{ მგპ.მ}^{1/2}.$$

ბზარის სიგრძე რეზერვუარის კედელში გამოითვლება ფორმულით



ნახ. 29. რეზერვუარის კედლის კონსტრუირება

$$L_0 = \frac{M^2 \cdot \gamma(a_1)}{(K_{ic}^b + 1)^2 \cdot b^2 \cdot h^2}, \quad (45)$$

$$L_0 = \frac{0,010979 \cdot 0,896}{(0,42 + 1)^2 \cdot 1,0^2 \cdot 0,5^2} = 0,0072 / 0,504 = 0,0143 \text{ მ} = 1,43 \text{ სმ},$$

სადაც  $b = 100$  სმ. გამოყოფილი კედლის ზონის სიგანეა.

არმატურის საჭირო ფართობი გამოითვლება ფორმულით:

$$A_s = \frac{a^2 (K_{lc}^{st})^4}{\pi L_0^2 h^2 \cdot c^2 K_{czc}^4 \cdot 3164} \left[ \sqrt{\frac{c}{2}} + f(e) \right]^4 (1 - e^2)^4; \quad (46)$$

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0,05^2 (27,5)^4}{3,14 \cdot 1,43 \cdot 0,5^2 \cdot 3,36^2 \cdot 1 \cdot 3164} \left[ \sqrt{\frac{3,36}{2}} + 0,007 + 0,128 \cdot 0,007 + \right. \\ &\quad \left. + 10,89 \cdot 0,007^2 + 22,14 \cdot 0,007^3 + 10,96 \cdot 0,007^4 \right]^4 (1 - 0,007^2)^4 = \\ &= \frac{1429,78}{40097,8} [1,29 + 0,007 + 0,000041 + 0,0000076 + 0,00000026]^4 \cdot 0,97 = \\ &= 0,035 \cdot 1,3 \cdot 0,96 = 0,00436 \text{ მ}^2, \end{aligned}$$

სადაც  $e = b/g + L_0 h = 1,0 / 1 + 0,0143 \cdot 0,5 = 0,007$

$$A_s = 43,6 \text{ სმ}^2,$$

სადაც  $g = 1$ ,  $b = 100$  სმ =  $1\text{მ}$ .

ვიღებთ  $10\Phi 25A500$ ;  $A_s = 44,14$  სმ<sup>2</sup>.

2) გამოვთვალოთ კვეთის ზიდვის უნარი რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის მეთოდის მიხედვით.

რეზერვუარის კედლის კვეთის ზიდვის უნარი გამოითვლება ფორმულით:

$$\begin{aligned} M_{\text{ჰ3}} &= \frac{K_{11c}^b \cdot \pi^{2/3} \cdot b}{\sqrt{l_g}} \left[ \left( x_i - \frac{a_{crc}^h}{2} \right) \left( h_0 - \frac{2x_i - a_{crc}^h}{4} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left( x - x_i - \frac{a_{crc}^h}{2} \right) \left( h_0 - \frac{2x + 2x_i + a_{crc}^h}{2} \right) \right] - \\ &\quad - \frac{K_{1c}^b \cdot \pi^{3/2} \cdot b}{\sqrt{l_g}} (h - x - L_{crc}^v + a) \frac{h_0 - x + L_{crc}^v - a}{2}; \quad (47) \end{aligned}$$



B40 კლასის ბეტონისათვის ცხრილიდან აღებული გვაქვს  $K_{lc}^b = 0,36$  მგპ·მ<sup>1/2</sup>;  $K_{11c}^b = 0,3,69$ მგპ·მ<sup>1/2</sup>.

გამოვთვალოთ

$$K_{lc}^s = 60 \cdot A_s \gamma_1(a_1) / b \sqrt{\pi \cdot a} = 60 \cdot 0,004413 \cdot 0,896 / 1,00 \cdot \sqrt{3,14 \cdot 0,5} = 0,2305 / 1 \cdot 0,396 = 0,58.$$

$$K_{lc}^s = 0,58,$$

სადაც  $A_s = 0,004413$  სმ<sup>2</sup> (გვ. 6)

$$\gamma_1(a_1) = 0,896 \text{ (გვ. 5)}$$

$a = 0,05$  მ დამცავი შრე.

გამოვთვალოთ ზზარის სიგრძე

$$L_0 = M^2 \gamma_1(a_1)^2 (2\pi - 1)^2 / 4(K_{lc}^b + K_{lc}^s) b^2 \cdot h^2 \cdot \pi^2, \quad (48)$$

$$L_0 = 0,00988 \cdot 0,896^2 (2 \cdot 3,14 - 1)^2 / 4(0,42 + 0,58) \cdot 1^2 \cdot 0,5 \cdot 3,14^2 = 0,182 \text{ მ,}$$

სადაც  $M = 10,978/1000$ .

გამოვთვალოთ ზზარის  $L_{crc}^v$  სიგრძე ხანგრძლივი დატვირთვისას.

$$L_{crc}^v = L_0 \cdot h = 0,182 \cdot 0,5 = 0,09 \text{ სმ.}$$

გამოვთვალოთ ზზარის სიგრძე ნორმალური კვეთისათვის:

$$L_{crc}^h = \frac{0,285 \cdot \sqrt{3} h^{3/2} \cdot \pi^{3/2} \sqrt{K_{lc}^b + K_{11c}^2}}{2\sqrt{2} K_{11c}^b \cdot h \cdot \sqrt{l_{ge}} - 2,26 \sqrt{3} h \cdot \pi^{3/2} \sqrt{K_{lc}^b + K_{11c}^b} \cdot d}, \quad (49)$$

$$\begin{aligned} L_{crc}^h &= \frac{0,285 \sqrt{3} \sqrt{0,5^3} \cdot \sqrt{3,14^3} \sqrt{0,42 + 4,86 \cdot 0,025}}{2\sqrt{2} \cdot 4,86 \cdot 0,5 \cdot 1 - 1,26 \sqrt{3} \cdot 0,5 \sqrt{3,14^3} \sqrt{0,42 + 4,85 \cdot 0,025}} = \\ &= \frac{0,285 \cdot 1,75 \cdot 0,35 \cdot 5,56 \cdot 2,29 \cdot 0,025}{2,8 \cdot 4,86 \cdot 0,5 - 2,26 \cdot 1,22 \cdot 5,56 \cdot 2,29 \cdot 0,025} = 0,093 \text{ მ.} \end{aligned}$$

გამოვთვალოთ ზზარის გახსნის სიგანე

$$\begin{aligned} a_{crc}^{bh} &= a_{crc}^{bh1} + a_{crc}^{bh1} = \frac{\sqrt{\pi^5} \cdot K_{lc}^b \cdot L_{crc}^h (1 - \nu^2)}{E_b \sqrt{l_{ge}}} (1 + 1,14 \lambda^2 - 0,604 \lambda^4)^2 + \\ &+ \frac{2K_{11c}^b}{\sqrt{\pi^3} \sqrt{L_{crc}^h} \cdot E_b} \cdot \int_{-L_{crc}^h}^{L_{crc}^h} \Gamma(L_{crc}^h \cdot \Omega) d\Omega, \quad (50) \end{aligned}$$

$$a_{crc}^{bh} = \frac{\sqrt{3,14^5} \cdot 0,42 \cdot 0,093 (1 - 0,2^2)}{36 \cdot 10^3 \cdot 1} (1 + 1,14 \cdot 0,186^2 + 0,6048 \cdot 0,186^4)^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2 \cdot 4.86}{\sqrt{3,14^3} \sqrt{0,093} \cdot 36000} \cdot \int_{-0,093}^{0,093} (0,093 \cdot 0,05) \cdot 0,05 = \\
& = \frac{17,47 \cdot 0,038 \cdot 0,96}{36000} (1 + 0,039 + 0,00072)^2 + \frac{9.72 \cdot 0,0046}{5,56 \cdot 0,30 \cdot 36000} = \\
& = 0,16 \cdot 1,7 + 0,0447/60048 = 0,0000053 = 0,53 \cdot 10^{-2},
\end{aligned}$$

სადაც  $\nu = 0,2$ ;  $\lambda = L_{crc}^h/h = 0,093/0,5 = 0,186$ .

4) კვეთის მაქსიმალური ზიდვის უნარის გამოსათვლელად საჭიროა შეკუმშული ზონის სიმაღლის  $x$ -ის გამოთვლა.

$$X = \frac{K_{1c}^{s1} A_s \sqrt{l_g} + \pi^2 \cdot b \left[ K_{1c}^b (h_0 - L_{crc}^h + a) + K_{11c}^b a_{crc}^h \sqrt{0,0625 \cdot d} \right]}{\pi^2 \cdot b (K_{1c}^b + K_{11c}^b) \sqrt{0,0625 d}}; \quad (51)$$

$$\begin{aligned}
X & = \frac{27,5 \cdot 0,004413 \cdot 1 + 3,14^2 \cdot 1,0 \left[ 0,42(0,45 - 0,093 + 0,05) + 4,86 \cdot 0,53 \cdot 10^{-4} \right]}{3,14^2 \cdot 1,0(0,45 + 4,86) \sqrt{0,0625 \cdot 0,0017}} \\
& \frac{\sqrt{0,0625 \cdot 0,00017}}{0,0017} = 0,23 \text{ მ},
\end{aligned}$$

სადაც  $K_{1c}^s = 27,5 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2}$ ;  $K_{11c}^s = 4,1 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2}$ ;

$X_i \approx a$  – დამცავი შრის ტოლად აიღება.

კვეთის ზიდვის უნარი გამოითვლება კვეთის დაძაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის III სტადიის დროს

$$\begin{aligned}
M_{\text{კვთ}} & = \frac{4,86 \sqrt{3,14^3} \cdot 1,0 \left[ \left( 0,05 \cdot \frac{0,00053}{2} \right) \left( 45 - \frac{2 \cdot 0,05 - 0,00053}{4} \right) + \right. \\
& \left. + \left( 0,23 - 0,05 - \frac{0,00053}{2} \right) \left( 0,45 - 2 \cdot 0,00053 + \frac{2 \cdot 0,05 + 0,00053}{4} \right) \right]}{\sqrt{l_{ge}}} - \\
& - \frac{0,42 \cdot \sqrt{3,14^3} \cdot 1,0}{\sqrt{l_{ge}}} (0,5 - 0,23 - 0,091 + 0,05) \frac{0,45 - 0,23 + 0,09 + 0,05}{2}; \\
M_{\text{კვთ}} & = \frac{4,86 \cdot 1,77 \cdot 1,0}{1} [0,000013(0,45 - 0,024) - 0,22 \cdot 0,424] - \frac{0,42 \cdot 1,77 \cdot 1,0 \cdot 0,229}{1} \times \\
& \times 0,0845 = 0,024 \text{ მგნ} \cdot \text{მ} = 24 \text{ კნ} \cdot \text{მ} > 10,978 \text{ კნ} \cdot \text{მ}.
\end{aligned}$$

5) გამოვთვალოთ ბზარწარმოქმნის მომენტი

$$M_{crc}^{rv} = K_{1c} \cdot W_{crc} \cdot K_{pc}, \quad (52)$$

სადაც  $W_{crc}$  – დაყვანილი კვეთის წინალობის მომენტი.

$$W_{crc} = I_{crc} \cdot A_{crc} / S_{crc} ,$$

$n$  – დრეკადობის მოდულების ფარდობა  $n = \frac{E_s}{E_b}$

$$A_{crc} = A^b + A_s \cdot n = 1,0 \cdot 0,5 + 0,004413 \cdot 5,55 = 0,52 \text{ მ}^2,$$

$$n = \frac{20 \cdot 10^4}{36,0 \cdot 10^3} = 5,55 ,$$

სადაც  $E_s = 20 \cdot 10^4$ ;  $E_b = 36 \cdot 10^3$ .

ჰორიზონტალური ბზარი წარმოიქმნება მხები ძალების მიხედვით  $\tau$ . ბზარის გაზრდა ხდება შიგა ძალების ენერჯის მეშვეობით, რომელიც მოდებულია ბზარის წვეროზე. მას ეწინააღმდეგება ბეტონი ( $K_{1c}^b$ ) და განივი არმატურა ( $K_{1c}^{sh}$ ).

გამოვთვალოთ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი  $K_{1c}^{sh}$

$$K_{1c}^{sh} = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi^2 \left( 4 \cdot K_{1c}^{st} / \pi^2 \sqrt{a} \right) (A_w - d) (0,5 - \varepsilon_{11}) \lambda^{3/2}}{2b \cdot \sqrt{L_{crc}^h}} ; \quad (53)$$

$$K_{1c}^{sh} = \frac{1,73 \cdot 9,85 \left( 4 \cdot 27,5 / 3,14^2 \sqrt{0,05} \right) (0,28 - 0,025) (0,5 - 0,077) \sqrt{0,186}}{2 \cdot 1,0 \sqrt{0,093}} =$$

$$= 0,38 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2}.$$

სადაც  $A_w$  არის 1 მ-ის სიგანე მოთავსებული საკიდების ფართობი  $\Phi 6$

$$A_s = 0,28 \text{ სმ}^2;$$

$d$  – მუშა ღეროების დიამეტრი;

$\varepsilon$  – კოეფიციენტი  $\varepsilon = 0,077$ .

$$\lambda = L_{crc}^h / h = 0,093 / 0,5 = 0,186 .$$

გამოვთვალოთ ბზარის კრიტიკული სიგრძე

$$L_{crc}^{h_{cr}} = \sqrt{\frac{(K_{1c}^b + K_{1c}^{sh}) h^{3/2} + \sqrt{6M}}{\sqrt{6bh}}} ; \quad (54)$$

$$L_{crc}^{h_{cr}} = \sqrt{\frac{(0,42 + 0,38) \cdot 0,5^3 + \sqrt{6 \cdot 9,88}}{\sqrt{6 \cdot 1,0 \cdot 0,5}}} = 4,39 \text{ მ}.$$

გამოვთვალოთ ბზარის შემდგომი ცვლილება დროში

$$\Delta L_{crc}'(t, \tau) = L_{crc}^{h_{cr}} - L_{crc}^h = 4,39 - 0,093 = 4,3 \text{ მ}.$$

გამოთვლით სიმბოლოები შემდეგი გამოსახულებით  $C_c^b(\infty, \tau)$  და  $\gamma$ .

სადაც  $C_c^b(\infty, \tau)$  – ცოცვადობა და გამოითვლება ფორმულით

$$C_c^b(\infty, \tau) = a \left( \frac{56\sqrt{l g'}}{\pi^{3/2} \cdot K_{11c}^b} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4}; \quad (55)$$

$$C_c^b(\infty, \tau) = 0,8 \left( \frac{56 \cdot 1}{\sqrt{3,14^3} \cdot 4,86} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ მგპ.}$$

სადაც  $a = 0,8$  მძიმე ბეტონისათვის.

გამოვთვალოთ რეზერვუარის 1 მ სიგანის ფილის სიმაღლით 5,7 მ წინაღობის მომენტი

$$W_{rcd} = \frac{J_{rcd} \cdot A_{rcd}}{S_{rcd}}; \quad (56)$$

$$n = E_s / E_b = \frac{20 \cdot 10^4}{36 \cdot 10^3} = 5,55.$$

ფართობი  $A_{rcd} = 0,5 \cdot 5,7 + 0,004413 \cdot 5,55 = 2,87 \text{ სმ}^2$ .

გამოვთვალოთ დაყვანილი კვეთის სტატიკური მომენტი

$$S_{rcd} = 0,5 \cdot 5,7 \cdot \frac{5,7}{2} + 5,55 \cdot 0,004413 = 8,14 \text{ მ.}$$

გამოვთვალოთ დაყვანილი კვეთის წინაღობის მომენტი კედლის მიმართ:

$$W_{rcd} = S_{rcd} / y_0; \quad (57)$$

სადაც

$$y_0 = \frac{S_{rcd}}{A_{rcd}} = \frac{8,14}{2,87} = 2,83 \text{ მ'}$$

$$W_{rcd} = 8,14 / 2,83 = 2,87 \text{ სმ}^3.$$

გამოვთვალოთ ელემენტის ცოცვადობა დაარმატურების კოეფიციენტის გათვალისწინებით  $\beta = 0,003$ .

$$\begin{aligned} C'(\infty, \tau) &= (1 - 0,7)^3 \sqrt{E_b \mu / E_s} \cdot C_c^b(\infty, \tau) = \\ &= (1 - 0,7)^3 \sqrt{36000 \cdot 0,003 / 200000} \cdot 1,15 \cdot 10^{-4} = 0,329 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

ზხარწარმოქმნის მომენტი ტოლია

$$M_{crc} = K_{1c}^b \cdot W_{rcd} \pi^{3/4} / \sqrt{l g} = 0,42 \cdot 0,304 \cdot \sqrt{3,14^3} / 1 = 606 \text{ კნ.მ.}$$

6) გამოვთვალოთ კედლის დეფორმაცია (გამოღუნვა) რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით.

გამოვთვალოთ ძაბვა გაჭიმულ არმატურაში

$$\sigma_s = \frac{4 \cdot K_{1c}^{sd}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{4 \cdot 27,5}{\sqrt{3,14 \cdot 0,05}} = 277,7 \text{ კნ.}$$

გამოვთვალოთ კოეფიციენტი  $K_{1c}^s$

$$K_{1c}^s = \frac{60 \cdot A_s}{b \sqrt{\pi \cdot a}} \cdot \gamma(a_1) = \frac{60 \cdot 0,004413}{1,0 \sqrt{3,14 \cdot 0,05}} = 0,0015 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2},$$

სადაც  $a_1 = a/h = 0,05/0,5 = 0,1$ .

ნორმალური ზზარის სიგრძე  $L_0 = 0,182 \text{ მ}$  (მაგ. 2).

$$L_{crc}^v = L_0 \cdot h = 0,64 \cdot 0,5 = 0,38.$$

ზზარის გახსნის სიგანე (ნორმალური ზზარის)

$$a_{crc}^{bv} = \frac{M^2 \gamma^2(L_0) \cdot (1 - \nu^2) (L_{crc}^v - a) \sqrt{l g'}}{\pi^{3/2} \cdot b^2 \cdot h^2 \cdot E_b K_{1c}^b \cdot L_{crc}^v}; \quad (58)$$

$$a_{crc}^{bv} = \frac{0,0988 \cdot 1,92(1 - 0,2^2)(0,384 - 0,05) \sqrt{1}}{\sqrt{3,143} \cdot 1,0^2 \cdot 0,5 \cdot 36 \cdot 10^3 \cdot 0,42 \cdot 0,384} = 7,74 \cdot 10^{-4},$$

სადაც  $\gamma^2(L_0) = \sqrt{0,4L_0} (1,99 - 2,47L_0 + 12,97L_0^2 - 23,17L_0^3 +$

$$+ 24,8L_0^4 = \sqrt{0,4 \cdot 0,182} (1,99 - 2,47 \cdot 0,182 + 12,97 \cdot 0,182^2 - 23,17 \cdot 0,182^3 +$$

$$+ 24,8 \cdot 0,182^4) = 0,072 \cdot 1,99 - 0,45 + 0,43 - 4,22 + 0,027) = 2,22 \cdot 10^{-4}.$$

ზზარის სიგანე შეკუმშულ ზონაში

$$a_{crc}^{sv} = \frac{2N_s}{\pi \cdot b \cdot E_b} \Gamma(L_{crc}^v, a); \quad (59)$$

სადაც  $N_s = \sigma_s \cdot A'$  ძაბვა შეკუმშულ არმატურაში 6Φ6A240  $A'_s = 1,7 \text{ სმ}^2$ ;

$$\sigma_s = K^s / \sqrt{0,0625 \cdot d} \sqrt{\pi^3}.$$

$$\sigma_s = \frac{27,5}{\sqrt{3,14^3} \sqrt{0,0625 \cdot 0,06}} = 83,33 \text{ კნ.}$$

$$N_s = \sigma_s \cdot A_s = 83,33 \times 49,09 = 408,33 \text{ კნ.}$$

ზზარის სიგანე შეკუმშულ ბეტონში

$$a_{\delta\delta}^{sv} = 2 \cdot N / \pi \cdot b \cdot E_b \cdot \ln \frac{(K_{1c}^{sh})^4 - \sqrt{(K_{1c}^{sh})^2 (K_{1c}^{sh} - a^2)}}{(K_{1c}^{sh})^3 \sqrt{(K_{1c}^{sh})^2 (K_{1c}^{sh} - a^2)}}; \quad (60)$$

$$a_{\delta\delta}^{sv} = \frac{2 \cdot 408,33}{3,14 \cdot 1,0 \cdot 36 \cdot 10^3} \ln \frac{0,380^4 - \sqrt{0,380^2 (0,380 - 0,05)^2}}{0,380^3 \sqrt{0,380^2 (0,380 - 0,005)^2}} = 8,1 \cdot 10^{-4}.$$

განივი ძვრის ბზარის სიგრძე შეკუმშული არმატურის გათვალისწინებით

$$L_{crc}^h = \frac{0,285\sqrt{3}h^{3/2} \cdot \pi^{3/2} \sqrt{K_{1c}^b \cdot K_{11c}^b \cdot d}}{2\sqrt{2}K_{11c}^b \cdot h \cdot \sqrt{l g}}; \quad (61)$$

$$L_{crc}^h = \frac{0,285 \cdot 1,73 \cdot \sqrt{0,5^3} \cdot \sqrt{3,14^3} \cdot \sqrt{0,42 \cdot 4,86 \cdot 0,06}}{2 \cdot 1,41 \cdot 4,86 \cdot 0,5 \cdot 1} = 0,051 \text{ მ.}$$

გამოვთვალოთ კედლის გაღუნვა (დეფორმაცია) შემდეგი ფორმულით, ავიღოთ რეზერვუარი კედლის სიმაღლე  $H = 5,7 \text{ მ}$

$$f = \frac{a_{crc}}{2(L_{crc}^v - a_{crc}^v)} \cdot \frac{H}{2} + a_{crc}^v; \quad (62)$$

$$f = \frac{7,74 \cdot 10^{-4}}{2(0,386 - 4,74 \cdot 10^{-4})} \cdot \frac{5,7}{3} + 7,74 \cdot 10^{-4} = 0,0014 \text{ მ.}$$

ნორმების მიხედვით რეზერვუარის კედლის დასაშვები დეფორმაცია ტოლია  $H/250 = 570,0/250,0 = 2,28 \text{ სმ} = 0,0228 \text{ მ.}$

მიღებული  $f = 0,0014 \text{ მ} < 0,0228 \text{ მ.}$

პირობა დაკმაყოფილებულია.

რეზერვუარის ხანგამძლეობის დასადგენად გამოვთვალოთ ცოცვადობის კოეფიციენტი  $A$  და  $B$

$$A = \frac{\gamma(a)G'(\infty, \tau)E_B(1-\nu)l_{lg}}{24\pi^2(K_{1c}^b)^2(1-\nu^2)} \quad (63)$$

სადაც  $M = 10,979 \text{ კნმ}$  მომქმედი მომენტი;  $W_{reg} = 2,87 \text{ სმ}^3$ -წინაღობის მომენტი.

$$G'(\infty, \tau) = 1,15 \cdot 10^{-4} = 0,0115 \text{ მგპ.}$$

$$E_b = 36 \cdot 10^3 \text{ მგპ.}$$

$$\nu = 0,2,$$

$$K_{1c}^b = 0,36,$$

$$K_{11c}^b = 3,69.$$

$$A = 0,54 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0115 \cdot 36 \cdot 10^3 (1 - 0,2^2) / 24 \cdot 3,14^2 \cdot 9,36^2 (1 - 0,2^2) = \\ = 0,0022356 / 29,44 = 0,0075,$$

სადაც

$$\gamma = 0,03 \cdot M \sqrt{l g} / \pi^{3/2} \cdot K_{11c}^b \cdot W_{reg} = 0,03 \cdot 0,010979 / \sqrt{3,14^3} \cdot 3,69 \cdot 2,87 = \\ = 0,00032 / 58,92 = 0,0000054 = 0,54 \cdot 10^{-5}.$$

$$B = 2 \cdot E_b G^b(\infty, \tau) = 2 \cdot 36 \cdot 10^3 \cdot 1,06 \cdot 10^{-4} = 7,63 \text{ მ} \quad (64)$$

სადაც

$$G^b(\infty, \tau) = a \left( \frac{56\sqrt{lg}}{\pi^{3/2} K_{11C}^b} - 0,63 \right) 10^{-4} =$$

$$= 0,8 \left( \frac{56 \cdot 1}{\sqrt{3,14^3} \cdot 3,69} - 0,63 \right) 10^{-4} = 1,06 \cdot 10^{-4} \quad (65)$$

სადაც  $a = 0,8$  მძიმე ბეტონისათვის.

გამოვთვალოთ ზზარის წაგრძელება ერთეულ დროში

$$\Delta b_{crc}^z(t, \tau) = l_{crc}^{hcr} - l_{crc}^h \quad (66)$$

$$l_{crc}^{hcr} = \sqrt{(K_{1C}^b + K_{1c}^{sh} \cdot h^{3/2} + \sqrt{b} \cdot b \cdot h \cdot \rho)} \quad (67)$$

სადაც

$$l_{cr}^{hcr} = \sqrt{(0,42 + 27,5)\sqrt{0,5^3} + \sqrt{b} \cdot 100 \cdot 0,5 \cdot 0,024} =$$

$$= \sqrt{27,92 \cdot 0,35} = 2,4 \cdot 100 \cdot 0,5 \cdot 0,024 = \sqrt{9,77 + 2,88} = 0,473 \text{ მ.}$$

სადაც  $b = 100$  მ;  $h = 0,5$  მ;  $\rho = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,024$  აიღება.

გამოვთვალოთ წაგრძელება

$$\Delta l_{crc}^r(t, \tau) = 0,473 - 0,093 = 0,38 \text{ მ}$$

სადაც  $l_{crc}^h = 0,093$  მ (ფორმულა 31).

ზზარის წაგრძელება ერთეულ  $t$  დროში  $\Delta l_{crc}^r = 0,38$  მ. რეზერვუარის ხანგამძლეობის დასადგენად ვისარგებლოთ ჩვენს მიერ შემოთავაზებულ ფორმულაში ზემოთ მიღებული სიდიდეების ჩასმით, მივიღებთ

$$\Delta l_{crc}^r = 0,38 \text{ მ.}$$

$$0,38 = 0,075 \left\{ 0,442 \left[ 0,54 \cdot 10^{-5} (t - 13140) + \lg(1 + 7,63(1 - l^{-0,54 \cdot 10^{-5} (t-28)})) \right] + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot 0,36 \cdot 3,12 \cdot \lg 13140 \times \int_{28}^t \frac{dt}{\lg t \sqrt{1 + 7,63(1 - e^{-0,54 \cdot 10^{-5} (t-28)})}} + (3,12 \lg 28)^2 \right\}.$$

$$\Delta l_{crc}^r = 0,033 \left\{ 0,442 \left[ 4,3 \cdot 10^{-2} (t - 28) + \lg(1 + 8,28)(1 - l^{-4,3 \cdot 10^{-2} (t-28)}) \right] + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot 0,32 \cdot 3,12 \cdot \lg 28 \int_{28}^t \frac{dt}{\lg t \sqrt{1 + 8,28(1 - e^{-4,3 \cdot 10^{-2} (t-28)})}} + \right.$$

$$\left. + (3,12 \lg 28)^2 \int_{28}^t \frac{dt}{(\lg t)^2} \right\}.$$

განტოლების ამოხსნის შემდეგ დავადგინეთ რეზერვუარის ასაკი, რომელიც ტოლია 32.5 წ.

## პროცედურა და ფუნქცია

$f[t_]:= -0.38+0.0075(0.442(0.54*10^{-5}(t-28)+\text{Log}[1+7.63(1-0.54*10^{-5}t)^{0.54*10^{-5}t}]))+2.036$

$3.12*\text{Log}[10,28]*\text{NIntegrate}[1/(\sqrt{1-7.63(1-0.54*10^{-5}t)^{0.54*10^{-5}t}}),\{z,28,t\}]+(3.12\text{Log}[10,28])^2\text{NIntegrate}[1/(\text{Log}[10,z])^2,\{z,28,t\}]$

შუახვედრებისმეთოდი[a\_,b\_,ε\_] := Module[{x1,x2,x3,k},

x1=a; x2 = b; k=0;

While[Abs[f[(x1+x2)/2]] > ε,

x3=(x1+x2)/2;

k++;

If[f[x1] f[x3]< 0, x2 = x3, x1 = x3]; პროცედურა და ფუნქცია

$f[t_]:= -0.38+0.0075(0.442(0.54*10^{-5}(t-28)+\text{Log}[1+7.63(1-0.54*10^{-5}t)^{0.54*10^{-5}t}]))+2.036$

$3.12*\text{Log}[10,28]*\text{NIntegrate}[1/(\sqrt{1-7.63(1-0.54*10^{-5}t)^{0.54*10^{-5}t}}),\{z,28,t\}]+(3.12\text{Log}[10,28])^2\text{NIntegrate}[1/(\text{Log}[10,z])^2,\{z,28,t\}]$

შუახვედრებისმეთოდი[a\_,b\_,ε\_] := Module[{x1,x2,x3,k},

x1=a; x2 = b; k=0;

While[Abs[f[(x1+x2)/2]] > ε,

x3=(x1+x2)/2;

k++;

If[f[x1] f[x3]< 0, x2 = x3, x1 = x3];

];

{k,(x1+x2)/2}

]

შუახვედრებისმეთოდი2[a\_,b\_,ε\_] := Module[{x1,x2,x3,k},

x1=a; x2 = b; k=0;

While[True,

x3=(x1+x2)/2;

If[Abs[f[x3]] > ε,Return[{k,x3}]];

k++;

If[f[x1] f[x3]< 0, x2 = x3, x1 = x3];

];

]

## ამოხსნა

შუახვედრებისმეთოდი[30.,65.,10<sup>-7</sup>]  
{22,32.4007}

შუახვედრებისმეთოდი2[30.,65.,10<sup>-7</sup>]  
{22,32.4007}

f[32.4007]

2.60979×10<sup>-6</sup>

t=32.5 წ.

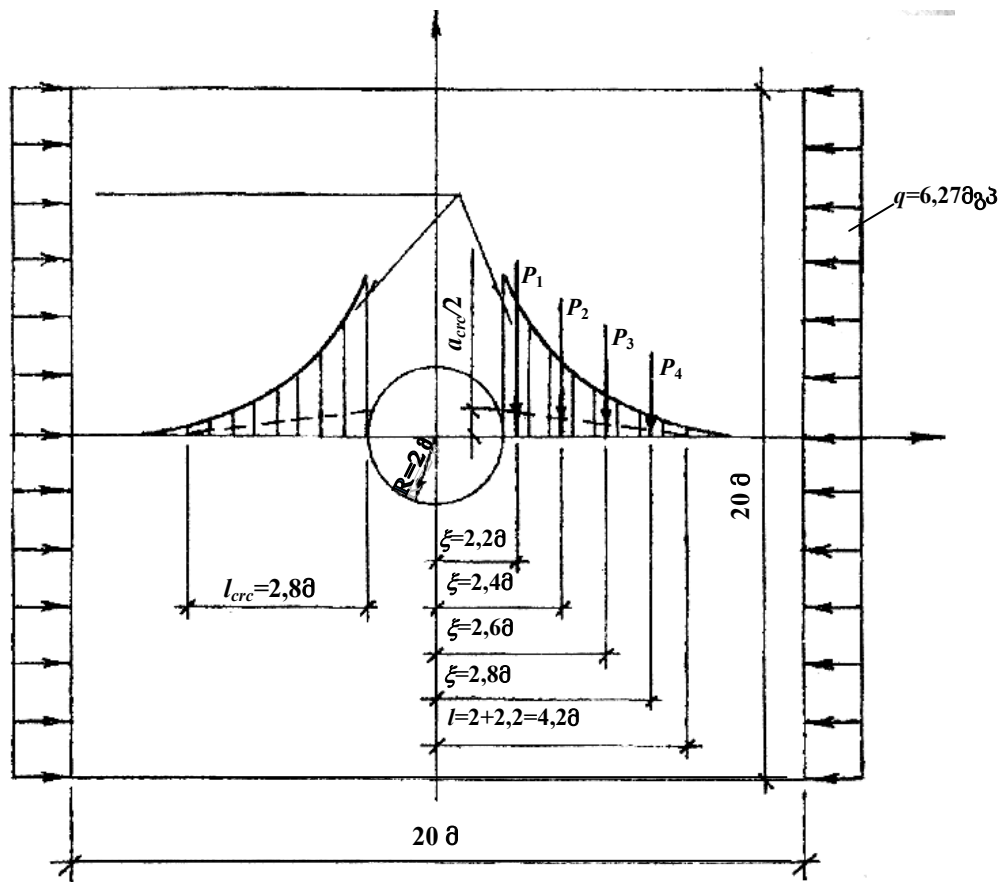


### 3.2. „ნატანებ ჰესის“ წყლის გადამყვანი ღიობის გაანგარიშება და კონსტრუირება

ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ რღვევის მექანიკის მეთოდით რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება ამაღლებს ბზარმედევობას, სიმტკიცეს და ხანგამძლეობას.

ჩვენი მიზანია გავიანგარიშოთ „ნატანებ ჰესის“ წყლის გადამყვანი ღიობი ბზარმედევობის უზრუნველყოფისათვის და მოვახდინოთ მისი სწორი კონსტრუირება. წყლის გადამყვანი ღიობი (ხვრელი) მოთავსებულია რკინაბეტონის ფილის სიბრტყეში (ნახ. 30). დასაშვები ბზარის გახსნა ღიობის ირგვლივ  $a_{\text{ბზ}}^{\text{max}} = 0,0002$  მ, ნორმალური მკუმშავი ძაბვის ინტენსივობა  $q_1 = 6,27$  მგპ აღებულია ჰესის გაანგარიშებიდან, რომესაც არანაირი კავშირი არ აქვს რღვევის მექანიკის გაანგარიშების მეთოდთან. დატვირთვა ხვრელზე მოდებულია თანაბრადგანაწილებულად, ბეტონი B40 კლასის,  $R_b = 22$  მგპ,  $R_{bt} = 1,4$  მგა,  $E_b = 36000$  მგპ.

$$R_{b,ser} = 29,0 \text{ მგპ}; R_{bt,ser} = 2,1 \text{ მგპ.}$$



ნახ. 30. გაანგარიშების სქემა

გამოვთვალოთ ძაბვის კონცენტრაციის კოეფიციენტი

$$K_{IC} = 0,018 + 0,500R_{bt} = 0,018 + 0,5 \cdot 1,4 = 0,718 \text{ მგპ}\cdot\text{მ}^{1/2}$$

სადაც  $K_{IC}$  – ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი ბეტონისათვის

$$K_{IC}^b = \frac{2 \cdot q \sqrt{\pi R(1-\delta_1)} \cdot \sqrt{1-(1-\delta_1)^{-4}}}{[1+(1+\delta_1)^2]^2},$$

სადაც  $\delta_1 = \ell$

$R$  – წრის (ხვრელის) რადიუსია = 2 მ;

$K_{IC}^b = K_{IC}$ , მაშინ

$$0,718 = \frac{2 \cdot 6,27 \sqrt{3,14 \cdot 2(1-\delta_1)} \sqrt{1-(1+\delta_1)^{-4}}}{[1+(1+\delta_1)^2]^2}.$$

მათემატიკური გამოთვლებით  $\delta_1 = 1,01$ ;  $R = 2,0$  მ ხვრელის რადიუსი, ზზარის სიგრძე  $l_{crc} = R \cdot \delta_1 = 2 \cdot 1,01 = 2,02$  მ.

გამოვთვალოთ ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი  $K_{IIIC}$

$$K_{IIIC} = 0,87 + 0,13R_b = 0,87 + 0,13 \cdot 22 = 3,73 \text{ მგპ}\cdot\text{მ}^{1/2}.$$

გამოვთვალოთ ბეტონის ცოცვადობის პარამეტრები

$$\begin{aligned} C(\infty, 0) &= a \left( \frac{56 \sqrt{l_{bg}}}{K_{IIIC} \pi^{3/2}} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4} = \\ &= 0,8 \left( \frac{56 \cdot 1}{3,73 \cdot \pi^{3/2}} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4} = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ 1/მგპ}, \end{aligned}$$

სადაც  $\sqrt{l_{bg}} = 1$ ;  $a = 0,8$  პროპორციულობის კოეფიციენტია მძიმე ბეტონისათვის;  $a = 1,0$  მსუბუქი ბეტონისათვის.

გამოვთვალოთ კოეფიციენტი  $\gamma$ , რომელიც დამოკიდებულია დატვირთვის ხანგრძლივ მოქმედებაზე

$$\gamma = 0,03 \frac{q \sqrt{l_{bg}}}{K_{IIIC} \cdot \pi^{3/2}} = 0,03 \frac{6,27 \cdot 1}{3,73 \cdot \pi^{3/2}} = 0,01 \text{ 1/წმ}.$$

გამოვთვალოთ მუდმივები A და B შემდეგი ფორმულები:

$$A = \frac{\pi \cdot C(\infty, 0) E_b K_{IC}^2 (1-\nu)}{24 R_{bt}^2 (1+\nu^2)} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 1,64 \cdot 10^{-4} \cdot 36000 \cdot 0,718^2 (1 - 0,2^2)}{24 \cdot 1,4^2 (1 + 0,2^2)} = 0,18,$$

სადაც  $\nu = 0,2$  აიღება ბეტონის შემადგენლობის მიხედვით

$$B = 2E_b C(\infty, 0) = 2 \cdot 36000 \cdot 1,64 \cdot 10^{-4} = 11,8.$$

ბზარის სიგრძე ხანგრძლივი დატვირთვის ზემოქმედებისას არმატურის გარეშე 30 დღის განმავლობაში

$$\begin{aligned} l_{crc}(30) &= l_{crc}^0 + \frac{A}{1+B} \left\{ \gamma t - \ln[1 + B(1 - e^{-\gamma t})] \right\} = \\ &= 2,1 + \frac{0,18}{1+11,8} \left\{ 0,01 \cdot 30 + \ln[1 + 11,8(1 - e^{-0,01 \cdot 30})] \right\} = 2,11 \text{ მ.} \end{aligned}$$

ბზარის გახსნის სიდიდის დასადგენად ვსარგებლობთ გაუსის რიცხვითი ინტეგრირების მეთოდით  $-4,2 \leq \xi \leq -2$  და  $2 \leq \xi \leq 4,2$ ; სადაც  $x$ -ის სიდიდე აიღება ნახაზის მიხედვით (ნახ. 31)

$$\begin{aligned} a_{crc}^0 &= \frac{2}{\pi E_b} \int_{-i}^i q(\xi) \Gamma(l, x_i, \xi) d\xi = \frac{2}{\pi \cdot 32500} \left[ \int_{-4,2}^{-2} 6,27 \left( 3 \frac{2^4}{\xi^4} - \frac{2^2}{\xi^2} \right) \Gamma(l, x_i, \xi) d\xi + \right. \\ &\quad \left. + \int_2^{4,2} 7,0 \left( 3 \frac{2^4}{\xi^4} - \frac{2^2}{\xi^2} \right) \Gamma(l, x_i, \xi) d\xi \right]. \end{aligned}$$

ჩავსვათ  $x_i$ -ის მნიშვნელობები ფორმულაში და გამოვთვალოთ  $a_{crc}^0$  ყოველი  $x$ -ისთვის, სადაც  $x_i$  წერტილის მდებარეობა განისაზღვრება არმატურის ბიჯის მიხედვით. ავიღოთ ბიჯი  $n=0,2$  მ, მაშინ ღიობის კიდიდან ყოველ 0,2 მ-ზე გვექნება  $x_1 = 2,2$  მ;  $x_2 = 2,4$  მ;  $x_3 = 2,6$  მ;  $x_4 = 2,8$  მ;

ბზარის გახსნის საწყისი სიდიდე  $x_i$  წერტილების შესაბამისად:

$$a_{crc}^0(2,2; y=0) = 0,00037 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^0(2,4; y=0) = 0,000356 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^0(2,6; y=0) = 0,0003115 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^0(2,8; y=0) = 0,0002492 \text{ მ}$$

ხანგრძლივი დატვირთვის მოქმედებისას ბზარის გახსნის სიდიდე ბეტონში გამოითვლება ფორმულით:

$$a_{crc}^b(x_i, y=0) = a_{crc}^0 [1 + E_b C(\infty, 0)(1 - e^{-\gamma t})]$$

მაშინ

$$a_{crc}^b(2,2; y=0)(30,0\text{დღე}) = 0,00037[1 + 36000 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} \times \\ \times (1 - e^{-0,010 \cdot 30})] = 0,000818 \text{ მ.}$$

ანალოგიურად გამოითვლება

$$a_{crc}^b(2,4; y=0)(30,0) = 0,000801 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^b(2,6; y=0)(30,0) = 0,000694 \text{ მ,}$$

$$a_{crc}^b(2,8; y=0)(30,0) = 0,000551 \text{ მ.}$$

ბზარის გახსნის სიგანე 1, 2, 3, 4 წერტილებში დასაშვებია  $a_{\text{გვ}} = 0,0002 \text{ მ}$ , რადგან ბზარის გახსნის სიდიდე აღემატება დასაშვებს, ამისათვის საჭიროა არმატურის მოთავსება ხვრელის ირგვლივ

$$a_{crc}^1 = 0,0002 - 2(1-1)0,2 \frac{0,0002}{2,2} = 0,0002 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^2 = 0,0002 - 2(2-1)0,2 \frac{0,0002}{2,4} = 0,00015 \text{ მ;}$$

$$a_{crc}^3 = 0,0002 - 2(3-1)0,2 \frac{0,0002}{2,6} = 0,0001 \text{ მ,}$$

$$a_{crc}^4 = 0,0002 - 2(4-1)0,2 \frac{0,0002}{2,8} = 0,00005 \text{ მ.}$$

იმისათვის, რომ გამოვთვალოთ არმატურაზე მომქმედი ძაბვა  $x_i$  წერტილში უნდა ამოვხსნათ განტოლებათა სისტემა. მასში შემავალი სიდიდეები მოცემულ ცხრილ 6-ში.

ცხრილი 6

$x_i$  და  $\xi_i$  კოორდინატების ფუნქციის  $G(4,2; x_i; \xi_i)$  მნიშვნელობა

$\xi$ $x_i, \text{მ}$	2,2	2,4	2,6	2,8	$a_{crc}^b(x_i; y)(t, \tau)$
2,2	-6,93	-6,12	-4,619	-3,94	0,000818
2,4	-6,42	-7,11	-5,78	-4,61	0,000801
2,6	-4,75	-6,24	-6,94	-6,11	0,000694
2,8	-3,8	-4,90	-6,08	-6,76	0,000551

$G(4,2; x_i; \xi_i)$  ფუნქციის მნიშვნელობები გამოთვლილია ინტერპოლაციის მეთოდით ფორმულის მიხედვით

$$a_{crc}^0 = \frac{2}{\pi \cdot E_b} \int_{b=1} q(\xi) \Gamma(l, x, \xi) d\xi,$$

სადაც

$$\Gamma(l, x, \xi) = \ln \frac{l^2 - x\xi \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}}{l^2 - x\xi + \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}},$$

სადაც  $l = l_{crc} + t$  (რადიუსი ხვრელის);

$x$  – აბსცისთა ღერძზე მანძილი, სადაც გამოითვლება ბზარის გახსნა;

$\xi$  – კოორდინატი, რომელიც იცვლება ინტერვალში  $-l \leq \xi \leq -R$ .

მიღებულ ფორმულებში  $x$ -ის და  $\xi$ -ის ჩასმის შედეგად მიღებულია  $\Gamma(l, x, \xi)$ -ის ფუნქციის სიდიდეები.

იმისათვის, რომ გავიგოთ ბზარის გახსნის სიდიდე  $P_1; P_2; P_3$  და  $P_4$

ძალის მოდების წერტილებში საჭიროა ამოვხსნათ განტოლებათა სისტემა, რომლის გამოსახულება ზოგადი სახით ასეთია:

$$\begin{cases} -\frac{4}{\pi E_b} [P_1 \Gamma(l; x_1; \xi_1) + P_2 \Gamma(l; x_1; \xi_2) + \dots + P_n \Gamma(l; x_1; \xi_n)] = a_{crc}^b(x_1; 0) - a_{crc}^1, \\ -\frac{4}{\pi E_b} [P_1 \Gamma(l; x_2; \xi_1) + P_2 \Gamma(l; x_2; \xi_2) + \dots + P_n \Gamma(l; x_2; \xi_n)] = a_{crc}^b(x_2; 0) - a_{crc}^2, \\ \dots \\ -\frac{4}{\pi E_b} [P_1 \Gamma(l; x_n; \xi_1) + P_2 \Gamma(l; x_n; \xi_n) + \dots + P_n \Gamma(l; x_n; \xi_n)] = a_{crc}^b(x_n; 0) - a_{crc}^1. \end{cases}$$

ჩავსვათ რიცხვითი სიდიდეები მოცემულ განტოლებაში და ამოვხსნათ  $P_1; P_2; P_3$  და  $P_4$

$$\begin{cases} -\frac{4}{\pi \cdot 36,0 \cdot 10^3} [6,93P_1 + 6,12P_2 + 4,619P_3 + 3,94P_4] = 0,000818 - 0,0002 \\ -\frac{4}{\pi \cdot 36,0 \cdot 10^3} [6,42P_1 + 7,11P_2 + 5,78P_3 + 4,61P_4] = 0,000801 - 0,00015 \\ -\frac{4}{\pi \cdot 36,0 \cdot 10^3} [4,75P_1 + 6,24P_2 + 6,94P_3 + 6,11P_4] = 0,000694 - 0,00010 \\ -\frac{4}{\pi \cdot 36,0 \cdot 10^3} [3,80P_1 + 4,90P_2 + 6,08P_3 + 6,76P_4] = 0,000551 - 0,00005. \end{cases}$$

ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შედეგად მივიღეთ

$$P_1 = 0,996 \text{ მეგ}\cdot\text{ნ}/\text{მ}; \quad P_2 = 0,86 \text{ მეგ}\cdot\text{ნ}/\text{მ}; \quad P_3 = 0,46 \text{ მეგ}\cdot\text{ნ}/\text{ნ}; \quad P_4 = 0,0534 \text{ მეგ}\cdot\text{ნ}/\text{მ}.$$

არმატურად გამოვიყენოთ A500c კლასის პერიოდული პროფილის არმატურა, რომლის  $E_s = 21 \cdot 10^4$  მგპ,  $R_s = 460$  მგპ.

დავუშვათ არმატურის დიამეტრი  $d = 32$  მმ, რომლისთვისაც ცხრილიდან ვიღებთ ძაბვის კონცენტრაციის კოეფიციენტს  $K_{IC}^{st} = 27,5$  მგპ, მაშინ ძაბვა განაპირა ღეროში იქნება:

$$\sigma_{s1} = \frac{4K_{IC}^{st}}{K_{crc} \sqrt{\pi d}} = \frac{4 \cdot 27,5}{1 \sqrt{\pi \cdot 0,032}} = \frac{110}{1 \sqrt{3,14 \cdot 0,032}} = \frac{110}{0,31} = 354,8 \text{ მგპ,}$$

სადაც  $K_{crc} = 1$ .

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 \cdot a_{crc}^2}{a_{crc}^1} = \frac{354,8 \cdot 0,0015}{0,0002} = 266,12 \text{ მგპ,}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_2 \cdot a_{crc}^3}{a_{crc}^1} = \frac{266,12 \cdot 0,0001}{0,0002} = 123,06 \text{ მგპ,}$$

$$\sigma_4 = \frac{\sigma_3 \cdot a_{crc}^4}{a_{crc}^1} = \frac{123,06 \cdot 0,0005}{0,0002} = 57,65 \text{ მგპ.}$$

არმატურის საჭირო ფართობი ძაბვის მიხედვით

$$A_{st} = \frac{P_i}{\sigma_{st}}.$$

აქედან

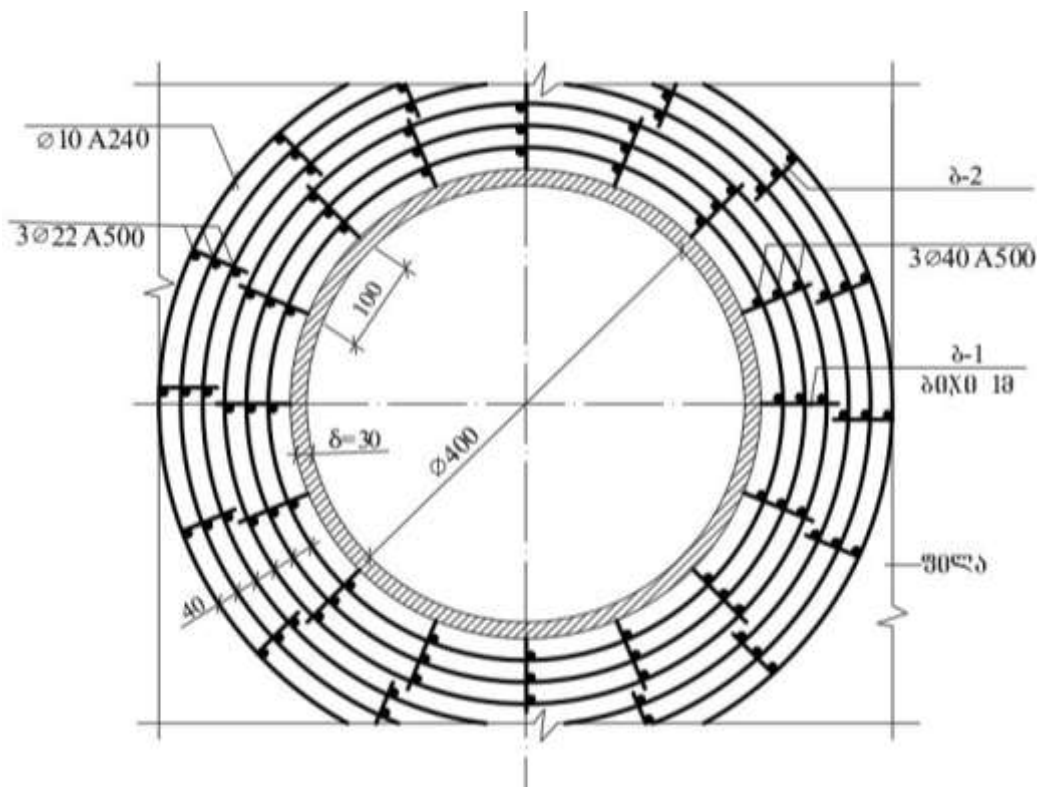
$$A_{s1} = \frac{P_1}{\sigma_{s1}} = \frac{0,996}{354,8} = 0,0028 \text{ მ}^2 = 28 \text{ სმ}^2;$$

$$A_{s2} = \frac{0,88}{266,5} = 0,0033 \text{ მ}^2 = 33,0 \text{ სმ}^2;$$

$$A_{s3} = \frac{0,46}{123,06} = 0,00374 \text{ მ}^2 = 37,4 \text{ სმ}^2.$$

ჩვენს მიერ აღებული 3Φ40-ის  $A_s = 37,3$  სმ<sup>2</sup>, რადგან არმატურის ფართობის სიდიდეებს შორია არ არის დიდი განსხვავება, ამიტომ სამივე დონეზე ვიღებთ ერთნაირ არმატურას 3Φ40 A500c  $A_s = 37,3$  სმ<sup>2</sup>.

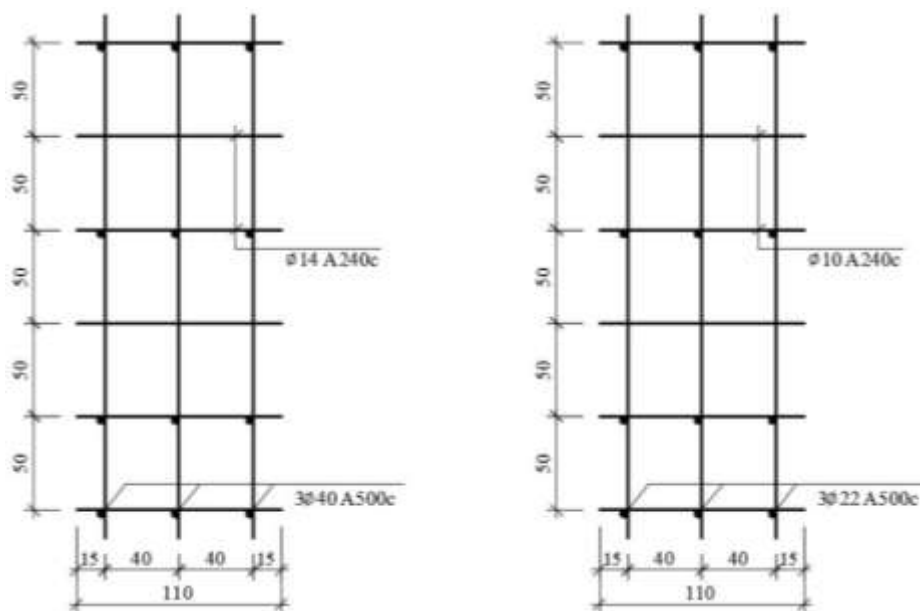
პირველი 3 ღერო აიღება Φ40 მმ, ხოლო დანარჩენი ღეროები აიღება შედარებით პატარა დიამეტრის Φ22 A500c. ღეროების რაოდენობა განისაზღვრება ბზარის სიგრძის მიხედვით  $l_{გზ} = 2,2$  მ. მილის შიგა კიდიდან (იხ. ნახ. 31) წრიულ ღეროებს შორის მანძილი აიღება 40 მმ. ე.ი.  $220/40=55$  ცალი ღერო. ბადე პირველი სამი არმატურის (იხ. ნახ. 32)



ნახ. 31. წყლის გადამყვანი მილის ღიობის კონსტრუირება

ბ - 1

ბ - 2



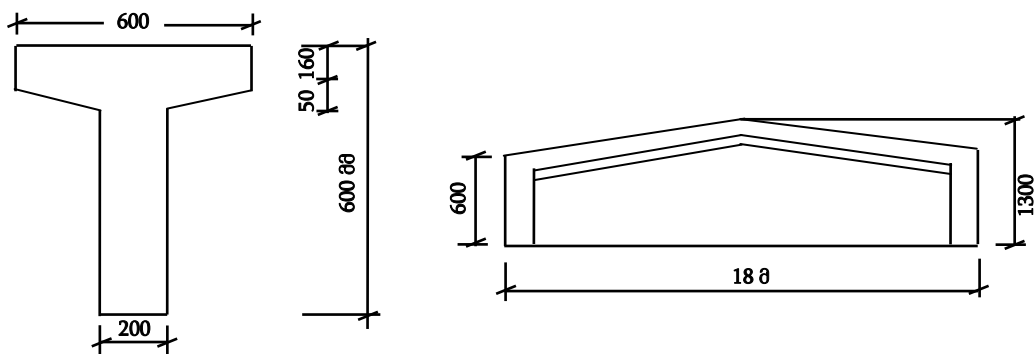
ნახ. 32. წყლის გადამყვანი მილის ღიობის დაარმატურება  
ბ-1 და ბ-2-ით

### 3.3. სამანქანო ნაწილში მოთავსებული გადახურვის რკინაბეტონის კოჭის გაანგარიშება და კონსტრუირება

სამანქანო ნაწილის გადახურვის რკინაბეტონის კოჭი არის ტესტბრი მოხაზულობის, ორქანობიანი შემდეგი ზომის;  $l=18$ მ, B40 კლასის, წინასწარდაძაბული არმატურით 50Ø5A500c კლასის არმატურა;  $A_s = 117,6$  სმ<sup>2</sup>, საწყისი დაბვა  $P_0 = 10,12$  კნ, დაუძაბავი არმატურა 2Ø14A240c კლასის  $A_s = 3,08$  სმ<sup>2</sup> და შეკუმშული ღერო 2Ø8A240c კლასის  $A_s = 1,01$  სმ<sup>2</sup>. განივი არმატურა Ø8A240c კლასის, საკიდებს შორის  $l/4$  მანძილზე  $S = 15$ სმ, ხოლო მაღში  $S_{max} = 20$ სმ.

საანგარიშო დატვირთვა კოჭის წონის გათვალისწინებით  $q = 10,12$  კნ/მ.

საჭიროა კოჭის გაანგარიშება დეფორმაციაზე რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით.



ნახ. 33. გადახურვის კოჭის გეომეტრიული ზომები

1) გამოვთვალოთ ძალები კოჭის კვეთებში:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{10,12 \cdot 18^2}{8} = 409,8 \text{ კნ}\cdot\text{მ.}$$

დაბვა გაჭიმულ არმატურაში

$$\sigma_s = \frac{4K_{IC}^{st}}{K_{cr} \sqrt{\pi d}} = \frac{4 \cdot 42,1}{\sqrt{\pi \cdot 0,005}} = \frac{168,4}{\sqrt{3,14 \cdot 0,05}} = \frac{168,4}{0,396} = 425,25 \text{ მგპ,}$$

სადაც  $K_{cr} = 1$ .  $K_{IC}^{st}$  – აიღება მე-7 ცხრილიდან.

არმატურის კლასის მიხედვით  $K_{IC}^{st} = 42,1$ .



ნორმატიული სიდიდე ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტები  
ბეტონისა და არმატურის კლასის მიხედვით

ბეტონის კლასი $K_c$	B10	B12,5	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B60
$K_{lc}^b$	0,16	0,20	0,22	0,28	0,32	0,36	0,40	0,42	0,45	0,52	0,61
$K_{llc}^b$	1,81	2,24	2,58	3,17	3,34	3,69	4,52	4,86	5,16	5,44	5,91
არმატურის კლასი $K^{st}$	A240c	A6005	A600c	Bp-1	B-II	Bp-2					
$K_{lc}^{st}$	22,0	27,5	51,4	28,0	48,4	42,1					
$K_{llc}^{st}$	32,8	41,1	76,7	87,6	87,6	86,7					

გამოვთვალოთ ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი  $K_{lc}^s$   
ფორმულით დაუძაბავი არმატურისათვის  $2\varnothing 14 A_s = 3,02 \text{ სმ}^2$ .

$$K_{lc}^s = \frac{60 A_s}{b \sqrt{\pi d}} Y(a_1) = \frac{60 \cdot 0,000302}{0,20 \sqrt{\pi \cdot 0,014}} \left( \frac{0,93}{\sqrt{1-0,074}} + \frac{1}{\sqrt{1-0,074^2}} - 0,93 \right) =$$

$$= 0,26 \text{ მკპ}\cdot\text{მ}^{1/2},$$

სადაც  $a = 0,1 \text{ მ}$  დამცავი შრე,  $A_{sp} = 0,00198 \text{ მ}^2$  დაუძაბავ არმატურასთან ერთად.

$$a_1 = a/h = 0,1/1,3 = 0,074.$$

გამოვთვალოთ  $K_{lc}^s$  – ძაბვის ინტენსივობის კრიტიკული კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს წინასწარდამაბულ არმატურის ბზარის გაჩენის შემაკავებელ თვისებას  $A_{sp} = 0,00198 \text{ მ}^2$ -ის;

$$K^{sp} = \frac{2 \Delta \sigma_s A_{sp}}{b \sqrt{\pi a_{sp}}} Y(a_{1sp}) = \frac{2 \cdot 100 \cdot 0,00198}{0,2 \sqrt{\pi \cdot 0,130}} \times$$

$$\times \left( \frac{0,93}{\sqrt{1-0,130}} + \frac{1}{\sqrt{1-0,130^2}} - 0,93 \right) = 2,74 \text{ მკპ}\cdot\text{მ}^{1/2},$$

სადაც  $a_{1,sp} = 0,170$ ,  $a_{1,sp} = a_{sp}/h = 0,170/1,3 = 0,130$ .

გამოვთვალოთ ნორმალური ბზარის სიგრძე, რომელიც აღიძვრება მომენტის მოქმედებით.

$$l_{crc}^v = \frac{M^2 Y_l^2(a_{sp})(2\pi - 1)^2}{4(K_{IC}^b + K_{IC}^s + K_{IC}^{sp})^2 b^2 h \cdot \pi^2} =$$

$$= \frac{0,409,8^2 (\sqrt{\pi} - 0,130 - 1)^2 (2\pi - 1)^2}{4(0,42 + 0,28 + 2,84)^2 \cdot 0,20^2 \cdot 1,3 \cdot 3,14^2} = 0,51 \text{ მ.}$$

მაბვა შეკუმშულ არმატურაში ( $2\Phi 10A240c$   $A_s = 1,56$  სმ<sup>2</sup>,  $K_{IC}^{st} = 22,0$ )

$$\sigma_{sc} = \frac{4K_{IC}^{st}}{K_{crc} \sqrt{\pi d'}} = \frac{4 \cdot 22}{1 \cdot \sqrt{3,14 \cdot 0,010}} = 382 \text{ მგპ.}$$

ნორმალური ძალა

$$N = \sigma_{st} \cdot A'_s = 382 \cdot 0,00198 = 0,756 \text{ ნ} = 75,6 \text{ კნ.}$$

ნორმალური  $N$  ძალა იწვევს ჰორიზონტალურ ბზარს.

2) ბზარის სიგრძე

$$l_{crc}^h = \frac{(\pi^{3/2} \sqrt{K_{IC}^b K_{IC}^b} h_w b - N_{sc} \sqrt{l_{bg}}) h}{2\sqrt{2} K_{IC}^2 b \sqrt{h l_{bg}} - 7,8 (K_{IC}^b K_{IC}^b h_w b - N_{sc} \sqrt{l_{bg}})} =$$

$$= \frac{(\pi^{3/2} \sqrt{0,42 \cdot 4,86} \cdot 0,2 \cdot 0,20 - 0,756) 1,3}{2\sqrt{2} \cdot 4,86 \cdot 0,2 \sqrt{1,3} - 7,8 (\pi^{3/2} \sqrt{0,42 \cdot 4,86} \cdot 0,20 \cdot 0,2 - 0,756)} = 0,47 \text{ მ.}$$

ბზარის გახსნის სიდიდე არმატურის შემაკავებელი გავლენის გარეშე

$$a_{crc}^v = \frac{M^2 Y^2(l_0)(1 - \nu^2)(l_{crc}^v - a_{sp}) \sqrt{l_{bg}}}{\pi^{3/2} b^3 h^3 E_b K_{IC}^b l_{crc}^v} =$$

$$= \frac{409,8^2 \cdot 1,22^2 (1 - 0,2^2) (0,51 - 0,170) \cdot 1}{\sqrt{3,14^2} \cdot 0,20^2 \cdot 1,3^3 \cdot 36 \cdot 10^3 \cdot 0,42 \cdot 0,51} = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ მ,}$$

სადაც  $Y(l_0) = 1,22$ ,  $l_0 = l_{crc}^v / h = 0,51 / 1,3 = 0,39$ .

არმატურა აკავებს ბზარის გახსნას, იწვევს მის დახურვას სიდიდით

$a_{crc}^{sv}$ , რომელიც გამოითვლება ფორმულით

$$a_{crc}^{sv} = \frac{2N_s}{\pi b E_b} \Gamma(\Gamma_{crc}^v, a_{sp}) = \frac{2 \cdot 915,6 \cdot 0,00198}{3,14 \cdot 0,2 \cdot 36 \cdot 10^3} = 6,69 \cdot 10^{-5} \text{ მ,}$$

მაშინ  $a_{crc}^v = a_{crc}^{bv} - a_{crc}^{sv} = 1,78 \cdot 10^{-4} - 6,69 \cdot 10^{-5} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ მ} = 0,00080 \text{ მ} = 0,080 \text{ მმ.}$

ექსპერიმენტებით მიღებული სიდიდე  $a_{crc}^v = 0,15$  მმ, ხოლო

ნორმებით მიღებული სიდიდე  $a_{crc}^v = 0,04$  მმ.

განივი ძვრის ზხარის გახსნის სიდიდე, არმატურის შემაკავებელი გავლენის გარეშე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$a_{crc}^{bh} = a_{crc}^{bhl} + a_{crc}^{bgII} = \frac{\pi^{s/2} K_{IC}^b l_{crc}^h (1-v^2)}{E_b \sqrt{l_{bg}}} (1+1,1418\lambda^2 - 0,6048\lambda^4)^2 +$$

$$+ \frac{2K_{IIc}^b}{\pi^{3/2} \sqrt{l_{crc}^h} E_b} \int_{-l_{crc}^h}^{l_{crc}^h} \Gamma(l_{crc}^h, \xi) d\xi = \frac{\pi^{5/2} 0,42 \cdot 0,47 (1-0,2)^2}{36 \cdot 10^3 \cdot 1} \times$$

$$\times (1+1,1418 \cdot 0,36^2 - 0,6048 \cdot 0,36^4)^2 +$$

$$+ \frac{2 \cdot 4,86}{\sqrt{3,14^3} \cdot \sqrt{0,47} \cdot 36 \cdot 10^3} \int_{-0,41}^{0,41} \Gamma(0,47, \xi) d\xi = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ მ,}$$

სადაც  $\lambda = \frac{l_{crc}^h}{h} = \frac{0,47}{1,3} = 0,36$ .

ზხარის დახურვა გამოითვლება ფორმულით

$$a_{crc}^{sh} = \frac{2\sigma_{sw} A_{sw}}{nbE_b} \Gamma(l_{crc}^h, \xi) = \frac{K_{IIc}^b \sqrt{2l_{crc}^h} \sqrt{1-d_0^c}}{\sqrt{\pi c} \cdot b \cdot E_b} \Gamma(l_{crc}^h, \xi) =$$

$$\frac{4,86 \sqrt{2 \cdot 0,47} \sqrt{1-0,045}}{\sqrt{\pi \cdot 3,36 \cdot 0,2 \cdot 36 \cdot 10^3}} \cdot 2,81 = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ მ,}$$

სადაც  $d_0^c = 0,045$  საკიდის Ø8 ფართობი.

ზხარი წარმოიქმნება კვეთში ძვრის ძალების დახმარებით შეკუმშულ ზონაში

$$a_{crc}^h = 1,85 \cdot 10^{-3} - 1,33 \cdot 10^{-4} = 1,717 \cdot 10^{-3} \text{ მ} = 0,0001717 \text{ მ.}$$

ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ  $a_{crc}^h = 1,06$  მმ მიღებულია ექსპერიმენტის შედეგად, დასაშვები გახსნის სიდიდე  $a_{crc}^{max} = 0,0002$  მ ტოლია, ჩვენს მიერ მიღებული დასაშვებზე ნაკლებია

$$a_{crc}^h = 0,0001716 < 0,0002 \text{ მ-ზე.}$$

3) შეკუმშული ზონის სიმაღლის გამოთვლა

$$x = \frac{4K_{IC}^{st} A_{sp} \sqrt{l_{bg}} + 4 \cdot K_{IC}^s A_s \sqrt{l_{bg}}}{\pi^2 b (K_{IC}^b + K_{IIc}^b) \sqrt{d}} +$$

$$+ \frac{\pi^2 b \sqrt{d} [K_{IC}^b (h_0 - l_{crc}^v + a_{sp}) + K_{IIc}^b a_{crc}^h] - N_{sc} \sqrt{\pi d l_{bg}}}{\pi^2 b (K_{IC}^b + K_{IIc}^b) \sqrt{d}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 4,21 \cdot 0,00198 + 4 \cdot 25,0 \cdot 0,000226}{3,14^2 \cdot 0,2(0,42 + 4,86)\sqrt{0,005}} +$$

$$+ \frac{3,14^2 \sqrt{0,005} \times [0,42(1,122 - 0,51 + 0,170) + 4,86 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3}]}{3,14^2 \cdot 0,2(0,42 + 4,86)\sqrt{0,005}} -$$

$$- \frac{0,02 \sqrt{3,14 \cdot 0,005 \cdot 1}}{3,14^2 \cdot 0,2(0,42 + 4,86)\sqrt{0,005}} = 0,533 \text{ მ.}$$

ნორმების მიხედვით გაანგარიშებით  $x = 0,501$  მ, როგორც ჩანს ის ნაკლებია რღვევის მექანიკით გაანგარიშებაზე.

$$x = 0,533 > 0,501 \text{ მ.}$$

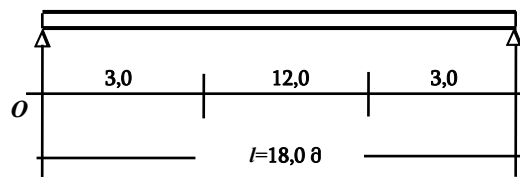
4) შევამოწმოთ მღუნავი მომენტის ეპიურაზე ადგილები, სადაც მოსალოდნელია ბზარების გაჩენა. ამისათვის საჭიროა დავადგინოთ წინააღობის მომენტი:

$$W_{red} = \frac{I_{red} A_{red}}{S_{red}} = \frac{0,0484 \cdot 0,2624}{0,22} = 0,06 \text{ მ}^3.$$

მღუნავი მომენტი

$$M_{crc} = \frac{K_{IC}^b W_{red} \cdot \pi^{3/2}}{\sqrt{I_{bg}}} = 0,42 \cdot 0,06 \pi^{3/2} = 0,140 \text{ მგკ} = 140 \text{ კნ}\cdot\text{მ.}$$

ჩვენთვის ცნობილია წერტილები 3,0 და 15,0, რომელიც სუფთა ღუნვის არეს ესაზღვრება, სუფთა ღუნვის არე 12,0 მ. საჭიროა ვიცოდეთ რამდენი ნორმალური ბზარი გაჩნდება სუფთა ღუნვის არეში,  $L_{crc}^{W1} = 3,0$  მ და  $L_{crc}^{W2} = 15,0$  მ.



ნახ. 34. სუფთა ღუნვის არე

გამოვთვალოთ მანძილი ნორმალურ ბზარებს შორის

$$d_{crc} = \frac{2ndn_s}{\pi^{3/2}} \left[ \frac{2K_{crc}^{st} M_{crc} \sqrt{I_{bg}}}{K_{crc} nM \sqrt{d} \pi^2 K_{IC}^b} - 1 \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 5,55 \cdot 0,005 \cdot 50}{\sqrt{3,14^3}} \left[ \frac{2 \cdot 42 \cdot 0,140}{5,55 \cdot 409,8 \cdot \sqrt{0,005} \cdot 3,14^2 \cdot 0,42} \right] = 4,31 \text{ მ,}$$

სადაც  $n$  – დაყვანის კოეფიციენტი = 5,55;

$n_s$  – გაჭიმული არმატურის რაოდენობა.

ბზარების რაოდენობა სუფთა რღვევის ზონაში

$$n_{crc}^v = \frac{L_{crc}}{d_{crc}} = \frac{12}{4,31} \approx 3, \dots 3 = 2,78 \approx 3 \text{ ბზარი.}$$

5) შევამოწმოთ კოჭის ჩალუნვა.

რკინაბეტონის ღუნვადი ელემენტის ჩალუნვა დაკავშირებულია ნორმალური და განივი ძვრის ბზარის გახსნის სიდიდესთან; ამასთან მათი სიდიდე სხვადასხვა სტადიის დროს იცვლება დატვირთვის ცვალებადობის გამო.

საერთოდ

$$f = f^v + f^h,$$

სადაც  $f^v$  – ნორმალური ბზარით გამოწვეული ჩალუნვა;

$f^h$  – განივი ძვრის ბზარით გამოწვეული ჩალუნვა.

მთლიანი ჩალუნვა გამოითვლება ფორმულით:

$$f^v = tg\varphi^v \cdot l_{sup},$$

სადაც  $\varphi^v$  – კუთხე ბზარის გახსნის

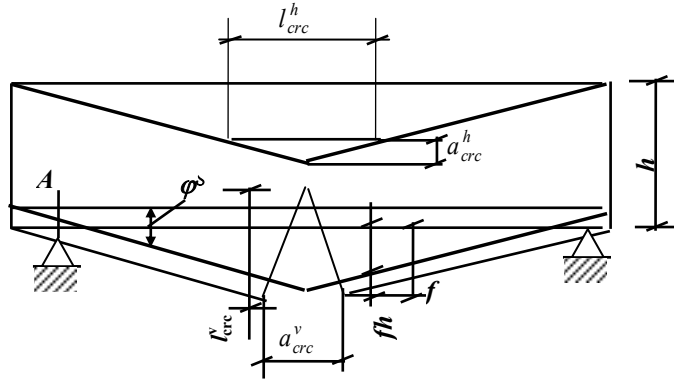
$$tg\varphi^v = \frac{a_{crc}^v}{2(l_{crc}^v - a_{crc}^v)} \cdot \frac{h_0}{2} + a_{crc}^h = \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{2(0,51 - 1,78 \cdot 10^{-4})} \cdot \frac{18}{2} + 1,717 \cdot 10^{-3} = 0,0059 \text{ მ.}$$

ლიტერატურიდან ცნობილია ექსპერიმენტით მიღებული სიდიდე  $f = 0,0065$  მ, ხოლო ნორმებით გაანგარიშებული  $f = 0,006$  მ.

როგორც გაანგარიშებებით შემოწმებიდან დადგინდა, რომ  $f = 0,0059 < 0,006$ ;  $f = 0,006$  მ (ნორმებით)

$$\begin{aligned} f &= \frac{a_{crc}^v}{2(l_{crc}^v - a_{crc}^v)} \cdot \frac{L}{2} + a_{crc}^h = \\ &= \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{2(0,51 - 1,78 \cdot 10^{-4})} \cdot \frac{18,0}{2} + 1,717 \cdot 10^{-3} = 0,0059 \text{ მ.} \end{aligned}$$

მიღებული ჩალუნვა გაანგარიშებულია ნორმებით  $f = 0,0059 < 0,006$ , ხოლო ექსპერიმენტით მიღებული სიდიდე  $f = 0,0065$  მ, რაც ახლოს არის ჩვენს მიერ გაანგარიშებულთან.



ნახ. 35. ნორმალური და განივი ძვრის ბზარი ღუნვად ელემენტში

6) გამოვთვალოთ ბზარის სიგრძე წინასწარდაძაბული არმატურის გათვალისწინებით.

ნორმალური ბზარის სიგრძის გამოთვლა კვეთის მაქსიმალური მომენტის მიხედვით  $l_{crc}^v = 0,51$  მ, ამ დროს შეჭიდულობა არმატურას და ბეტონს შორის დარღვეულია.

ბზარის პარამეტრები, რომელიც გრძივი ღერძის მიმართ არის დახრილი გამოითვლება ფორმულით, წინასწარდაძაბული არმატურის გათვალისწინებით:

$$\begin{aligned}
 l_{crc}^{vi} &= \frac{\pi^2 (h - l_{crc}^{vi}) \left( \pi^{3/2} \sqrt{K_{IC}^b K_{IIC}^b} h_w b + \right.}{2\sqrt{2l_{bg}} K_{IIC}^b b \sqrt{h - l_{crc}^{vi}} - 1,96\pi^2 \left( \pi^{3/2} \sqrt{K_{IC}^b K_{IIC}^b} h_w b + \right.} \\
 &\quad \left. + \frac{4K_{IC}^{st} A_{sp} (h_0 - x - l_{crc}^{vi}) \sqrt{l_{bg}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{d} (h_0 - x)} \right) (0,5 - \varepsilon_i)}{\left. + \frac{4K_{IC}^{st} A_{sp} (h_0 - x - l_{crc}^{vi}) \sqrt{l_{bg}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{d} (h_{0m} - x)} \right) (0,5 - \varepsilon_i)} = \\
 &= \frac{3,14^2 (1,3 - 0,51) (\sqrt{3,14^3} \sqrt{0,42 \cdot 4,86} \cdot 0,15 \cdot 0,2 +}{2\sqrt{2 \cdot 1 \cdot 4,86} \cdot 0,2 \sqrt{1,3 - 0,51} - 1,96 \cdot 3,14^2 \times} \\
 &\quad \left. + \frac{4 \cdot 42,1 \cdot 0,00198 (1 - 122 - 0,533 - 0,51)}{3,14^2 \sqrt{0,005} (1,122 - 0,533)} \right) \times} \\
 &\quad \times \sqrt{3,14^3} \sqrt{0,42 \cdot 4,86} \cdot 0,15 \cdot 0,2 + \\
 &\quad \times (0,5 - 0,4)}{\left. + \frac{4 \cdot 4,21 \cdot 0,00198 (1,122 - 0,533 - 0,66)}{3,14^2 \cdot \sqrt{0,005} (1,122 - 0,533) (0,5 - 0,4)} \right)} = 0,0212 \text{ მ.}
 \end{aligned}$$

$$l_{crc}^{vi} = 0,0212 \text{ მ.}$$

გამოვთვალოთ ბზარის გახსნის სიდიდე, სადაც  $\lambda = \frac{l_{crc}^h}{h} = \frac{0,47}{1,3} = 0,36$ .

$$\begin{aligned} a_{crc}^{bhi} &= \frac{\pi^{5/2} K_{IC}^b l_{crc}^{hi} (1-\nu^2)}{E_b \sqrt{l_{bg}}} (1+1,1418\lambda^2 - 0,6048\lambda^4)^2 + \\ &+ \frac{2K_{IC}^b}{\pi^{3/2} \sqrt{l_{crc}^{hi}} E_b} \int_{-l_{crc}^{hi}}^{l_{crc}^{hi}} \Gamma(l_{crc}^{hi}, \xi) d\xi = \\ &= \frac{\sqrt{3,14^5} \cdot 0,47 \cdot 0,47 (1-0,2)^2}{36 \cdot 10^{-3} \cdot 1} (1+1,1418 \cdot 0,07^2 - 0,6048 \cdot 0,07^4)^2 + \\ &+ \frac{2 \cdot 4,86}{\sqrt{3,14^3} \cdot 0,47 \cdot 36 \cdot 10^3} \int_{-0,47}^{0,47} \Gamma(0,47, \xi) d\xi = 2,89 \cdot 10^3 \text{ მ.} \end{aligned}$$

როცა  $a_{crc}^{vi} = 1,74 \cdot 10^{-4}$  მ, მაშინ  $l_{crc}^i$  გამოითვლება ასე:

$$l_{crc}^i = \sqrt{(l_{crc}^{vi})^2 + (l_{crc}^{hi})^2} = \sqrt{0,51^2 + 0,47^2} = 0,69 \text{ მ.}$$

ბზარის გახსნის სიდიდე

$$a_{crc}^i = 1,74 \cdot 10^{-4} + 2,89 \cdot 10^{-3} = 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ მ.}$$

როდესაც განივი ძვრის ბზარის სიგრძე ტოლია:

$$\begin{aligned} l_{crc}^h &= \frac{(K_{IC}^b)^2 b^2 h^4}{1,4 \cdot 10^{-3} \pi^5 M^2 (0,5 - \xi_i)^2} = \\ &= \frac{0,42^2 \cdot 0,2^2 \cdot 1,3^4}{1,4 \cdot 10^{-3} 3,14^5 \cdot 0,409,8^2 (0,5 - 0,077)^2} = 0,079 \text{ მ.} \end{aligned}$$

ჰორიზონტალური ბზარის ზრდა დაკავშირებულია ბზარის წვერზე ძაბვების ველის ინტენსივობის გაზრდასთან, რომელმაც გამოიწვია  $l_{crc}^h$  – ბზარის მაქსიმალური სიგრძე. ბზარის სიგრძის გაზრდა ამის შემდეგ მომდინარეობს შედარებით მცირედ, მაგრამ როდესაც მიაღწევს  $l_{crc}^{her}$ -ს იწყება თაროს აშრევა (შეკუმშული ზონიდან ფენის ახლეჩვა), რასაც ეწინააღმდეგება ბეტონი ( $K_{IC}^b$ ) და განივი არმატურა (საკიდები)  $K_{IC}^{sh}$ .

გამოვთვალოთ მათი სიდიდეები:

$$K_{IC}^{sh} = \frac{\sqrt{3} \pi^2 \left( \frac{4L_{IC}^{st}}{\pi^2 \sqrt{d}} A_w - Q \right) (0,5 - \xi_i) \lambda^{3/2}}{2b \sqrt{l_{crc}^h}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 3,14^2 \left( \frac{4 \cdot 12 \cdot 0,000101}{3,14^2 \sqrt{0,008}} - 0,0059 \right) (0,5 - 0,77) \sqrt{0,32^3}}{2 \cdot 0,2 \sqrt{0,410}} = 0,069 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2}.$$

რადგან  $K_{cre}^{sh} = 0,063 \text{ მგპ} \cdot \text{მ}^{1/2}$ , გამოვთვალოთ ბზარის სიგრძე

$$h_{cre}^{her} = \sqrt{(K_{IC}^b + K_{IC}^{sh}) \cdot h^{3/2} + \sqrt{6} \cdot M / \sqrt{6} \cdot b \cdot h \cdot \rho} =$$

$$= \sqrt{(0,42 + 0,69) \cdot \sqrt{1,3^3} + \sqrt{6} \cdot 0,409 / \sqrt{6} \cdot 0,2 \cdot 1,3 \cdot 0,024} = 19,24 \text{ მ}.$$

განივი ძვრის ბზარის სიგრძე განივი ღეროების შემაკავებელი თვისების გათვალისწინებით ტოლია:

$$\Delta l_{cre}^r(t, \tau) = l_{cre}^{her} - l_{cre}^h = 19,24 - 0,47 = 18,77 \text{ მ}.$$

ბზარის სიგრძის გაზრდას გრძივი მიმართულებით ხელს უწყობს ბეტონის ცოცვადობის სიდიდე, რომელიც დროის გაზრდის მიხედვით მცირდება და გამოითვლება ფორმულით

$$C^r(\infty, \tau) = (1 - 0,7 \cdot \sqrt[3]{n\mu}) \cdot C^b(\infty, \tau) =$$

$$= \left( 1 - 0,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{36 \cdot 10^3 \cdot 0,0170}{20 \cdot 10^4}} \right) \cdot 1,15 \cdot 10^{-4} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/მგპ}.$$

კოეფიციენტი A და B დამოკიდებულება შემდეგნაირად გამოისახება:

სადაც  $n = E_b / E_s$

$$A_r = \frac{\gamma C^r(\infty, \tau) E_b (1 - \nu^2) l_{bg}}{24 \pi^2 (K_{IC}^b)^2 (1 - \nu^2)} =$$

$$= \frac{4,3 \cdot 10^{-2} \cdot 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 36 \cdot 10^3 (1 - 0,2^2)}{24 \cdot 3,14^2 \cdot 0,42^2 (1 - 0,2)^2} = 0,0031,$$

$$B = 2 E_b C^b(\infty, \tau) = 2 \cdot 36 \cdot 10^3 \cdot 1,15 \cdot 10^{-4} = 8,28.$$

ბზარის ნაზრდი ანუ წაგრძელება

$$\Delta l_{cre}^r(t, \tau) = A_r \left\{ \frac{K_{IC}^b(\tau)^2}{\gamma(1+B)} \left[ \gamma(t-\tau) + \ln(1+B(1-e^{-\gamma(t-\tau)})) \right] + \right.$$

$$+ 2K_{IC}^b(\tau) \lg 28 \int_{-t}^t \frac{dt}{\lg t \sqrt{1+B(1-e^{-\gamma(t-\tau)})}} +$$

$$\left. + (K_{IC}^b \lg 28)^2 \int_t^t \frac{dt}{(\lg t)^2} \right\}.$$



ჩავსვით გამოსახულებაში რიცხვითი მნიშვნელობები

$$\Delta l'_{crc} = 0,0033 \left\{ 0,442 \left[ 4,3 \cdot 10^{-2} (t - 28) + \lg(1 + 8,28 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 - e^{-4,3 \cdot 10^{-2} (1-28)}) \right) \right] + 2 \cdot 0,42 \cdot 3,12 \cdot \lg 28 \times \\ \left. \times \int_{28}^t \frac{dt}{\lg t \sqrt{1 + 8,28(1 - e^{-4,3 \cdot 10^{-2} (1-28)})}} + (3,12 \lg 28)^2 \int_{28}^t \frac{dt}{\lg(t)^2} \right\} .$$

შემოთავაზებული განტოლების ამოხსნა მათემატიკურად წარმოადგენს სირთულეს, ამიტომ მისი ამოხსნა შევასრულეთ გამომთვლელი მანქანის საშუალებით. შევადგინეთ პროგრამა გამომთვლელი მანქანისათვის და განსაზღვრეთ დრო, რომლის განმავლობაში ელემენტი იმუშავებს რეკონსტრუქციის გარეშე.

ამ ტოლობის ამოხსნის შემდეგ  $t = 14640$  დღე = 40 წელი. ე.ი. კაპიტალური შეკეთების გარეშე თაროს ახლეჩა წიბოსგან მოხდება 40 წლის შემდეგ, ე.ი.  $2017 + 40 = 2057$  წელს.

ხანგრძლივობის პროექტის მიხედვით დადგენის ალგორითმი

1	ელემენტზე ზემოქმედების საპროექტო პარამეტრები: T, W, P, N, M	6	ბზარის $\ell$ , $\ell \ell$ და $a_{sb}$ განსაზღვრა
2	ბეტონის მახასიათებლები, მათი თვისებები, ხანგამძლეობის პარამეტრები	7	ერთეულ დროში ბზარის ნაზრდის განსაზღვრა $\Delta \ell$
3	ბეტონის შემადგენლობა, მისი სიმტკიცე $R_b, R_{bt}, R_c$	8	ცოცვადობის განსაზღვრა $\mu$ -ს დაარმატურების პროცენტის გათვალისწინებით $C^h(\infty, ++)=\sum(c_1 - c_0)K$
4	ბეტონში, სიცარიელების, ბზარების ფორმების ანგარიში, ინტეგრალური და დიფერენციალური განტოლებების გამოთვლა	9	კოეფიციენტების A და B სიდიდის განსაზღვრა
5	არმატურის მახასიათებლები სიმტკიცეზე $R_s, R_{sw}, R_{sc}$	10	ელემენტის საექსპლუატაციო ხანგრძლივობის დადგენა

## პროცედურა და ფუნქცია

```
f[t_]:= -0.07+0.0036(0.473(2.3*10-2(t-28)+Log[1+10.92(1-0.023(t-28))])-2 0.36
1.59*Log[28] *NIntegrate[1/(√(1-10.92(1-0.023 z 28)))
Log[z]),{z,28,t}]+(1.59Log[28])2 NIntegrate[1/(Log[z])2,{z,28,t}]
```

## შუახვედრების პროცედურა და ფუნქცია

```
f[t_]:= -0.07+0.0036(0.473(2.3*10-2(t-28)+Log[1+10.92(1-0.023(t-28))])-2 0.36
1.59*Log[28] *NIntegrate[1/(√(1-10.92(1-0.023 z 28)))
Log[z]),{z,28,t}]+(1.59Log[28])2 NIntegrate[1/(Log[z])2,{z,28,t}]
```

```
შუახვედრების მეთოდი[a_,b_,ε_] := Module[{x1,x2,x3,k},
```

```
x1=a; x2 = b; k=0;
```

```
While[Abs[f[(x1+x2)/2]] > ε,
```

```
x3=(x1+x2)/2;
```

```
k++;
```

```
If[f[x1] f[x3] < 0, x2 = x3, x1 = x3];
```

```
];
```

```
{k,(x1+x2)/2}
```

```
]
```

```
შუახვედრების მეთოდი2[a_,b_,ε_] := Module[{x1,x2,x3,k},
```

```
x1=a; x2 = b; k=0;
```

```
While[True,
```

```
x3=(x1+x2)/2;
```

```
If[Abs[f[x3]] > ε,Return[{k,x3}]];
```

```
k++;
```

```
If[f[x1] f[x3] < 0, x2 = x3, x1 = x3];
```

```
];
```

```
]
```

## ამოხსნა

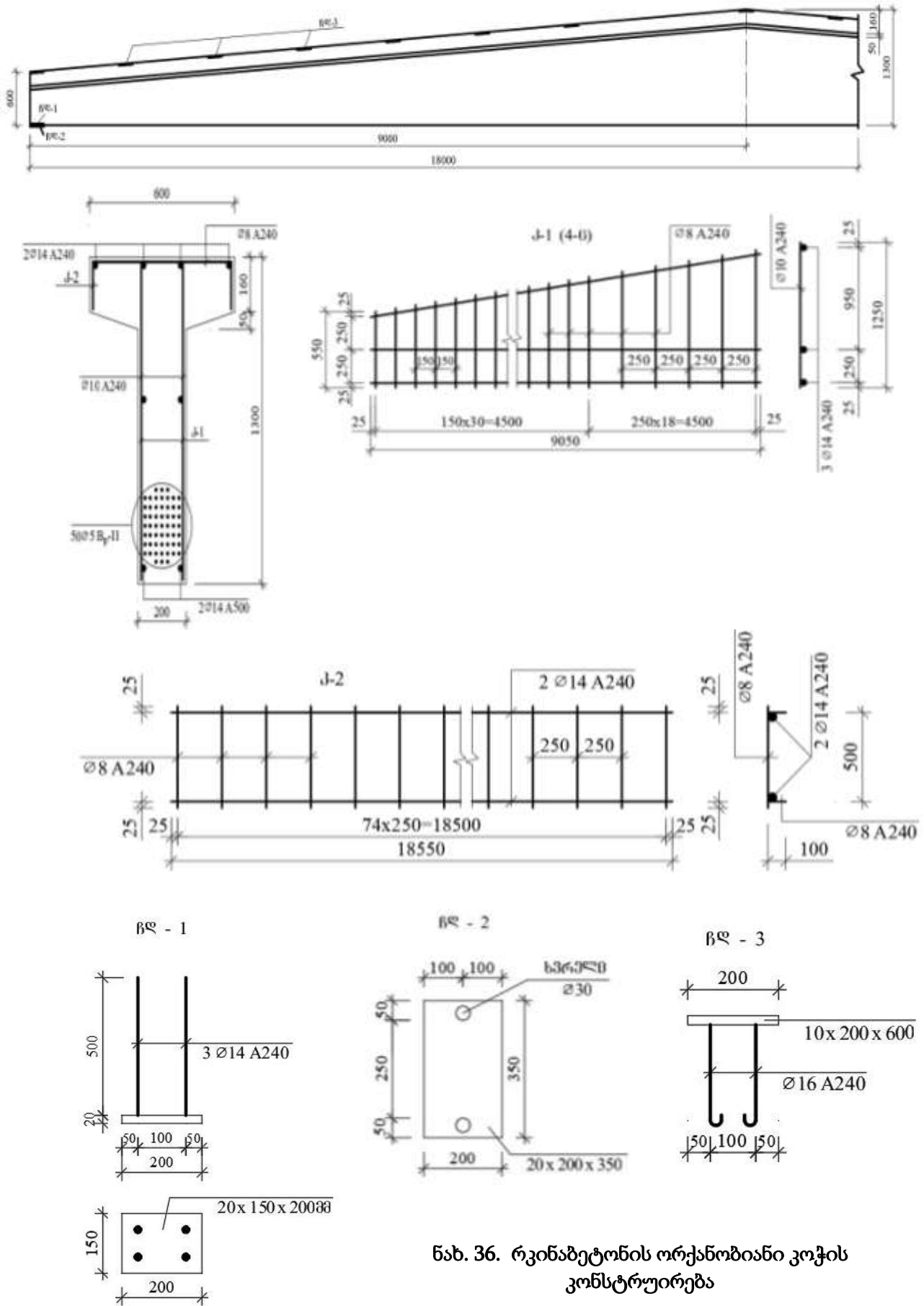
```
შუახვედრების მეთოდი[30.,65.,10-7]
```

```
{16,40.2184}
```

```
f[40.2184]
```

```
-5.19263×10-9
```

t=40 წ.



ნახ. 36. რკინაბეტონის ორქანობიანი კოჭის კონსტრუქცია

## დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია მცირე ჰესების მშენებლობის აქტუალური საკითხები, მისი გაანგარიშება და უსაფრთხო ექსპლოატაცია; ჰიდროტექნიკური ნაგებობების რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით. თეორიული კვლევები გვიჩვენებს, რომ ბზარმედეგობის პარამეტრები არის მასალის ძირითადი მახასიათებელი, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს მეტად საპასუხისმგებლო ჰიდრონაგებობების უსაფრთხო ექსპლოატაცია.

თეორიული გაანგარიშებებიდან ირკვევა, რომ რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება ბზარმედეგობაზე არსებული ნორმების მიხედვით, რომელიც კვეთს იხილავს დეფექტების (ბზარების და სიცარიელების) გარეშე, თითქმის 1,5÷2,0-ჯერ ნაკლები არმატურის ფართობია საჭირო, ვიდრე „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდებით გაანგარიშებისას, სადაც ელემენტის კვეთი განხილულია მასში არსებული ბზარების და დეფექტების გათვალისწინებით.

სადისერტაციო ნაშრომში გაანგარიშებულია „ნატანებ ჰესის“ სადაწნევო რეზერვუარის კედელი, არსებული ნორმების მიხედვით (ერთი მეტრის სიგანის, 0,5 მ სისქის და 5,7 მ სიმაღლის), მიღებული არმატურის საჭირო ფართობი შეადგენს 25,45 სმ<sup>2</sup>, მაშინ როდესაც „რკინაბეტონის რღვევის“ მექანიკის მეთოდებით გაანგარიშებისას არმატურის საჭირო ფართობი იმავე კედელში შეადგენს 49.04 სმ<sup>2</sup>-ის, თითქმის ორჯერ მეტს.

ანალოგიური შედეგები მივიღეთ სადაწნევო რეზერვუარის წყლის გადამყვანი მილის რკინაბეტონის ფილაში არსებული ღიობის (მილის მოსათავსებლად) გაანგარიშებისას. ნორმების მიხედვით არმატურის ფართობი უშუალოდ ღიობის მახლობლად 11,4 სმ<sup>2</sup>-ია, ხოლო „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მიხედვით 37.8 სმ<sup>2</sup>. თითქმის 3-ჯერ მეტი.

„ნატანებ ჰესის“ რკინაბეტონის კონსტრუქციების თეორიული გაანგარიშებისაგან მიღებული შედეგების შედარება

№	ელემენტის დასახელება	არმატურის საჭირო ფართობი, სმ <sup>2</sup>					არმატურის ფართობების სხვაობა, სმ <sup>2</sup>					განსხვავება %-ში			ბეტონის მოც. მ <sup>3</sup>
		არსებული ნორმების მიხედვით, სმ <sup>2</sup>	±0,00 1,0 მ-მდე	1,0 მეტ. 2,0 მ	2,0-დან 3,0 მ	3,0-დან 5,7 მ	1,0 მ 2,0 მ	2,0 მ 3,0 მ	3,0 მ 4,0 მ	4,0 მ 5,7 მ	I	II	III		
1	სადაწნეო რეზერვუარის კედლის კონსტრუქცია	10Φ18A500 ბიჯით 200 (1 გრძ. მ-ში) $A_s=25,45$ სმ <sup>2</sup>	10Φ25A500 $A_s=49,04$ სმ <sup>2</sup>	10Φ22A500 $A_s=38,01$ სმ <sup>2</sup>	10Φ20A500 $A_s=31,42$ სმ <sup>2</sup>	10Φ18A500 $A_s=25,45$ სმ <sup>2</sup>	23,49	12,56	5,97	0	21,4	14,1	8,35	2,85	
2	წყლის გადამყვანი ღიობის ფილის კონსტრუქცია	3Φ22A500 $A_s=11,4$ სმ <sup>2</sup>	3Φ40A500 $A_s=37,8$ სმ <sup>2</sup>		-	-	26,4	-	-	-	21,6	-	-	2,0	
		3Φ18A500 $A_s=7,3$ სმ <sup>2</sup>	3Φ25A500 $A_s=12,73$ სმ <sup>2</sup>		-	-	7,43	-	-	-	18	-	-	1,6	
3	სამანქანო ნაწილის გადახურვის კონსტრუქცია	40Φ5Bp-II $A_{sp}=7,97$ სმ <sup>2</sup> 2Φ14A240 $A_s=3,08$ სმ <sup>2</sup> სულ 11,09	50Φ5Bp-II $A_{sp}=9,8$ სმ <sup>2</sup> $A_s=3,08$ სმ <sup>2</sup> სულ 12,88 სმ		-	-	1,71	-	-	-	1,73	-	-	16,0	

ასევე გაანგარიშებულია ძალოვანი კვანძის საამქროს რკინაბეტონის გადახურვის 18-იანი წინასწარდაძაბული კოჭის, რომელიც ბზარმედეგია, მიუხედავად ამისა, არსებული ნორმებით გაანგარიშებულია არმატურის საჭირო ფართობი 11,09 სმ<sup>2</sup>, ხოლო რღვევის მექანიკით მეთოდებით გაანგარიშებით 12,88 სმ<sup>2</sup>.

სადისერტაციო ნაშრომში „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდის გამოყენებით ჰიდროტექნიკური ნაგებობების რკინაბეტონის კოჭის გაანგარიშებისას დადგენილია მისი ექსპლოატაციის ხანგრძლივობის დრო.

ამ ამოცანის გადასაწყვეტად შედგენილია გაანგარიშების ალგორითმი, პროგრამა გამომთვლელი მანქანისათვის და დადგენილია ექსპლიატაციის დრო, რომლის შემდეგ ელემენტი დაექვემდებარება კაპიტალურ შეკეთებას. ჩვენის აზრით სადისერტაციო ნაშრომში პირველად არის გადაწყვეტილი რკინაბეტონის ელემენტების ექსპლოატაციის, ხანმედეგობის საკითხი, რომელიც მნიშვნელოვანია სამშენებლო წარმოების განვითარებისათვის, ასევე ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისათვის, კაშხლებისათვის, ძალზე სამომავლოდ, რადგან ჩვენი ქვეყნის ტერიტორიაზე მოსალოდნელია ახალი ჰიდროსადგურების მშენებლობა.

სადისერტაციო ნაშრომში განხილული საკითხების ანალიზის შედეგად გაკეთდა შემდეგი დასკვნები:

1. საქართველოს ტერიტორია მდიდარია ისეთი მდინარეებით, სადაც შეიძლება აიგოს დიდი და მცირე ჰესები, რომელსაც შეუძლია ეკონომიკის, გაძლიერება. მათ შორის მცირე ჰესებს აქვს უპირატესობა დიდ ჰესებთან შედარებით, გამომუშავებული ენერჯის ღირებულება  $2\div 2,5$ -ჯერ მცირეა, ვიდრე დიდი ჰესების გამომუშავებული ენერჯია.
2. მცირე ჰესების უპირატესობა გახლავთ ასევე, მცირე შეტბორვის ფართობი, სიახლოვე მომხმარებელთან, მშენებლობის, მცირე ხანგრძლივობა, მექანიზმების გამოყენების სიმარტივე, არ ახდენს გავლენას ეკოლოგიაზე, მოსახლეობის დასაქმება და სხვა.

3. როგორც ცნობილია ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, მეტად საპასუხისმგებლო ნაგებობებია, ექსპლოატაციის დროს იმყოფებიან მოძრავი წყლის გავლენის ქვეშ, რომელიც არსებულ ტექნოლოგიურ ბზარებში შედის და აზიანებს ნაგებობას, იწვევს მის გამორეცხვას და რღვევას. ამდენად ბზარმდეგობის ამაღლება, გააუმჯობესებს მშენებლობის ხარისხს, გაზრდის სიხისტეს, მდგრადობას, ხანგამძლეობას და მის უსაფრთხო ექსპლოატაციას.
4. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშება „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ მეთოდების გამოყენებით, სადაც განხილულია ელემენტის ბზარიანი კვეთი, დადგენილია ბზარის სიგრძე. გახსნის სიდიდე და მისი ზრდის დინამიკა, რომლის გამოყენება პროექტირების დროს დამპროექტებლებს დაეხმარება შექმნან ბზარმდეგი, განსაკუთრებით მოძრავ წყალში მდებარე კონსტრუქციები, როგორცაა სადაწნევო რეზერვუარები, კაშხლის კონსტრუქცია და მოახდინონ მათი სწორი კონსტრუირება.
5. სადისერტაციო ნაშრომში პირველად შექმნილია გაანგარიშების პროგრამა რკინაბეტონის კონსტრუქციების ექსპლოატაციის ხანგრძლივობის დასადგენად კომპიუტერული დაპროექტებისა, რომლის პროგრამული გადაწყვეტა შეასრულს სამშენებლო ფაკულტეტის მშენებლობის კომპიუტერული დაპროექტების № 106 დეპარტამენტმა.

ყოველივე ზემოთ მოთხრობილი არის მეტად საპასუხისმგებლო საკითხების გადაწყვეტის საქმეში შეტანილი მცირედი წვლილი, როგორცაა ბზარმდეგობის პარამეტრების დადგენა, რომელიც არის მასალის მთავარი მახასიათებელი XXI საუკუნის სამშენებლო კონსტრუქციებისათვის, და რომ, „რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის“ გაანგარიშების არსებული მეთოდები დაეხმარება მკვლევარებს იმ საკითხების გადაწყვეტაში, სადაც სიმტკიცის და ბზარმდეგობის პარამეტრების დასადგენად ტრადიციული მეთოდების გამოყენება აღმოჩნდება უშედეგო.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. ნ. მოწონელიძე. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. თბილისი, განათლება, ნაწ. I, 1977, ნაწ. II. თბილისი, განათლება, 1982.
2. ზ. გედენიძე. თაღვანი კაშხლების სიმტკიცეზე გაანგარიშება სეისმური ზემოქმედების გათვალისწინებით. თბილისი, სტუ, 1997.
3. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. М., Стройиздат, 1982. 196 с.
4. Пирадов К.А., Пирадов А.Б., Иосебашвили Г.З., Кахиани Л.А. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на основе методов механики разрушения. Тбилиси «Мецნიერება», 1999.
5. ა. პირადოვი, კ. პირადოვი, ლ. კახიანი, გ. იოსებაშვილი. ბეტონისა და რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის საფუძვლები. გამომცემლობა „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 1998.
6. Леонов С.Н., Лихачевский А.Я. Влияние объемной концентрации высокопрочного заполнителя на прочность и трещиностойкость тяжелого бетона с позиции механики разрушения. Известия ВУЗ-ов строительство, 1995, № 12, с. 48-50.
7. Трапезников Л.П. О критерии распространения трещины при хрупком разрушении стареющих материалов, обладающих свойством ползучести. Изв. АН СССР, Механика твердого тела, 1976, № 6, с. 130-136.
8. Пересыпкин Е.Н. Расчет стержневых железобетонных элементов. М., Стройиздат, 1988, 168 с.
9. Мгеладзе Г.Г. Трещиностойкость нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов из легкого бетона с учетом различной его прочностных и деформативных характеристик. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тбилиси, 1989, 24 с.
10. Пирадов А.Б., Гвелесиანი Л.О., Пирадов К.А. Развитие трещин в бетонных и железобетонных элементах при циклическом нагружений // Бетон и железобетон, № 5, М., с. 10-12.
11. Пирадов К.А. Критический коэффициент интенсивности напряжений железобетона // Бетон и железобетон, № 12, М., 1992, с. 21-23.
12. Пирадов К.А. Ширина раскрытия нормальных трещин в изгибаемых железобетонных элементах // Сборник трудов НИИЖБ, М., 1993, с. 79-80.
13. Пирадов К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона. Издательство «Технический университет», Тбилиси, с. 355.
14. Пирадов К.А., Гузеев Е.А. Физико-механические основы долговечности бетона и железобетона // Бетон и железобетон, № 1, М., 1998, с. 25-26.
15. ი. საღინაძე, შ. გაგომიძე, ი. ქადარია. გარემოსდაცვითი ჰიდროსაინჟინრო პრობლემებისა და მათი გადაჭრის გზების შესახებ ქალაქ ფოთის შავიზღვისპირა რეგიონში. ელექტრონული ჟურნალი Energyonline N1(6), 2012. <http://www.energyonline.ge>.



16. Габуния Г.Ш. Концентраций напряжений в зоне отверстий бетонных и железобетонных элементов при одноосном и двухосном жатии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Тбилиси, 1989, 24 с.
17. Гурешидзе Г.Г. Повышение трещиностойкости стеновых панелей из лешкого бетона на основе методов механики разрушения. Диссертация, Грузинский политехнический институт, 1990.
18. Гурешидзе Г.Г. Исследование параметров механики разрушения при оценке трещиностойкости и прочности бетона стеновых панелей. Тез. док. международного симпозиума (По проблемам механики сплошных сред). Тбилиси, ГТУ, 1997.
19. Гурешидзе Г.Г. Методика проведения экспериментальных исследований прочности и трещиностойкости легких бетонов. Бетон и железобетон. Москва, 2009. № 5. ISSN 0005-9889.
20. ი. ლუდუშაური, ალ. კაკუშაძე, ნ. მოწონელიძე. მასიურთავებიანი კონტრფორსული კაშხლების ანგარიში ფუძის დრეკადობის გათვალისწინებით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, თბილისი, 1970.
21. ალ. ლოსაბერიძე. დაწნევითი გვირაბების ერთფენიანი მოპირკეთების გეგმარება და გაანგარიშება. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, თბილისი, 1963.
22. ხუბელიანი, ბ. ჩიკვაშვილი, ა. სახვაძე. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. საქართველოს სასოფლო სამეურნეო ინსტიტუტი. თბილისი, 1982.
23. Какушадзе Ал. Методы расчета конструирования перекрытий подземных гидротехнических сооружений. Труды Грузинского технического университета, Тбилиси, 1963.
24. ლ. კახიანი, ლ. ბალანჩივაძე, ლ. ვერულაშვილი. რკინაბეტონის კონსტრუქციები. ლექციების კონსპექტი ჰიდროტექნიკური სპეციალობისათვის, „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2013.
25. ა. ყუბანეიშვილი. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. დაპროექტების ძირითადი საკითხები ს.ნ. 2.06.01-97. საქართველოს სათბობ-ენერგეტიკის სამინისტრო, თბილისი, 2000. 63 გვ.
26. ა. ყუბანეიშვილი. მიწისქვეშა ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. სნ 2.06.06-98, საქართველოს ურბანიზაციის და მშენებლობის სამინისტრო, თბილისი, 2006, 86 გვ.
27. მ. კოდუა. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაციის შესახებ მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში. სამეცნ. ტექნ. ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“; №1-2 (21-22), 2016. გვ. 12-17.
28. I. Saginadze, M. Pkhakadze, M. Kodua and Sh. Gagoshidze. Hydro-engineering and environmental problems in Poti Black Sea region and ways of their solution. European Geosciences Union to be held in Vienna, Austria, April 2016. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA.18.1745S>.
29. Васильев П.И., Кононов Б.И., Чирков Я.Н. Железобетонные конструкций гидротехнических сооружений. Киев-Донецк. «Вища школа», 1982.

30. ო. სოლომონია, მ. დადიანი, ნ. ცაბაძე, რ. პატარაია, ნ. აბრამიშვილი. საქართველოს მდინარეების მცირე ჰიდროენერგეტიკული ტექნიკური პოტენციალის კადასტრი. საქართველოს ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტი. თბილისი, 2006.
31. პ. შენგელია. ჰიდროელექტრული სადგურები. თბილისი. განათლება. 1967.
32. ა. სოხაძე, ლ. კახიანი, ლ. ავალიშვილი, ლ. ბალანჩივაძე, მ. ჭანტურია, გ. გურეშიძე, ა. ლებანიძე. რკინაბეტონის კონსტრუქციები. I, II ნაწილი. თბილისი: სტუ, 2012.
33. Руководство по учету сейсмических воздействии при проектировании гидротехнических сооружений. главы СНиП II-A 12-69, Москва, 1977, 167с.
34. Сагинадзе И.С. Расчет откосных оградительных сооружений морских портов в районах Поти и Анаклии. ISSN 1612-0287. Georgian engineering news. N 4, 2016. P. 62-67.
35. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. დაპროექტების ძირითადი საკითხები ს.ნ. 2.06.01-97. ოფიციალური გამოცემა მოქმედებს 1998 წლის 20 იანვრიდან. თბილისი, 2000.
36. საქართველოს სამშენებლო ნორმები და წესები. ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციები. პნ.03.01-07. თბილისი, 2007.
37. დ. გურგენიძე, ლ. კახიანი, მ. სულაძე. რკინაბეტონის მაღლივი კარკასული შენობები და მათი სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების არსებული პრობლემები // სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა, № , თბილისი, 2018, გვ.
38. დ. გურგენიძე, ლ. კახიანი, ლ. ბალანჩივაძე, მ. სულაძე. სხვადასხვა ქვეყნის სეისმომდეგი მშენებლობის ნორმები და მათი კრიტიკული შეფასება // სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა №4(43), თბილისი, 2016, გვ. 40-44.
39. დ. გურგენიძე, ლ. კახიანი, მ. სულაძე. რკინაბეტონის მაღლივი კარკასული შენობები და მათი სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების პრობლემები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა №3(42), თბილისი, 2016, გვ. 60-64.
40. მ. სულაძე. რკინაბეტონის ელემენტების ხანგამძლეობის გაანგარიშება „რღვევის მექანიკის მეთოდების გამოყენებით“ // სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა № 2(59), თბილისი, 2018, გვ.
41. მ. სულაძე. მცირე ჰესების უპირატესობანი. // სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა № 2(49), თბილისი, 2018, გვ. 58.
42. დ. გურგენიძე, მ. სულაძე. მცირე ჰესების უპირატესობანი. II საერთაშორისო სიმპოზიუმი „სეისმომდეგობა და საინჟინრო სეისმოლოგია“. საქ. ტექნ. უნივერსიტეტის გამომც. 2019, გვ. 96-99.
43. დ. გურგენიძე, მ. სულაძე. საქართველოს მდინარეების ენერგეტიკული პოტენციალი. II საერთაშორისო სიმპოზიუმი „სეისმომდეგობა და საინჟინრო სეისმოლოგია“, თეზისების კრებული საქ. ტექნ. უნივერსიტეტი, თბილისი, 2019, გვ. 83.

44. ი. სალინაძე, ა. ბრეგვაძე, ზ. გამეზარდაშვილი. შავი ზღვის ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლის მონაკვეთის ეროზიისაგან დაცვა წყალქვეშა გეოტუბების გამოყენებით. აწსუ-ს მოამბე. 2017, № 2(10).  
<https://moambe.atsu.edu.ge/106-->, html.
45. ხელვაჩაური 1 და ხელვაჩაური 2 ჰესების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი. ჰესების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტებში შეტანილი ცვლილებების გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში. შპს „გამა კონსალტინგი“. 2013. (ხელმისაწვდომია). 214 გვ.  
<http://moe/goe.gow.ge/index/php>.
46. „ინფორმაციული ბიულეტენი მიწისქვეშა ჰიდროსფეროს და საშიში გეოლოგიური პროცესების შესწავლის და პროგნოზირების შესახებ“, საქართველოს გეოლოგიის სახელმწიფო დეპარტამენტი, თბილისი 2000.
47. ლ. ი. მარუაშვილი. საქართველოს ფიზიკური გეოგრაფია. თბილისი, 1964.
48. გ. გუჯაბიძე. საქართველოს გეოლოგიური რუკა. თბილისი 2003.
49. Буачидзе И.М. Гидрогеология СССР. Том X. Грузинская ССР, Том 10, Недрa, Москва, 1970.
50. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 9, Закавказье и Дагестан, выпуск 1, западное Закавказье. Гидрографическое описание рек, озер и водохранилищ. Под ред. Г.Н. Хмаладзе и В.Ш. Цомая. Ленинград, изд. „гидрометеоиздат“. 1972.
51. ვ. მაღლაკელიძე. ჰიდროლოგია, ჰიდრომეტრია და ჰიდროტექნიკური ნაგებობები. თბილისი, განათლება, 1990.
52. ა. მოროზოვი. წყლის ენერჯის გამოყენება. განათლება, თბილისი, 1993.
53. Смирнов И.Н. Гидравлические турбины и насосы. М.: Высшая школа, 1969.
54. ნ. ნინუა. რკინაბეტონის კონსტრუქციები, თბილისი, განათლება, 1988.
55. ა. სოხაძე, ლ. კახიანი, ლ. ბალანჩივაძე, მ. ჭანტურია, გ. გურემიძე. რკინაბეტონის კონსტრუქციები. I ნაწილი. თბილისი: სტუ, 2011.
56. Мандрков А.П. Примеры расчета железобетонных конструкций. М., «Стройиздат», 1989.