



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

მიხეილ სანიკიძე

კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზი ექსპლუატაციის პერიოდში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0171, საქართველო

2022 წ

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი სამშენებლო

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მიხეილ სანიკიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **კაშხლისა და ფუმის მდგრადობის ანალიზი ექსპლუატაციის პერიოდში** და ვამღებთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ

ავტორი: მიხეილ სანიკიძე

დასახელება: კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზი ექსპლუატაციის პერიოდში

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: მშენებლობის ინჟინერიის დოქტორი სხდომა ჩატარდა _____

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 დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ცაგერის ბეტონის კაშხალი (სიმაღლე - 11 მ) განთავსებულია მსხვილფრაქციულ ხრეშოვან გრუნტზე. ბათიმეტრული კვლევებისა და ასევე წყალქვეშა დათვალიერების შედეგად გამოვლენილ იქნა, რომ ენერგიის ჩამქრობი ჭის ფილა დანგრეული იყო და ფუძეში განვითარდა 5 მ-იანი გამორეცხილი ორმო, რომელმაც შეაღწია კიდევ ნაგებობის ძირში, სადაც არსებობს მაღალი მკუმშავი ძაბვები. ყოველივე რეალურ საშიშროებას ქმნიდა მდგრადობის დაკარგვის თვალსაზრისით.

წყალსაცემი ფილის დანგრევის შედეგად ფილტრაციული სიგრძე დამოკლდა, რამაც შესაბამისად გაზარდა დაწნევის გრადიენტები კაშხლის ფუძის გამორეცხვის ზონაში. აღნიშნულის შედეგად შემცირდა მარაგები სუფოზიისადმი.

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა საექსპლუატაციო დატვირთვებისა (მათ შორის ფილტრაციული დაწნევების) და ფუძის მასალის არაწრფივი 3-ღერძა დეფორმაციის გათვალისწინებით.

„ძაბვა-დეფორმაციის“ აპროქსიმაციისათვის გამოიყენება ანალიტიკური დამოკიდებულება, რომელიც ემყარება მსხვილფრაქციული გრუნტების ექსპერიმენტული კვლევების შედეგებს. გრუნტების დეფორმაციის ანალიზისათვის გამოიყენება დატვირთვის დევიატორული უბანი მარსელასა და გუპტას ექსპერიმენტული კვლევების გათვალისწინებით.

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. სისტემის არაწრფივი სიხისტის მატრიცის ფორმირება ჩატარებულ იქნა იტერაციული გაანგარიშებების გზით.

მიღებულ იქნა, რომ კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზონაში (ფუძეში არსებული გამორეცხვის უბანთან) მკუმშავი ძაბვების კონცენტრაციის გავლენით პლასტიკური დეფორმაციები გაზრდილია. აღნიშნულის შედეგად ადგილი აქვს ძაბვების გადანაწილებას. კერძოდ, მაღალი კონცენტრაციის ზონაში ადგილი აქვს დამაბული მდგომარეობის განტვირთვას ხოლო საკონტაქტო ზონის უფრო სიღრმისეულ კვითებში კი დატვირთვას.

ძაბვა-დეფორმაციის ჰიპერბოლური მრუდის გამოყენებით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის ფუძეში, განსაკუთრებით უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, მოხდა ძაბვების მნიშვნელოვანი გადანაწილება. კერძოდ, მკუმშავი ძაბვების მაღალი კონცენტრაციის ზონაში ძაბვები მცირდება, ხოლო კაშხლის ცენტრალური კვითის მიმართულებით ძაბვები უფრო იზრდება.

ფუძეში ძაბვების ხსენებული მდგომარეობა აისახება ფუძის მდგრადობაზე. კერძოდ, ძაბვების გადანაწილების შესაბამისად, ადგილი აქვს ძვრის პოტენციური ზედაპირის გადაადგილებას კაშხლის ცენტრალური კვეთის მიმართულებით. მთლიანობაში იზრდება არამდგრადი მასივის არე, რაც კიდევ უფრო აუარესებს კაშხლის მდგომარეობას.

წყალსაგდების მუშაობისას, უმეტეს შემთხვევებში ადგილი აქვს ბიეფების შეუღლებას, რასაც თან ახლავს ჰიდრავლიკური ნახტომი, რომელიც თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას ფარის გაღების გარკვეულ ნიშნულზე აღწევს. აღნიშნულის გავლენით, წყალსაცემ ფილაზე ვითარდება ენერჯის დეფიციტი და არსებული ტურბულენტური რეჟიმის თანმხლები პულსაციური დატვირთვა. ენერჯის დეფიციტის მნიშვნელობა, ძირითადად ჰიდრავლიკური ნახტომის გაზრდის შედეგად იმატებს. ეს დატვირთვები ზოგიერთ შემთხვევაში აღწევს საკმაოდ მაღალ მნიშვნელობებს. ამრიგად, ფილის სიმტკიცისა და მდგრადობის (ზოგიერთ შემთხვევაში ფილის დაანკერების) შეფასებისას ექსპლუატაციის პერიოდში, აუცილებელია გავითვალისწინოთ ნაკადის ჰიდროდინამიკური გავლენა.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ფილის სიმტკიცისა და მდგრადობის გაანგარიშებები უნდა ჩატარდეს საექსპლუატაციო დატვირთვების მთლიანი დიაპაზონის გათვალისწინებით, ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით, სამშენებლო ნორმების მოთხოვნების შესაბამისად.

ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების განსაზღვრა ფილაზე მოიცავს ორ ამოცანას. კერძოდ, განსაზღვრული იქნას დატვირთვა:

- ფილის ზედაპირზე, ქვემო ბიეფში გადაგდებული ნაკადის გარსდენის ზემოქმედებით;
- ფილის ძირზე განვითარებული ფილტრაციული უკუწნევიტ.

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის პულსაციური კომპონენტები განისაზღვრება არსებული ექსპერიმენტული ჰიდრავლიკური კვლევების შედეგების მიხედვით. კერძოდ, ხვედრითი პულსაციის კომპონენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ფილაზე განისაზღვრება „წერტილებში“ პულსაციური წნევების ანალიტიკური დამოკიდებულებით. აღნიშნული ითვალისწინებს წერტილოვანი წნევის პულსაციის სტანდარტის თანაფარდობას (სტანდარტული გადახრა) და ხვედრითი პულსაციური დატვირთვის სტანდარტს ფილის ფართობზე.

ცაგერის საშუალოდაწნევიანი ჰიდროკვანძის წყალჩამქრობი აუზის ფილა (5 მ სისქის) ექსპლუატაციის პერიოდში მთლიანად იქნა დანგრეული.

კაშხალს ქვემო ბიეფის მხრიდან გაუჩნდა 5 მ-იანი გამორეცხილი ორმო, რომელმაც რეალური საფრთხე შეუქმნა კაშხლის მდგრადობას.

ცაგერის კაშხლის ჰიდრავლიკური რეჟიმების ანალიზზე დაყრდნობით, წყალჩამქრობ აუზში შექმნილი ჰიდრავლიკური რეჟიმის თანმხლები ჰიდროდინამიკური და პულსაციური დატვირთვები მიღებულ იქნა ფარების გაღების სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს და ამასთან დაკავშირებით შეფასდა ფილის მდგრადობის სხვადასხვა მარაგები.

ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმი განსაზღვრავს არამარტო ენერგიის ჩამქრობი ჭის გეომეტრიულ ზომებს, არამედ ფილაზე განვითარებულ ჰიდროდინამიკურ დატვირთვებს და შესაბამისად ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობას. ამასთან დაკავშირებით განისაზღვრება ფილის საპროექტო პარამეტრები (მათ შორის სისქე, მისი არმირება), ხოლო კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში, ასევე მათი ანკერირების პარამეტრებიც

ნაშრომში წარმოდგენილია კაშხლისა და ფუძის არაწრფივი მუშაობის რიცხვითი ანალიზის ცალკეული შედეგები.

RESUME

The Tsageri concrete dam ($h=11$ m) is located on a gravel foundation. Batimetric surveys, as well as underwater inspections, revealed that the stilling basin slab had been demolished and a 5 m leached pit had developed at the foundation, which had penetrated even to the foot of the structure with high compressive stress. All posed a real danger in terms of loss of stability.

The seepage length was shortened as a result of the demolition of the basin slab, which in turn increased the pressure gradients in the dam foundation wash zone. As a result, the reserves of seepage strength have decreased.

Static calculations of the “dam- foundation” system were performed taking into account the operating loads (including seepage pressures) and the nonlinear 3-axial deformation of the foundation material.

An analytical approach based on the results of experimental studies of macrofragment soils is used to approximate the "stress-deformation". The load deviation area is used for soil deformation analysis based on experimental studies by Marcella and Gupta.

Nonlinear calculations of the “dam-foundation” system were performed using the two-dimensional finite element model. The formation of the nonlinear stiffness matrix of the system was carried out by iterative calculations.

It was obtained, that the plastic deformations were increased under the influence of the concentration of compressive stresses in the contact zone of the dam and the foundation (near the leaching area in the foundation). As a result, there is a redistribution of stress. In particular, in the zone of high concentration there is unloading of the stress state and in the deeper sections of the contact zone there is loading.

By using the hyperbolic stress-strain curve, it was obtained that a significant redistribution of stresses occurred at the foundation of the dam, especially under downstream side. In particular, in the zone of high concentration of compressive stresses, the stresses decrease, while the stresses increase in the direction of the central section of the dam.

The mentioned state of stresses at the foundation affects the stability of the foundation. In particular, according to the stress distribution, there is a displacement of the potential shear surface in the direction of the central section of the dam. As a whole, the unstable area grows, which further worsens the stability condition of the dam.

During the operation of the spillways, in many cases there is a conjunction of the streams accompanied by the hydraulic jump, which reaches its maximum

value at a certain value of the gates opening. Under the influence of this, energy shortage and the pulsating load accompanying the existing turbulent regime develops on the stilling basin slab. The value of the energy shortage increases mainly with the increase of the hydraulic jump. These loads in some cases reach a fairly high value. Thus, when assessing slab strength and stability (in some cases slab anchoring) in a row of the operating loads, it is necessary to consider the hydrodynamic impact of the flow.

Thus, calculations on slab strength and stability need to be performed taking into account the total range of operating loads, according to the limiting state, in accordance with the requirements of the construction norms.

Hydrodynamic impact on tile involves two main tasks. In particular, the loads are determined:

- On the surface of the slab, under the influence of the flow stream;
- the seepage pressure developed at the bottom of the slab.

The pulsating components of the hydrodynamic load are determined according to the results of existing experimental hydraulic studies. In particular, the maximum value of the specific pulsation component on a slab is determined using analytical dependencies based on pulsed pressure data at “points”. This takes into account the ratio of the point pulse pressure standard (standard deviation) and the specific pulse load standard on the slab area.

The Tsageri medium-pressure hydropower plant stilling basin slab (5 m thick) was completely destroyed during operation. A 5 m leached pit emerged under concrete gravity dam from the downstream, created a real threat to the structure’s stability loss.

Based on the analysis of the hydraulic regimes of the Tsageri Dam, the accompanying hydrodynamic and pulsating loads of the hydraulic regime created in the stilling basin were obtained at different values of the gates opening and, in this connection, the slab stability reserves.

The hydraulic regime, developed during the conjunction of the streams, determines not only the geometric dimensions of the stilling basin slab, but also the hydrodynamic loads, developed on the slab and consequently, the strength and stability of the slab. In this regard, the design parameters of the slab (including its thickness, its reinforcement) are determined, and in the case of a rock base, also their anchoring parameters.

The paper presents separate results of numerical analysis of nonlinear work of dam and foundation.

შინაარსი

შესავალი.....	15
ლიტერატურის მიმოხილვა.....	21
1.1 ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები (ზოგადი აღწერა).....	21
1.1.1 ბეტონის წყალსაგდებიანი კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე.....	23
1.1.2 არაკლდოვან ფუძეზე ბეტონის კაშხლის განთავსების სქემები. კაშხლის მიწისქვეშა კონტურის ფორმირება	24
1.1.3 კვლევები გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუქციათა მუშაობისა და გაანგარიშების მეთოდების მიმართ	26
1.1.4 კვლევები ენერგიის ჩამქრობი ჭის პროექტირებასთან დაკავშირებით.....	34
კვლევა, შედეგები და მათი განსჯა.....	48
2.1 ენერგიის ჩამქრობ ჭაში წყალსაცემ ფილაზე ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გაანგარიშება	48
2.1.1 ენერგიის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილის ჰიდრავლიკური რეჟიმის ანალიზი.....	48
2.1.2 წყალსაცემ ფილაზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გაანგარიშება	50
2.1.3 პულსაციური ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გაანგარიშება...	51
2.2 კაშხალი-ფუძე სისტემის სტატიკური გაანგარიშებების ძირითადი თეორიული საფუძვლები	54
2.2.1 არაწრფივი გაანგარიშებების ძირითადი თეორიული არსი	57
2.3 ცაგერის ჰიდროკვანძის ნაგებობებზე განვითარებული პრობლემების ანალიზი	60
2.3.1 ჰიდროკვანძის ნაგებობათა საპროექტო გადაწყვეტის ანალიზი	60
2.3.2 ჰიდროკვანძის ქვემო ბიეფში განვითარებული პროცესების ანალიზი.....	62
2.4 ცაგერის ჰიდროკვანძის წყალსაცემი ფილის მდგრადობის შეფასება.....	66

2.4.1	ენერგიის ჩამქრობ ჭაში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის ანალიზი.....	66
2.4.2	ჰიდრავლიკური რეჟიმი 1 ფარის გახსნისას	66
2.4.3	ჰიდრავლიკური რეჟიმი 2 ფარის გახსნისას	67
2.4.4	ჰიდრავლიკური რეჟიმი 3 ფარის გახსნისას	68
2.4.5	ჰიდრავლიკური რეჟიმი 4 ფარის გახსნისას	68
2.5	კაშხლის ფუძის ფილტრაციული გაანგარიშება.....	78
2.6	წყალსაცემი ფილის მდგრადობის შეფასება	81
2.7	ცაგერის ბეტონის კაშხლის მდგრადობის ანალიზი ქვემო ბიეფში განვითარებული გარეცხვის არსებობისას	84
2.7.1	კაშხალი-ფუძე სისტემის მდგრადობის ანალიზი წრფივი გაანგარიშების მიხედვით.....	84
2.7.2	კაშხალი-ფუძე სისტემის მდგრადობის ანალიზი არაწრფივი გაანგარიშების მიხედვით.....	98
2.7.3	კაშხლის მდგრადობის ანალიზი ზემო ბიეფში დონის დაწვევისას.	103
	დასკვნა.....	107
	გამოყენებული ლიტერატურა.....	110
	დანართები.....	114

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი #1 - ჰიდრავლიკური ნახტომი ფრუდის რიცხვის მიხედვით.....	49
ცხრილი #2 - გრუნტის საინჟინრო მახასიათებლები	86
ცხრილი #3 - კერნების ლაბორატორიული კვლევის შედეგები	91

ნახაზების ნუსხა

ნახაზი #1 - ბიეფების შეუღლების ზოგადი სქემა.....	48
ნახაზი #2 - ჰიდროდინამიკური და ფილტრაციული უკუწნევის მოქმედების სქემა ჰიდრავლიკური ნახტომის ფარგლებში	51
ნახაზი #3 - ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია	52
ნახაზი #4 - წნევის პულსაციის სტანდარტის ცვლილება ნახტომის სიგრძეზე	53
ნახაზი #5 - k_n კოეფიციენტების განაწილება ფილის სიგრძეზე.....	54
ნახაზი #6 - წნევის პულსაციის კორელაცია	54
ნახაზი #7 - ორგანზომილებიანი იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები	56
ნახაზი #8 - დატვირთვა გადაადგილების მრუდი.....	60
ნახაზი #9 - ლაჯანურჰესის სათავე კვანძი, საშუალოდაწნევიანი ბეტონის გრავიტაციული კაშხლით. ხედი ქვედა ბიეფის მხრიდან და გრძივი ჭრილი	61
ნახაზი 10 - ბათიმეტრული კვლევის შედეგებით გამოსახული დაზიანების ამსახველი 3D მოდელი	63
ნახაზი 11 - ქვემო ბიეფში ფუძის გარეცხილი ზონა გალერეების ქვეშ განვითარებული დაცურების ზედაპირით	63
ნახაზი #12 - გამრეცხი გალერეების ქვეშ განვითარებული დაცურების ზედაპირი.....	64
ნახაზი #13 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ.	69
ნახაზი #14 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში	70
ნახაზი #15 – ფარის გახსნასა და წყლის ხარჯს შორის დამოკიდებულება ...	71
ნახაზი #16 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ.	72

ნახაზი #17 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში	73
ნახაზი #18 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ.	74
ნახაზი #19 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში	75
ნახაზი #20 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ.	76
ნახაზი #21 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში (4 ფარის გახსნისას)	77
ნახაზი #22 - საანგარიშო სქემა კაშხალი-ფუძე სისტემის ფილტრაციული გაანგარიშებისთვის.....	78
ნახაზი #23 - ფილტრაციული ბადე კაშხლის ფუძეში საპროექტო და ენერჯის ჩამქრობ ჭაში გამორეცხილი ძირის შემთხვევაში.	79
ნახაზი #24 - ფილტრაციული უკუწნევა კაშხლის ძირზე	80
ნახაზი #25 - ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტები ფუძეში	80
ნახაზი #26 - ჰიდროდინამიკური დატვირთვა და წნევის პულსაცია ფილაზე	83
ნახაზი #27 - „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის საანგარიშო სქემა ფუძის ეტაპობრივი გარეცხვის გათვალისწინებით	88
ნახაზი #28 - არაკლდოვან ფუძეზე არსებული კაშხლის მდგრადობაზე შეფასების ზოგადი სქემა.....	88
ნახაზი #29 - მაქსიმალური მთავარი ძაბვები კაშხლის ფუძეში	93
ნახაზი #30 - ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილება კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე.....	94
ნახაზი #31 - მხები ძაბვების განაწილება კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე..	95
ნახაზი #32 - მდგრადობის მარაგები მორგენსტერნ-პრაისისა და ბიშოპის საანგარიშო სქემის მიხედვით.....	96
ნახაზი #33 - მდგრადობის მარაგები ორდინარისა და ჯანბუს საანგარიშო სქემის მიხედვით.....	97

ნახაზი #34 - მდგრადობის მარაგები კაშხლისა და ფუძის ერთობლივი მუშაობისას	98
ნახაზი #35 - კაჭარ-ხრემოვანი გრუნტის ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები ძაბვების დევიატორულ უბანზე (მარსალის კვლევები).....	99
ნახაზი #36 - σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო c-c კვეთზე, არწრფივობის გათვალისწინებით:	101
ნახაზი #37 - მარაგის კოეფიციენტების (K) განაწილება კაშხლის ფუძეში .	102
ნახაზი #38 - მდგრადობის მარაგები ძვრაზე სიმტკიცის პირობის მიხედვით წყალსაცავში წყლის 501.55 მ.ზ.დ. არსებობისას	104
ნახაზი #39 - საკონტაქტო ძაბვები ზღუდარსა და ფუძის საკონტაქტო კვეთში ზემო ბიეფში წყლის დონის 1 მ-ით აწევსას (502.55 მ.ზ.დ.-მდე)	105

შესავალი

სამეცნიერო თემის აქტუალობა: ჰიდროენერგეტიკულ და ჰიდრომელიორაციულ მშენებლობას წამყვანი ადგილი უკავია ქვეყნის ეკონომიკურ განვითარებაში. გასათვალისწინებელია, რომ საქართველო წყლის რესურსებით მდიდარი ქვეყანაა, რაც სამომავლოდ ბევრ სასიკეთო პერსპექტივებს სახავს ამ მიმართულებით.

კაშხლებს, როგორც ყველაზე საპასუხისმგებლო წყალშემტბორავ ნაგებობებს, წამყვანი ადგილი უკავია ჰიდროკვანძებში. საშუალო და მაღალდაწნევიანი ობიექტების შემთხვევაში, კაშხლები ყველაზე უფრო მეტად ძვირადღირებული ნაგებობებია და მათი გამართული მუშაობა მნიშვნელოვან წილად განსაზღვრავს მთლიანად ჰიდროკვანძების საიმედოობას.

კაშხლების სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობები პროექტირების წამყვანი საკითხებია, ხოლო ექსპლუატაციის პერიოდში კი, ნაგებობათა საიმედოობაზე კონტროლი ხორციელდება ინსტრუმენტული გაზომვებისა და შესაბამისი კვლევების გზით.

ბეტონის წყალშემტბორავ ნაგებობათა შორის ერთ-ერთ ტრადიციულ და ფართოდ გავრცელებულ სახეს წარმოადგენს გრავიტაციული კაშხალი. ამ ტიპის კაშხლებმა, როგორც მაღალი საიმედოობის მქონე ნაგებობებმა, დიდი ხანია დაიმკვიდრეს თავი მსოფლიო კაშხალთმშენებლობის პრაქტიკაში. ისინი წარმატებით მუშაობენ მკაცრი კლიმატური და მაღალი სეისმიურობის პირობებშიაც კი.

გრავიტაციული კაშხლები ფართოდაა წარმოდგენილი საქართველოს ჰიდროენერგეტიკულ ობიექტებზე. მათ შორისაა ზაჰესის, რიონჰესის, გუმათჰესის, აბაშაჰესის, ცაგერის გრავიტაციული კაშხლები. ისინი ასევე გამოიყენება როგორც დამოუკიდებელი წყალსაგდები ნაგებობები, რის გამოც მათი როლი ასევე გამორჩეულად მაღალია ჰიდროკვანძების

საიმედოობაში. ამ მხრივ აღსანიშნავია ჟინვალჰესის (14 მ), სიონჰესის (8 მ), თეძამის (დაპროექტებულია) და სხვა წყალსაგდები კაშხლები.

კაშხლების გაანგარიშებისას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს მასალათა (ბეტონისა და ფუძის გრუნტის) არაწრფივობა. საკითხის მნიშვნელობა განსაკუთრებით ძლიერდება არაკლდოვანი ფუძის პირობებში, სადაც გრუნტის კუმშვის დიაგრამა ($\sigma = f(\varepsilon)$) მკვეთრად არაწრფივია. ასეთ პირობებში კი ადგილი აქვს ნარჩენი დეფორმაციების განვითარებას, რაც თავს იჩენს ობიექტის ექსპლუატაციის დროს. შესაბამისად, აღნიშნული საკითხი მოითხოვს სიღრმისეულ შესწავლას და პროექტირების დროს გათვალისწინებას.

წყალსაშვიანი გრავიტაციული კაშხლების საიმედო ექსპლუატაციას მნიშვნელოვან წილად განსაზღვრავს ქვემო ბიეფში ენერგიის ჩამქრობი ჭის გამართული მუშაობა, რომლის დაზიანებას ყოველთვის თან ახლავს ფუძის გამორეცხვა, რაც შესაბამისად დიდ საშიშროებას ქმნის ნაგებობის მდგრადობის დაკარგვის მხრივ, მისი მნიშვნელობა განსაკუთრებით იმატებს არაკლდოვანი ფუძის პირობებში.

ენერგიის ჩამქრობი ჭის ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობას განსაზღვრავს ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმი. ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული მაღალი ტურბულენტობა წარმოქმნის ენერგიის დეფიციტს და ვიბრაციულ დატვირთვებს, რაც ფილტრაციულ უკუწნევასთან ერთად ხშირ შემთხვევაში ფილის ნგრევის მიზეზს წარმოადგენს.

გრავიტაციული კაშხლების პროექტირების დროს, მათი კონსტრუქციების დამუშავებისას, გადამწყვეტი როლი აკისრია ფუძეებს. სწორედ ამიტომ, სამშენებლო ნორმებში, ბეტონის კაშხლები ორ ძირითად ჯგუფადაა წარმოდგენილი: 1) კაშხლები კლდოვან და 2) კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე.

მოცემული საკითხები, საზოგადოდ, მეტად აქტუალურია კაშხალთმშენებლობის პრაქტიკაში, არამარტო მაღალდაწნევიანი, არამედ საშუალო და დაბალდაწნევიანი ჰიდროკვანძების დროსაც, მით უფრო არაკლდოვანი ფუძეების არსებობისას.

ხსენებულ საკითხებთან დაკავშირებით ჩვენს ქვეყანაში მეტად სერიოზული პრობლემები შეიქმნა ზაჰესის, ორთაჭალჰესისა და ცაგერის ჰიდროკვანძებში. თუმცა, ეს არ არის პრობლემური ჰიდროკვანძების სრული ჩამონათვალი, რადგან ექსპლუატაციაში მყოფი კაშხლების მდგომარეობა ამ მხრივ ჯერ შეუსწავლელი და შესაბამისად უცნობია.

წარმოდგენილი პრობლემები უმნიშვნელოვანესია და დიდწილად განსაზღვრავენ კაშხლების საიმედოობას, რასაც სამწუხაროდ პროექტირების დროს არ აქვს დათმობილი სათანადო ყურადღება. ამ საკითხებთან დაკავშირებული შედეგები, თავს იჩენს ობიექტების ექსპლუატაციის პერიოდში სხვადასხვა დეფექტების სახით, ხოლო ცალკეულ შემთხვევებში ფატალური შედეგებითაც მთავრდება. ჰიდროკვანძების რეაბილიტაცია კი მნიშვნელოვან ფინანსურ დანახარჯებთან არის დაკავშირებული.

ნაშრომში განხილულია ენერჯის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემ ფილაზე განვითარებული ჰიდროდინამიკური დატვირთვები და ფილის მდგრადობის კვლევები, ასევე არაკლდოვან ფუძეზე მყოფი გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობის შეფასება (ფუძის დაზიანების პირობებში) გრუნტის არაწრფივი დეფორმირების გათვალისწინებით. რიცხვითი გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა ცაგერის გრავიტაციული კაშხლის მაგალითზე.

ზემოთხსენებული საკითხები სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ძირითად ობიექტს წარმოადგენს.

კვლევის მიზანი: შემუშავდეს წყალსაცემი ფილის სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდოლოგია, ექსპერიმენტული კვლევის

შედეგებისა და ბიეფების შეუღლების პროცესში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის თანმხლები დატვირთვის (ენერჯის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გათვალისწინებით;

განისაზღვროს ცაგერის კაშხლის ქვემო ბიეფში ჰიდრავლიკური რეჟიმი, მისი თანმხლები დატვირთვის პარამეტრები და მათი ზემოქმედებით წყალსაცემი ფილის სიმტკიცე და მდგრადობა (სარეაბილიტაციო პროექტის დამუშავებასთან დაკავშირებით);

გაანალიზდეს ცაგერის კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ძაბვები გრუნტის არაწრფივობის გათვალისწინებით;

შეფასდეს ცაგერის გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობა ქვემო ბიეფში განვითარებული გამორეცხვების გათვალისწინებით.

სამეცნიერო სიახლე: დამუშავდა გაანგარიშების კომპლექსური მეთოდიკა, ბიეფების შეუღლების ჰიდრავლიკური და სატატიკური გაანგარიშებისათვის. მეთოდიკის საფუძველზე შესაძლებელია:

დიფერენცირებულად იქნას შეფასებული ექსპლუატაციის პერიოდში ფილაზე განვითარებული დატვირთვების (ენერჯის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გავლენა წყალსაცემი ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობაზე;

გაანგარიშდეს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ყველა საპროექტო პარამეტრი (ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები).

სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე დამუშავდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდიკა, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმადობის ($\sigma = f(\varepsilon)$), ასევე ფილტრაციული დატვირთვების გათვალისწინებით, რაც საშუალებას იძლევა შეფასდეს ხსენებული სისტემის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა (დდმ), კაშხლის

მდგრადობის მარაგები ფუძის გრუნტის ზიდვის უნარიანობის გათვალისწინებით.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა: დამუშავებული მეთოდიკის საფუძველზე, შესაძლებელია გაანგარიშდეს ენერჯის ჩამქრობი ჭის გეომეტრიული ზომები, წყალსაცემი ფილის ყველა საანგარიშო პარამეტრი, მათ შორის ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები (კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში), როგორც საპროექტო ასევე სარეაბილიტაციო ობიექტისათვის;

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდიკა, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმადობის გათვალისწინებით, საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს ხსენებული სისტემის დდმ, ასევე სისტემის ზიდვის უნარიანობა საპროექტო პირობებისა და ფუძის გეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით;

ნაშრომში წარმოდგენილი მეთოდიკის გამოყენებით ჩატარდა ცაგერის ჰიდროკვანძის გრავიტაციული კაშხლის სარეაბილიტაციო გაანგარიშებები, რომლის საფუძველზე:

- მიღებულ იქნა წყალსაცემი ფილის პარამეტრები (სისქე, არმირებისა და ანკერების ზომები);
- შეფასდა კაშხლის დდმ და მდგრადობის მარაგები ფუძეში (ქვემო ბიეფის მხარეს) გაჩენილი გამორეცხილი 5 მ-იანი ორმოს გავლენის გათვალისწინებით;
- გაანგარიშდა წყალსაცავში წყლის დამუშავების ის მინიმალური დონე, რომლის არსებობის დროს მიღწეულ იქნა რეაბილიტაციის პერიოდში უსაფრთხოება:
 - ფუძის ფილტრაციული სიმტკიცე და;
 - კაშხლის მდგრადობა.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალის, ლიტერატურის მიმოხილვის, კვლევის, შედეგებისა და

მათი განსჯის, დასკვნის, გამოყენებული ლიტერატურისა და დანართებისგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 115 ნაბეჭდ გვერდზე, რომელიც მოიცავს 39 ნახაზს, 3 ცხრილსა და 2 დანართს.

ნაშრომის აპრობაცია: სადისერტაციო მასალები მოხსენიებულ იქნა აბრეშუმის გზის მე-16 დისტანციურ საერთაშორისო კონფერენციაზე, თბილისი 2021.

პუბლიკაციები: სადისერტაციო ნაშრომის თემასთან დაკავშირებით დღეისათვის გამოქვეყნებულია ოთხი სამეცნიერო სტატია, საქართველოში აკრედიტირებულ რეფერირებულ ჟურნალებში.

ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1 ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები (ზოგადი აღწერა)

ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები, კონსტრუქციის სიმარტივისა და მისი აღმართვის შესაძლებლობების წყალობით, ფართოდაა გავრცელებული მთელს მსოფლიოში. ისინი საიმედოა ნებისმიერ სიმაღლეზე და შესაძლებელია აშენდეს ყველანაირ ბუნებრივ პირობებში, მათ შორის მკაცრ ზამთარში.

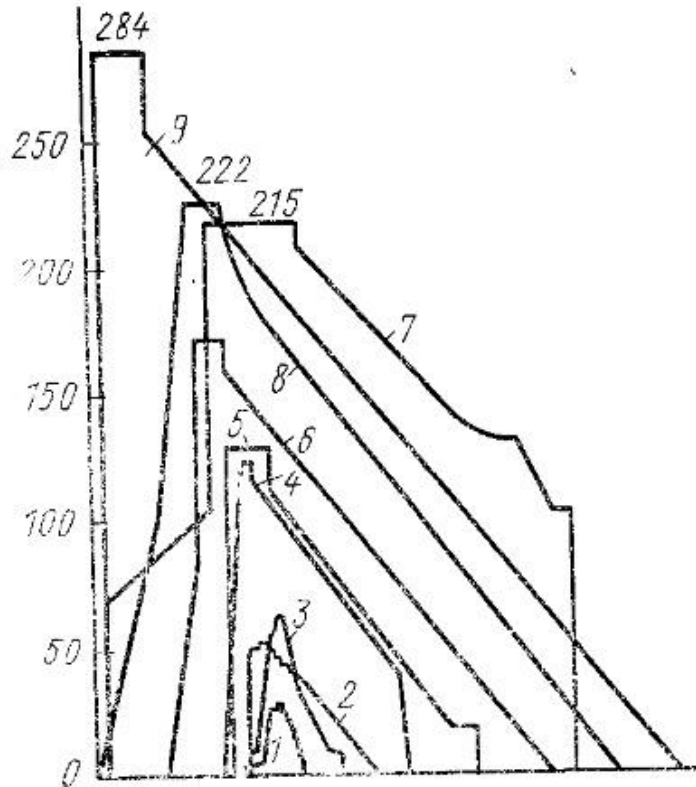
გრავიტაციული კაშხლები, მათზე მოქმედი ძირითადი ძალის (წყლის ჰორიზონტალური დაწნევის) შეკავებას ახდენენ საკუთარი წონით, რომელიც ქმნის ფუძის გასწვრივ ძვრის მიმართ წინაღობის ძალას.

გრავიტაციული კაშხლები კონსტრუქციულად წარმოადგენენ ბეტონის კედლებს, ყრუ ან წყალსაშვიანი ნაწილით (სურ. #1 და #2).

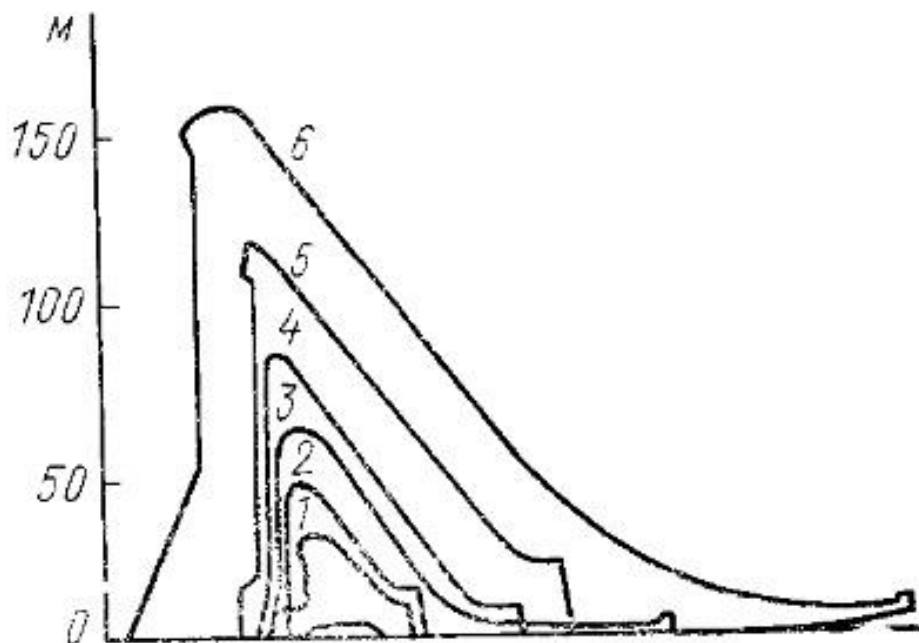
კაშხლის განივი პროფილები: თავდაპირველ კაშხლებს, მაგალითად პუენტესი (1791), გრობუა (1838), ჰქონდათ მეტად მძიმე განივი პროფილები, ტრაპეციასთან მიახლოებული ან თუნდაც მართკუთხედის ფორმის.

განგარიშების თეორიის დამუშავებასთან ერთად, შემდგომში გამოჩნდნენ კაშხლის უფრო ეკონომიური, მრუდწირული ან პოლიგონური მოხაზულობის მქონე პროფილები. თუმცა, ყველაზე ეკონომიურ პროფილად, მიჩნეულ იქნა ძირში წარმოდგენილი სამკუთხა ფორმა, რამოდენიმე გადახრითა და კორექტირებით, რომელიც გამოწვეულია კაშხლის მუშაობის პირობებით. დღეისათვის კაშხლების უმეტესობის პროექტირება ხორციელდება სამკუთხა ფორმის პროფილებით.

გრავიტაციული კაშხლების სტატიკურ განგარიშებას ჩვეულებრივ აწარმოებენ იმ ძალების გათვალისწინებით, რომლებიც მოქმედებენ ბრტყელ კვეთებზე, კაშხლის ღერძის ნორმალზე, ანუ ბრტყელი ამოცანის პირობებში.



სურათი #1 - რამოდენიმე გრავიტაციული კაშხლის პროფილი (ყრუ)
 1 - გრობუა (1838); 2 - პუნტესი (1791); 3 - ფიურანსი (1866); 4 - შამბონი (1936); 5 - ბრაცკი (1965); 6 - გრენდ კული (1942); 7 - ტოკტოგული (1976); 8 - ჰუვერი (1935); 9 - გრანდ დინკანსი (1961)



სურათი #2 - რამოდენიმე გრავიტაციული კაშხლის პროფილი (წყალსაშვიანი)
 1 - ციმლიანსკი (1951); 2 - დნეპრი (1932); 3 - ნორისი (1935); 4 - გრენდ კული (1942); 5 - კრასნოიარსკი (1970); 6 - შასტა (1944)

ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების ზოგადი კონსტრუქციულ-სამშენებლო მახასიათებლები: ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუქციები დიდწილად დამოკიდებულია მისი ფუძის მახასიათებელზე - კლდოვანი თუ არაკლდოვანი; მასზეა დამოკიდებული ნაგებობის სასაზღვრო ეკონომიური სიმაღლე (დაწნევა): არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში არაუმეტეს 35 - 40 მ, კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში სასაზღვრო დაწნევა, პრაქტიკაში განხორციელების მიხედვით, აღწევს 300 მეტრს და მეტს.

ზოგადად კაშხლის ღერძი სწორხაზოვანია, თუმცა გვხვდება ტეხილებიც და მრუდწირებიც, რაც გამოწვეულია ჩვეულებრივ გეოლოგიური (რათა კაშხალი განთავსდეს მეტად სანდო ერთგვაროვან ქანებზე), ზოგჯერ ტოპოგრაფიული პირობებით.

კაშხლის ტანის ყველა ზონაში, ბეტონმა უპირველეს ყოვლისა უნდა დააკმაყოფილოს სიმტკიცის პირობები, მისი დამაბული მდგომარეობის შესაბამისად. თუმცა, კონტურის ზონებში, ბეტონი ასევე ექცევა გარე ფაქტორების გავლენის ქვეშ: ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა, წყლის ფილტრაცია, წყალსაშვი ზედაპირების აბრაზია, ამიტომაც აქ ბეტონმა უნდა დააკმაყოფილოს დამატებითი მოთხოვნები [1].

1.1.1 ბეტონის წყალსაგდებიანი კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე

არაკლდოვან ფუძეებზე აგებული ბეტონის კაშხლები, თავიანთი ფორმით, განსხვავდებიან კლდოვან ფუძეებზე განთავსებული კაშხლებისგან, ფუძესთან დიდი საკონტაქტო ზონითა და შესაბამისი წონით. აღნიშნული გამოწვეულია იმით, რომ არაკლდოვან ფუძეზე განთავსებული კაშხლის ძვრაზე მდგრადობის მიმართ წინაღობა 1.5-4-ჯერ უფრო ნაკლებია, ვიდრე კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში, რაც ფუძეზე დასაშვები დაბალი დატვირთვებიდან გამომდინარეობს.

არაკლდოვანი ფუძის ეს მახასიათებლები, მათზე მაღალი კაშხლების მშენებლობას ხდიან არაეკონომიურს და ხშირად შეუძლებელს, ამიტომაც მათი სიმაღლე შემოისაზღვრება 40-50 მეტრამდე დაწნევით. კაშხლის კონსტრუქციული სქემები, განსაკუთრებით მათი ფუნდამენტური ნაწილების და მიწისქვეშა კონტურების სქემები, ნაკარნახევია ფუძეში გრუნტების ინჟინრულ-გეოლოგიური თვისებებით.

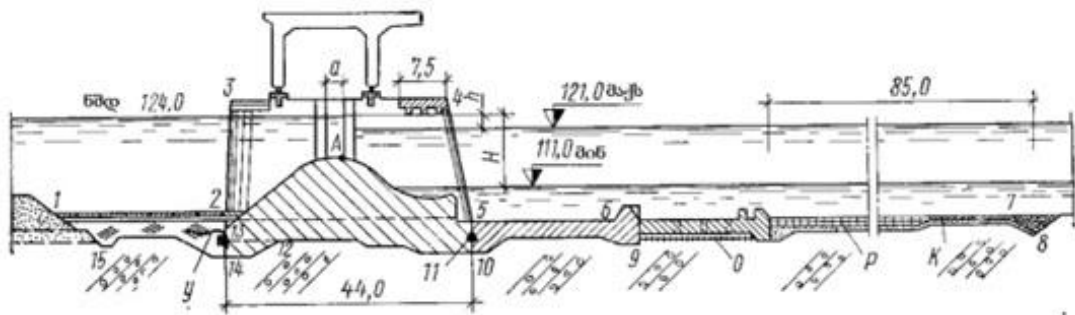
1.1.2 არაკლდოვან ფუძეზე ბეტონის კაშხლის განთავსების სქემები. კაშხლის მიწისქვეშა კონტურის ფორმირება

არაკლდოვან ფუძეზე ნებისმიერი კაშხლის სქემის გადაწყვეტა შეიძლება იმ შემთხვევაში, თუ გათვალისწინებულია სამი ძირითადი მოთხოვნა: კაშხლის ძვრაზე მდგრადობის უზრუნველყოფა ფუძის სიმტკიცის შენარჩუნებით; უკუფილტრაციის ყველაზე დაბალი მნიშვნელობის მიღება, ფუძის ფილტრაციის მიმართ სიმტკიცის უზრუნველსაყოფად; კაშხლის წყალსაშვი ნაწილიდან გატარებული წყლის ნაკადის ჭარბი ენერგიის ჩაქრობა.

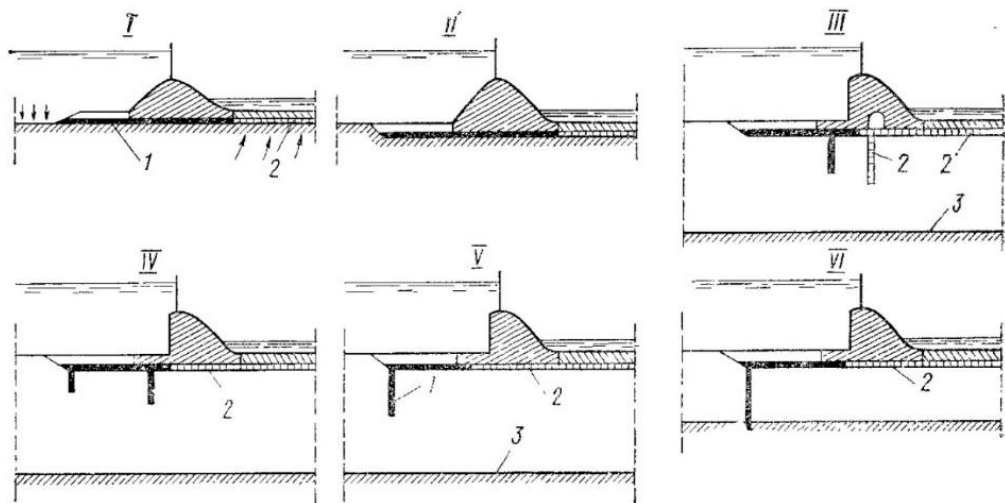
პირველი ორი მოთხოვნა დაკავშირებულია ფუძის გეოლოგიურ მახასიათებლებთან, მესამე - ძირითადად კაშხლიდან გატარებული წყლის ნაკადის სპეციფიკურ ხარჯებთან. სპეციფიკური ხარჯების მატებასთან ერთად, იმატებს წყლის ენერგიის ჩამქრობი ჭის სიღრმე და შესაბამისად იზრდება კაშხლის საძირკვლის ფილის განთავსების სიღრმეც, რთულდება ქვედა ბიეფში წყლის ენერგიის ჩაქრობა. კაშხლის რაციონალური სქემა ასევე უნდა აკმაყოფილებდეს მისი მინიმალური ღირებულების მოთხოვნებს. სქემის შერჩევა ხდება ვარიანტების განხილვის საფუძველზე (სურ. #3).

მიწისქვეშა კონტურის სქემა ყალიბდება გეოლოგიური აგებულების, საძირკვლის ტიპისა და მიწისქვეშა კონტურის მიმართ წაყენებული მოთხოვნების მიხედვით (მინიმალური ფილტრაციული წნევა, ფუძის

ფილტრაციის მიმართ სიმტკიცის შენარჩუნება). თუ ფუძე შედგება შედარებით ერთგვაროვანი შეუკავშირებელი გრუნტისგან, ხოლო წყალმდეგი ფენა განთავსებულია დიდ სიღრმეზე, კაშხლის მასთან მიერთება არ არის მიზანშეწონილი.



სურათი #3 - კაშხალი ბრტყელი მიწისქვეშა კონტურით



სურათი #4 - წყალსაშვიანი კაშხლების სქემები არაკლდოვან ფუძეზე
 I, II - თიხოვან გრუნტზე კაშხლის განთავსება როდესაც ვერტიკალური ფარდების დაყენება შეუძლებელია ან არაპრაქტიკულია; III, IV, V - როდესაც წყალმდეგი ფენა განთავსებულია სიღრმეში; VI - როდესაც წყალმდეგი ფენა არ არის განთავსებული სიღრმეში. 1 და 2 - მიწისქვეშა კონტურის წყალგაუმტარი და წყალგამტარი (დრენაჟი) ნაწილი, 3 - წყალმდეგი ფენა.

ამ შემთხვევაში, ვერტიკალურ ფილტრაციის საწინააღმდეგო კონსტრუქციებს (ნარანდები, კედლები, საცემენტაციო ფარდები),

რომლებიც ვერ დადიან წყალმდეგ ფენამდე, უწოდებენ დაკიდებულს. ასეთი ტიპის ფუძეების დროს შეიძლება გამოყენებულ იქნას მიწისქვეშა კონტურის სქემები I, II, III, IV, V, VI, რომლებიც გამოსახულია სურ. #4-ზე. მუქი ხაზებით აღნიშნულია მიწისქვეშა კონტურის წყალგაუმტარი ფენები, შტრიხით - წყალგამტარი.

1.1.3 კვლევები გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუქციათა მუშაობისა და გაანგარიშების მეთოდების მიმართ

ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების არაკლდოვან ფუძეზე განთავსების მრავალი განსხვავებული სქემის არსებობის გამო, დიდ მნიშვნელობას იძენს მათი განთავსების ადგილის სწორი შერჩევა. გეოლოგიური მახასიათებლების მიხედვით, დამცავი ჰიდროტექნიკური ელემენტების მოსაწყობად სხვადასხვა ინჟინრული ვარიანტების შემუშავება და ყველაზე ოპტიმალური გადაწყვეტის მოძებნა, ობიექტის ხანგრძლივი ექსპლუატაციის უზრუნველყოფის მთავარი გარანტიაა.

არაკლდოვანი გრუნტების დეფორმაციულობის რთული სურათის გამო, არაერთი კვლევა და შესწავლა ჩატარდა, რათა შეემუშავებინათ ინჟინრული მიზნებისთვის შესაფერისი მეთოდები. მათ შორის ერთ-ერთია მიხაილ საინოვის ნაშრომი გრუნტის მაკროფრაგმენტების დეფორმაციის პარამეტრებთან დაკავშირებით, სადაც ავტორი ცდილობს განაზოგადოს სხვა ავტორების მიერ შესრულებული გრუნტის მაკროფრაგმენტების ტესტირების შედეგები და გასცეს რეკომენდაციები გრუნტის პარამეტრების არაწრფივი მოდელების განსაზღვრაზე. ნაშრომი იძლევა ხრეშოვანი და კენჭოვანი გრუნტის და კარიერიდან მოპოვებული კლდოვანი ქანების მოცულობითი წონის განსაზღვრის შესაძლებლობას. კვლევაში ნაჩვენებია, რომ კუმშვითი ძაბვებით გამოწვეული საწყისი მძვრელი მოდულები დამოკიდებულია ძაბვებზე, რომლებიც შეიძლება აისახოს დენის ფორმულით. ხაზგასასმელია ის ფაქტორი, რომ კვლევა ორიენტირებულია

ქვისა და მიწა-ქვიან გრავიტაციულ კაშხლებში მიმდინარე პროცესებზე, თუმცა ვინაიდან ქვემოთ მოცემული სადისერტაციო ნაშრომისთვის შერჩეული ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი განთავსებულია არაკლდოვან ფუძეზე, მოცემული კვლევით მიღებული შედეგები და რეკომენდაციები მნიშვნელოვნად მიიჩნევა კვლევის სწორი წარმართვისთვის. დღეისათვის სხვადასხვა ქვეყნის ლაბორატორიებში შესრულებულია მსხვილმარცვლოვანი გრუნტების უამრავი სტაბილომეტრული გამოცდები, დაგროვებულია დიდი ექსპერიმენტალური მასალები და გამოვლენილია ამ გრუნტების ძირითადი თავისებურებები [2-6].

ექსპერიმენტალურმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მსხვილფრაქციული გრუნტები ხასიათდებიან არაწრფივი დეფორმაციულობით და მათი დეფორმირების დროს თავს იჩენს არა მხოლოდ პლასტიკური, არამედ დილატანსიური (გაფართოებითი) თვისებები. გამოვლინდა კავშირი გრუნტის დეფორმაციასა და მტკიცე მდგომარეობას შორის. კვლევებმა აჩვენა, რომ მსხვილფრაქციული გრუნტის სიმტკიცე და დეფორმადობა მნიშვნელოვან წილად დამოკიდებულია მის კუმშვადობაზე. კუმშვის არარსებობის დროს ისინი მალევე იშლებიან, ხოლო კუმშვის მაღალი წნევების დროს იძენენ ძალიან მაღალ სიმტკიცეს.

მსხვილფრაქციულ გრუნტებზე ჩატარებული ექსპერიმენტალური კვლევების დიდი რაოდენობის მიუხედავად, საიმედო მონაცემები მათ თვისებებზე დღემდე არ არის მიღებული, ვინაიდან ქვეზე ჩატარებული ექსპერიმენტი ძალიან რთულად შესრულებადია (მსხვილფრაქციული გრუნტის ნაწილაკების მაქსიმალური ზომა აღწევს ასობით მილიმეტრს). მსგავსი გრუნტების გამოსაკვლევად საჭიროა მსხვილმასშტაბიანი ლაბორატორიული დანადგარები, სადაც ამ დანადგარებმა საშუალება უნდა მისცეს მკვლევარს ექსპერტიმენტი ჩატარდეს ისეთი წნევებით, რომლებსაც ქვა კაშხლის ტანში განიცდის ($2 \div 5$ მპა-მდე). ასეთი გამოსაცდელი დანადგარები ძალიან ძვირადღირებულია, ამიტომაც რეალური

მსხვილფრაქციული გრუნტების კვლევის ნაცვლად, ცდებს უფრო მცირე მასშტაბის დანადგარებზე, მოდელურ გრუნტებზე ატარებენ.

ძირითადად გვაქვს შედეგები, რომლებიც მიღებულია არა თვით მსხვილფრაქციული გრუნტების ექსპერიმენტალური გამოცდით, არამედ მეტად მცირემარცვლოვანი ანალოგების (სამოდელო გრუნტების) გამოცდით. სწორედ ეს ხსნის მსხვილფრაქციული გრუნტების დეფორმირებადობასთან დაკავშირებული საიმედო მონაცემების არქონას. სამოდელო გრუნტებზე ჩატარებული კვლევები, უმეტესწილად არ მიიღება კაშხლების საანგარიშოდ, ვინაიდან ისინი არასრულად ასახავენ კაშხლის ტანში გრუნტის რეალურ ქცევას.

მსხვილფრაქციული გრუნტების თვისებების კვლევის კუთხით ჩატარებული ექსპერიმენტებიდან, შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ის მონაცემები, რომლებიც მიიღეს მარსალმა, მარაჩიმ და გუპტამ [7-9].

ყველა ეს კვლევა ჩატარდა 3-ღერძა კუმშვის დანადგარებზე სტანდარტული მეთოდის გამოყენებით. თავიდან ხდებოდა გრუნტის კუმშვა თანაბარი ძაბვით σ_3 ყველა მიმართულებით, ხოლო შემდეგ კუმშვა σ_1 მხოლოდ ერთი (ვერტიკალური) ღერძის მიმართულებით, ძაბვის σ_3 უცვლელი მდგომარეობის დროს.

მარსალის კვლევები ჩატარდა 1960-იან წლებში, მექსიკაში, კაშხალი ინფერნილოს მშენებლობის დროს, რისთვისაც აიწყო სპეციალური მსხვილმასშტაბიანი მოწყობილობა 3-ღერძა კუმშვისთვის, რამაც შესაძლებელი გახადა ტესტი ჩატარებულიყო კუმშვითი წნევის ფართო დიაპაზონში. აღსანიშნავია, რომ ლაჯანურჰესის და შესაბამისად ცაგერის კახლის მშენებლობა სწორედ მე-20 საუკუნის 60-იან წლებს უკავშირდება, რაც იმას ნიშნავს რომ იმ პერიოდისთვის უკვე აქტუალურ საკითხს წარმოადგენდა არაკლდოვანი გრუნტების დეფორმაციულობის საკითხი.

მარაჩიმ ექსპერიმენტები ჩაატარა ორი მაღალი კაშხლის - ოროვილის (სურ. #5) და პირამიდის (სურ. #6) მშენებლობისთვის.



სურათი #5 - პირამიდის კაშხალი
მდებარეობს ლოს ანჯელესის ჩრდილოეთ ნაწილში



სურათი #6 - ოროვილის კაშხალი
მდებარეობს კალიფორნიაში, ქალაქ ოროვილის აღმოსავლეთ ნაწილში

მიუხედავად მნიშვნელოვანი და მოცულობითი ექსპერიმენტული კვლევებისა, სწორედ გეოლოგიურ საკითხებთანაა დაკავშირებული

კაშხლის სწრაფდენზე მომხდარი ავარია, რომელიც 2017 წლის თებერვალში, წყალდიდობის ხარჯის გატარების დროს განვითარდა. ქვემოთ აღწერილ ავარიასთან დაკავშირებული საკითხები, ნაწილობრივ უკავშირდება სადისერტაციო თემას ნაგებობის ფუძის მდგრადობის კუთხიდან გამომდინარე. კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზის მნიშვნელობის კუთხით, საჭიროა განვიხილოთ ის ისტორიული შემთხვევები და ავარიები, რომლებიც აღშინულ საკითხს უკავშირდება, შესაბამისად ქვემოთ წარმოჩენილია რამოდენიმე შემთხვევა, რათა ცხადად იქნას დანახული პრობლემის აქტუალობა.

დიდი კაშხლების პროექტირებისას გაითვალისწინება კატასტროფული ხარჯები, რომლის უსაფრთხო გატარებაც უნდა უზრუნველყოს შესაბამისმა ჰიდროტექნიკურმა ობიექტმა. ძირითად შემთხვევებში, მათი პროექტირების დროს, ანგარიშები ითვალისწინებს მაქსიმალურ შესაძლო წყალდიდობას, რაც შეიძლება ძლიერი წვიმის შედეგად მოვიდეს. ძირითადი წყალსაშვის დაპროექტება ისეთი ხარჯის გასატარებლად, როგორც ნაგებობის ექსპლუატაციის პერიოდში ძალიან იშვიათადაა მოსალოდნელი, აზრს კარგავს. კატასტროფულად დიდი წყალდიდობისას, რომელიც უკავშირდება 2017 წლის თებერვალში ისტორიულად ყველაზე უხვნალექიან ზამთარს, საჭირო გახდა სწრაფდენის ჩართვა წყალსაცავში მომატებული დონის რეგულირებისთვის, თუმცა წყლის გაშვებიდან მალევე, უჩვეულო ნაკადი შეიმჩნეოდა სწრაფდენის დახრილი უბნის შუა ნაწილზე. აღნიშნული ფაქტორი საკმარისი აღმოჩნდა მიეღოთ სწრაფდენის ფარის დაკეტვის და წყალდიდობის ხარჯის გაშვების დროებით შეჩერების გადაწყვეტილება, რათა უკეთ დაეთვალიერებინათ ანომალიის ადგილი. შედეგად გამოვლინდა, რომ რამოდენიმე ბეტონის დიდ ფილას სრულიად დაკარგული ჰქონდა მდგრადობა და მის ქვეშ ფიქსირდებოდა უზარმაზარი ხვრელი. წყალდიდობის შედეგად წყალსაცავში დონის მატებამ, ოპერატორებს საშუალება არ მისცათ სწრაფდენი დაკეტილ მდგომარეობაში დიდხანს გაეჩერებინათ, მათ უნდა

გაეღოთ დანარჩენი ფარები და შეხვედროდნენ ნაგებობის შესაძლო დაზიანებას. ძლიერმა წვიმამ, მომუშავე სწრაფდენის მიუხედავად, გამოიწვია წყალსაცავში წყლის დონის აწევა და ავარიული წყალსაშვიდან გადადინებაც. კატასტროფული ხარჯის რთულ პირობებში გატარების შემდგომ დაიწყო პრობლემის დეტალური შესწავლა (სურ. #7) და სწრაფდენის დაზიანებული უბნის აღსადგენად პროექტის შემუშავება ექსტრემალურად ვიწრო ვადებში, ვინაიდან ოპერატორებს მალევე მოუწევდათ საგაზაფხულო წყალდიდობებისთვის მზაობა.



სურათი #7 - ოროვილის კაშხლის სწრაფდენის დაზიანებული უბანი, მდგომარეობა წყალდიდობის გატარების შემდგომ

საპროექტო გადაწყვეტის დროს მოპოვებული გეოლოგიური მონაცემების მიხედვით, სწრაფდენის ფუძე ხასიათდებოდა გეოლოგიურად მყარი გამოუფიტავი მასივით. წყალდიდობის გატარების შედეგად გამოვლენილი რეალური გეოლოგიური მდგომარეობით შეფასდა, რომ ფუძე შედგებოდა ძლიერ ეროზირებადი და გამოფიტული კლდოვანი ქანებისგან. ამდენად, მომხდარი ავარიის მიზეზი უკავშირდებოდა ფუძის რეალურ გეოლოგიურ აგებულებას [10].

ოსტინის ბლოკური წყობის ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი, სიმაღლით 15 მ, აშენდა 1909 წელს, პენსილვანიაში. ექსპლუატაციაში გაშვებიდან ორ წელზე ნაკლებ დროში, მრავალმა ნაწილობრივმა დაზიანებამ, კაშხალს განუვითარა პრობლემები და 1911 წლის 30 სექტემბერს, წყალდიდობის გატარებისას განიცადა რღვევა (სურ. #8 და #9).

კაშხლის რღვევის მიზეზად დასახელდა მის ძირზე განვითარებული უკუწნევის არასრულყოფილი გათვალისწინება, რაც განვითარდა კაშხლის ტანში არსებულ ბზარებში, ფორებსა და ნაკერებში, ასევე კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზონაში და ფუძის ქანებში არსებულ ნაპრალებში. 1920-იან წლებამდე გრავიტაციული კაშხლების უდიდესი ნაწილი, კაშხლის წონით შექმნილი დიდი დამჭერი ძალისა და ფუნდამენტთან კავშირის დადებითი მნიშვნელობიდან გამომდინარე, პროექტდებოდა უკუწნევის მნიშვნელობის უგულვებელყოფით. მოცემულმა და 1900-იანი წლების ადრეულ ხანებში სხვა მსგავსმა შემთხვევებმა, წინ წამოწიეს უკუწნევის მნიშვნელობის საკითხები, რამაც ინჟინრებს შეამუშავებინა ისეთი საპროექტო გადაწყვეტა, როგორცაა საცემენტაციო ფარდა, რომელიც უზრუნველყოფს კაშხლის ძირზე უკუწნევის შემცირებას [11].

კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზი მოიცავს სხვადასხვა საკითხს, რომელთა შორის უმნიშვნელოვანესია გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები, მათი სიმტკიცე ძვრაზე, ბზართა სისტემაზე და უკუწნევის მნიშვნელობებზე. შესაბამისად, ფუძის გეოლოგიური შესწავლა და მისი საინჟინრო პარამეტრების განსაზღვრა ძირითად როლს თამაშობს კაშხლისა და მისი შემადგენელი ელემენტების სწორად განსაზღვრისა და პროექტირებისთვის.

არაკლდოვან ფუძეზე არსებული ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობაზე ანალიზი, მოითხოვს მარაგების შეფასებებს როგორც კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო სიბრტყის, ასევე გეოლოგიური ბზარებისა და სიღრმული ძვრის ზედაპირების მიმართ.



სურათი #8 - ოსტინის კაშხლის ისტორიული სურათი მის რღვევამდე



სურათი #9 - ოსტინის კაშხლის სურათი რღვევის შემდგომ

განგარიშებების დროს გამოიყენება ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა და მასზე დაყრდნობით: ბიშოპის, ჯანბუს, მორგენსტერნ-პრაისის და ორდინარის კრიტერიუმები.

ფუძეში არსებული ბზარების პირობებში, საკითხი უფრო რთულდება, რაც მოითხოვს დამატებით მდგომარეობის ანალიზს.

პროექტირების თანამედროვე ეტაპზე, ნაგებობათა გაანგარიშებისას, ძირითადად გამოიყენება სასრული და სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი. აღსანიშნავია, რომ „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის შესწავლისას, მაინც უპირატესობით ხასიათდება სასრული ელემენტების მეთოდი, რომელიც მაღალი სიზუსტით ითვალისწინებს როგორც ნაგებობის გეომეტრიულ და ფუძის გეოლოგიურ სირთულეებს (კლდოვანი და არაკლდოვანი მასივების არსებობისას), ასევე ფუძის დამუშავებისა და მშენებლობის ეტაპობრივობას [12-20].

1.1.4 კვლევები ენერჯის ჩამქრობი ჭის პროექტირებასთან დაკავშირებით

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა პროექტირებაში მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს ბიეფების შეუღლების ამოცანა, რაც განსაზღვრავს ენერჯის ჩამქრობი ჭის გაბარიტებსა და კონსტრუქციულ გადაწყვეტას.

ამ თემაზე ჩატარებულია დიდი რაოდენობის კვლევებით, თუმცა, ჰიდრავლიკური ნახტომები, თავიანთი სირთულის გამო, ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი. აქედან გამომდინარე, კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ნაშრომი შეეხება წნევების ცვალებადობას სივრცული ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს, ენერჯის ჩამქრობ ჭაში გაფართოების სხვადასხვა თანაფარდობისას. კვლევაში მიღებული შედეგები ნათელს ჰფენს მორეგების წარმოქმნის პროცესს და ენერჯის ჩამქრობ ჭაში მიღებული წნევების პულსაციას, გაფართოების სხვადასხვა თანაფარდობის დროს. კვლევა მოიცავს ლაბორატორიულ ექსპერიმენტს, რომელიც ჩატარდა ჰორიზონტალურ მართკუთხა ჩარჩოს მქონე 0.5 მ სიგანისა და 10 მ სიგრძის ავზში. ფრუდის რიცხვის მიახლოების დიაპაზონი კვლევისთვის მოიცავდა 6.4 - 12.5 ერთეულს და კონსტრუქციის გაფართოების კოეფიციენტები შესაბამისად იყო 0.4, 0.6, 0.8 და 1-ის ტოლი [21-30].

შედეგებმა აჩვენა, ცვლადების მკაფიო დამოკიდებულება ფრუდის რიცხვზე და ჰიდრავლიკური ნახტომის მანძილზე. ექსტრემალური წნევის პულსაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები ვითარდება ჰიდრავლიკური ნახტომის დიაპაზონში, რის გამოც მიზანშეწონილად ითვლება ენერჯის ჩამქრობი ჭის გამაგრება.

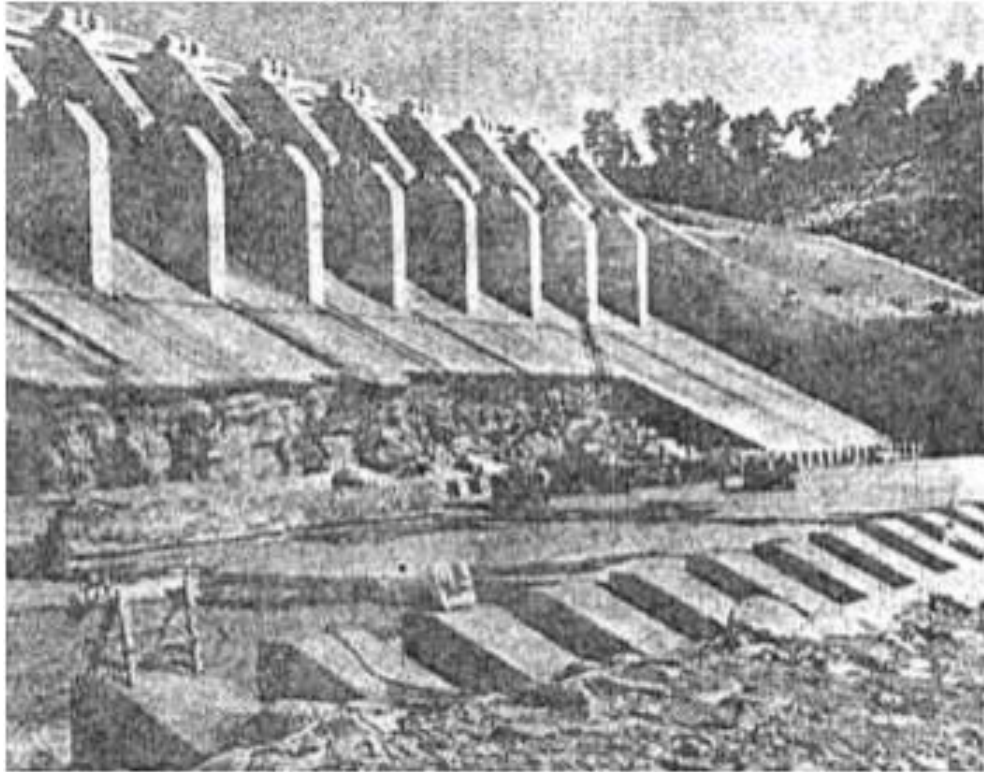
ჰიდრავლიკური ნახტომები კლასიფიცირებულია ფრუდის რიცხვის მიხედვით. ყველაზე ეფექტური ჰიდრავლიკური ნახტომი ენერჯის ჩამქრობის პირობებით მოქცეულია დიაპაზონში $4.5 < Fr < 10$, რაც ამცირებს ენერჯის ჩამქრობი ჭის სიგრძეს. ნახტომის ბოლოში, სადაც ზედა ბიეფის დინება ერწყმის ქვედა ბიეფის რეგიონს, ადგილი აქვს ერთეულოვანი სიჩქარისა და წნევის ველების წყვეტას. ჰიდრავლიკურ ნახტომებში ენერჯია ქრება ფართომასშტაბიანი ტურბულენტური სტრუქტურების წარმოქმნის გამო, რომლებიც დაკავშირებულია ჰიდროდინამიკური წნევის უმნიშვნელო პულსაციებთან, რომლებიც მოქმედებს ენერჯის ჩამქრობი აუზის ძირზე და კედლებზე. წნევების ასეთმა პულსაციებმა შეიძლება გამოიწვიოს მძიმე დაზიანება, რომელიც გამოიხატება ფილების მდგრადობის დაკარგვით, მასალების ეროზიით და კავიტაციის განვითარებით. ჰიდრავლიკური ნახტომების ტურბულენტობის ინტენსივობისა და წნევის პულსაციის შესწავლა დაიწყო 1950-იანი წლების ბოლოს, როდესაც ხელმისაწვდომი გახდა საჭირო ინსტრუმენტები, ამიტომაც გასაკვირი არ არის, რომ მაშინ ცოდნის დონე შედარებით დაბალი იყო და ენერჯის ჩამქრობი ელემენტების კონსტრუქცია ნაკლებად დახვეწილი. იმ პერიოდში, წნევის პულსაციებით გამოწვეული დიდი დაზიანებები ენერჯის ჩამქრობ ჭებში დაფიქსირდა რამოდენიმე ობიექტზე, მაგალითად ასეთი იყო კარნაფულის კაშხალი ბანგლადეშში და მალპასოს კაშხალი მექსიკაში (სურ. #10 და #11). სწორედ მოცემული შემთხვევების საფუძველზე, წინა პლანზე წამოიწია წნევის პულსაციის დეტალური შესწავლის საკითხები.

კარნაფულის კაშხლის შემთხვევაში, წყალდიდობის ხარჯის გატარების დროს წარმოქმნილმა წნევის პულსაციამ, ენერჯის ჩამქრობი ჭის სიგრძით 23 მ და სიგანით 180 მ დაზიანება გამოიწვია. რა თქმა უნდა, თავდაპირველად მკვლევართა კომისიამ წარმოადგინა დაზიანების სხვადასხვა მიზეზები, როგორცაა უკუწნევა სტრუქტურაში წყალსაცავიდან წყლის ფილტრაციის გამო, დინების ნაკადში შემთხვევით მოხვედრილი ხის მასალები და სხვა. თუმცა მოდელის შექმნისა და მეტად ზუსტი სწავლებების შემდგომ, დაზიანების ძირითად მიზეზად, წყალდიდობის ხარჯის გატარების დროს, ჰიდრავლიკური ნახტომის შედეგად წარმოქმნილი ინტენსიური წნევის პულსაცია დასახელდა.

მალპასოს კაშხლის შემთხვევაში, ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილების დაზიანება 1970 წელს მოხდა, როდესაც წყალსაშვ უბანზე მაქსიმალური საპროექტო ხარჯის 20%-ზე ნაკლები რაოდენობა გაატარეს. 12 მ სიგრძისა და 12 მ სიგანის მქონე 2 მ სისქის თითოეული ფილა 720 ტონამდე იწონიდა. ხაზგასასმელია, რომ ფილები განთავსებული იყო ხრეშოვან ფუძეზე, რომლებმაც დაკარგეს მდგრადობა, რითაც ნაგებობა სერიოზული საფრთხის წინაშე დააყენეს. კვლევების შედეგებმა აჩვენეს, რომ სწორედ წნევის პულსაციები იყო დაზიანების ძირითადი მიზეზი. აღნიშნულ შემთხვევას მრავალი კვლევა მოჰყვა შემდგომში, რითაც გამოვლინდა ასევე კავიტაციის რისკების მატება წნევის პულსაციის დროს, შესწავლილ იქნა ტურბულენტური წნევის მახასიათებლები თავისუფალი და ფორსირებული ჰიდრავლიკური ნახტომებისთვის და მრავალი სხვა.

ორივე შემთხვევაში, ტურბულენტური რეჟიმის დროს განვითარებული წნევის პულსაციები აღმოჩნდა ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილების დაზიანების ძირითადი მიზეზი. აღნიშნულის შემდგომ წარმოდგენილ იქნა ინფორმაცია მოდელისა და ნატურის ურთიერთდამოკიდებულების შესახებ, სადაც მითითებული დაბალი

სიხშირის ტურბულენტობა და წნევის პულსაციები, გამოწვეულია ფართომასშტაბიანი მორევებით და წყლის ზედაპირის ლეღვით.



სურათი #10 - კარნაფულის კაშხალი დაზიანების შემდგომ, 1961 წელი, ბანგლადეში



სურათი #11 - მალპასოს კაშხლის წყალსაშვის ენერჯის ჩამქრობი ჭა დაზიანების შემდგომ, 1970 წელი, მექსიკა

ამ პროცესებში დომინანტურია გრავიტაციისა და ინერციის ძალები. აღნიშნულის საპირისპიროდ, მაღალი სიხშირის პულსაციები გამოწვეულია ბლანტ ძალებთან დაკავშირებული ტურბულენტობით. გარდა ამისა, რამდენიმე კვლევამ აჩვენა, რომ წნევის პულსაციის უგანზომილებო ინდექსის პიკური მნიშვნელობა დამოკიდებულია ჰიდრაულიკური ნახტომის სიგრძეზე, ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილის დახრილობაზე, ფრუდის რიცხვის მიახლოებაზე, ინციდენტის ნაკადის განვითარებაზე და ცდის ხანგრძლივობაზე. ამ სწავლებებმა ასევე აჩვენეს, რომ მაქსიმალური და მინიმალური პოზიტიური და ნეგატიური წნევის პულსაციები ნახტომის მთელ სიგრძეზე, დასაწყისში მკვეთრად იზრდება და თანდათან იკლებს ნახტომის ბოლოს.

მოდელების უმეტეს შემთხვევებში, ფრუდის რიცხვის დიდი მნიშვნელობის დროს, აირის ჩართულობა ჰიდრაულიკურ ნახტომებში მნიშვნელოვანია როგორც ნახტომის ბოლოს, ასევე მისი ბრუნის ადგილებში (რეცირკულაციის რეგიონში), სადაც აირის უმეტესი ნაწილი წარმოიქმნება და ტრანსპორტირდება ქვედა ბიეფის მხარეს, დიდი მორევის სტრუქტურებით.

კვლევაში წარმოდგენილ იქნა ენერჯის ჩამქრობ ქებში სივრცითი ჰიდრაულიკური ნახტომების ყველაზე რელევანტური ჰიდროდინამიკური მახასიათებლები, გაფართოების სხვადასხვა კოეფიციენტებით. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ ტურბულენტობის ინტენსივობის მატებას და ფრუდის რიცხვის ზრდას, თან ახლას წნევის პულსაციების ზრდაც. შედეგები ასევე აჩვენებს, რომ ექსტრემალური წნევის პულსაციის მნიშვნელობები დამოკიდებულია ჰიდრაულიკური ნახტომის სიგრძეზე. ამასთან ერთად, დადებითი და უარყოფითი წნევის კოეფიციენტები გვხვდება გარკვეულ უბნებში, რის გამოც მიზანშეწონილია ასეთ ზონებში ყურადღება მიექცეს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილების გამაგრების საკითხებს. საშუალო წნევების ანალიზი მიუთითებს, რომ წნევები

ჰიდრავლიკური ნახტომის ბოლოს, სივრცითი ნახტომის შემთხვევაში, გაცილებით მეტია ვიდრე კლასიკური ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს, ვინაიდან კედლების თანდათანობით გაფართოებით მცირდება ხვედრითი სიღრმე [31].

ანალოგიური კვლევა, ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილაზე წნევის პულსაციების საკითხებთან დაკავშირებით, განხილულია ნაშრომში რიცხვითი მეთოდის გამოყენებით. აღნიშნული ითვალისწინებს უეცარ განივ გაფართოებას და ფილის ნიშნულის დაწევას. ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს ადგილი აქვს რთული ჰიდრავლიკური მახასიათებლების, მათ შორის წნევის პულსაციის სივრცით განაწილებას. მოცემული პროცესის სიმულირებისთვის რიცხვითი მეთოდის ნაშრომში გამოყენებულ იქნა FLOW-3D პროგრამული უზრუნველყოფა, რითაც შესაძლებელი გახდა ენერჯის ჩამქრობ ჭაში მაქსიმალური და მინიმალური წნევები განსაზღვრულიყო. წნევის პულსაციის გენერირების მექანიზმზე და ნავიესტოქსის განტოლების გამოყენებით, ნაშრომში წარმოჩენილ იქნა მახასიათებელი ფაქტორების (პულსაციის სიჩქარე და სიჩქარის გრადიენტი) რაოდენობრივი და წნევის პულსაციის მახასიათებლების თვისებრივი ანალიზი, რითაც დასტურდება, რომ წნევის პულსაციის განაწილება ენერჯის ჩამქრობ ჭაში დამოკიდებულია პულსაციის სიჩქარეზე.

ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს, ჭარბი ენერჯის ჩამქრობა ხორციელდება სწორედ ჭის საწყის უბანში, სადაც გვაქვს დინების მაღალი სიჩქარეები და ეროზიისა და კავიტაციის შედეგად, ადგილი აქვს ფილის დაზიანებას.

ჰიდრავლიკური ნახტომის ქვეშ, წნევის პულსაციამ შეიძლება გამოიწვიოს უკიდურესად სერიოზული ზიანი, ხოლო ამწევი ძალების ცვალებადობა მნიშვნელოვან ფაქტორს იძენს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილის რღვევაში. ამ პრობლემების გადასაჭრელად, რეალურ პროექტებში გამოყენებულ იქნა ენერჯის ჩამქრობი აუზები ძირის ვარდნით, როგორცაა

ქსიანჯიაბას კაშხალი (სურ. #12), ჯინანჩაოს კაშხალი (სურ. #13) და ა.შ. ენერჯის ჩამქრობი აუზი ძირის ვარდნით, როგორც ენერჯის ჩამქრობის ახალი ტიპი, მნიშვნელოვან როლს თამაშობს, რაც აშკარად განსხვავდება ტრადიციული ენერჯის ჩამქრობი ჭისგან. იმისათვის, რომ გაიზარდოს ენერჯის ჩამქრობის ხარისხი და ადაპტირდეს რელიეფის სპეციფიურ მოთხოვნებთან, ენერჯის ჩამქრობი ჭა უნდა დაპროექტდეს წყალსაშვი უბნის დახრილ ნაწილზე უფრო ფართო სიგანით. საინჟინრო გადაწყვეტის ეკონომიურობის პერსპექტივიდან გამომდინარე, შეერთების უბანი უნდა იყოს დაპროექტებული ისე, რომ მიღებულ იქნას მკვეთრი ან განსხვავებულად გამოყოფილი ნაწილი წყალსაშვი უბანსა და ენერჯის ჩამქრობ ჭას შორის. ამ ვითარებაში წარმოიქმნება სივრცითი ჰიდრავლიკური ნახტომი.

მიუხედავად იმისა, რომ ვარდნის არსებობა ამცირებს სიჩქარეს ქვედა ნაწილში და შეუძლია შეანელოს წნევის პულსაციის ნაწილი, უეცარი გაფართოება ქმნის ვერტიკალურ მორევს კედლის ორივე მხარეს. ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ღერძის მქონე მორევის სუპერპოზიცია, განსაკუთრებით ართულებს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილაზე წნევის პულსაციის მახასიათებლებს, ხოლო მოცემული საინჟინრო გადაწყვეტის სიახლიდან გამომდინარე, ამ პროცესის მათემატიკური სიმულაციები მოცემული ეტაპისთვის ნაკლებადაა შესწავლილი.

წყლის მოძრაობის ტრაექტორია, ენერჯის ჩამქრობი ჭის კონსტრუქციის გათვალისწინებით, განსაკუთრებით კომპლექსურია. ამ დროს მიმდინარე წნევის პულსაციების მახასიათებლები მჭიდროდაა დაკავშირებული ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობაზე. ჩატარებულ იქნა კვლევების სერია წნევის პულსაციასთან დაკავშირებით, რომლებიც ვითარდება ჩამქრობი ჭის ფილაზე, რისი მოდელირებაც და ანალიზიც მოცემულ იქნა ნაშრომში.



სურათი #12 - ქსიანჯიაბას კაშხალი, მდებარეობს ჩინეთის სამხრეთ-დასავლეთში



სურათი #13 - ჯინანჩაოს კაშხალი, ქალაქ ლიჯიანგის სამხრეთ-დასავლეთ ნაწილში, ჩინეთი

პულსაციური პროცესების შესწავლასთან დაკავშირებით ჩატარდა ასევე კვლევები, FLOW-3D პროგრამული კომპლექსის გამოყენებით, რაც მიზნად ისახავდა რეალურ ნაგებობასა და ფიზიკურ მოდელს შორის მასშტაბის ეფექტით გამოწვეული სხვაობის შეფასებას (სურ. #14).

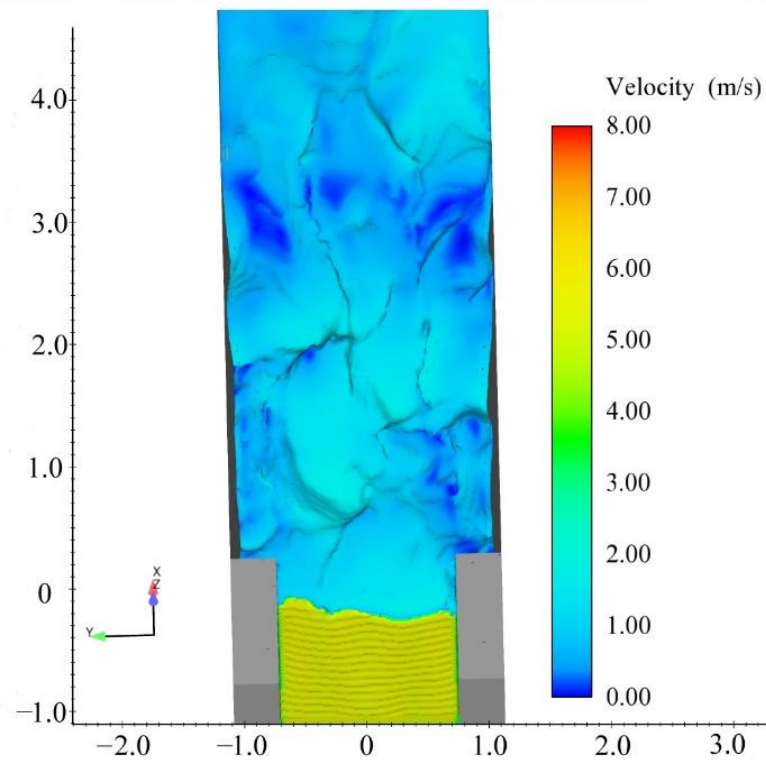
კვლევების შედეგად გაკეთებული იქნა დასკვნები. კერძოდ, ნაკადისა და სიჩქარის განაწილება, დროისა და წნევის ცვალებადობის საშუალო მნიშვნელობების დამოკიდებულება, ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილაზე მიღებული მაქსიმალური და მინიმალური წნევის რიცხვითი სიმულაციები, კარგად შეესაბამება ექსპერიმენტის შედეგებს. ჭის კონსტრუქციაზე მოქმედი წყლის ტურბულენტობის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მდგენელები გავლენას ახდენს წნევის პულსაციაზე. უეცარი გვერდითი გაფართოება და ფილის ნიშნულის დაწევა, წარმოშობს სივრცით ჰიდრავლიკურ ნახტომს, რაც განსხვავდება ექვივალენტური კლასიკური ჰიდრავლიკური ნახტომისაგან.

აღნიშნულ საკითხთან დაკავშირებით წარმოდგენილია ენერჯის ჩამქრობი ჭის დაანკერებული ფილის კონსტრუქცია, სადაც აღწერილია ამომგდები ძალის ცვლილება დროში, რაც გამოწვეულია ტურბულენტური ნაკადის წნევის ცვალებადობით [32-40].

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული და ექსპერიმენტული ანალიზები განსაზღვრავენ ასეთი ჭების გარსზე მოქმედი, დროში განვითარებული დატვირთვების და ამომგდები ძალის მაქსიმალურ მნიშვნელობებს. ნაშრომში გაანალიზებულია აგრეთვე ძირზე დაანკერებული ფილების დინამიური ქცევა.

მიღებულ იქნა, რომ ექვივალენტური სისქის კრიტერიუმის გამოყენებადობა, დაანკერებული ფილების შემთხვევაში (რომელიც ემყარება სტატიკურ მდგომარეობაში მყოფ ფილებზე მოქმედი ძალების ბალანსს) არ აკმაყოფილებს მდგრადობის პირობას. ამის საფუძველზე

იანგარიშება ანკერების კვეთის ფართი ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილის დასაპროექტებლად.



სურათი #14 - წყლის დინების ფიზიკური ნიმუში და სიმულაციური მოდელი

წნევის პულსაციები, რომლებიც დაკავშირებულია ჰიდრავლიკურ ნახტომებში ენერჯის ჩაქრობასთან, აღიარებულ იქნა, როგორც დაზიანების გამომწვევი მიზეზი ზოგიერთი ენერჯის ჩამქრობი ჭისტვის. ამ ცვალებადობების გათვალისწინებით საპროექტო კრიტერიუმები დამუშავდა პროცესების შემდეგ თანმიმდევრობაზე: პულსაციური წნევები აზიანებს ფილებს შორის არსებულ ნაკერებს; ამ ნაკერების გავლით, ექსტრემალური წნევის მნიშვნელობები შეიძლება გავრცელდეს ფილების ზედა ზედაპირიდან ქვედა ზედაპირის მიმართულებით; მყისიერი წნევის დიფერენციალმა (სხვაობამ) ფილის ზედა და ქვედა ზედაპირებს შორის შეიძლება მიაღწიოს მაღალ მნიშვნელობებს; წნევის დიფერენციალიდან წარმოქმნილი ძალა შეიძლება აღემატებოდეს ფილის წონას და ანკერის წინაღობას.

თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევებით მიღებულ იქნა ლოგიკური შედეგები, რომლის თანახმად დაანკერებული ფილების რღვევის ალბათობა უფრო მცირეა, ვიდრე დაუანკერებელი ფილებისა, რომლებიც სავარაუდოდ კარგავენ მდგრადობას მხოლოდ მაქსიმალური წნევის გავლენით.

ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად, გამოვლინდა კავიტაციის მნიშვნელოვანი ზემოქმედების უბნები ჰიდროდინამიკური წნევების პულსაციის დროს და ასევე წარმოდგენილ იქნა გრაფიკული დამოკიდებულებები, რომლებიც წყალსაცემის ცალკეულ წერტილებზე, კავიტაციის სხვადასხვა ეტაპზე, წნევის პულსაციის სტანდარტებს ასახავენ [41-46].

ზემოთ როგორც აღინიშნა, არაკლდოვან ფუძეზე ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების პროექტირებისას, როგორც წესი ითვალისწინებენ ჰიდრავლიკური და ფილტრაციული ზემოქმედებით გრუნტის გარეცხვის თავიდან აცილების სხვადასხვა ჰიდროტექნიკურ ელემენტებს, როგორებიცაა: ვერტიკალური ნარანდები და უკუფილტრები

კაშხლის ძირზე მოქმედი უკუწნევის შესამცირებლად; წყალსაცემი ნაწილი, რომელიც წარმოდგინდება ენერჯის ჩამქრობი ჭით, წყალსაცემი ფილებისა და მათზე სადრენაჟო ხვრეტებით, რათა მოიხსნას ფილტრაციული უკუწნევა; რისბერმა, რომელიც გამოიყენება ფილტრაციული გზის დასაგრძელებლად და გრუნტის შემდგომი გარეცხვისგან დასაცავად. რა თქმა უნდა, თითოეული კონსტრუქციის საჭიროება, საპროექტო გადაწყვეტა და პარამეტრები, დამოკიდებულია არაკლდოვანი გრუნტის მახასიათებლებზე და ექსპლუატაციის პირობებზე, შესაბამისად პრაქტიკაში ნაკლებად შეიძლება შეგვხვდეს ობიექტი, რომელიც ზემოთ ჩამოთვლილ ელემენტებს სრულად მოიცავს [47].

საქართველოში აშენებული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ძირითადი ნაწილი, უკვე მიიჩნევა ხანდაზმულ ნაგებობებად მათი ექსპლუატაციის ხანგრძლივობიდან გამომდინარე, შესაბამისად, მათ ქცევაზე დაკვირვების ანალიზი გვაძლევს საინტერესო შედეგებს, რომელთა გამოყენებაც მნიშვნელოვანია როგორც ახალი კაშხლების პროექტირებისთვის, ასევე მათი სწორი ექსპლუატაციის ან არსებული კაშხლების მდგრადობის და უსაფრთხოების კონტროლის გაუმჯობესების მიზნით. აღნიშნული განაპირობა სწორედ კაშხლების ქცევაზე კვლევებისა და კაშხლის რღვევის მიზეზების ანალიზმა.

სადისერტაციო ნაშრომი შეეხება სწორედ კაშხლების და მათი შემადგენელი ელემენტების მდგრადობის ანალიზს, იმ დაზიანებების გათვალისწინებით, რომლებიც ლაჯანური ჰესის სათავე კვანძზე, მდინარე ცხენისწყალზე განთავსებული ცაგერის კაშხლის ქვედა ბიეფში, ექსპლუატაციის პერიოდში გამოვლინდა. ნაშრომში მოცემული ობიექტი ატარებს მეტად ღირებულ მნიშვნელობას. კერძოდ, ცაგერის კაშხალი წარმოადგენს ძირითად კვანძს, რომლის მეშვეობითაც ხდება მდინარე ცხენისწყლის გადაგდება ლაჯანურის წყალსაცავში 60 მ³/წმ საანგარიშო ხარჯით. აღნიშნული ობიექტის უსაფრთხოების ფაქტორს ზრდის ასევე ის

გარემოება, რომ კაშხალი განთავსებულია არაკლდოვან გრუნტზე, შესაბამისად მისი მდგრადობის უზრუნველსაყოფად, აუცილებელია თავიდან იქნას აცილებული ალუვიალური გრუნტის გარეცხვის პროცესები, რისთვისაც საპროექტო გადაწყვეტით კაშხლის ქვედა ბიეფში მოეწყო კიდეც წყალსაცემი ჭა, წყალსაშვი ნაწილიდან გადინებული წყლის ნაკადის ენერჯის ჩასაქრობად. განხორციელებული საპროექტო გადაწყვეტის მიუხედავად, ობიექტის თითქმის 60 წლიანი ექსპლუატაციის განმავლობაში, კაშხლის ქვედა ბიეფის მარცხენა ნაწილში (გამრეცხი გალერეების გამოსასვლელი უბანი), 5 მეტრიანი სისქის მქონე ბეტონის წყალსაცემი ფილის რღვევის შედეგად, ფუძეში წარმოიქმნა ორმო, რომელმაც ნაწილობრივ შეაღწია კიდეც კაშხლის ძირში. საჭიროა აღინიშნოს, რომ სწორედ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის მხარეს, განვითარებულ ორმოსთან არსებობს მაღალი მკუმშავი ძაბვები, რაც ნაგებობის მდგრადობის დაკარგვის რეალურ საშიშროებას წარმოქმნიდა.

წარმოდგენილ კვლევებში განხილულია საკითხები, რომლებიც ეხება ბიეფების შეუღლების დროს ენერჯის დეფიციტისა და პულსაციური დატვირთვების ზემოქმედებას ჩამქრობი ჭის კონსტრუქციაზე, რაც სამწუხაროდ ნაკლებად გაითვალისწინება პროექტირების დროს. პროექტანტები ძირითადად შემოიფარგლებიან მხოლოდ ჭის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებით. ექსპლუატაციის პერიოდში, უმეტეს შემთხვევაში თავს იჩენს წყალსაცემი ფილის დაზიანების და მთლიანი დანგრევის ფაქტებიც კი. ასე მაგალითად, მნიშვნელოვანი დაზიანებები განვითარდა ორთაჭალჰესის ენერჯის ჩამქრობ ჭაში, ხოლო ზაჰესის და ცაგერის ჰიდროკვანძების წყალსაცემი ფილები საერთოდ აღარ არსებობდა, სადაც ფუძის გარეცხვამ ქვემო ბიეფში ≈ 6 მ-ს მიაღწია, რამაც მნიშვნელოვანი პრობლემები შექმნა. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაციისას, განსაკუთრებით კი არაკლდოვანი ფუძის არსებობისას მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს გრუნტის არაწრფივი დეფორმირების საკითხი, რაც მით უფრო აქტუალურია მარეგულირებელი წყალსაცავების არსებობისას.

ექსპლუატაციის პერიოდში ფუძის დატვირთვა-განტვირთვას თან ახლავს ნარჩენი დეფორმაციების განვითარება და მასთან დაკავშირებული სხვა არასასურველი პროცესები [48-51].

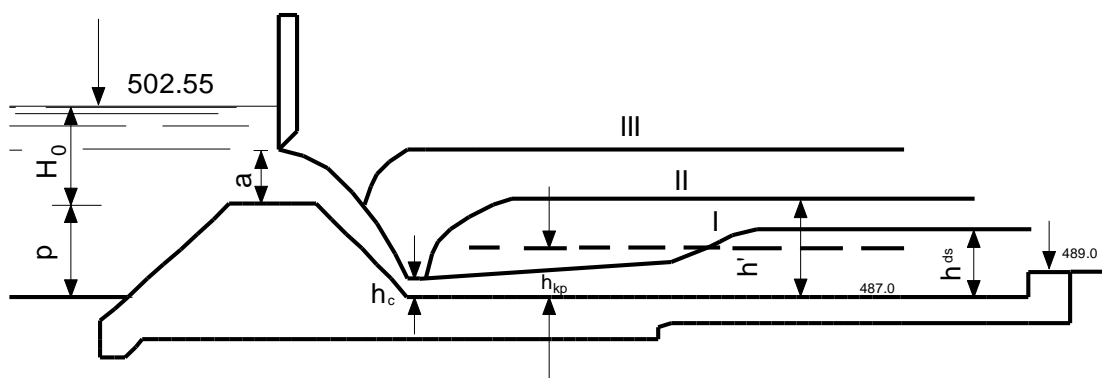
აღნიშნული საკითხები სწორედ სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ძირითად ამოცანებს წარმოადგენენ.

კვლევა, შედეგები და მათი განსჯა

2.1 ენერგიის ჩამქრობ ჭაში წყალსაცემ ფილაზე ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გაანგარიშება

2.1.1 ენერგიის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილის ჰიდრავლიკური რეჟიმის ანალიზი

მოცემულ თავში განხილულია კაშხლის ქვემო ბიეფში ენერგიის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილის მდგრადობის საკითხი წყალდიდობის ხარჯების გატარების დროს. აღნიშნული პროცესის შესასწავლად მნიშვნელოვანია გაანალიზდეს ჰიდრავლიკური რეჟიმები ენერგიის ჩამქრობ ჭაში ბიეფების შეუღლების გაანგარიშებით, ფარის გაღების სხვადასხვა ვარიაციის დროს. ბიეფების შეუღლების გაანგარიშებები (ზოგადი სქემა მოცემულია ნახ. #1) ჩატარებულ იქნა ძირითადი განმსაზღვრელი განტოლებების გამოყენებით.



ნახაზი #1 - ბიეფების შეუღლების ზოგადი სქემა

$$\begin{cases} q = \varphi h_c \sqrt{2g(p + H_0 - h_c)} \\ h' = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{kp}}{h_c} \right)^3} - 1 \right] \end{cases} \quad (2.1.1)$$

სადაც,

q - ხვედრითი ხარჯი;

- φ - სიჩქარის კოეფიციენტი;
- g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება;
- H_0 - დაწნევა კაშხალზე;
- h_c - წყლის სიღრმე შეკუმშულ კვეთში;
- h' - შეუღლებული სიღრმე;
- h_{kp} - ქვემო ბიეფში წყლის კრიტიკული სიღრმე.

ზემოთ მოცემული განტოლება დაიყვანება კუბურ განტოლებამდე და მისი ამოხსნა ხორციელდება შერჩევით.

ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული ჰიდრავლიკური ნახტომის შეფასება წარმოებს h' და h_{ds} შორის არსებული პირობებით. კერძოდ, არსებობს:

- განდევნილი ნახტომი, თუ $h > h_{ds}$
- კრიტიკული ნახტომი, თუ $h = h_{ds}$
- დაძირული ნახტომი, თუ $h < h_{ds}$

ჰიდრავლიკური ნახტომის შეფასება ჩატარებულ იქნა აგრეთვე ფრუდის რიცხვის გამოყენებით:

$$Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{gh_c^3}} \quad (2.1.2)$$

ფრუდის რიცხვის მიხედვით ჰიდრავლიკური ნახტომის შეფასება წარმოდგენილია ცხრ. #1-ის სახით.

ცხრილი #1 - ჰიდრავლიკური ნახტომი ფრუდის რიცხვის მიხედვით

Fr_1	ჰიდრავლიკური ნახტომის ხასიათი
$1.5 < Fr_1 < 2.5$	სუსტი ნახტომი
$2.5 < Fr_1 < 4.5$	მერყევი ნახტომი
$4.5 < Fr_1 < 9$	მდგრადი ნახტომი
$Fr_1 > 9$	ძლიერი ნახტომი

2.1.2 წყალსაცემ ფილაზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვების განგარიშება

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის მაქსიმალური და მინიმალური ორდინატები განისაზღვრება ფორმულით:

$$h_{d,max} = \left[0.85 \left(1 - 0.55 \sqrt[3]{\frac{h}{h_2} - 1} \right) \cdot \sqrt{\frac{T_0}{h_{cr}} - 2} \right] h_{cr} \quad (2.1.3)$$

$$h_{d,min} = 0.15h_{cr} \quad (2.1.4)$$

სადაც,

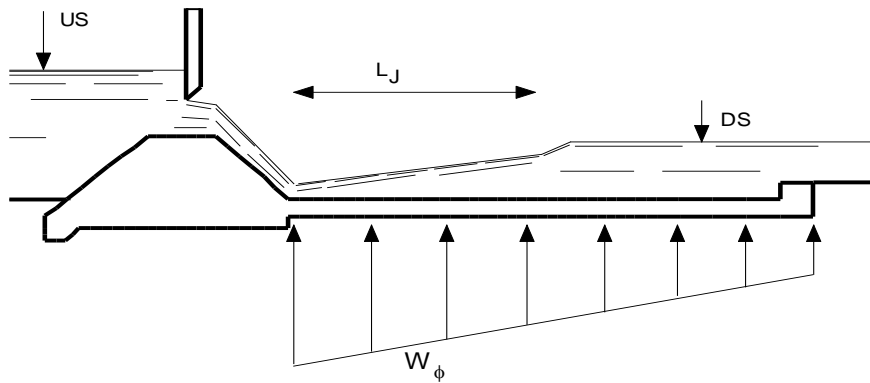
h - წყლის სიღრმე ქვემო ბიეფში;

h_2 - შეკუმშული ნაკადის შეუღლებული სიღრმე;

h_{cr} - კრიტიკული სიღრმე;

T_0 - დაწნევა ფილაზე.

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ეპიურა წყალსაცემ ფილაზე, ზოგადად წარმოდგინდება ტრაპეციის სახით. დატვირთვის მაქსიმალური ორდინატა განთავსებულია ნაკადის შეკუმშულ კვეთში, ხოლო მინიმალური ორდინატა ნახტომის ბოლოში. ჰიდრავლიკური ნახტომის და ფილტრაციული უკუწნევის მოქმედების ზოგადი სქემა წარმოდგენილია ნახ. #2.



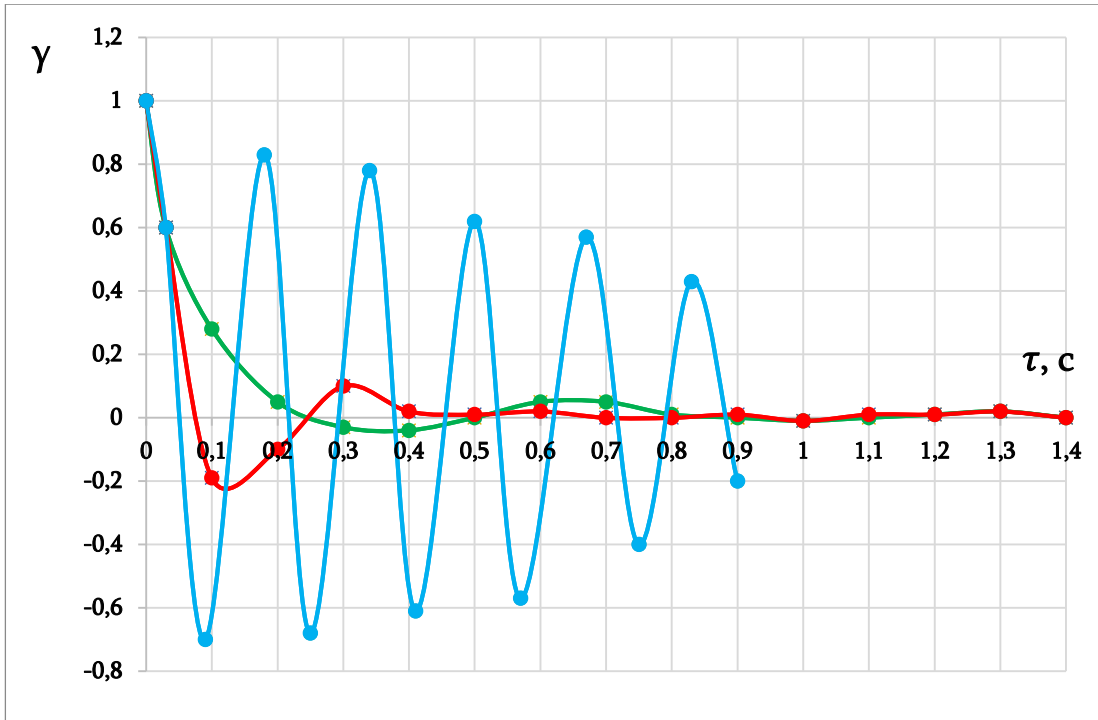
ნახაზი #2 - ჰიდროდინამიკური და ფილტრაციული უკუწნევის მოქმედების სქემა ჰიდრაულიკური ნახტომის ფარგლებში

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაციისას, განსაკუთრებით წყალსაგდებ ნაგებობებში, ნაკადის მოძრაობა ტურბულენტურია, რომლის მთავარი მახასიათებელი ნიშნებია სიჩქარისა და წნევის პულსაცია. უკანასკნელი ზემოქმედებას ახდენს წყალსაცემ ფილაზე და შესაბამისად მოითხოვს შეფასებას.

ამდენად, წყლის ხარჯების გატარებისას ენერგიის ჩამქრობი ჭის ფილაზე, გარდა ენერგიის დეფიციტისა, ადგილი აქვს აგრეთვე ნაკადის ტურბულენტური რეჟიმის თანმხლები წნევის პულსაციას და შესაბამის დატვირთვას.

2.1.3 პულსაციური ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გაანგარიშება

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის პულსაციური კომპონენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტული ჰიდრაულიკური კვლევების შედეგების მიხედვით (ნახ. #3).



ნახაზი #3 - ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ხვედრითი პულსაციის კომპონენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ფილაზე განისაზღვრება „წერტილებში“ პულსაციური წნევების მონაცემთა საფუძველზე დამოკიდებულებით:

$$p' = \sigma k_n k_0 \quad (2.1.5)$$

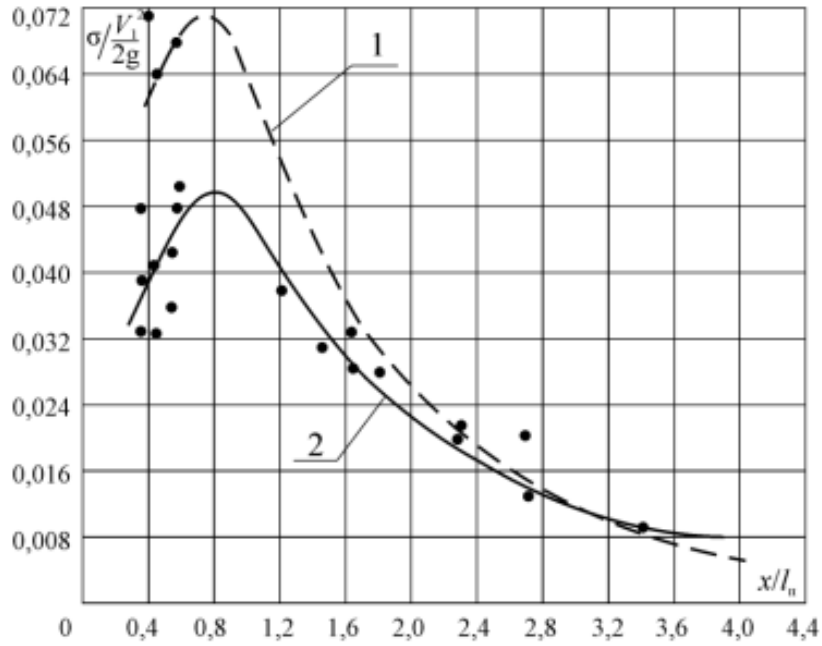
სადაც,

σ - წნევის პულსაციის სტანდარტი (სტანდარტული გადახრა) წერტილში;

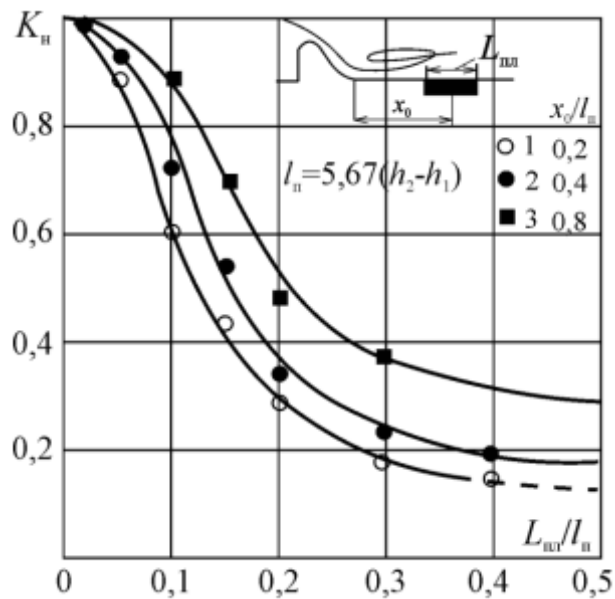
k_n - გასაშუალების კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია წნევის პულსაციის სტანდარტის თანაფარდობისა წერტილზე პულსაციის დატვირთვის სპეციფიკურ სტანდარტზე σ_n განაწილებული ფილის ფართობზე;

k_0 - პროპორციულობის კოეფიციენტი წნევის პულსაციის ამპლიტუდასა და მის სტანდარტს შორის.

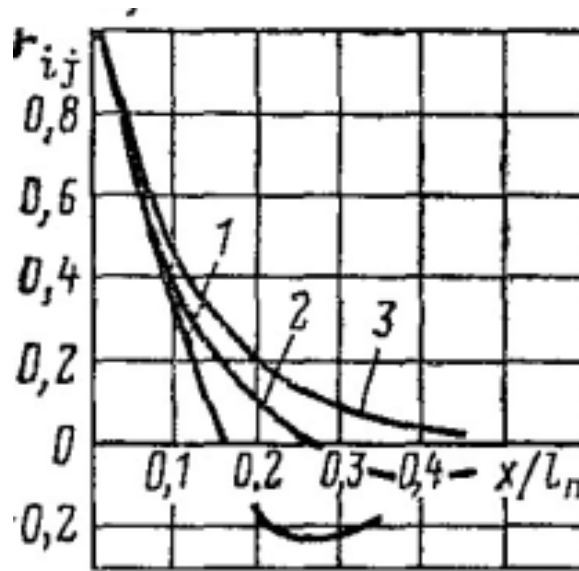
წნევის პულსაციის სტანდარტები σ ექსპერიმენტული კვლევებისა და გამოთვლების მიხედვით, შეჯამებული სახით, ნაჩვენებია ნახ. #4.



ნახაზი #4 - წნევის პულსაციის სტანდარტის ცვლილება ნახტომის სიგრძეზე გასაშუალების საშუალო კოეფიციენტი k_n განისაზღვრება გრაფიკის გამოყენებით ფილის ცალკეული უბნების მიხედვით (ნახ. #5), ხოლო კორელაციის კოეფიციენტები გრძივი და განივი მიმართულებით განისაზღვრება გრაფიკიდან (ნახ. #6).



ნახაზი #5 - k_n კოეფიციენტების განაწილება ფილის სიგრძეზე



ნახაზი #6 - წნევის პულსაციის კორელაცია:

- 1 - ნახტომის დაწყებისას;
- 2 - ნახტომის შუაში და ბოლოში;
- 3 - ნახტომის შემდეგ.

საბოლოოდ, ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ჯამური მნიშვნელობა ფილაზე განისაზღვრება ფორმულით:

$$p = p_0 \pm \frac{A}{2} \tag{2.1.6}$$

სადაც,

p_0 - დროში გასაშუალებული დატვირთვა ფილაზე;

A - პულსაციური დატვირთვის მაქსიმალური ამპლიტუდა

2.2 კაშხალი-ფუძე სისტემის სტატიკური გაანგარიშების ძირითადი თეორიული საფუძვლები

ნაშრომში წარმოდგენილი გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით. მეთოდის ძირითადი თეორია წარმოდგენილია მრავალ პუბლიკაციაში და ამდენად, არ საჭიროებს დეტალურ განხილვას [52-60].

მეთოდის სარეალიზაციო განტოლებათა სისტემა, გადაადგილებათა მეთოდის ფორმით, ემყარება წონასწორობაში მყოფი სისტემის სრული პოტენციალური ენერჯის სტაციონარობის პირობას, რომელსაც მატრიცული ფორმით აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = [k]\{u\} + \{F\} = 0 \quad (2.2.1)$$

სადაც,

χ - განსახილველი სისტემის კვადრატული ფუნქციონალი;

$[k]$ - სისტემის სიხისტის მატრიცა;

$\{F\}$ და $\{u\}$ - დატვირთვისა და გადაადგილებათა ვექტორების კვანძური მნიშვნელობები.

სისტემის სიხისტის მატრიცა გამოითვლება ფორმულით:

$$[k] = \int_s [B]^T [D][B] ds \quad (2.2.2)$$

სადაც,

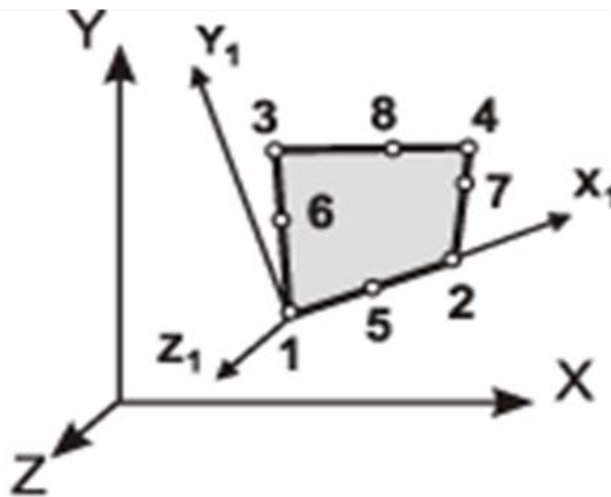
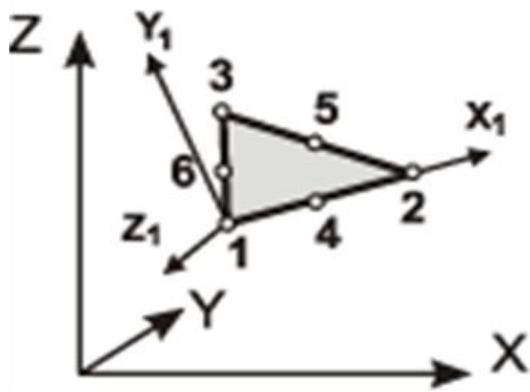
$[B]$ - ელემენტის გეომეტრიული მახასიათებლების მატრიცა, რომელიც აკავშირებს დეფორმაციებს კვანძურ გადაადგილებებთან;

$[D]$ - ფიზიკური მახასიათებლების მატრიცა, რომელსაც იზოტროპული მასალისათვის (ნახ. #7) ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში აქვს სახე:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

აქ,

E და ν - მასალის დრეკადობის მოდული და პუასონის კოეფიციენტები შესაბამისად.



ნახაზი #7 - ორგანოზომილებიანი იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები

ანიზოტროპული მასალებისათვის ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში $[D]$ მატრიცა ლოკალურ კოორდინატთა სისტემაში წარმოდგენილია შემდეგი სახით (2.2.4):

$$[D'] = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2\nu_1^2)} \begin{bmatrix} n(1-\nu_2^2) & \nu_2(1+\nu_2) & 0 \\ \nu_2(1+\nu_1) & (1-\nu_1^2) & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu_1)(1-\nu_1-2\nu_1^2) \end{bmatrix} \quad (2.2.4)$$

აქ,

E_1 და ν_1 - მასალის მახასიათებლები იზოტროპიის ველის სიბრტყეში;

E_2 და ν_2 - იგივე, იზოტროპიის ველის პერპენდიკულარულად;

$$n = \frac{E_1}{E_2}, \quad \frac{G_2}{E_2} = m$$

G - ძვრის მოდული.

გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში $[D]$ მატრიცა განისაზღვრება პირობიდან:

$$[D] = [T][D]'[T]^T$$

სადაც,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \cdot \cos \beta & -\sin \beta \cdot \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (2.2.5)$$

β - კუთხეა კოორდინატთა სისტემის ღერძებს შორის.

2.2.1 არაწრფივი გაანგარიშებების ძირითადი თეორიული არსი

სასრული ელემენტის მეთოდის ძირითადი განტოლება, რომელიც ასახავს წონასწორობის პირობას, მიღებულია წრფივი სტატიკური გაანგარიშების შემთხვევისთვის.

მასალის არაწრფივობის დეფორმაციის შემთხვევაში გლობალური ხისტი მატრიცა $[K]$ აღარ არის წრფივი. არაწრფივი ამონახსენი ემყარება იტერაციულ გაანგარიშებებს, რომლებიც გამოყენებულია ბეიზის, ზინკევიჩისა და ტეილორის კვლევებში.

ზოგადად, არაწრფივი ანალიზის ძირითადი პრობლემა ემყარება განსახილველი კონსტრუქციის წონასწორობის მდგომარეობის განსაზღვრას, რომელიც შეესაბამება მასზე მოქმედ დატვირთვებს. თუ ეს დატვირთვები დროის ფუნქციაა, t მომენტში არაწრფივი წონასწორობის პრობლემა შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგი განტოლების ამოხსნის სახით:

$$\{^t\Psi\} = \{^tR(a)\} - \{^tF\} = 0 \quad (2.2.6)$$

სადაც:

ψ - კვანძური გაუწონასწორებელი დატვირთვები;

F - გარედან გამოყენებული კვანძური დატვირთვები;

R - ელემენტის დამაბულობით გამოწვეული კვანძური დატვირთვები;

a - კვანძური გადაადგილებები.

იტერაციული გაანგარიშება იწყება წონასწორული ან სულ მცირე, წონასწორობის მახლობლად მდგომარეობიდან იმ დაშვებით, რომ $\psi^{-1} \approx 0$. ვექტორი $\{R\} = \int [B]\{\sigma\}dv$ გამოითვლება ელემენტის შიგა ძაბვის საფუძველზე.

დატვირთვები აღწერილია უწყვეტი spline ფუნქციების გამოყენებით, რომლებიც აღწერენ მთლიან დატვირთვას, რომელიც გამოიყენება სისტემაზე დროის მიხედვით.

მაშასადამე, დროის კონკრეტული ნამატისთვის t , $\{^tF\}$ არის დატვირთვის ნაზრდი, რომელიც მიღებულია განვითარებული t დროში და განისაზღვრება დატვირთვის ფუნქციების მნიშვნელობათა სხვაობით $t = 1$ და t , დროს.

(2.2.6) განტოლების იტერაციული ამოხსნა ემყარება ნიუტონ რაფსონის მეთოდს, რომელიც ახდენს ქვემოთ მოცემული განტოლების აპროქსიმაციას:

$$\{\Psi^{i+1}\} = \{\Psi^{i+1}\} + \left[\frac{\partial \Psi^i}{\partial a} \right] \{a^i\} \quad (2.2.7)$$

სადაც, i არის იტერაციის რიგი, t ზემოწერი გამოტოვებულია სიცხადისთვის. იტერაციული გაანგარიშების დასაწყებად პროცესი t დროის საფეხურისთვის, გადაადგილებები წინა დროის საფეხურის ბოლოს (ე.ი. დრო $t - 1$) გამოიყენება როგორც ${}^t a^1 = {}^{t-1} a$.

(2.2.6)-ის გაწარმოებით მიიღება:

$$\left[\frac{\partial \Psi}{\partial a} \right] = \left[\frac{\partial R}{\partial a} \right] = [K_T] \quad (2.2.8)$$

სადაც,

$[K_T]$ - ტანგენციალური სიხისტის მატრიცაა.

იტერაციული კორექტირება, მოდებული კვანძის გადაადგილებაზე შეიძლება გაანგარიშდეს შემდეგნაირად:

$$[K_T^i] \{ \delta a^i \} = - \{ \Psi^i \} \quad (2.2.9)$$

ან:

$$\{ \delta a^i \} = - [K_T^i]^{-1} \{ \Psi^i \} \quad (2.2.10)$$

წარმატებული იტერაციის სერიები გვაძლევს შემდეგ რეზულტატს:

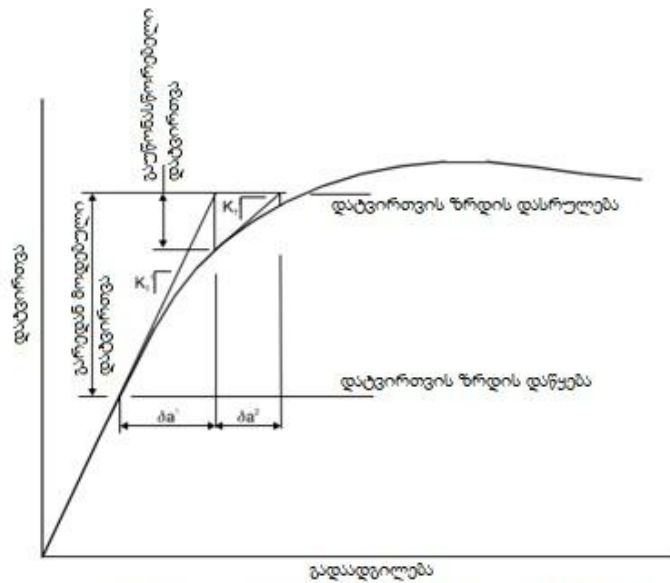
$$\{ {}^t a^{i+1} \} = \{ {}^{t-1} a \} + \sum_{k=1}^i \{ \delta a^k \}$$

ნიუტონ რაფსონის მეთოდში, სიხისტის მატრიცა ტანგენციალურია დატვირთვა-გადაადგილების მრუდის მიმართ და კორექტირდება ყოველი ახალი იტერაციის დროს. ეს პროცესი ილუსტრირებულია ნახ. #8 (ა). ამ პროცესს თან ახლავს მასალების დეფორმაციის მოდულის კორექტირება, თუმცა სიხისტის მატრიცა ცვლილებას არ განიცდის და საწყისი სიხისტის მატრიცა შენარჩუნებულია იტერაციის მთელი პერიოდის განმავლობაში.

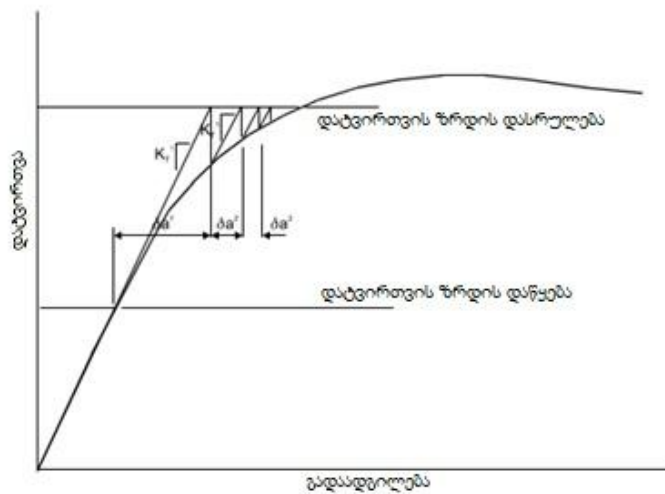
უნდა აღინიშნოს, რომ დატვირთვის ქვეშ იგულისხმება გარედან მოქმედი საექსპლუატაციო დატვირთვა. დატვირთვის საფეხურზე პირველი გამეორებისთვის და ეს არის დაუბალანსებელი დატვირთვა შემდგომი გამეორებებისთვის.

განტოლების ამოხსნისას მიიღება გადაადგილებების ნაზრდი, რომელიც წარმოიქმნება t დროში განვითარებული მზარდი დატვირთვით

{ tF }. გადაადგილების ნაზრდი დროის ბიჯების მიხედვით გაითვალისწინება კვანძურ გადაადგილებებში.



ა) იტერაციის სქემა ტანგენციალური მოდულის გამოყენებით

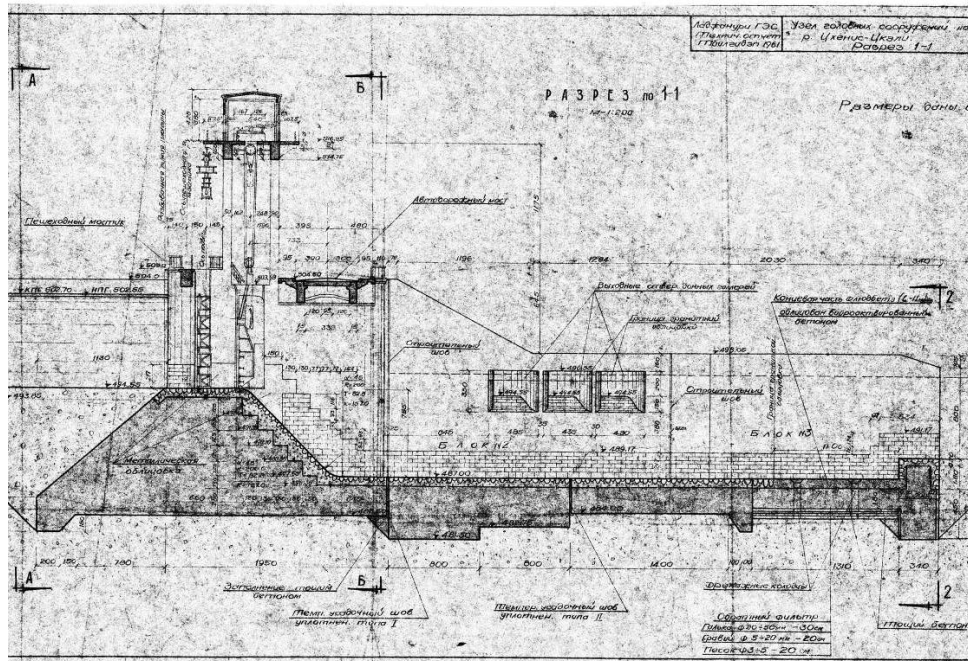
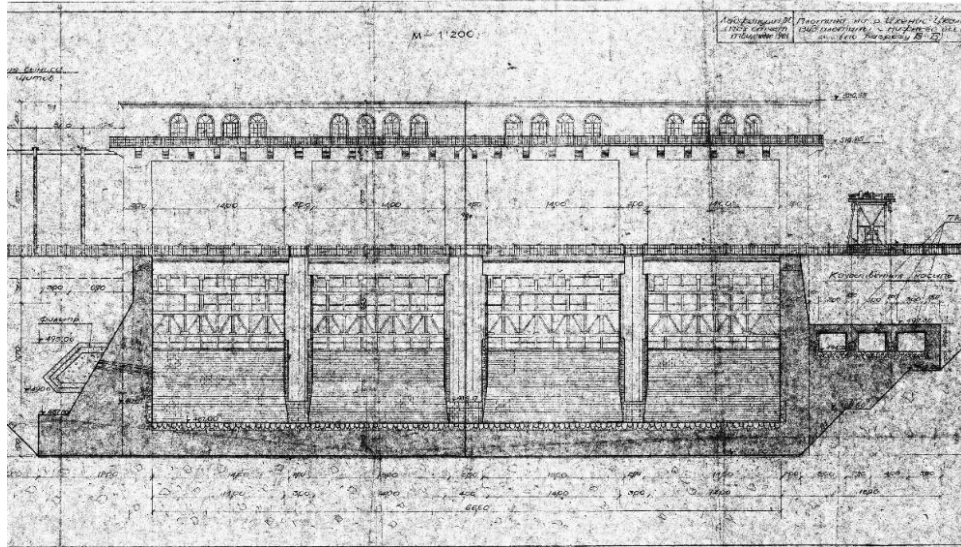


ნახაზი #8 - დატვირთვა გადაადგილების მრუდი
2.3 ცაგერის ჰიდროკვანძის ნაგებობებზე განვითარებული პრობლემების ანალიზი

2.3.1 ჰიდროკვანძის ნაგებობათა საპროექტო გადაწყვეტის ანალიზი

კვლევის ობიექტად განხილულ იქნა ლაჯანურის ჰიდრო ელექტრო სადგურის სათავე კვანძი, რომელიც განთავსებულია მდინარე

ცენისწყალზე, დაბა ცაგერთან და წარმოადგენს ოთხმალიან, საშუალოდაწნევიან ბეტონის გრავიტაციულ კაშხალს (ნახ. #9).



ნახაზი #9 - ლაჯანურჰესის სათავე კვანძი, საშუალოდაწნევიანი ბეტონის გრავიტაციული კაშხლით. ხედი ქვედა ბიეფის მხრიდან და გრძივი ჭრილი ჰიდროკვანძი ექსპლუატაციაში შევიდა 1960 წელს და უზრუნველყოფს ლაჯანურის წყალსაცავში 60 მ³/წმ საანგარიშო ხარჯის მიწოდებას.

წყალდიდობის პერიოდში ქვემო ბიეფში წყლის ხარჯების რეგულირებისათვის კაშხლის თხემზე მოწყობილია ბრტყელი საკეტები,

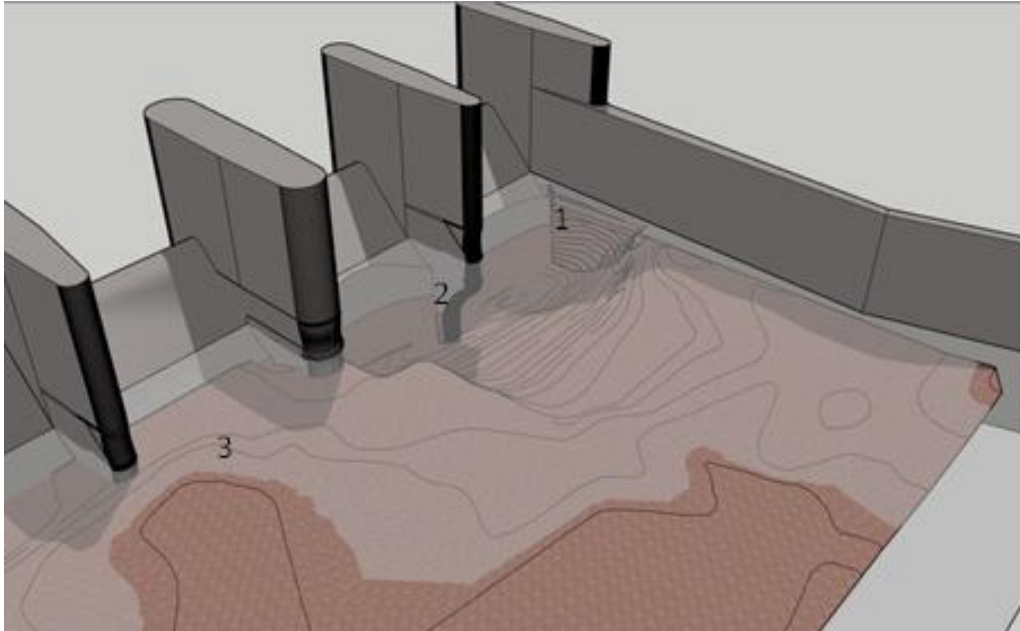
რომლებიც უზრუნველყოფენ მთლიანად წყლის მაქსიმალური ხარჯის (1600 მ³/წმ) გატარებას.

ფუძის ალუვიალური გრუნტების გარეცხვის თავიდან აცილების მიზნით, ქვემო ბიეფში მოეწყო წყალსაცემი ჭა (სიგრძით 45 მ, სიგანით 66.5 მ და სიღრმით 2 მ), რომელიც უზრუნველყოფს წყალსაშვებიდან გადინებული წყლის ნაკადის ენერჯის ჩაქრობას. წყალსაცემი ფილა შეკუმშული ნაკადის კვეთში შეადგენს 5.5 მ-ს, რომელიც ჭის ბოლოს აღწევს 3 მ-ს.

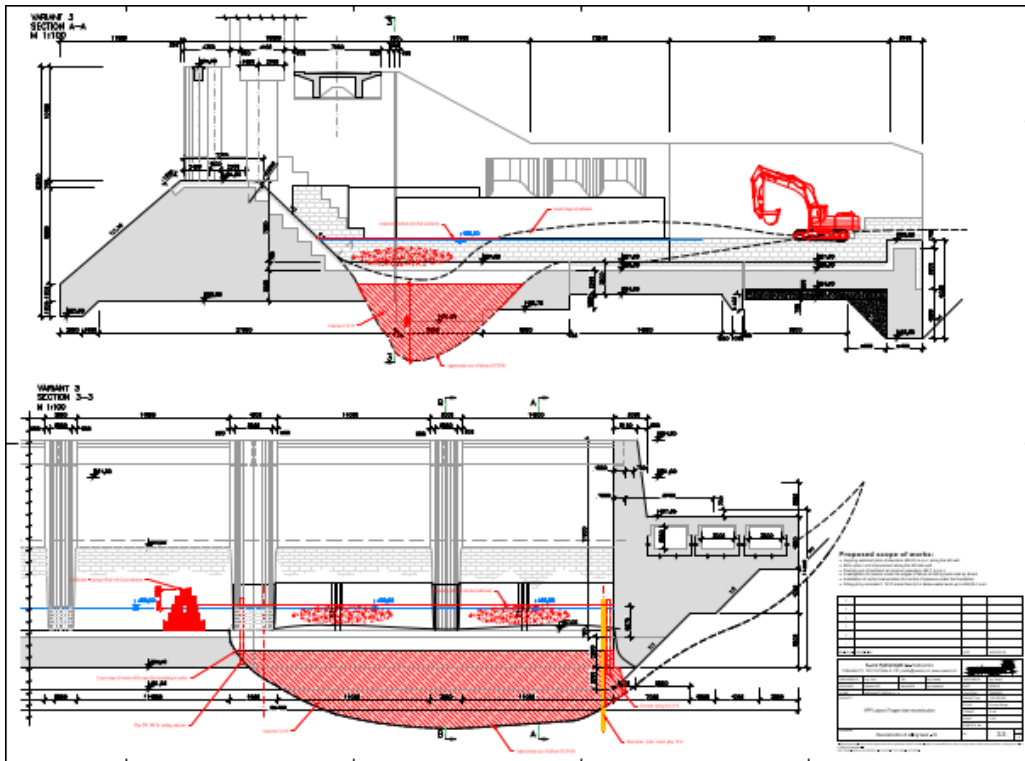
2.3.2 ჰიდროკვანძის ქვემო ბიეფში განვითარებული პროცესების ანალიზი

ჰიდროკვანძზე დაზიანების თავდაპირველი გამოვლინებები შეიმჩნეოდა კაშხლის წყალსაშვიან ნაწილებზე და საკეტების სამართავ ბურჯებზე.

ბათიმეტრული გაზომვების შედეგად დადგინდა, რომ კაშხლის პირველი და მეორე ფარის გასწვრივ, ქვედა ბიეფის მიმართულებით წყალჩამქრობი აუზის წყალსაცემი ფილა აღარ არსებობდა, ხოლო ფუძე ამორეცხილი იყო (ნახ. #10-12). ამასთან დაკავშირებით მარცხენა ფერდის ქვედა წყალქვეშა ნაწილს (სადაც განთავსებულია გამრეცხი გალერეები), გამოეცალა საყრდენი (პასიური უკუწნევა). პროცესების განვითარება თანდათანობით მიმდინარეობდა, რასაც ხელს უწყობდა ფერდში არსებული ფილტრაცია და 2007 წელს, მარცხენა ფერდში განვითარდა სიღრმული ძვრა და დიდი კარსტი დიამეტრით ≈ 5 მ (სურ. #15 და #16).



ნახაზი 10 - ბათიმეტრული კვლევის შედეგებით გამოსახული დაზიანების ამსახველი 3D მოდელი

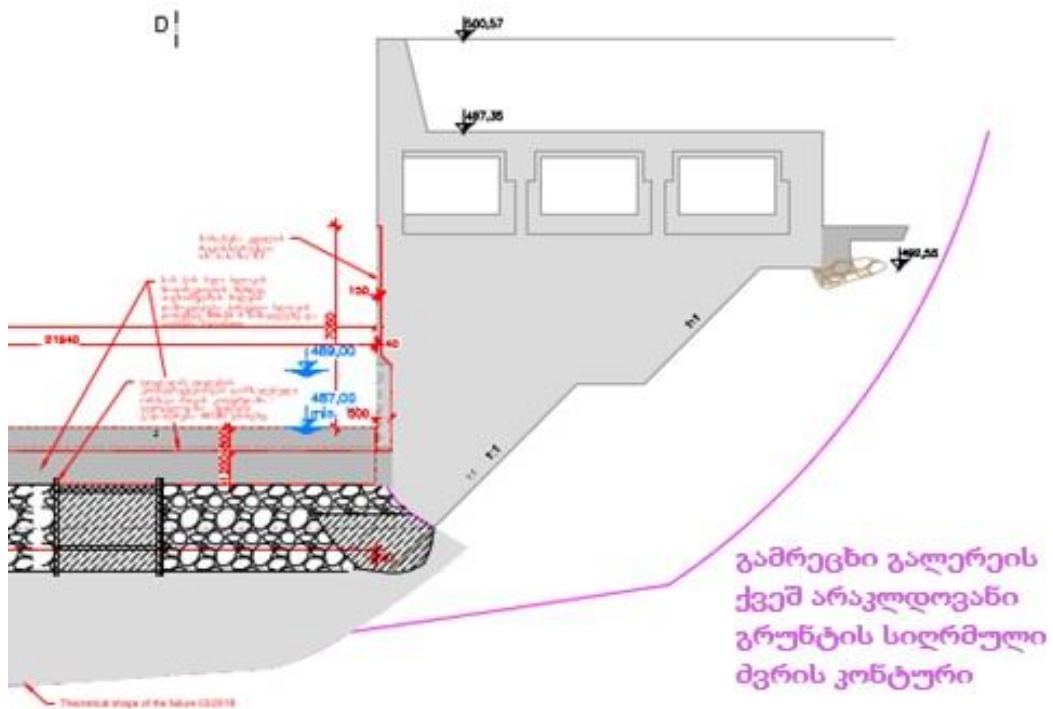


ნახაზი 11 - ქვემო ბიეფში ფუძის გარეცხილი ზონა გალერეების ქვეშე განვითარებული დაცურების ზედაპირით

საჭიროა აღინიშნოს, რომ კაშხალი, შუა ბურჯის სამშენებლო ნაკერით, გაყოფილია მარცხენა და მარჯვენა ნაწილებად. ამის გამო 1 და 2

მაღის ფარგლებში კაშხალი წარმოადგენს დამოუკიდებელ ნაგებობას. ამდენად, ქვემო ბიეფში განვითარებული გარეცხვის ორმო უშუალო ზემოქმედებას ახდენს მის მუშაობაზე, კერძოდ, აუარესებს მდგრადობას.

პრობლემის აღმოსაფხვრელად 2009 წელს ჩატარდა მნიშვნელოვანი საექსკავაციო სამუშაოები, რაც მიზნად ისახავდა გამრეცხი გალერეის კონსტრუქციის ნიშნულამდე დასვლას და მის მთელ სიგრძეზე ბეტონის ფენის დასხმას გრუნტის შემდგომი ჩავარდნისგან დასაცავად.



ნახაზი #12 - გამრეცხი გალერეების ქვეშ განვითარებული დაცურების ზედაპირი



სურათი #15 - მარცხენა ფერდის მხარეს განვითარებული კარსტული სივრცე, 2010 წელი



სურათი #16 - ჩავარდნილი ფერდი მარცხენა ნაპირზე, 2017 წელი

2.4 ცაგერის ჰიდროკვანძის წყალსაცემი ფილის მდგრადობის შეფასება

2.4.1 ენერგიის ჩამქრობ ჭაში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის ანალიზი

ცაგერის ჰიდროკვანძის ბიეფების შეუღლების გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა ძირითადი განმსაზღვრელი განტოლებებით, ასევე ფრუდის რიცხვის გამოყენებით. ენერგიის ჩამქრობ ჭაში ჰიდრავლიკური რეჟიმის შეფასება ჩატარებულ იქნა 4 საკეტის თანმიმდევრულად ჩართვისას, მათი გახსნის სხვადასხვა მნიშვნელობების გათვალისწინებით, ზემო ბიეფში წყლის მაქსიმალური დონის (502.55 მ.ზ.დ) არსებობისას.

ფარის გახსნისას წყლის ხარჯების მნიშვნელობები და ქვემო ბიეფში ხარჯის მრუდის მონაცემები აღებული იქნა ლაჯანური ჰესის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ექსპლუატაციის ინსტრუქციიდან.

2.4.2 ჰიდრავლიკური რეჟიმი 1 ფარის გახსნისას

გაანგარიშებების შედეგად მიღებულ იქნა, რომ 1 ფარის გახსნისას ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრებია:

- ზემო ბიეფში წყლის დონე - 502.55 მ.ზ.დ.;
- ფარის სრულად გახსნისას მაქსიმალური ხარჯი - $Q = 497 \text{ მ}^3/\text{წმ}$;
- მაქსიმალური ხვედრითი ხარჯი - $q = 7.47 \text{ მ}^2/\text{წმ}$;

ფარის გახსნისას, როცა:

- $a < 1.5$ მ-მდე ($q < 2.3 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრავლიკურ ნახტომს ($h' < h_{ds}$);
- $a > 1.5$ მ-მდე ($q > 2.3 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს განდევნილ მკაცრ ჰიდრავლიკურ ნახტომს ($Fr_1 > 9$);
- $a > 4.0$ მ-მდე ($q > 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დამყარებულ ჰიდრავლიკურ ნახტომს ($4.5 < Fr_1 < 9$);

ფრუდის რიცხვის მიხედვით, როცა:

- $q < 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $9 < Fr < 25$, ადგილი აქვს ძლიერ ნახტომს;
- $q > 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $Fr < 9$, ადგილი აქვს დამყარებულ ნახტომს.

ამდენად, 1 ფარის გახსნისას ენერგიის ჩამქრობ კაში მაღალი ხაჯრების გატარების დროს ძირითადად ვითარდება განდევნილი ნახტომი (ნახ. #13-15).

2.4.3 ჰიდრავლიკური რეჟიმი 2 ფარის გახსნისას

2 ფარის გახსნისას ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრებია (ნახ. #16 და #17):

- ზემო ბიეფში წყლის დონე - 502.55;
- ფარის სრულად გახსნისას მაქსიმალური ხარჯი - $Q = 994 \text{ მ}^3/\text{წმ}$;
- მაქსიმალური ხვედრითი ხარჯი - $q = 14.95 \text{ მ}^2/\text{წმ}$;
- ფარის გახსნისას, როცა:
 - $a < 0.7$ მ-მდე, ($q < 2.0 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრავლიკურ ნახტომს ($h' < h_{ds}$);
 - $0.8 < a < 2.0$ მ-მდე, ($2.0 < q < 6.0 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს განდევნილ ძლიერ ჰიდრავლიკურ ნახტომს - ($Fr > 9$);
 - $a > 2.0$ მ-მდე, ($6 < q < 15 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დამყარებულ ჰიდრავლიკურ ნახტომს - ($4.5 < Fr < 9$);
- ფრუდის რიცხვის მიხედვით, როცა:
 - $q < 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $9 < Fr < 18.5$, ადგილი აქვს ძლიერ ნახტომს;
 - $q > 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $4.5 < Fr < 9$, ადგილი აქვს დამყარებულ ნახტომს.

ამდენად, 2 ფარის გახსნისას ენერგიის ჩამქრობ კაში მაღალი ხარჯების გატარების დროს ძირითადად ვითარდება განდევნილი ნახტომი.

2.4.4 ჰიდრაული რეჟიმი 3 ფარის გახსნისას

3 ფარის გახსნისას ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრაული რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრებია (ნახ. #18 და #19):

- ზემო ბიეფში წყლის დონე - 502.55;
- ფარის სრულად გახსნისას მაქსიმალური ხარჯი - $Q = 1491 \text{ მ}^3/\text{წმ}$;
- მაქსიმალური ხვედრითი ხარჯი - $q = 22.42 \text{ მ}^2/\text{წმ}$;
- ფარის გახსნისას, როცა:
 - $a < 0.5$ მ-მდე ($q < 2 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრაული ნახტომს;
 - $a > 0.5$ მ-ს ($q > 2 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს განდევნილ ჰიდრაული ნახტომს;
- ფრუდის რიცხვის მიხედვით, როცა:
 - $q < 6 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $9 < Fr < 16$, ადგილი აქვს ძლიერ ნახტომს;
 - $6 < q < 21 \text{ მ}^2/\text{წმ}$, $4.5 < Fr < 9$, ადგილი აქვს დამყარებულ ნახტომს.

ამდენად, 3 ფარის გახსნისას ენერჯის ჩამქრობ ქაში მაღალი ხარჯების გატარების დროს ძირითადად ვითარდება განდევნილი ნახტომი.

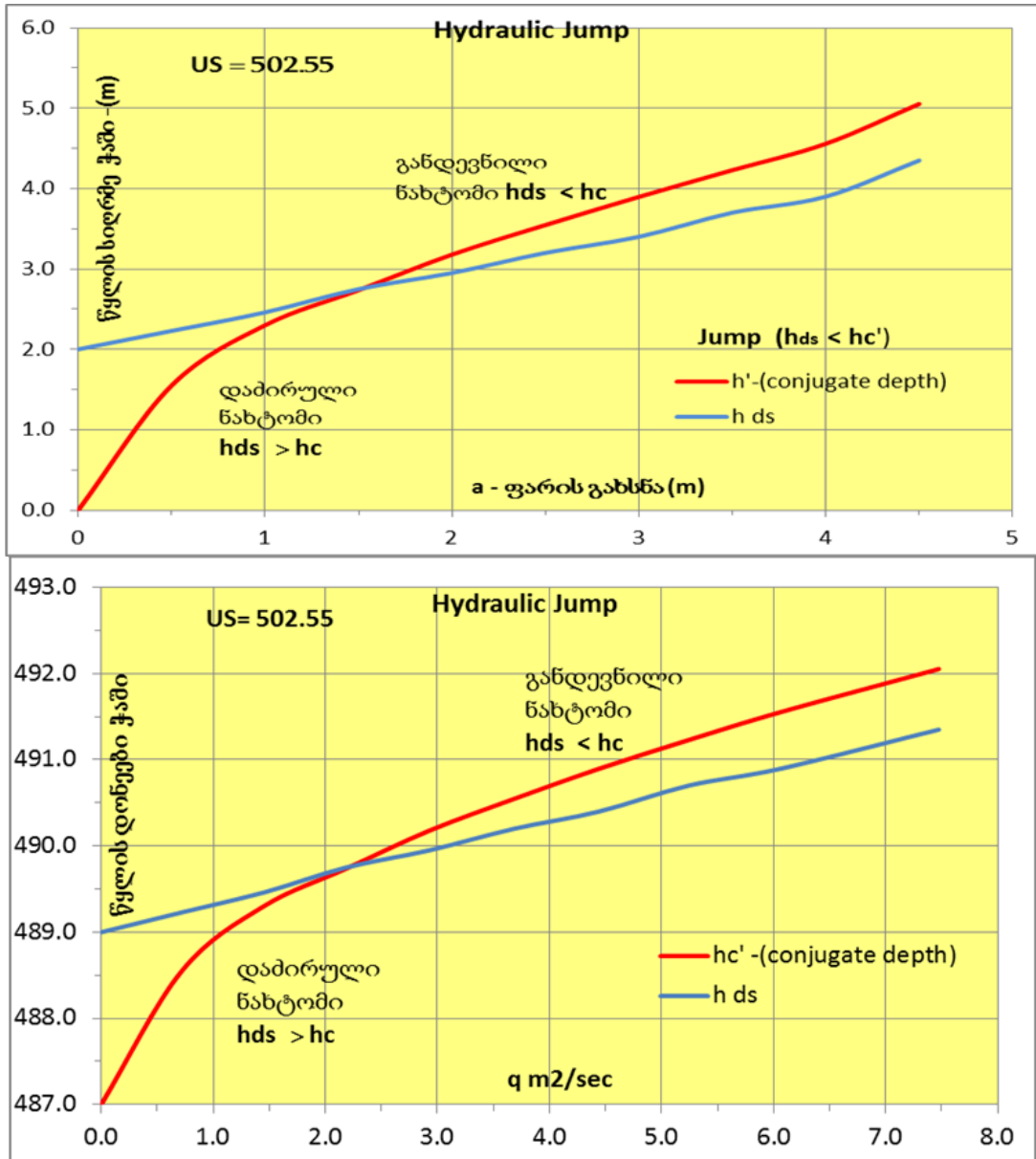
2.4.5 ჰიდრაული რეჟიმი 4 ფარის გახსნისას

4 ფარის გახსნისას ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრაული რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრებია (ნახ. #20 და #21):

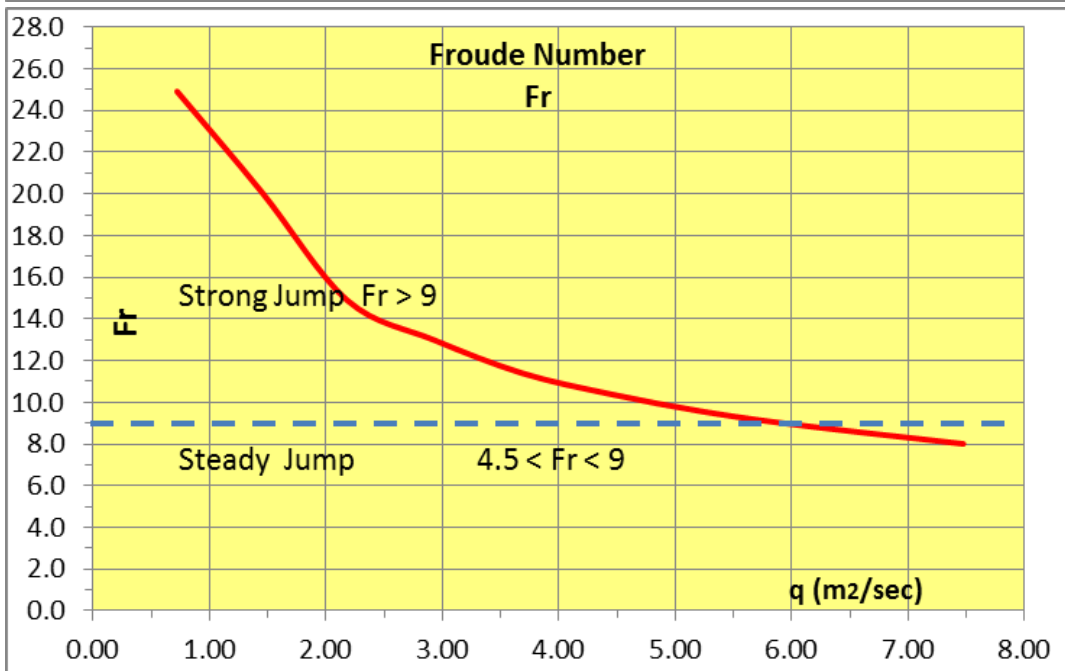
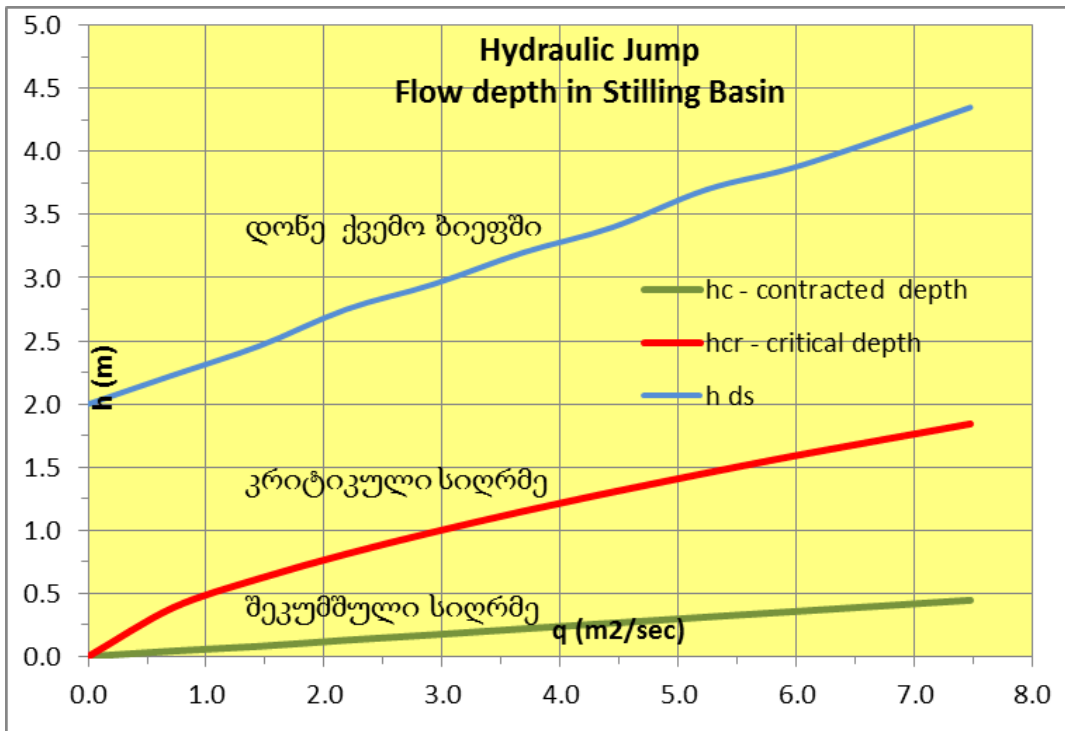
- ზემო ბიეფში წყლის დონე - 502.55 მ.ზ.დ.;
- ფარის სრულად გახსნისას მაქსიმალური ხარჯი - $Q = 1988 \text{ მ}^3/\text{წმ}$;
- მაქსიმალური ხვედრითი ხარჯი - $q = 29.89 \text{ მ}^2/\text{წმ}$;

ფარის გახსნის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრაული ნახტომს;

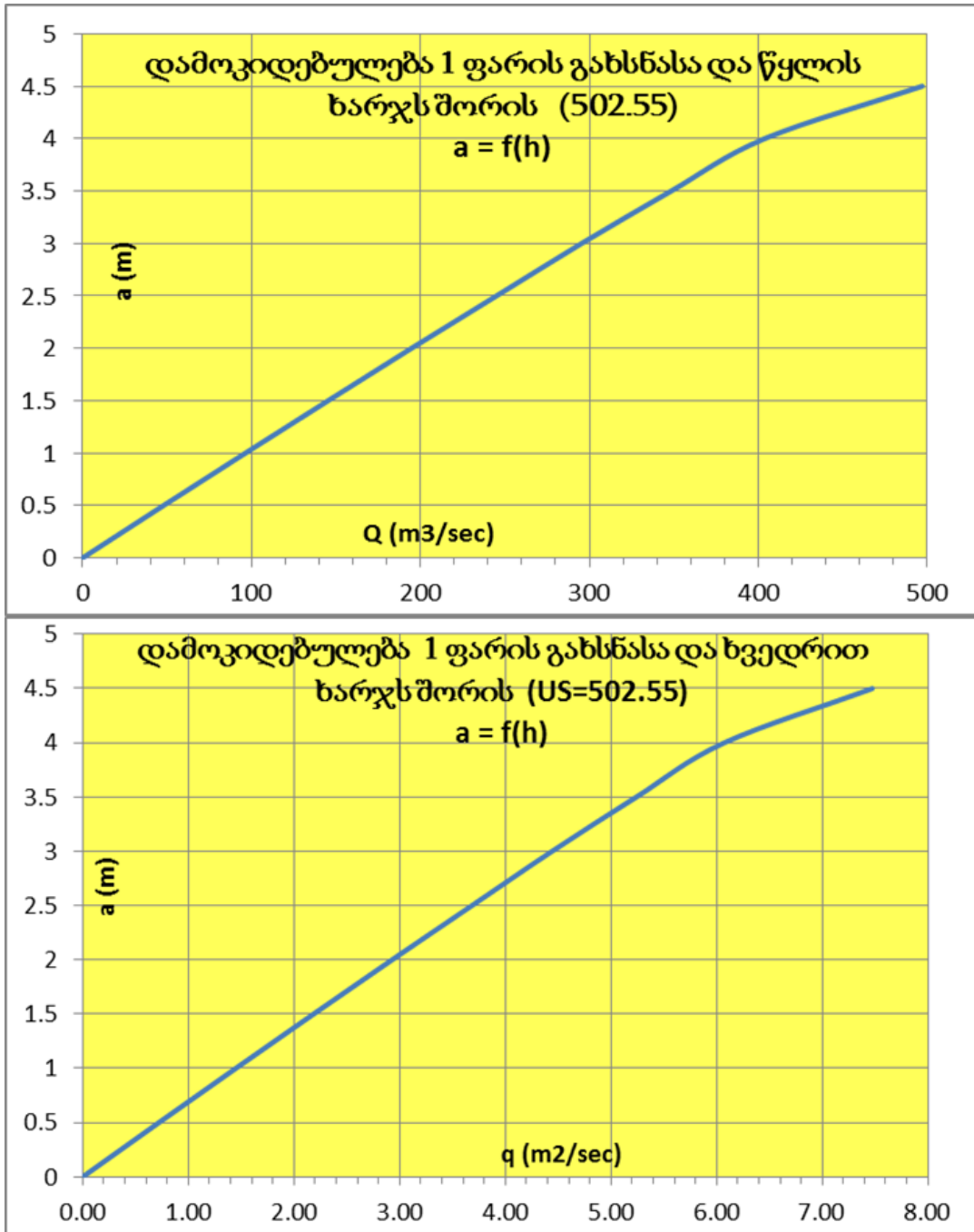
განგარიშებათა შედეგებით მიღებული იქნა, რომ მაქსიმალური ხარჯების გატარებისას 1, 2 და 3 საკეტების თანმიმდევრული ჩართვისას ვითარდება განდევნილი ნახტომი, ხოლო მე-4 საკეტის დამატებისას კი დაძირული ჰიდრავლიკური ნახტომი.



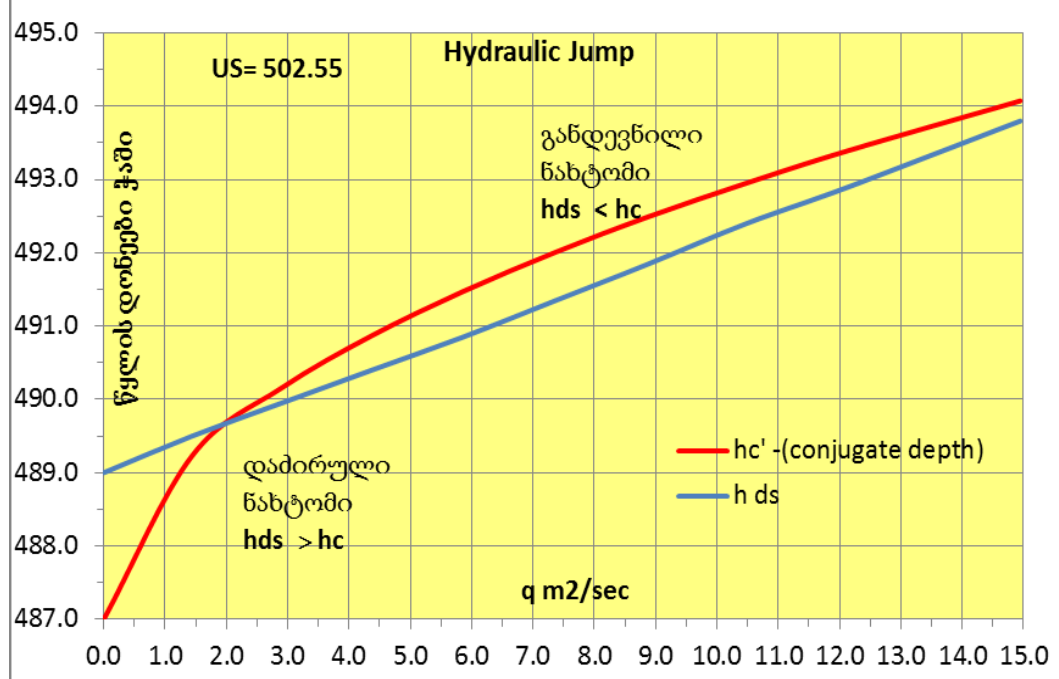
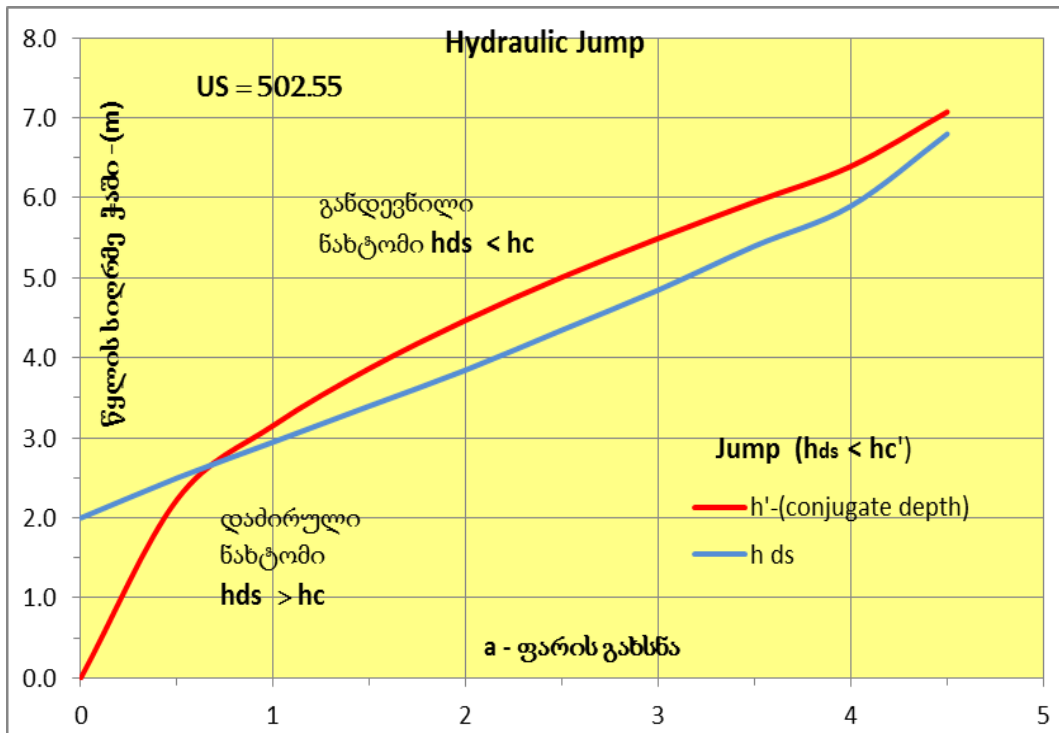
ნახაზი #13 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ. (1 ფარის გახსნისას)



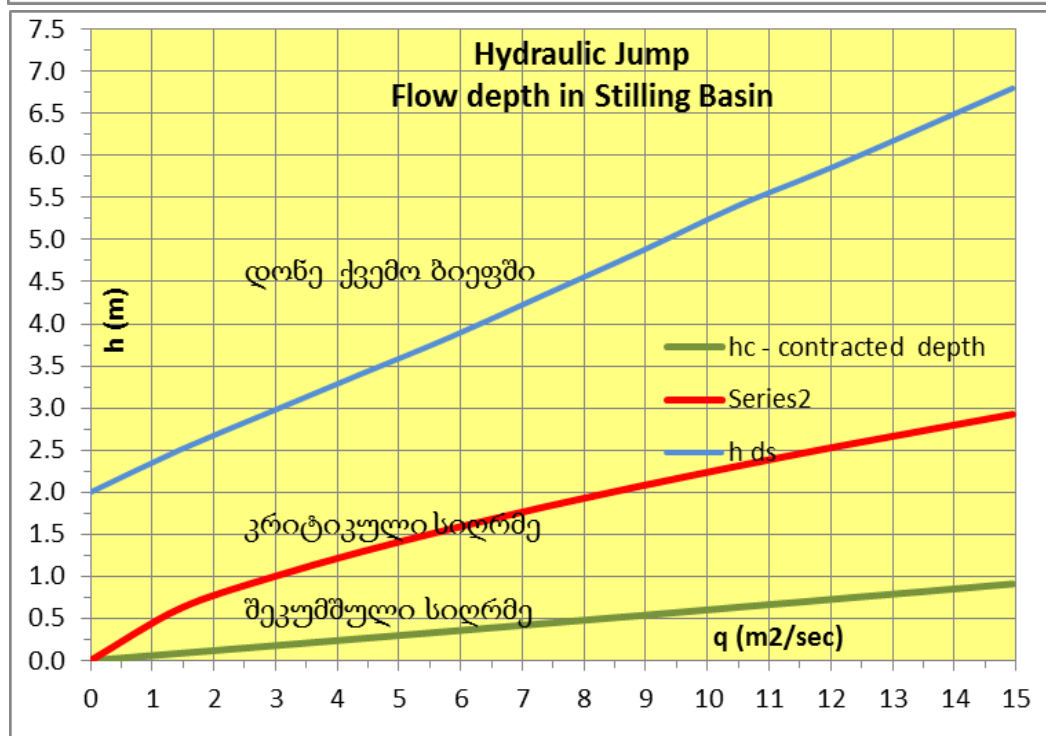
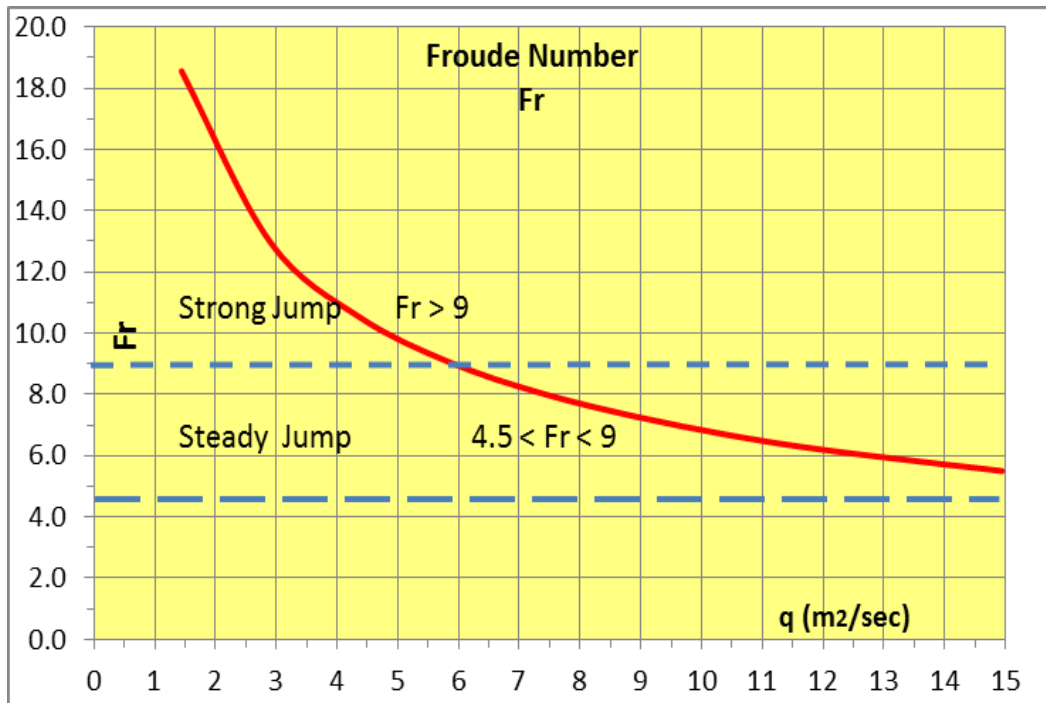
ნახაზი #14 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში (1 ფარის გახსნისას)



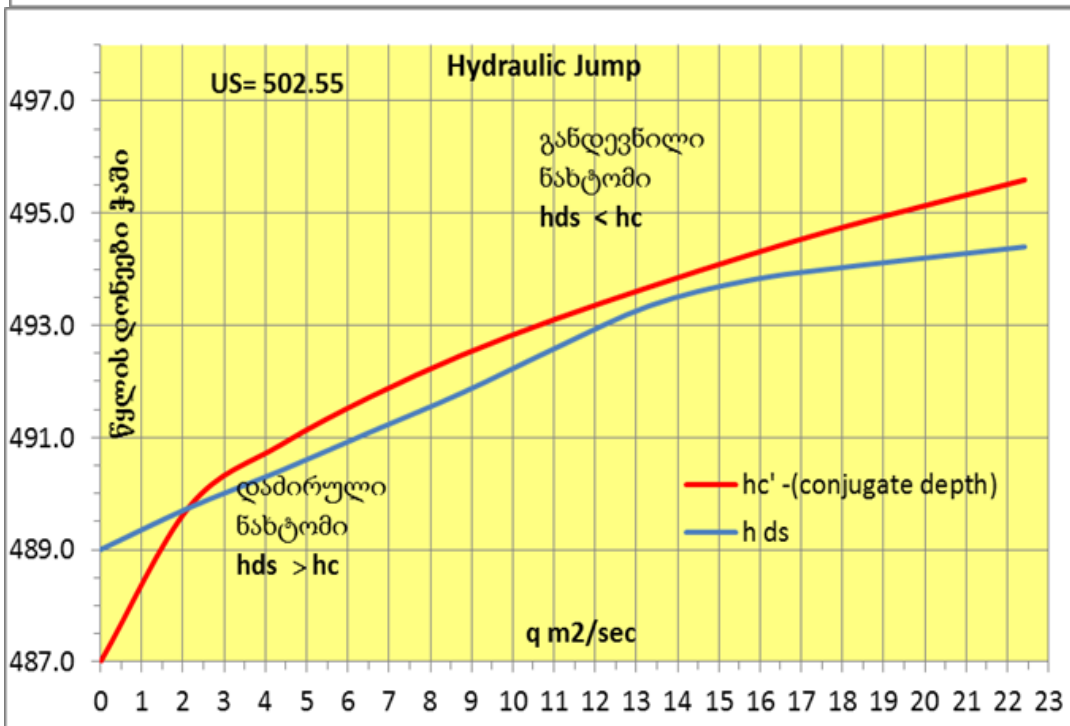
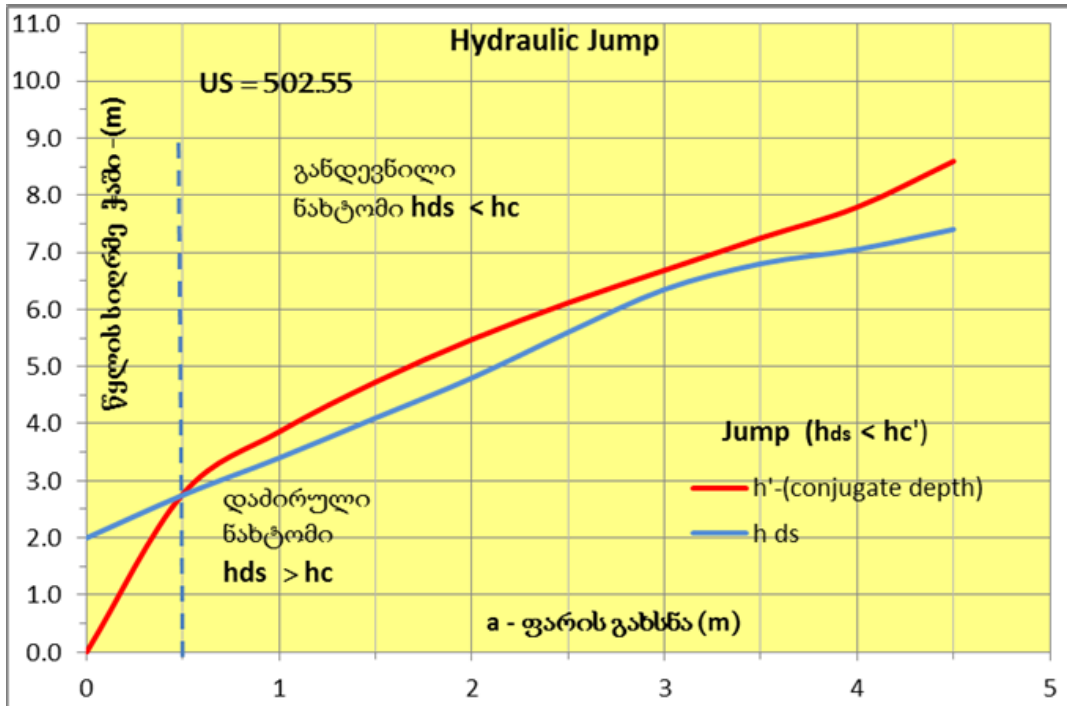
ნახაზი #15 – ფარის გახსნასა და წყლის ხარჯს შორის დამოკიდებულება (1 ფარის გახსნისას)



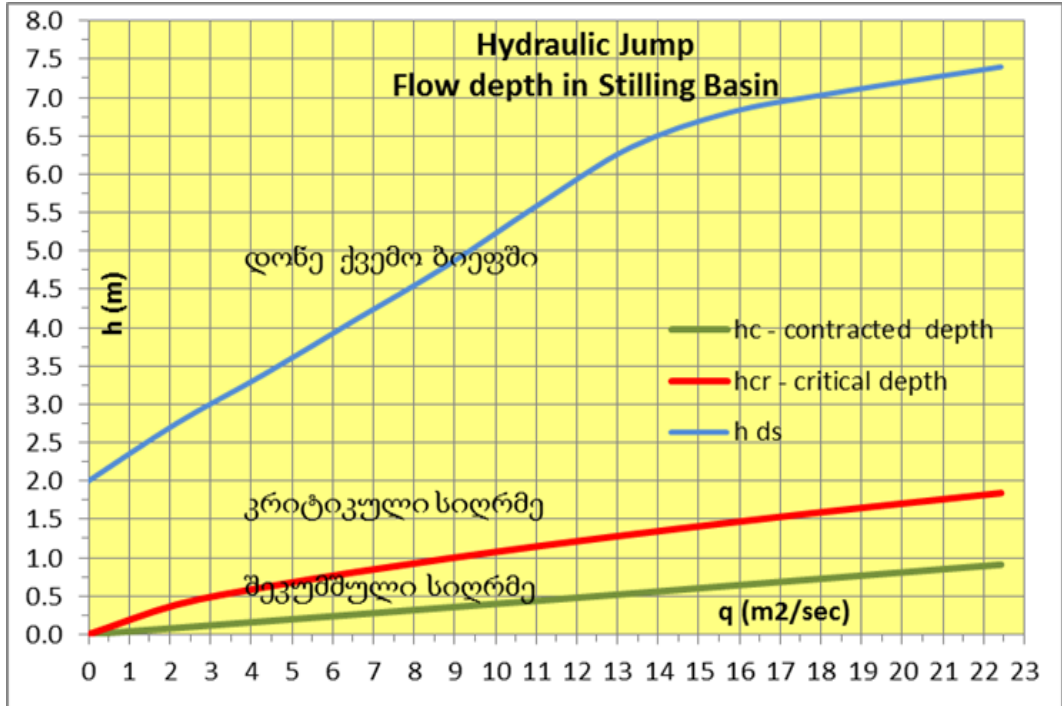
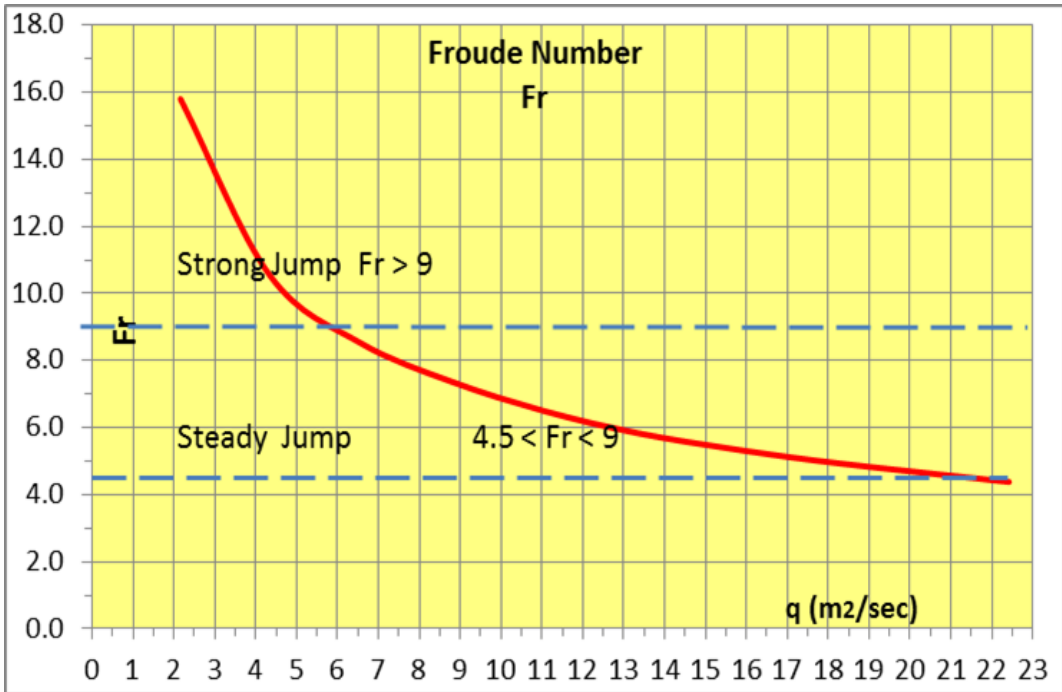
ნახაზი #16 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ. (2 ფარის გახსნისას)



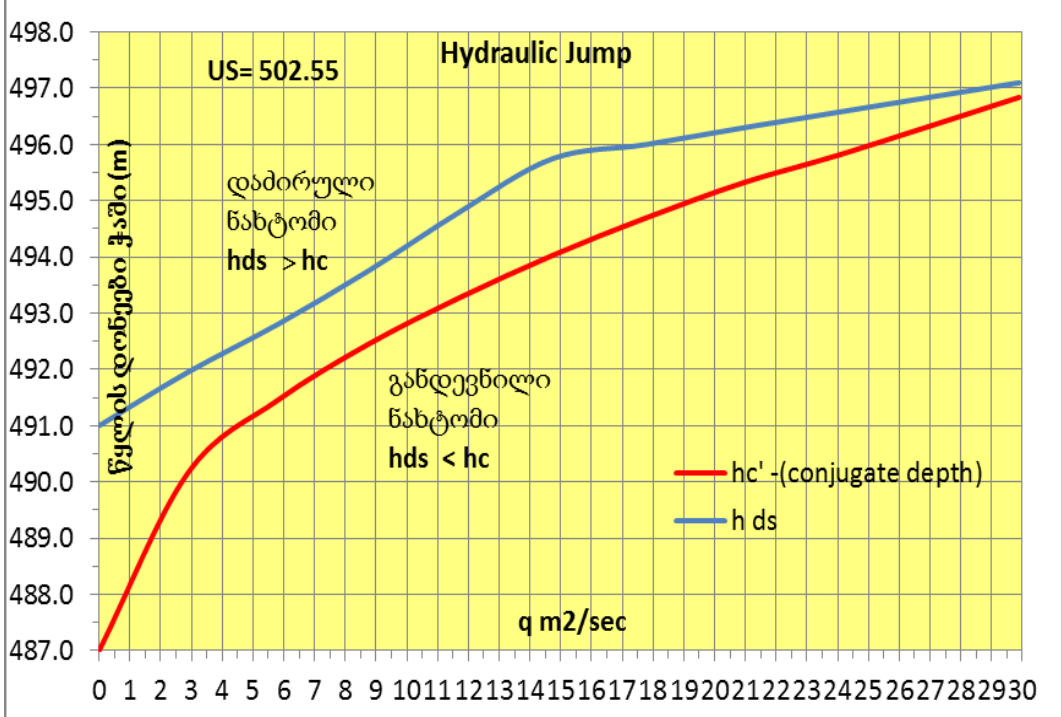
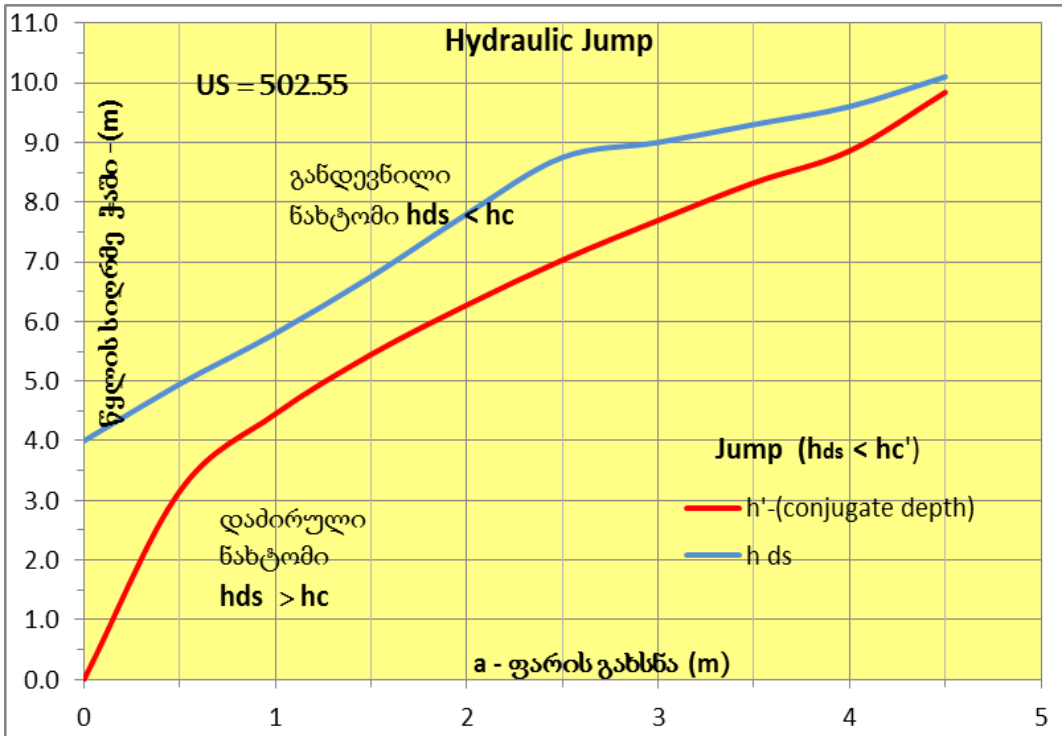
ნახაზი #17 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში (2 ფარის გახსნისას)



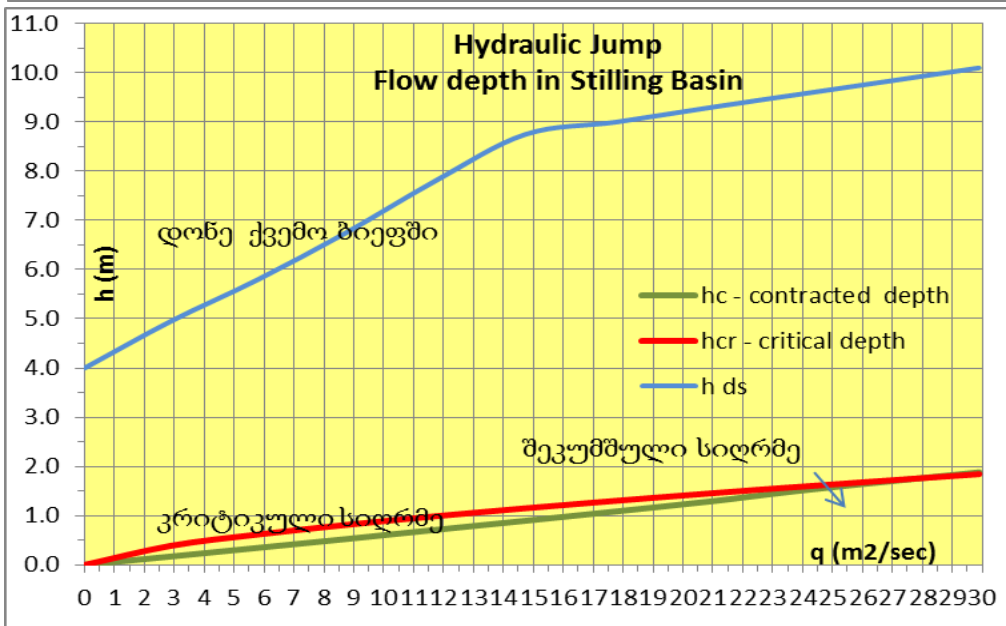
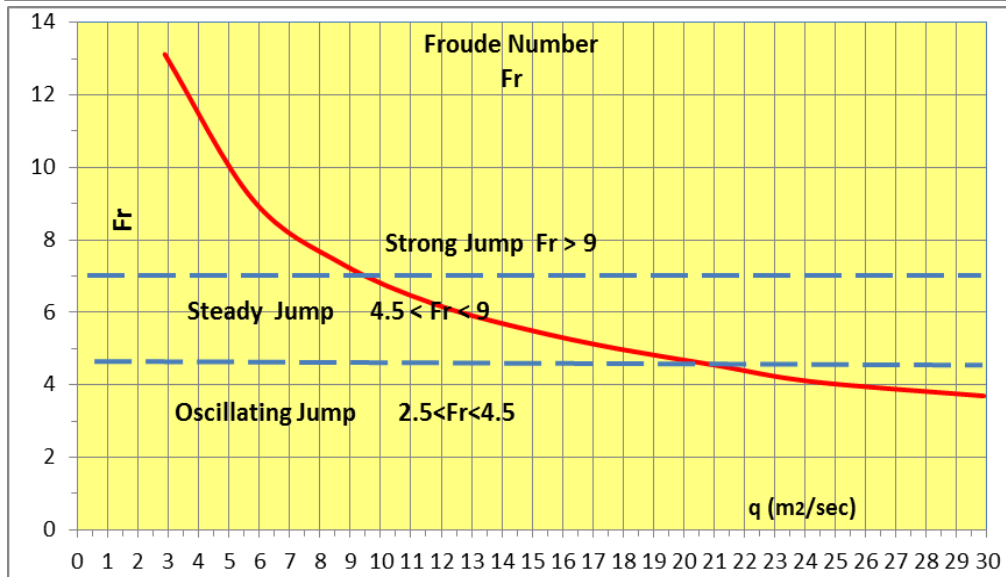
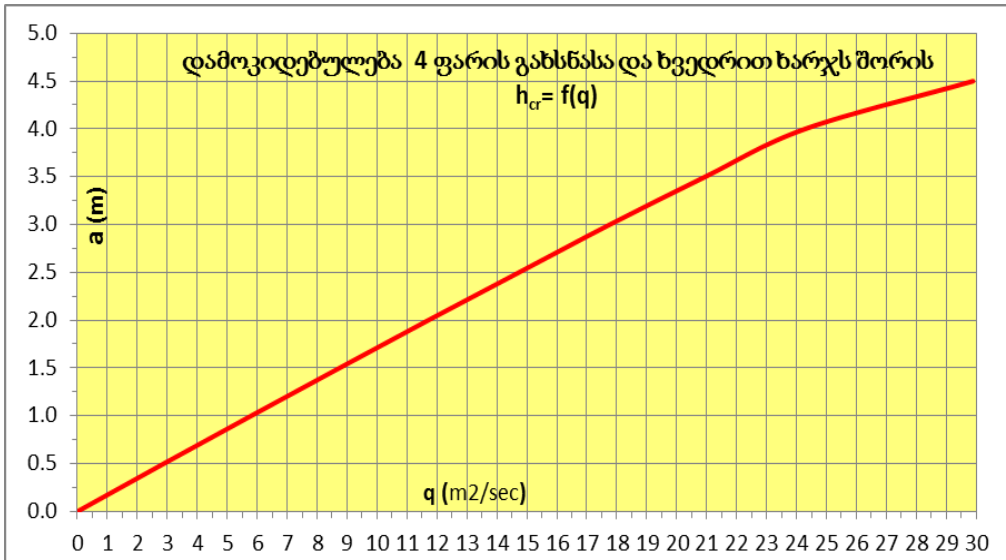
ნახაზი #18 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ. (3 ფარის გახსნისას)



ნახაზი #19 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში (3 ფარის გახსნისას)



ნახაზი #20 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყლის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას, ქვემო ბიეფში წყლის: a) სიღრმეების და b) ნიშნულების მიმართ. (4 ფარის გახსნისას)

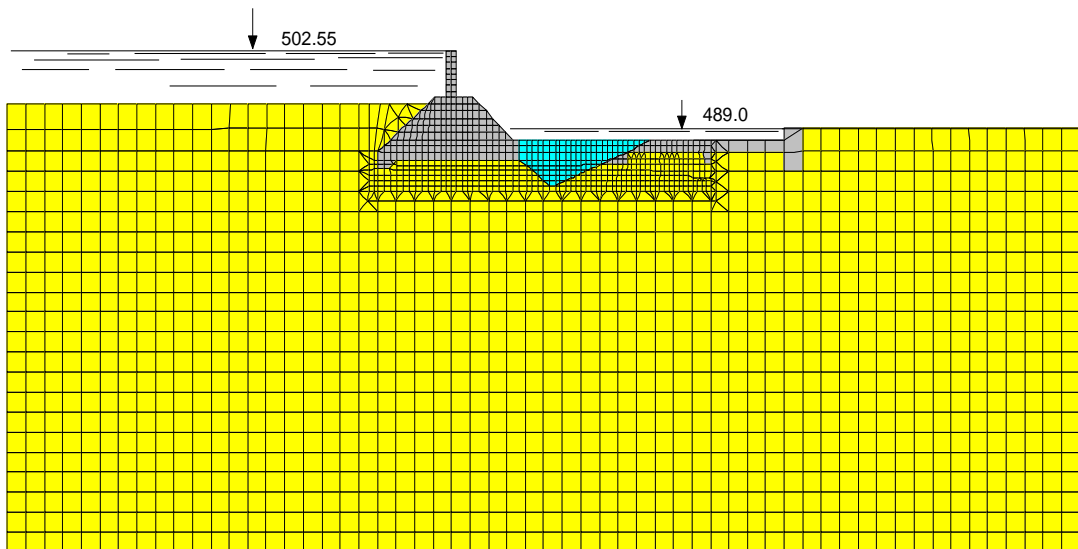


ნახაზი #21 - ფრუდის რიცხვის დამოკიდებულება ხვედრით ხარჯზე და დონეები ჭაში (4 ფარის გახსნისას)

2.5 კაშხლის ფუძის ფილტრაციული გაანგარიშება

ფილტრაციული გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა სისტემისთვის „კაშხალი-ფუძე“ ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სასრული ელემენტების მოდელის გამოყენებით. საანგარიშო სქემა ითვალისწინებს ხსენებული სისტემის გეომეტრიულ ზომებს და ფუძის ფიზიკურ-მექანიკურ პარამეტრებს საპროექტო გადაწყვეტის შესაბამისად. აგრეთვე ქვემო ბიეფში ორმოს გაჩენას (ნახ. #22).

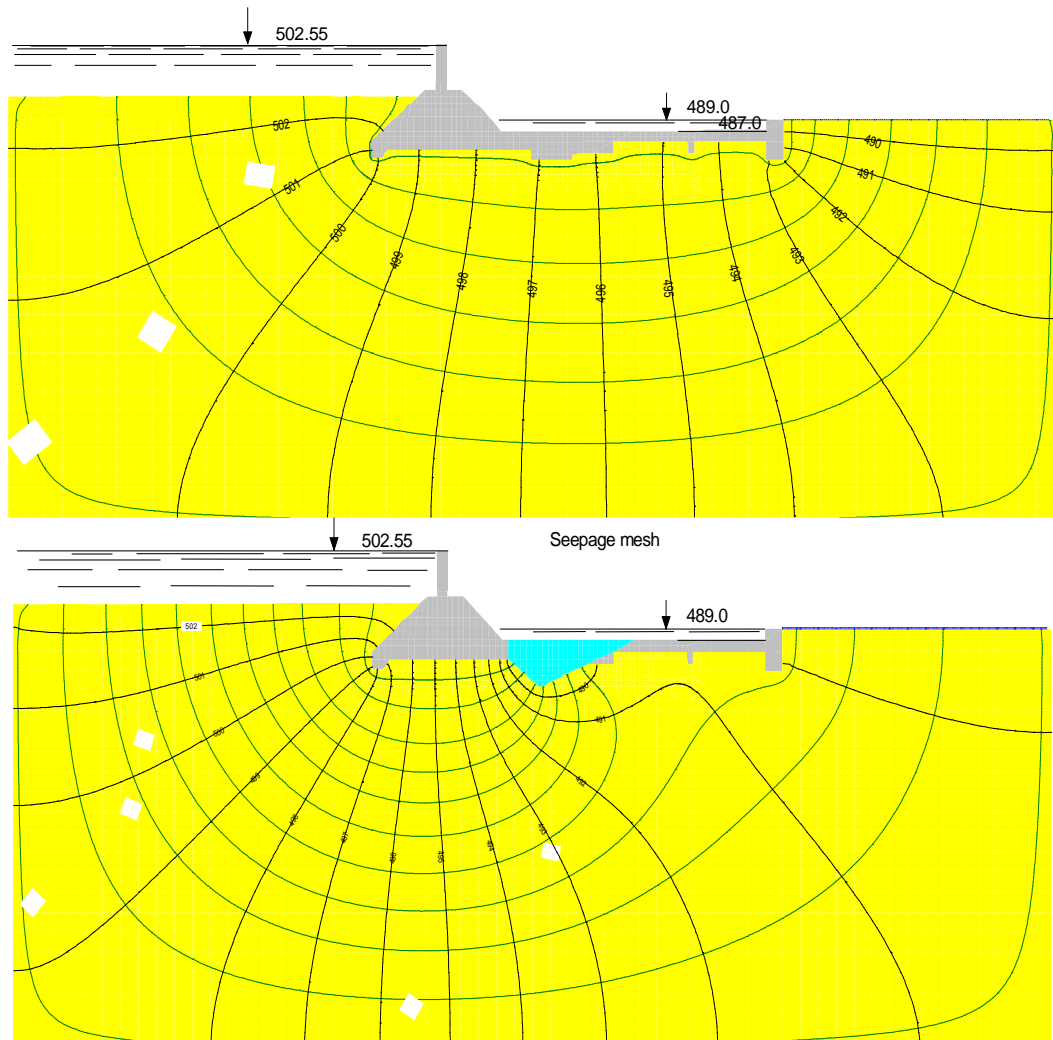
გაანგარიშების შედეგებით მიღებული იქნა ფილტრაციული პარამეტრების სრული სპექტრი, მათ შორის ფილტრაციული უკუწნევისა და გრადიენტების განაწილება კაშხლის ფუძეში ფილის საპროექტო და დაზიანებული მდგომარეობისთვის (ნახ. #23 და #24).



ნახაზი #22 - საანგარიშო სქემა კაშხალი-ფუძე სისტემის ფილტრაციული გაანგარიშებისთვის

მიღებულ იქნა, რომ ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტები კაშხლის ძირში არსებულ სივარდილესთან აღწევს $1 \div 1.2$ -ს (ნახ. #25). გეოლოგიური კვლევების მიხედვით, ფუძეში არსებული ხრეშოვანი გრუნტი შეიცავს წვრილ ნაწილაკებს (ფრაქციით ≈ 1 მმ), ხოლო საშუალო და

წვრილი ფრაქციის გრუნტებისათვის დასაშვები გრადიენტი შეადგენს 1.0 და 0.75 შესაბამისად. აღნიშნულის გათვალისწინებით კაშხლის ფუძეში არსებული ფილტრაციული გრადიენტები ახლოსაა დასაშვებთან.

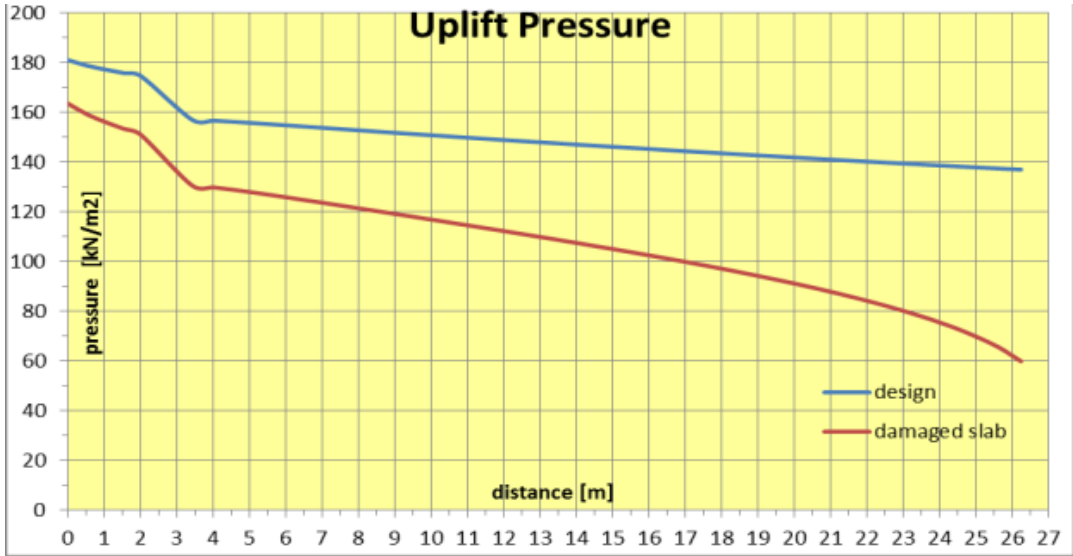


ნახაზი #23 - ფილტრაციული ბადე კაშხლის ფუძეში საპროექტო და ენერჯის ჩამქრობ ჭაში გამორეცხილი ძირის შემთხვევაში.

ამდენად, ფილტრაციული სიმტკიცის მარაგები პრაქტიკულად ამოწურულია.

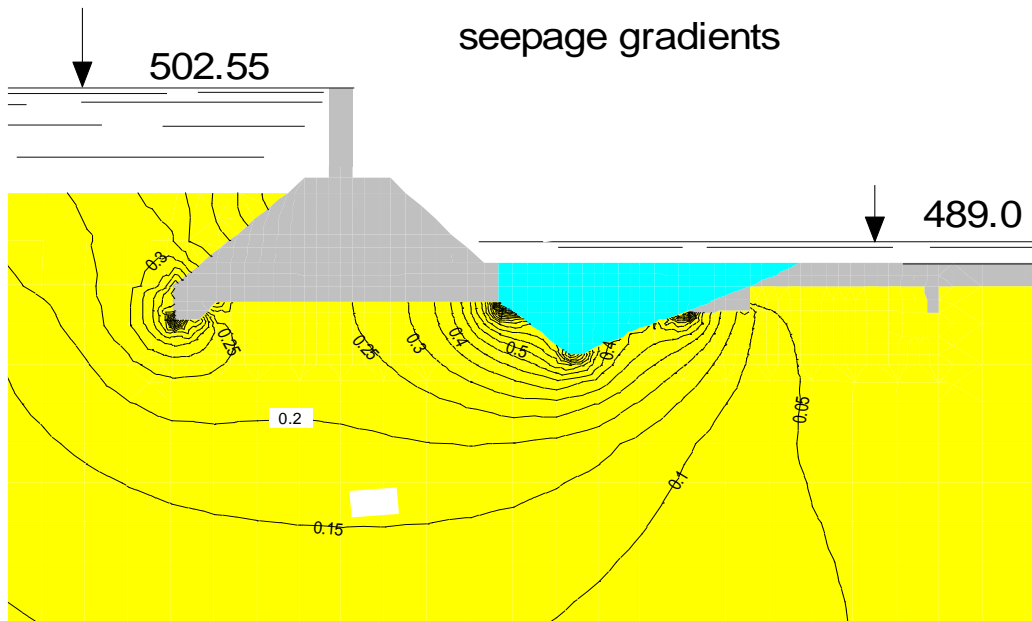
ფილტრაციული უკუწნევა კაშხლის ძირზე შეადგენს:

- საპროექტო მდგომარეობისთვის - 3 980 კნ-ს;
- ქვემო ბიეფში სიცარიელის არსებობისას 2 789 კნ-ს.



ნახაზი #24 - ფილტრაციული უკუწნევა კაშხლის ძირზე

ამდენად, ქვემო ბიეფში ორმოს გაჩენის შედეგად ფილტრაციული დაწნევები კაშხლის ძირზე სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგების ქვეშ შემცირდა 2-დან 8 მ-მდე შესაბამისად. ამდენად, სიცარიელის არსებობისას ფილტრაციული უკუწნევა კაშხლის ძირზე (საპროექტო მდგომარეობასთან შედარებით) შემცირებულია 1 200 კნ-ით.



ნახაზი #25 - ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტები ფუძეში

2.6 წყალსაცემი ფილის მდგრადობის შეფასება

წყალსაცემების მუშაობისას განდევნილი ნახტომის გავლენით წყალსაცემ ფილაზე ვითარდება ენერჯის დეფიციტი და არსებული ტურბულენტური რეჟიმის თანმხლები პულსაციური დატვირთვები. აღნიშნული დატვირთვები, ცალკეულ შემთხვევებში, აღწევს საკმაოდ მაღალ მნიშვნელობას. ამდენად, წყალსაცემი ფილის სიმტკიცისა და მდგრადობის (ცალკეულ შემთხვევაში ფილის ანკერირების) შეფასებისას საექსპლუატაციო დატვირთვებს შორის საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას ნაკადის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება.

წყალსაცემი ფილის სისქე, მისი არმირება, ხოლო კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში მათი ანკერირება, უნდა აკმაყოფილებდეს სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობებს, ნორმატიული მოთხოვნების შესაბამისად.

ფილის სიმტკიცეზე გაანგარიშებები საჭიროა ჩატარდეს ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით ქვემოთ მოცემული პირობის გამოყენებით:

$$n_c N_p \leq R k_n \quad (2.6.1)$$

სადაც,

n_c , k_n - დატვირთვების შეთანწყობის და საიმედოობის კოეფიციენტები შესაბამისად;

N_p - განზოგადოებული ჰიდროდინამიკური დატვირთვის საანგარიშო მნიშვნელობა;

R - განზოგადოებული დამჭერი ძალის საანგარიშო მნიშვნელობა.

წყალსაცემი ფილის სიმტკიცისა და მდგრადობის გაანგარიშებისათვის, საჭიროა განსაზღვრულ იქნას მთლიანად მასზე, ან მის ცალკეულ ფრაგმენტებზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვა.

ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების განსაზღვრა ფილაზე მოიცავს ორ ამოცანას. კერძოდ, განსაზღვრული იქნას:

- ფილის ზედაპირზე განვითარებული დატვირთვა
 - ენერგიის დეფიციტის და,
 - პულსაციის შედეგად.
- ფილის ძირზე ფილტრაციის შედეგად განვითარებული უკუწნევა.

ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკაში გამოიყენება, როგორც არადრენირებადი ფილები, ასევე დრენირებადი ფილები (ანუ სადრენაჟო ჭების განთავსებით ფილის მთელ ზედაპირზე ან მის ნაწილზე). სადრენაჟო ჭების მოწყობა საშუალებას იძლევა შემცირდეს ენერგიის დეფიციტი ფილაზე და შესაბამისად მისი სისქე.

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე მიიღება, რომ ენერგიის დეფიციტი დამოკიდებულია ქვემო ბიეფში განვითარებულ ჰიდრაულიკურ რეჟიმზე და დრენაჟის კონსტრუქციაზე (ჭების რაოდენობასა და მათ განლაგებაზე).

საზოგადოდ, ყველა შემთხვევაში, როდესაც ქვემო ბიეფში დონე მეტია კრიტიკულზე ($h > h_{cr}$) ადგილი აქვს ჰიდრაულიკურ ნახტომს, რომელიც თავის მაქსიმალურ სიდიდეს აღწევს საკეტის გახსნის გარკვეული მნიშვნელობის დროს.

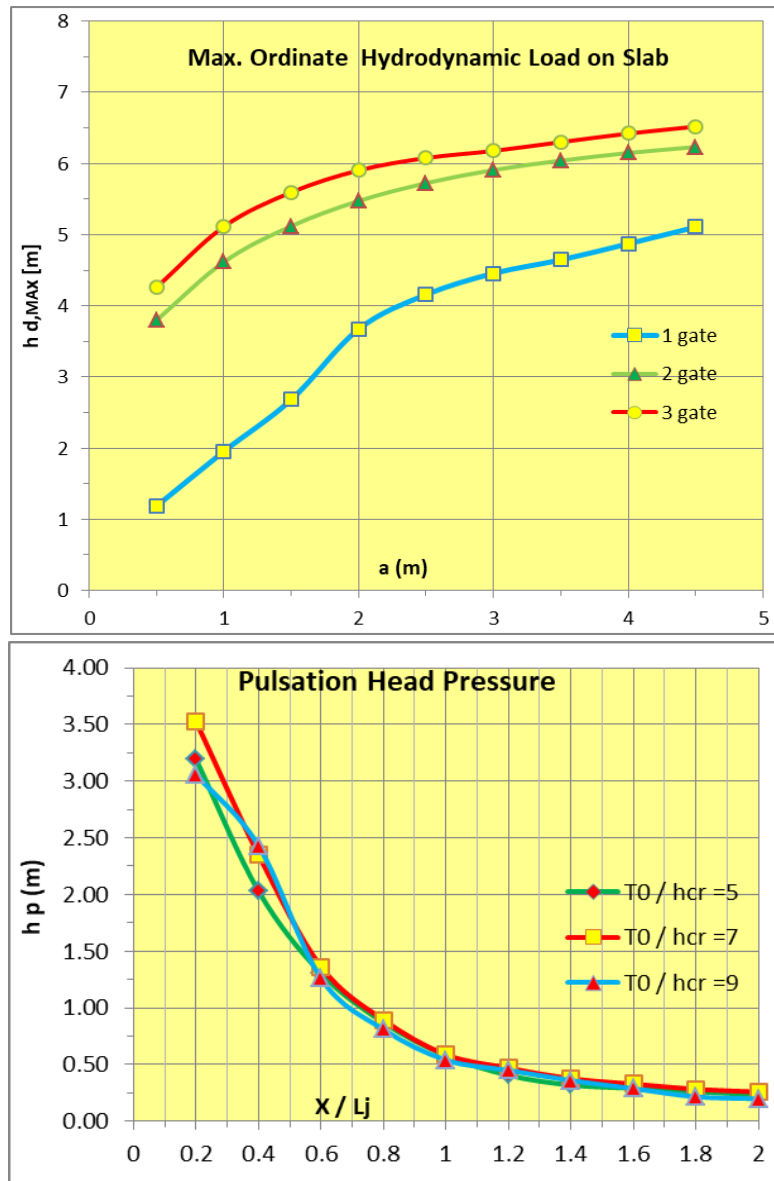
განდევნილი ნახტომის არსებობისას არადრენირებული ფილის ზედაპირზე წარმოიქმნება ენერგიის დეფიციტი, რომლის მნიშვნელობა იზრდება ძირითადად განდევნილი ნახტომის ზრდის შესაბამისად. აღნიშნული საკითხები საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას პროექტირებისას.

2-განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში, დაწნევის დეფიციტი ჰიდრაულიკური ნახტომის ფარგლებში, შესაძლებელია წარმოდგენილ იქნას ფილაზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვებისა და ფილტრაციული უკუწნევის ერთობლივი ზემოქმედების მიხედვით (ნახ. #26).

გაანგარიშებებით მიღებულ იქნა, რომ ჰიდროდინამიკური დატვირთვის მაქსიმალური მნიშვნელობა აღწევს 3 ფარის ერთდროული

გახსნისას, რომლის დროს $q = 22.42 \text{ მ}^2/\text{წმ}$. ამდენად, ფილის მდგრადობის განგარიშება ჩატარდა სწორედ 3 ფარის გახსნისას განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის პარამეტრებისათვის.

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობა ვითარდება შეკუმშულ კვეთსა და ჰიდრავლიკური ნახტომის ბოლოს შესაბამისად.



ნახაზი #26 - ჰიდროდინამიკური დატვირთვა და წნევის პულსაცია ფილაზე ხსენებული პირობებისათვის, ნაკადის დინების მიმართულებით ფარდობითი პულსაციური დატვირთვის მოცემული მნიშვნელობების მიხედვით, განსაზღვრულ იქნა პულსაციური დატვირთვა 1, 2 და 3 ფარის

გახსნის დროს, ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრავლიკური ნახტომის შესაბამისი პარამეტრების (q , L_j და $\frac{T_0}{h_{cr}}$) მიხედვით.

საკითხის სპეციფიურობიდან გამომდინარე და უარესობის პირობის შესაქმნელად - პულსაციური დატვირთვის მნიშვნელობა, არსებულ შემთხვევაში მიიღება ფილის ზედაპირის ნორმალის მიმართულებით.

გაანგარიშების შედეგების მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ ფილა ვერ აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას. ფილის მდგრადობაზე გაანგარიშება ჩატარებულ იქნა ზემოხსენებული (2.6.1) პირობის მიხედვით.

საბოლოოდ, ფილის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად საჭირო გახდა ანკერების დაპროექტება, რომლის პარამეტრების (რაოდენობა, სიგრძე და დიამეტრი) განსაზღვრა მოხდა ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ექსტრემალური მნიშვნელობებისათვის.

2.7 ცაგერის ბეტონის კაშხლის მდგრადობის ანალიზი ქვემო ბიეფში განვითარებული გარეცხვის არსებობისას

2.7.1 კაშხალი-ფუძე სისტემის მდგრადობის ანალიზი წრფივი გაანგარიშების მიხედვით

საკვლევი ობიექტის აღწერისას და ქვემო ბიეფში მიმდინარე პროცესებზე დაკვირვების შედეგებში როგორც აღინიშნა, ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილამ ექსპლუატაციის განმავლობაში განიცადა რღვევა, რამაც ფუძეში განავითარა 5 მ-ზე მეტი სიღრმის მქონე ორმო, რომელმაც შეაღწია კიდეც ნაგებობის ძირში. საჭიროა აღინიშნოს, რომ სწორედ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის მხარეს არსებობს მაღალი მკუმშავი ძაბვები. ყოველივე კი რეალურ საშიშროებას ქმნიდა მდგრადობის დაკარგვის თვალსაზრისით.

წყალსაცემი ფილის დანგრევის შედეგად ფილტრაციული სიგრძე დამოკლდა, რამაც შესაბამისად გაზარდა დაწნევის გრადიენტები კაშხლის

ფუძის გამორეცხვის ზონაში. აღნიშნულის შედეგად შემცირდა ფილტრაციული სიმტკიცის (სუფოზიის) მარაგები.

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშებები, ჩატარებული იქნა საექსპლუატაციო დატვირთვებისა (მათ შორის ფილტრაციული დაწნევების) და ფუძის მასალის არაწრფივი 3-დერმა დეფორმაციის გათვალისწინებით.

საჭიროა ხაზი გავუსვათ იმ ფაქტს, რომელიც ლიტერატურის მიმოხილვისას იქნა ხსენებული, რომ გრუნტები, კლდოვან ფუძესთან შედარებით, ხასიათდებიან უფრო მაღალი მნიშვნელობის არაწრფივობით, რომლის გავლენაც ხსენებულ პირობებში კიდევ უფრო იზრდება.

„ძაბვა-დეფორმაციის“ აპროქსიმაციისათვის გამოყენებულ იქნა ანალიტიკური დამოკიდებულება, რომელიც ემყარება მსხვილფრაქციული გრუნტების ექსპერიმენტული კვლევების შედეგებს. გრუნტების დეფორმაციის ანალიზისათვის გამოიყენება დატვირთვის დევიატორული უბანი მარსალისა და გუპტას ექსპერიმენტული კვლევების გათვალისწინებით.

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი გაანგარიშებები, ჩატარებულ იქნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. სისტემის არაწრფივი სიხისტის მატრიცის ფორმირება შესრულდა იტერაციული გაანგარიშებების გზით.

მიღებულ იქნა, რომ კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზონაში (ფუძეში არსებული გამორეცხვის უბანთან) მკუმშავი ძაბვების კონცენტრაციის გავლენით, პლასტიკური დეფორმაციები გაზრდილია. აღნიშნულის შედეგად ადგილი აქვს ძაბვების გადანაწილებას. კერძოდ, მაღალი კონცენტრაციის ზონაში ადგილი აქვს დაძაბული მდგომარეობის განტვირთვას, ხოლო საკონტაქტო ზონის უფრო სიღრმისეულ კვთებში კი დატვირთვას.

მდგრადობის ანალიზისთვის გამოყენებულ იქნა გრუნტის სიმტკიცის შეფასება მორი-კულონის თეორიის გამოყენებით.

ნაშრომში მოცემულია ცაგერის ბეტონის კაშხლისა და ფუძის არაწრფივი მუშაობის რიცხვითი ანალიზის ცალკეული შედეგები.

ვინაიდან კაშხლის ფუძე ძირითადად ერთგვაროვანია და შეიცავს ხრემოვან გრუნტს თიხა-ქვიშის შემავსებლით, როგორც ეს ზემოაღნიშნულ საინჟინრო-გეოლოგიურ კვლევებში ფიქსირდება, შესაბამისად გამოიყო ის ძირითადი მახასიათებელი პარამეტრები (ცხრ. #2), რომელთა გამოყენებითაც შეიქმნა საკვლევი ობიექტის მოდელი.

საზოგადოდ, არაკლდოვანი გრუნტებისთვის „ძაბვა-დეფორმაციის“ მრუდი ხასიათდება მნიშვნელოვანი სიმრუდით, რაც მიუთითებს გრუნტის არაწრფივი დეფორმადობის როლზე. ამასთან დაკავშირებით „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა მასალის არაწრფივობის გათვალისწინებით „ძაბვა-დეფორმაციის“ ჰიპერბოლური მრუდის მოდელით და სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

ცხრილი #2 - გრუნტის საინჟინრო მახასიათებლები

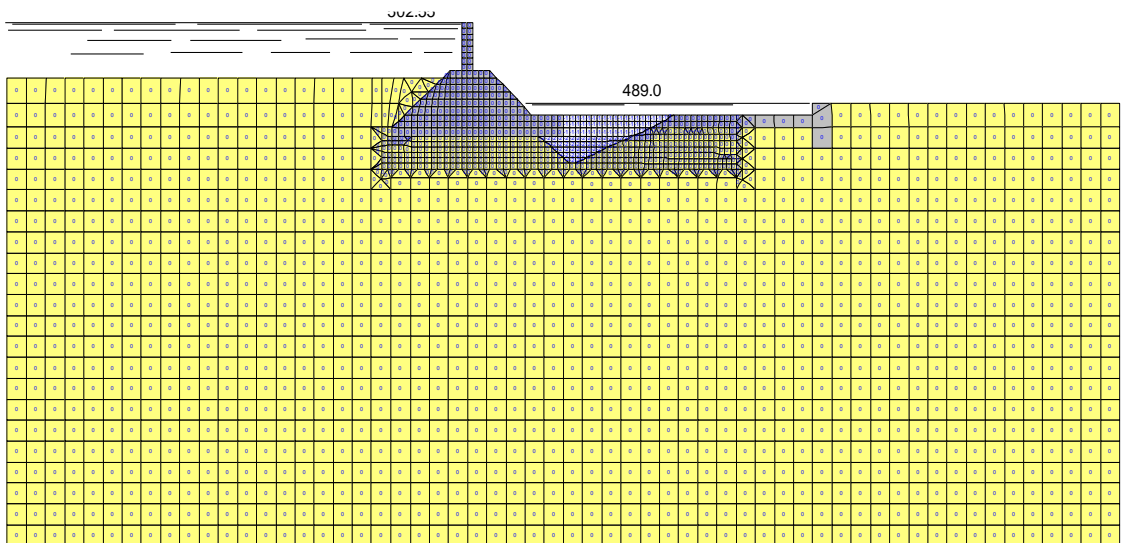
დრეკადობის მოდული [კნ/მ ²]	40000
პუასონის კოეფიციენტი	0.27
შიგა ხახუნის კუთხე [°]	26
ხვედრითი შეჭიდულობა [კნ/მ ²]	10
მოცულობითი წონა [კნ/მ ³]	20.5

ზემოთ როგორც აღინიშნა, საკვლევი ობიექტი წარმოადგენს ცაგერის გრავიტაციულ კაშხალს არაკლდოვან ფუძეზე, ხოლო დაწნევა კაშხალზე მიიღება ბურჯებში განთავსებული ბრტყელი ფარების საშუალებით.

ამდენად წყალსაცავიდან განვითარებული ჰიდროსტატიკური წნევა, ბურჯების საშუალებით გადაეცემა გრავიტაციულ კაშხალს. მთლიანად კაშხალი წარმოდგენილია 2 ბლოკის სახით, ხოლო თითოეულ ბლოკში განთავსებულია 2 წყასლაგდები მალი. ობიექტის კვლევის მდგომარეობისთვის კაშხლის 1-ლი და მე-2 წყასლაგდები მალეების ქვემო ბიეფში გაჩენილი იყო სიცარიელე, რაც ეჭვქვეშ აყენებდა აღნიშნული ბლოკის მდგრადობის საკითხს.

არაკლდოვან ფუძეზე განთავსებულ კაშხლებს ანგარიშობენ სიმტკიცისა და ძვრაზე მდგადობის პირობებით, რომელიც მოიცავს შერეული და სიღრმული ძვრის სქემებს. აღნიშნულის შესაბამისად აიგო სასრულ ელემენტთა მოდელი შემდგომი ანალიზისთვის (ნახ. #27).

განსახილველ შემთხვევაში განსაკუთრებით აქტუალურია სწორედ შერეული ძვრა. აღნიშნული გულისხმობს, რომ ძვრის სიბრტყე გადის არა კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე, არამედ შესაძლებელია, რომ ძვრის სიბრტყემ მოიცვას კონტაქტის ნაწილი სადაწნეო წახნაგის ქვეშ და ასევე სიღრმისეული ზონა - უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (ნახ. #28).

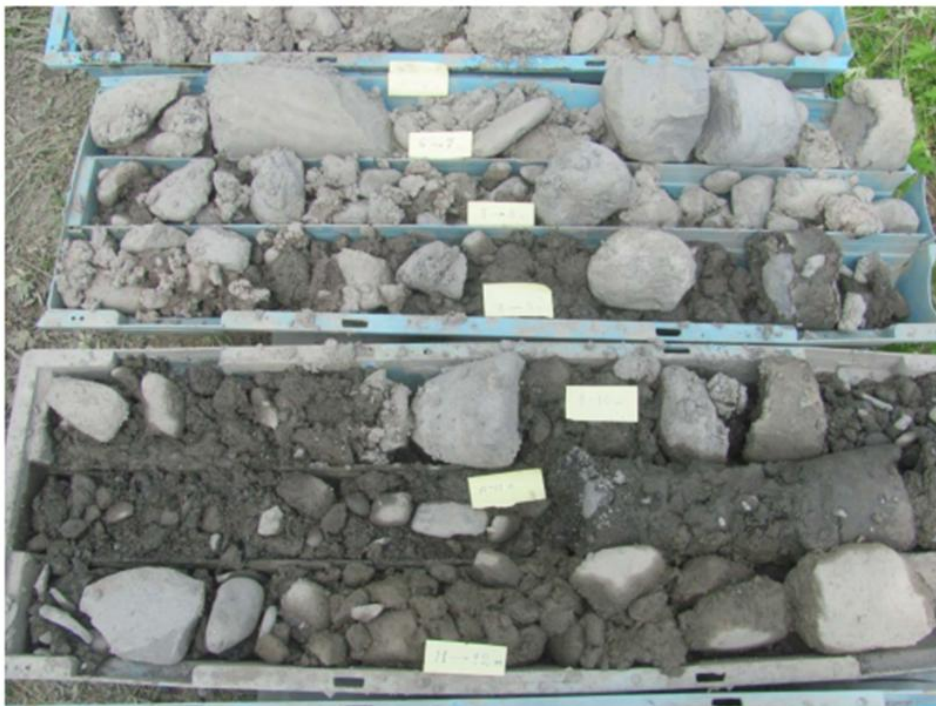
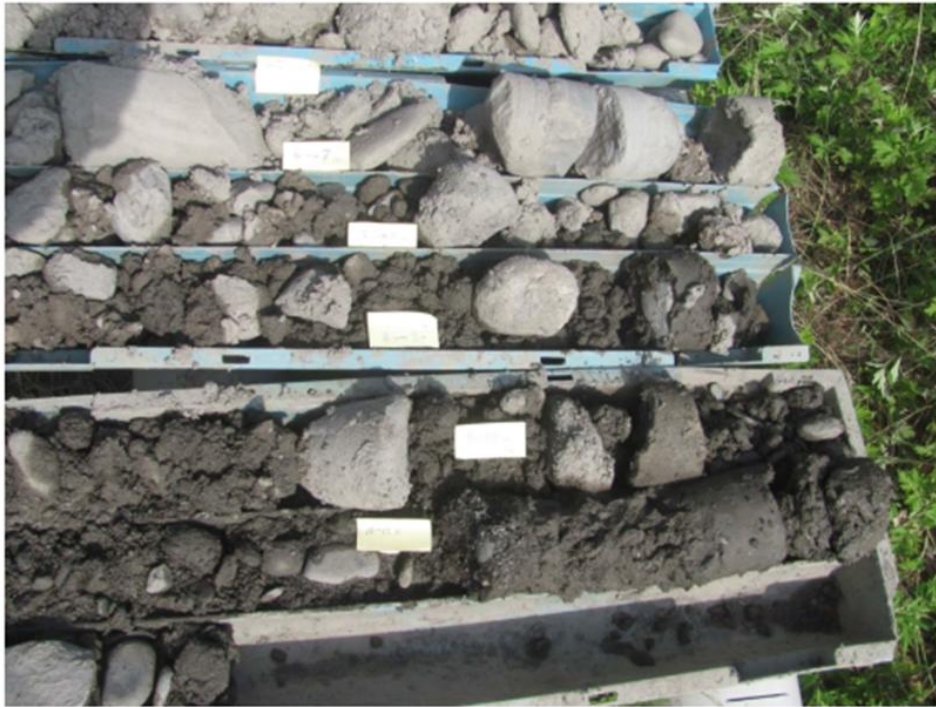


კაშხლის ფუძეს ქვემო ბიეფის მხარეს აქვს ღრმა (≈ 5 მ სიღრმის) გარეცხვის ორმო, აღნიშნული ზრდის ძაბვების კონცენტრაციას კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო ზედაპირზე, განსაკუთრებით უდაწნეო წახნაგის ქვეშ. შესაბამისად, გაუარესებულია გაჩენილი ორმოს ფერდის ლოკალური მდგრადობა.

საკითხის განხილვისას გასათვალისწინებელია ფუძის გეოლოგიური აღნაგობა. ფუძე მთლიანად ხრეშოვანი გრუნტითაა წარმოდგენილი (სურ. #17).

კაშხლის მდგომარეობის შესწავლა ჩატარებულ იქნა სტატიკა-ფილტრაციის 2-განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სისტემისთვის „კაშხალი-ფუძე“ სასრულ-ელემენტთა მოდელის გამოყენებით.

განგარიშები შესრულდა ჰიდროკვანძზე ჩატარებული გეოლოგიური კვლევების შედეგების გათვალისწინებით (ცხრ. #3).



სურათი #17 - ქაბურღილების გამოყენებით ამოღებული გრუნტის ნიმუშები

ხსენებული სისტემის საანგარიშო სქემა ითვალისწინებს:

- კაშხლის გეომეტრიულ ზომებს;

- ფუძის დეფორმაციულ მახასიათებლებს (გეოლოგიური მონაცემების მიხედვით);
- კაშხლის წინ დაგროვილი ნატანიდან განვითარებულ დატვირთვებს;
- ფილტრაციულ წნევებს კაშხლის ფუძეში;
- ფილისა და ფუძის გარეცხვის პროცესს.

ცხრილი #3 - კერნების ლაბორატორიული კვლევის შედეგები

ლოკაცია	სინჯის #	სიღრმე, მ	ტენიანობა, %	სიმკვრივე, გ/სმ ³	ფორიანობის კოეფიციენტი	ფილტრაციის კოეფიციენტი, მ/დღე-ღამე	შიგა ხახუნის კუთხე, °	შეჭიდულობა კგ/სმ ²	საანგარიშო წინაღობა, კგ/სმ ²
კაშხალი	1.1	0.50	20.19	2.66	0.50	12.5	29.0	-	2.00
	1.2	0.50	24.89	2.64	0.58	16.5	31.5	-	1.59
	1.3	0.50	25.45	2.64	0.60	18.1	34.0	-	1.50
	1.4	0.50	23.14	2.65	0.57	15.8	32.0	-	1.64
	1.5	0.50	23.41	2.66	0.55	14.3	33.5	-	1.75
	1.6	0.50	22.09	2.67	0.52	13.7	30.0	-	1.89
მარცხენა ნაპირი	2.1	0.20	23.29	2.71	0.64	0.33	24.0	0.132	2.37
	2.2	0.20	26.15	2.69	0.69	0.36	22.5	0.120	2.20
	2.3	0.20	27.05	2.68	0.70	0.38	22.5	0.116	2.19
	2.4	0.20	25.12	2.71	0.65	0.32	24.0	0.130	2.38
	2.5	0.20	24.09	2.70	0.66	0.34	23.0	0.126	2.36
ქვედა ბიეფი	3.1	0.15	23.54	2.65	0.69	6.8	29.0	-	1.30
	3.2	0.15	22.57	2.66	0.64	7.0	32.0	-	1.58
	3.3	0.15	24.15	2.64	0.70	6.1	33.0	-	1.40
	3.4	0.15	24.01	2.66	0.68	7.2	34.0	-	1.75
	3.5	0.15	23.89	2.67	0.71	6.8	31.0	-	1.32

კაშხლის ფუძეში შექმნილი დაძაბული მდგომარეობის გაანგარიშებები ჩატარდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემისთვის დატვირთვების ეტაპობრივი ცვლილებების გათვალისწინებით. უკანასკნელი გულისხმობს საპროექტო გადაწყვეტისათვის ფუძეში არსებული დაძაბული მდგომარეობის ცვლილებას ექსპლუატაციის დროს, ფილისა და ფუძის გარეცხვის შედეგად მომხდარი დატვირთვების გადანაწილების გათვალისწინებით.

ცაგერის კაშხალი მაღალი საპასუხისმგებლო ობიექტია და შესაბამისად უნდა აკმაყოფილებდეს მოთხოვნებს V კლასის ნაგებობების მიმართ - $K > 1.25$. არსებულ მდგომარეობაში ძვრაზე მდგრადობის მარაგების შეფასება არ გულისხმობს ხსენებულ მოთხოვნებს, მაგრამ უნდა აკმაყოფილებდეს მინიმალურს, რომელიც გარანტირებული იქნება რეაბილიტაციის პერიოდში $K \approx 1.1$.

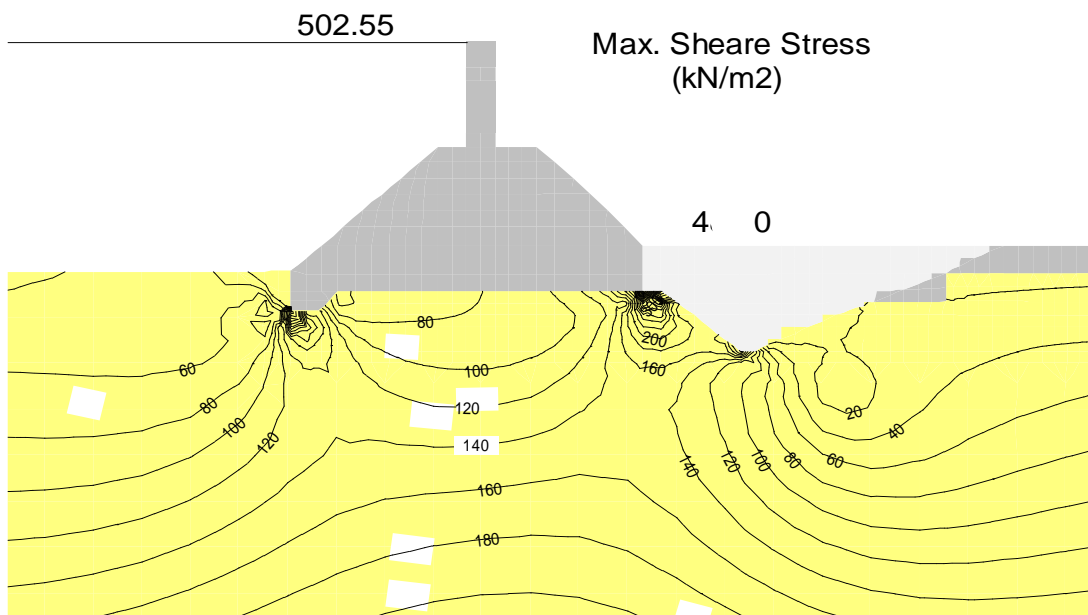
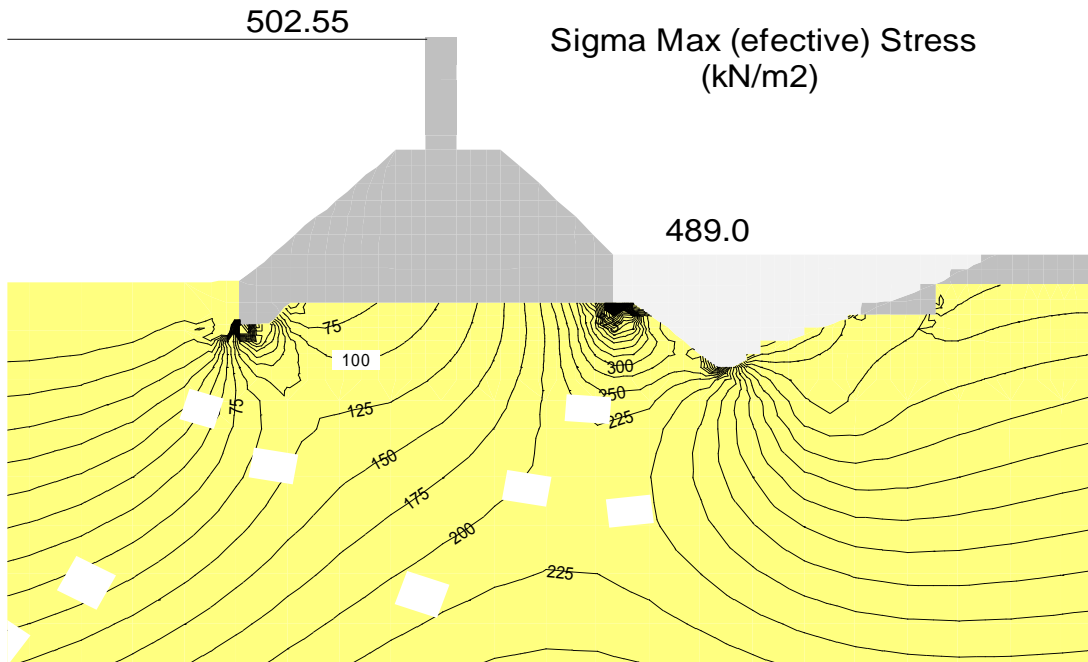
ფუძის მდგრადობაზე გაანგარიშებები ჩატარდა:

- წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე დაცურების მეთოდის მიხედვით, ბიშოპის, მორგენსტერნ-პრაისის, ორდინარის და ჯანბუს კრიტერიუმებით;
- წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე ცოცვის მეთოდის მიხედვით, ფუძის დაძაბული მდგომარეობის გათვალისწინებით (სასრული ელემენტების მეთოდის მიხედვით);
- კაშხლისა და ფუძის ერთობლივი მუშაობის გათვალისწინებით, გრუნტის ძვრაზე სიმტკიცის ლოკალური მარაგების მიხედვით.

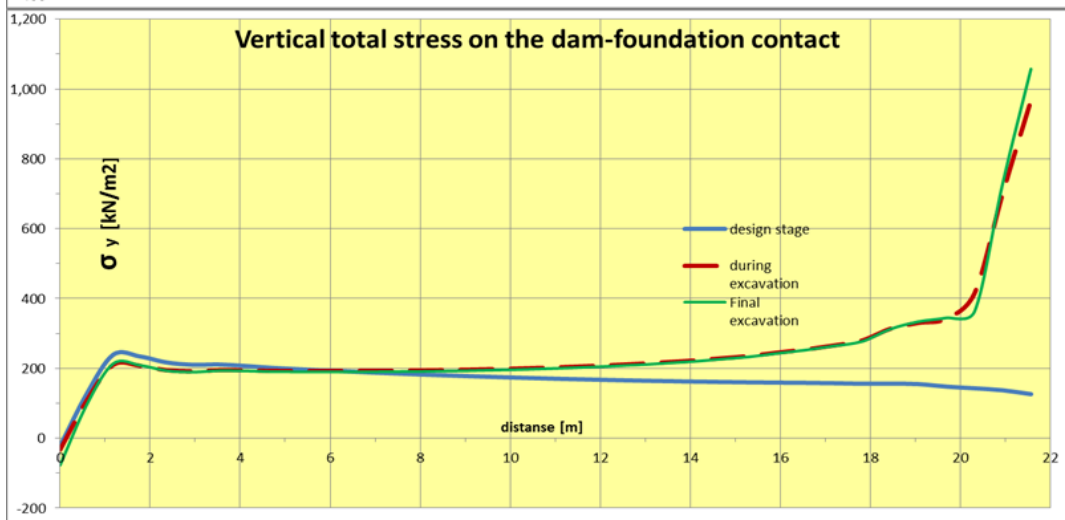
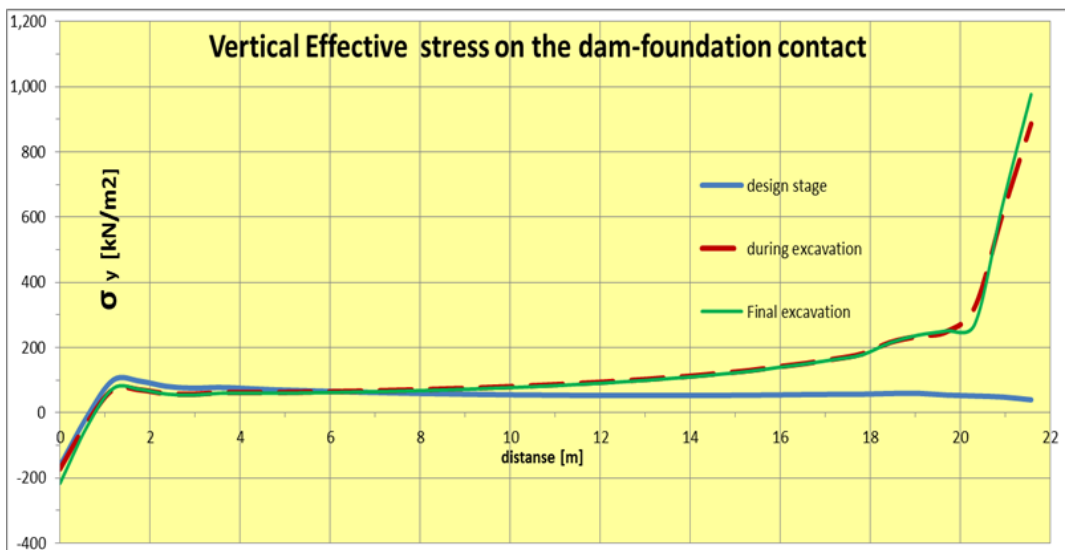
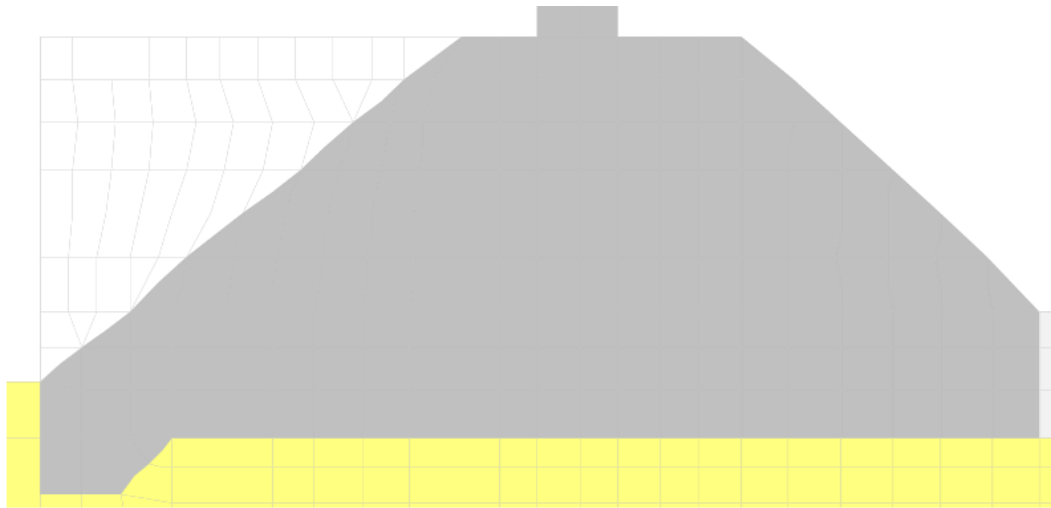
„კაშხალი-ფუძე“ სისტემისათვის ჩატარებული გაანგარიშებებით მიღებულ იქნა (ნახ. #29-31):

- მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები;
- მაქსიმალური მხები ძაბვები;

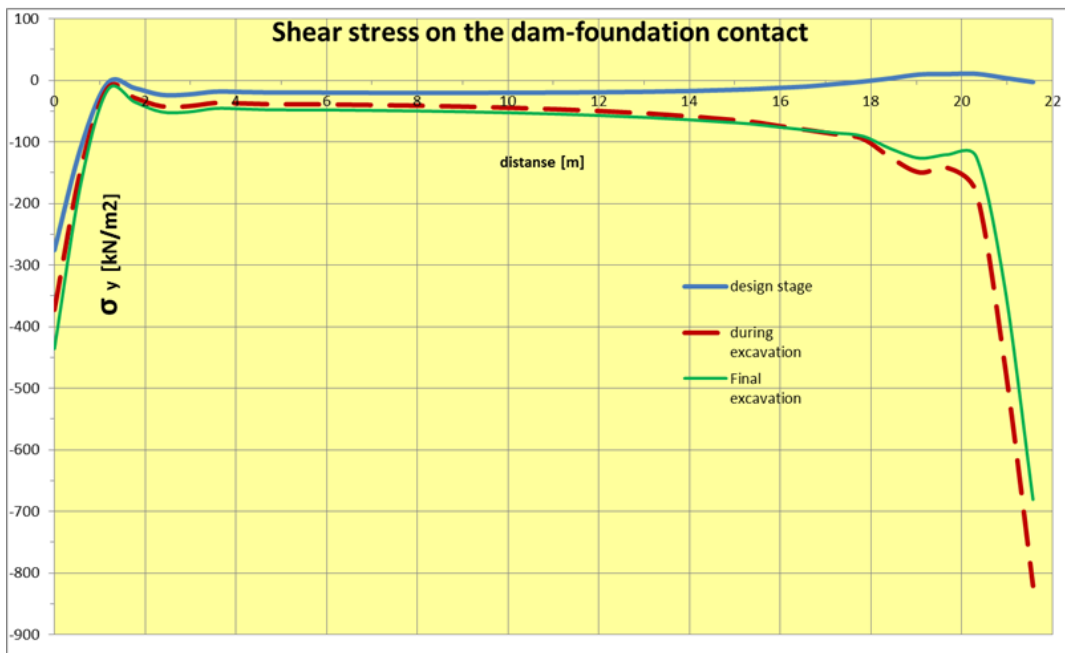
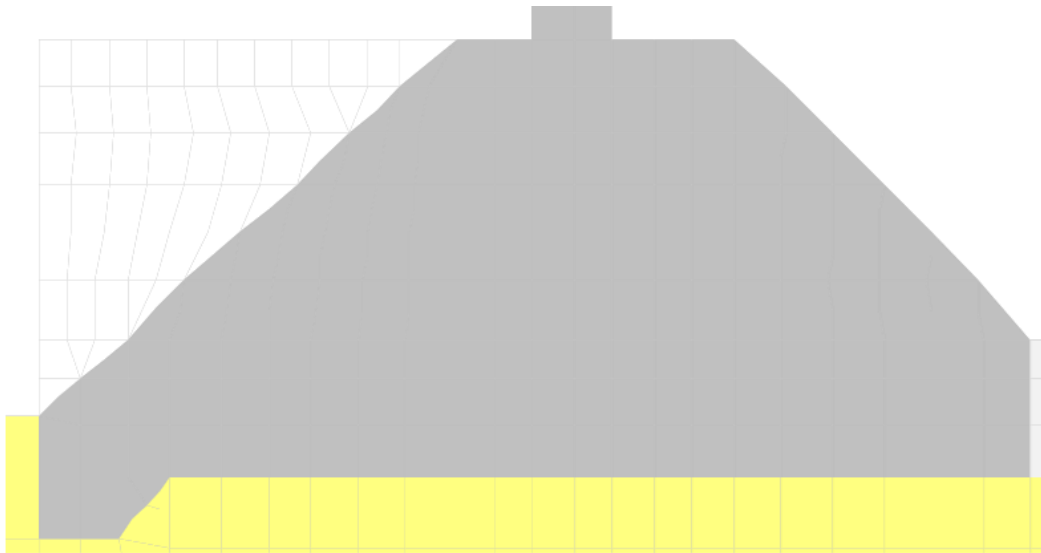
- ვერტიკალური (მათ შორის ეფექტური) ძაბვების ეპიურები კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო კვეთისთვის.



ნახაზი #29 - მაქსიმალური მთავარი ძაბვები კაშხლის ფუძეში



ნახაზი #30 - ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილება კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე

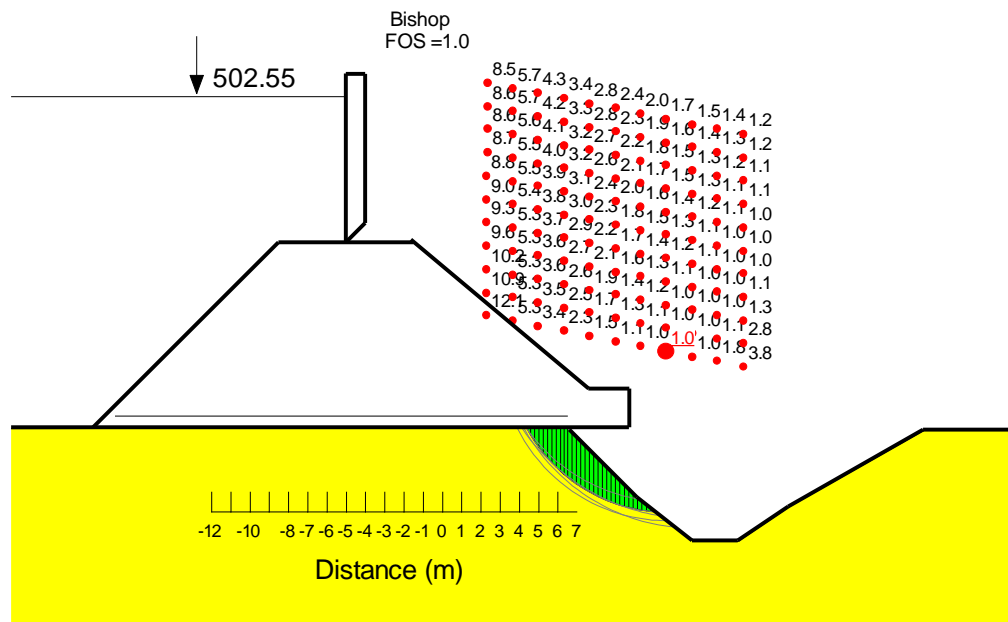
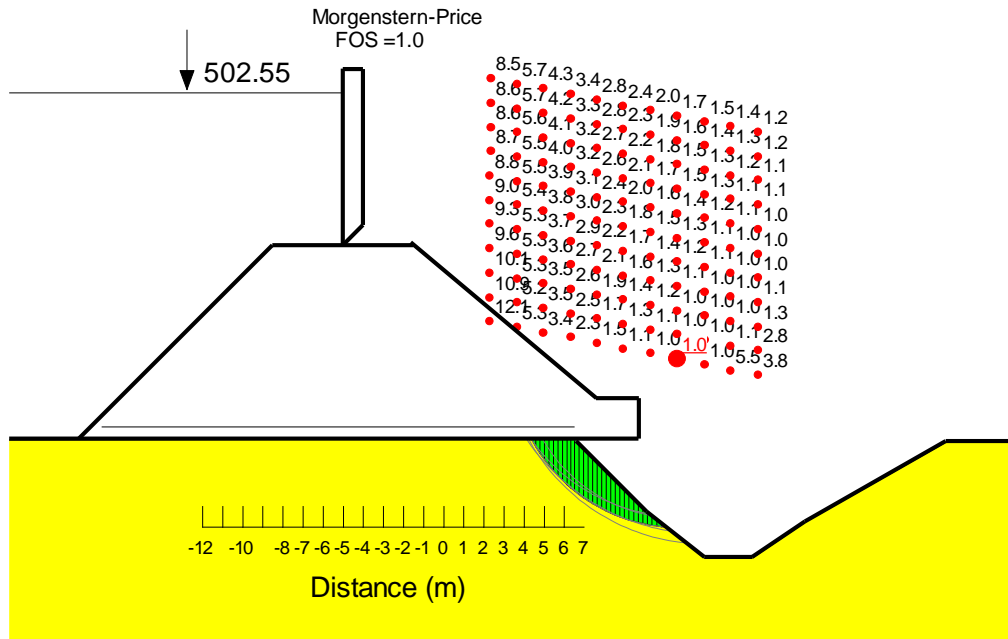


ნახაზი #31 - მხები ძაბვების განაწილება კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე

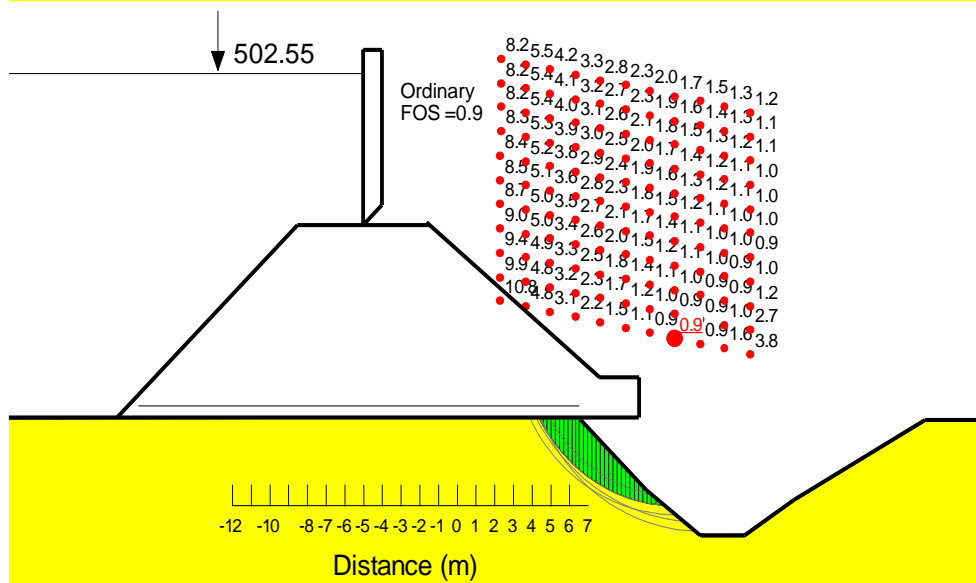
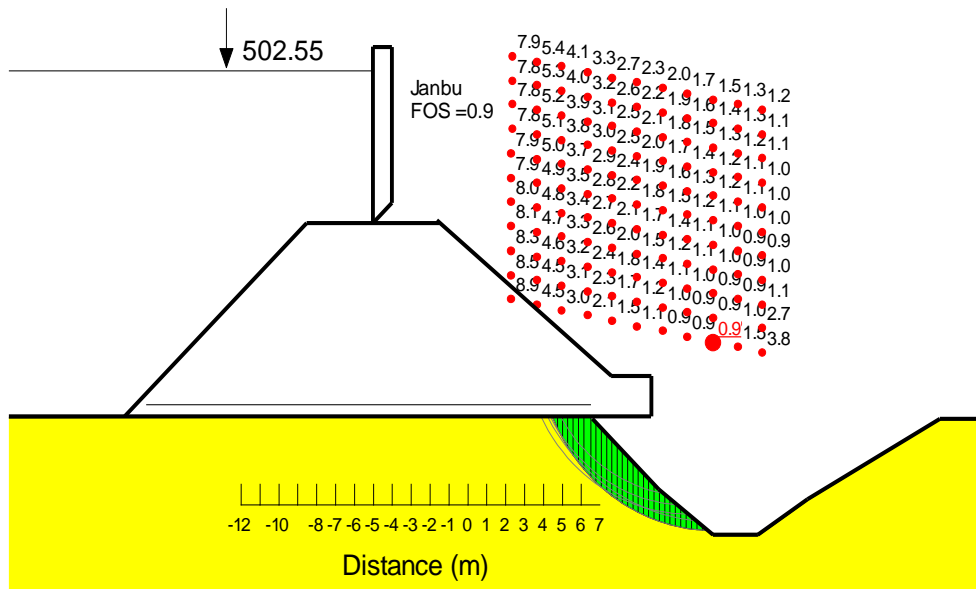
წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე ცოცვის მეთოდის მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ არსებული გრუნტის მდგრადობის მარაგები, სხვადასხვა კრიტერიუმების მიხედვით, იმყოფება ზღვრულ მდგომარეობაში (ნახ. #32 და #33). კერძოდ:

- მორგენსტერნ-პრაისის და ბიშოპის მიხედვით - $K = 1.0$;
- ორდინარისა და ჯანზუს მიხედვით - $K = 0.9$.

ფუძის დამაბული მდგომარეობის გათვალისწინებით (სასრული ელემენტების მეთოდის მიხედვით) მიღებულ იქნა ანალოგიური შედეგები $K \approx 1.0$ (ნახ. #34).



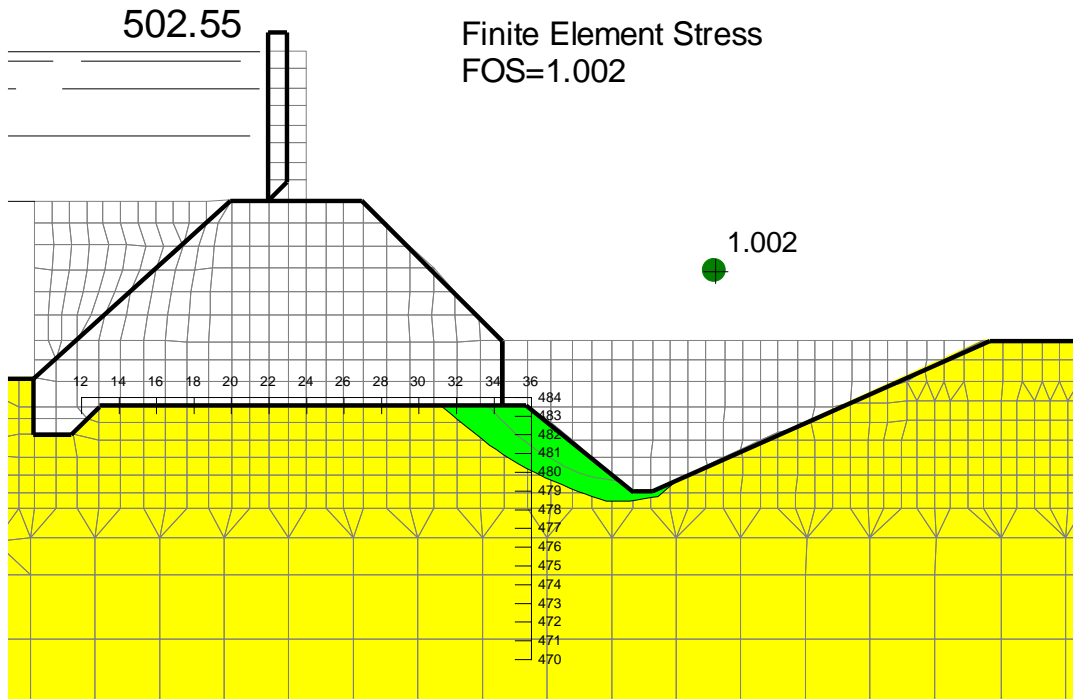
ნახაზი #32 - მდგრადობის მარაგები მორგენსტერნ-პრასისისა და ბიშოპის საანგარიშო სქემის მიხედვით



ნახაზი #33 - მდგრადობის მარაგები ორდინარისა და ჯანბუს საანგარიშო სქემის მიხედვით

ამდენად, ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები იდენტურია და ერთდროულად ადასტურებს, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (სიღრმეში ≈ 5 მ-მდე) მდგომარეობა, შეიძლება შეფასდეს როგორც არამდგრადი.

ხსენებული მასივის მდგრადობის დაკარგვის შემთხვევაში, პროცესი გადაინაცვლებდა ფუძის სიღრმეში და გამოიწვევდა კაშხლის მთლიან ავარიას.



ნახაზი #34 - მდგრადობის მარაგები კაშხლისა და ფუძის ერთობლივი მუშაობისას

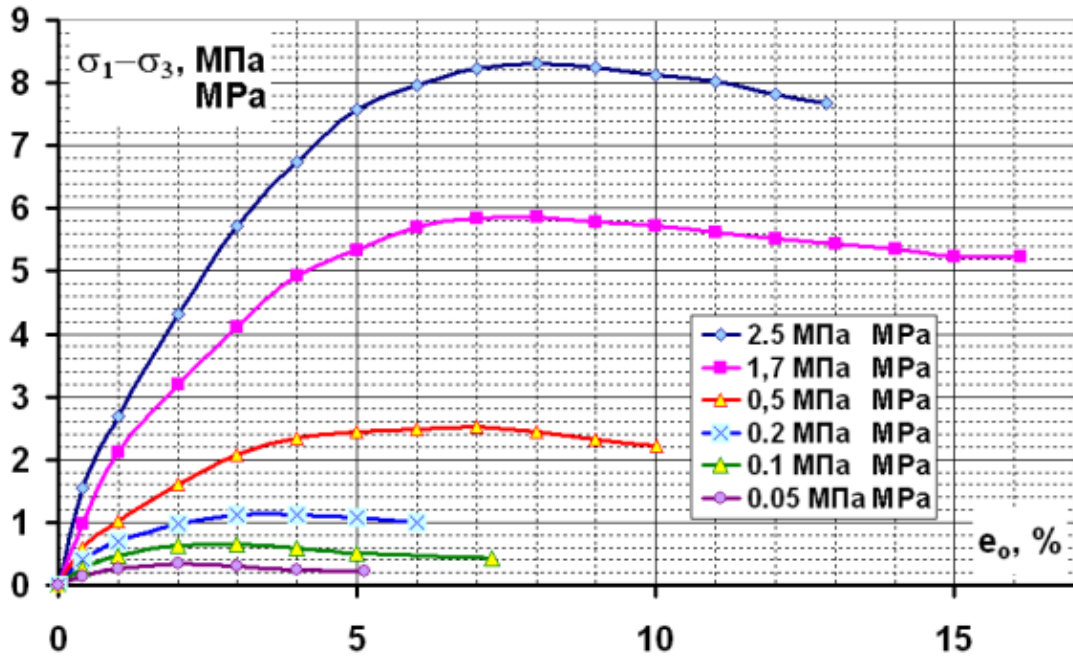
საკითხს ამძიმებდა ის ფაქტი, რომ ფუძეში ორმოს გაჩენის შედეგად, კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, გრუნტმა დაკარგა გამბრჯენი, რასაც საზოგადოდ თან ახლავს გრუნტის განმკვრივება (განივი მიმართულებით გრუნტი განიცდის დეფორმირებას). ამასთან დაკავშირებით უცნობი იყო ამ ზონაში გრუნტის მდგომარეობა.

2.7.2 კაშხალი-ფუძე სისტემის მდგრადობის ანალიზი არაწრფივი გაანგარიშების მიხედვით

ქვემოთ მოცემულია ფუძის გაანგარიშება გრუნტის არაწრფივი დეფორმადობის გათვალისწინებით.

კაშხლის ფუძის მსხვილფრაქციული გრუნტებისთვის " $\sigma - \varepsilon$ " მრუდის აპროქსიმაციისთვის გამოყენებულ იქნა ანალიტიკური დამოკიდებულება, რომელიც ემყარება დატვირთვის დევიატორული უბნის

ანალიზს, მარსალის ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების მიხედვით (ნახ. #35).



ნახაზი #35 - კაჭარ-ხრემოვანი გრუნტის ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები ძაბვების დევიატორულ უბანზე (მარსალის კვლევები)

„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა 2 ვარიანტისათვის. განხილულ იქნა შემთხვევები:

- 1) ფილის მყისიერი ნგრევის სქემა;
- 2) ფილის თანდათანობითი ნგრევის სქემა.

გრუნტის მასალის არაწრფივი გაანგარიშების შედეგების მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, განსაკუთრებით მაღალი მკუმშავი ძაბვების ზონაში, მოხდა ძაბვების მნიშვნელოვანი გადანაწილება, რაც შესაბამისად აისახა ფუძის საკონტაქტო c-c კვეთზე. კერძოდ:

- σ_y ვერტიკალური მკუმშავი ძაბვების მაღალი კონცენტრაციის ზონაში, არაწრფივი გაანგარიშების შედეგებით მიღებული

ძაბვები მცირდება წრფივი ანგარიშების შედეგებთან შედარებით, ხოლო კაშხლის ცენტრალური კვეთისკენ აღნიშნული ძაბვები უფრო იზრდება. ასეთი კანონზომიერება შენარჩუნებულია ფილის როგორც მყისიერი, ასევე თანდათანობითი ნგრევის სქემების დროს (ნახ. #36);

- ფილის თანდათანობითი ნგრევის დროს, σ_y ძაბვების მნიშვნელობა, მყისიერი ნგრევის სქემასთან შედარებით, იზრდება გრუნტის მასალის არაწრფივობის გათვალისწინებისას;
- კაშხლის მდგრადობის შეფასება, სიღრმული ძვრის სქემის მიხედვით, ჩატარებული იქნა გრუნტის ძვრაზე სიმტკიცის პირობის მიხედვით:

$$\tau < \tau_{cr}$$

რასაც შეესაბამება პირობა $\theta_{max} < \varphi$.

სადაც,

- τ, τ_{cr} - მხები ძაბვების საანგარიშო და ზღვრული მნიშვნელობები დაცურების საშიშ ზედაპირზე;
- θ_{max} - დამაბული მდგომარეობის შესაბამისი კუთხე;
- φ - გრუნტის შიდა ხახუნის კუთხე.

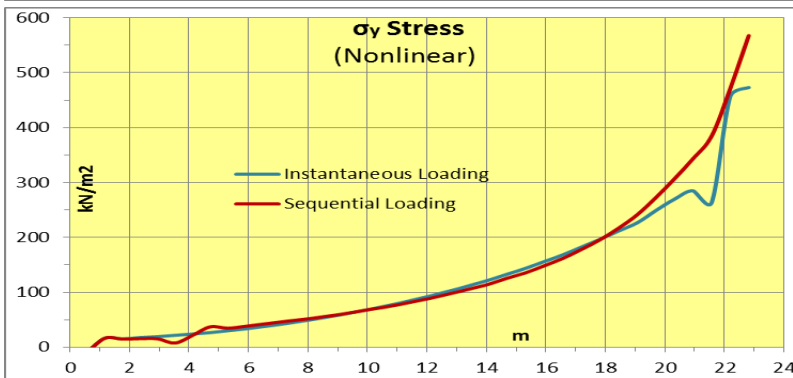
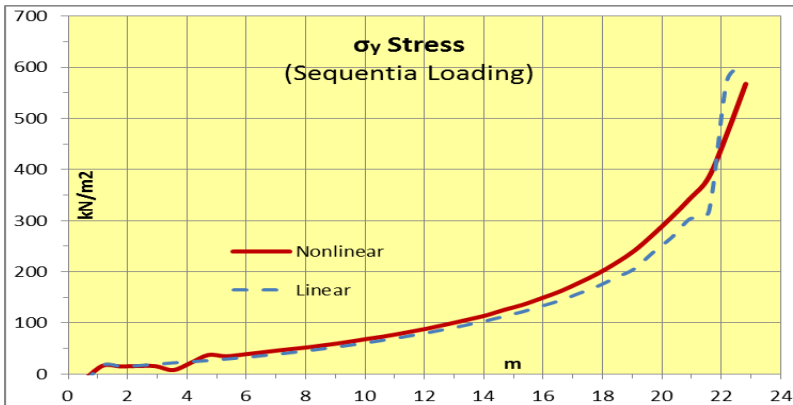
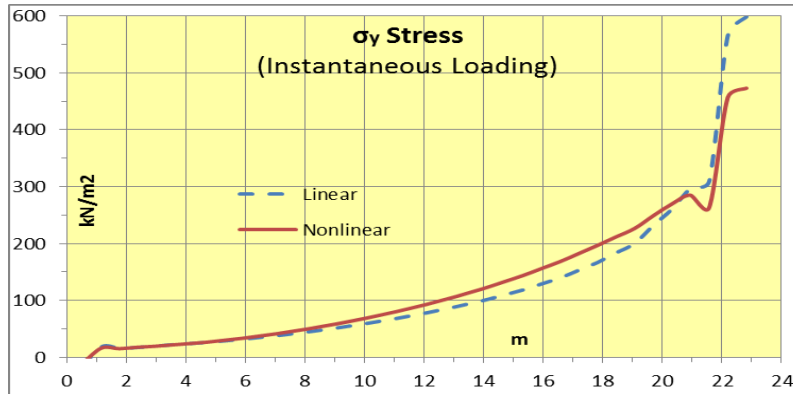
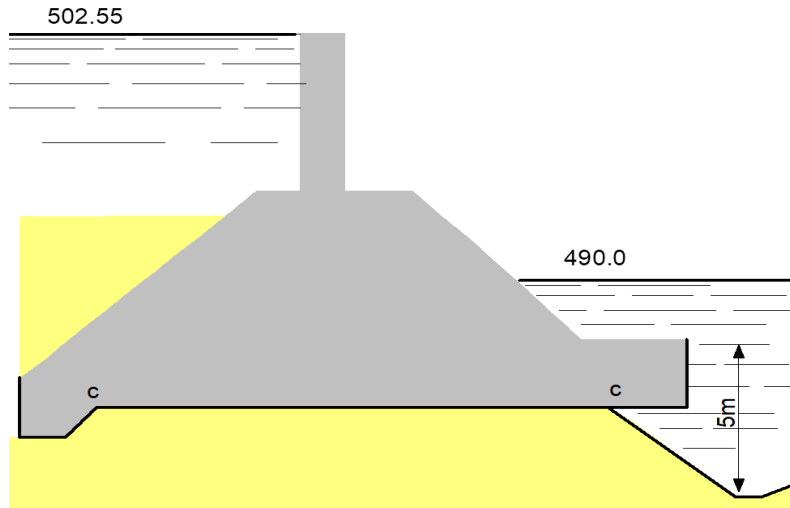
ზღვრული მდგომარეობა მთავარი ძაბვების გამოყენებით გამოისახება პირობით:

$$\sin \theta_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma_c}$$

აქ, $\sigma_c = c / \operatorname{tg} \varphi$.

საბოლოოდ, ძვრაზე სიმტკიცის პირობა წარმოდგინდება ფორმულით:

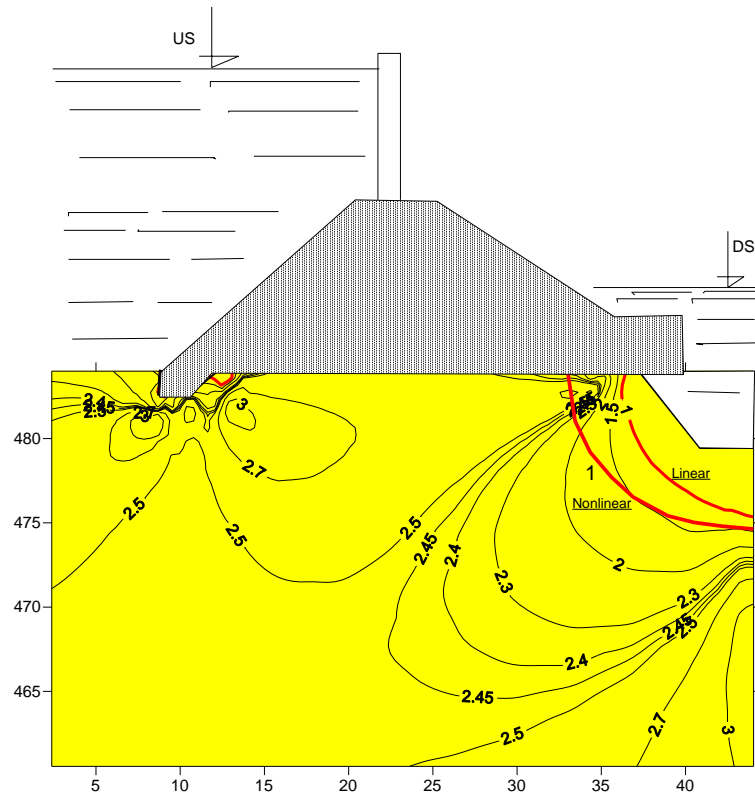
$$K = \frac{\varphi}{\theta_{max}} > 1$$



ნახაზი #36 - σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო c-c კვეთზე, არწრფივობის გათვალისწინებით:

- ა) ფილის მყისიერი ნგრევისას; ბ) ფილის თანდათანობითი ნგრევის დროს;
- გ) ფილის მყისიერი და თანდათანობითი ნგრევისას.

კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (გარეცხვის ორმოსთან) წრფივი გაანგარიშების რიცხვითი შედეგების მიხედვით მიღებული არსებული ზღვრული მდგომარეობის ზედაპირი ($K \approx 1$), წრფივი გაანგარიშების შედეგებთან შედარებით, გადაადგილდა კაშხლის ფუძის სიღრმისაკენ, რაც ლოგიკურია (ნახ. #37).



ნახაზი #37 - მარაგის კოეფიციენტების (K) განაწილება კაშხლის ფუძეში

კვლევის შედეგად მიღებული პარამეტრები გამოყენებულ იქნა ქვედა ბიეფში სარეკონსტრუქციო სამუშაოების უსაფრთხოდ წარმოებისათვის, კერძოდ, წყალსაცავში 502.55 მ.ზ.დ.-ის დროს კაშხალი ვერ აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას ($K \approx 1$), რასაც მნიშვნელოვნად ამძიმებდა კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (ორმოს ზონაში) ფილტრაციული ნაკადის გრადიენტების მაღალი მნიშვნელობა, რის გამოც ფილტრაციული სიმტკიცის მარაგები პრაქტიკულად ამოწურული იყო.

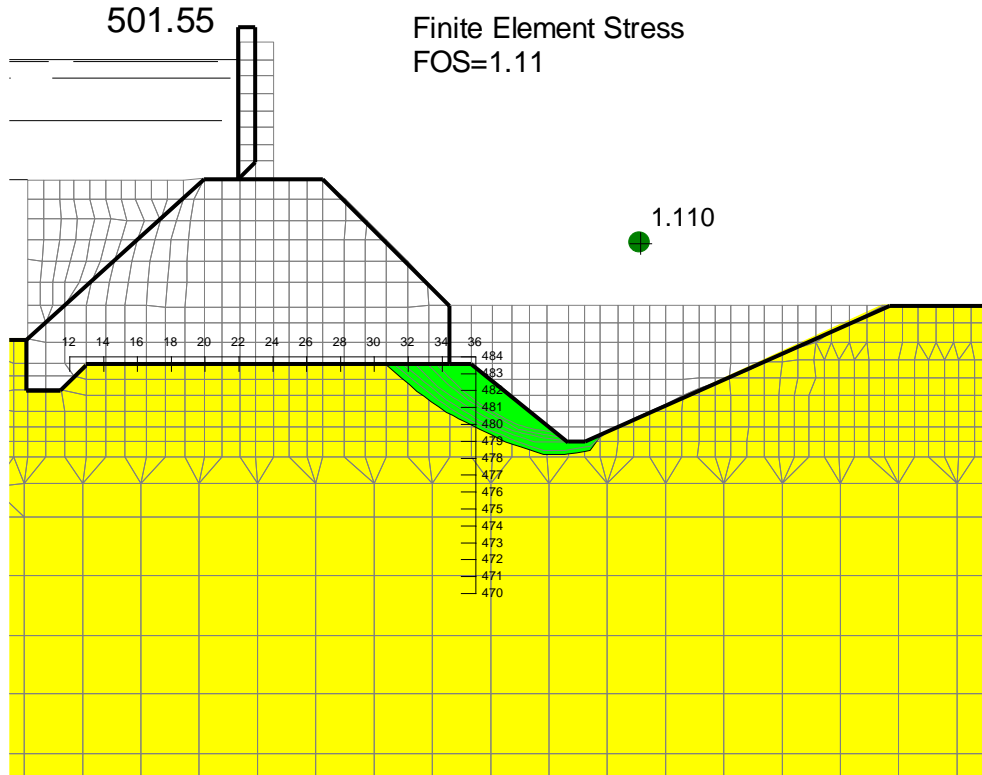
2.7.3 კაშხლის მდგრადობის ანალიზი ზემო ბიეფში დონის დაწვევისას

კაშხლის არსებული მდგომარეობა საშიშროებას ქმნიდა სარეაბილიტაციო სამუშაოების ჩატარებისთვის. მდგრადობასთან დაკავშირებული ყველა გაანგარიშება (502.55 მ.ზ.დ.-ის დროს) ჩატარდა ზემო ბიეფში 501.55 მ.ზ.დ. ნიშნულის არსებობისას, რომლის შედეგად მიღებულ იქნა, რომ ზემო ბიეფში წყლის დონის 1 მ-ით დაწვევისას, კაშხალზე მოქმედი მძვრელი ძალა მცირდება 10%-მდე, შესაბამისად განხილულ იქნა შემთხვევა, როცა ზემო ბიეფში წყლის დონე დაიწევდა მოცემული ერთეულით (501.55 მ.ზ.დ.). აღნიშნული ქმედება საშუალებას იძლეოდა მძვრელი ძალა კაშხალზე შემცირებულიყო 200 კნ-ით, რომლის დროს კაშხლის მდგრადობის მარაგები იზრდება $K = 1.1$ -მდე, რაც რეაბილიტაციის ხანმოკლე პერიოდისთვის (1 თვემდე) მისაღებად ჩაითვალა (ნახ. #38). ამდენად, აღნიშნული ქმედება რეაბილიტაციის დროს უსაფრთხოების აუცილებელ პირობას წარმოადგენდა.

გამომდინარე იქიდან, რომ ერთის მხრივ ზემო ბიეფში წყლის დონის 1 მ-ით დაწვევა ზრდიდა მდგრადობის მარაგებს, მეორე მხრივ მცირდებოდა ლაჯანურჰესის წყალსაცავში გადასროლილი მდ. ცხენისწყლის ხარჯი, შესაბამისად საჭირო იყო განსაზღვრულიყო ზემო ბიეფში წყლის დონის დაწვევისთვის აუცილებლობის პერიოდი.

ამ საკითხთან დაკავშირებით ჩატარდა გაანგარიშებები, რომელიც მიზნად ისახავდა შეფასებულიყო ენერჯის ჩამქრობ კაში რკინა-ბეტონის ზღუდარის მოწყობისა და მის წინ კაშხლამდე არსებული სივრცის ბეტონით შევსების გავლენა კაშხლის მდგრადობაზე - ზემო ბიეფში წყლის დონის 1.0 მ-ით (502.55 მ.ზ.დ. ნიშნულამდე) გაზრდისას.

გაანგარიშებებით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლიდან ზღუდარზე განვითარებული მძვრელი ძალის ზემოქმედებით მის ფუძეში (საკონტაქტო სიბრტყეში) შენარჩუნებული იქნება ვერტიკალური მკუმშავი ძაბვები σ_y და შესაბამისად, უზრუნველყოფილი იქნება მდგრადობის საკითხი (ნახ. #39).

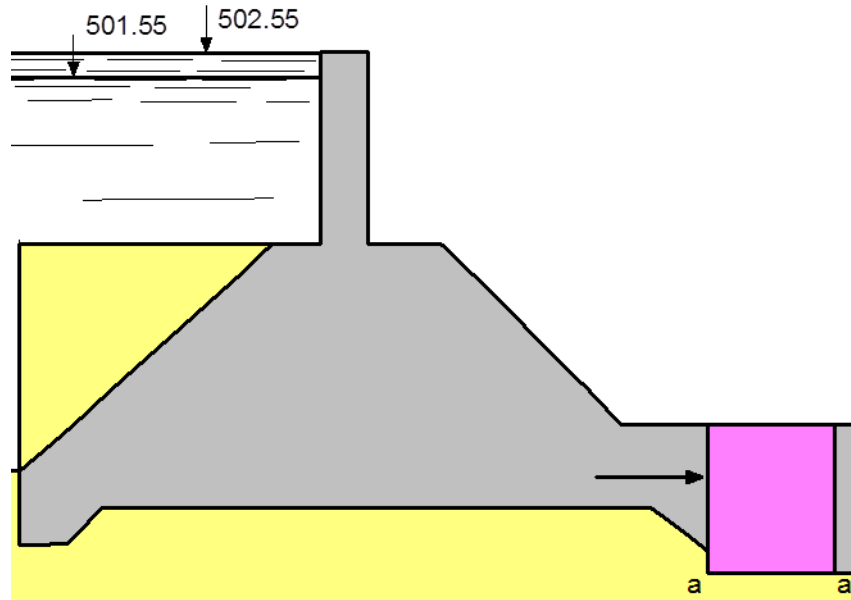


ნახაზი #38 - მდგრადობის მარაგები ძვრაზე სიმტკიცის პირობის მიხედვით წყალსაცავში წყლის 501.55 მ.ზ.დ. არსებობისას

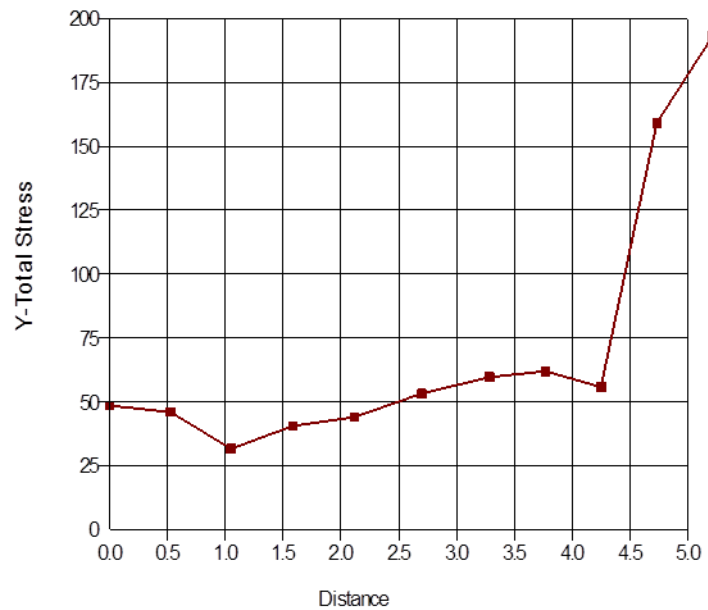
კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ არსებული თავისუფალი ფერდი, რომელიც დაუტვირთავი იყო, ზღუდარის მოწყობის შემდეგ ბეტონით ივსება და შესაბამისად, კარგავს თავისუფლად დეფორმირების უნარს. ხსენებულ ფერდზე ჩნდება მკუმშავი ძაბვები.

ამდენად, ზღუდარის მოწყობა და მის წინ არსებული თავისუფალი სივრცის ბეტონით შევსებისას:

- იხსნება კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ არსებული ფერდის მდგრადობის დაკარგვის საკითხი;
- რკინა-ბეტონის ზღუდარი დამოუკიდებლად აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას.



Y-Total Stress vs. a - a section



ნახაზი #39 - საკონტაქტო ძაბვები ზღუდარსა და ფუძის საკონტაქტო კვეთში ზემო ბიეფში წყლის დონის 1 მ-ით აწევსას (502.55 მ.ზ.დ.-მდე)

განგარიშების შედეგით დადგინდა, რომ სარეაბილიტაციო გადაწყვეტის მიხედვით, კაშხლის ფუძეში არსებული 5 მ-იანი ორმოს მთლიანად შევსება ბეტონის ფენით, სრულად აკმაყოფილებდა ნაგებობის უსაფრთხოების მოთხოვნებს.

სარეაბილიტაციო სამუშაოების განხორციელებამ სათავე კვანძის მდგრადობის პირობები გააუმჯობესა, რამაც შესაძლებელი გახადა მისი უსაფრთხო ექსპლუატაცია როგორც წყალსაშვების ფუნქციონირების, ასევე გამრეცხი გალერეების ამუშავებით. აღნიშნულის შედეგად წყალმიმღების ზღურბლის წინ დაგროვებული ფსკერული ნატანის მოცილება კვლავ ხორციელდება ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ექსპლუატაციის ინსტრუქციის შესაბამისად.

დასკვნა

- ❖ დამუშავდა ენერგიის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილის სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდოლოგია, ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებისა და ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული ჰიდრაულიკური რეჟიმის თანმხლები ჰიდროდინამიკური დატვირთვის (ენერგიის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გათვალისწინებით.
- ❖ მეთოდოლოგიის საფუძველზე შესაძლებელია:
 - დიფერენცირებულად იქნას შეფასებული ექსპლუატაციის პერიოდში ფილაზე განვითარებული დატვირთვების (ენერგიის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გავლენა წყალსაცემი ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობაზე;
 - გაანგარიშებული იქნას ენერგიის ჩამქრობი ჭის ყველა საპროექტო პარამეტრი (ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები).
- ❖ სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე დამუშავდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდოლოგია, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმაციის ($\sigma = f(\varepsilon)$), ასევე ფილტრაციული დატვირთვების გათვალისწინებით. აღნიშნული საშუალებას იძლევა შეფასდეს ხსენებული სისტემის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და კაშხლის მდგრადობის მარაგები ფუძის გრუნტის ზიდვის უნარიანობის გათვალისწინებით.
- ❖ ცაგერის საშუალოდაწნევიანი ჰიდროკვანძის ბიეფების შეუღლების ჰიდრაულიკური ანალიზის შედეგად მიღებული იქნა, რომ:
 - დაბალი ხარჯების გატარებისას, ($q < 2.0 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრაულიკურ ნახტომს;
 - უფრო მაღალი ხარჯების გატარებისას ($q > 2.0 \text{ მ}^2/\text{წმ}$) კი - ვითარდება სხვადასხვა სახის (ძლიერი, დამყარებული) განდევნილი ჰიდრაულიკური ნახტომი.

- ❖ ამდენად, ექსპლუატაციის პერიოდში ენერჯის ჩამქრობ ქაში ძირითადად მყარდებოდა განდევნილი ნახტომი. ასეთი ჰიდრავლიკური რეჟიმის პირობებში კი, წყალსაცემ ფილაზე ვითარდებოდა მაღალი სიდიდის ჰიდროდინამიკური დატვირთვები, რომელიც მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევდა 3 ფარის გახსნისას. წყალსაცემ ფილაზე ჰიდროდინამიკური დატვირთვების პერიოდული მოქმედება (ხანგრძლივი დროის განმავლობაში), გახდა მისი დაშლის ძირითადი მიზეზი.
- ❖ საჭიროა აღინიშნოს, რომ ცაგერის ჰიდროკვანძის წყალსაცემი ფილის შემთხვევაში, პულსაციის გავლენა, ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ჯამურ მნიშვნელობაში, აღმოჩნდა საკმაოდ მნიშვნელოვანი - მიაღწია 35%-ს. საშუალო და მაღალდაწნევიანი ჰიდროკვანძების შემთხვევაში, ბიეფებს შორის დაწნევის ზრდის შედეგად, პულსაციის როლი მოსალოდნელია რამდენადმე კიდევ გაიზარდოს, რაც ამ ფაქტორის მნიშვნელობაზე მიუთითებს.
- ❖ სამწუხაროდ, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების პროექტირების პრაქტიკაში, ძირითადად იფარგლებიან ენერჯის ჩამქრობი ქის გეომეტრიული ზომების დადგენით, ხოლო წყალსაცემი ფილის საპროექტო ზომები ინიშნება ძირითადად ანალოგების მიხედვით, სადაც ჰიდროდინამიკური დატვირთვები არაა გათვალისწინებული. ჩატარებულმა გაანგარიშებებმა ცხადყვეს ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გათვალისწინების აუცილებლობა.
- ❖ „კაშხლი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშების დროს მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა ფილის თანდათანობითი ნგრევის სქემის გათვალისწინება, რომლის დროს, მყისიერი ნგრევის სქემასთან შედარებით, ფუძეში მკუმშავი ძაბვები 25%-მდე გაიზარდა. აღნიშნული კანონზომიერება შენარჩუნებულია გრუნტის როგორც წრფივი, ისე არაწრფივი დეფორმადობის გათვალისწინების დროს.

- ❖ „კაშხლი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი გაანგარიშებით, დაზღვევით, დეფორმაციის ჰიპერბოლური მრუდის გამოყენებით, მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის ფუძეში, განსაკუთრებით უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, ადგილი აქვს დაზღვევის მნიშვნელოვან გადანაწილებას. კერძოდ, მკუმშავი დაზღვევის მაღალი კონცენტრაციის ზონაში დაზღვევა მცირდება, ხოლო კაშხლის ცენტრალური კვეთის მიმართულებით დაზღვევა უფრო იზრდება.
- ❖ „კაშხლი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი მუშაობა აისახება ასევე ფუძის მდგრადობაზე. კერძოდ, დაზღვევის გადანაწილების შესაბამისად, ადგილი აქვს ძვრის პოტენციური ზედაპირის გადაადგილებას კაშხლის ცენტრალური კვეთის მიმართულებით. ამასთან დაკავშირებით, მთლიანობაში იზრდება არამდგრადი მასივის არე, რაც კიდევ უფრო აუარესებს კაშხლის მდგრადობას.
- ❖ არაწრფივი გაანგარიშების შედეგები აისახა ასევე მორგენსტერნ-პრაისის, ბიშოპის, ორდინარისა და ჯანბუს მდგრადობის მარაგებზე.
- ❖ ჩატარებული კვლევები მიუთითებს არაწრფივობის მაღალ მნიშვნელობაზე - განსაკუთრებით არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში. სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი გაანგარიშებები საფუძვლად დაედო ცაგერის ჰიდროკვანძის სარეაბილიტაციო პროექტს.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Khorsavi S., Salajegheh J. and Heydari M., Simulating of Each Concrete Gravity Dam with Any Geometric Shape including Dam-Water-Foundation Rock Interaction Using APDL. *World Appl. Sci. J.*, 17(3), 2012, pp. 354-363;
2. https://www.researchgate.net/publication/310784957_DEFORMATION_PARAMETERS_OF_MACROFRAGMENT_SOILS_IN_SOIL_DAMS, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
3. Li Y., Niu Z., Li Q., Wang L., Experimental study on underflow stilling pool with contraction pier of large unit width discharge and low Froude number, *Water Resour. And Hydropwer Eng.*, (5), 2018, pp. 77-83;
4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.659855/full>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
5. Soroush A., Jannatiaghdam R. Behavior of Rockfill Materials in Triaxial Compression Testing. *Int. J. of Civ. Eng.*, 10(2) 2012, pp. 153-183;
6. Araujo F., Ota J., Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda, *Revista Brasileira de Recursos Hidricos.*, 21(2), 2016, pp. 360-376;
7. https://www.researchgate.net/publication/356117910_Numerical_simulation_of_hydraulic_performance_with_free_overfall_flow, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
8. Qing W. and Xibin H., Three-dimensional numerical simulation of flow in bend of steep slope based on Flow-3D, *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 27(05), 2016, pp. 145-149;
9. Tan G.W., Han C.H., Han K. and Yu K.W., Experimental Study on the Hydraulic Characteristics of the Two-Stage Energy Dissipation in Low Froude Number Flow, *Adv. Water Sci.*, 31(1), 2020 pp. 71-81;
10. <https://practical.engineering/blog/2021/5/17/what-really-happened-at-the-oroville-dam-spillway>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
11. Hariri-Ardebili M.A., Kolbadi S.M.S., Kianoush M., FEM-Based parametric analysis of a typical gravity dam considering input excitation mechanism, *Journal of Soil Dynamic Earthquake*; (84), 2016, pp. 22-43;
12. Burman A., Nayak P., Agrawal P., Maity D., Coupled gravity dam-foundation analysis using a simplified direct method of soil-structure interaction, *J. of Soil Dyn. Earthq. Eng.*, (34), 2012 pp. 62-68;
13. Hariri-Ardebili M.A., Impact of foundation nonlinearity on the crack propagation of high concrete dams, *J. of Soil Mech. Found. Eng.*, (51), 2014, pp. 72-82;
14. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2589/htm>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
15. Yang Y., Liu H. Wen M. and Cao C., Study on relative Froude number over steps of stepped spillways, *Journal of Hydroelectric Engineering*, 34(6), 2015, pp. 112-116;

16. Bayon-Barrachina A., Amparo Lopez-Jimenez P., Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM, *Journal of Hydroinformatics*, 17(4), 2015, pp. 662-678;
17. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/10/1343>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
18. Al-Juboori M. and Datta B., Improved optimal design of concrete gravity dams founded on anisotropic soils utilizing simulation-optimization model and hybrid genetic algorithm, *ISH J. Hyd. Eng.*, (1574614), 2019, pp. 1-18;
19. Al-Juboori M. and Datta B., Performance evaluation of a genetic algorithm-based linked simulation-optimization model for optimal hydraulic seepage-related design of concrete gravity dams, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 24(2), 2018, pp. 1-25;
20. Phung Q. T., Maes N., Jacques D., Perko J., De Schutter G., and Ye G., Modelling the evolution of microstructure and transport properties of cement pastes under conditions of accelerated leaching, *Construction and Building Materials*, vol. 115(2), 2016, pp. 179-192;
21. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/1/60/htm>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
22. Wang, H.; Felder, S.; Chanson, H. An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. *Exp. Fluids*, (55), 2014, pp. 1–18;
23. Phung Q. T., Maes N., Jacques D., De Schutter G., and Ye G., Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached cement pastes accounting for mix composition, *C&C Res*, 79(15), 2016, pp. 217-234;
24. Lu Z., Su J., and Wang Z., Post-evaluation of concrete quality of old dam in Fengman hydropower station, *Water Power*, 46(3), 2020, pp. 99–103;
25. Wang X., Zhang J., Fu Z., Xu H., Xu T., Zhou C., Influences of flow rate and baffle spacing on hydraulic characteristics of a novel baffle dropshaft, *Water Science and Engineering*, 13(3), 2020, pp. 233-242;
26. Rossi R., Larese A., Dadvand P., An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, (71), 2013, pp. 687–716;
27. Wang, H.; Murzyn, F.; Chanson, H. Interaction between free-surface, two-phase flow and total pressure in hydraulic jump, *Exp. Therm. Fluid Sci.* (64), 2015, pp. 30–41;
28. Nóbrega, J.; Schulz, H.; Marques, M. Relation between free surface profiles and pressure profiles with respective fluctuations in hydraulic jumps. *In Proceedings of the 4th IAHR Europe Cong.*, (4), 2016, pp. 629–636;
29. Hassanpour N., Hosseinzadeh D.A., Farsadizadeh D., Gualtieri C., An Experimental Study of Hydraulic Jump in a Gradually Expanding Rectangular Stilling Basin with Roughened Bed, *Wat.*, 9(12), 2017, pp. 1-23;
30. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1758>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;

31. Yangliang Lu, Jinbu Yin, Zhou Yang, Kebang Wei, Zhiming Liu - Numerical Study of Fluctuating Pressure on Stilling Basin Slab with Sudden Lateral Enlargement and Bottom Drop, *Water*, 13(2), 2021, pp. 1-18;
32. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012422001321?dgcid=rss_sd_all&utm_campaign=RESR_MRKT_Researcher_inbound&utm_medium=referral&utm_source=researcher_app, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
33. Zhao E., Wu C., Wang S., Hu J. and Wang W., Seepage dissolution effect prediction on aging deformation of concrete dams by coupled chemo-mechanical model, *Const. and Build. Mat.*, 237(3), 2020, pp. 1–13;
34. Mojtahedi A., Soori N. and Mohammadian M., Energy dissipation evaluation for stepped spillway using a fuzzy inference system, *SN Applied Sciences*, (8), 2020 pp. 173–190;
35. Dejam M., Hydrodynamic dispersion due to a variety of flow velocity profiles in a porous-walled microfluidic channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (136), 2019, pp. 87–98;
36. Zhang J., Zhang Q., Wang T., Li S., Diao Y., Cheng M., Baruch J., Experimental Study on the Effect of an Expanding conjunction Between a Spilling Basin and the Downstream Channel on the height After Jump, *Arab. J. Sci. Eng.*, (42), 2017, pp. 4069–4078;
37. Liu D., Fei W., Wang X., Chen H., Qi L., Establishment and application of three-dimensional realistic river terrain in the numerical modelling of flow over spillways, *Water Supply*, (18), 2018, pp. 119–129;
38. Naseri, F., Sarkardeh H., Jabbari E., Effect of inlet flow condition on hydrodynamic parameters of stilling basins, *Acta Mech.*, (229), 2017, pp. 1415–1428;
39. <http://repositorio.lnec.pt:8080/xmlui/handle/123456789/1011530>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
40. Padulano R., Fecarotta O., Del Giudice G., Carravetta A., Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin, *J. Irrig. Drain. Eng.*, (143), 2017, pp. 1-9;
41. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1030/1/012116>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
42. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/lithosphere/article/2021/Special%204/2738130/613533>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
43. Lokke A., Chopra A.K., Direct finite element method for nonlinear analysis of semi-unbounded dam-water-foundation rock systems, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, (46), 2017, pp. 1267-1285;
44. Gao Y., Zhu D., Zhang F., Lei G., Stability analysis of three-dimensional slopes under water drawdown conditions, *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 2014, pp. 1355-1364;
45. Bazarov, D.R., Mavlyanova, D.A. Numerical studies of long-wave processes in the reaches of hydrosystems and reservoirs. *Magazine of Civil Engineering*, 87(3), 2019, pp. 123–135;

46. Shen X., Numerical and experimental investigation of the pressure fluctuation in a mixed-flow pump under low flow conditions, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, 234(1), 2020, pp. 46-57;
47. Zhou L., Bai L., Li W., Shi W., Wang C., PIV validation of different turbulence models used for numerical simulation of a centrifugal pump diffuser, *Eng. Comput.* (35), 2018, pp. 2-17;
48. Kalabegishvili M., Sanikidze M., Sadunishvili M., Issue of Stilling Basin slab Stability, *16th Int. Silk Road Virtual Conference*, (16), 2021, pp. 115-121;
49. Kalabegishvili M., Sanikidze M., Tsageri Concrete Dam Stability Analysis, *16th Int. Silk Road Virtual Conference*, (16), 2021, pp. 183-188;
50. სანიკიძე მ., გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობის ანალიზი ფუძეში გარეცხვის განვითარებისას, *სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“*, #3(59), 2021, გვ. 57-62;
51. სანიკიძე მ., ენერჯის ჩამქრობი ჭის ჰიდრავლიკური რეჟიმი და პულსაციური დატვირთვები ფილაზე, *სამეცნიერო-ტექნიკური რეფერირებადი ჟურნალი „ენერჯია“*, 2(102), 2022, გვ. 5-12;
52. Novakoski C.K., Hampe R.F., Conterato E., Marques M.G., Teixeira E.D., Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway, *Braz. J. Water Res.* (22), 2017, pp. 1-8;
53. Zhang S., Li X., Zhu Z., Numerical simulation of cryogenic cavitating flow by an extended transport-based cavitation model with thermal effects, *Cryogenics*, (92), 2018, 98-104;
54. Chernykh O.N., Evaluation of the conditions for conjugation of pools and measures to ensure the reliability of the operation of spillways of a high-pressure hydroelectric complex, *Env. Eng.*, (2), 2020, pp. 56-65;
55. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Evaluation of the kinematic structure of the flow behind the buried well in the downstream of the culverts of the agro-industrial complex APK, *J. Env. Eng.*, (1), 2022, pp. 48-51;
56. ბაქრაძე დ., ამყლაძე თ., ჯინჭარაძე კ., წყალქვეშა ბეტონირება და მოთხოვნილებები მის მიმართ, *სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა*, 1(54), 2020 გვ. 56-62;
57. Abraham M., Kuriakose B., Kuruvilla R., Static analysis of gravity dams considering foundation-Structure Interaction, *Applied Mechanics and Materials*, 857(1), 2017 pp. 237-242;
58. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/3702712/>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
59. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.808840/full>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022;
60. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-017-2755-0>, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 1.06.2022.

დანართები



დანართი 1 - კოფერდამის ჩადგმა კაშხლის ქვედა ბიეფში



**დანართი 2 - ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილა და 1-ლი და მე-2 წყალსაშვები
აღდგენის პროცესში და მის შემდგომ**