

1.1



საქართველოს ტექნიკური  
უნივერსიტეტი  
1922 წლიდან

ჯონი ჭანია

არასტაციონალური თერმული რეჟიმის გავლენა ენგურჭესის  
თაღოვანი კაშხლის ბზარგანვითარებაზე

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0160, საქართველო

2023 წ

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ჯონი ჭანიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **არასტაციონალური თერმული რეჟიმის გავლენა ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ბზარგანვითარებაზე და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.**

-----, ----- 2023 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

აკადემიკოსი - დავით გურგენიძე -----

პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი -----

რეცენზენტი პროფ. ი.შეყრილაძე -----

რეცენზენტი ასოც.პროფ. პ.ჭიჭაღუა -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
2023 წ

ავტორი: ჯონი ჭანია

დასახელება: არასტაციონალური თერმული რეჟიმის გავლენა  
ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ბზარგანვითარებაზე

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

სადისერტაციო ნაშრომში მოცემულია ბეტონის კაშლების მშენებლობის ტექნოლოგიის, ასევე ექსპლუატაციის პერიოდის თანმხლები თერმული რეჟიმის ანალიზი.

თერმული რეჟიმის რეგულირების საკითხები ბეტონის კაშლების მშენებლობის პერიოდში მოიცავს მშენებლობის პრაქტიკაში დანერგილ სხვადასხვა მეთოდების ანალიზს. განხილულია:

- ბეტონირებადი ბლოკის გაციება ბეტონში ჩამონტაჟებული მილის ხვეულების საშუალებით ცირკულირებადი წყლის გამოყენებით;
- ბეტონის ნარევის წინასწარ გაგრილების გამოყენება;
- ცემენტის მოხმარების შემცირება და დაბალთერმული ცემენტების გამოყენება;
- ბეტონის ზონირება კაშლის მონაკვეთის გასწვრივ;
- ბლოკების სიმაღლის შეზღუდვა და წინა ბლოკზე მომდევნო ბლოკის დაბეტონების დაყოვნების რეგულირება.

განხილულია ბეტონის გრავიტაციულ და თაღვანი კაშლების მშენებლობის ორი ძირითადი მეთოდი "სვეტოვანი" და "შრეობრივი". სვეტოვანი განიხილება გრავიტაციულ კაშლების, ხოლო სექციური - თაღვან კაშლების მშენებლობისას.

განხილულია ბრატსკის, ბუხტარმის, კრასნოიარსკის, უსტ-ილიმსკის, ტოქტოგული, კურფსაი, ტაშკუმირი, ბურეას, მიატლინსკის, ვილიუისკის, გრავიტაციული და საიანო-შუშენსკაიას თაღვანი გრავიტაციული, ჩირგეის, ენგურის და ხუდონის თაღვანი კაშლების მშენებლობის ტექნოლოგია.

თერმული რეჟიმის შესწავლასთან დაკავშირებით მოცემულია არასტაციონალური თბური რეჟიმის კვლევა ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. ამასთან დაკავშირებით წარმოდგენილია თბოგამტარობის პრობლემის გადაწყვეტის ძირითადი ალგორითმი სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით და დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის სქემა სასრული სხვაობების მეთოდის გამოყენებით.

ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ტემპერატურული ველის რიცხვითი გაანგარიშებებისათვის მოცემულია სასაზღვრო პირობების თეორიული და ნატურული გაანგარიშებების შედეგები. ამასთან დაკავშირებით მოცემულია ტემპერატურული ველის განაწილება ენგურჰესის თაღოვან კაშხლის ტანში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური და მინიმალური შეტბორვის დონეების დროს. გაანალიზებულია რიცხვითი გაანგარიშებებისა და კაშხლის გალერეებში არსებული თერმომეტრული გაზომვების შედეგები.

## RESUME

The dissertation provides an analysis of the construction technology of concrete dams, as well as the accompanying thermal regime during the operation period.

The issues of regulation of the thermal regime during the construction of concrete dams include the analysis of various methods implemented in construction practice.

Discussed:

- cooling of the concreted block by means of pipe coils embedded in concrete using circulating water;
- use of pre-cooling of the concrete mixture;
- reduction of cement consumption and use of low-temperature cements;
- Concrete zoning is along the section of the dam;
- Limiting the height of the blocks and regulating the delay of concreting of the next block over the previous block.

Two main methods of construction of concrete gravity and arch dams "columnar" and "layered" are discussed. Columnar is considered in the construction of gravity dams, and sectional - arch dams.

The construction technology of Bratsk, Bukhtarm, Krasnoyarsk, Ust-Ilimsk, Toktogul, Kurfsai, Tashkumir, Burea, Myatlinsk, Viliuisk, gravity and Sayano-Shushenskaya arch gravity, Chirgei, Enguri and Khudon arch dams is discussed.

In connection with the study of the thermal regime, the study of the non-stationary thermal regime is given within the framework of the two-dimensional problem. In this regard, the basic algorithm for solving the heat conduction problem using the finite element method and the differential equation solution scheme using the finite difference method are presented.

The results of theoretical and natural calculations of boundary conditions are given for the numerical calculations of the temperature field of the Engurhesi arch dam. In this regard, the distribution of the temperature field in the body of the Engurhesi arch dam during the maximum and minimum flooding levels of the water in the reservoir is given. The results of numerical calculations and thermometric measurements in the dam galleries are analyzed.

## შინაარსი

1	პრობლემის თანამედროვე მდგომარეობა ლიტერატურის მიმოხილვა და კვლევების კრიტიკული ანალიზი .....	16
1.1	თერმული რეჟიმის რეგულირება ბეტონის კაშხლების მშენებლობის პერიოდში და რეგულირების ძირითადი მიდგომები .....	16
1.2	ახალი სამშენებლო ტექნოლოგიის თავისებურებები ბეტონის კაშხლების მშენებლობისას .....	21
1.3	ბეტონირების ტექნოლოგიის ძირითადი პრინციპები .....	26
1.4	მშენებლობის თანამედროვე მდგომარეობა და კაშხლების ტემპერატურული რეჟიმი .....	29
1.4.1	ახალი ტექნოლოგიის განვითარების შედეგები მიატლინსკის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობაზე ..	29
1.4.2	მშენებლობის დროს მიღებული ბეტონის ტემპერატურის რეჟიმის მკაცრი მოთხოვნები .....	30
1.5	ხუდონ ჰესის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგია ...	36
1.6	ტრადიციული ტექნოლოგიით, ბეტონის ტექნიკური მახასიათებლების რეგულირება .....	40
2.	კაშხლის არასტაციონალური თბური რეჟიმის კვლევა .....	44
2.1	სასრულ-ელემენტული მოდელის დამუშავება ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში .....	44
2.2	ორგანოზომილებიანი სიმპლექს ელემენტი .....	47
2.3	დიფერენციალური განტოლების ამოხსნა სასრული სხვაობების მეთოდის გამოყენებით .....	48
2.4	ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ტემპერატურული ველის გაანგარიშება .....	49
2.4.1	გაანგარიშების სასაზღვრო პირობები თაღოვანი კაშხლის უდაწნეო წახნაგის მხრიდან .....	49
2.4.2	გაანგარიშების სასაზღვრო პირობები თაღოვანი კაშხლის სადაწნეო წახნაგის მხრიდან .....	51

2.4.3	ენგურჰესის კაშხლის ტემპერატურული ველის ანალიზი ნატურული დაკვირვების შედეგების გათვალისწინებით .....	53
2.5	ენგურჰესის კაშხლის თბური რეჟიმის გაანგარიშებები და შედეგების ანალიზი .....	62
2.5.1	კაშხლის საანგარიშო სქემა .....	62
2.5.2	კაშხლის სასაზღვრო პირობები .....	64
2.5.3	თაღოვანი კაშხლის ტანის ტემპერატურული ველის გაანგარიშება .....	67
2.5.4	კაშხლის ტანის ტემპერატურული ველის ანალიზი თეორიული და თერმომეტრული გაანგარიშებების შედეგების მიხედვით	73
3	დასკვნა .....	83
	გამოყენებული ლიტერატურა .....	85
	დანართები .....	95



### ცხრილების ნუსხა

2.4.3.1	თერმომეტრული გაზომვებით დაფიქსირებული ტემპერატურების ცვალებადობის ცხრილი	57
2.4.3.2	კაშხლის გალერეებში ტემპერატურული გაზომვების შედეგები.	59
2.4.3.3.	კაშხლის გალერეებში თეორიული და ტემპერატურული გაზომვების შედეგები	60
2.4.3.4	კაშხლის თბური რეჟიმის გაანგარიშებისა და თერმომეტრული გაზომვების შედეგები	62

## ნახაზების

## ნახაზების ნუსხა

### ნომრები

1.3.1	ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალების უზრუნველყოფა	28
1.4.2.1	მიატლინსკისა და ჩირგეის ბეტონის ბლოკების გაგრილების სიჩქარის მრუდები	33
1.4.2.2	ყალიბის თბოგაცემის მახასიათებელი მრუდები	35
2.3.1	ორგანზომილებიანი იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები	49
2.4.3.1	პირველი წარმოებულის რიცხვითი გაანგარიშება ჰაერისა და კაშხლის ტანის სხვადასხვა ნიშნულებზე	50 63
2.4.3.2	ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხლის 450 და 402 ნიშნულებზე გაზომვების შედეგებით	64
2.5.1.1	კაშხლის თბური რეჟიმის სასრულ ელემენტთა მეთოდით გაანგარიშების სქემა	66
2.5.3.1	ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს სტაციონალური რეჟიმის დროს - თეორიული გაანგარიშებით - (აგვისტოს ბოლო)	72
2.5.3.2	ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში წყლის მინიმალური დონის დროს - თეორიული გაანგარიშებით (თებერვალი)	73
2.5.3.3	ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს სტაციონალური რეჟიმის დროს - თეორიული გაანგარიშებით	74
2.5.3.4	ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში (თეორიული ამონახსნებით) წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს	75
2.5.3.5.	ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში (თეორიული ამონახსნებით) წყალსაცავში წყლის მინიმალური დონის დროს	76

2.5.4.1	თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 15 სექციის 402მ ნიშნულზე არსებულ გალერეაში	82
2.5.4.2	თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 402მ ნიშნულზე არსებულ გალერეებში; სადაწნეო (US), ცენტრალურ (CN) და უდაწნეო (DS) კვეთებში	83
2.5.4.3	თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 15 სექციის 450მ ნიშნულზე არსებულ გალერეაში სადაწნეო (US), უდაწნეო (DS) და ცენტრალურ (CN) კვეთებში	84
2.5.4.4	თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 450მ ნიშნულზე არსებულ გალერეებში; სადაწნეო (US), ცენტრალურ (CN) და უდაწნეო (DS) კვეთებში	85
2.5.4.5	ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს	86
2.5.4.6	ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში წყალსაცავში წყლის მინიმალური დონის დროს	87

### დანართები

დანართი - 1	ჩირგვი ჰესის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობა. ბეტონირებადი ბლოკები	102
დანართი - 2	მშენებარე ბეტონის თაღოვანი კაშხლების ტექნოლოგიური სქემები	106
დანართი - 3	მიატლინსკის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგიური სქემები	113
დანართი - 4	გრაფიტაციული კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგიური სქემები	116
დანართი - 5	ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლი	118

## შესავალი

**სამეცნიერო თემის აქტუალობა:** ჰიდროენერგეტიკული და ჰიდრომელიორაციული მშენებლობა წამყვანი მიმართულებებია ქვეყნის ეკონომიკური განვითარების მხრივ. ცნობილია, რომ საქართველო წყლის რესურსებით მდიდარი ქვეყანას წარმოადგენს, რაც ხსენებული მიმართულებით სამომავლოდ ბევრ სასიკეთო პერსპექტივებს სახავს.

საშუალო და მაღალდაწვეიანი ჰიდროკვანძების შემადგენლობაში ყველაზე საპასუხისმგებლო წყალშემტბორავ ნაგებობებს, წარმოადგენს კაშხლები.

კაშხლები, როგორც ყველაზე უფრო მეტად ძვირადღირებულ და საპასუხისმგებლო ნაგებობებს წამყვანი როლი აკისრიათ მთლიანად ჰიდროკვანძების გამართულ მუშაობაში. ისინი მნიშვნელოვან წილად განსაზღვრავენ ობიექტის საიმედოობას.

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

თაღოვანი კაშხლი, ზოგადად წარმოადგენს სივრცით კონსტრუქციას, რომელიც, წყალსაცავიდან განვითარებულ დატვირთვებს გადასცემს ხეობის კლდოვან ფერდობებს. შედარებით ვიწრო ხეობებისა და კლდოვანი ფუძეების არსებობისას თაღოვანი კაშხლებს ბეტონის კაშხლებს შორის კონკურენტი არ გააჩნია. მან დიდი ხანია დაიმკვიდრა თავი კაშხალთმშენებლობის პრაქტიკაში, როგორც ეკონომიურად მისაღებმა და მუშაობის მხრივ საიმედო ნაგებობამ. იგი შენდება სეისმურად მაღალ აქტიურ და ასევე მკაცრ კლიმატურ პირობებში. ცხადია, აქ განსაკუთრებით მკაცრი მოთხოვნები წაეყენებათ ფუძეებს. ფუძის კლდოვანი ქანები უნდა აკმაყოფილებდეს სიმტკიცისა და წყალუჟონადობის მოთხოვნებს. თაღოვანი კაშხლები ჩვეულებრივ შენდება ხეობის მთიან უბნებში.

მათი მცირე სისქის მიუხედავად, თუნდაც დიდ სიმაღლეების დროს, თაღოვანი კაშხლები წარმოადგენენ საკმაოდ საიმედო და მოქნილ კონსტრუქციას და უფრო

მაღალი სიმტკიცის ზღვარი აქვთ ვიდრე კაშხლების სხვა ტიპებს, თუ კლდოვანი მასის სიმტკიცე, რომელიც კაშხლიდან იღებს დატვირთვას, არ არის დარღვეული. საჭიროების შემთხვევაში, შესაძლებელია ფუძის ზიდვის უნარიანობის გაზრდა ცემენტაციისა, და სხვადასხვა სიცარიელების შევსების გზით.

თაღოვანი კაშხლების მშენებლობაში მნიშვნელოვანი როლი აკისრია მშენებლობის ტექნოლოგიას და მასთან დაკავშირებით ნაგებობის ტემპერატურულ რეჟიმს. აღნიშნული შესაბამისად ძლიერ ზემოქმედებას ახდენს თაღოვანი კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე და საიმედოობაზე.

ბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ჩამოყალიბებაში ტემპერატურული რეჟიმის გავლენა მნიშვნელოვანია. ხშირ შემთხვევაში კი იწვევს ნაკერების გახსნას და ბზარების განვითარებას. თაღოვან კაშხლების, როგორც თხელკედლიანი კონსტრუქციებისათვის, პრობლემა კიდევ უფრო მძიმდება, რაც საკითხის აქტუალობასა და მნიშვნელოვნებას კიდევ უფრო ზრდის.

კაშხლებისათვის მონოლითურობის უზრუნველყოფა დაკავშირებულია ტექნიკურ სირთულეებთან და დიდ ფინანსურ დანახარჯებთან. საკითხის შესწავლისათვის მიმართავენ თეორიულ და ექსპერიმენტულ გამოკვლევებს, რომლის საფუძველზე მიიღება სხვადასხვა საინჟინრო-ტექნიკური გადაწყვეტები.

თაღოვანი კაშხლებისათვის ზამთრის პერიოდი ბევრ სირთულეებს წარმოშობს. იმის გამო, რომ იგი შედარებით თხელკედლიან კონსტრუქციას წარმოადგენს, წყლისა და ჰაერის ტემპერატურის მკვეთრი შემცირება ნაგებობაში გამჭიმავი ძაბვების კონცენტრაციას ზრდის და შესაბამისად ბზარგანვითარების საშიშროებას ქმნის.

ზამთრის ცივ პერიოდებში, როდესაც მაღალია წყლის დონე წყალსაცავში იზრდება კაშხალში ექსტრემალური ძაბვები. აღნიშნული მდომარეობა უმჯობესდება წყლის დაბალი დონის პირობებში.

ამდენად, ენგურის კაშხლის, როგორც მაღალ საპასუხისმგებლო ნაგებობის საიმედო ექსპლუატაციისათვის ტემპერატურული რეჟიმის შესწავლას მით უფრო დიდი მნიშვნელობა აქვს.

ზემოთხსენებული საკითხები სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ძირითად ობიექტს წარმოადგენს.

#### **კვლევის მიზანია:**

- ენგურჰესის თაღოვან კაშხლის მაგალითზე შესწავლილ იქნას ნაგებობაში ტემპერატურული ველის განაწილება წლის სხვადასხვა პერიოდში ძირითადად წყალსაცავში წყლის დონის მახასიათებელი ნიშნულების (მაქსიმალური და მინიმალური დონის) არსებობისას.

აღნიშნულთან დაკავშირებით სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე დამუშავდეს ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა არასტაციონალური თერმული რეჟიმების გაანგარიშებისათვის.

#### **სამეცნიერო სიახლე:**

დამუშავებული იქნა ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა, რომლის გამოყენებით გამოყენებით შესაძლებელია შესწავლილი იქნა ტემპერატურული ველი ამოცანათა ფართე კლასისათვის, მათ შორის თაღოვანი კაშხლებისათვის, 2 განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში არასტაციონალური თერმული რეჟიმების გათვალისწინებით იზოპარამეტრული ელემენტების გამოყენებით.

მიღებული იქნა გაანგარიშების საანგარიშო პარამეტრები (საანგარიშო ბადის ბიჯი და ინტეგრების დროითი ბიჯი), რომლებიც საშუალებას იძლევა მიღებული იქნას ტემპერატურული ველის კონცენტრაციის უბნები კაშხალში.

#### **ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა:**

2 განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში დამუშავებული საანგარიშო პროგრამის გამოყენებით შესაძლებელია შესწავლილი იქნა ტემპერატურული ველი ბეტონის კაშხლებისათვის, მათ შორის თაღოვანი კაშხლებისათვის, კონსტრუქციათა გეომეტრიული ფორმისა და თბო მახასიათებლების ნაირგვარობისათვის,

არასტაციონალური თერმული რეჟიმების გათვალისწინებით იზოპარამეტრული ელემენტების გამოყენებით.

ენგურჰესის მაგალითზე შესწავლილ იქნა თაღოვან კაშხლში ტემპერატურული ველის განაწილება წლის სხვადასხვა პერიოდში წყალსაცავში წყლის დონის მახასიათებელი ნიშნულების (მაქსიმალური და მინიმალური დონის) არსებობის დროს.

**ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა:** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალის, ლიტერატურის მიმოხილვის, კვლევის, შედეგებისა და მათი განსჯის, დასკვნის, გამოყენებული ლიტერატურისა და დანართებისგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 119 ნაბეჭდ გვერდზე, რომელიც მოიცავს 19 ნახაზს, 4 ცხრილსა და 5 დანართს.

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

# 1. პრობლემის თანამედროვე მდგომარეობა ლიტერატურის მიმოხილვა და კვლევების კრიტიკული ანალიზი

## 1.1 თერმული რეჟიმის რეგულირება ბეტონის კაშხლების მშენებლობის პერიოდში და რეგულირების ძირითადი მიდგომები

მსოფლიოში ბეტონის კაშხლების მშენებლობაში მრავალწლიანი გამოცდილებიდან გამომდინარე, შემუშავებულია და პრაქტიკაში დანერგილია სხვადასხვა ეფექტური მეთოდი და ღონისძიება, რომელთა განხორციელება საშუალებას იძლევა ან გამოირიცხოს თერმული ბზარების წარმოქმნის შესაძლებლობა, ან მნიშვნელოვნად შეამციროს მათი გაჩენის ალბათობა. ასეთი მიდგომები კი საშუალებას იძლევა გაიზარდოს ნაგებობათა სიმტკიცის მარაგები, ხანმედეგობა და თავიდან იქნას აცილებული ექსპლუატაციის პერიოდში არასასურველი პროცესების განვითარება.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა მშენებლობის პრაქტიკაში ზოგადად, ბეტონის ტემპერატურის რეჟიმის რეგულირების ძირითადი საშუალებებია:

ბეტონირებადი ბლოკის გაციება ბეტონში ჩამონტაჟებული მილის ხვეულების საშუალებით ცირკულირებადი წყლის გამოყენებით;

ბეტონის ნარევის წინასწარ გაგრილების გამოყენება;

ცემენტის მოხმარების შემცირება და დაბალთერმული ცემენტების გამოყენება;

ბეტონის ზონირება კაშხლის მონაკვეთის გასწვრივა;

ბლოკების სიმაღლის შეზღუდვა და წინა ბლოკზე მომდევნო ბლოკის დაბეტონების დაყოვნების რეგულირება.

გარდა ამისა, ბზარების ალბათობის შესამცირებლად, გამოიყენება გეგმაში (ჰორიზონტალური მიმართულებით) ბლოკების ზომების შეზღუდვა.

სსრკ-ში ბეტონისა და ბზარების წარმოქმნაში თერმული ძაბვების შესწავლა დაიწყო 1930-იან წლებში დნეპერის ჰიდროელექტრო კაშხლის და მასიური ხიდის



საყრდენების მშენებლობისას. დაიწყო ტემპერატურული ველების მოდელირების მეთოდების შემუშავება [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15,16,17,18,19,20]. ბეტონში ტემპერატურისა და ძაბვის გამოთვლის მეთოდი, შემოთავაზებული იქნა მეთოდი ხელსაყრელი ტემპერატურული განაწილების დიაგრამის ფორმირებისთვის, რომელიც შეესაბამება ბეტონში ნულოვან ძაბვას, ჩატარდა ბეტონში ტემპერატურისა და დეფორმაციების დიდი საველე კვლევები ჩამონტაჟებული დისტანციური მოწყობილობების გამოყენებით. შემოთავაზებულია "კონუსი" ბეტონში თავისუფალი ტემპერატურის დეფორმაციების გასაზომად. დეფორმაციების განსხვავება მიღებული ბეტონის მასაში და „კონუსში“ დაყენებული ტენზომეტრული გაზომვებით შეესაბამება ტემპერატურულ დეფორმაციებს, რომლებიც არ მომხდარა გარე ბმების (კავშირების) გავლენით და რომლებიც პროპორციულია ტემპერატურული ძაბვებისა. დრეკადობი მოდულისა და ბეტონის ცოცვის საზომის მნიშვნელობების გათვალისწინებით, რომლებიც მიღებულია დროის ფუნქციაში ბეტონის დიდი ნიმუშების გრძელვადიანი გამოცდების შედეგად, ასევე კაშხალში გაზომილი დეფორმაციებისა და ტემპერატურული გაზომვების შედეგად, შესაძლებელი გახდა, სუპერპოზიციის (გადაფარვის) მეთოდის გამოყენებით, შეფასდეს ბეტონის კაშხლებში წარმოქმნილი თერმული ძაბვების სიდიდე.

ბეტონის ბზარების პრევენციის განსაკუთრებით მწვავე საკითხები წარმოიშვა 50-იან წლებში ბუხტარმისა და ბრატსკის ჰიდროელექტროსადგურების (100 მ-ზე მეტი) მაღალი გაფართოებულ ნაკერებიანი ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების მშენებლობის დროს. ბრატსკის კაშხლის ბეტონის ბლოკებში გაჩენილი ბზარები, რომელიც აგებული იყო კლასიკური სვეტებად დაყოფით მძიმე კლიმატურ პირობებში (ციმბირი), მოითხოვდა ბეტონის თერმულად დაძაბული მდგომარეობის სიღრმისეულ შესწავლას, ფართო მასშტაბიანი წარმოების ექსპერიმენტების დაყენებას მშენებარე კაშხლებზე. ახალი კაშხლების პროექტირებისას დაიწყო კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური ღონისძიებების კომპლექსების, ასევე ძვირადღირებული დანადგარების გათვალისწინება, რომლებიც შესაძლებელს გახდიდა ბეტონის ტემპერატურული რეჟიმის რეგულირებას.

ბუხტარმის ჰესის მშენებლობის დასრულების შემდეგ ბრატსკის ჰესის მშენებლობისას ექსპერიმენტულად განვითარდა "გრძელი ბლოკების" მეთოდი, რომლის ძირითადი მახასიათებლები იყო:

კაშხლის თითოეული მონაკვეთის ბეტონირება ერთ ბლოკში ზემო ბიეფიდან ქვემო ბიეფისაკენ 50 - 60 მ სიგრძისა და 1,25 - 1,5 მ სიმაღლის;

ბეტონის დაცვა გარე ზემოქმედებისაგან თვითამწვევი „კარვის“ საშუალებით, რაც იძლეოდა ბლოკისთვის ხელოვნური კლიმატის შექმნის შესაძლებლობას როგორც ზამთარში, ასევე ნებისმიერ სხვა პერიოდში;

ხისტი ბეტონის ეტაპობრივი ჩაწყობა ცემენტის მოხმარებით 160 - 180 კგ კუბურ მეტრზე 0,4 - 0,5 მ ფენებში, დატკეპნილი სპეციალურ მოძრავ მექანიზმზე დამონტაჟებული ვიბრატორების ჯგუფით. ბლოკების ზედაპირის მორწყვა გამოყენება, როგორც ბეტონის ტემპერატურის მაქსიმალურად შემცირების ძირითადი საშუალება.

ბრატსკის კაშხლის ექსპერიმენტულ „გრძელ ბლოკებში“, რომელთა გრძელი მხარეები, მიუხედავად თბილი ყალიბისა, ექვემდებარებოდა გარე ჰაერის ტემპერატურის რყევებს, ბზარები წარმოიქმნა კლდის ფუძის მიმდებარე ბეტონის სწრაფი გაციების გამო და ასევე კლდიდან მომორებულ მონაკვეთებში ბეტონის ტემპერატურის დიდი უთანასწორობის გამო. ბუხტარმის ჰესის კაშხლის მონაკვეთებში, ბეტონით "გრძელი ბლოკებით" საერთო სექციის ქვეშ, რომელიც იცავდა გაფართოებულ ნაკერებში სექციების გრძელ წახნაგებს გარე ჰაერის ტემპერატურის რყევებისგან, რაც უზრუნველყოფდა კლდესთან შეუღლებისა და ასევე მისგან დაშორებით ზონებში ბეტონის ნელა გაგრილებას და ბეტონის ტემპერატურის ველის თანაბარ განაწილებას, ბზარები არ განვითარდა [7,10,11,12].

გრძელი ბლოკების“ მეთოდმა დარჩა მხოლოდ ექსპერიმენტების ფარგლებში. მეთოდის მთავარი უარყოფითი მხარე წინააღმდეგობა, რომელიც დაკავშირებულია იმ ფაქტთან, რომ კონსტრუქციის ზრდის ტემპის ზრდასთან ერთად ბლოკების სიმაღლის გაზრდის გამო ან ბლოკზე ბლოკის დაბეტონებას შორის ინტერვალის შემცირებით, ბეტონის გათბობის მნიშვნელობა იზრდება და,

ბლოკების სიგრძის მატებასთან ერთად დასაშვები მაქსიმალური ტემპერატურა მცირდება.

ამიტომ კონსტრუქციის აგების დასაჩქარებლად აუცილებელია ბეტონის ნარევის ან, კონსტრუქციაში ბეტონის გაცივების ღირებულების გაზრდა. გაცივების ხარჯების შესამცირებლად და რაც მთავარია, დიდი ფართობის „გრძელი ბლოკების“ ბეტონის გამარტივებისთვის, ისინი გადავიდნენ საფეხურიანი ბეტონირების სქემიდან ერთ ფენაზე, ე.ი. „შრეობრივი“ მეთოდით [7].

ტოქტოგულისა და კურპსაის ჰესების გრავიტაციულ კაშხლებში (გაფართოებული ნაკერების გარეშე) ბეტონის მასივებში, რომლებიც ჩაწყობილი იქნა „შრეობრივი“ მეთოდით, ცხელ კლიმატურ პირობებში (ცენტრალური აზია) მთელ ფრონტზე (ერთი ნაპირიდან მეორემდე), ბზარები არ იქნა აღმოჩენილი. ტოქტოგულის კაშხლისთვის ქვიშა და მსხვილი შემავსებლები გაცივდა 5C გრადუსამდე, ერთი ფენისგან შემდგარი ბლოკის სიმაღლე იყო ჯერ 0.50, შემდეგ კი 0.75 მ., ხოლო ბეტონი ჩააწყვეს 1.0 მ სიმაღლის ბლოკებში, რომელიც შედგება ერთი ფენისგან. .

აღსანიშნავია 22 ათასი კუბური მეტრი მოცულობის მასივის ბეტონის გამოცდილება ბუხტარმის ჰესის წყალსაშვიანი კაშხლის ერთ-ერთ მალზე, რომელშიც ბეტონი მოთავსებული იყო 50 მ-ზე მეტი სიგრძის ბლოკებში (ქვემო ბიეფიდან ზემო ბიეფამდე) და სიმაღლით 7–8 მ, მაღალი ინტენსივობით, თითქმის ერთ თვეში (აპრილი) 38 მ სიმაღლემდე. ეს მასივი ინახებოდა 1,5 წლის განმავლობაში სრულ გაცივებამდე თბილ ყალიბში, ქვემო ბიეფიდან ზემო ბიეფამდე, გამაგრებელი საშუალებების გამოყენების გარეშე. ამავდროულად, პირველი გაცივების პერიოდში, რომელიც გაგრძელდა 3 თვე (გაზაფხული და ზაფხული), გაიზარდა გარე ჰაერის ტემპერატურა. მიუხედავად ბეტონის მაღალი 45-50 გრადუსი მაქსიმალური ტემპერატურისა, არც ვიზუალური დათვალიერებით და არც ამ მასივის ქვედა ნაწილში დაყენებული სპეციალური გრძელბაზიანი ტენზომეტრების ჩვენებით, ბზარები არ დაფიქსირებულა [21,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31]. ამ მონაკვეთის ბეტონირების შედეგებმა, ისევე როგორც მთელი მონაკვეთების ბეტონირების გამოცდილებამ ერთი ბლოკით კანადაში [6] აჩვენა, რომ წახნაგების საკმარისად ძლიერი თერმული დაცვის

პირობებში, რაც უზრუნველყოფს მთელი მასის ერთგვაროვან, ნელ გაგრილებას დიდი ტემპერატურის ვარდნის გარეშე. შესაძლებელია ავიცილოთ ბზარგანვითარება, ბეტონის მაღალ მაქსიმალურ ტემპერატურის არსებობის დროსაც, რომელიც ეწყობა კლდოვან ფუძეზე.

თუ თავიდან გრავიტაციულ კაშხლებში ბზარი მიუღებლად მიიჩნეოდა, მაშინ, როცა სამშენებლო გამოცდილება დაგროვდა, განსაკუთრებით მძიმე კლიმატურ პირობებში, ბზარებისადმი დამოკიდებულება ნაკლებად კატეგორიული გახდა. გამოთქმულია მოსაზრებები ბზარების თავიდან აცილების შეუძლებლობის შესახებ, ბზარების წარმოქმნის დაშვების შესახებ, რომლებიც არ არის საშიში კონსტრუქციისთვის, კაშხლში სპეციალური ნაკერების მოწყობილობაზე, რომელიც ორგანიზებას უკეთებს ბზარებს მხოლოდ ისე, რომ ბზარებმა არ გააუარესოს ნაგებობის, როგორც ერთიანი კონსტრუქციის, მუშაობა [32,33,34,35,36,37,38,39].

შეიძლება ჩაითვალოს, რომ რუსეთში ბეტონის კაშხლების მშენებლობის ორი ძირითადი მეთოდი განვითარდა.

პირველს შეიძლება ეწოდოს "სვეტოვანი". ეს მეთოდი ხასიათდება წინმსწრები და ჩამორჩენილი ელემენტების არსებობით. ამდენად, სვეტები განიხილება გრავიტაციულ კაშხლებში, ხოლო სექციები - თაღოვან კაშხლებში [40,41,42,43,44,45,46,47].

ბრატსკის, კრასნოიარსკის, უსტ-ილიმსკის გრავიტაციული და საიანო-შუშენსკაიას თაღოვანი გრავიტაციული კაშხლები დაბეტონდა 3.00 მ სიმაღლის ბლოკებით, ამ კაშხლებში დიდი რაოდენობით ბეტონი, მაღალ (24 მ-მდე) ბლოკებში იქნა ჩაწყობილი. ჩირგეისა და ენგურის თაღოვანი კაშხლები დაბეტონებული იყო ძირითადად 1,50 მ სიმაღლით ბლოკებად, წინა და ჩამორჩენილ მონაკვეთებს შორის. მძიმე კლიმატურ პირობებში, ბლოკების ზემოთ კარვების რაოდენობის შემცირებით, კარვებით დაფარული ზედაპირის და კარვების ქვეშ არსებული სივრცის გაცხელებული მოცულობის შემცირებით, სვეტების რიგრიგობით მაღალი ბლოკებით ბეტონირების დროს, მნიშვნელოვანი ეკონომია იქნა მიღწეული მასალებში და დაზოგილ ენერჯიაში.



წინმსწრებ სექციებში ბზარების წარმოქმნის შესამცირებლად, შემოთავაზებული იყო [9] დიფერენცირება მოთხოვნილებები ჩამორჩენილი და წინმსწრებ სექციებში ტემპერატურული რეჟიმისთვის - ამ უკანასკნელისთვის უფრო მკაცრი დაყენება. მაგრამ მოთხოვნების ოდნავ გამკაცრებაც კი გამოიწვევს არაადეკვატურ ეფექტს, მათი განხორციელების ღირებულების ძალიან დიდ ზრდას.

აღნიშნული აიხსნება იმით, რომ ჩირგეის კაშხლის მშენებლობაში უკვე გამოყენებულია კონტროლის თითქმის ყველა შესაძლო მეთოდი:

ვაკუუმური ორთქლის ჭავლით დამუშავებისას ქვიშის 5C გრადუსამდე გაციების შედეგად, უხეში აგრეგატების ყველა ფრაქციის გაგრილება სპეციალურ ბუნკერებში ცივი ჰაერით 5°C გრადუსამდე, რაც კომპენსაციას უკეთებდა, ქარხანაში ნარევის დამუშავებისა და ტრანსპორტირებისას გაცხელებას, გაგრილება, დიდი აგრეგატები ბეტონის ქარხნის მიწოდებელ ურნებში ცივი ჰაერის შერევით და წყლის გაგრილებით, ბეტონის ნარევის ტემპერატურა ცხელ პერიოდში აღწევდა 11C გრადუსს;

მაქსიმალური ტემპერატურის შესამცირებლად ბეტონის მილის გაგრილება ხდებოდა 1,50 x 1,50 მ მილებს შორის საფეხურზე, ბლოკების ზედაპირები დატენიანებული იყო სიცხეში, შემცირდა ცემენტის მოხმარება და გამოიყენებოდა დაბალი ტემპერატურის ცემენტი.

ცივ პერიოდში ბეტონის ზედაპირები დაცული იყო ჰაერის ტემპერატურის რყევის გავლენისგან.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, მიატლინის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგია ეფუძნებოდა ქვემოთ მოყვანილ სხვა პრინციპებს, რომლებიც მიზნად ისახავდა არა ბეტონის ტემპერატურული რეჟიმის მოთხოვნების გამკაცრებას, არამედ მათ შერბილებას და რეგულირების გამარტივებას.

ცნობილია თეორიული პოზიცია, რომ კედელში, რომელიც პრაქტიკულად წარმოდგინდება თაღოვანი კაშხალი, მომენტალურად დაბეტონებულია ფუძიდან გარკვეულ მანძილზე, საშუალო მოცულობის ტემპერატურის ცვლილება

ნებისმიერი მნიშვნელობით და ნებისმიერი სიჩქარით არ იწვევს თერმულ ძაბვებს, მაგრამ მხოლოდ იწვევს წრფივი ზომების ცვლილებას ტემპერატურის დეფორმაციების კოეფიციენტის [8,49,50,51,52,53,54,55,56]. შეიძლება წარმოვიდგინოთ, რომ რეალურ პირობებში, თერმული ძაბვების სიდიდე დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენად განსხვავდება ბეტონის ტემპერატურა და დეფორმაციის მახასიათებლები ცალკეულ ზონებში საშუალო მოცულობის მნიშვნელობებისგან, ასევე ამ განსხვავებების ფორმირების ისტორიაზე.

ნატურულმა კვლევებმა აჩვენა [57,58,59,60], რომ ტემპერატურული ველის უთანასწორობის ერთობლიობა ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ მიმართულებით იწვევს დაძაბულობის ზრდას და ზოგიერთ შემთხვევაში იწვევს ბზარების წარმოქმნას.

ამრიგად, შემუშავებულ ტექნოლოგიაში ბზარების თავიდან აცილების მთავარი საშუალება არის ტემპერატურული ველის გათანაბრება და ბეტონის დეფორმაციის მახასიათებლები კაშხლის მთელ მოცულობაში:

1. გადაწყდა ტემპერატურული ველის გათანაბრების უზრუნველყოფა შემდეგი ღონისძიებებით [61,62,63,64,65,66,67,68,69,70]:

1.1. ჰორიზონტალური მიმართულებით (რომელიც ემთხვევა კაშხლის ღერძს), ერთი ნაპირიდან მეორე ნაპირამდე, ბეტონის ბლოკების იარუსებად ბეტონირება, წინმსწრები სექციების გარეშე;

1.2. კაშხლის ღერძზე პერპენდიკულარულად ჰორიზონტალური მიმართულებით - მილის უწყვეტი გაგრილებით, აუცილებლობის შემთხვევაში, ცივ პერიოდში კიდეების თერმული დაცვასთან ერთად;

1.3. ვერტიკალური მიმართულებით - ბლოკის ჰორიზონტალური ზედაპირის სწრაფი, მოქნილი ტემპერატურის კონტროლი მილით უწყვეტი გაგრილების კომბინაციის გამოყენებით;

2. ბეტონის დეფორმაციის მახასიათებლების გათანაბრების მიზნით, ახალმა ტექნოლოგიამ მიიღო ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალის შეზღუდვა.

ჩირგვის კაშხლის მშენებლობის ტრადიციული წინმსწრები სექციების მეთოდით გამოყენებით, ტემპერატურა სამივე მიმართულებით არათანაბარია. კაშხლის ღერძის მიმართულებით, ბლოკების ბეტონირების შემდეგ, ტემპერატურა

იწყებს გათანაბრებას ჩამორჩენილ სექციებში. ამ მომენტისთვის, წინმსწრები სექციების ბლოკებში ხდება თერმული დეფორმაციები და ხდება ძაბვების წარმოქმნა.

„შრეობრივი“ მეთოდით, კაშხლის ღერძის გასწვრივ ტემპერატურის ერთგვაროვნება ერთი ნაპირიდან მეორემდე უზრუნველყოფილია ერთი ფენისგან შემდგარი ბლოკების თანმიმდევრული ბეტონირებით.

კაშხლის ღერძის პერპენდიკულარულ ჰორიზონტალურ მიმართულებით არათანაბარი ტემპერატურით წარმოქმნილი ძაბვების შესამცირებლად, ზედა და ქვედა ნაწილებზე ეწყობა ნაკერები - ჭრილები, რომლებიც ექვემდებარება გარე ჰაერის ტემპერატურის რყევებს. თაღვანი კაშხლის შექმნის შესაძლებლობას დასაბუთება სჭირდება სპეციალური კვლევებით, ვინაიდან არსებობს მოსაზრება, რომ ნაკერებმა მთლიანობაში შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს კაშხლის მუშაობაზე. მილის გაგრილების, როგორც ტემპერატურის გათანაბრების საშუალებად არჩევის საფუძველი იყო სავლე კვლევების შედეგები [10], რომლებმაც აჩვენეს, რომ მილის ურთიერთ დაშორებით 1,50 x 1,50 მ ბიჯით, ტემპერატურული სხვაობა განივი მონაკვეთზე არ აღემატება 5 C გრადუსს.

მილის გაგრილების ეფექტურობის განმსაზღვრელი მთავარი ფაქტორი არის ბეტონის ტემპერატურის შემცირების სიჩქარე. ანალიტიკური გამოთვლების საფუძველზე [71,72,73,74,75,76,77,78,79,80]. მიღებულია, რომ მილის გაგრილების ინტენსივობის მატებასთან ერთად კლდესთან ახლოს 27 მ სიგრძის ბლოკის არსებობისას ბზარის ალბათობა იზრდება, ხოლო მილებს შორის 1.50 x 1.50. მ ბიჯის არსებობისას, უწყვეტი გაგრილებისას სამი კვირის შემდეგ, იწვევს ბზარმდეგობის პირობის დარღვევას. მაგრამ ეს ეხება მხოლოდ კლდეზე ან ძველ ბეტონზე დაგებულ ბლოკებს.

როგორც კლდოვანი ძირიდან მოშორებით ჩირგვის კაშხლის ბლოკებში ბზარების წარმოქმნის დაკვირვებით ჩანს, რომ გაგრილების სიჩქარის ზრდით დღეში C 1,0-დან 2,5 გრადუსამდე ბზარების რაოდენობა მცირდება. უფრო მეტიც, ყველაზე ინტენსიური ბზარი დაფიქსირდა გაციების სიჩქარით 1.0C გრადუსი დღეში, რაც მარეგულირებელ დოკუმენტებში მიღებული იქნა, როგორც მაქსიმალური დასაშვები. როგორც კურპსაის კაშხლის „შრეობრივი“ ბეტონირების



დროს საველე დაკვირვებით გამოვლინდა, დღეში 3-4 გრადუსიანი გაციების სიჩქარე არ იწვევს 30 მ ან მეტი ზომების მქონე ბლოკების დაზარვას.

ბეტონის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე [8, 12] სითბოს ბალანსის საველე კვლევებმა აჩვენა, რომ ბლოკის ზედაპირზე წყლის მიწოდებისა და დინების რეჟიმის შეცვლით, შესაძლებელია ზედაპირის ტემპერატურაზე სწრაფად ზემოქმედება და ტემპერატურის ველის შეცვლა ვერტიკალური მიმართულებით.

ინტენსიური წყალმომარაგებისა და დრენაჟის ორგანიზებისას ისე, რომ წყალი მიედინება მთელ ზედაპირზე სტაგნაციის ზონების წარმოქმნის გარეშე, ჰორიზონტალურ ზედაპირზე საშუალო ტემპერატურა უდრის ბლოკიდან შემოსული და გამომავალი წყლის ტემპერატურის საშუალო არითმეტიკულს. ინტენსიური აორთქლების შედეგად, დატენიანებისას ზედაპირის ტემპერატურა უფრო დაბალია, ვიდრე ჰაერის ტემპერატურა, თუნდაც მზის გამოსხივების სრული ზემოქმედებისას. მშრალი ზედაპირის ტემპერატურა უფრო მაღალია, ვიდრე ჰაერის ტემპერატურა, განსაკუთრებით მზის გამოსხივების დროს.

ინტენსიური მორწყვის დროს, ბლოკის ზედაპირზე წყლის მუდმივი ფენის შექმნისას შესაძლებელია მიწოდებული წყლის დინების სიჩქარის ცვლილებით დაარეგულიროთ ზედაპირის ტემპერატურა მშრალი ზედაპირის ტემპერატურამდე. საჭიროების შემთხვევაში, ბლოკის ზედაპირი შეიძლება დაიფაროს კიდეც.

ბლოკების ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ზედაპირების ტემპერატურის სწორი რეგულირების წინაპირობა (პუნქტი 1.2 და პუნქტი 1.3) არის ბეტონის ტემპერატურული რეჟიმის რეგულირების სერვისის არსებობა სამშენებლო მოედანზე, რომელიც ამონტაჟებს ტემპერატურის სენსორებს კაშხალში, აკეთებს ტემპერატურულ გაზომვებს, ამუშავებს გაზომვის მონაცემებს და ტემპერატურული ველის მდგომარეობის ანალიზისა და პროგნოზის საფუძველზე იღებს ოპერაციულ გადაწყვეტილებებს ტემპერატურის კონტროლის შესახებ. ამ სერვისს უნდა ჰქონდეს პროგრამა პერსონალური კომპიუტერისთვის, რომელიც ბეტონის ტემპერატურისა და კლიმატური მონაცემების გაზომვის შედეგების საფუძველზე იძლევა ბეტონის ტემპერატურული რეჟიმის პროგნოზს.

ბეტონის დეფორმაციის მახასიათებლების გასწორება აუცილებელია ძირითადად ვერტიკალური მიმართულებით, სადაც ბლოკებს შორის შეხებისას, მათი მნიშვნელობების განსხვავება ქვედა და ზედა ბლოკებისთვის ძირითადად განისაზღვრება ბლოკების დაბეტონების შორის ინტერვალით.

[9]-ში აღმოჩნდა, რომ ჩირგიის კაშხალში თითო ბლოკის ბეტონის საშუალო ინტერვალი არის 10,5 დღე, ხოლო ბლოკების 60% განთავსდა 8 დღეზე მეტი ინტერვალით. ბზარები უმთავრესად წარმოიშვა ბლოკებში, რომლებიც ბეტონირებული იყო ქვედა ბლოკის დაგებიდან 7 დღეზე მეტი ხნის შემდეგ.

ამ ფაქტორის დიდი გავლენა ბზარებაზე და დაბეტონების პირობებიდან გამომდინარე ინტერვალების მინიჭების აუცილებლობა ნაჩვენებია შესაბამის დოკუმენტში [10]-ში. [11]-ში ასევე აღნიშნულია, რომ 10 დღეზე ნაკლები ხნის განმავლობაში ბეტონის შეფერხებით იქმნება ხელსაყრელი თერმულად დაძაბული მდგომარეობა.

### 1.3 ბეტონირების ტექნოლოგიის ძირითადი

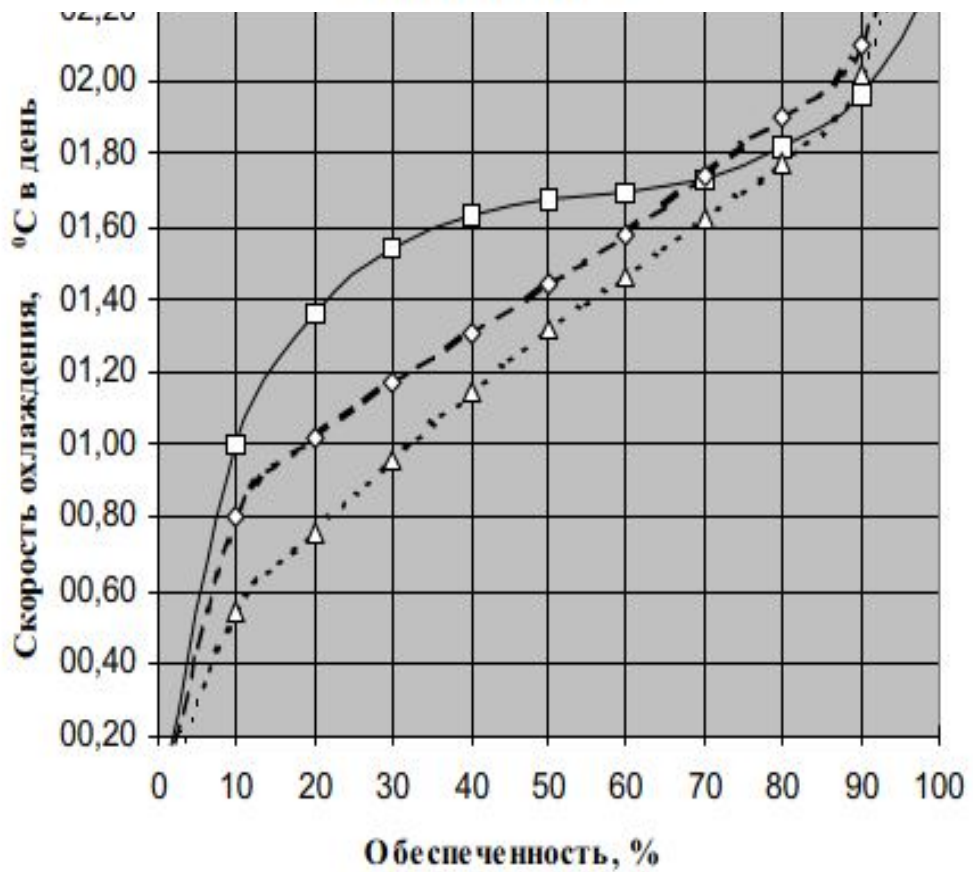
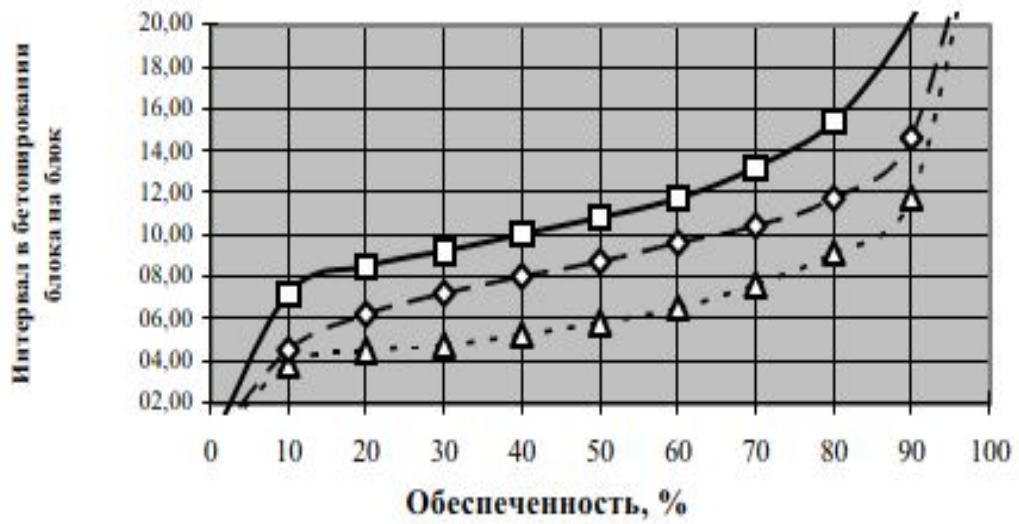
#### პრინციპები

ჩატარებული ანალიზი საშუალებას გვაძლევს ჩამოვაცალიბოთ ახალი ტექნოლოგიის შემდეგი პრინციპები:

1. ბეტონის გაბზარვის თავიდან ასაცილებლად აუცილებელია შემდეგი ძირითადი ღონისძიებები:

- საჭიროა ჩაწყობილი ბეტონის მილების ინტენსიური გაგრილება;
- კაშხლის იარუსიანი ბეტონირება წინმსწრები და ჩამორჩენილი სექციების გარეშე;
- ბლოკის ბეტონირებისას ინტერვალი განისაზღვრება ბეტონის მოსამზადებლად ბლოკის მომზადების პერიოდით, მაგრამ არ უნდა აღემატებოდეს 7 დღეს;

- ბლოკების ჰორიზონტალური ზედაპირის ტემპერატურის მოქნილი კონტროლი;
  - ტემპერატურის კონტროლის სამსახურის ორგანიზება სამშენებლო ბეტონების რეჟიმში;
2. თუ ერთ ბლოკზე ბლოკის ბეტონირების ინტერვალი აღემატება 7 დღეს, ბეტონის ტემპერატურულ რეჟიმზე იგივე მოთხოვნები უნდა დაწესდეს, რაც კლდეზე ბეტონირებისას (ნახ. 1.3.1);
3. ექსტრემალური პირობებისთვის რეკომენდებულია შემდეგი დამატებითი პროდუქტები:
- ბლოკების ჰორიზონტალური ზედაპირის დაფარვა;
  - სადაწნეო და უდაწნეო ზედაპირების თერმული დაცვა;
  - საწყობებში შემავსებლების დაჩრდილვა ან დატენიანება.
4. პირველი პუნქტის მოთხოვნების შესრულებისას არ რეგულირდება: ბეტონის ტემპერატურა - ბეტონირების დროს (ბეტონის და აგრეგატების წინასწარ გაგრილებისთვის სპეციალური დანადგარები არ აიგება და არ გამოიყენება); ცემენტის სითბოს გამოყოფის რაოდენობა; მინიმალური ინტერვალები ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების დროს.



ნახ. 1.3.1 ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალების უზრუნველყოფა.

-- ▲ -- - ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალები მიატლინსკის კაშხალზე (ბზარები არ იქნა შემჩნეული);

- ◆ - ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალები წინმსწრებ სექციების დაუბზარავი ბლოკებისათვის ჩირგვის კაშხალზე;

— □ — ბლოკის ბლოკზე ბეტონირების ინტერვალები წინმსწრებ სექციების ბზარებიანი ბლოკებისათვის ჩირგვის კაშხალზე.

## 1.4 მშენებლობის თანამედროვე მდგომარეობა და კაშხლების

### ტემპერატურული რეჟიმი

#### 1.4.1 ახალი ტექნოლოგიის განვითარების შედეგები

##### მიატლინსკის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობაზე

მიატლინსკის ჰესის თაღოვანი კაშხალი (სრული სამშენებლო სიმაღლე 86,5 მ) მოიცავს საცობს, საყრდენ ბალიშს (უნაგირს), ორმაგი სიმრუდის თაღს გეგმაში წრიული ფორმით (სიმაღლით 73 მ) და ხეობასთან სანაპირო საყრდენებს.

თაღის სისქე ძირში არის 11,5 მ, თხემის გასწვრივ 6,3 მ. სექციათა შორის ნაკერებს შორის საშუალო მანძილი 17,0 მ. ბეტონის მოცულობაა 108900 კუბური მეტრი, მათ შორის თაღოვან ნაწილში 77 200 კუბური მეტრი.

სამშენებლო ტერიტორიის კლიმატური პირობები ხასიათდება ჰაერის საშუალო წლიური ტემპერატურით 12 გრადუსი C. წელიწადში დაახლოებით 40 დღეა ჰაერის საშუალო დღიური ტემპერატურით 0-ზე დაბალი, დაახლოებით 100 დღე - ტემპერატურით პლიუს 20 და 2 დღე - პლიუს 30 გრადუსზე მაღალი ტემპერატურით. ცივი პერიოდი, სადაც შესაძლებელია უარყოფითი ტემპერატურა, შეადგენს 90 დღეს.

მიატლინსკის ჰესის პროექტში მიღებულ იქნა კაშხლის მშენებლობის ტრადიციული სქემა წინმსწრები და ჩამორჩენილი სექციების გამოყენებით (დანართი 3).

## 1.4.2 მშენებლობის დროს მიღებული ბეტონის ტემპერატურის

### რეჟიმის მკაცრი მოთხოვნები

ბეტონის ნარევის ტემპერატურა ბეტონირების დროს არ უნდა იყოს 15 გრადუსზე მაღალი, ბლოკებში ბეტონის მაქსიმალური ტემპერატურა არ უნდა იყოს 42 გრადუსზე მაღალი, ტემპერატურათა სხვაობა ბლოკების ცენტრში და ჰორიზონტალურ ზედაპირზე, არ უნდა აღემატებოდეს 14 გრადუსს, ტემპერატურას შორის განსხვავება ცენტრში და ბლოკების ვერტიკალურ წახნაგებზე - არ უნდა აღემატებოდეს 24 გრადუსს, მდინარის წყლით ბეტონის გაგრილების სიჩქარე, მიღებს შორის 1,5 x 1,5 მ ბიჯის დროს, წყალი პირველ 7 დღის განმავლობაში და არა უმეტეს 11 - 15 გრადუსი ცელსიუსს.

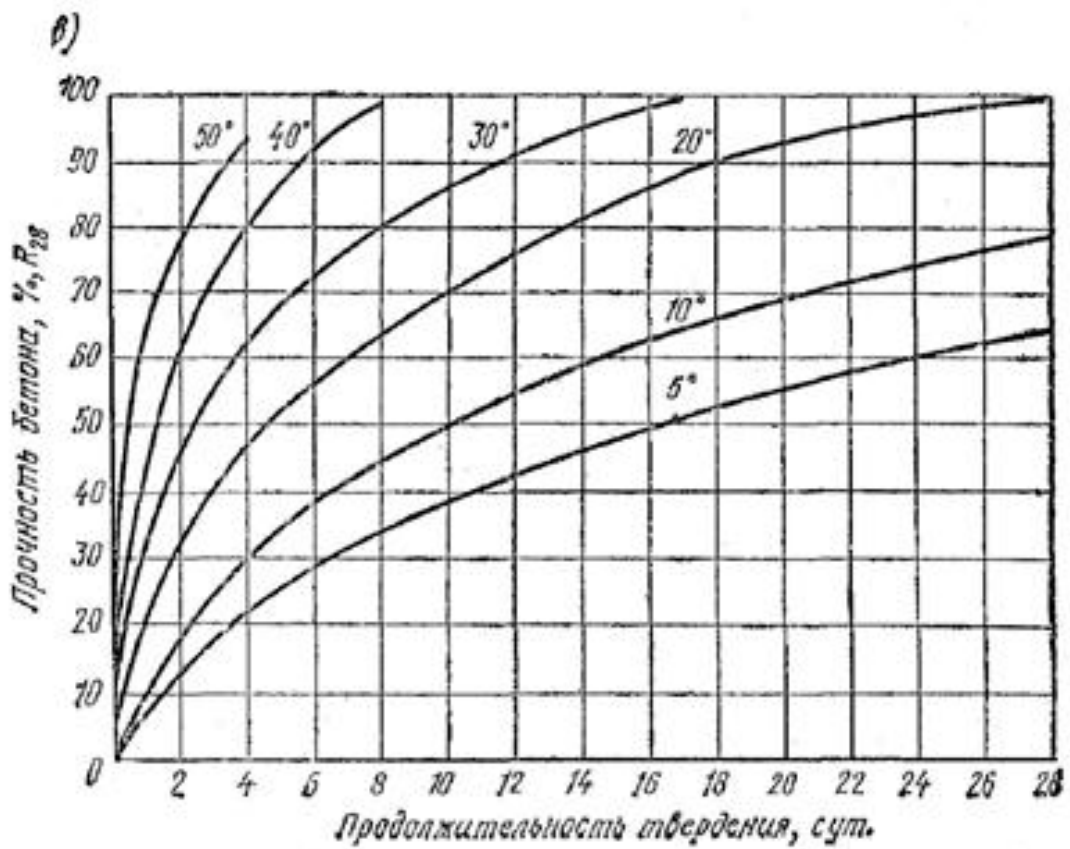
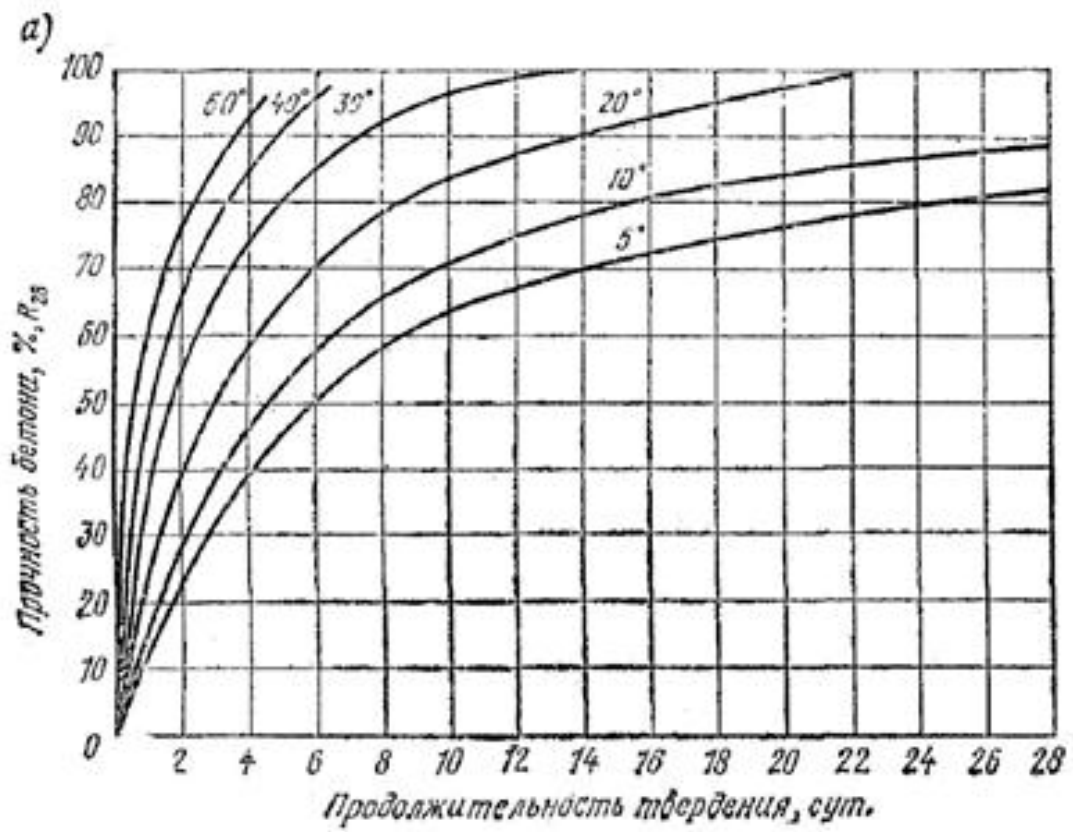
1,5 გრადუსი C დღეში, ბეტონის გაციების სიჩქარე სამაცივრო სადგურიდან წყლით (პლუს 3 გრადუსი C) - ჩართვის შემდეგ პირველ 2 დღეში - არაუმეტეს 1,4, შემდეგ - არაუმეტეს 0,9 გრადუსი C.

ახალი ტექნოლოგია წარმატებით იქნა ათვისებული მიატლინის კაშხლის მშენებლობისას. თაღოვანი კაშხლის ბეტონის მოცულობის 75%-ზე მეტი ჩაწყობილი იქნა დამუშავებული პრინციპების დაცვით.

ამავდროულად, მიღწეული იყო არა მხოლოდ ბეტონირების მაღალი სიჩქარე (საშუალოდ 8 მ თვეში), არამედ უზრუნველყოფილი იყო ბეტონის დაბზარვის პრევენცია. ბლოკების ჰორიზონტალური ზედაპირების (100%), სექციათაშორისი ზედაპირების (100%), სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგების ზედაპირების (90%-მდე) რეგულარული დათვალიერებისას, ახალი ტექნოლოგიის დაცვით ჩაწობილი ბეტონის მასაში ბზარები არ გამოვლენილა. ყოველივე წარმოადგენს ახალი ტექნოლოგიის პრინციპების მართებულობის დამაჯერებელ დადასტურებას.

მშენებლობის პროცესში სავსე კვლევებმა აჩვენა, რომ ბზარების თავიდან აცილების ძირითადი ფაქტორია კაშხლების ბლოკებად ბეტონირების ტექნოლოგია (დანართი 4, 5).

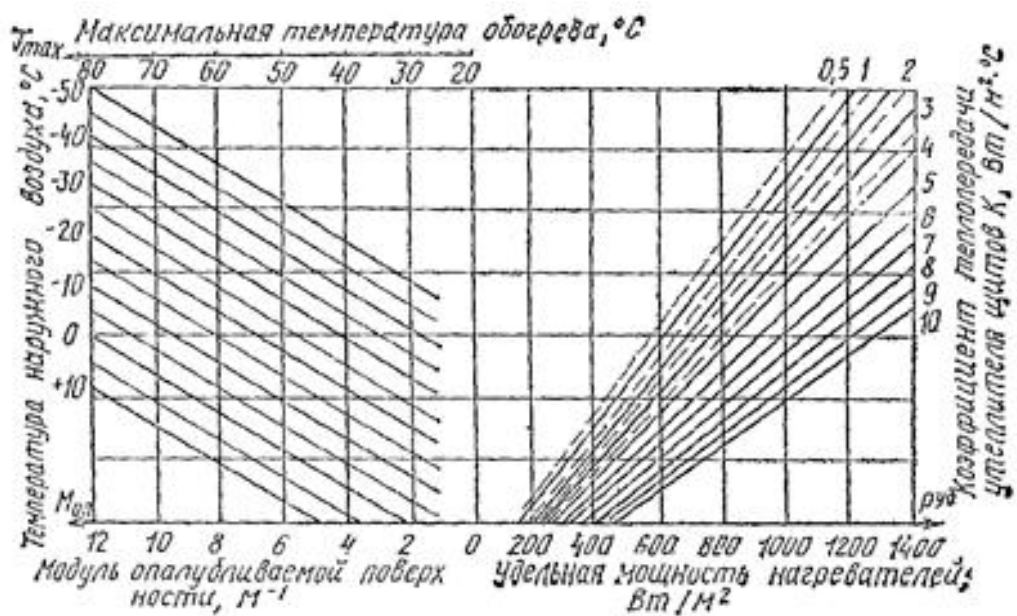




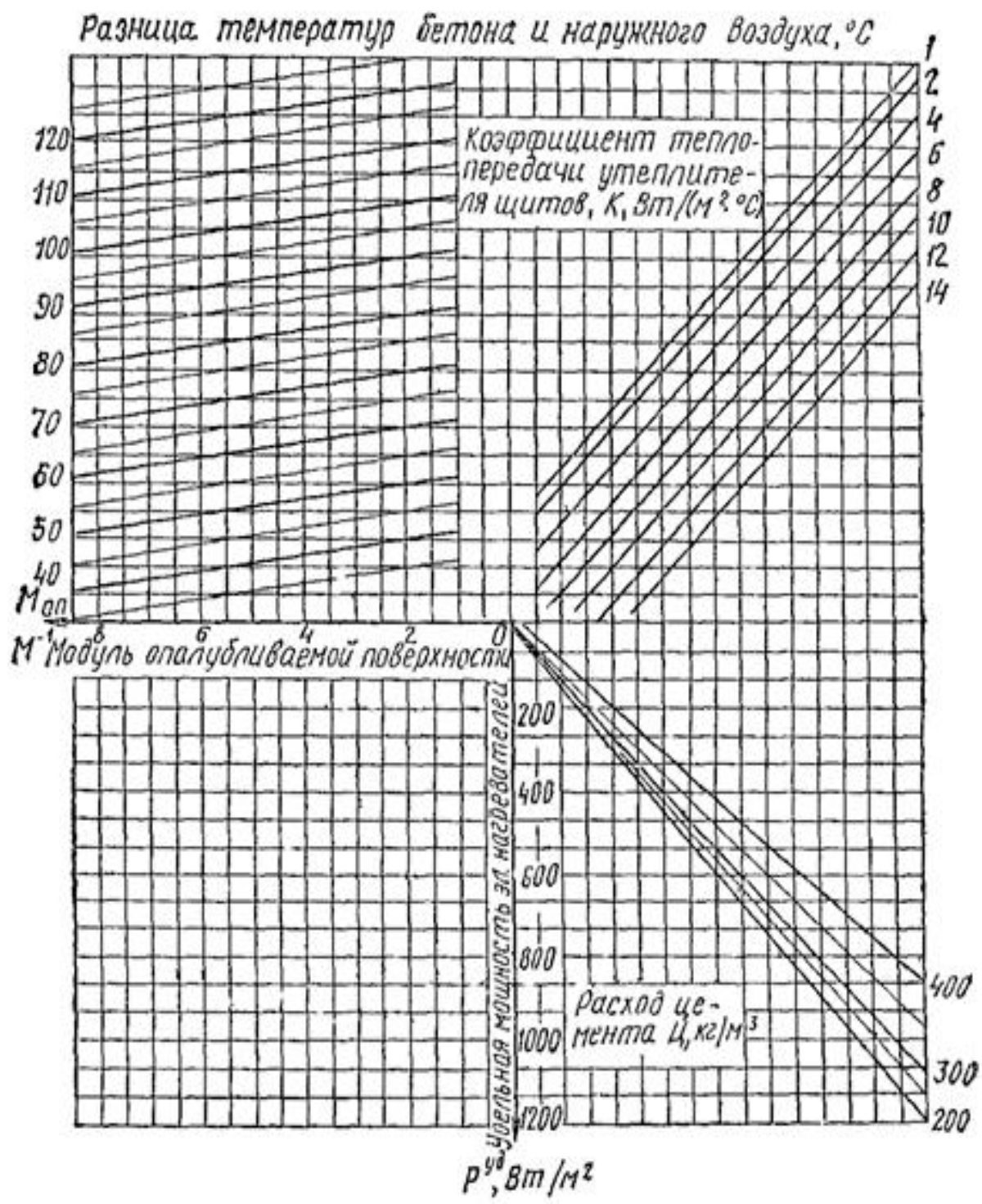
ნახ. 1.4.2.1 მიატლინსკისა და ჩირგეის კაშხლების ბეტონის ბლოკების გაგრილების სიჩქარის მრუდები.



ნახ. 1.4.2.2, 1.4.2.3 მოცემულია ბეტონის ტემპერატურული უზრუნველყოფა ჩაწყოების დროს, რომელიც უზრუნველყოფს ბეტონის მაქსიმალურ ტემპერატურას ბლოკებში 1,5 მ სიმაღლეზე. ბეტონის საშუალო ტემპერატურა ჩაწყოების დროს მიატლინის კაშხალზე იყო 21,9, 22,0 და 23,6 გრადუსი C, ჩირგეის კაშხალზე იმავე თვეებში, როდესაც მუშაობდა საერთო გაგრილების ბლოკები საშუალო ტემპერატურა იყო - 16,3, 17,9 და 18,1 გრადუსი C. ბეტონის მაქსიმალური ტემპერატურა ბლოკებში, რომელთა სიმაღლე იყო 1,5 მ, მიატლინის კაშხალზე 35% შემთხვევაში აღემატებოდა 42-ს და 13%-ს.



ნახ. 1.4.2.2 ყალიბის თბოგაცემის მახასიათებელი მრუდები.



ნახ. 1.4.2.3 ყალიბის თბოგაცემის მახასიათებელი მრუდები.

ჩირგეის კაშხალის შემთხვევაში საშუალო ტემპერატურა აღემატებოდა 45° C გრადუსს, ხოლო მაქსიმალური ტემპერატურა 50° C გრადუსს.

ბეტონის მაღალმა მაქსიმალურმა ტემპერატურებმა არ გამოიწვია ბზარგანვითარება მიატლინსკის კაშხალში, როგორც ეს იყო ჩირგეისა და ენგურის კაშხლებში [8,9], სადაც ბზარები ყველაზე მეტი იყო. ინტენსიური თბილ პერიოდში: 38% გვხვდება ზაფხულში, გაზაფხულზე და ზაფხულში - ბლოკების 80% ბზარებით.

## 1.5 ხუდონ ჰესის თაღოვანი კაშხლის

### მშენებლობის ტექნოლოგია

ხუდონის კაშხალზე ახალი ტექნოლოგიის გამოყენების Miatly გამოცდილების გასავრცელებლად, პირველ რიგში აუცილებელია ამ კაშხლების სამშენებლო უბნების ძირითადი კლიმატური მახასიათებლების შედარება, რომლებიც მოცემულია ქვემოთ:

მიუხედავად იმისა, რომ ხუდონის კაშხლის ტერიტორიაზე ჰაერის საშუალო წლიური ტემპერატურა 1,4 გრადუსით დაბალია და ყინვების ხანგრძლივობა 1,5-ჯერ მეტია, ამ ზონაში ზოგადი პირობები უფრო ხელსაყრელია ტემპერატურული რეჟიმისთვის. ბეტონის ვიდრე მიატლინის კაშხლის მიდამოში. ხუდონის კაშხლის მიდამოში ჰაერის ტემპერატურის მერყეობის ამპლიტუდა გაცილებით ნაკლებია, სხვაობა ივლისის საშუალო წლიურ ტემპერატურასა და ჰაერის საშუალო წლიურ ტემპერატურას შორის უფრო მცირეა (ბეტონის სტაბილურ ტემპერატურამდე გაგრილების რაოდენობა უფრო მცირეა).

მშენებლობის ტექნოლოგია სთან დაკავშირებით ზოგადად გაკეთებული იქნა გარკვეული შენიშვნები:

- ბლოკის ყველაზე დიდი ზომა გეგმაში. საკონტაქტო (კლდოვანი) ზონის სიმაღლეა 0,1 x ლ, გარდამავალი ზონის სიმაღლე 0,1-დან 0,5 x ლ-მდე, თავისუფალი ზონა იწყება 0,2 x ლ სიმაღლიდან.



- ბლოკების სიმაღლე და ბეტონირების ინტერვალები დრო უნდა შეირჩეს ბეტონის მაქსიმალური ტემპერატურის უზრუნველსაყოფად. ახალი ტექნოლოგიით მაქსიმალური ტემპერატურა შემოიფარგლება მხოლოდ კონტაქტური (კლდეზე ან „ძველ“ ბეტონზე ბეტონირებისას) და გარდამავალ ზონებით.

- კონტაქტურ და გარდამავალ ზონებში ბეტონირების დასაშვები ინტერვალი 7 დღეზე ნაკლებია, თავისუფალ ზონაში კი უფრო მეტი. ახალი ტექნოლოგიის მოთხოვნების შესაბამისად, ერთ ბლოკზე ბლოკის ბეტონირების ინტერვალი არ უნდა აღემატებოდეს 7 დღეს. თუ ინტერვალი აღემატება 7 დღეს, ზედა ბლოკში აუცილებელია ტემპერატურის დარეგულირება, როგორც კლდეზე დაბეტონებისას. თავისუფალ ზონაში მინიმალური მანძილი ბლოკის ბეტონის დროს არ არის შეზღუდული. საკონტაქტო ზონაში, ინტერვალი შეიძლება დამოკიდებული იყოს საჭირო მაქსიმალური ტემპერატურის უზრუნველსაყოფად.

- ახალი ტექნოლოგიით მილების გაგრილების შეფერხებები დაუშვებელია.

- ბეტონის მაქსიმალური დასაშვები გაგრილების სიჩქარეა 1 გრადუსი C დღეში. ბეტონის გაგრილების სიჩქარით 1 გრადუსი C დღეში, ყველაზე დიდი ზხარის წარმოქმნა დაფიქსირდა ჩირგეის კაშხლის მშენებლობაზე, რომლის ინტენსივობა შემცირდა, როდესაც გაციების სიჩქარე გაიზარდა 2,5 გრადუსამდე დღეში. ახალი ტექნოლოგიით გაგრილების სიჩქარე შეზღუდული არ არის. მილის 1,50 x 1,50 მ ზომებით, ტემპერატურის პიკიდან პირველ 3-5 დღეში, გაგრილების სიჩქარე არ აღემატება 2,5 გრადუსს დღეში, შემდეგ კი მცირდება.

- გაციების მილის გადართვა მდინარის წყლიდან გაცივებულ წყალზე უნდა მოხდეს ბეტონის 22 გრადუსამდე გაციებისას. ახალი ტექნოლოგიით მდინარის წყლის დაბალი ტემპერატურის გათვალისწინებით, გადართვა გაცივებულ წყალზე უნდა გაკეთდეს მაშინ, როდესაც სხვაობა ბეტონისა და წყლის ტემპერატურებს შორის აღწევს 3-7 გრადუსს.

- მაქსიმალური სხვაობა ბეტონისა და გამაგრილებელი წყლის ტემპერატურას შორის პირველ ეტაპზე აღწევს 30° და მეორე ეტაპზე 20° C.

მიღების მახლობლად ხელსაყრელი დამაბულობი მდგომარეობის შესაქმნელად, დაბეტონებამდე უნდა ჩაერთოს მიღებით გაგრილება, რომელიც დასაშვებია, როდესაც განსხვავება ბეტონისა და წყლის ტემპერატურებს შორის აღწევს 40 გრადუსამდე. ახალი ტექნოლოგიით ბეტონისა და წყლის ტემპერატურებს შორის სხვაობა ვერ შეიზღუდება და ვერ გადააჭარბებს მითითებულ ზღვრებს. ვინაიდან თავდაპირველად გაცივება ხდება მდინარის წყლით და გადადიან გაცივებულ წყალზე, როცა განსხვავება ბეტონისა და წყლის ტემპერატურას შორის მერყეობს 3-7 გრადუსამდე.

- კაშხლის ყველა ზონისთვის, ტემპერატურათა დასაშვები მაქსიმალური განსხვავებები ბლოკის ცენტრში და მის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე შეადგენს: C 14 გრადუს - ბლოკის ცენტრში და, მის გვერდებზე - C 24 გრადუს. ახალი ტექნოლოგიით იგივე მოთხოვნები შენარჩუნებულია მითითებული ტემპერატურის სხვაობებზე.

- კლდის ფუძის გავლენა ბეტონში ძაბვაზე თანდათან მცირდება მისგან დაშორებით.

- თავისუფალ ზონაში, ბეტონის დასაშვები ტემპერატურა დაბეტონების დროს არის C 15 გრადუსი, მე-2 ეტაპზე ბეტონის დასაშვები გაგრილების სიჩქარე არ არის C 1 გრადუსზე მეტი დღეში. ახალი ტექნოლოგიით ბეტონის ტემპერატურა დაბეტონების დროს, ბეტონის მაქსიმალური ტემპერატურა და თავისუფალ ზონაში მისი გაგრილების სიჩქარე შეზღუდული არ არის. ბლოკების სიმაღლე აღებულია 1,50-ის ტოლად.

- უნდა აღინიშნოს, რომ 7 დღის ინტერვალით ბლოკის დაბეტონებისას და სპეციფიკაციაში მითითებულ თვეში ბეტონის დაბეტონების სიჩქარით 40,000 კუბ.მ, ბლოკებით 3,00 მ-ზე მეტი სიმაღლით პრაქტიკულად შეუძლებელია.

- კაშხლის ყველა ზონაში ზედაპირული გაგრილების ან ბლოკების თერმული დაცვის რეჟიმების შესახებ კონკრეტული რეკომენდაციები დაუყოვნებლივ უნდა იყოს გაცემული სამშენებლო ტემპერატურის კონტროლის სამსახურის მიერ კლიმატური მახასიათებლების მოკლევადიანი პროგნოზის შესაბამისად, ბეტონისა და ფუძის ტემპერატურების გათვალისწინებით.

## 1.6 ტრადიციული ტექნოლოგიით, ბეტონის ტექნიკური მახასიათებლების რეგულირება

ტრადიციული ტექნოლოგიით, ტექნიკური მახასიათებლების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად ბეტონის ნარევის ტემპერატურის დაყენების დროს საჭიროა მვირადღირებული ზომების (ენერგოტევადი და ლითონის კონსტრუქციების) გატარება. ახალი ტექნოლოგიით, ბზარების თავიდან ასაცილებლად, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს: ბეტონის მიღების უწყვეტი გაგრილებას, ბლოკის ბლოკზე დაბეტონების ინტერვალების დაცვას (არაუმეტეს 7 დღისა), კაშხლის შრეებად (წინმსწრები მონაკვეთების გარეშე) მშენებლობა და დროებითი თერმული დაცვა.

თუ ტრადიციული და ახალი ტექნოლოგიით თერმული დაცვის ხარჯები დაახლოებით ერთნაირია, მაშინ ახალი ტექნოლოგიით სრულდება შემდეგი მოთხოვნები:

- დაბეტონების დროს ბეტონის ნარევის ტემპერატურის შეზღუდვის გაუქმების შედეგად, გამორიცხულია კომპონენტების წინასწარ გამაგრილებელი დანადგარების მშენებლობისა და ექსპლუატაციის ხარჯები;
- უწყვეტობისა და გაგრილების სიჩქარის შეზღუდვის გაუქმების გამო კაშხლის გაგრილების დაჩქარების შედეგად, მცირდება სამაცივრო სადგურის საექსპლუატაციო ხარჯები მიღების გაგრილებისთვის განკუთვნილი წყლის გაგრილებისთვის;
- მშენებლობის დაჩქარების შედეგად ბლოკის ბეტონირებისას მინიმალური ინტერვალების შეზღუდვის აღმოფხვრის შედეგად და სამუშაო ნაკადის უკეთ ორგანიზების გამო ბლოკების იარუსებად დაბეტონების დროს, პირობითად ფიქსირებული დანახარჯები წყალქცევაზე, აგრეთვე ამწე და სხვა აღჭურვილობასა და ექსპლუატაციიზე - შემცირებული იქნა.

აღნიშნულ საკითხებთან დაკავშირებით მნიშვნელოვანია გიუნტერის როლი (1959 წლიდან მუშაობს რუსეთში - სსრკ-ში) ბეტონის ტემპერატურული რეჟიმის



რეგულირებისა და ბეტონის მასიური კონსტრუქციების ბზარების პრევენციის პრობლემებზე, მათ შორის ბეტონის კაშხლების მშენებლობაზე [7]. მათ შორის:

ბუხტარმის, ბრატსკის, კრასნოიარსკის, უსტ-ილიმსკის, ტოქტოგულის, კურფსაის, ტაშკუმირსკის, ბურეის, კრაპივინსკაიას, ვილიუსკის - გრავიტაციული, ჩირკეის, ენგურის, მიატლინსკის, ხუდონის - თაღოვანი, საიანო-შუშენსკის - თაღოვან-გრავიტაციული, მშენებლობაზე.

ზემოთ ჩამოთვლილი კაშხლებიდან რვა აშენდა ციმბირისა და შორეული ჩრდილოეთის ცივ პირობებში, რვა ცენტრალური აზიისა და კავკასიის ცხელ პირობებში.

ინჟინერი გიუნტერი ზედამხედველობდა ლაბორატორიულ და სრულმასშტაბიან კვლევებს, ტესტების, შემუშავებას, კორექტირებას, შემდეგი მეთოდების შენარჩუნებას:

- ბეტონის კონსტრუქციებში ტემპერატურისა და თერმული ძაბვების გაანგარიშების მეთოდები. ცემენტების და ბეტონების სითბოს გამოყოფის განსაზღვრა. ბეტონისა და ბაზის თერმული დაცვა გაყინვისგან. ზედაპირული შემოწმება. ბლოკის ზედაპირების შემოწმება და ბზარების აღრიცხვა. ბეტონის მიღების გაგრილება.

- ბლოკების ზედაპირის გაგრილება წყლით მორწყვით და დატენიანებით ზედაპირის სითბოს ბალანსის ყველა კომპონენტის გაზომვით: სითბოს გადაცემა, მასის გადაცემა (აორთქლება, კონდენსაცია) და მზის გამოსხივება. ბეტონის თერმოფიზიკური მახასიათებლების გაზომვა (მოცულობითი წონა, თბოტევადობა, თბოდიფუზიურობა, თბოგამტარობა). მაღალი ხარისხის სტანდარტული ბეტონის მოსამზადებლად გაყინული, მსხვილი აგრეგატების გამოყენების პირობების დასაბუთება. დანადგარები ყინულის ნამსხვრევების დასამატებლად წყლის ნაწილის შერევის ნაცვლად. ორთქლის ექვეტორის დანადგარები ქვიშის გაგრილებისთვის. მსხვილი აგრეგატების დამატებითი გაგრილების დაყენება ბეტონის ქარხნის საკვების ურნაში ცივი ჰაერის მიწოდებით. დიდი აგრეგატების ცივი წყლით გაგრილების ინსტალაციები სპეციალურ ურნებში (როდესაც წყალი მიეწოდება ურნას ზემოდან და ქვემოდან)

და დიდი აგრეგატების ცივი წყლით დამატებითი გაგრილება საკონტროლო დახარისხების მოედნებზე.

- ყველა ზემოაღნიშნული დანადგარის დაყენებისას ჩატარდა სითბოს გადაცემის და მასის გადაცემის პროცესების შესწავლა ქვიშისა და დიდი აგრეგატების გაგრილების ან გათბობისთვის ოპტიმალური პარამეტრების შესარჩევად (სითბოს გადამზიდავი ტემპერატურა, პროცესის ხანგრძლივობა).

- სხვადასხვა სახის კვლევებისა და გაზომვების ჩატარების მიზნით თაღოვანი კაშხლების ტანში გრავიტაციულის ანალოგიურად ეწყობა გალერეები. ეს გალერეები ასევე გამოიყენება ცემენტაციის სამუშაოების ჩატარების დროს ბლოკებს შორის არსებული ნაკერების შესავსებად. ჰორიზონტალური გალერეებს შორის კომუნიკაცია ხორციელდება შახტების გამოყენებით.

ხელსაყრელი გარემო პირობებში თაღოვანი კაშხლები წარმოადგენენ ყველაზე ეკონომიურ საიჟინრო გადაწყვეტას. ასე მაგალითად, ჩირკეის ჰიდროელექტროსადგურის კაშხლის პროექტირებისას ადგილობრივი მასალისგან დამზადებული კაშხლის ვარიანტი უარყოფილი იქნა მისი უპირატესობის მიუხედავად, რაც გამოიხატება ცემენტის ეკონომიით. ადგილობრივი მასალის კაშხლის ვარიანტი მოითხოვდა დიდ ინვესტიციებს და ამავე დროს ხანგრძლივ მშენებლობის პერიოდს. ამდენად, მთლიანობაში უპირატესობა მიენიჭა თაღოვანი კაშხლის ვარიანტს და შესაბამისად, დაპროექტებული იქნა თაღოვანი კაშხალი პარამეტრებით: სიმაღლე - 230 მ, თალის სისქე თავზე - 6 მ და ძირში - 32 მ.

ამდენად, კვლევების [81,82,83,84] მიმოხილვის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა:

ბეტონის კაშხლების მშენებლობის პროცესში (საველე კვლევების შედეგების მიხედვით), მიღებული იქნა, რომ ბზარების თავიდან აცილების ძირითადი ფაქტორებია ბლოკებად წარმოებული ბეტონირების ინტერვალები, მიღების გაგრილების უწყვეტობა და იარუსებად ბეტონირება წინმსწრები სექციების გარეშე.

ხუდონის კაშხლის ტერიტორიაზე ჰაერის საშუალო წლიური ტემპერატურა 1,4 გრადუსით დაბალია და ყინვების ხანგრძლივობა 1,5-ჯერ მეტია, ვიდრე მიატლის კაშხლის რაიონში. ამდენად, ამ ზონაში ბეტონირებისათვის

ანალოგიური სქემის გამოყენებისას ზოგადი პირობები უფრო ხელსაყრელია ბეტონირების ტემპერატურული რეჟიმის შესაქმნელად.

ხუდონის კაშხლის ტერიტორიაზე ჰაერის ტემპერატურის მერყეობის ამპლიტუდა გაცილებით ნაკლებია, სხვაობა ივლისის საშუალო თვიურსა და ჰაერის საშუალო წლიურ ტემპერატურას შორის უფრო მცირეა.

- ბზარების თავიდან ასაცილებლად, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს: ბეტონის მიღების უწყვეტი გაგრძელების სისტემის არსებობას;
- ბლოკების ბეტონირების ინტერვალების დაცვას (არაუმეტეს 7 დღისა);
- მშენებლობის წარმოებას იარუსებად (წინმსწრები ბლოკების გარეშე) და;
- კაშხლის წახნაგების დროებითი თერმულ დაცვას (საჭიროების შემთხვევაში) ტემპერატურული ვარდნისგან.

## 2. კაშხლის არასტაციონალური თბური რეჟიმის კვლევა

### 2.1 სასრულ-ელემენტული მოდელის დამუშავება ორგანზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში

ბეტონის კაშხლებისათვის თბური რეჟიმის გამოკვლევა ზოგადად წარმოადგენს არასტაციონალური თბოგამტარობის ამოცანას [85,86].

საკითხის შესწავლა განიხილება ორგანზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში, თბოგამტარობის განმსაზღვრელი განტოლება წარმოდგინდება კვაზიჰარმონიული დიფერენციალური განტოლების სახით.

$$K_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + Q = \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

სადაც:

$\varphi$  - ტემპერატურული ველია;

$k_x, k_y$  - ტემპერატურის გამტარობის კოეფიციენტებია X და y ღერძების მიმართულელებით შესაბამისად;

$Q$  - სითბოს რაოდენობაა;

$\lambda$  - სითბოს თბოგადაცემის კოეფიციენტი;

$t$  - დრო.

(2.1.1)-თან დაკავშირებით ფუნქციონალს ააქვს სახე:

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} [K_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - 2(Q - \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial t})\varphi] dV + \int_{S_1} q \varphi dS + \int_{S_2} \frac{h}{2} [\varphi^2 - 2\varphi \varphi_\infty + \varphi_\infty^2] dS \quad (2.1.2)$$

(2.1.2) ფუნქციონალის წარმოდგენა ელემენტების მონაწილეობით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\chi_Q = \sum_{e=1}^N \int_V \varphi^{(e)} [\frac{\partial \{\varphi\}}{\partial t} - Q^{(e)}] dV \quad (2.1.3)$$

ელემენტის ტემპერატურული ველის ფუნქცია განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\varphi^e = [N^e] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

სადაც,  $[N^e]$  - ელემენტების ფორმის ფუნქციაა. (2.1.4)-ს დიფერენცირების შედეგად მიიღება:

$$\frac{\partial \varphi^e}{\partial t} = [N^e] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} \quad (2.1.5)$$

$[N^e]$  - წარმოადგენს კოორდინატების ფუნქციას და არაა დამოკიდებული დროზე. (2.1.5) და (2.1.4)-ს გათვალისწინებით (2.1.3) მიიღება:

$$\chi_Q = \sum_{e=1}^N \int_V (\lambda [N^e] \{\phi\} [N^e] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} - [N^e] \{\phi\} Q) dV \quad (2.1.6)$$

წარმოდგენილი ინტეგრალების ჯამის მინიმიზაცია სრულდება  $\{\phi\}$ -ით. (2.1.6) -ის დიფერენცირებით  $\{\phi\}$  -ით მიიღება:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{\phi\}} = \sum_{e=1}^N - \int_V [N^e]^T Q dV + \sum_{e=1}^E \lambda \int_V [[N^e]^T [N^e] dV] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} \quad (2.1.7)$$

(2.1.7) -ის გაერთიანებით (2.1.2) საბოლოოდ, დროითი ინტეგრალის ფუნქციონალის მინიმიზაციის შედეგად საბოლოოდ, (2.1.1) დაიყვანება პირველი რიგის დიფერენციალურ განტოლებაზე:

$$[C] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} [K] \{\phi\} + \{F\} = 0 \quad (2.1.2) \quad (2.1.8)$$

წარმოდგენილ  $n$  განტოლებათა სისტემაში  $[K]$ ,  $[C]$  და  $\{F\}$  გაიანგარიშება ფორმულებით:

$$[c^e] = \int_V \lambda [N]^T [N] dV \quad (2.1.9)$$

$$[k^e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_V h [N]^T [N] dS \quad (2.1.10)$$

$$[f^e] = \int_V Q [N]^T dV + \int_{S_1} q [N]^T dS - \int_{S_2} h \Phi_\infty [N]^T dS \quad (2.1.11)$$

მატრიცა  $[C]$  მოიხსენება, როგორც დემფირირების მატრიცა.

$[c^e], [k^e], [f^e]$  წევრების გაანგარიშება ცალკეული ელემენტებისათვის სწარმოებს დამოუკიდებლად, ხოლო (2.1.2) ინტეგრალის გაანგარიშება ხორციელდება სასანგარიშო სისტემაში შემავალი  $n$  ელემენტების აჯამების გამოყენებით.

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

$[N]$  - ელემენტების ფორმის ფუნქციაა;

$[D]$  - მატრიცა შეიცავს თბოგამტარობის კოეფიციენტებს. ცალკეული ელემენტისათვის იგი იანგარიშება ფორმულით:

$$[D^e] = \begin{bmatrix} K_x^e & 0 \\ 0 & K_y^e \end{bmatrix} \quad (2.1.12)$$

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

$$[D] = [T][D]^T [T]^T$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \cdot \cos \beta & -\sin \beta \cdot \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (2.1.13)$$

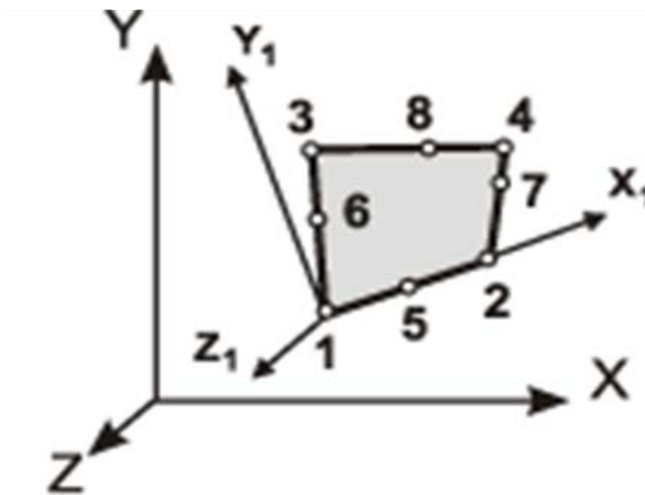
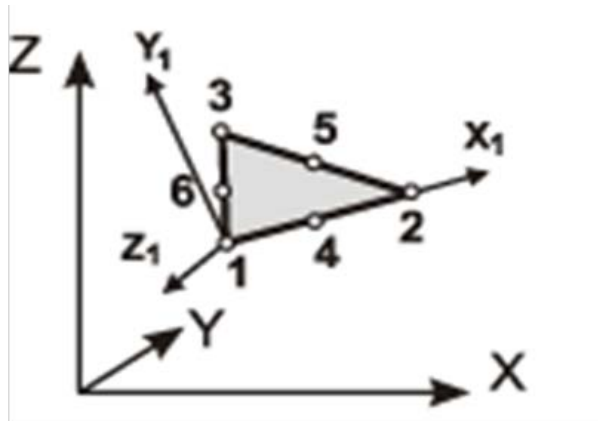
$\beta$  - კუთხეა კოორდინატა სისტემის ღერძებს შორის.

გაანგარიშება სრულდება სასრულ-ელემენტული მოდელის გამოყენებით იტერაციული თანმიმდევრობით.

## 2.2 ორგანზომილებიანი სიმპლექს ელემენტი

ფუნქციის მატრიცას ორგანზომილებიანი სიმპლექს ელემენტისათვის  $L$  კოორდინატებში აქვს სახე:

$$[N] = [L_1 \ L_2 \ L_3] \quad (2.2.1)$$



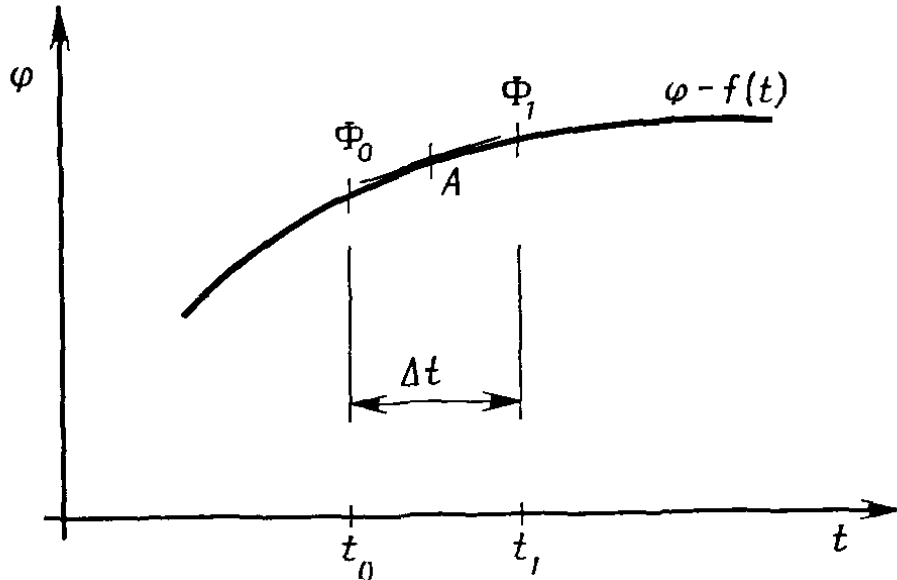
ნახ. 2.2.1. ორგანზომილებიანი იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები.

ერთეულოვანი სისქის ელემენტისათვის ინტეგრალი (2.1.9) საბოლოოდ დებულობს სახეს:

$$[C^e] = \lambda \int_A \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} [L_1 \ L_2 \ L_3] dA = \frac{\lambda A}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

## 2.3 დიფერენციალური განტოლების ამოხსნა სასრული სხვაობების მეთოდის გამოყენებით

იმისათვის, რომ დროითი ინტეგრალის ნებისმიერ წერტილში მიღებული იქნას  $\{\Phi\}$  საჭიროა ამოხსნილი იქნას (2.1.10) დიფერენციალური განტოლება. წარმოდგენილ გაანგარიშებებში გამოიყენება სასრული სხვაობების მეთოდი.



ნახ. 2.3.1 პირველი წარმომებული რიცხვითი გაანგარიშება.

განიხილება  $\Delta t = t_1 - t_0$  უბანზე 2 წერტილი აბცისებით  $t_0$  და  $t_1$ .

პირველი წარმომებული  $A$  წერტილში ტოლია (ნახ. 2.2.1):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_1 - \phi_0}{\Delta t} \quad (2.2.1)$$

$$\frac{\partial \{\Phi\}}{\partial t} = \{\Phi'\} = \frac{1}{\Delta t} (\{\Phi\}_1 - \{\Phi\}_0) \quad (2.2.2)$$

რადგანაც  $\{\Phi'\}$  გაიანგარიშება დროითი ინტეგრალის შუა წერტილში, ამიტომ ამავე წერტილში საჭიროა გაანგარიშებული იქნას  $\{\Phi\}$  და  $\{F\}$ .

$$\{\Phi'\} = \frac{1}{2} (\{\Phi\}_1 + \{\Phi\}_0) \quad (2.2.3)$$

$$\{F'\} = \frac{1}{2} (\{F\}_1 + \{F\}_0) \quad (2.2.4)$$

(2.2.2), (2.2.3), (2.2.4) მნიშვნელობების გათვალისწინებით (2.1.2)-ში მიიღება:



$$\frac{1}{\Delta t} [C]\{\Phi\}_1 - \frac{1}{\Delta t} [C]\{\Phi\}_0 + \frac{1}{2} [K]\{\Phi\}_1 + \frac{1}{2} [K]\{\Phi\}_0 + \{F\}^* = 0 \quad (2.2.3)$$

$$([K] + \frac{2}{\Delta t} [C]) \{\Phi\}_1 = (\frac{2}{\Delta t} [C] - [K])\{\Phi\}_0 - 2\{F\}^* \quad (2.2.4)$$

$$[A]\{\Phi_n\} = [P]\{\Phi_0\} - \{F\} \quad (2.2.5)$$

სადაც,  $[A]$  არის  $[C]$  და  $[K]$  მატრიცების კომბინაცია დამოკიდებულია დროის ბიჯზე  $\Delta t$ .

## 2.4. ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ტემპერატურული ველის გაანგარიშება

ენგურჰესის კაშხლის ტემპერატურული ველის გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა დამუშავებული საანგარიშო პროგრამისა და მოდელის მიხედვით არასტაციონარული თბოგამტარობის ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. ქვემოთ მოყვანილია თბური ველის შესწავლა კაშხლის ტანში დროის სხვადასხვა პერიოდებისათვის.

### 2.4.1 გაანგარიშების სასაზღვრო პირობები თაღოვანი კაშხლის უდაწნეო წახნაგის მხრიდან

ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა ენგურჰესის კაშხლის მშენებლობის რაიონში მიღებული იქნა მისი მარავალწლიანი დაკვირვების მონაცემების საფუძველზე,

ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობის ამსახველ ფუნქციაში – კოსინუსოიდაში შემავალი პარამეტრები საშუალო წლის შემთხვევაში ტოლია:

მრავალწლიანი საშუალო ტემპერატურა -  $12,27^{\circ}\text{C}$ ;

ტემპერატურის სეზონური რხევის ამპლიტუდა წელიწადის განმავლობაში -  $9,13^{\circ}\text{C}$ ; კოსინუსოიდის საწყისი ფაზა -  $3,42$ .

ყველაზე ცხელი წელიწადისთვის აღნიშნული პარამეტრები ტოლია, შესაბამისად: 13,40°C-ის, 9,92°C-ისა და -3,60-ის.

კაშხლის ღია ზედაპირების ტემპერატურის განსზღვრისას, რომლებზედაც გავლენას ახდენს მზის გამოსხივება, აუცილებელია მის მიერ გამოწვეული დამატებითი გათბობის გათვალისწინება. დედამიწის საშუალო განედებზე კაშხლების მშენებლობის გამოცდილების მიხედვით მათი ზედაპირების დამტებით გათბობა შეადგენს  $\approx 9^{\circ}\text{C}$  ზაფხულში და  $\approx 2^{\circ}\text{C}$  ზამთარში[3].

ენგურჰესის კაშხლისათვის მისი ზედაპირების დამატებითი გათბობა ადგილობრივი პირობების გათვალისწინებით შეიძლება იქნას ზაფხულში 4,0°C-ის და ზამთარში 2°C -ის ტოლად. შესაბამისად, ჰაერის ტემპერატურის საპროექსიმაციო ფორმულაში სათანადო პარამეტრები ტოლი იქნება:

ა) საშუალო წლისთვის

$$T_{\text{საშ}} = 12,27 + \frac{4+2}{2} = 15,27^{\circ}\text{C};$$

$$A = 9,13 + \frac{4-2}{2} = 10,13^{\circ}\text{C};$$

ა) ცხელი წლისთვის

$$T_{\text{საშ}} = 13,40 + \frac{4+2}{2} = 16,40^{\circ}\text{C};$$

$$A = 9,22 + \frac{4-2}{2} = 10,92^{\circ}\text{C};$$

ანგარიში ჩატარებული იქნა, აგრეთვე ჰაერის ტემპერატურის სეზონურ ცვალებადობაზე 2001 წელს ჩატარებული დაკვირვებების შედეგების მიხედვით, რომელიც დამუშავებულ იქნა ჩვენს მიერ ჩატარებული კომპიუტერული გაანგარიშებების გამოყენებით.

კოსინუსოიდის პარამეტრების მნიშვნელობები მზის გამოსხივებით გამოწვეული დამატებითი გათბობის გათვალისწინებით ტოლია, შესაბამისად:

ა) საშუალო წლიური ტემპერატურა  $T_{საშ} = 15,87 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; რხევის ამპლიტუდა  $A = 67 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; კოსინუსოიდის საწყისი ფაზა  $\varphi = -3,42$ .

გაანგარიშებებში გამოყენებული იქნა ენგურჰესის წყალსაცავში წყლის დონის ცვალებადობაზე 2001 წლის დაკვირვებების მონაცემები.

გაანგარიშებების შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ საწყისი მონაცემების სახით გამოყენებულია ამ კაშხლის ბეტონის თბოტექნიკური მახასიათებლების მნიშვნელობები, მიღებული მათი მრავალწლიანი გამოკვლევების ანალიზის საფუძველზე. გამოკვლევები შესრულებულია საშუალო წლისათვის.

გაანგარიშებათა შედეგებთან ერთად მოყვანილია კაშხლის მე-15 სექციაში ჩაწყობილი თერმომეტრების მიხედვით განსაზღვრული ტემპერატურების მნიშვნელობები მის 402 და 450მ ნიშნულებზე სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგებზე, ცენტრალურ (ბირთვულ) ზონაში.

თეორიული გაანგარიშებების შედეგები გაანალიზებულია ნატურული ექსპერიმენტული დაკვირვების მონაცემებთან ერთად.

#### 2.4.2 გაანგარიშების სასაზღვრო პირობები თაღოვანი კაშხლის სადაწნეო წახნაგის მხრიდან

კაშხლის სადაწნეო ზედაპირზე (წყალსაცავში წყლის დონის ფარგლებში) სრულდება სასაზღვრო პირობა  $T = T_w$ , სადაც  $T_w$  - წყლის ტემპერატურის მნიშვნელობაა კაშხლის ზედაპირის განსახილველი კვეთის დონეზე.

წყლის ტემპერატურა წყალსაცავში ნშდ=510მ დონის დაბლა 80 მ-მდე განისაზღვრება ფორმულით.

$$T_w = T_k + (mT_A - T_k) \left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right)^2$$

სადაც:

$T_w$  - წყლის ტემპერატურაა განსახილველი კვეთის დონეზე;

$T_A$  - ჰაერის ტემპერატურა;

$m$  - კოეფიციენტი, რომელიც მიიღება 0.5 -ის ტოლად;

$Z$  - წყალსაცავის ზედაპირიდან კვეთის ჩაღრმავება;

$z_0$  - წყალსაცავის სიღრმე, რომლის დაბლა ტემპერატურა მიიღება მუდმივად;

$T_k$  - წყლის ტემპერატურა წყალსაცავის  $z_0$  სიღრმეზე.

საზოგადოდ, წყალსაცავში 80მ-ზე მეტ სიღრმეზე წყლის ტემპერატურა მიიღება  $\approx 4^{\circ}C$  -ის ტოლად.

ენგურჰესის წყალსაცავში ჩატარებული კვლევების შედეგად დადგენილ იქნა, რომ 70-80მ-ის სიღრმეზე და უფრო ქვევით წყლის ტემპერატურა მუდმივია დროის გარკვეულ მომენტში, მაგრამ იცვლება დროში. მაგალითად, 1998წ-ის 13 მაისს იცვლებოდა საზღვრებში  $6.2^{\circ}$ - $6.6^{\circ}$ , ხოლო 31 ივლისს  $10.7^{\circ}$ - $11.4^{\circ}$ -ის ფარგლებში.

➤ კაშხლის იმ ზედაპირების ტემპერატურა, სადაც ადგილი აქვს კონტაქტს ბეტონსა და გარემოს ჰაერს შორის, განისაზღვრება ფორმულით:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\beta}{\lambda} (T_{\delta} - T_{\phi}) ,$$

სადაც  $\beta$  - თბოგადაცემის კოეფიციენტი,  $\lambda$  - თბოგამტარობის კოეფიციენტი,  $T_{\delta}$  - გარემოს, ჰაერის ტემპერატურაა,  $T_{\phi}$  - კაშხლის ზედაპირის ტემპერატურა.

➤ გარემოს ტემპერატურა განისაზღვრება ფორმულით:

$$T_{\delta} = T_0 + A \cos \left( \frac{2\pi}{\omega} - \phi \right) ;$$

სადაც:  $T_0$  - გარემოს საშუალოწლიური ტემპერატურაა;  $A$  - გარემოს ტემპერატურის რხევის ამპლიტუდა;  $\omega$  - საათების საშუალო რაოდენობაა წელიწადში ( $\omega = 8640$ );  $\phi$  - კოსინუსოიდის საწყისი ფაზა.

➤ კაშხლისა და მისი ფუძის კონტაქტის უსასრულოდ თხელ ფენაში მიიღება ამ საზღვარზე მათი ტემპერატურებისა და მასზე გამავალი თბური ნაკადების ტოლობის პირობა:

$$T_{კ,საზღვ} = T_{ფ,საზღვ}; \quad \lambda_{კ} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{კ} = \lambda_{ფ} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{ფ}.$$

ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით საანგარიშო მოდელი (ნახ.1) შედგენილი იქნა კაშხლის ცენტრალური კვეთისათვის ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. ზადის ერთეულად გამოყენებული იქნა მართკუთხა და სამკუთხა ელემენტები ტემპერატურული ველის კვადრატული აპროქსიმაციით.

საწყისი მონაცემების სახით გამოყენებულია ამ კაშხლის ბეტონის თბოტექნიკური მხასიათებლების მნიშვნელობები, მიღებული მათი მრავალწლიანი გამოკვლევების ანალიზის საფუძველზე.

გამოკვლევები შესრულებულია საშუალო, ყველაზე ცხელი და 2001 წელს ჩატარებული დაკვირვებების მონაცემების გამოყენების საფუძველზე.

### 2.4.3 ენგურჰესის კაშხლის ტემპერატურული ველის ანალიზი ნატურული დაკვირვების შედეგების გათვალისწინებით

ნატურული გამოკვლევები კი შესრულებული იქნა 2007 წ. ენგურჰესის კაშხლის მე-15 სექციის 402 და 450მ ნიშნულებზე მდებარე ჰორიზონტალურ კვეთებში ჩაწყობილი TS ტიპის ელექტროთერმომეტრების გამოყენებით. ტემპერატურები იზომებოდა კაშხლის სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგებზე და მის ცენტრალურ (ბირთვულ) ზონაში. იმავდროულად იზომებოდა ჰაერის ტემპერატურაც.

ქვემოთ მოცემულია:

- თეორიული გაანგარიშებებისა და კაშხალის გაღერებში არსებული თერმომეტრული გაზომვების შედეგები მოცემულია ცხრილებში (2.4.3.1-2.4.3.2) და ნახაზებზე 2.4.3.1-2.4.3.12. კერძოდ, ცხრილი 2.4.3.1-ში მოყვანილია აღნიშნული თეორიული გაანგარიშებების შედეგები. შედარებისათვის, აქვე მოყვანილია თერმომეტრული გაზომვების მონაცემები.

ცხრილი 2.4.3.1											
თერმომეტრული გაზომვებით დაფიქსირებული ტემპერატურების ცვალებადობის გრაფიკები											
თვეები. წყლის დონის ნიშნულები (მ)											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
430.8	411.7	404.7	413.41	420.62	441.63	490.64	510.26	508.34	504.9	490.22	471.56
429.23	411.18	404.5	413.44	420.93	442.67	491.06	509.84	508.1	504.81	489.45	470.51
428.56	410.68	404.25	416	420.86	444.26	491.87	509.88	507.74	504.61	488.62	469.57
428.18	410.17	404.15	417.88	420.85	446.3	492.52	509.95	507.4	504.32	487.78	468.54
427.73	409.82	404	418.95	421.45	448.14	493.31	509.85	507.26	504	487.11	467.45
427.28	409.47	404.15	420.44	422.17	450.39	494.14	509.34	507.11	503.62	486.39	466.3
426.48	409.14	404.4	422.65	422.52	452.56	494.93	509.35	506.88	503.3	485.62	465.02
425.96	408.97	404.1	423.83	422.97	454.14	495.91	509.57	506.69	502.88	494.97	463.73
425.48	408.77	403.5	424.5	423.76	455.26	497.05	509.71	506.61	502.53	484.24	462.87
424.62	408.76	402.5	424.15	421.25	455.94	498	509.38	506.56	502.1	483.33	462.17
424.18	408.76	401.5	424.4	424.41	456.77	498.7	509.29	506.55	501.74	482.95	461.48
423.71	408.75	400	424.7	424.8	458.02	499.48	509.39	506.45	501.35	481.85	460.88
423.24	408.35	400.6	424.05	425.41	459.86	500.25	509.67	506.4	500.98	481.38	460.25
422.68	408.35	401	423.59	426.11	462.04	501	509.81	506.32	500.73	480.73	459.54
422.15	408.3	402.5	422.57	426.71	464.52	501.7	509.68	506.5	500.35	480.08	458.9
421.72	408.26	403.9	421.77	428.07	467.04	502.45	509.6	506.42	499.83	480.4	458.43
421.16	408.25	405.5	421.58	429.78	468.15	503.23	509.25	506.34	499.27	481.21	457.79
420.62	408.23	406.5	421.11	430.83	473.68	504.07	509.1	506.18	498.68	481.32	457.19
420.07	408.1	407.55	420.36	431.78	476.05	504.73	509.02	505.95	498.21	480.96	456.68
419.64	408.01	408.05	420.09	432.53	477.31	505.42	508.87	505.82	497.65	480.38	456.33
419.07	407.9	408.97	419.41	433.28	479.32	506	509.02	505.58	497.15	479.68	455.82
418.49	407.65	410.5	419.31	434.59		506.58	509.01	505.37	496.68	479.07	455.2
417.99	406.86	412.09	419.63	435.32		507.21	509.05	505.05	496.11	478.36	454.37
417.46	406.25	412.79	420.21	435.88		507.9	509.04	504.75	495.54	477.65	453.57

416.9	405.9	413.45	421.36	436.9		508.56	508.97	504.37	494.99	476.81	452.83
416.16	405.7	414.1	422	437.47		509.18	508.91	504	494.59	475.98	452.18
415.45	405.6	413.86	422.16	437.84		509.79	508.8	503.67	494.03	475.22	452.18
414.62	404.6	413.03	421.71	438.43		510.12	508.68	503.76	493.28	474.47	452.09
413.54	-	412.91	421.23	438.77		509.93	508.52	503.67	492.54	473.54	451.71
412.74	-	413.88	421.05	439.13		509.93	506.37	504.73	491.83	472.57	451.61
412.3	-	413.84	-	439.44		510.02	508.56	-	491.03	-	451.56

- ცხრილი 2.4.3.2-ში მოცემულია შესაბამისი თერმომეტრული გაზომვების შედეგები 2007 წლის 20 ოქტომბრიდან 2011 წლის 28 ივლისის ჩათვლით.

დღეები	ცხრილი 2.4.3.2											
	თვეები, ჰაერის ტემპერატურა											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	7.7	8.3	11.3	18.1	12.1	14.9	19.6	25.6	17	15.2	9.9	11.8
2	9.9	6.4	9.3	13.3	10.6	22.7	18.1	25.1	19.9	17.3	14	13.1
3	6.2	7.1	6.8	6.9	10.9	15.8		23.3	22.6	16.5	13.7	11.5
4	6.9	2	11.3	8	12.3	21.7		27.7	15.7	20.2	14	9.8
5	6.5	-0.3	13.7	14.5	12.8	17.9		25.7	16.5	22.8	14.8	5.9
6	6.4	2.6	13.1	8.3	17.7	11.5		23.8	22.4	17.3	15.5	4.4
7	6.3	2.8	6.8	15.2	15.3	12.9		23.9	25.1	15.9	11.3	9.3
8	6.4	3.9	4.7	11.7	13.7	16.4		24.2	21.4	17.3	15.3	10.3
9	8.4	4.5	5.3	12.5	13.1	14.6		23.7	19.2	19.4	14.6	11.5
10	8	6.6	9.5	16.2	13.6	16.3	20.5	24.4	20.4	19.8	13.8	7.8
11	4.5	6.3	14.2	14.4	11.8	18.3	19.3	27.4	22.8	17.2	13	2.6
12	3.9	0.3	12.1	9.6	11.5	22.5	20.5	29.6	25.2	15.8	9	5.3
13	2.5	4.3	10.8	10.4	18	22.3	21.4	30.3	22.1	17.7	11.8	9.2
14	-2.5	3.3	12.2	16.5	15.5	20.5	21.4	28.1	19.6	13.2	14.7	8.4
15	-2	-2.2	13.8	9.5	11	26	23.6	23.1	21.8	13.4	12.4	3.6
16	-2.3	-0.9	6.4	12.8	10	18.5	24.5	22.7	20.9	13.5	6.8	3.9
17	0.3	-0.4	5.5	10.6	11.8	15.7	24	25.7	22.9	14.7	1.3	3.8
18	-0.3	-2.1	12.4	15.5	13.7	14.8		27.1	22.8	12.2	1.1	5.9
19	1	5.3	11.6	12.6	14.2	19.7		25.7	20.8	11.4	3.6	4.5
20	0.3	1	9	12.8	18.2	24.1		23.7	19.8	11.8	5.9	0.3
21	-0.3	-1.3	8.3	15.8	10.6	27.3		23.4	20	11.7	3.4	1.9
22	-0.4	-2.1	12.3	19.6	12.8	17.9		25.5	19	10.8	0.7	4.3

23	-1.4	-0.3	15.7	17.3	15.9	16.8	27.3	23.7	21.2	13.7	5.1	5.8
24	-0.9	0.8	6.5	12.6	12.6	20.4	24.4	20.7	20.9	11.3	8.6	7.3
25	-0.8	2	5.8	10.5	10.4	19.4	24	20.9	21.7	6	13.3	7.3
26	-1.8	4.1	12.4	11.3	18.4	16.8	24.4	20.1	19.5	4.9	7.9	5.4
27	3.5	9.6	13.2	9.2	11.1	18	25.3	18.6	20.2	7.1	8	8.3
28	3.7	7.2	16.1	12.8	11.8	18.1	25.6	20.6	21.9	9.3	8.3	9.2
29	4.8	-	6.8	18.3	12.8	16.3	25.1	21.5	14.3	9.1	9.6	8.8
30	7.2	-	8.2	15.3	10.7	17	25.2	21.9	14.9	8.1	11.2	7.5
31	9.5	-	9.8	-	11.2	-	24.9	14.3	-	7.6	-	6.9
Tvis saS.	3.3	2.8	10.2	13.1	13.1	18.5	23.1	23.9	20.4	13.5	9.7	7
maqs.	13	11	21	26	25	33	33	35	30	28	19	15
min	-5	-5	4	9	5	8	17	14	14	2	0	-1

ცხრილი 2.4.3.3.3 კაშხლის გალერეებში ტემპერატურული გაზომვების შედეგები

თარიღი	წლწ	ჰაერის ტემპერატურა	B15- 402 US სადაწ ნეო	B15- 402 CN ცენტ რალ ური	B15- 402 DS უდაწ ეო	B15- 450 US სადაწ ნეო	B15- 450 CN ცენტ რალ ური	B15- 450 DS უდა წნეო
20.10.2007	507.37	16.8	8.7	21.1	16.3	12.9	20.1	15.1
25.10.2007	507.5	22.7	8.8	20.8	16.2	13.1	19.7	15.1
05.11.2007	507.92		9.1	19.5	16.1	13	18.7	15
28.11.2007	504.69		10	15.7	15.4	11.8	14.9	14.6
19.12.2007	502.24		5.3	15.1	12.7	10.5	14.1	12.4
15.01.2008	488.02	3.3	3.7	14.5	9.5	8.5	13.4	9.4
28.01.2008	475.65	1.1		14	9	7.6	12.9	9
26.02.2008	449.36	2.9		13.3	7.8	6.1	12.1	7.9
10.03.2008	442.81	15.1	5.6	12.9	8.8	5.9	11.7	8.9
02.04.2008	449.93	6.7	5.6	13	10.2	6.8	11.6	9.7
08.04.2008	449.6	13.5	5.9	12.8	11.9	8.2	11.5	10.6



28.04.2008	465.22	17.9	6.7	13	14.1	8.4	11.6	13.3
04.06.2008	483.04	16.2	9.3	13.3	15.5	10.1	11.8	14.8
16.06.2008	490.55	20.5	9.5	13	16	10.2	11.9	15.6
30.06.2008	498.87	17.4	10.2	13.2	17.6	10.6	12	16.8
28.07.2008	509.45	22.3	12.2	14.2	20.5	11.5	12.7	19.3
03.09.2008	510.04	18.5	13.7	14.8	22.6	12.1	13.1	21.1
23.10.2008	508.01	14.5	13.3	13.9	17.2	11.5	13.2	16.9
11.11.2008	504.28	10.1	10.5	13.6	15.7	11.5	13.6	16.1
03.12.2008	501.95	11.1	10.2	13.5	14.3	10.8	13.5	14.8
25.12.2008	493.8	2.1	9.5	14.2	12.3	9.9	12.8	11.6
06.01.2009	488.64	0.8	9.2	14.4	10.9	8.2	12	9.2
21.01.2009	481.21	3.8	7.4	13.2	8.6	7.8	12.3	8.8
03.02.2009	474.35	3	7.4	13.5	9.7	8	12.7	10
18.02.2009	465.45	4.1	6.8	13.2	10.2	7.2	11.9	9.9
09.03.2009	440.25	8.5	6.5	12.9	10	6.3	11.7	9.5
23.03.2009	428.36	2.9	6.5	13	10.2	6.6	11.4	9.5
07.04.2009	417.6	12.7	6.7	12.9	11.2	7.1	11.2	10.3
08.05.2009	434.2	11.4	7.7	12.3	13.1	9.8	11	12.4
02.06.2009	464.19	21.3	9.4	12.8	16.1	10.7	11.5	15.3
16.06.2009	482.45	17.2	10	13	17.9	11.4	11.8	16.9
03.07.2009	496.9	21.7	9.9	12.3	18.6	11.3	12.2	18.7
21.08.2009	507.5	18.4	12.9	14.9	21.1	11.6	12.9	19.3
11.09.2009	504.03	20.1	13.4	15.4	21.8	13	14.3	20.9
23.09.2009	506.36	15.2	13	14.9	19.8	13.2	13.8	19.9
25.11.2009	500.78	9.8	11.6	15.3	15.9	11.5	13.8	15.1
15.12.2009	490.8	5.7	9.1	13.7	12.1	9.2	12.3	11.5
11.01.2010	487.4	11.2	8.9	14.2	11.4	9.5	13.4	11.4
27.01.2010	478.97	-3.4	7.5	13.2	10.4	8.6	12.9	10.9
24.02.2010	463.29	5.9	5	10.3	7	7	11.7	9.4

23.03.2010	451.49	10.9	5.3	11.6	8.3	6.9	11.9	9.6
07.05.2010	445.02	21.9	5.3	10.4	11.2	10.3	11.6	13
01.07.2010	502.91	22.4	11.1	13.7	19.6	9.6	11.2	17.5
30.07.2010	510.31	26.6	12.9	14.9	22.1	10.9	12.4	19.7
07.09.2010	506.67	22.7	14.2	15.8	24.2	11.8	13.5	22
23.09.2010	503.2	18.2	13.7	14.4	22.4	12.2	14.2	21.5
15.10.2010	509.32	12.7	8.6	11.1	15.1	11.2	13.4	18.1
03.11.2010	507.76	11	11.2	14.7	17	11.4	14.2	16.9
25.11.2010	493.94	11.3	11.2	15.8	17	10.2	13.4	15.3
04.01.2011	471.36	7.9	9.3	15.1	13.7	8.8	13.1	12.3
01.02.2011	445.31	-0.7	7.3	13.9	10.5	6	11.4	9
21.02.2011	426.41	1.2	6.9	14.4	9.3	5	12.5	8.6
07.03.2011	415.69	2.2	6	13.6	9.3	6	13	9.6
04.04.2011	413.94	14.5	6.5	13.6	11.2	6.5	11.7	10
02.05.2011	427		6.6	12.6	11	8.8	12.1	11.2
19.05.2011	442.94		5.6	10.7	10.2	10.3	12.1	12.3
02.06.2011	465.73		8.2	12.6	14.3	11.7	12.1	14.5
21.06.2011	492.26	17.9	9.4	12.7	16.8	10.1	11	15.6
04.07.2011	500.46	21.2	8.2	11.1	15.2	10.1	11.4	16.1
28.07.2011	510.05	25.1	12.1	14.3	20.3	10.9	12.2	18.5

შენიშვნა : US –სადაწნეო ზედაპირი, CN - ცენტრალურ ზონა, DS - უდაწნეო ზედაპირი.

ცხრილი 2.4.3.4. ენგურჰესის კაშხლის თბური რეჟიმის გაანგარიშებისა და თერმომეტრული გაზომვების შედეგები

განსახილველი კვებების	მინიმალური ტემპერატურები (°C)			მაქსიმალური ტემპერატურები (°C)		
	სადაწნეო წახნაგი	ცენტრალური ზონა	უდაწნეო წახნაგი	სადაწნეო წახნაგი	ცენტრალური ზონა	უდაწნეო წახნაგი

	თეორიული	თერმომეტრული	თეორიული	თერმომეტრული	თეორიული	თერმომეტრული	თეორიული	თერმომეტრული	თეორიული	თერმომეტრული	თეორიული	თერმომეტრული
402.0	7.6	3.7	11.8	10.3	8.5	7.0	10.0	14.2	13.8	21.1	20.8	24.2
450.0	7.6	5.0	11.4	11.0	7.8	7.9	10.0	13.2	15.5	20.1	20.6	22.0

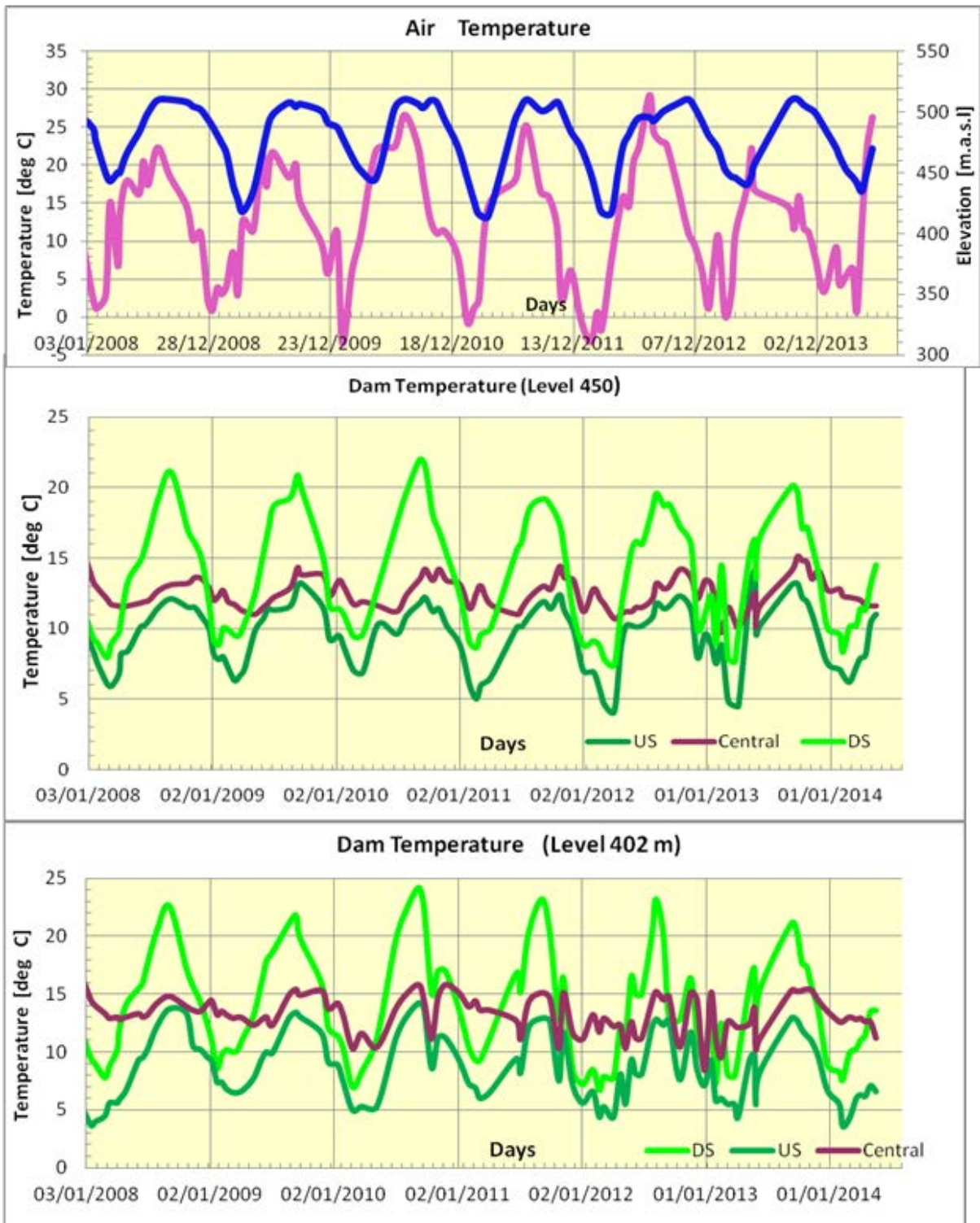
ქვემოთ ნახაზებზე მოცემულია:

- ნახ.2.4.3.2-2.4.3.3-ზე ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხლის მე-15 სექციის ზონაში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური და მინიმალური დონეების დროს;

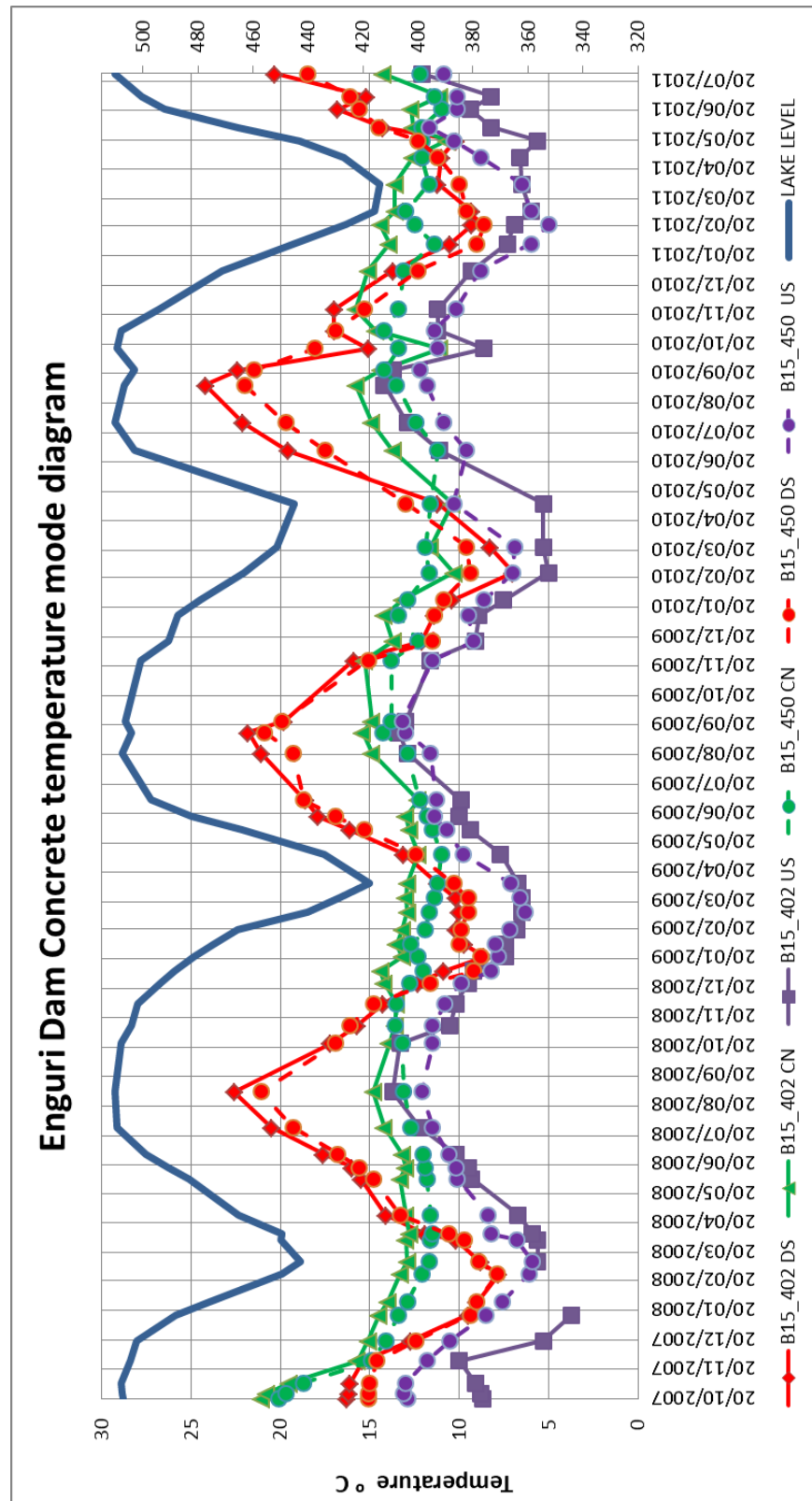
- ნახ. 2.4.3.4-2.4.3.5-ზე ტემპერატურის განაწილება მისი მე-15 სექციის სხვადასხვა ნიშნულზე მდებარე ჰორიზონტალურ კვეთეებში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური და მინიმალური დონეების დროს ნაგებობის სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგების, ბირთვის ზონებში;

- ნახ. 2.4.3..2-ზე ტემპერატურის განაწილება ამ სექციის 402 და 450მ ნიშნულებზე მდებარე ჰორიზონტალურ კვეთებში წყალსაცავში მაქსიმალური და მინიმალური დონეების დროს თეორიული და თერმომეტრული გაზომვების შედეგების მიხედვით;

- ნახ.2.3.12-ზე კაშხლის ამ სექციის აღნიშნულ ნიშნულებზე სადაწნეო, უდაწნეო და ცენტრალურ ზონებში გალერეებში თერმომეტრული გაზომვებით დაფიქსირებული ტემპერატურების დროში ცვალებადობის გრაფიკები.



ნახ. 2.4.3.1 ჰაერისა და კაშხლის ტანის სხვადასხვა ნიშნულებზე ტემპერატურების განაწილება (გაზომვების შედეგებით 2008 – 2011წ.).



ნახ. 2.4.3.2. ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალის 450 და 402 ნიშნულებზე (გაზომვების შედეგებით). US –სადაწნეო ზედაპირი, CN - ცენტრალურ ზონა, DS უდაწნეო ზედაპირი.

## 2.5 ენგურჰესის კაშხლის თბური რეჟიმის გაანგარიშებები და შედეგების ანალიზი

### 2.5.1 კაშხლის საანგარიშო სქემა

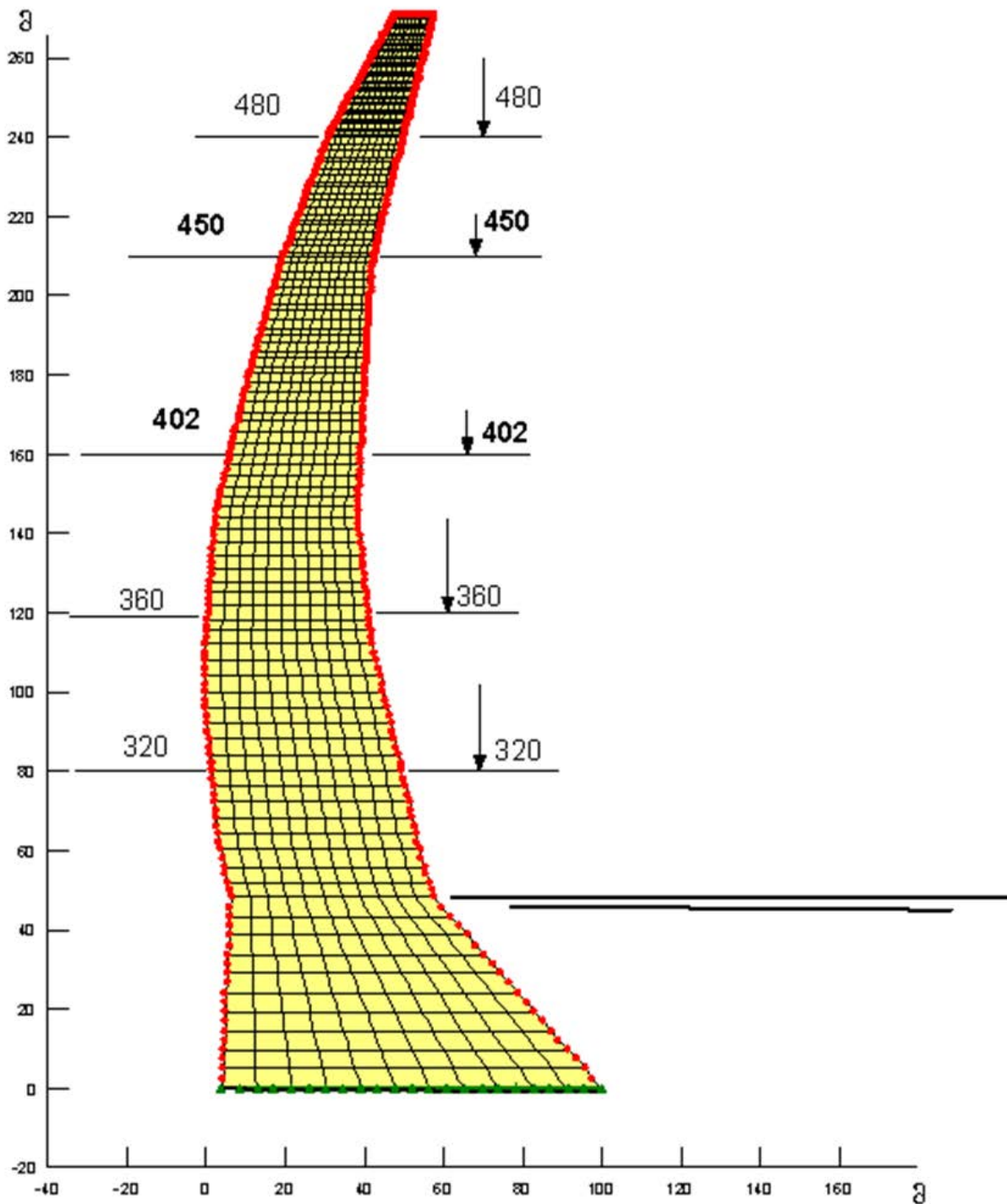
ენგურჰესის კაშხლის თერმორეჟიმის გასაანგარიშებლად განხილული იქნა მისი ცენტრალური კონსოლი ზომებით:

- სრული სამშენებლო სიმაღლე - 271.5მ;
- მათ შორის თაღოვანი ნაწილი სიმაღლე - 231.5მ;
- საცობი სიმაღლით 40.0მ;
- სისქე საცობისა და ფუძის კონტაქტის ზონაში 90.0 მ;
- თაღოვანი ნაწილისა და საცობის კონტაქტის ზონაში 52.0მ;
- თხემის დონეზე \_ 10,0 მ;
- ნაგებობის ფუძის ზომები: სიმაღლე 50.0მ, სისქე 100.0მ.

სითბოს გავრცელება თაღოვან კაშხალში განხილული იქნა 2 მიმართულებით: ვერტიკალურად და ჰორიზანტალურად (რადიალურად).

არასტაციონარული თბოგამტარობის ამოცანა განხილული იქნა სასრულ ელემენტთა მეთოდით [87,88]. კაშხლის ცენტრალური კონსოლის არე დაყოფილი იქნა მართკუთხედისა და სამკუთხედის ფორმის ელემენტებად, სულ 1353 ელემენტად, რომლებიც დაკავშირებულია 4328 კვანძში. ნახ. 2.5.1.1-ზე მოცემულია კაშხლის თბური რეჟიმის სასრულ ელემენტთა მეთოდით გაანგარიშების სქემა 2 განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში,

კაშხლის ტემპერატურული ველის გაანგარიშების ჩატარებამდე თეორიული ექსპერიმენტის გზით დადგენილი იქნა საანგარიშო სქემის ელემენტების გეომეტრული ზომები, ასევე დროის ბიჯი, რომელიც მიღებული იქნა 10 წუთის ტოლად.



ნახ.2.5.1.1. კაზხლის თბური რეჟიმის სასრულ ელემენტთა  
 მეთოდით გაანგარიშების სქემა.

ტემპერატურის საწყისი განაწილება ამ კონსოლში 411.5მ ნიშნულამდე მიღებული იქნა თანაბრად და ტოლად ნაგებობის ნაკერების დაცემენტების ტემპერატურისა ამ ზონაში 10°C-ისა, ხოლო ამ ნიშნულის ზემოთ მდებარე ზონაში -12°C-ისა, ასევე ნაგებობის ნაკერების დაცემენტების ტემპერატურების ტოლად ამ ზონაში. ტემპერატურის განაწილება ნაგებობის ფუძის ზონაში მიღებული იქნა ნატურული ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით 10°C-ის ტოლად.

ბეტონის თბოტექნიკური მახასიათებლების მნიშვნელობები მიღებული იქნა მათი მრავალწლიანი გამოკვლევების შედეგების ანალიზის საფუძველზე:

- თბოგამტარობის კოეფიციენტი  $\beta=1.75$  კკალ/(მ.სთ.გრად);
- ტემპერატურის გამტარობის კოეფიციენტი  $0.003\text{მ}^2/\text{სთ}$ ;
- $\lambda$  - თბოგადაცემის კოეფიციენტი  $20.0$  კკალ/(მ<sup>2</sup>.სთ.გრად);
- ხვედრითი თბოტევადობა  $0.235$  კკალ/(კგ.გრად);
- მოცულობითი მასა  $25.0$  კნ/მ<sup>3</sup>.

## 2.5.2 კაშხლის სასაზღვრო პირობები

გაანგარიშებების დროს მიღებული იქნა შემდეგი სასაზღვრო პირობები:

- ნაგებობის ფუძის მარცხენა და მარჯვენა ვერტიკალურ ზედაპირებზე, აგრეთვე მის ქვედა ჰორიზონტალურ ზედაპირზე მიღებული იქნა თბოიზოლაციის პირობა (სითბოს ნაკადი არც შემოდის და არც გადის);
- ნაგებობის სადაწნეო წახნაგზე იმ ზონაში, სადაც ადგილი აქვს კონტაქტს ბეტონსა და წყალს შორის - წყლის ტემპერატურის მნიშვნელობის ტოლად (I სახის სასაზღვრო პირობა) 60 მ სიღრმემდე, რომელიც იცვლება დროში და გამოითვლება (2.5.2.1) ფორმულით, ხოლო უფრო მეტ სიღრმეზე 6,0°C-ს ტოლად.
- ნაგებობის სადაწნეო წახნაგის იმ ზონაში, სადაც ადგილი აქვს კონტაქტს ბეტონსა და ჰაერს შორის, აგრეთვე კაშხლის უდაწნეო წახნაგზე და



ქიმის დონეზე, სადაც, აგრეთვე აქვს კონტაქტს ბეტონსა და ჰაერის შორის მიღებული იქნა III სახის სასაზღვრო პირობა (2.5.2.2).

I და III სახის სასაზღვრო პირობები აპროქსიმირებული იქნა კომლპექსურად [4].

კაშხლის სადაწნეო წახნაგისთვის ფორმულას აქვს სახე:

$$T_{0,k+1} = GT_{1,k+1} + vT_{k+1}^{\beta}, \quad (2.5.2.1)$$

უდაწნეო წახნაგისთვის

$$T_{n,k+1} = GT_{n-1,k+1} + vT_{k+1}^{\beta}, \quad (2.5.2.2)$$

კაშხლის ქიმის დონეზე ჰორიზონტალური ზედაპირისათვის \_

$$T_{m,k+1} = G_1T_{m-1,k+1} + vT_{k+1}^{\beta} \quad (2.5.2.3)$$

სადაც:

$$G = \frac{1}{1 + \xi},$$

$$\xi = \frac{\beta}{\lambda} \Delta x,$$

$$v = \frac{\xi}{1 + \xi},$$

$$G_1 = \frac{1}{1 + \xi_1},$$

$$\xi_1 = \frac{\beta}{\lambda} \Delta y,$$

$$v_1 = \frac{\xi_1}{1 + \xi_1},$$

$\beta$  - თბოგადაცემის კოეფიციენტი,  $\lambda$  \_ თბოგამტარობის კოეფიციენტი,

$\Delta x$  და  $\Delta y$  \_გეომეტრიული ზიჯებია ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებებით;

- $T_{1,k+1}$  - ტემპერატურები კაშხლის სადაწნეო წახნაგთან მდებარე მეზობელ I კვანძებში სათანადო დონეზე,  $(k+1) \Delta t$  დროის მომენტებში;
- $T_{n-1,k+1}$  - ტემპერატურები კაშხლის უდაწნეო წახნაგთან მდებარე მეზობელ I კვანძებში სათანადო დონეზე,  $(k+1) \Delta t$  დროის მომენტებში;
- $T_{m-1,k+1}$  - ტემპერატურები კაშხლის ქიმის მეზობელ I კვანძებში  $(k+1) \Delta t$  დროის მომენტებში;
- $T_{k+1}^a$  - ჰაერის ტემპერატურა  $(k+1) \Delta t$  დროის მომენტებში;

ჰაერის ტემპერატურის სეზონური ცვალებადობის ამსახველ ფორმულაში შემავალი პარამეტრები ტოლია [5]:

საშუალო წლის შემთხვევაში:  $T_{სშ}=12.27^{\circ}\text{C}$ ;

$$A=9.13^{\circ}\text{C};$$

$$\varphi=-3.42.$$

კაშხლის ღია ზედაპირების ტემპერატურების განასზღვრისას, რომლებზედაც გავლენას ახდენს მზის გამოსხივება, აუცილებელია მის მიერ გამოწვეული დამატებითი გათბობის გათვალისწინება. დედამიწის საშუალო განედებზე კაშხლების მშენებლობის გამოცდილების მიხედვით მათი ზედაპირების დამატებითი გათბობა შეადგენს  $\approx 9.0^{\circ}\text{C}$ -ს ზაფხულში და  $\approx 2.0^{\circ}\text{C}$ -ს ზამთარში.

ენგურჰესის კაშხლისათვის მისი ზედაპირების დამატებითი გათბობა შეიძლება მივიღოთ ზაფხულში  $4.0^{\circ}\text{C}$ -ის და ზამთარში  $2.0^{\circ}\text{C}$ -ის ტოლად. შესაბამისად, ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობის ამსახველ ფორმულაში შემავალი პარამეტრები ტოლი იქნება:

$$\text{საშუალო წლისთვის} - T_{საშ}=12.27+\frac{4+2}{2}=15.27^{\circ}\text{C};$$

$$A=9.13+\frac{4-2}{2}=10.13^{\circ}\text{C};$$

$\varphi$  –ს მნიშვნელობა იგივე რჩება  $-3.42$ .

გაანგარიშებებში გამოყენებული იქნა ენგურჰესის წყალსაცავში წყლის დონის ცვალებადობაზე 2001წ. ჩატარებული დაკვირვებების მონაცემები, მოყვანილი ცხრილი 1-ში (დანართი 1).

გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა კომპიუტერული პროგრამის მიხედვით.

### 2.5.3 თაღოვანი კაშხლის ტანის ტემპერატურული ველის

#### გაანგარიშება

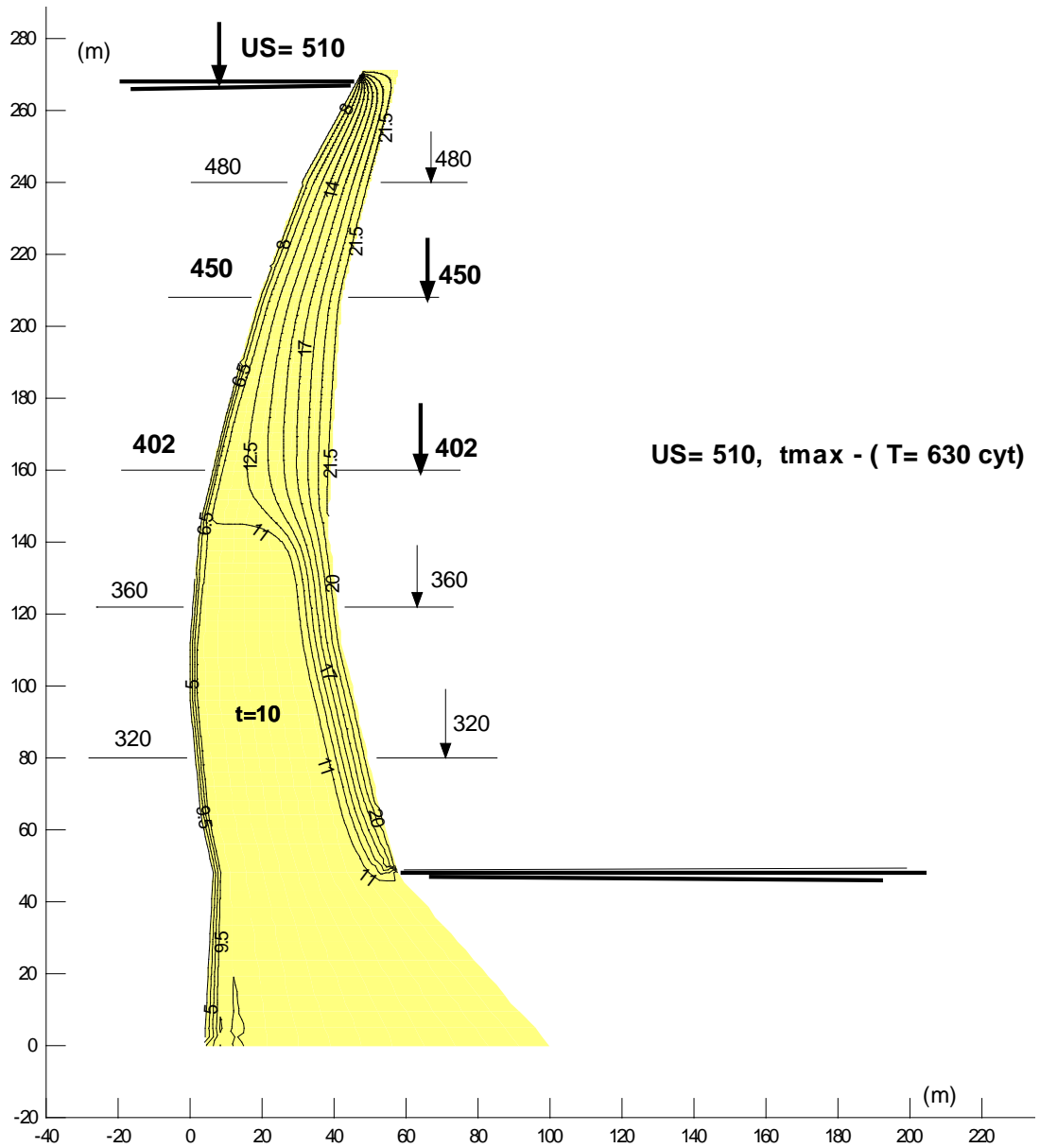
თეორიული გაანგარიშებების შედეგების მიხედვით მე-15 სექციისათვის მიღებული იქნა:

#### 402 მ ნიშნულზე

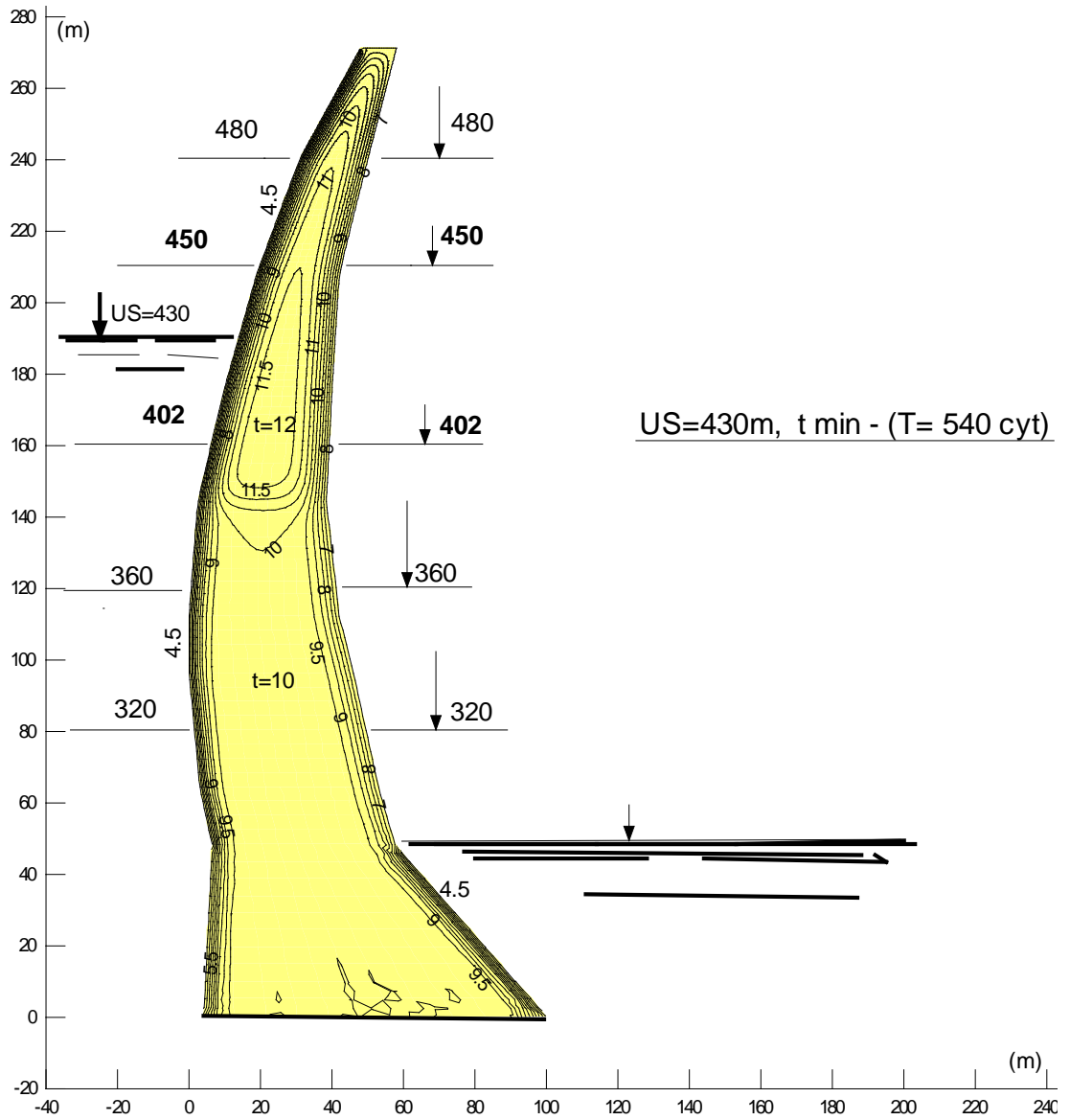
- ტემპერატურის მაქსიმალური მნიშვნელობა სადაწნეო წახნაგზე შეადგენს  $10^{\circ}\text{C}$ -ს, უდაწნეოზე -  $20,8^{\circ}\text{C}$ -ს, ცენტრალურ ზონაში  $13,8^{\circ}\text{C}$ -ს;
- მინიმალური ტემპერატურები სადაწნეო წახნაგზე -  $7,2^{\circ}\text{C}$ -ს, უდაწნეოზე  $8,5^{\circ}\text{C}$ -ს, ცენტრალურ ზონაში  $11,8^{\circ}\text{C}$ -ს;
- მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობა `ბირთვი (ცენტრალური ზონა)\_წახნაგი` შეადგენს:  $11,8-7,2=4,6^{\circ}\text{C}$ .

#### 450 მ ნიშნულზე:

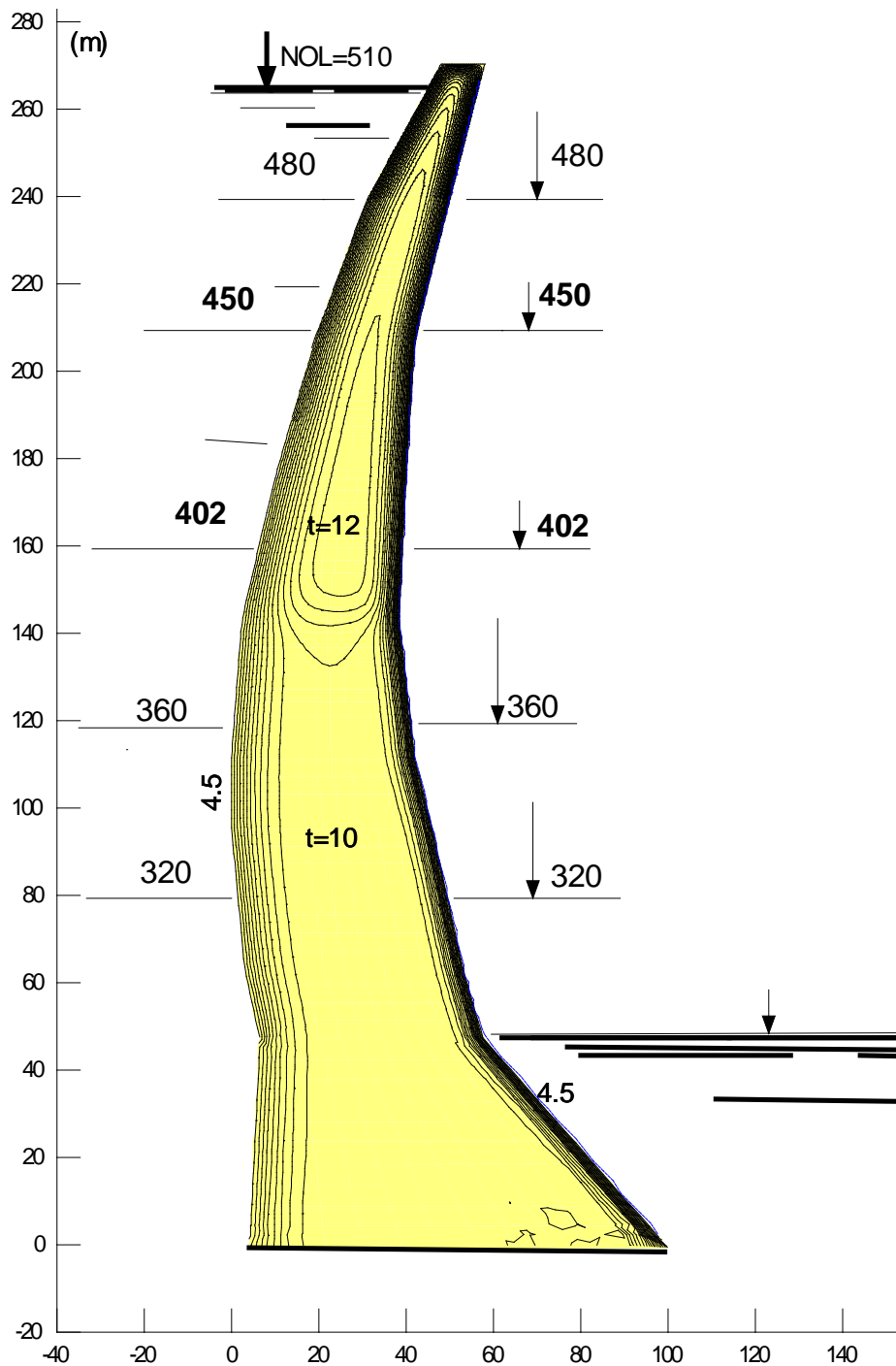
- მაქსიმალური ტემპერატურები სადაწნეო წახნაგზე -  $10^{\circ}\text{C}$ -ს, უდაწნეოზე  $20,6^{\circ}\text{C}$ -ს, ცენტრალურ ზონაში  $15,5^{\circ}\text{C}$ -ს;
- მინიმალური ტემპერატურები სადაწნეო წახნაგზე -  $7,6^{\circ}\text{C}$ -ს, უდაწნეოზე  $7,8^{\circ}\text{C}$ -ს, ცენტრალურ ზონაში  $11,4^{\circ}\text{C}$ -ს;
  - მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობა `ბირთვი(ცენტრალური ზონა)\_წახნაგი` შეადგენს:  $15,5-10,0=5,5^{\circ}\text{C}$ .



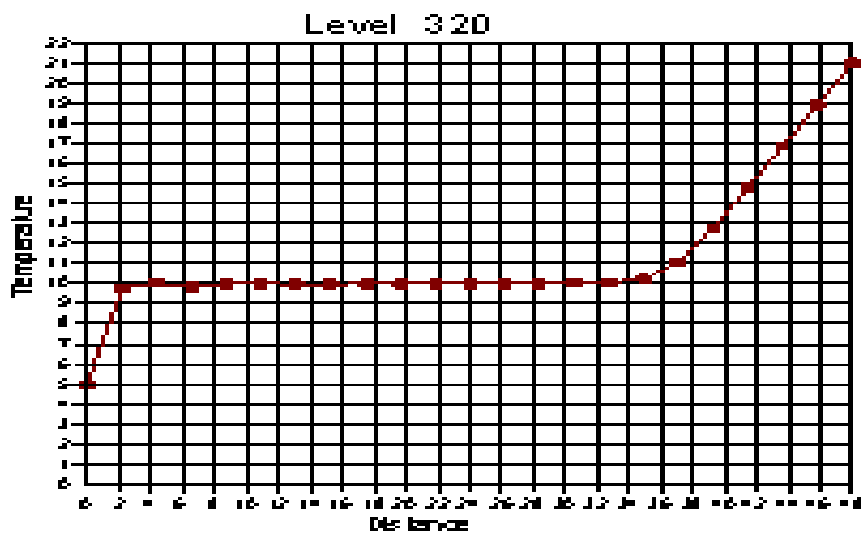
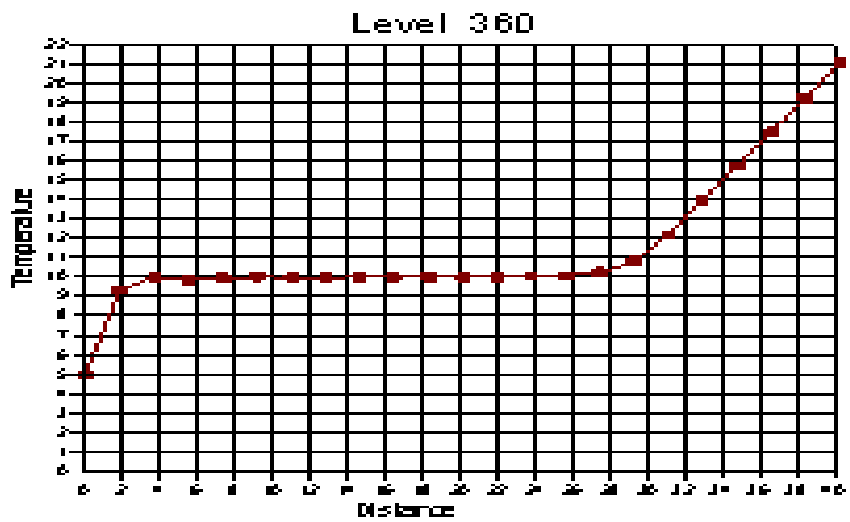
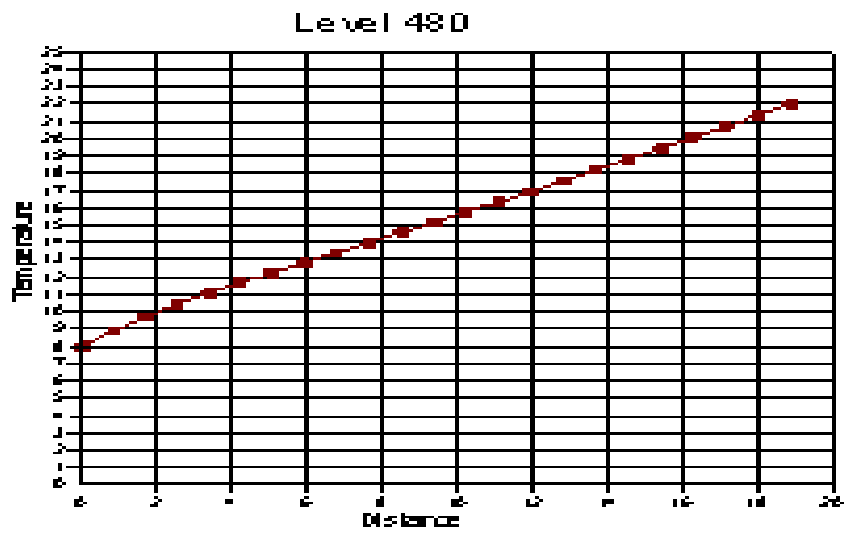
ნახ. 2.5.3.1 ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს სტაციონალური რეჟიმის დროს - თეორიული გაანგარიშებით - (აგვისტოს ბოლო).



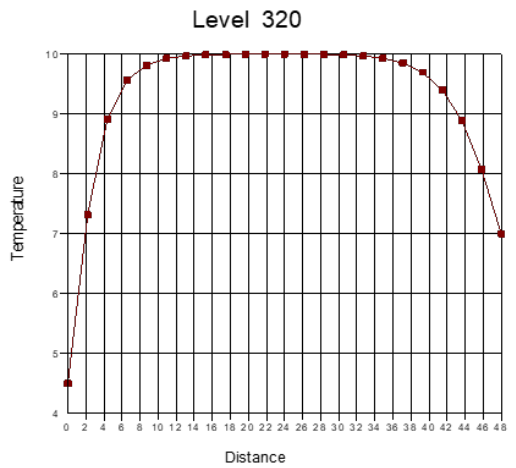
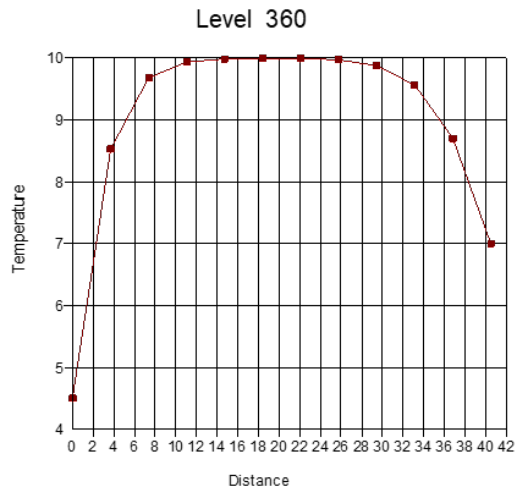
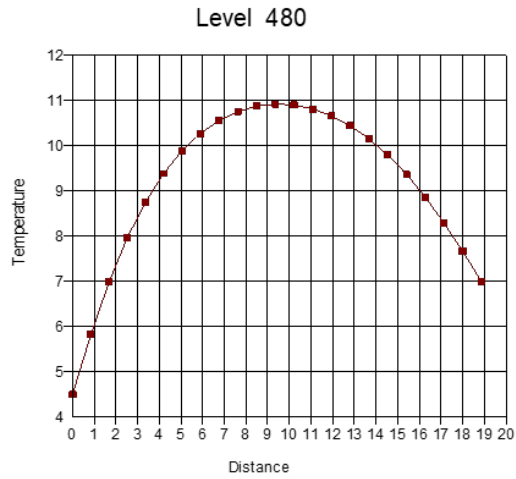
ნახ. 2.5.3.2 ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში  
 წყლის მინიმალური დონის დროს - თეორიული გაანგარიშებით  
 (თებერვალი).



ნახ. 2.5.3. 3 ტემპერატურული ველის განაწილება კაშხალში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს სტაციონალური რეჟიმის დროს - თეორიული გაანგარიშებით.



ნახ. 2.5.3.4. ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში (თეორიული ამონახსნებით) წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს.



**ნახ. 2.5.3. 5. ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში (თეორიული ამონახსნებით) წყალსაცავში წყლის მინიმალური დონის დროს.**



## 2.5.4 კაშხლის ტანის ტემპერატურული ველის ანალიზი თეორიული და თერმომეტრული გაანგარიშებების შედეგების მიხედვით

ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ტანში არსებულ გალერეებში 402მ და 450 მ ნიშნულებზე (კაშხლის სხვადასხვა სიღრმეზე) თერმორეჟიმის შესაფასებლად ჩამონტაჟებულია თერმომეტრები (ნახ. 2.5.4.1 - 2.5.4.4).

### თერმომეტრული გაზომვების შედეგები

ჰაერის მაქსიმალური ტემპერატურა 2007 წლის განმავლობაში დაფიქსირებულია 25 ოქტომბერს და ტოლია 22.7°C-ის (აქ გასათვალისწინებელია, რომ გვაქვს მხოლოდ 2 მონაცემი), 2008წ. \_ 28 ივლისს და შეადგენს 22.3°C-ს, 2009წ. \_ 3 ივლისს და შეადგენს 21.7°C-ს, 2010წ. \_ 30 ივლისს და შეადგენს 26.6°C-ს, 2011წ. \_ 28 ივლისს და შეადგენს 25.1°C-ს. ამრიგად, 2007-2011წ.წ. პერიოდში ჰაერის მაქსიმალური ტემპერატურა შეადგენს 26.6°C.

ჰაერის მინიმალური ტემპერატურა 2007 წლის განმავლობაში დაფიქსირებულია 20 ოქტომბერს და შეადგენს 16.8°C-ს, 2008წ. \_ 28 იანვარს და შეადგენს 1.1°C-ს, 2009წ. \_ 6 იანვარს და შეადგენს 0.8°C-ს, 2010წ. \_ 27 იანვარს და შეადგენს -3.4°C-ს, 2011წ. \_ 1 თებერვალს და შეადგენს -0.7°C-ს. ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში ჰაერის მინიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2010წ. 27 იანვარს და შეადგენს -3.4°C.

**კაშხლის მე-15 სექციის 402მ ნიშნულზე თერმომეტრული გაზომვებით გამოვლენილ ტემპერატურათა მონაცემები**

#### ➤ მაქსიმალურ ტემპერატურათა მნიშვნელობები:

უდაწნეო წახნაგზე 2007 წლის განმავლობაში მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 20 ოქტომბერს და შეადგენს 16.3°C, 2008წ.\_ 3 სექტემბერს და შეადგენს 22.6°C-ს, 2009წ.\_ 11 სექტემბერს და შეადგენს 21.8°C-ს, 2010წლის \_ 7 სექტემბერს და შეადგენს 24.2°C-ს, 2011წ. \_ 21 ივნისს და შეადგენს 16.8°C-ს.

ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში ამ კაშხლის უდაწნეო წახნაგზე მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2010წლის 7 სექტემბერს და შეადგენს 24.2°C-ს.

**სადაწნეო წახნაგზე** 2007 წლის განმავლობაში მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 28 ოქტომბერს და შეადგენს 10,0°C-ს, 2008წ.\_ 3 სექტემბერს და შეადგენს 13.7°C-ს, 2009წ.\_ 11 სექტემბერს და შეადგენს 13.4°C-ს, 2010 წლის 7 სექტემბერს და შეადგენს 14.2°C-ს, 2011წ.\_ 28 აგვისტოს და შეადგენს 12.1°C-ს. ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში აღნიშნული კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე 402მ ნიშნულზე მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2010 წლის 7 სექტემბერს და შეადგენს 14,2°C-ს.

**ცენტრალურ ზონაში** 2007 წლის განმავლობაში მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 20 ოქტომბერს და შეადგენს 21,1°C-ს, 2008წ. 3 სექტემბერს და შეადგენს 14.8°C-ს, 2009წ. 11 სექტემბერს და შეადგენს 15.4°C-ს, 2010წლის 7 სექტემბერს და 25 ნოემბერს და შეადგენს 15.8°C-ს, 2011წ. 4 იანვარს და შეადგენს 15.1°C-ს. ამრიგად, 2007-2011წ.წ. პერიოდში მე-15 სექციის 402მ ნიშნულზე, ცენტრალურ ზონაში მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2007 წლის 20 ოქტომბერს და შეადგენს 21.1°C-ს.

➤ **მინიმალური ტემპერატურათა მნიშვნელობები:**

**უდაწნეო წახნაგზე** 2007 წლის განმავლობაში დაფიქსირებულია 19 დეკემბერს და შეადგენს 12.7°C, 2008წ. \_ 26 თებერვალს და შეადგენს 7.8°C-ს, 2009წ. \_ 21 იანვარს და შეადგენს 8.6°C-ს, 2010 წ. \_ 24 თებერვალს და შეადგენს 7°C-ს, 2011წ. \_ 21 თებერვალს და 7 მარტს და შეადგენს 9.3°C-ს. 2007-2011წ.წ. პერიოდში მე-15 სექციის 402მ ნიშნულზე უდაწნეო წახნაგზე მინიმალური ტემპერატურა აღინიშნება 2010 წლის 24 თებერვალს და შეადგენს 7°C-ს.

**სადაწნეო წახნაგზე** 2007 წლის განმავლობაში დაფიქსირებულია 19 დეკემბერს და შეადგენს 5.3°C-ს, 2008წ.\_ 15 იანვარს და შეადგენს 3.7°C-ს, 2009წ. \_ 9 მარტს და 23 მარტს და შეადგენს 6.5°C-ს, 2010წ. \_ 24 თებერვალს და შეადგენს 5.0°C-ს, 2011წ. \_ 7 მარტს და შეადგენს 6.0°C-ს. ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში მინიმალური ტემპერატურა ამ კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე დაფიქსირებულია 2008წ. 15 იანვარს და შეადგენს 3.7°C-ს.

**ცენტრალური ზონა** - მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობა (ვარდნილი) „ბირთვი წახნაგი“ 2007 წლის განმავლობაში აღინიშნება 20 ოქტომბერს და შეადგენს  $21.8-8.7=12.4^{\circ}\text{C}$ -ს, 2008წ. \_ 15 იანვარს და შეადგენს  $14.5-3.7=10.8^{\circ}\text{C}$ -ს, 2009წ.\_ 23 მარტს და შეადგენს  $13.0-6.0=6.5^{\circ}\text{C}$ -ს, 2010 წელს \_ 23 მარტს და შეადგენს  $11.6-5.3=6.3^{\circ}\text{C}$ -ს, 2011წ. \_ 7 მარტს და შეადგენს  $13.6-6.0=7.6^{\circ}\text{C}$ -ს. ამრიგად, კაშხლის აღნიშნულ ზონაში 2007-11წ.წ. პერიოდში მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობა `ბირთვი-წახნაგი` აღინიშნება 2007წ. 20 ოქტომბერს და შეადგენს  $12.4^{\circ}\text{C}$ -ს.

**კაშხლის მე-15 სექციის 450 მ ნიშნულზე თერმომეტრული გაზომვებით გამოვლენილ ტემპერატურათა მონაცემები**

➤ **მაქსიმალურ ტემპერატურათა მნიშვნელობები:**

**უდაწნეო წახნაგზე** - 2007 წ. \_  $15.1^{\circ}\text{C}$  20 და 25 ოქტომბერს; 2008წ.\_  $21.1^{\circ}\text{C}$  3 სექტემბერს; 2009წ.\_  $20.9^{\circ}\text{C}$  11 სექტემბერს; 2010წელს \_  $22.0^{\circ}\text{C}$  7 სექტემბერს; 2011წ.\_  $18.5^{\circ}\text{C}$  28 ივლისს; ამრიგად, 2007-2011წ.წ. პერიოდში მაქსიმალური ტემპერატურა კაშხლის უდაწნეო წახნაგზე დაფიქსირებულია 2010წ. \_ 7 სექტემბერს და შეადგენს  $22.0^{\circ}\text{C}$ -ს.

**სადაწნეო წახნაგზე** - 2007 წ.  $13.1^{\circ}\text{C}$  25 ოქტომბერს; 2008წ. \_  $12.1^{\circ}\text{C}$  3 სექტემბერს; 2009წ. \_  $13.2^{\circ}\text{C}$  23 სექტემბერს; 2010წელს \_  $12.2^{\circ}\text{C}$  23 სექტემბერს; 2011წ. \_  $11.7^{\circ}\text{C}$  2 ივნისს; ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში კაშხლის მე-15 სექციის 450მ ნიშნულზე სადაწნეო წახნაგზე მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2009 წლის 23 სექტემბერს და შეადგენს  $13.2^{\circ}\text{C}$ -ს.

**ცენტრალურ ზონაში** - 2007 წ. \_  $20.1^{\circ}\text{C}$  20 ოქტომბერს; 2008 წელს \_  $13.6^{\circ}\text{C}$  11 ნოემბერს; 2009წ. \_  $14.3^{\circ}\text{C}$  11 სექტემბერს; 2010 წელს \_  $14.2^{\circ}\text{C}$  23 სექტემბერს; 2011წ.\_  $13.1^{\circ}\text{C}$  4 იანვარს. ამრიგად, 2007-2011წ.წ. პერიოდში კაშხლის ამ ზონაში მაქსიმალური ტემპერატურა დაფიქსირებულია 2007წ. 20 ოქტომბერს და შეადგენს  $20.1^{\circ}\text{C}$ -ს.

➤ **მინიმალური ტემპერატურათა მნიშვნელობები:**

**უდაწნეო წახნაგზე:** 2007 წ. \_  $12.4^{\circ}\text{C}$  19 დეკემბერს; 2008წ.\_  $7.9^{\circ}\text{C}$  26 თებერვალს; 2009წ. \_  $8.8^{\circ}\text{C}$  21 იანვარს; 2010წ. \_  $9.4^{\circ}\text{C}$  24 თებერვალს; 2011წ. \_  $8.6^{\circ}\text{C}$  21

თებერვალს; ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში კაშხლის ამ ზონაში მინიმალური ტემპერატურის მნიშვნელობა დაფიქსირებულია 2008 წელს – 26 თებერვალს და შეადგენს 7.9°C-ს.

**სადაწნეო წახნაგზე** - 2007 წ. – 10.5°C 19 დეკემბერს; 2008წ.\_ 5.9°C 10 მარტს; 2009წ.\_ 6.3°C 9 მარტს; 2010წ. – 6.9°C 23 მარტს; 2011წ.\_ 5.0°C 21 თებერვალს; ამრიგად, 2007-2011წ.წ. პერიოდში კაშხლის ამ ზონაში დაფიქსირებული მინიმალური ტემპერატურაა 5.0°C 2011წ. 21 თებერვალს.

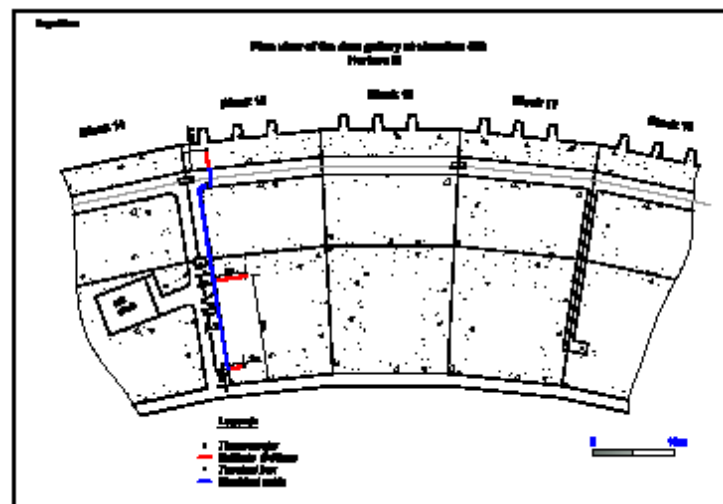
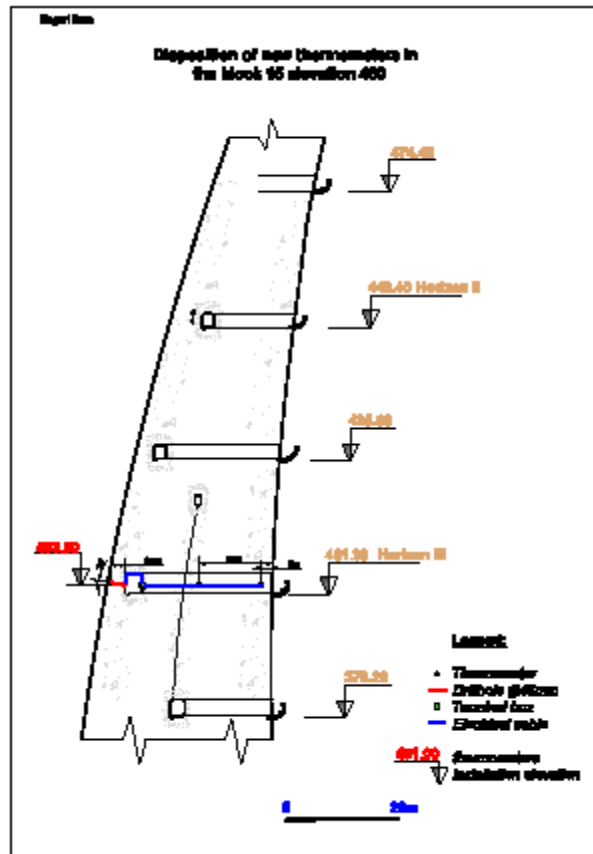
**ცენტრალურ ზონაში** - 2007 წ. – 14.1°C 19 დეკემბერს; 2008წ.\_ 11.5°C 8 აპრილს; 2009წ.\_ 11.0°C 8 მაისს; 2010წ. – 11.2°C 1 ივლისს; 2011წ.\_ 11.0°C 21 ივნისს; ამრიგად, 2007-11წ.წ. პერიოდში მინიმალური ტემპერატურის მნიშვნელობა ამ ზონაში დაფიქსირებულია 2009წ. 8 მაისს და 2011 წ. 21 ივნისს და შეადგენს 11.0°C-ს.

მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობების მნიშვნელობები კაშხლის მე-15 სექციის 450მ ნიშნულზე აღნიშნული წლების მიხედვით ასეთია: 2007წ. – 20.1-12.9=7.2°C-ს 20 ოქტომბერს, 2008წ.\_ 12.1-6.1=6.0°C 26 თებერვალს, 2009წ.\_ 11.7-6.3=5.4°C 9 მარტს, 2010 წელს – 11.9-6.9=5.0°C-23 მარტს, 2011წ. – 12.5-5.0=7.5°C 21 თებერვალს.

ამრიგად, 2007-2011წ.წ.წ. პერიოდში ამკაშხლის მე-15 სექციის 450მ ნიშნულზე მდებარე ზონაში მაქსიმალური ტემპერატურული სხვაობა `ბირთვი-წახნაგი` დაფიქსირებულია 2011წლის 21 თებერვალს და შეადგენს 7,5°C-ს. საჭიროა აღინიშნოს, რომ ტემპერატურული სხვაობები “ბირთვი-წახნაგი” 10.8 და 12.4°C, დაფიქსირებული ენგურჰესის კაშხლის მე-15 სექციის 402 ნიშნულზე, საშიშია ამ ნაგებობებისათვის.

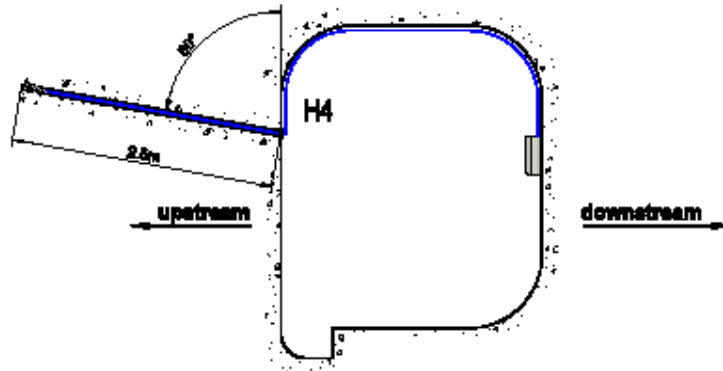
ენგურჰესის კაშხლის თბური რეჟიმის თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგების გაანალიზება და შედარება გვიჩვენებს, რომ ისინი ძირითადად დამაკმაყოფილებლად ემთხვევა ერთმანეთს. ამავე დროს საჭიროა აღინიშნოს, რომ რიგ შემთხვევებში განსხვავება მათ შორის არსებითია, რაც დასაშვებია ასეთ რთულ ნაგებობაში, რომელსაც კონტაქტი აქვს ორ გარემოსთან -

ჰაერთან და წყალთან, მრავალი წლის განმავლობაში მიმდინარე თბური პროცესები გამოკვლევისას.

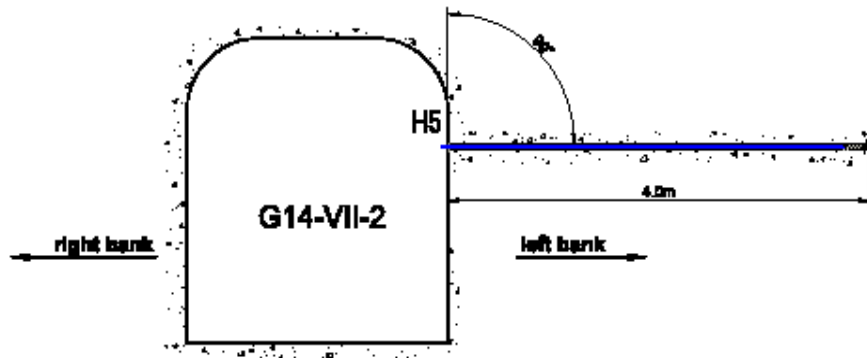


ნახ. 2.5.4.1 თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 15 სექციის 402მ ნიშნულზე არსებულ გალერეაში; სადაწნეო (US), უდაწნეო (DS) და ცენტრალურ (CN) კვეთებში.

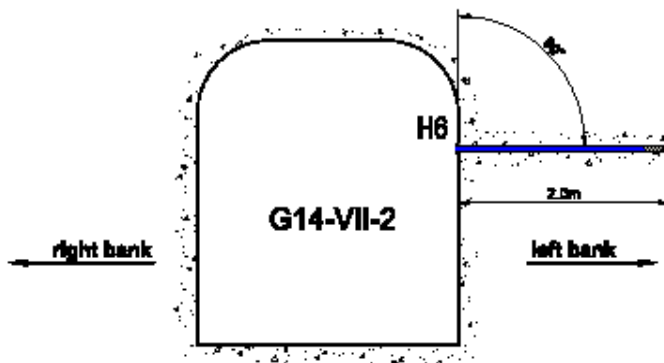
**Thermometer TC-B15-402-US**  
**Cross section**



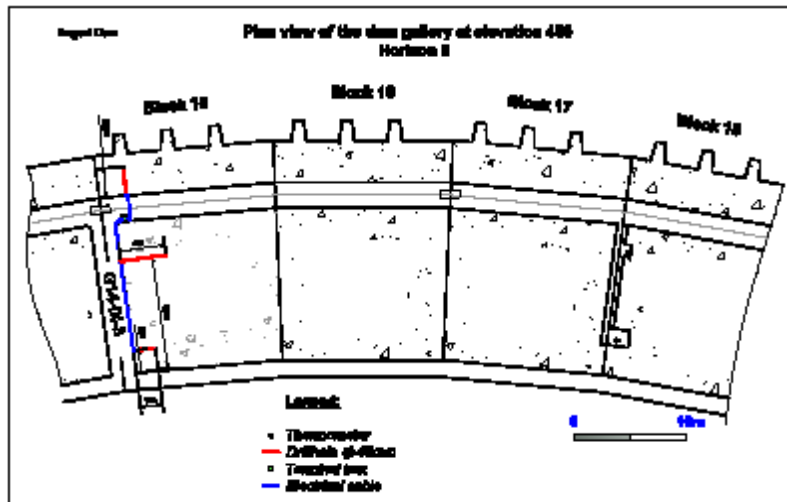
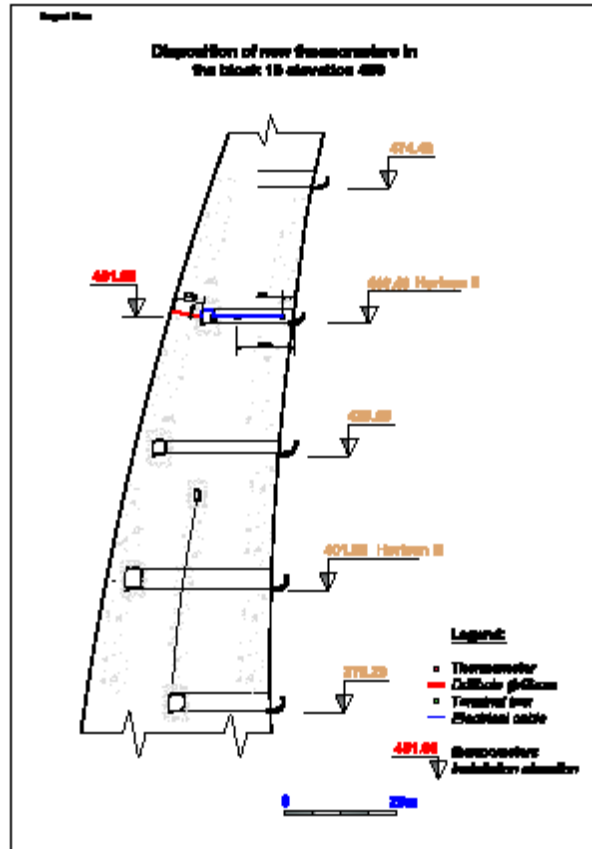
**Thermometer TC-B15-402-CN**  
**Cross section**



**Thermometer TC-B15-402-DS**  
**Cross section**

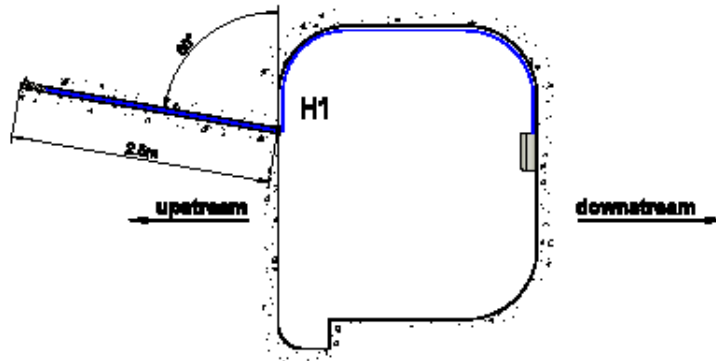


ნახ. 2.5.4.2 თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 402მ ნიშნულზე არსებულ გალერეებში; სადაწნეო (US), ცენტრალურ (CN) და უდაწნეო (DDS) კვეთებში.

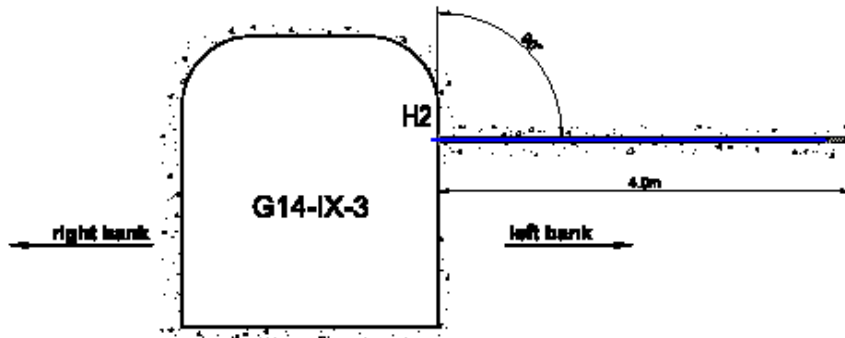


ნახ. 2.5.4.2 თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 15 სექციის 450 მ ნიშნულზე არსებულ გალერეებში; სადაწნეო (US), ცენტრალურ (CN) და უდაწნეო (DDS) კვთებში.

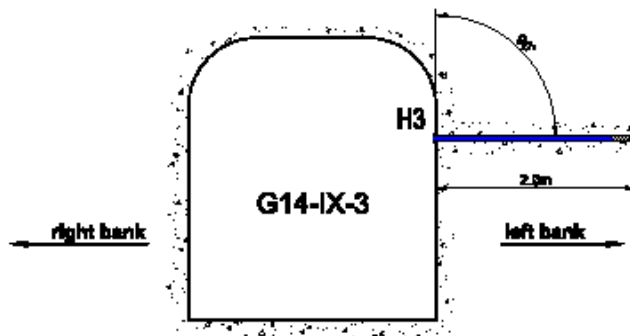
**Thermometer TC-B15-450-US**  
**Cross section**



**Thermometer TC-B15-450-CN**  
**Cross section**



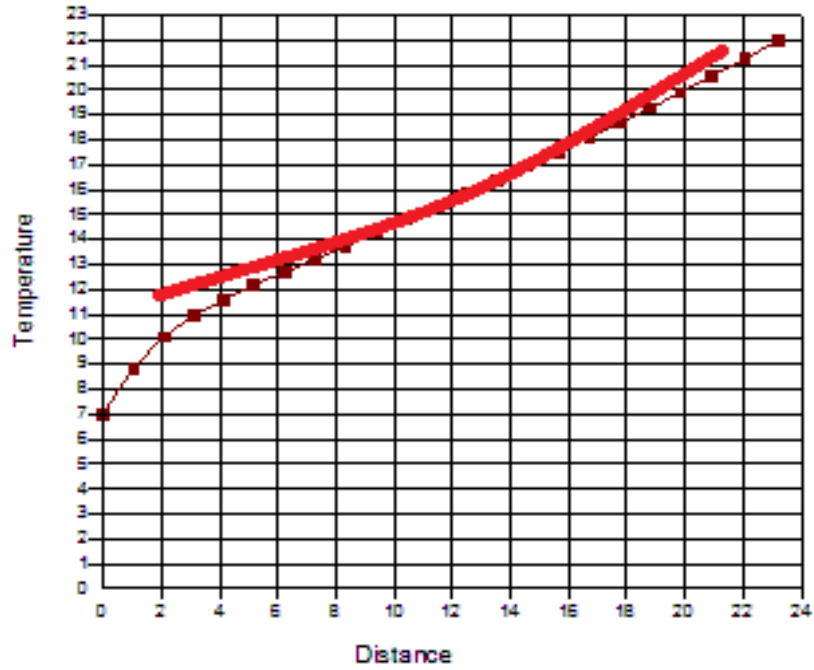
**Thermometer TC-B15-450-DS**  
**Cross section**



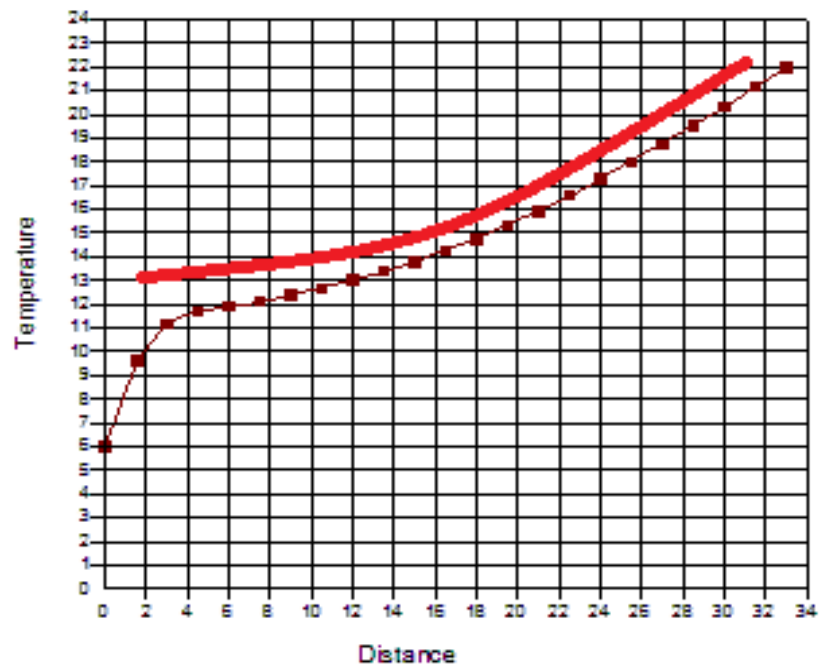
ნახ. 2.5.4.4 თერმომეტრების განლაგების სქემა კაშხლის 450მ ნიშნულზე არსებულ გალერეებში; სადაწნეო (US), ცენტრალურ (CN) და უდაწნეო (DDS) კვეთებში.



### Level 450

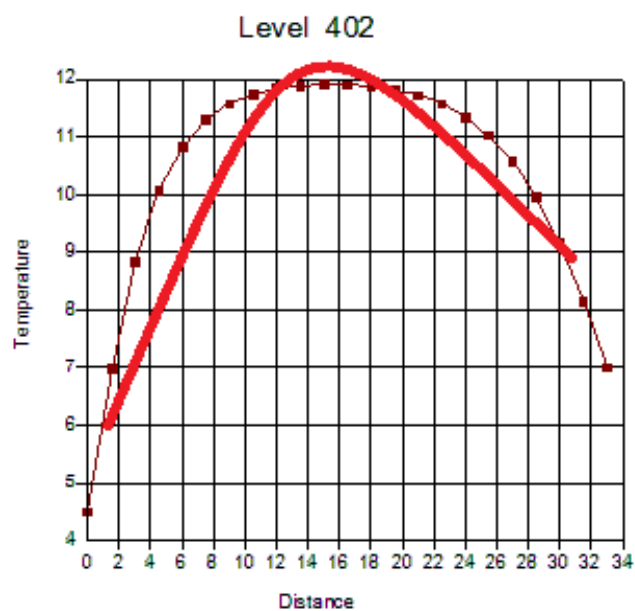
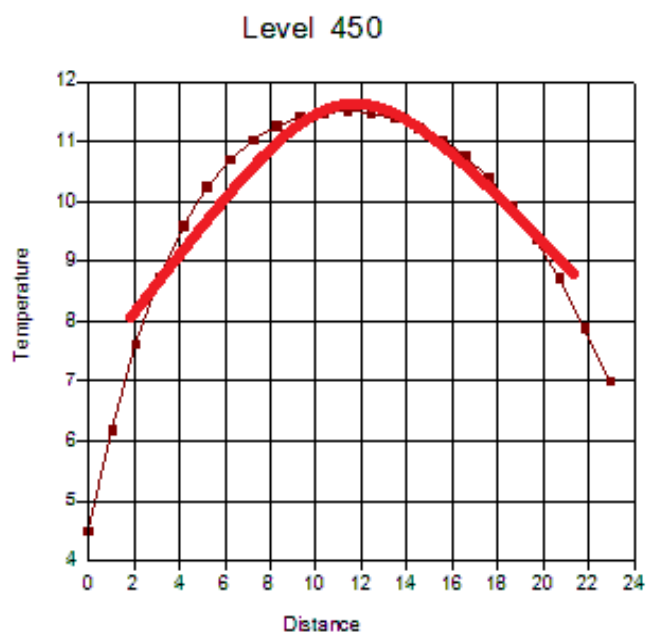


### Level 402



ნახ. 2.5.4.5 ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური დონის დროს:

- თეორიული ამონახსნებით;
- ნატურული გაზომვებით.



ნახ. 2.5.4.6 ტემპერატურის განაწილება კაშხლის ჰორიზონტალურ კვეთებში წყალსაცავში წყლის მინიმალური დონის დროს:

————— თეორიული ამონახსნებით;

————— ნატურული გაზომვებით.

### 3. დასკვნა

1. დამუშავებული იქნა ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში არასტაციონალური ტემპერატურული ველის შესასწავლად.

აღნიშნულის საფუძველზე ჩატარებული იქნა ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის თბური რეჟიმის გაანგარიშება და ანალიზი.

2. ენგურჰესის კაშხლის თბური რეჟიმის თეორიული და კაშხლის გალერეებში არსებული თერმომეტრული გაზომვების შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ისინი ძირითადად კარგ შესაბამისობაში არიან ერთმანეთთან. ამავე დროს საჭიროა აღინიშნოს, რომ რიგ შემთხვევებში, განსხვავება მათ შორის არსებითია, რაც დასაშვებია ასეთ რთულ ნაგებობისათვის, რომელსაც მრავალი წლის განმავლობაში კონტაქტი აქვს ორ გარემოსთან - ჰაერთან და წყალთან. ანალოგიური კანონზომიერება გამოვლენილი იქნა ასევე სხვა კაშხლებზე ჩატარებული თბური პროცესების გამოკვლევისას.

3. წელიწადის ცივ სეზონში ენგურჰესის კაშხალში წარმოიშობა საკმაოდ დიდი ტემპერატურული ვარდნები „ბირთვი-წახნაგი“, რომელთაც შუძლიათ გამოიწვიონ საშიში გამჭიმავი ძაბვები, რომელთა განეიტრალება შეუძლიათ წელიწადის ცხელ სეზონში წარმოშობილ მკუმშავ ძაბვებს, გამოწვეული ანალოგიური ტემპერატურული ვარდნებით „ბირთვი-წახნაგი“.

4. ენგურჰესის კაშხლის პროექტირების დროს მიღებული გადაწყვეტილების თანახმად მშენებლობის დროს 400 მ ნიშნულის დაბლა და მაღლა ცენტრალურ ზონებში (ბირთვი) ტემპერატურა შენარჩუნებული იქნა 10° და 12° C შესაბამისად. გაზომვების შედეგების მიხედვით ეს ტემპერატურული მაჩვენებლები აღნიშნულ ზონაში ამჟამად იცვლება 11 დან 14 გრადუსის ფარგლებში, ქვემო ბიეფის ტემპერატურული რყევის ამპლიტუდა 17° C-ზე უფრო მეტია ვიდრე ზემო ბიეფისა (9° C), რაც კაშხალში ჰაერის თბური ტალღის გავლენაზე მიუთითებს.

ამჟამად, სამწუხაროდ, გაზომვები მხოლოდ 2 კვეთში მიმდინარეობს, რაც სრულ წარმოდგენას არ იძლევა მთელი წლის განმავლობაში ტემპერატურული ველის განაწილებაზე მთლიანად კაშხალში.

5. ტემპერატურულ რეჟიმი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კაშხლის დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. 2006 წელს (გვირაბის რემონტისა და ენერგეტიკულ სისტემაში თბოსადგურის ბლოკის ჩართვასთან დაკავშირებით) 2-ჯერ (აგვისტოს ბოლო და ნოემბრის ბოლო) მოხდა წყალსაცავის შევსება. 2.5 თვის დაყოვნებით გამოწვეულმა ჰაერის ტემპერატურის დაწევამ, წყალსაცავის მაქსიმალური ნიშნულის დროს, გამოიწვია კაშხლის გადახრა ქვემო ბიეფის მხარეს 5მმ-ით. ამ დროს სადაწნეო ზედაპირზე მაქსიმალური მთავარი ძაბვები შემცირდა ~2.2მგპა-ით მაგრამ არსებული ძაბვები მკუმშავია და ამის გამო მთლიანობაში სადაწნეო წახნაგზე გამჭიმავი ძაბვები არ ჩნდება.

6. სამომავლოდ, ენგურჰესის ექსპლუატაციისას საჭიროა გათვალისწინებული იქნას თერმული რეჟიმის გავლენა თაღოვან კაშხალზე და წყალსაცავის შევსება არ მოხდეს ზამთრის პერიოდში (ძირითადად, იანვარში - როდესაც ტემპერატურა მინიმალურია). ამ დროს კაშხალზე დამატებით ვითარდება თერმული ძაბვები და შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს კაშხალის ხეობასთან მცირე გამჭიმავი ძაბვების გაჩენას და საკონტაქტო ზონებში მცირეოდენ გახსნას.

7. კაშხლის ძირითადი ნაწილში არსებული ბზარების უმეტესობა ვერტიკალური ორიენტაციისაა, რაზეც კაშხლის სიმრუდემ იქონია გავლენა. კონტაქტის ზონისაკენ ბზარების ორიენტაციის ცვლილებაში ტემპერატურულ ძაბვებთან ერთად გავლენას ახდენს მთავარი ძაბვები.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. F. Salazar, D. Vicente, J. Irazábal, I. de-Pouplana, Javier San Mauro. A Review on Thermo-mechanical Modelling of Arch Dams During Construction and Operation: Effect of the Reference Temperature on the Stress Field. *Materials Science*.
2. P. Žvanut, G. Turk, A. Kryzanowski Thermal Analysis of a Concrete Dam Taking into Account Insolation, Shading, Water Level and Spillover.
3. Engineering, Environmental Science. *Applied Sciences*. 2021.
4. Engineering. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019
5. 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;
6. 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;
7. Ю. Гунтер - автор новой технологии возведения массивных бетонных сооружений, успешно использованной на строительстве арочной плотины Миатлинской ГЭС в 1985 году на Кавказе в России,
8. Н.З. Колбазов, Г.Т. Микеладзе, Л.С. Габуня. Внедрение передовой технологии и новой техники на строительстве Ингурской ГЭС .
9. Журнал “Гидротехническое строительство”, № 8. 1984. СССР .
10. Л.П. Трапезников. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений . Энергоатомиздат. 1986. СССР
11. Е.Н. Елизаров и другие. Анализ трещинообразования в блоках Чиркейской ГЭС . Журнал “Энергетическое строительство”, № 8. 1977. СССР .
12. Г.П. Вербицкий, Г.И.Чоговадзе, Ф.И.Данелия. Об укрупнении блоков бетонирования арочных плотин с допущением радиальных термических трещин . Журнал “Гидротехническое строительство”, № 10. 1987. СССР .

13. N. Aniskin N. Chong Chyk. Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base. Conf. Series: Materials Science and Engineering 365 - 2018;
14. Rana A. Embaby, Amr Abdelrahman, Ezzeldin Yazeed Sayed-Ahmed. Concrete Gravity Dams: Coupled Thermal-Stress Numerical Analysis. Conference Paper in IABSE Symposium Report · May 2018;
15. **N. Aniskin, Chuc Nguyen Trong** The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. MATEC Web Conf. **Volume** 196, XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018).
16. **N. Aniskin**, Alexey Mikhailovich Shaytanov. Optimization of the Temperature and Thermo-Stressed State of a Concrete Dam Constructed from Particularly Lean Roller-Compacted Concrete. 30 March 2023. *Buildings* 2023, *13*(4), 914;
17. Gaspar, A.; Lopez, F. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields. *Eng. Struct.* **2014**, *65*, 99–110;
18. ICOLD Bulletin 165. Selection of Materials for Concrete Dams, ICOLD, Antalya. 1999. Available online: <https://www.icold-cigb.org/GB/publications/bulletins.asp> (accessed on 1 March 2023).
19. Nagayama, I.; Jikan, S. 30 years' history of Roller-Compacted Concrete dams in Japan. In *Roller Compacted Concrete Dams*; Routledge: Milton Park, UK, 2018; pp. 27–38. [[Google Scholar](#)]
20. Aniskin, N.A.; Shaitanov, A.M.; Shaitanov, M.V.; Khokhotva, S.N. Influence of solar radiation on heating of massif of gravity dam erected from low-cement concrete. *Hydraul. Eng. Constr.* **2021**, *11*, 11–18. [[Google Scholar](#)]
21. Aniskin, N.; Truk, N.T.; Anh, L.D. Influence of base elasticity modulus on thermal stress state of concrete block. *Hydraul. Eng. Constr.* **2019**, *11*, 4–9. [[Google Scholar](#)]
22. N. Aniskin, Trong Chuc Nguyen. Prediction of thermal stress in a concrete gravity dam. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030 (2021).
23. M. Balissat, C. Bossoney, N. Nilipour, A. Fankhauser, “Heightening And Transformation Of A Single Curvature Arch-Gravity Dam Into A Double Curvature

- Arch Dam”, 22nd Congress International Commission on Large Dams, Barcelona, Spain, June 2006, to be Published;
24. Van-Lam Tang, Trong-Chuc Nguyen, Bulgakov B., Ngoc-Anh Pham, Trong-Phuoc Huynh. A COMBINED EXPERIMENT-SIMULATION STUDY ON TEMPERATURE REGIME OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE APPLYING FOR DAM CONSTRUCTION;
  25. Grumbine RE. Using transboundary environmental security to manage the Mekong River: China and SouthEast Asian Countries. International Journal of Water Resources Development 2018; 34(5):792–811.;
  26. Zhang S, Yu M, Xiao F, Wang C. Long-term structural responses of orifices in gravity dams considering thermal and creep effects. Journal of Performance of Constructed Facilities 2015;30(3);
  27. Isao N, Shigeharu J. 30 years’ history of roller compacted concrete dams in Japan. Roller compacted concrete dams, Berga et al. edition, Swets & Zeitlinger, Lisse; 2003.
  28. Bui TMH, Schreinemachers P, Berger T. Hydropower development in Vietnam: Involuntary resettlement and factors enabling rehabilitation. Land Use Policy 2013;31:536–544.
  29. Polimeni JM, Iorgulescu RI, Chandrasekara R. Trans-border public health vulnerability and hydroelectric projects: The case of Yali falls dam. Ecological Economics 2014;95:81–89.
  30. Raghavan SV, Tue VM, Yui LS. Impact of climate change on future stream flow in the Dakbla river basin. Journal of Hydroinformatics;16(1):231–244. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.165>;
  31. Liu X, Zhang C, Chang X, Zhou W, Cheng Y, Duan Y. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. Applied Thermal Engineering 2015;78:449–459. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050>;
  32. Tressa K, Kavitha PE, Bennet K. Numerical analysis of temperature distribution across the cross section of a concrete dam during early ages. American

Journal of Engineering Research 2013;1:26–31. <http://www.ajer.org/papers/rase-2013/volume-1/E120132631.pdf>;

33. Parveen K, Aeid AA, Bijan S, Khaled G. Thermal and structural response of RCC dams during their service life. *Journal of Thermal Stresses* 2015;10:1–19. <https://doi.org/10.1080/01495739.2015.1015862>;

34. Kuzmanovic V, Savic L, Mladenovic N. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of RCC dams. *Journal of Thermal Stresses* 2013;36(2):112–134. <https://doi.org/10.1080/01495739.2013.764795>;

35. Fu YF, Wong YL, Tang CA, Poon CS. Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperatures–Part I: Thermal cracking around single inclusion. *Cement and Concrete Composites* 2004;26:99–111. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00086-6) *Journal of Thermal Engineering, Research Article, Vol. 6, No. 5, pp. 772-785, October, 2020 785*;

36. Fu YF, Wong YL, Tang CA, Poon CS. Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperatures–Part II: thermal cracking around multiple inclusions. *Cement and Concrete Composites* 2004;26:113–126. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00087-8);

37. Šavij B, Schlangen E. Use of phase change materials (PCMs) to mitigate early age thermal cracking in concrete: Theoretical considerations. *Construction and Building Materials* 2016;126:332–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.046>;

38. Singh PR, Rai DC. Effect of piped water cooling on thermal stress in mass concrete at early ages. *Journal of Engineering Mechanics* 2018;144(3):0001418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001418);

39. Modarres A, Hosseini Z. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design* 2014;64:227–236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>;



40. Yoshitake I, Komure H, Nassif AY, Fukumoto S. Tensile properties of high volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate. *Construction and Building Materials* 2013;49:101–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020>;
41. Ali MA, Kambiz R. Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials* 2013;38:356–364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.109>;
42. Aghabaglou AM, Çakir ÖA, Ramyar K. Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites* 2013;37:259–266. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009>;
43. Mikulčić H, Klemeš JJ, Vujanović M, Urbaniec K, Duić N. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production* 2016;136(Part B):119–132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.145>;
44. Tang VL, Boris B, Olga A, Oksana L, Pham NA. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete. *E3S Web of Conferences* 2018;33:02030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302030>;
45. Terwilliger TC, Bunkóczi G, Hung LW, Zwart PH, Smith JL, Akey DL, Adams PD. Can I solve my structure by SAD phasing? Planning an experiment, scaling data and evaluating the useful anomalous correlation and anomalous signal. *Acta Crystallographica Section D: Structural Biology* 2016;D72:359–374. <https://doi.org/10.1107/S2059798315019403>.
46. Williams HP. *Model Building in Mathematical Programming*. John Wiley & Sons; 2013. ISBN: 978-1-118-44333-0 [23] Wang, B., Xia, X., & Zhang, J. (2014). A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*, 77, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.025>.

47. Tang VL, Boris B, Sofia B, Olga A, Pham NA, Vu DT. Effect of rice husk ash and fly ash on the workability of concrete mixture in the high-rise construction. E3S Web of Conferences 2018;33:02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302029>.
48. Wackerly D, Mendenha III W, Scheaffer RL. Mathematical Statistics with Applications. Brooks/Cole [Cengage Learning]; 2014. ISBN: 9780495110811.
49. Aniskin N, Chyk NC. Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018;365:042083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042083>.
50. Ahmed EYS, Abdelrahman A, Embaby RA. Concrete dams: Thermal-stress and construction stage analysis. Dams and Reservoirs 2017;28(1):1–19. <https://doi.org/10.1680/jdare.16.00055>.
51. Chen H, Liu Z. Temperature control and thermal-induced stress field analysis of GongGuoQiao RCC dam. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2018; doi: 10.1007/s10973-018-7450-1. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7450-1>.
52. Ashtankar VB, Chore HS. Thermo-structural monitoring of RCC dam in India through instrumentation. Structural Monitoring and Maintenance 2015;2(2):95–113. <https://doi.org/10.12989/smm.2015.2.2.095>.
53. Bobko CP, Zadeh VZ, Seracino R. Improved schmidt method for predicting temperature development in mass concrete. ACI Materials Journal 2015;112(4):579–586. <https://doi.org/10.14359/51687454> [31] Aniskin NA, Chuc NT. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. MATEC Web of Conferences 2018;196:04059. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604059>.
54. Bevelhimer, M., and Bennett, W.: Assessing cumulative thermal stress in fish during chronic intermittent exposure to high 415 temperatures, Environmental Science & Policy, 3, 211-216, 2000.
55. Soares, M.A., Levis, P., Seara, R.W., Ferreira, E.S. and Terres, J.F., “Seepage and Treatment of Cracks in Salto Caxias Dam”, Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 2003, pp. 1185-1191.

56. Barrett, Bruce and Ringel, Jan, “Upper Stillwater Crack Repair”, Proceedings of the Association of Dam Safety Officials (ASDSO) 2006 Annual Conference, Boston, Massachusetts, September 2006.

57. Fitzgerald, Thomas, Hansen, Kenneth D., and Marshall, Tillman, “Hot Dam! Mass Concrete – Expected vs. Actual Performance”, Proceedings of the ASDSO. 2011 Annual Conference, Washington, D.C.

58. Kenneth D HANSEN, Brian A FORBES. THERMAL INDUCED CRACKING PERFORMANCE OF RCC DAMS. 6 TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) DAMS Zaragoza, 23 – 25 October 2012.

59. Maier, Giulio & Ardito, Raffaele & Fedele, Roberto. (2004). Inverse analysis problems in structural engineering of concrete dams. 9.

60. Dams and Appurtenant Hydraulic Structures, Ljubomir Tanchev, 2nd Edition, 2014 [3] Hu, Jiang & Wu, Suhua. (2018). Statistical modeling for deformation analysis of concrete arch dams with influential horizontal cracks. Structural Health Monitoring. 18. 147592171876030. 10.1177/1475921718760309.

61. Wieland, Martin & F. Kirchen, G. (2012). Long-term dam safety monitoring of Punt dal Gall arch dam in Switzerland. Frontiers of Structural and Civil Engineering. 6. 10.1007/s11709-012-0144-z.

62. Human, Odon & Oosthuizen, C. (2016). NOTES ON THE BEHAVIOUR OF A 65 YEAR OLD CONCRETE ARCH DAM AFFECTED BY AAR (MAINLY BASED ON VISUAL OBSERVATIONS).

63. Campos, André & López, Carlos & Blanco, Ana & Aguado, Antonio. (2016). Structural Diagnosis of a Concrete Dam with Cracking and High Nonrecoverable Displacements. Journal of Performance of Constructed Facilities. 30. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000869.

64. Luo, Danni & Lin, Peng & Li, Qingbin & Zheng, Dong & Liu, Hongyuan. (2015). Effect of the impounding process on the overall stability of a high arch dam: a case study of the Xiluodu dam, China. Arabian Journal of Geosciences. 8. 10.1007/s12517-015-1868-6.

65. Hua Cui, Jian & Jiang Xiao, Han & Shan, Liang. (2011). Contact Analysis on the Longitudinal Joint of Gravity Dam. *Advanced Materials Research*. 250-253. 2931-2934. 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.2931.
66. Bukenya, Patrick. (2014). Health monitoring of concrete dams: a literature review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*.
67. Willm G and Beaujoint N. Les me ´ thodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricite ´ de FranceProble ` mes anciens et solutions nouvelles. In: International Commission on Large Dams (ICOLD), 9th Congress on large dams, vol. III, Istanbul, Turkey, 1967, pp.529–550. (in French).
68. Berberan, Antonio & Portela, Eliane & Boavida, João. (2006). Assisted visual inspection of dams as a tool for structural safety control. A case study..
69. Alba, Mario & Bernardini, Giulia & Giussani, Alberto & Paolo Ricci, Pier & Roncoroni, Fabio & Scaioni, Marco & Valgoi, Paolo & Zhang, Katherine. (2008). Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techiques. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 37.
70. Strumenti e metodi per il monitoraggio delle strutture e dei fenomeni. Alberto Giussani. Politecnico di Milano. AUTEc 2007. GEOMATICA. La didattica all'inseguimento dell'evoluzione scientifica e tecnologica. Cosa insegnare. Come insegnare. Pavia, 10-11 Maggio 2007.
71. Chouinard, Luc & Roy, Vincnet. (2015). PERFORMANCE OF STATISTICAL MODELS FOR DAM MONITORING DATA.
72. Kaamin, Masiri & Azyyati Idris, Noor & MOHD BUKARI, SAIFULLIZAN & Ali, Zaurin & Samion, Norhafiza & A. A., Mustafa. (2017). Visual Inspection of Historical Buildings Using Micro UAV. *MATEC Web of Conferences*. 103. 07003. 10.1051/mateconf/201710307003.
73. De Sortis, Adriano & Paoliani, P. (2007). Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring. *Engineering Structures - ENG STRUCT*. 29. 110-120. 10.1016/j.engstruct. 2006.04.022.

74. Fedele, Roberto & Maier, G & Miller, B. (2006). Health Assessment of Concrete Dams by Overall Inverse Analyses and Neural Networks. International Journal of Fracture. 137. 151-172. 10.1007/s10704-006- 6582-7.

75. Ferdinand Klug, Werner Lienhart and Helmut Woschitz. High resolution monitoring of expansion joints of a concrete arch dam using fiber optic sensors\*. Proc. 6th World Conference on Structural Control and Monitoring (6WCSCM), 2014, Barcelona, Spain: 3164-3176 [19] www.geosense.co.uk [20] www.berntsen.com

76. Zac James Prins. INVESTIGATING THE OPERATIONAL BEHAVIOUR OF A DOUBLE CURVATURE ARCH DAM. FACULTY OF ENGINEERING AND THE BUILT ENVIRONMENT DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING.

77. Milan Talich. The Deformation Monitoring of Dams by the GroundBased InSAR Technique - Case Study of Concrete Hydropower Dam 59 Orlik. Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engg. (IJAAEE) Vol. 3, Issue 1 (2016) ISSN 2349-1523 EISSN 2349-1531

78. Ardito, Raffaele & Cocchetti, Giuseppe. (2006). Statistical approach to damage diagnosis of concrete dams by radar monitoring: Formulation and a pseudo-experimental test. Engineering Structures. 28. 2036- 2045. 10.1016/j.engstruct.2006.04.001.

79. Pan, Bing & Qian, Kemao & Xie, Huimin & Asundi, Anand. (2009). TOPICAL REVIEW: Two-dimensional digital image correlation for inplane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science & Technology - MEAS SCI TECHNOL. 20. 10.1088/0957- 0233/20/6/062001.

80. Reagan, Daniel & Sabato, Alessandro & Niezrecki, Christopher. (2017). Unmanned aerial vehicle acquisition of three-dimensional digital image correlation measurements for structural health monitoring of bridges. 1016909. 10.1117/12.2259985.

81. Colombo, Martina & Domaneschi, Marco & Ghisi, Aldo. (2016). Existing concrete dams: Loads definition and finite element models validation. Structural Monitoring and Maintenance. Vol. 3. 129-144. 10.12989/smm.2016.3.2.129.

82. Andreini, Marco & De Falco, Anna & Marmo, Giovanni & Mori, Matteo & Sevieri, Giacomo. (2017). Modelling issues in the structural analysis of existing concrete gravity dams.

83. Qingbin Li, Guohe Liang, Yu Hu, and Zheng Zuo, “Numerical Analysis on Temperature Rise of a Concrete Arch Dam after Sealing Based on Measured Data,” Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, Article ID 602818, 12 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/602818>.

84. Bofang, Z. \_1997\_. “Prediction of water temperature in deep reservoir.” Dam Eng., VIII\_1\_, 13–25. [30] Sheibani, Farrokh & Ghaemian, Mohsen. (2006). Effects of Environmental Action on Thermal Stress Analysis of Karaj Concrete Arch Dam. Journal of Engineering Mechanics-asce - J ENG MECHASCE. 132. 10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:5(532).

85. ჯ.ჭანია. ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის ტემპერატურული რეჟიმის გაანგარიშების საკითხები. კონფერენციის თეზისები, მიღწილი აკად. ი.ლუღუშაურის 95 წლის იუბილეს. თბილისი 05.2023.

86. ჯ.ჭანია. არასტაციონალური ტემპერატურული ველის გაანგარიშება ბეტონის კაშხლებისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომათა კრებული, 2023.

87. M.Kalabegishvili, D.Chania, M.Sadunishvili, R.Samkharadze. Enguri HPP Arch Dam Temperature Field Analysis. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომათა კრებული, 2023.

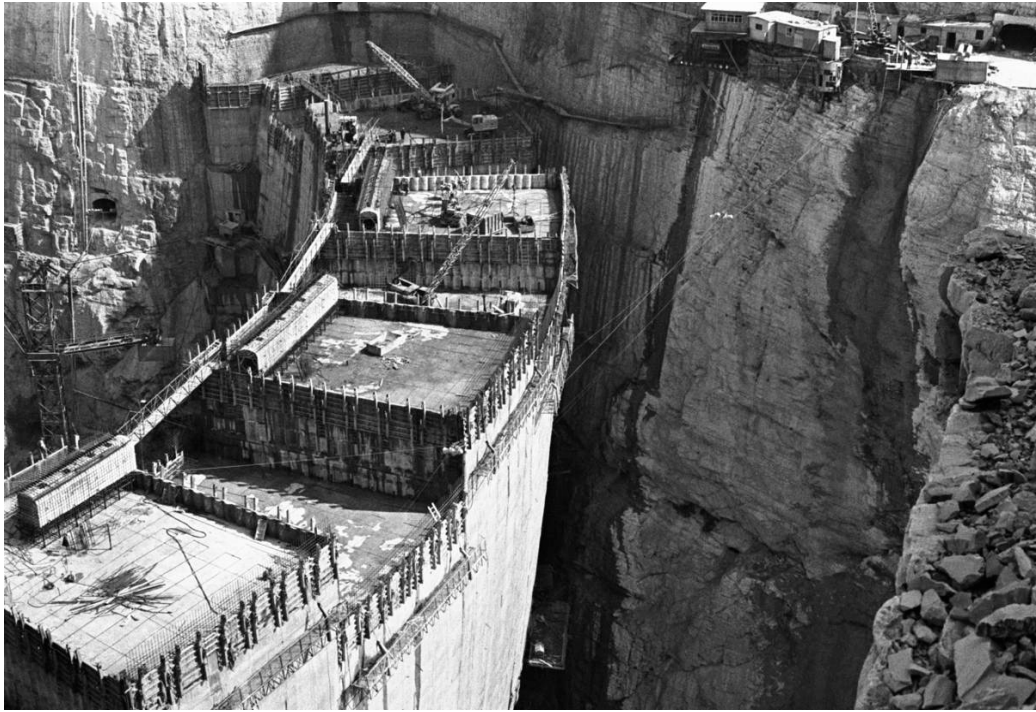
88. Kalabegishvili M., Chania J. Georgian Technical University. Thermal regime and cracking of enguri arch dam. ЕВРОПЕЙСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. Тбилиси 2022 с.114-128.

## დანართები

## დანართი - 1

ჩირგეი ჰესის თაღოვანი კაშხალის მშენებლობა.  
ბეტონირებადი ბლოკები





ფოტო 1. ჩირგვი ჰესის თაღოვანი კაშხალის მშენებლობა.  
ბეტონირებადი ბლოკები.



ფოტო 2. ჩირგვი ჰესის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობა.



ფოტო 3. ჩირგვი ჰესის თაღოვანი კაშხალი

## დანართი - 2

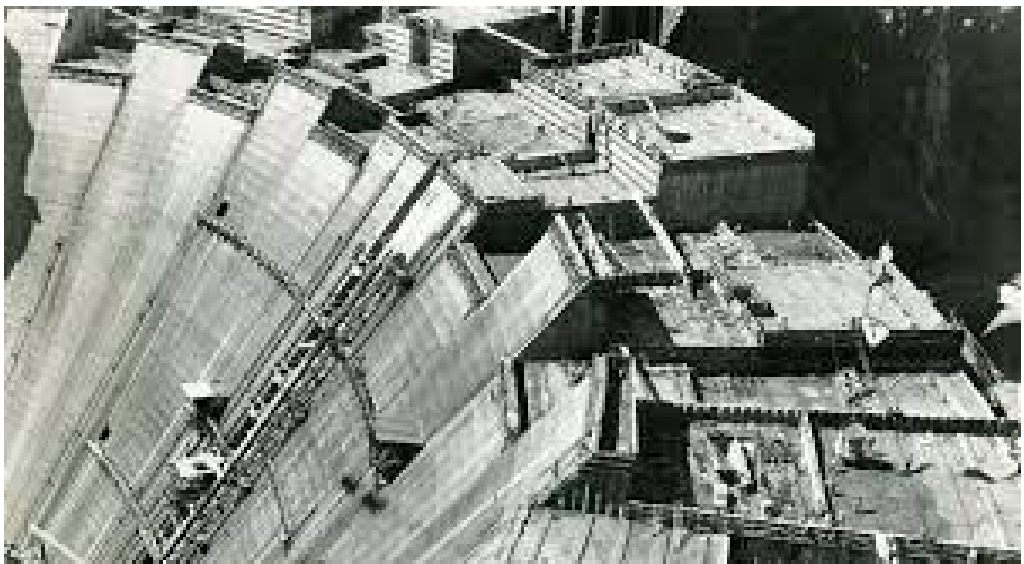
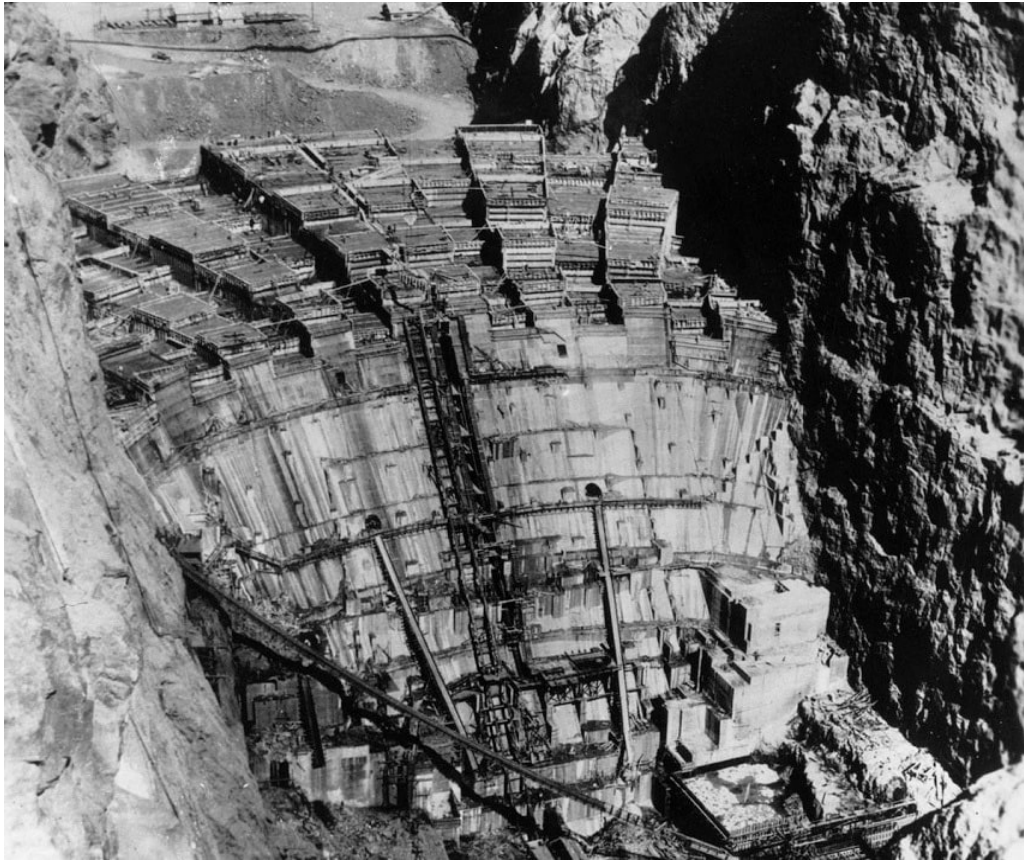
მშენებარე ბეტონის თაღოვანი კაშხლების  
ტექნოლოგიური სქემები







ფოტო ბეტონირებადი სექციები მშენებარე კაშხლის  
ფუძის ზონაში.



ფოტო ბეტონირებადი სექციები  
თაღოვანი კაშხლის მშენებლობისას.





ლოს ანჯელის თაღვანი კაშხლის მშენებლობა



თაღოვანი კაშხლის მშენებლობა სექციებით (ჩინეთი).

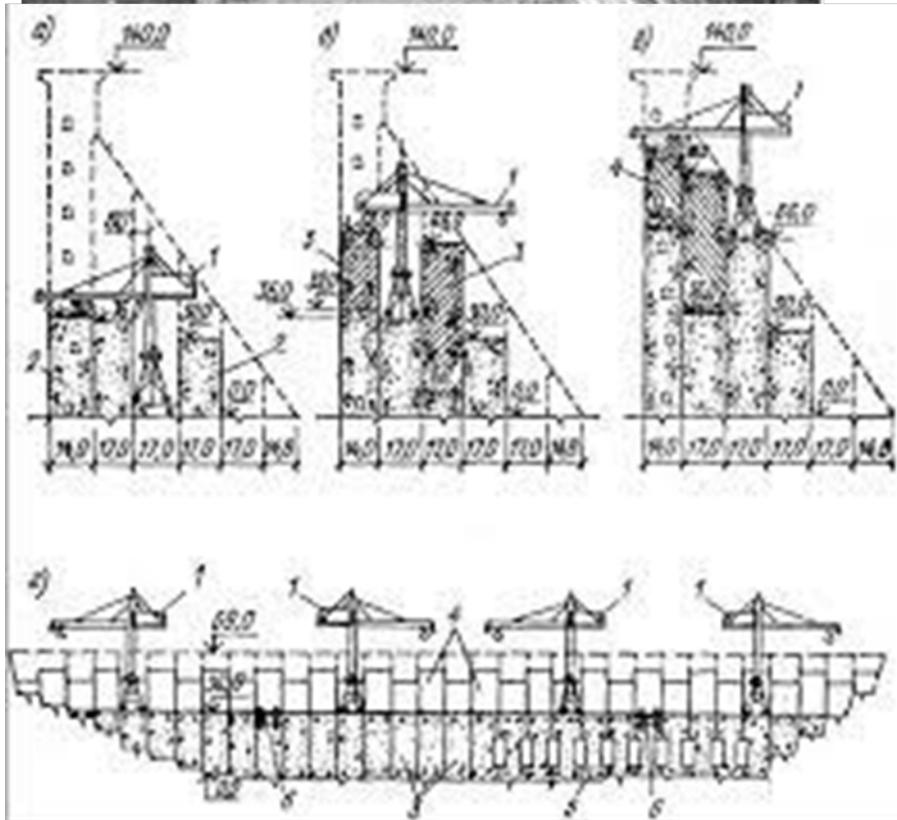
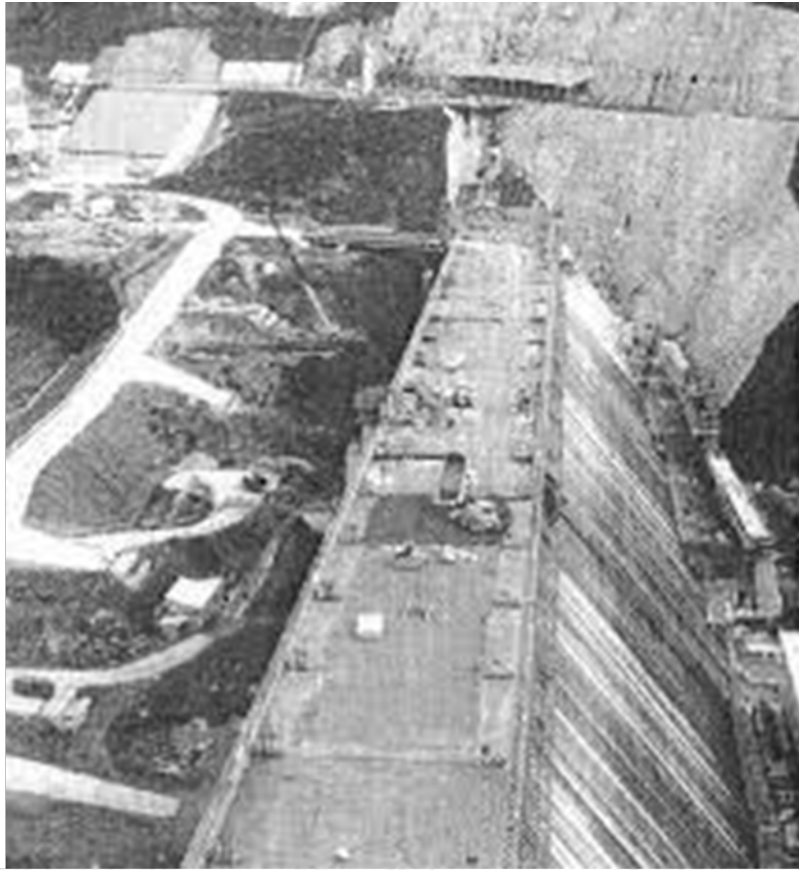
### დანართი - 3

მიატლინსკის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობის  
ტექნოლოგიური სქემები



## დანართი - 4

გრაფიტაციული კაშხლის მშენებლობის  
ტექნოლოგიური სქემები



## დანართი - 5

ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლი



ენგურჯესის თალოვანი კაშხლის მშენებლობა (1977 წელი).