

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზაალ ბუკია

**ჰიდროდინამიკური დატვირთვა კომპლუნი ტიპის
წყალმიმღებ ნაგებობებზე მიწისძვრის დროს**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა - მშენებლობა

შიფრი 0732.1.1

ხელმძღვანელი: პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0160, საქართველო

2021

საავტორო უფლება © 2021 წელი ზაალ ბუკია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი სამშენებლო ფაკულტეტი ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ზაალ ბუკიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: ჰიდროდინამიკური დატვირთვა კოშკურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებზე მიწისძვრის დროს“ და რეკომენდაციას ვაძლევთ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. თარიღი 00.00.2021

ხელმძღვანელი: პროფესორი მ. ყალაბეგიშვილი

რეცენზენტი:

ტმდ, აკადემიკოსი გ. გაბრიჩიძე

პროფესორი დ. ჯანყარაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2021 წელი

ავტორი: ზაალ ბუკია

დასახელება: ჰიდროდინამიკური დატვირთვა კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებზე მიწისძვრის დროს

ფაკულტეტი: სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 08.11.2017

ინდივიდუალური პროფესორის ან ინსტიტუტის მიერ
ზემოთმოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით
მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და
გავრცელების სპეციალური უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს
ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ სპეციალურ 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 „ჰიდროდინამიკური დატვირთვა კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებზე მიწისძვრის დროს“ განხილულია საშუალო და მაღალდაწნევიან ჰიდროკვანძებში ნაგებობათა გავრცელებული კომპურა ტიპის წყალმიმღების სიმტკიცისა და მდგრადობის კვლევა სეისმური ზემოქმედებისას.

ტალღური თეორიის ფარგლებში დამუშავებული იქნა ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებისათვის ჰიდროდინამიკური წნევის განსაზღვრისათვის სეისმური ზემოქმედების დროს (დრეკადი რხევების მიხედვით) წყალმიმღებების კონფიგურაციის, ასევე კომპებს შორისა და ასევე, კომპსა და კაშხალს შორის მანძილების გათვალისწინებით. ყოველივე შესაძლებლობას იძლევა განსაზღვრული იქნას ნაგებობათა შორის დაშორების სახიფათო ზონა.

კვლევის დამუშავებული მეთოდის საუძველზე მიღებული იქნა წრიული კვეთის შეწყვილებული ცილინდრული ტიპის წყალმიმღები ნაგებობებისათვის წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვები, რაც ითვალისწინებს ასევე მათი კაშხლიდან დაშორების გავლენას.

ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სპექტრალური თეორიის ფარგლებში, სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, დამუშავებული იქნა კვლევის მეთოდიკა წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვების გათვალისწინებით. წყლის ინერციული ზემოქმედების გაანგარიშება ემყარება წარმოდგენილ ნაშრომში დამუშავებულ მეთოდიკას.

დამუშავებული იქნა კომპურა წყალმიმღების სივრცითი კონსტრუქციის დინამიკური გაანგარიშების გამარტივებული მოდელი ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, რაც გულისხმობს წრიული ან მართკუთხა კვეთის,

სიმაღლეში ცვლადი გეომეტრული პარამეტრების მქონე კონსტრუქციის მოდელირებას დაყვანილი პარამეტრების მქონე პრიზმული ძელის გამოყენებით. აღნიშნული მოდელი საშუალებას იძლევა შეირჩეს კოშკის კონსტრუქციის საპროექტო პარამეტრები, მათ შორის რკ.ბეტონის კედლის ფარდობითი სისქე.

ცარიელი წყალსაცავის არსებობისას ორ და სამ განზომილებიანი ამოცანების ფარგლებში ჩატარებულმა რიცხვითი ამონახსნების ანალიზმა აჩვენა შედეგების კარგი თანხვედნა. ყოველივე მყარ საფუძველს ქმნის რათა ხსენებული ორ განზომილებიანი მოდელი გამოყენებული იქნას ასევე, სავსე წყალსაცავის დროს განვითარებული წყლის დინამიკური ზემოქმედების გასათვალისწინებლად.

დამუშავებული მეთოდიკის საფუძველზე შეფასებული იქნა თეძამის ჰიდროკვანძის წყალმიმღები ნაგებობის სეისმური დამაბული მდგომარეობა და სიმტკიცის მარაგები წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით. მიღებული იქნა წყალმიმღები კოშკის რკინაბეტონის კედლის ფარდობითი სისქის (t/r) ოპტიმალური მნიშვნელობა წყლის დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

Abstract

The dissertation "Hydrodynamic load on tower water intake during the earthquake" discusses the study of the strength and stability of tower-type structures in medium and high-pressure hydrosystem during seismic impact.

Under the wave theory, an algorithm and calculation program were developed for tower-type aquifers to determine the hydrodynamic pressure during seismic impacts (according to elastic oscillations), configuration of aquifers, as well as between towers and tower distances between dams. Every opportunity is given to determine the dangerous zone of distance between buildings.

Based on the research methodology, loads developed by hydrodynamic impact of water for paired cylindrical intake structures of circular cross-section were obtained, which also takes into account the impact of their distance from the dam.

Within the framework of the two-dimensional task of spectral theory, using the finite element method, the research methodology was developed taking into account the loads developed by the hydrodynamic impact of water. The calculation of the inertial impact of water is based on the methodology developed in the presented paper.

A simplified model for the dynamic calculation of the spatial construction of a tower intake was developed using the finite element method within the 2 dimensional task, which involves modeling a structure with a circular or rectangular section with variable geometric parameters in height using a prism pole with reduced parameters. This model made it possible to select the design parameters of the tower construction, including the relative thickness of the reinforced concrete wall.

In the presence of an empty reservoir, the analysis of numerical solutions performed within the framework of 2 and 3 dimensional tasks showed a good agreement of the results. All provide a solid basis for the application of the above 2

dimensional models to take into account the dynamic impacts of water developed during a full reservoir.

Based on the developed methodology, the seismic stress condition and strength reserves of the Tedzami hydropower plant were assessed taking into account the hydrodynamic impacts of the water. The optimal value of the relative thickness (t / r) of the reinforced concrete wall of the intake tower was obtained taking into account the dynamic impact of water.

შინაარსი

შესავალი	13
1. სეისმური და ჰიდროდინამიკური დატვირთვები ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე	17
1.1 წყლის ჰიდროდინამიკური დატვირთვების განსაზღვრასთან დაკავშირებული არსებული მასალის მიმოხილვა	17
1.2 სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების ძირითადი მეთოდოლოგია	26
2. კვლევის მეთოდიკა და ძირითადი ალგორითმი	30
2.1 საკითხის არსი და დაშვებები	30
2.2 ცილინდრული გარსის რხევა	31
2.2.1 ამოცანის არსი	31
2.3 ორი ერთვაროვანი ცილინდრული წყალმიმღები ნაგებობის სინქრონული რხევა	34
2.4 ორი წყალმიმღების სინქრონული რხევა და კაშხალის არსებობა	38
2.5 ნამახვანჰესის კოშკურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობის გაანგარიშების რიცხვითი შედეგების ანალიზი	42
3. დინამიკის ამოცანის ამოხსნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით	45
3.1 გაანგარიშების ძირითადი ალგორითმი	45
3.2 წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება სამ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში	50
4. წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში	52
4.1 ცილინდრული ფორმის წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება	52
4.2 კოშკურა წყალმიმღების გაანგარიშება ცარიელი წყალსაცავის პირობებში	55
4.3 კოშკურა წყალმიმღების გაანგარიშება სავსე წყალსაცავის დროს წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით	65
4.3.1 კონსოლური ძაბვები კოშკურა წყალმიმღების კედელში სავსე წყალსაცავის არსებობისას	69
4.3.2 რგოლური ძაბვები კოშკურა წყალმიმღების კედელში	74

4.4 წყალმიმღები კოშკის რკინაბეტონის ცილინდრული კვეთის	
სიმტკიცის შეფასება	85
დასკვნები	
.	87
ლიტერატურა	89
დანართი 1	
კოშკურა ტიპის წყალმიმღებების კონსტრუქციები	93
დანართი 2	
ნამახვანჰესისა და თეზამის ჰიდროკვანძის კოშკურა	
წყალმიმღებები	100

ნახაზების ნუსხა:

ნახ. 1.1.1 "ნაგებობა - წყალსაცავი" სისტემის სქემა: ა - შეზღუდული წყალსაცავის გათვალისწინებით; ბ - შეუზღუდავი წყალსაცავის გათვალისწინებით ვესტერგარდის ამოცანა;

ნახ. 2.2.1 ცილინდრული კოშკის რხევა ვერტიკალური ღერძის მიმართ;

ნახ. 2.3.1 ორი ერთგვაროვანი ცილინდრული წყალმიმღები კოშკის თავისუფალი სინქრონული რხევის სქემა;

ნახ.2.4.1 კაშხლის სიახლოვეს მყოფი ორი წყალმიმღების სინქრონული რხევის სქემა;

ნახ. 2.5.1 სიჩქარის პოტენციალი ორი წყალმიმღების არსებობისას. გეომეტრული პარამეტრების 1 და 2 ვარიანტი;

ნახ. 2.5.2. სიჩქარის პოტენციალი გეგმაში ორი წყალმიმღების არსებობისას. გეომეტრული პარამეტრების 3 და 4 ვარიანტი;

ნახ. 2.5.3. სიჩქარის პოტენციალი სიმაღლეში ორი წყალმიმღების არსებობისას. გეომეტრული პარამეტრების 1 და 2 ვარიანტი;

ნახ. 2.5.4. სიჩქარის პოტენციალი სიმაღლეში ორი წყალმიმღების არსებობისას. გეომეტრული პარამეტრების 3 ვარიანტი;

ნახ. 3.1 2 და 3 განზომილებიან ამოცანებში გამოყენებული სასრული ელემენტები;

ნახ.3.2.1.თეზამის წყალმიმღები კოშკის სამ განზომილებიანი სასრულ-ელემენტური მოდელი;

ნახ. 3.2.2 კოშკის რხევის დროს ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები სიმაღლის შუა კვეთში (ტ/მ2);

ნახ. 4.1 წრიული კვეთის კოშკურა წყალმიმღების ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის პრიზმული ძელი;

ნახ. 4.2.1 თეძამის კოშკურა წყალმიმღების საანგარიშო კონსტრუქცია;

ნახ. 4.2.2 „კოშკურა წყალმიმღები - ფუძე“ სისტემის სასრულ ელემენტური მოდელი ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის პრიზმული ძელის გამოყენებით;

ნახ. 4.2.3 კოშკის გადაადგილება პიკური აჩქარების ($T=4წმ$) დროს;

ნახ.4. 2.4 მიწისძვრის საანგარიშო აქსელეროგრამა;

- ნახ.4. 2.5 ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების ($\sigma_{y,d}$) განაწილება ცილინდრული კონსტრუქციის სიმაღლეში პიკური აჩქარების დროს (ინტეგრების დროითი ბიჯების ამონახსნების მიხედვით);
- ნახ.4.2.6 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები ($\sigma_{y,d}$), როცა $E_T / E_F = 1$;
- ნახ.4.2.7 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები ($\sigma_{y,d}$), როცა $E_T / E_F = 10$;
- ნახ.4.2.8 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური ძაბვები. ა. დინამიკური ძაბვები ($\sigma_{y,d}$); B - დინამიკური ($\sigma_{y,d}$) და ჯამური ძაბვები σ_s ;
- ნახ.4. 2.9 ფუძის დამყოლობის გავლენა კოშკის ფუძეში ძაბვების განაწილებაზე;
- ნახ.4. 2.10 კოშკის ექსტრემალური გადახრები ფუძის დამყოლობის გათვალისწინებით;
- ნახ. 4.3.1. კოშკურა წყალმიმღების რხევის 5 ფორმა;
- ნახ. 4.3.2. კოშკურა წყალმიმღების რხევის 5 ფორმის შესაბამისი სიხშირეები;
- ნახ.4. 2.10 კოშკის ექსტრემალური გადახრები ფუძის დამყოლობის გათვალისწინებით;
- ნახ. 4.3.1.2 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები σ_y კოშკურა წყალმიმღების კედელში დამყოლი ფუძის დროს;
- ნახ. 4.3.1.3 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები σ_y კოშკურა წყალმიმღების კედელში ხისტი ფუძის დროს;
- ნახ. 4.3.1.4 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები σ_y კოშკურა წყალმიმღების კედელში: ცარიელი წყალსაცავის დროს (წითელი ფერი); ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გათვალისწინებით (ლურჯი ფერი);
- ნახ. 4.3.2.1 კოშკურა წყალმიმღების კორპუსიდან ამოღებული ერთეულოვანი სისქის რგოლის დატვირთვის საანგარიშო სქემა;
- ნახ. 4.3.2.2 კოშკურა წყალმიმღების კორპუსიდან ამოღებული ერთეულოვანი სისქის რგოლის საანგარიშო სქემა;
- ნახ. 4.3.2.3 მაქსიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროსტატიკური წნევის ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.4 მაქსიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას;

- ნახ. 4.3.2.5 მინიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.6 მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციის ჰორიზონტალურ კვეთში ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.7. მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვების განაწილება რგოლურ კონსტრუქციის ჰორიზონტალურ კვეთში ჰიდროსტატიკური, ჰიდროდინამიკური წნევებისა და მათი ჯამური ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.8. მაქსიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების ჯამური ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.9. მინიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების ჯამური ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.10. მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვების განაწილება რგოლურ კონსტრუქციის ვერტიკალურ კვეთში ჰიდროსტატიკური, ჰიდროდინამიკური წნევებისა და მათი ჯამური ზემოქმედებისას;
- ნახ. 4.3.2.11 . კომპურა წყალმომღების დეფორმირებული წრიული კვეთი ჰიდროდინამიკური დატვირთვების ზემოქმედებით;
- ნახ. 4.3.2.12. კომპურა წყალმომღების დეფორმირებული წრიული კვეთის გადაადგილებები ჰიდროდინამიკური დატვირთვების ზემოქმედებისას.

შესავალი

სამეცნიერო თემის აქტუალობა: საშუალო და მაღალდაწნევიან ჰიდროკვანძებში, ხშირ შემთხვევაში წყლის დონე წყალსაცავში განიცდის ცვალებადობას ფართო საზღვრებში, ამიტომაც წყლის აღება ხორციელდება კომპურა ტიპის წყალმიმღების გამოყენებით.

ზოგადად, კომპურა ტიპის წყალმიმღები წარმოადგენს ცალკე მდგომ ნაგებობას, მთელ მის პერიმეტრზე ან მის ნაწილზე განლაგებული წყალმიმღები ხვრეტებით. ამ ტიპის ნაგებობებს იყენებენ იმ შემთხვევაში, როდესაც სანაპირო წყალმიმღების მოწყობა არახელსაყრელია ტოპოგრაფიული პირობების გამო, დაკავშირებულია დიდი მოცულების სამუშაოთა შესრულებასთან და მიუღებელია.

კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობების საინტერესო მაგალითები გვხვდება კულიჯში (ა.შ.შ. არიზონის შტატი), ეგიუზონში (საფრანგეთი); სელულა (აშშ სამხრეთ კაროლინა), შვარცენბახში (გერმანია), გიზელდონში (ჩრდილო კავკასია, ოსეთი), ბოლდერში, ფიზერში, ნევავსში (მექსიკა); ლაგონტონში კომპურა ტიპის, დევის ბრიჯის მოწყობილობაში (აშშ ვერმონტის შტატი), ლიკს რიკერის მოწყობილობაში (აშშ კენტუკი).

კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობების დაპროექტებისას ერთ-ერთი რთული და მნიშვნელოვანი ამოცანაა - ჰიდროდინამიკური (სეისმური) დატვირთვებისა და მათი ზემოქმედებით ნაგებობებში განვითარებული ძაბვების განსაზღვრა.

აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტა მოცემული აქვთ ძირითადად ს. შულმანს, ი. შეინინს, პ. კულმაჩს. წარმოდგენილ ნაშრომში ძირითადად გამოყენებულია ჰიდროტექნიკის დარგში ცნობილი მეცნიერის პროფესორ სერგეი შულმანის მირ შემოთავაზებული ერთ-ერთი მეთოდი.

სეისმურად აქტიურ რეგიონებში ჰიდროტექნიკური მშენებლობის განვითარება საჭიროებს გაანგარიშების ისეთი მეთოდების შემუშავებას, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სიმტკიცეს,

მდგრადობას, ეკონომიურობას და საიმედოობას სეისმური და ჰიდროდინამიკური დატვირთვების ზემოქმედებისას.

სამოქალაქო მშენებლობებისაგან განსხვავებით ჰიდრონაგებობების სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების განსაკუთრებულობა დაკავშირებულია მთელ რიგ სირთულეებთან, აუცილებელია წყლის მასის ზემოქმედების გათვალისწინება, რომელიც თავის მხრივ (ჰიდროსტატიკური წნევის გარდა) იწვევს სადაწნეო წახნაგზე ჰიდროდინამიკურ დატვირთვას. ნაგებობის საკუთარი რხევების სიხშირისა და ფორმის ცვლილებებს, რაც საბოლოო ჯამში ძლიერ ზეგავლენას ახდენს ნაგებობის დამაბუდეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

ჰიდრონაგებობების გაანგარიშება სეისმომდეგობის დინამიკური თეორიის არსებული მეთოდებით დაფუძნებულია ჰიდროდინამიკისა და ნაგებობის დინამიკური განტოლებების ერთობლივ განხილვასთან ე.ი. ჰიდროდრეკადობის ამოცანების ამოხსნასთან. აღნიშნული კი სერიოზულ მათემატიკურ პრობლემებთან არის დაკავშირებული, რადგან ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან კონსტრუქციული გადაწყვეტებით, გამოსაყენებელი მასალებით და მუშაობის პირობებით. ამგვარი ამოცანების ამოხსნა დაკავშირებულია სერიოზულ მათემატიკურ სიძნელებებთან.

მიუხედავად იმისა, რომ ხსენებულ საკითხთან დაკავშირებით თეორიული კვლევების გარდა მიმდინარეობს ასევე ექსპერიმენტული კვლევები.

საქართველო, წარმოადგენს სეისმურად აქტიურ რეგიონს. შესაბამისად, ჰიდრონაგებობის და მათ შორის კომპურა ტიპის წყალმიმღებების სეისმომდეგობაზე გაანგარიშება კვლავ დიდ ყურადღებას იმსახურებს. საქართველოში ამჟამად ექსპლუატაციაშია ჟინვალის, სიონის და ლაჯანურის ჰიდროკვანძების კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობები. დაპროექტებულია ნამახვანჰესის და თემამის ჰიდროკვანძების კომპურა ტიპის წყალმიმღებები.

ყოველივე ნათლად წარმოაჩენს საკითხის აქტუალობას და მნიშვნელობას.

კვლევის მიზანია დამუშავებული იქნას:

- კვლევის ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა, რომლის გამოყენებით შესაძლებელი იქნება განისაზღვროს:
 - ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილება კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობაზე სეისმური ზემოქმედების დროს;
 - ჰიდროკვანძში წყალმიმღებ ნაგებობათა განლაგების (მათ შორის კაშხლის არსებობისას), გავლენა მათზე ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილებაზე;
 - წყალმიმღებსა და კაშხალს შორის მანძილის კრიტიკული მნიშვნელობის განსაზღვრა;
- კომპურა წყალმიმღების სეისმოდამაბული მდგომარეობა დაცლილი და სავსე წყალსაცავის პირობებში წყლის დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

კვლევის ობიექტად განიხილული იქნა საქართველოში ნამახვანის შეწყვილებული (ორი ერთმანეთთან ახლოს მდგომი) და თეძამის ცილინდრული ტიპის წყალმიმღები ნაგებობები.

სამეცნიერო სიახლე

- კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობათა სეისმომედეგობაზე ანგარიშის შეფასებისათვის ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში დამუშავებულ იქნა:
 - ❖ ტალღური თეორიის ამონახსნების საფუძველზე, ერთი ან შეწყვილებული (ორი ერთმანეთთან ახლოს მდგომი) ნაგებობისათვის, კაშხლის დაშორების გათვალისწინებით, ნაგებობაზე წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვების განსაზღვრის მეთოდიკა და შესაბამისი საანგარიშო პროგრამა;
 - ❖ სპექტრალური თეორიის საფუძველზე, სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, ხსენებულ ნაგებობათა დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდიკა ცარიელი და სავსე წყალსაცავის არსებობისას.

- შეფასებულია წყალმიმღებსა და კაშხალს შორის დაშორების კრიტიკული მნიშვნელობა.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა

დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე შესაძლებელია შეფასებული იქნას, სხვადასხვა კონსტრუქციის კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობათა სეისმომდეგობა ცარიელი და სავსე წყალსაცავის არსებობისას.

ხსენებული მეთოდის გამოყენებით შეფასებულ იქნა:

- ❖ ნამახვანის შეწყვილებული ცილინდრული ტიპის წყალმიმღები ნაგებობაზე წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვები, რაც ითვალისწინებს ასევე მათი კაშხლიდან დაშორების გავლენას;
- ❖ თემამის ჰიდროკვანძის წყალმიმღები ნაგებობის სეისმური დაძაბული მდგომარეობა და სიმტკიცის მარაგები წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება: შესავალის, ხუთი თავის (ლიტერატურული მიმოხილვა, კვლევის შედეგები და მათი განსჯა, დასკვნა) და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 111 ნაბეჭდ გვერდზე. იგი შეიცავს 44 ნახაზსა და 2 ცხრილს.

ნაშრომის აპრობაცია: დისერტაციო მასალები მოხსენებულ იქნა: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 86-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. თბილისი 2018.

პუბლიკაციები: სადისერტაციო ნაშრომის თემასთან დაკავშირებით დღეისათვის გამოქვეყნებულია ხუთი სამეცნიერო სტატია, საქართველოში აკრედიტირებულ რეფერირებულ ჟურნალში.

თავი 1

1. სეისმური და ჰიდროდინამიკური დატვირთვები

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე

1.1 წყლის ჰიდროდინამიკური დატვირთვების განსაზღვრასთან დაკავშირებული არსებული მასალის მიმოხილვა

კომპურა ტიპის წყალმიმღებები კონსტრუქციათა ფორმის ნაირგვარობით შეიძლება იყოს ცილინდრული ან პრიზმული მართკუთხა კვეთით, სიმაღლეში ცვლადი გეომეტრული პარამეტრებით (დანართი 1). წყალმიმღებები შეიძლება იყოს ცალკე მდგომი, შეწყვილებული ან კიდევ უფრო მეტი რაოდენობისა (მაგალითად ჰუვერას ჰიდროკვანძი, დანართი 1). ექსპლუატაციის ხასიათის მიხედვით არსებობს მშრალი და სველი კომპურა ტიპის წყალმიმღებები.

ამჟამად დაპროექტებულია ნამახვანის 107 მ სიმაღლის კომპურა ტიპის შეწყვილებული წყალმიმღებები თაღოვან კაშხალთან, აგრეთვე თეძამის 44 მ-იანი მშრალი ტიპის კომპურა წყალმიმღები.

როგორც კვლევებმა აჩვენა წყალმიმღებების კონსტრუქციული ცვლილებები სეისმური ზემოქმედების დროს გავლენას ახდეს კომპის დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე, რაც გამოწვეულია ერთის მხრივ ნაგებობის ინერციული, მეორეს მხრივ კი წყალსაცავიდან განვითარებული წყლის ჰიდროდინამიკური დატვირთვების განვითარებით. ცხადია, აღნიშნული გათვალისწინებული უნდა იქნას წყალმიმღებ ნაგებობათა პროექტირებისას.

სეისმური ზემოქმედებით ხდება, როგორც თვით კონსტრუქციის, ასევე წყლის გარემოს რხევა. ამ შემთხვევაში, წყლის გარემო იწვევს დამატებით (ჰიდროსტატიკურზე მეტ) წნევას ნაგებობაზე, რაც ჰიდროდინამიკურ წნევას წარმოადგენს. ჰიდროდინამიკური წნევის სიდიდე დამოკიდებულია ნაგებობის რხევის პარამეტრებზე და წყალსაცავის კონფიგურაციაზე

განივკვეთის ფორმაზე, წყალსაცავის სიგრძესა და მის მოხაზულობაზე გეგმაში. მთლიანად ან ნაწილობრივ შევსებულ წყალსაცავის არსებობის დროს ფუძის სეისმური ზემოქმედებისას რხევაში მონაწილეობენ კაშხალი, წყალმიმღები ნაგებობა და წყლის მასა. როდესაც ცნობილია ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე და "ნაგებობა - წყალსაცავი" სისტემის მოძრაობის აჩქარება, შესაძლებელია განისაზღვროს წყლის ინერციული ზემოქმედება და შესაბამისად ჰიდროდინამიკური წნევა.

წყლის ინერციული ეფექტის გარდა, ასევე შეიცვლება სისტემის "ნაგებობა - წყალსაცავი" რხევის ენერჯის გაბნევის მნიშვნელობები. არსებობს შეთავაზებები ამ გავლენის შეფასებისათვის, მიერთებული ბლანტი სითხის ხახუნის (წინააღმდეგობის) გამოყენებით. ეს პროცესები ასოცირდება წყლის სიბლანტესთან და ტალღის წარმოქმნის შეუქცევად პროცესებთან. ზოგადი, სავარაუდო გაანგარიშებებით, ნაგებობის რხევის დროს ენერჯის დამატებითი დანაკარგები წყალსაცავის მასის გათვალისწინებით, შეიძლება უგულებელყოფილი იქნას და გათვალისწინებული იქნას მხოლოდ წყლის მიერთებული მასების ინერციული გავლენა ნაგებობაზე.

ნაგებობის წყლის გარემოსთან ურთიერთქმედების გათვალისწინებისას, არსებული თეორიული ამონახსნების უმეტესობაში გაკეთებულია შემდეგი დაშვებები [1]:

- წყალი განიხილება არაბლანტი და უკუმშვადი სითხე;
- მხედველობაში არ მიიღება თავისუფალ ზედაპირზე ტალღების წარმოქმნა, წყლის მოძრაობა განიხილება პოტენციურად (არაგრიგალური);
- განიხილება "ნაგებობა - წყალსაცავი" სისტემის მცირე რხევები თანმიმდევრობითი ჰორიზონტალური ჰარმონიული რხევების დროს.

ხსენებულ პირობებში წყლის ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარე საკოორდინატო

ღერძების მიმართულებით (ნახ. 1.1.1) და ჰიდროდინამიკური წნევა ნებისმიერ

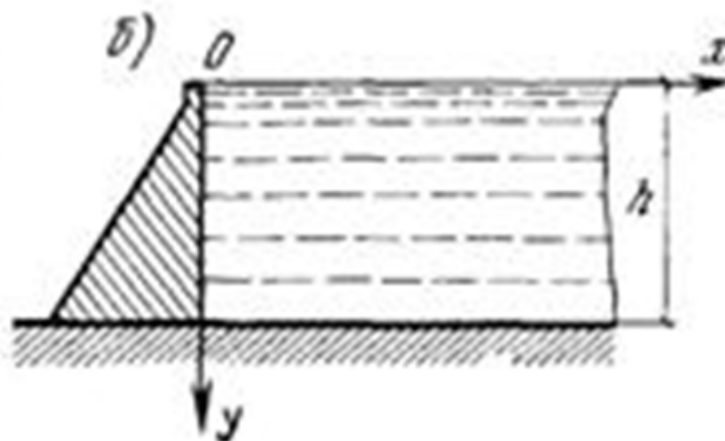
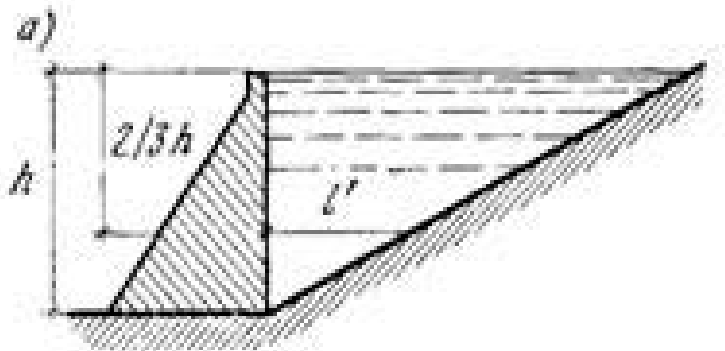
წერტილში გამოიხატება პოტენციური ფუნქციის საშუალებით:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

$$p(x, y, t) = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

სადაც U, V არის წყლის შუაგულის წერტილების გადაადგილება x და y ღერძების მიმართულებით, $p(x, y, t)$ არის ჰიდროდინამიკური წნევა კოორდინატების x, y წერტილზე; - ρ_0 წყლის სიმკვრივე.



ნახ. 1.1.1 "ნაგებობა - წყალსაცავი" სისტემის სქემა:

ა - შეზღუდული წყალსაცავის გათვალისწინებით; ბ - შეუზღუდავი წყალსაცავის გათვალისწინებით ვესტერგარდის ამოცანა.

სიჩქარის პოტენციალი $\Phi(x, y, t)$ უნდა აკმაყოფილებდეს:

- ლაპლასის განტოლებას (უკუმშვადი სითხის შემთხვევაში), და

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$$

- დაშვებებს:
 - წყალსაცავის ფსკერის ვერტიკალური მიმართულებით სიჩქარე ნულის ტოლია;
 - დატვირთვა თავისუფალ ზედაპირზე მუდმივია. უგულბელყოფილია ტალღის ფორმის ცვლილება;
 - კაშხლისგან დაშორებულ წერტილებში სითხის მოძრაობა უმნიშვნელოა. ამ წერტილებში მოძრაობის სიჩქარე ნულის ტოლია;
 - წყლის მასის წერტილებისა და ნაგებობის სადაწნეო ზედაპირის წერტილების ჰორიზონტალური გადაადგილების სიჩქარე ერთმანეთის ტოლია.

წარმოდგენილ ფორმულირებაში ჰიდროდრეკადობის პრობლემის გადაწყვეტას ეძღვნება გ.მ. ვესტერგარდის, პ. პ. კულმაჩის, ი. შეინინის. ს. გ. შულმანის და სხვათა სამუშაოები [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13].

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ ჰიდროდინამიკური წნევის სიდიდე დამოკიდებულია კონსტრუქციის რხევის ფორმაზე. ლაპლასის განტოლების ამონახსნების მიხედვით, ზემოთ მოცემულ სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა $F(x, y, t)$ -ის გამოსახულებები, აგრეთვე ჰიდროდინამიკური წნევის მნიშვნელობა $P(x, y, t)$ განსახილველი არის ყველა წერტილისათვის.

საკითხის შესწავლისათვის საინტერესოა წყალსაცავის მხრიდან კონსტრუქციაზე განვითარებული ინერციული დატვირთვების ($P(y, t)$). ფარდობა $P(y, t)/U(y, t)$ (სადაც, $U(y, t)$ - ნაგებობის აჩქარებაა y წერტილში)

წარმოადგენს წყლის მიერთებულ მასას და ზოგადად განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$m_b(y) = \frac{P(y,t)}{U(y,t)}$$

სადაც, $m_b(y)$ არის წყლის განაწილებული მიერთებული მასა y წერტილში.

აღსანიშნავია, რომ წყლის ეფექტის გათვალისწინება იწვევს დინამიკური ინერციული დატვირთვის ცვლილებას სისტემაში „ნაგებობა წყალსაცავი“. კერძოდ, იცვლება ნაგებობის რხევის პერიოდები და ინერციული დატვირთვები. ზოგადად, ნაგებობის დინამიკური გაანგარიშება ხორციელდება წყლის მიერთებული მასის გათვალისწინებით. მიახლოებითი გაანგარიშებების დროს მიიღება,

$$T_{ib} = T_i \sqrt{1 + M_b / M_\sigma}$$

სადაც T_{ib} - არის ნაგებობის რხევის i -ური ტონის პერიოდი, წყლის გარემოს გათვალისწინებით;

- T_i იგივე, ჰაერში;

- $M_b = \int_b^h m_b(y) dy$ წყლის ჯამური მიერთებული მასა (წარმოდგენილ შემთხვევაში ბრტყელი ამოცანისათვის);

- M_σ - ნაგებობის ბეტონის მთლიანი მასა.

ნაგებობის რხევის ფორმები, წყლის გავლენის გათვალისწინებით, პრაქტიკულად იდენტურია ჰაერში ნაგებობის რხევის ფორმებისა. კოეფიციენტების სიდიდეები, რომლებიც დამოკიდებულია ნაგებობის რხევის ფორმაზე, i -ური ტონით რხევის დროს განისაზღვრება ფორმულით:

$$\eta_{ik} = X_{ik} \frac{\sum X_{ij} (m_j + m_{bj})}{\sum X_{ij}^2 m_j}$$

სადაც m_{bj} არის წყლის მიერუბულ მასის მნიშვნელობა კონსტრუქციის j წერტილში.

სამშენებლო ნორმები [13] იძლევა რეკომენდაციებს წყლის მიერთებული მასის დასადგენად ზოგიერთი ყველაზე გავრცელებული საანგარიშო შემთხვევებისათვის:

- სქემა 1 - არადეფორმირებადი ნაგებობის თანდათანობითი ჰორიზონტალური გადაადგილებები ვერტიკალური (1ა) ან დახრილი (1ბ) სადწნეო წახნაგით;
- სქემა 2 - კონსოლური ტიპის ვერტიკალური წახნაგის მქონე ნაგებობის ბრუნვითი რხევები;
- სქემა 3 - კონსოლური ტიპის ნაგებობის კონსოლური კონსტრუქციის ჰორიზონტალურ გადაადგილებათა რხევები;
- სქემა 4 - V ფორმის ხეობაში არადეფორმირებადი ნაგებობის ჰორიზონტალური თანდათანობითი გადაადგილებითი რხევები ვერტიკალური სადწნეო წახნაგით და სხვა საანგარიშო შემთხვევები.

მიწისძვრის დროს ღრმა წყლის გრძელი სიგრძის ხიდებისთვის, წყალსა და ნაგებობას შორის ურთიერთქმედება აუცილებლად იწვევს ჰიდროდინამიკურ ძალას კონსტრუქციებზე. მორისონის პოტენციური სითხის თეორიის საფუძველზე შემოთავაზებულ იქნა ჰიდროდინამიკური ძალის გამარტივებული გაანგარიშების მეთოდი. ჩინეთში მდინარე ნანჯინგის იანგცეს მე -3 ხიდის პროტოტიპად აღების მიზნით, ჩატარდა ექსპერიმენტული კვლევები სეისმური პლატფორმის გამოყენებით. ექსპერიმენტის კვლევებისა და შემოთავაზებული გამარტივებული თეორიული გაანგარიშების საფუძველზე მიღებული იქნა შედეგების პრაქტიკულად მისაღები თანხვედრა. ძირითადი დასკვნებით მიღებული იქნა, რომ ღრმა წყალში ხიდის ბუნებრივი ვიბრაციის სიხშირე მცირდება,

ხოლო წყლისა და კონსტრუქციის ურთიერთქმედების გამო ძირითადი სიხშირე მცირდება 8,24% -ით. ღრმა წყლში ხიდის არსებობისას მიწისძვრის დროს ჰიდროდინამიკური ძალის ზეგავლენა დინამიურ რეაქციაზე უფრო მნიშვნელოვანია, ისე ძირითადი სარტყლის მოღუნვის მომენტი 7,73% -ით, ხოლო დატვირთვების ყველაზე უარესი თანწყობის დროს მოღუნვის მომენტი 14,22% -ით იქნა გაზრდილი. ღრმა წყლის არსებობისას ხიდების სეისმომდეგობის შეფასების დროს, აუცილებლად უნდა იქნას გათვალისწინებული წყლის კონსტრუქციაზე ურთიერთქმედების ეფექტი.

ნაშრომებში [6,7,8,9] დამუშავებული იქნა კვლევის მეთოდика, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას კომპურა წყალმიმღების წინასწარი სეისმური ანალიზისთვის, „ფუძე-კონსტრუქცია-წყალსაცავი“ სისტემის ურთიერთქმედების ჩათვლით. ფორმულირება ასევე ითვალისწინებს ფუძის გავლენის ეფექტს. წყლის ჰიდროდინამიკური წნევა გათვალისწინებული იქნა მიერთებული მასების საშუალებით, რომლებიც მოცემულია ანალიტიკური სახსნების სახით, მარტივად გამოსაყენებლად კონსტრუქციათა ანალიზსა და პროექტირებაში. რიცხვითი გაანგარიშების შედეგების ანალიზით მიღებული იქნა, რომ ჰიდროდინამიკური ეფექტები მნიშვნელოვანია და იწვევს კომპის დამატებით გადახრას, მომენტების, ძვრების და ასევე ფუნდამენტის მობრუნების შემცირებას. კვლევამ აჩვენა, რომ დაბალი სიმაღლის კომპებისათვის საძირკვლის აწევა ნაკლებად სავარაუდოა. პირიქით, თხელი მოქნილი კომპებისათვის სავარაუდოდ, ფუნდამენტის აწევა უფრო მოსალოდნელია, განსაკუთრებით უფრო ხისტი ფუძეების არსებობისას, რომლის დროსაც მომენტები და გადახრები მნიშვნელოვნად იკლებს.

ნაშრომებში [18,19] მოცემულია დინამიკური ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები, რომლებიც ჩატარდა დიდ ბრიტანეთში (Wimbleball) 50 მ სიმაღლის კაშხლის წყალმიმღების კომპის მიმართ. ჩატარებული იქნა ასევე შედეგების ანალიზი შესაბამისი მოდელის რიცხვით ამონახსნებთან. ამ სამუშაოს მიზანი იყო შეფასებულიყო წყალსაცავის წყლის კუმშვადობის

გავლენა კომპის სეისმომედეგობაზე. მიღებული იქნა, რომ ხსენებული ფაქტორი უმნიშვნელოა და შესაძლებელია იგნორირებული იქნას კომპების სეისმური ანალიზის დროს.

ჩატარებული იქნა კვლევათა სამი სერია წყალსაცავში წყლის სხვადასხვა დონის არსებობისას. კონსტრუქციის სადაწნეო ზედაპირის წერტილების აჩქარება და ჰიდროდინამიკური წნევა იზომებოდა ვიბრაციის დროს კომპის სიმაღლეზე განვითარებული ღუნვის სამი ძირითადი რეჟიმისთვის.

კომპის რიცხვითი მოდელის შემუშავების მიზნით გამოყენებულ იქნა სასრული ელემენტის მეთოდი. კომპი წარმოდგენილი იყო ტრადიციული მასიური ელემენტებით, ხოლო წყალსაცავი უკუმშვადი სითხის ელემენტებით. ეს მოდელი გაანალიზდა კომპისა და წყალსაცავის მოდალური მახასიათებლებისა და ჰარმონიული რხევების რეაქციების პროგნოზირებისთვის დინამიკური ექსპერიმენტების დროს დაწესებული სხვადასხვა პირობებით.

კომპის აჩქარებისა და წყალსაცავში ჰიდროდინამიკური წნევის თეორიული ამონახსნები შედარებული იქნა ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებთან. მაღალი სიზუსტე იქნა ნაპოვნი ბუნებრივი სიხშირეებისა და რეჟიმული რხევის ფორმებისთვის, ხოლო ჰარმონიული რხევის შესაბამისი რეაქციები ხასიათდებოდა მისაღები სიზუსტით.

კომპისა და წყალსაცავის დაკვირვების შედეგად მიღებული რეაქციები ამყარებენ დაშვებას, რომ წყალსაცავის წყლის კუმშვადობა არ არის მნიშვნელოვანი ფაქტორი დიდი ზომის კომპების სეისმური ანალიზისთვის.

ნაშრომში [20] ბურჯისათვის დამუშავებული იქნა მიწისძვრებით გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გაანგარიშების ნახევრად ანალიტიკური და ნახევრად რიცხვითი გაანგარიშება. Trefftz-ის სრული ფუნქციები იქნა გამოიყენებული ხისტი მოძრაობისა და დრეკადი ვიბრაციის პოტენციალის შესაქმნელად. გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით. აღნიშნული მეთოდით

შედარებით მარტივად და ეფექტურად იქნა ჩატარებული გაანგარიშებები. წარმოდგენილი იყო მაგალითები, რომლებშიც განიხილებოდა მიწისძვრაზე გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გავლენა ბურჯზე. შესაბამისად შეფასებული იქნა ამ მეთოდის სიზუსტე. თეორიული ამონახსნების საფუძველზე განხილულ იქნა ჰიდროდინამიკური წნევა წრიული ფორმის კონსტრუქციისათვის. ნახევარანალიტიკური და ნახევრად რიცხვითი მეთოდების საფუძველზე დამუშავებული იქნა ჰარმონიული რხევების შედეგად გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილება წრიული ფორმის კონსტრუქციაზე. შეფასებული იქნა აგრეთვე მიერთებული მასის კოეფიციენტი.

შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ მოძრაობის დაბალი სიხშირის შემთხვევაში, ბურჯის თავზე წყლის ზედაპირული ტალღა მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენს ჰიდროდინამიკურ წნევაზე ხოლო პირიქით, მოძრაობის მაღალი სიხშირით გამოწვეული ზედაპირული ტალღა მცირე გავლენას ახდენს. ხიდზე ჰიდროდინამიკური წნევის მნიშვნელობის შესასწავლად ჩატარებულია ხიდის მოდელების კვლევები ვიბრო მაგიდაზე.

1.2 სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების ძირითადი მეთოდოლოგია

მიწისძვრის ზემოქმედებისას ნაგებობის სეისმომდეგობაზე გაანგარიშების ძირითად მახასიათებლად გამოიყენება ფუძის აჩქარება. უკანასკნელი მოცემულია სეისმურობის კოეფიციენტით და წარმოადგენს ფუძის საანგარიშო აჩქარებისა და თავისუფალი ვარდნის აჩქარებათა ფარდობას:

$$K_c = \frac{W_0}{g} \quad (1.2.1)$$

საწყის ნორმატიულ დოკუმენტებში 7-9 ბალამდე დიაპაზონის ინტენსივობის დროს სეისმური მშენებლობის დროს მიღებული იყო სეისმურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ცხრ. 1-ის შესაბამისად.

ცხრილი 1.

საანგარიშო სეისმურობა	7	8	9
სეისმურობის კოეფიციენტი K_c	0.025	0.05	0.1

სეისმური ზემოქმედებისას ნაგებობისა და სითხის ურთიერთქმედების გაანგარიშების მეთოდები მნიშვნელოვნადაა დაკავშირებული სეისმომდეგობის თეორიის თანამედროვე მდგომარეობაზე.

სეისმომდეგობაზე საანგარიშო მეთოდების განვითარების საწყის ეტაპზე ძირითად მეთოდად მიიჩნეოდა ე.წ. სეისმომდეგობის სტატიკური თეორია, რომელიც დამუშავდა გასული საუკუნის დასაწყისში იაპონიაში (ომორისა და სანოს შრომები) და იარსება 50-იან წლებამდე [4].

ამ თეორიის მიხედვით ნაგებობაში დრეკადი დეფორმაციები მხედველობაში არ მიიღება, ანუ მიწისძვრის დროს განიხილება ხისტი ნაგებობის გადატანითი მოძრაობა ფუძესთან ერთად. ამ დროს ნაგებობის ყველა წერტილის აჩქარება ფუძის აჩქარების ტოლია, ხოლო

ჰორიზონტალურად მიმართული ინერციული ძალები სიმაღლეში განაწილებულია მასების მიხედვით. ამდენად, ინერციული ძალა m წერტილში განიხილება სტატიკურად:

$$S = mW_0 = K_c g m = K_c Q \quad (1.2.2)$$

სადაც $W_0 = K_c g$ - ნაგებობის ფუძის საანგარიშო მაქსიმალური აჩქარებაა.

ასეთი მიდგომა შედარებით სამართლიანია მასიური და ხისტი ნაგებობებისათვის, რომელთა დრეკადი გადაადგილებები მცირეა ფუძის გადაადგილებებთან შედარებით. ამავე დროს საჭიროა აღინიშნოს, რომ ხისტი ნაგებობებისათვისაც კი, მაგ. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები, თუ კი სეისმური რხევის სიხშირე უახლოვდება ნაგებობის ძირითად სიხშირეს, ამ შემთხვევაში დრეკადი გადაადგილებები აღწევს მნიშვნელოვან სიდიდეებს.

მაღალი და მოქნილი ნაგებობებისათვის სეისმომედეგობის სტატიკური თეორია პრინციპულად შორდება მისაღებ შედეგებს. მაღალი სეისმური ძალების ზემოქმედებისას ხსენებული თეორიის გამოყენების შედეგად მრავალი ნაგებობა იქნა დანგრეული, რაც ადასტურებს ამ მიდგომის მიუღებლობაზე.

სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე დამუშავებული იქნა სეისმომედეგობის დინამიკური თეორია, რომელიც საშუალებას იძლევა დასაბუთებულად მიღებული იქნას ნაგებობის დამაბულ-დეფორმირებული მგდომარეობა სეისმური ზემოქმედებისას. ამ მიმართულებით პირველი კვლევები გაკეთებული იქნა იაპონელი მკვლევარის მონონობეს მიერ.

$$m \ddot{y} + r y = -m \ddot{Y}_0(t) \quad (1.2.3)$$

სადაც

$$\dot{Y}_0(t) = -W_0 \sin \omega t \quad (1.2.4)$$

თავისუფალი რხევების უგულველყოფის შედეგად (რაც დაკავშირებულია ენერჯის გაბნევასთან) მიიღება:

$$y(t) = \frac{W_0}{\omega_0^2} \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \sin \omega t = \frac{W_0}{\omega_0^2} \frac{\sin \omega t}{1 - T_0^2/T^2} \quad (1.2.5)$$

სადაც

- $\omega_0 = (2\pi/m)^{1/2}$ - თავისუფალი რხევების სიხშირეა;
- $T_0 = 2\pi/\omega_0$ - რხევის პერიოდია.

სეისმური ინერციული დატვირთვა m მასის გადატანითი და დრეკადი გადაადგილების გათვალისწინებით ტოლია

$$S = -m(\dot{Y}_0 + \ddot{y}) \quad (1.2.6)$$

\dot{Y}_0 და \ddot{y} -ის გათვალისწინებით მიიღება მაქსიმალური მნიშვნელობა

$$S = k_c g m \frac{1}{1 - T_0^2/T^2} = k_c g m \beta \quad (1.2.7)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - T_0^2/T^2} \quad (1.2.8)$$

სადაც β , არის დინამიკურობის კოეფიციენტი და ითვალისწინებს სისტემის დინამიკურ თვისებებს.

ამდენად, S სეისმური ინერციული ძალა (1.2.7)-ის მიხედვით გასწავდება β სიდიდით მისი სტატიკური მნიშვნელობისაგან (1.2.2) -ს მიხედვით.

შიგა ხახუნის გათვალისწინებით (მაგ. საროკინის ჰიპოტეზის მიხედვით) დინამიკურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \omega^2/\omega_0^2\right)^2 + \gamma^2}} \quad (1.2.9)$$

სადაც γ - ჩახშობის პარამეტრია.

ამ მიმართულებით მნიშვნელოვანი განვითარება მოხდა კ.ზავრიევის მიერ, რომელმაც გაითვალისწინა მიწისძვრის საწყისი ფაზა და ფუძის მოძრაობა წარმოადგინა შემდეგი სახით:

$$Y_0(t) = A \cos \omega t$$

აღნიშნულის შედეგად დინამიკურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დებულობს სახეს:

$$\beta = \frac{2}{1 - T_0^2/T^2}$$

უკანასკნელიდან მიიღება, რომ თავისუფალი რხევების გათვალისწინებით სეისმური დატვირთვა გაიზარდა 2-ჯერ.

თავი 2

2. კვლევის მეთოდთა და ძირითადი ალგორითმი

2.1 საკითხის არსი და დაშვებები

დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად შეიძლება გამოყენებულ იქნას მიმდევრობითი მიახლოების მეთოდი. არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ამოცანის სასაზღვრო პირობების მიახლოებითი დაკმაყოფილება ხდება ლაპლასის და ჰელმჰოლცის ცნობილი განტოლებების ამონახსნების თანდათანობითი შეკრების გზით, რომლებიც აკმაყოფილებენ ამ პირობების ნაწილს.

ჰიდროდინამიკური (სეისმური) დატვირთვის საანგარიშოდ გამოიყენება შემდეგი დაშვებები:

- 1) სითხე არის იდეალური, ერთგვაროვანი და უკუმშვადი.
- 2) თავისუფალ ზედაპირზე ტალღური მოვლენება არ ვითვალისწინებთ და ჰიდროდინამიკური წნევის ცვალებადობას განაპირობებს მხოლოდ მიერთებული მასა.
- 3) წყლის მიერ დაკავებული მოცულობის გეომეტრიული კონფიგურაციის ცვლილება რხევების დროს მხედველობაში არ მიიღება.

ნაშრომში დასმული თეორიული ამოცანების გადაწყვეტისას გამოყენებული იქნა მათემატიკური ფიზიკის მეთოდები. ბევრი ამოცანების ამოხსნა ხდებოდა კლასიკური მეთოდებით (ცვლადების განცალკევების, კომპლექსური ცვლადების ფუნქცია, ინტეგრალური გარდაქმნა ჩვენ შემთხვევაში გამოყენებული იქნება თანდათანობითი მიახლოების მეთოდი. აქ შეგვხვდება ტალღური, ლაპლასის ჰელმჰოლცის განტოლებები. ბესელის, ჰენკელის და მაკდონალდის ფუნქციები.

კომპიუტერული წყალმომღებების დაპროექტებისას სირთულეს წარმოადგენს ჰიდროდინამიკური (სეისმური) დატვირთვებისა და მათგან გამოწვეული ძაბვების განსაზღვრა. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად მოცემული აქვს რიგი ცნობილი ჰიდროტექნიკოსებს, მათ შორის ს. შულმანს და ი. შეინინს. ყველა ავტორს

ანგარიშის თავისი მეთოდი გააჩნია. ჩვენ ვხელმძღვანელობთ ს. შულმანის მიმდევრობითი მიახლოების მეთოდით [1].

მისი არსი მდგომარეობს შემდეგში: ნაგებობის რთული გეომეტრიული კონფიგურაციის გამო, ამოცანის სასაზღვრო პირობების მიახლოებითი დაკმაყოფილება ხდება ლაპლასისა და ჰელმჰოლცის ცნობილი განტოლების ამონახსნების თანდათანობითი შეკრების გზით, რომელთაგანაც ყოველი ამ პირობის ნაწილს აკმაყოფილებს.

ს. შულმანის მიერ ამოცანა დასმული იქნა ერთი წყალმიმღებისა და კაშხლის ურთიერთქმედებაზე. ჩვენ მოგვიხდა ამოცანის უფრო რთული სახით წარმოდგენა (განზოგადება) – ორი წყალმიმღების ერთმანეთთან ურთიერთქმედება და მათგან გარკვეულ მანძილზე მდებარე კაშხლის გავლენა წყალმიმღებების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

ჩვენ მიერ განხილულ იქნა წყალმიმღებებისა და კაშხლის განლაგების ორი შემთხვევა.

2.2 ცილინდრული გარსის რხევა

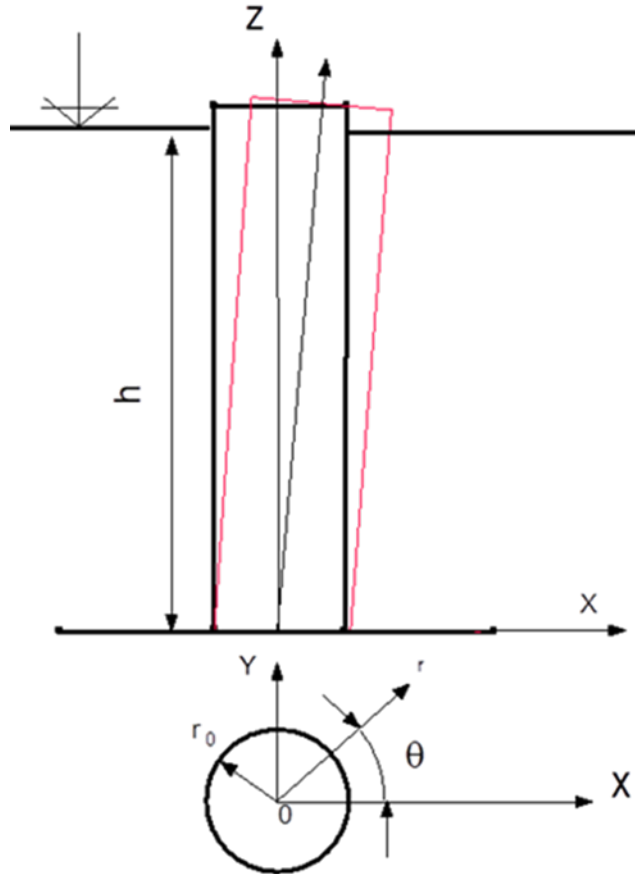
2.2.1 ამოცანის არსი

ზოგადად, კონსტრუქციის ფუძის სეისმური რხევის (ნახ.2.1) დროს სითხის მოძრაობის სიჩქარის პოტენციალი აკმაყოფილებს ტალღურ განტოლებას:

$$\nabla^2 = \frac{1}{C_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.2.2.1)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \phi \right|_{r=h} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0 \quad (2.2.2.2)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=r_0} = [\omega_0(z, \theta, t) + \omega(z, \theta, t)]$$



ნახ.2.2.1 ცილინდრული კოშკის რხევა ვერტიკალური ღერძის მიმართ.

სადაც, $w_0(z, \theta, t)$ - როგორც მთლიანი ხისტი კონსტრუქციის გადაადგილება; $w(z, \theta, t)$ - კონსტრუქციის გარსის დრეკადი გადაადგილების რადიალური მდგენელია;

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \varphi(r, \theta, z) \exp i\omega t;$$

$$\omega_0(z, \theta, t) = \omega_0(z, \theta) \exp i\omega t \quad (2.2.2.3)$$

$$\omega(z, \theta, t) = \omega(z, \theta) \exp i\omega t$$

წარმოდგენილ პირობებში ტალღური განტოლება (2.2.2.1) გადადის ჰელმჰოლცის განტოლებაში (z, θ, t) ის მიმართ:

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\omega^2}{c_0^2} \varphi = 0 \quad (2.2.2.4)$$

შემდეგი სასაზღვრო პირობების არსებობისას:

$$\begin{aligned}
- \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z}|_{z=0} &= \frac{\partial \varphi}{\partial r}|_{r=\infty} = \varphi|_{z=h} = 0; & (2.2.2.5) \\
- \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r}|_{r=r_0} &= i\omega[\omega_0(z, \theta) + \omega(z, \theta)];
\end{aligned}$$

ცვლადთა განცალების მოქმედების შემდეგ (2.2.2.4) და (2.2.2.5) ამოხსნის შედეგად, იძულებითი რხევების შემთხვევისათვის დაბალი სიხშირეების რხევისას, როდესაც $\omega < \omega_1 = \pi c_0 / 2h$, მიიღება სითხის (როგორც აკუსტიკური არისათვის) რხევის საკუთარი სიხშირეები, შემდეგი სახით:

$$\varphi(r, \theta, z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \frac{K_n(\nu_m \frac{r}{h})}{K'_n(\nu_m \frac{r_0}{h})} \times \cos \frac{m\pi z}{2h} \cos n \theta \quad (2.2.2.6)$$

სადაც,

$$\nu_m = \left[\left(\frac{m\pi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\omega h}{c_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.2.2.7)$$

$$A_{mn} = \frac{2\omega}{\pi \nu_m} \int_0^h \int_0^{2\pi} (\omega_0 + \omega) \cos n\theta \cos \frac{m\pi z}{2h} d\theta dz$$

აქ - K_n - ბესელის, ჰენკელის მოდიფიცირებული ფუნქციაა ან მაკდონალდის n რიგის ფუნქციაა.

(2.2.2.6)-ის ამოხსნით მიიღება ამოცანის ცხვადასხვა კერძო შემთხვევები.

კერძოდ, თუ

- $\omega_0 \neq 0$, $\omega = 0$, მაშინ არსებობს შემთხვევა, როგორც მთლიანი ხისტი კონსტრუქციის რხევა.
- $\omega_0 = 0$, განიხილება გარსული კონსტრუქციის თავისუფალი რხევა.

შესაძლებელია ასევე განხილული იქნას შემდეგი მახასიათებელი დეფორმაციები:

- $n=0$ - გარსული კონსტრუქციის ღერძული სიმეტრიული რხევა;

- $n=1$ - წრიული ღეროს ღუნვითი რხევა;
- $n \geq 2$ - გარსული კონსტრუქციის ღუნვითი რხევა.

თუ წყალს ჩავთვლით, როგორც უკუმშვად სითხეს, ანუ $\omega \ll \omega_1$, მაშინ

$$\varphi(r, \theta, z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \frac{K_n\left(\frac{m\pi}{2} \frac{r}{h}\right)}{K'_m\left(\frac{m\pi}{2} \frac{r_0}{h}\right)} \times \cos \frac{m\pi z}{2h} \cos n \theta \quad (2.2.2.8)$$

2.3. ორი ერთვაროვანი ცილინდრული წყალმიმღები ნაგებობის სინქრონული რხევა

ორი ერთვაროვანი ცილინდრული წყალმიმღები ნაგებობა სინქრონულად რხევის შემთხვევაში (ნახ. 2.3.1) ზემოხსენებული მიმდევრობითი მიახლოების მეთოდის რეალიზაციის სქემა საჭიროებს მცირედი სახით შეცვლას – უნდა ვიპოვოთ წყლის სიჩქარის პოტენციალი, რომელიც აკმაყოფილებს ლაპლასის განტოლებას და შემდეგ სასაზღვრო პირობებს [4,21]:

კოშკის რხევის მოძრაობის სიჩქარის რადიალური მდგენელი, როცა $z = h$, $\theta = 0$, ტოლია v_0 . სიჩქარის პოტენციალის გამოსახულებას, აქვს სახე:

$$\varphi(r, \theta, z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} B_m \frac{K_1\left(v_m \frac{r}{h}\right)}{K'_1\left(v_m \frac{r}{h}\right)} \cos \frac{m\pi z}{2h} \cos \theta$$

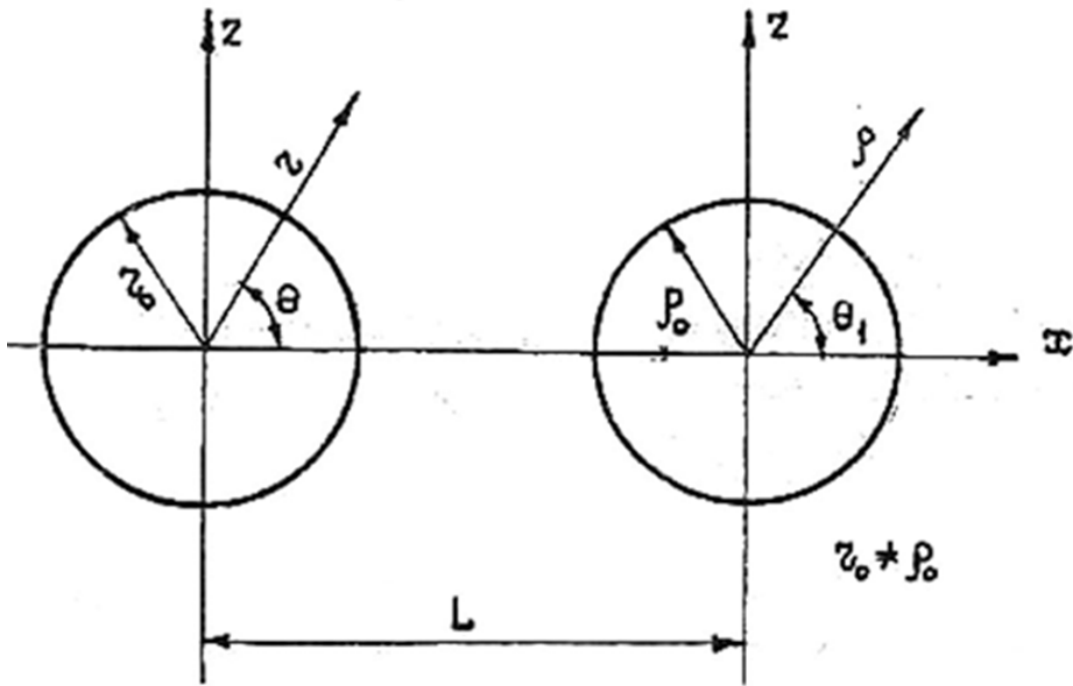
სადაც,

$$B_m = \frac{4\omega \omega_0 h}{m\pi v_m} \left[(-1)^{\frac{m-1}{2}} - \frac{2}{m\pi} \right]$$

სიჩქარის პოტენციალი აკმაყოფილებს ჰელმჰოლცის განტოლებას

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\omega^2}{c_0^2} \varphi = 0$$

შემდეგი სასაზღვრო პირობებით (ნახ.2.3.1 როცა $\omega < \omega_1$):



ნახ.2.3.1 ორი ერთგვაროვანი ცილინდრული წყალმიმღები კომპის თავისუფალი სინქრონული რხევის სქემა.

- $\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=\infty} = \varphi \Big|_{z=h} = 0;$
- $\frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = i\omega[\omega_0(z, \theta) + \omega(z, \theta)];$
- $\frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \omega\omega_0 \frac{z}{h} \cos \theta.$

საბოლოოდ, ჰიდროდინამიკური წნევა კომპურა წყალმიმღებების კონსტრუქციის ზედაპირზე განსაზღვრება ფორმულით:

$$p^*(r, \theta, z) = \frac{1}{\omega^2 \omega_0 h} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} B_m \frac{K_1(v_m \frac{r}{h})}{K'_1(v_m \frac{r}{h})}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (1)$$

$$\varphi|_{z=H} = 0; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=r_0} = V_o \cos \Theta; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = V_o \cos \Theta_1. \quad (4)$$

ამოცანის ამონახსნს ვეძებთ შემდეგი ჯამის სახით:

$$\varphi = \varphi^{(h)} = \varphi^{(0)} + \sum_{i=1}^n \varphi^{(i)},$$

სადაც $\varphi^{(0)}$ ამონახსნის ნულოვანი მიახლოებაა.

ნულოვანი მიახლოებისათვის ვიღებთ ცალკე მდგომი კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობის ამონახსნს [2], ყოველი წყალმიმღებისათვის ცალ-ცალკე. წყალმიმღებებს აქვს სხვადასხვა რადიუსი $r_0 \neq r$ ამრიგად,

$$\begin{aligned} \varphi^{(0)} = & V_o H \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} A_m K_1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos \Theta + \\ & + V_o H \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} A_m K_1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{\rho_0}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos \Theta_1, \end{aligned}$$

სადაც K ჰენკელის მოდიფიცირებული ფუნქციაა (ან მაკდონალდის ფუნქცია).

პირველი მიახლოებისათვის ვიღებთ ჯამს:

$$\varphi^{(1)} = \varphi^{(s)} + \varphi_{\nabla y}^{(1)}.$$

სიჩქარის $\varphi_{\nabla y}^{(1)}$ პოტენციალი უნდა აკმაყოფილებდეს ლაპლასის განტოლებას, (1) და (2) სასაზღვრო პირობებს და ასევე შემდეგ პირობებს:

$$\left. \frac{\partial \varphi_{\nabla y}^{(1)}}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\Delta V_r^{(0)}(\Theta, z);$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_{Vg}^{(1)}}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = -\Delta V_{\rho}^{(0)}(\Theta_1, z);$$

$\varphi_{Vg}^{(1)}$ განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$\varphi_{Vg}^{(1)} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} B_{mn} K_1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos n\Theta,$$

სადაც,

$$B_{mn} = -\frac{4\omega}{m\pi^2 K_n^1 \left(\frac{m\pi r_0}{2H} \right)} \int_0^H \int_0^{2\pi} \Delta V_r^{(0)}(\Theta, z) \cos n\Theta \cos \frac{m\pi z}{2H} d\Theta dz.$$

მეორე მიახლოებისათვის ავიღოთ ჯამი:

$$\varphi^{(2)} = \varphi^{(1)} + \varphi_{VgI}^{(2)};$$

$\varphi^{(2)}$ უნდა აკმაყოფილებდეს (1), (2) და (4) პირობებს, ხოლო $\varphi_{VgI}^{(2)}$ – (1) და

(2) პირობებს და ლაპლასის განტოლებას

$$\left. \frac{\partial \varphi_{VgI}^{(2)}}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = -[\Delta V_{\rho}^{(0)} - \Delta V_{\rho}^{(1)}];$$

$\varphi_{VgI}^{(2)}$ განისაზღვრება:

$$\varphi_{VgI}^{(2)} = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \frac{K_n \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{\rho}{H} \right)}{K_n^1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{\rho}{H} \right)} \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos n\Theta_1,$$

სადაც,

$$A_{mn} = -\frac{4\omega}{m\pi^2} \iint \Delta V_r^{(1)}(\Theta_1, z) \cos n\Theta_1 \cos \frac{m\pi z}{2H} d\Theta_1 dz;$$

$$\omega_m = \frac{m\pi}{2} \cdot \frac{C_0}{H} \quad (m=1,3,\dots)$$

2.4. ორი წყალმიმღების სინქრონული რხევა და კაშხლის არსებობა

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ორი წყალმიმღები სინქრონულად ირხევა და გარკვეულ მანძილზე მდებარეობს კაშხალი, რომელიც მათ დაძაბულ მდგომარეობაზე გავლენას ახდენს [22].

ანალოგიურად გვექნება სასაზღვრო პირობები (ნახ. 2.4.1):

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=L} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r_1=r_o} = V_o \cos \Theta_1; \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=r_o} = V_o \cos \Theta; \quad \varphi|_{z=H} = 0;$$

ნულოვანი მიახლოებისათვის ვიღებთ ჯამს:

$$\begin{aligned} \varphi^{(0)} &= V_o H \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} A_m K_1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_o}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \\ &+ V_o H \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} A_m K_1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_1}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y - L_1)^2}}; \\ A_m &= \frac{16}{m^2 \pi^2} (-1)^{\frac{m-1}{2}} \left[K_o \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_o}{H} \right) + K_2 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_o}{H} \right) \right]^{-1/2} \end{aligned}$$

პირველი მიახლოებისათვის ვიღებთ ჯამს:

$$\varphi^{(1)} = \varphi^{(0)} + \varphi_{\rho^{\circ} \vartheta b}^{(1)},$$

სადაც,

$$\left. \frac{\partial \varphi_{\rho^{\circ} \vartheta b}^{(1)}}{\partial x} \right|_{x=L} = -\Delta V_x^{(0)}(y, z); \quad \left. \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial x} \right|_{x=L} = \Delta V_x^{(0)}(y, z); \quad \left. \frac{\partial \varphi^{(s)}}{\partial r_1} \right|_{r_1=r_o} = V_o \cos \Theta_1 + \Delta V_r^{(0)}(\Theta_1, z).$$

ამონახსნი აიღება ვერტიკალური დრეკადი კედლის რხევის განტოლებიდან [4]:

მეორე მიახლოებისათვის ვიღებთ შემდეგი ამონახსნების ჯამს:

$$\varphi^{(2)} = \varphi^{(0)} + \varphi_{\text{ახს}}^{(1)} + \varphi_{\text{ფი}}^{(2)}, \quad \left. \frac{\partial \varphi_{\text{ფი}}^{(2)}}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\Delta V_r^{(1)}(\Theta, z),$$

სადაც $\varphi_{\text{ფი}}^{(2)}$ -ის განსაზღვრა დაიყვანება დრეკადი ცილინდრული გარსის რხევის ამოცანის ამოხსნამდე:

$$\varphi_{\text{ფი}}^{(2)} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} B_{mn} K_n \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r}{H} \right) \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos n\Theta,$$

სადაც,

$$B_{mn} = -\frac{4\omega}{m\pi^2 K_n^1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_0}{H} \right)} \int_0^H \int_0^{2\pi} \Delta V_r^{(1)}(\Theta, z) \cos n\Theta \cos \frac{m\pi z}{2H} d\Theta dz.$$

მესამე მიახლოებისათვის ვიღებთ შემდეგი ამონახსნების ჯამს:

$$\varphi^{(3)} = \varphi^{(2)} + \varphi_{\text{ფი}}^{(3)},$$

რომელიც უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობას:

$$\left. \frac{\partial \varphi^{(2)}}{\partial r_1} \right|_{r_1=r_0} = \Delta V_{r_1}^{(2)}(\Theta_1, z) + V_0 \cos \Theta_1.$$

მაშინ მივიღებთ

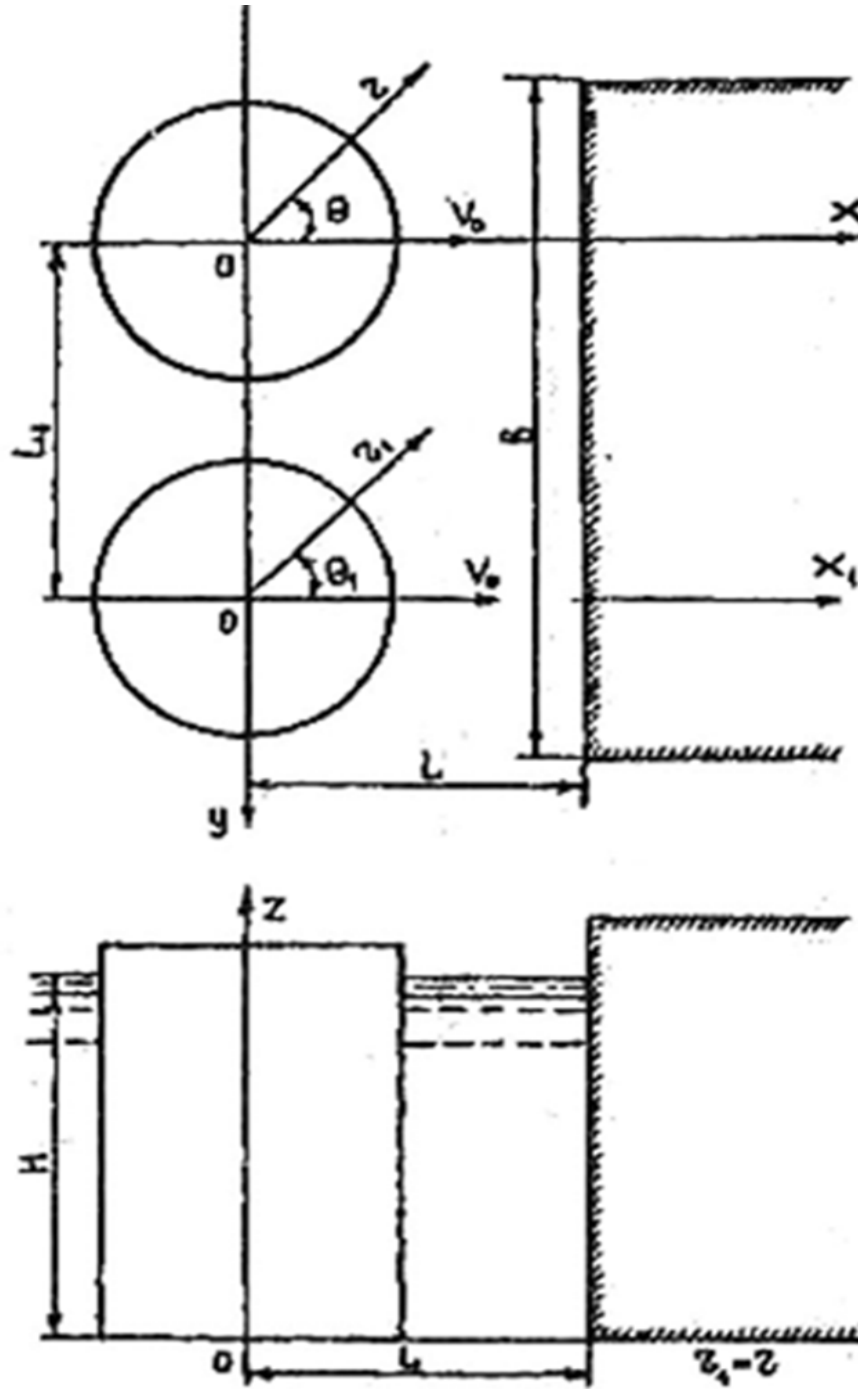
$$\varphi_{\text{ფი}}^{(3)} = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \frac{K_n \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_1}{H} \right)}{K_n^1 \left(\frac{m\pi}{2} \cdot \frac{r_1}{H} \right)} \cos \frac{m\pi z}{2H} \cos n\Theta_1;$$

$$\nu_m = \frac{m\pi}{2}; \quad \omega_m = \frac{m\pi}{2} \cdot \frac{C_0}{H} \quad (m = 1, 3, \dots)$$

$$A_m = -\frac{4\omega}{m\pi^2} \int_0^H \int_0^{2\pi} \Delta V_{r_1}^{(2)}(\Theta_1, z) \cos n\Theta_1 \cos \frac{m\pi z}{2H} d\Theta_1 dz.$$

ანალოგიურად მიმდინარეობს შემდგომი მიახლოების გაანგარიშება, ამასთან ყოველი მიახლოების დროს სიჩქარის პოტენციალზე მინიშნებული ინდექსი „წყ“ და „წყ1“ ნიშნავს სასაზღვრო პირობების

დაკმაყოფილებას შესაბამისად წყალმიმღების ცილინდრულ ზედაპირზე $r = r_0$ და $r_1 = r_0$, ხოლო ინდექსი „კაშხ“ – სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილებას კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე $-x = L$.



ნახ. 2.4.1 კაშხლის სიახლოვეს მყოფი ორი წყალმიმღების სინქრონული რხევის სქემა.

ორმაგი ინტეგრალების განსაზღვრა, რომელიც დამუშავდა პროგრამით და იანგარიშებოდა ორმაგი დაჯამების სახით, შეიცვალა ჩვენს მიერ სპეციალურად შემუშავებული ქვეპროგრამით. დიფერენციალები, რომელიც იყო გამოყენებული საწყის გამოსახულებებში, გამოთვლილი იქნა ანალიზურად და შეყვანილია პროგრამაში უკვე მზა გამოსახულების სახით. აღსანიშნავია, რომ საწყისი პირობების შესაბამისად დიფერენცირება დეკარტის კოორდინატებში შესაძლებელია, შეიცვალოს დიფერენცირებით ცილინდრული კოორდინატებში და პირიქით. წარმოდგენილი ფორმულები გარდაიქმნება იმ მოთხოვნების გათვალისწინებით, რომელიც აუცილებელია მათი კომპიუტერში მოსახერხებელი შეყვანისათვის.

დამუშავებული პროგრამის საფუძველზე ჩატარებულია საკონტროლო ანგარიშები, სპეციალურად შედგენილი ტესტებით, რომელთა შედეგები შეესაბამება ეტალონებს.

წყალმიმღები ნაგებობის რადიუსის და სიმაღლის თანაფარდობა და წნევის ცვლილების კანონი არსებითად განსხვავდება პარაბოლური ეპიურისგან, წნევა თითქმის მუდმივია მთელ სიმაღლეზე და მხოლოდ თავისუფალ ზედაპირთან ახლოს იწყებს შემცირებას, ხოლო კაშხალსა (შემაკავებელ გარემოს) და წყალმიმღებ ნაგებობას შორის მანძილის გაზრდით დატვირთვის დონე წყალმიმღებზე კლებულობს.

2.5. ნამახვანჰესის კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობის განგარიშების რიცხვითი შედეგების ანალიზი

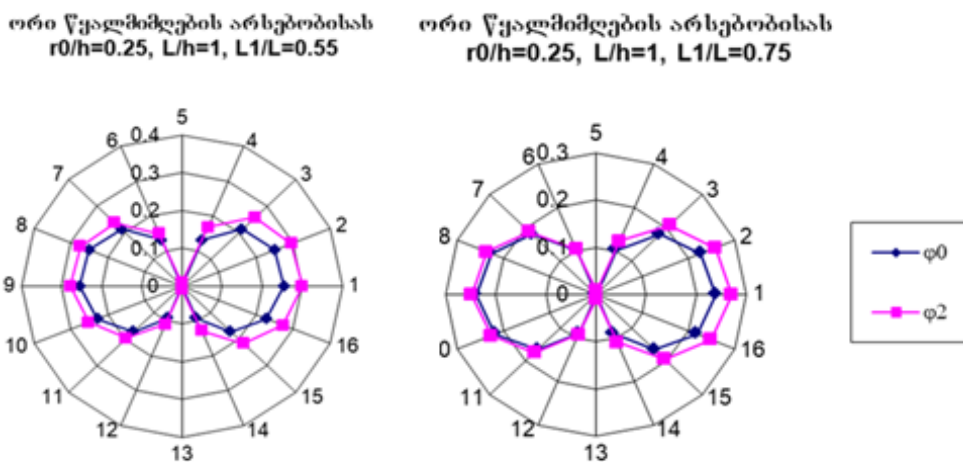
საანგარიშოდ გამოყენებულ იქნა ნამახვანის ჰიდროკვანძი. განგარიშება ჩატარდა ჩვენ მიერ დამუშავებული ალგორითმით და პროგრამით Fortran-ის ენაზე პერსონალური კომპიუტერისთვის. წარმოდგენილი ფორმულები გარდაიქმნა იმ მოთხოვნების შესაბამისად, რომელიც აუცილებელი იყო მათი პროგრამული დამუშავებისათვის.

პროგრამა შეიცავს კომპურა ტიპის წყალმიმღები ნაგებობების წრფივი დრეკადი რხევების განგარიშებას, ერთმანეთთან ურთიერთქმედებას სეისმური ზემოქმედების დროს კაშხლის გავლენის გათვალისწინებით.

ჩატარდა საკონტროლო განგარიშებები სპეციალურად შედგენილი ტესტებით, რომელთა შედეგები კარგად შეესაბამება ეტალონებს. განგარიშებისას განხილულ იქნა ვარიანტები, კერძოდ წყალმიმღებების

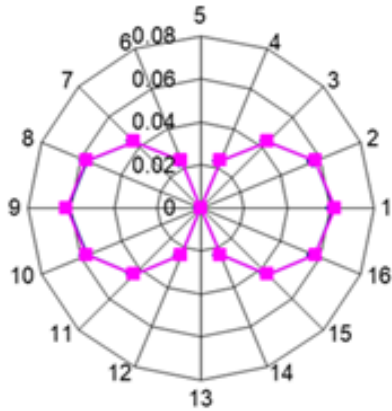
კონფიგურაციის r_0/H , ურთიერშორის მანძილის L_1/L და წყალმიმღებებსა და კაშხლის დაშორების L/H სხვადასხვა შემთხვევისათვის.

განგარიშების ცალკეული შედეგები მოცემულია ნახაზებზე: 2.5.1, ნახ. 2.5.2, ნახ. 2.5.3, ნახ. 2.5.4.

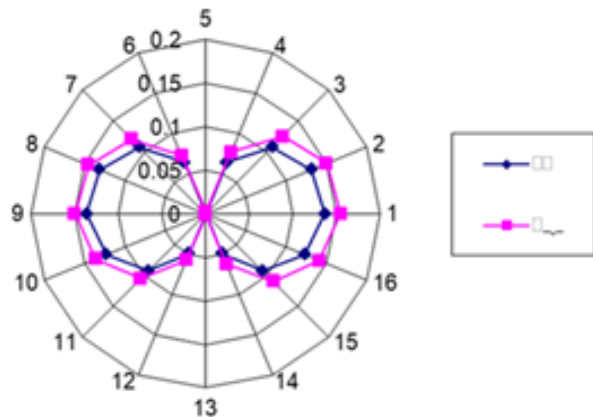


ნახ. 2.5.1. სიჩქარის პოტენციალი ორი წყალმიმღების არსებობისას. გეომეტრული პარამეტრების 1 და 2 ვარიანტი.

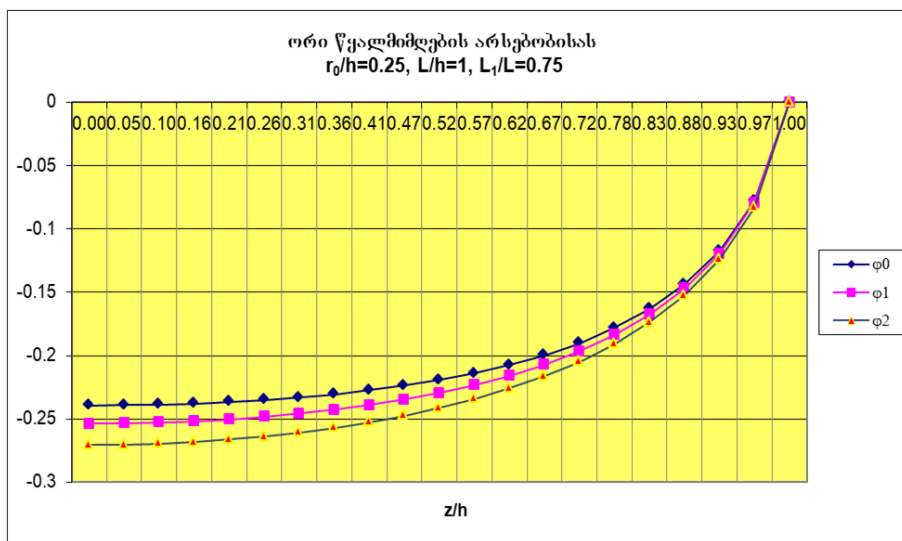
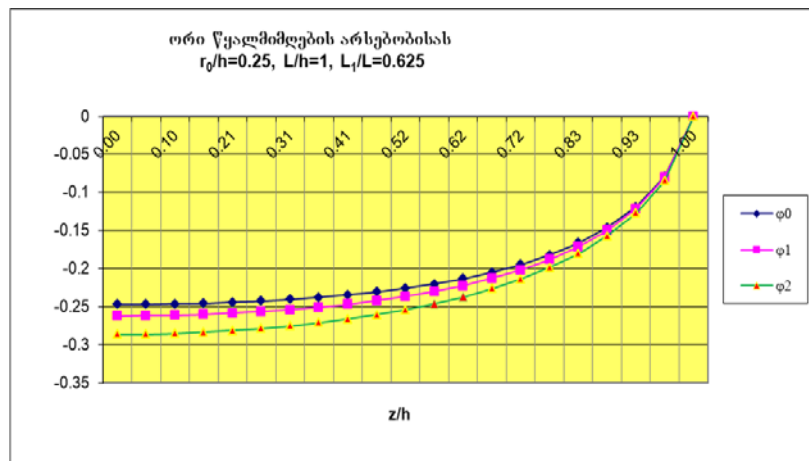
ორი წყალმიმღების არსებობისას
 $r_0/h=0.062$, $L/h=3$, $L_1/L=0.309$



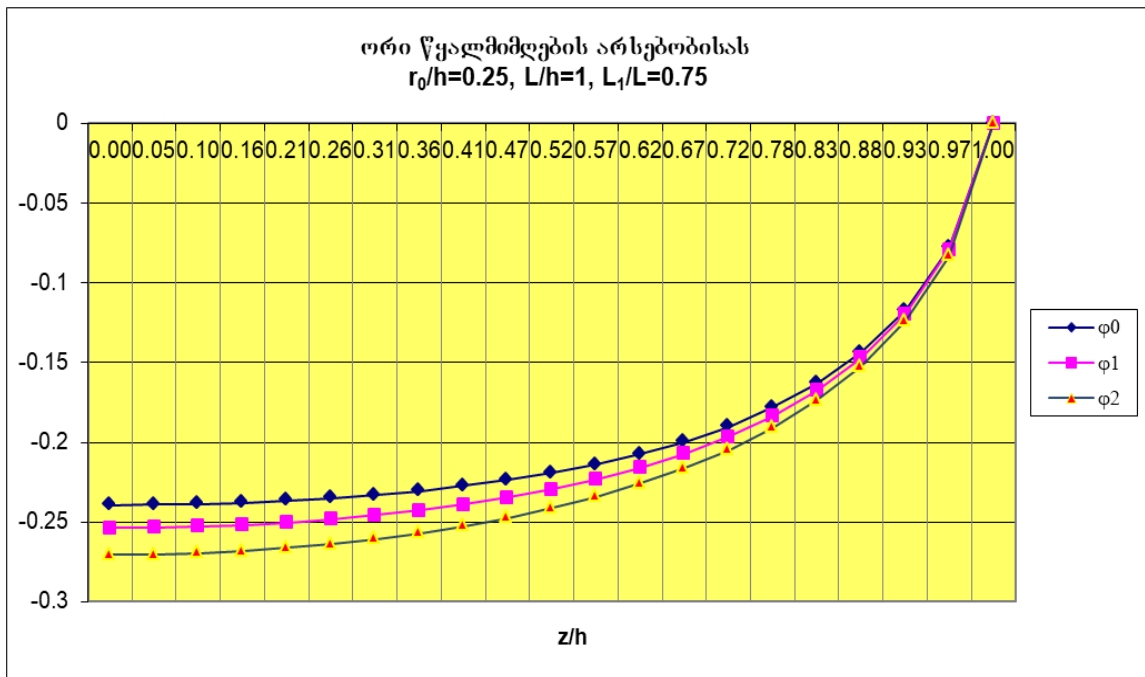
ორი წყალმიმღების არსებობისას
 $r_0/h=0.125$, $L/h=1$, $L_1/L=0.3125$



ნახ. 2.5.2. სიჩქარის პოტენციალი გეგმაში ორი წყალმიმღების არსებობისას.
 გეომეტრული პარამეტრების 3 და 4 ვარიანტი.



ნახ. 2.5.3. სიჩქარის პოტენციალი სიმაღლეში ორი წყალმიმღების არსებობისას.
 გეომეტრული პარამეტრების 1 და 2 ვარიანტი



ნახ. 2.5.4. სიჩქარის პოტენციალი სიმაღლეში ორი წყალმიმღების არსებობისას.

გეომეტრული პარამეტრების 3 ვარიანტი .

თავი 3. დინამიკის ამოცანის ამოხსნა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით

3.1 გაანგარიშების ძირითადი ალგორითმი

დინამიკის ძირითადი განტოლებას დემფერირებული სისტემისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$M \ddot{V} + C \dot{V} + K V = P(t) \quad (3.1.1)$$

სადაც, M - მასების მატრიცა; C - დემფირების მატრიცა, ხოლო K - სიხისტის მატრიცა;

V, \dot{V}, \ddot{V} - გადაადგილების, სიჩქარის და აჩქარების ვექტორები შესაბამისად;

$P(t)$ - გარე (სეისმური) დატვირთვა.

მათემატიკურად (3.1.1) განტოლება წარმოადგენს მეორე რიგის წრფივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას.

ზოგადად, მისი ამოხსნა შესაძლებელია მუდმივ კოეფიციენტებიანი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის სტანდარტული პროცედურით. საჭიროა აღინიშნოს, რომ აღნიშნული პროცედურა არაეფექტური ხდება, როდესაც იზრდება მატრიცის რიგი. პრაქტიკული გაანგარიშებებისათვის უფრო ეფექტურია სხვა ალგორითმი [23-28], რომლებიც შესაძლებელია იყოს 2 ჯგუფად: პირველი - პირდაპირი ინტეგრება და საკუთარი რხევის ფორმებად დაშლა.

წყალმიმღები ნაგებობის კოშკის გაანგარიშებისას გამოყენებულ იქნა ორივე მეთოდი.

სასრული ელემენტების მეთოდის ძირითადი თეორია წარმოდგენილია მრავალ პუბლიკაციებში [29-41] და ამდენად არ საჭიროებს დეტალურ განხილვას. მეთოდის სარეალიზაციო

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

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = [k]\{u\} + \{F\} = 0 \quad (3.1.2)$$

სადაც χ - განსახილველი სისტემის კვადრატული ფუნქციონალია;

$[k]$ - სისტემის სიხისტის მატრიცაა;

$\{F\}$ და $\{u\}$ - დატვირთვისა და გადაადგილებათა ვექტორების კვანძური მნიშვნელობებია;

სისტემის სიხისტის მატრიცა გამოითვლება ფორმულით:

$$[k] = \int [B]^T [D] [B] ds \quad (3.1.3)$$

სადაც: $[B]$ - ელემენტის გეომეტრიული მახასიათებლების მატრიცაა და აკავშირებს დეფორმაციებს კვანძურ გადაადგილებებთან;

$[D]$ - ფიზიკური მახასიათებლების მატრიცაა და იზოტროპული მასალისათვის ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში აქვს სახე:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (3.1.4)$$

აქ E და ν - მასალის დრეკადობის მოდული და პუასონის კოეფიციენტებია შესაბამისად.

ანიზოტროპული მასალებისათვის ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში [D] მატრიცა ლოკალურ კოორდინატთა სისტემაში წარმოდგენილია შემდეგი სახით [52,53,54]:

$$[D] = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2\nu_1^2)} \begin{bmatrix} n(1-\nu_2^2) & \nu_2(1+\nu_2) & 0 \\ \nu_2(1+\nu_1) & (1-\nu_1^2) & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu_1)(1-\nu_1-2\nu_1^2) \end{bmatrix} \quad (3.1.5)$$

აქ E_1 და ν_1 მასალის მახასიათებლებია იზოტროპიის ველის სიბრტყეში;

E_2 და ν_2 - იგივე იზოტროპიის ველის პერპენდიკულარულად;

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

G - ძვრის მოდულია;

გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში [D] მატრიცა განისაზღვრება პირობიდან:

$$[D] = [T][D'] [T]^T \text{ სადაც:}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \cdot \cos \beta & -\sin \beta \cdot \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

β - კუთხეა კოორდინატთა სისტემის ღერძებს შორის.

წრფივი სამკუთხა ელემენტები (ნახ.2.1) ხასიათდებიან პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტით. ელემენტს შიგნით გადაადგილების ველი კვანძური გადაადგილებებით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N]\{\delta^e\} = [N'_i N'_j N'_k]\{\delta^e\} \quad (3.1.7)$$

სადაც I – ერთეულოვანი მატრიცაა, ხოლო $[N]$ - ფორმის ფუნქციაა,

$$N'_i = \frac{a_i + b_i x + c_i}{2s}$$

$a_i + b_i x + c_i$ - ელემენტის ფარგლებში გადაადგილების ველის პოლინომის კოეფიციენტებია; x, y – ელემენტის შიგნით ნებისმიერი წერტილის კოორდინატებია; S – ელემენტის ფართია; $[N]$ - მატრიცის დანარჩენი წევრები მიიღება i, j, k ინდექსების ციკლური გადანაცვლებით; $\{\delta^e\}$ - ელემენტის კვანძური გადაადგილების ვექტორია.

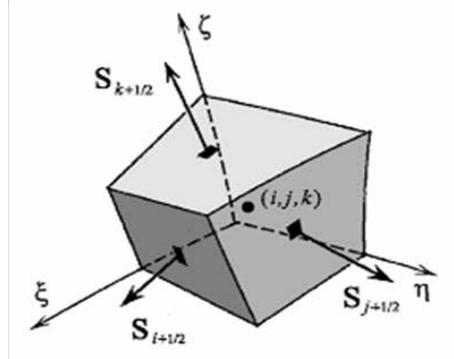
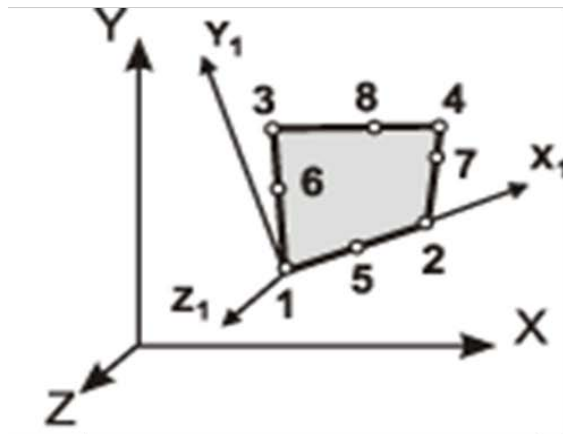
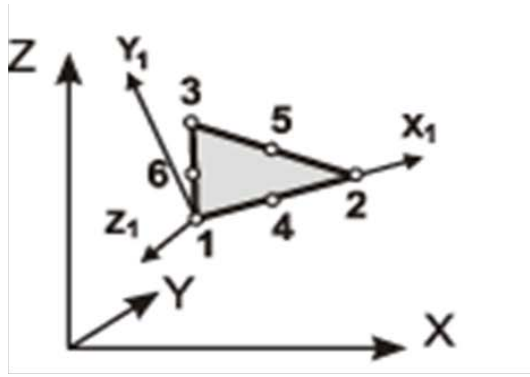
დეფორმაციები ელემენტის ფარგლებში განისაზღვრება კომის დამოკიდებულებებით:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N'_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N'_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N'_k}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N'_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N'_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N'_k}{\partial y} \\ \frac{\partial N'_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N'_j}{\partial y} & \frac{\partial N'_j}{\partial x} & \frac{\partial N'_k}{\partial y} & \frac{\partial N'_k}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ v_i \\ U_j \\ v_j \\ U_k \\ v_k \end{Bmatrix} \quad (3.1.8)$$

ხოლო ძაბვები ჰუკის კანონით:

$$\underline{\{\sigma\}} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.1.9)$$

მდგენელი ძაბვების განსაზღვრის შემდეგ გამოითვლებიან მთავარი ძაბვები და მათი ტრაექტორიები.

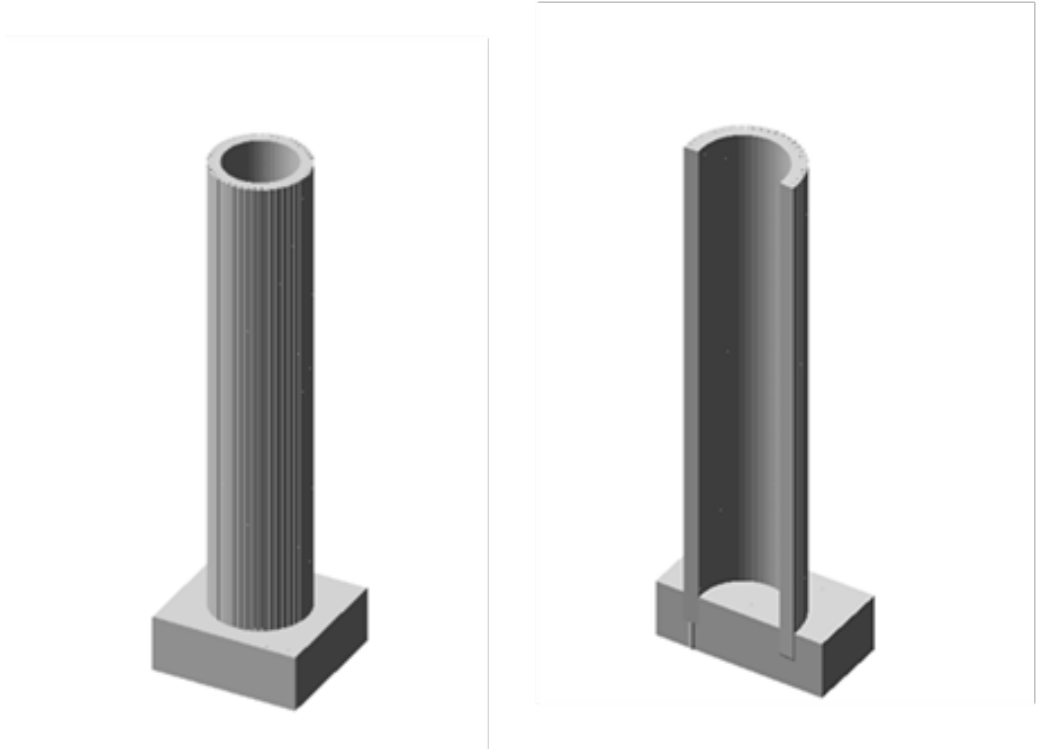


ნახ. 3.1. ორ და სამ განზომილებიან ამოცანებში გამოყენებული სასრული ელემენტები.

3.2 წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება

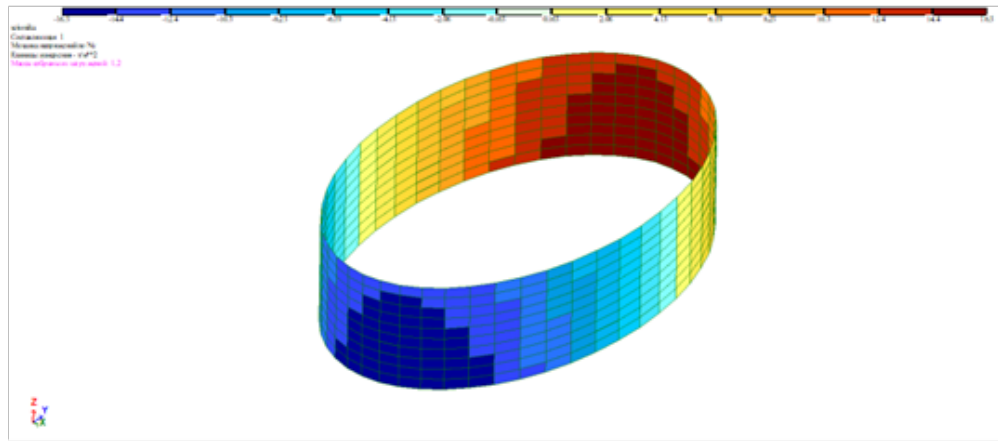
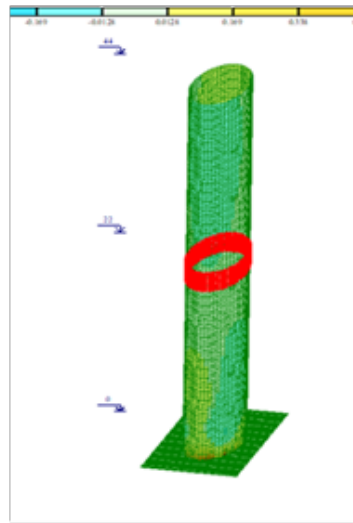
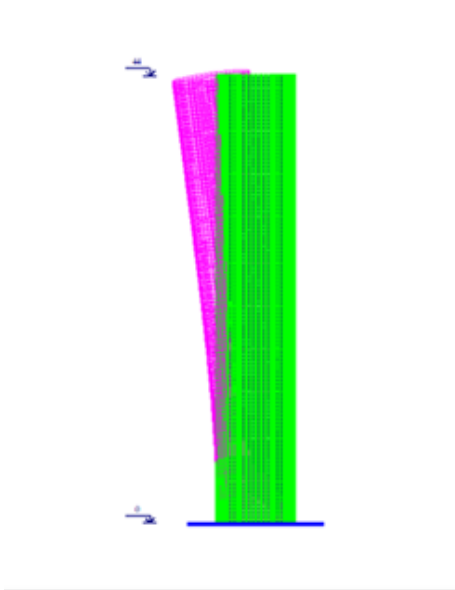
სამ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში

კოშკის გაანგარიშება სამ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში ჩატარებული იქნა პროგრამული კომპლექსი „LIRA“-ს გამოყენებით, რომლის შედეგად მიღებული იქნა ნაგებობის სივრცითი დაძაბული მდგომარეობის კომპონენტები.



ნახ.3.2.1.თეძამის წყალმიმღები კოშკის

სამ განზომილებიანი სასრულ-ელემენტური მოდელი



ნახ. 3.2.2 კოშკის რხევის დროს ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები
სიმაღლის შუა კვეთში (ტ/მ²).

თავი 4

4. წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება

ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში

4.1 ცილინდრული ფორმის წყალმიმღები კონსტრუქციის გაანგარიშება

წყალმიმღები კოშკი ზოგადად წარმოადგენს სივრცით კონსტრუქციას წრიული ან მართკუთხა განივკვეთით ხოლო სიმაღლეში შესაძლებელია ჰქონდეს მუდმივი ან ცვლადი გეომეტრიული ზომები. ასეთ კონსტრუქციებში, ჩვეულებრივად განივკვეთის ზომები (რადიუსი ან გვერდი) მნიშვნელოვნად მცირეა სიმაღლესთან შედარებით, ფუძის სეისმური რხევისას კონსტრუქცია ძირითადად ვერტიკალურ სიბრტყეში განიცდიან ღუნვის დეფორმაციებს, რომლის დროს განივი კვეთები დეფორმაციის გარეშე განიცდიან მობრუნებას. ამ დროს კონსტრუქციის კორპუსში ჩნდება დამატებითი ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები. საინჟინრო თვალსაზრისით წყალმიმღები კოშკის სეისმოდაცხადი მდგომარეობის შესაწავლა უპირატესად მიზნად ისახავს ხსენებული ძაბვების ექსტრემალური მნიშვნელობების განსაზღვრას.

წყალმიმღების სივრცითი კონსტრუქციის შესწავლა ზოგადად წარმოადგენს სამ განზომილებიან ამოცანას. ცხადია, გაანგარიშების თვალსაზრისით უფრო მოხერხებულია საკითხის განხილვა ორ განზომილებიანი ამოცანების ფარგლებში. ნაშრომში წარმოდგენილია სქემა, რომელიც განიხილავს წყალმიმღები კოშკის შესაბამისი სიმაღლის, ექვივალენტური დინამიკური პარამეტრების მქონე მართკუთხა კვეთის პრიზმულ კონსტრუქციას.

ცილინდრული კონსტრუქციის შემთხვევაში რგოლური კვეთის შეცვლა ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის მქონე პრიზმული კონსტრუქციით, შესაძლებელია მოხდეს დაყვანილი მექანიკური პარამეტრების გამოყენებით, რომლის დროს უნდა სრულდებოდეს პირობა (ნახ.4.1):

$$E_0 I_0 = E_R I_R$$

სადაც, I_0 და I_R - ინერციის მომენტებია ცილინდრული კონსტრუქციის რგოლური და ექვივალენტური პრიზმულ კონსტრუქციის მართკუთხა კვეთებისათვის შესაბამისად;

E_0 - ცილინდრული კონსტრუქციის მასალის დრეკადობის მოდულია;

E_R - პრიზმული ძელის დაყვანილი დრეკადობის მოდულია ღუნვის დეფორმაციისათვის.

საბოლოოდ, სრული ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები პრიზმულ კონსტრუქციში საექსპლუატაციო დატვირთვების სტატიკური და დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით შესაძლებელია მიღებული იქნას სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად:

$$\sigma_s = \sigma_{y,d} + \sigma_{y,s}$$

აქ, $\sigma_{y,d}$ და $\sigma_{y,s}$ - ვერტიკალური ნორმალური ძაბვებია პრიზმულ კონსტრუქციაში განვითარებული დინამიკური და სტატიკური ზემოქმედებით შესაბამისად.

რგოლისა და მართკუთხა კვეთისათვის ინერციის მომენტები განისაზღვრება ცნობილი ფორმულებით [40,41]:

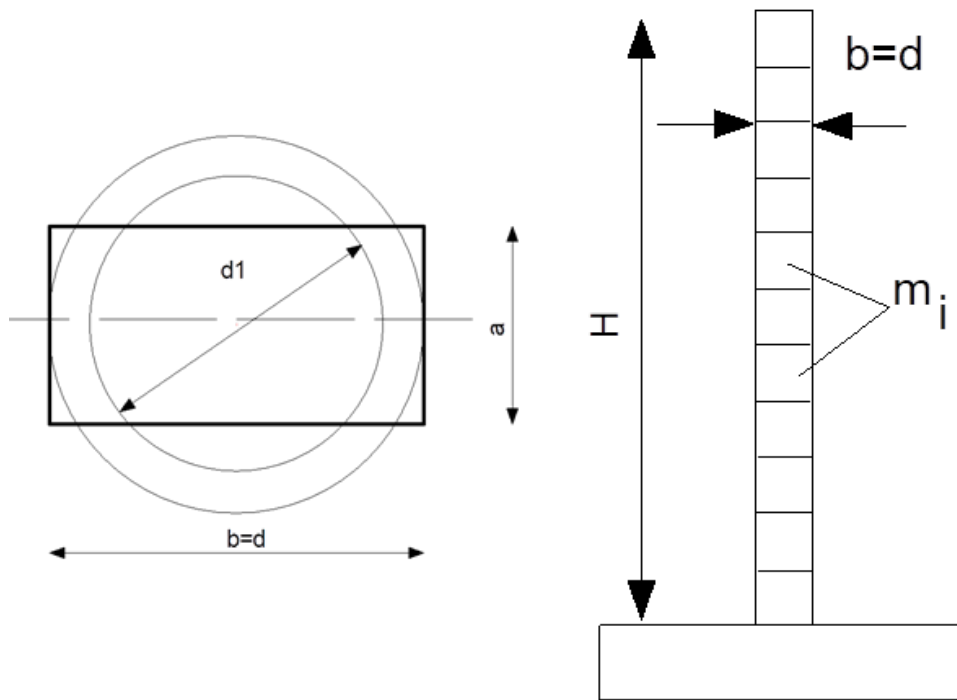
$$I_0 = \frac{\pi r^4}{4} (1 - C^4)$$

$$I_R = \frac{ab^3}{12}$$

სადაც, r - ცილინდრის გარე რადიუსია; $C = \frac{d_1}{d}$, აქ d_1 და d - ცილინდრის შიგა და გარე დიამეტრებია შესაბამისად;

a და b მართკუთხა კვეთის გვერდებია.

თუ ჩავთვლით, რომ $b = d$, მაშინ დაყვანილი მართკუთხა კვეთის მეორე გვერდი განისაზღვრება ინერციის მომენტების გატოლებით.



ნახ. 4.1 წრიული კვეთის კოშკურა წყალმიმღების ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის პრიზმული ძელი.

პრიზმული ძელისათვის მასების (m_i) განაწილება სიმაღლეში მოხდება კოშკის საპროექტო კონსტრუქციის გეომეტრული ზომების მიხედვით - მათი დაყვანილი მნიშვნელობების მიხედვით.

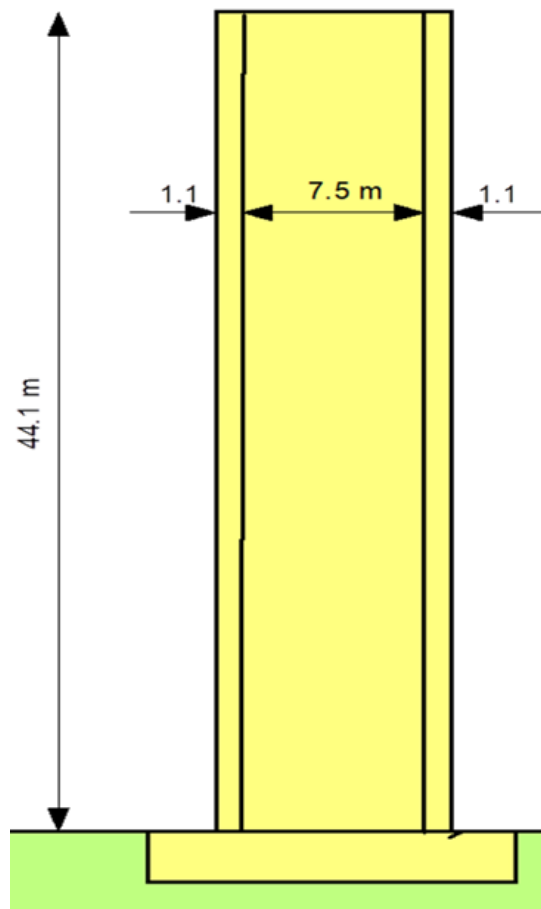
ზოგადად, წრიული ან მართკუთხა კვეთის და ასევე სიმაღლეში ცვლადი გეომეტრიული ზომის მქონე წყალმიმღები ნაგებობის კოშკის სეისმიურ ზემოქმედებაზე გაანგარიშების სქემა შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნას ექვივალენტური ინერციის მომენტისა და, სიმაღლეში, ასევე ექვივალენტური მასების (m_i) განაწილების მქონე მართკუთხა კვეთის მქონე პრიზმული ძელის სახით (ნახ. 4.1).

4.2 კოშკურა წყალმიმღების გაანგარიშება

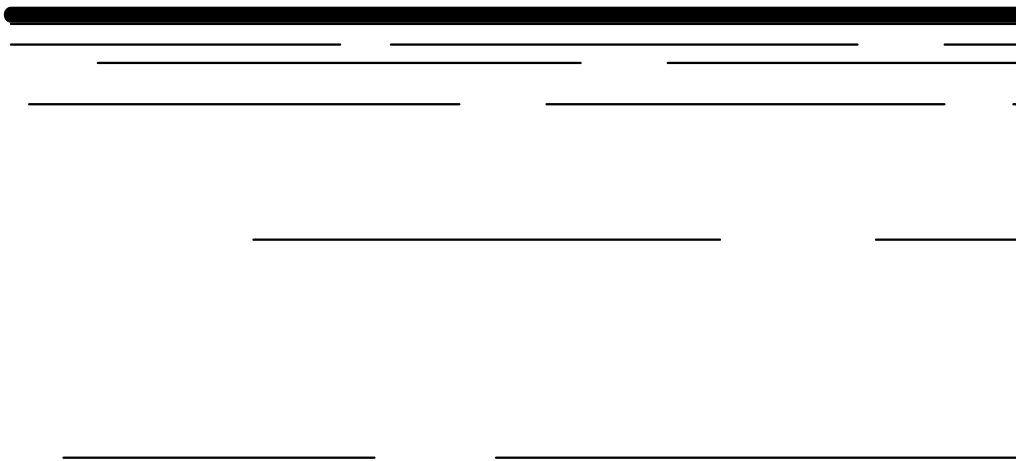
ცარიელი წყალსაცავის პირობებში

წინამდებარე გაანგარიშება მიზნად ისახავს გაანალიზოს ცილინდრული ფორმის კოშკურა კონსტრუქციის სეისმური დაძაბული მდგომარეობა ორ განზომილებიანი სასრულ-ელემენტული მოდელის გამოყენებით და ასევე მოხდეს შედეგების ანალიზი სამ განზომილებიან ამოცანასთან მიმართებით.

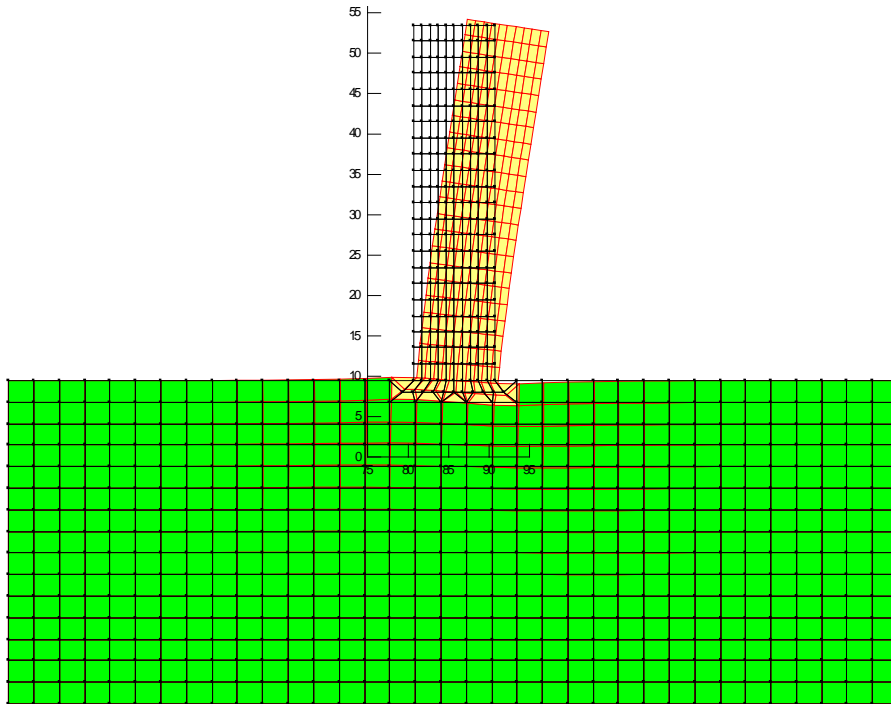
ქვემოთ მოცემულია თეძამის ჰიდროკვანძის კოშკურა წყალმიმღების გაანგარიშების რიცხვითი შედეგების ანალიზი საკუთარი წონის გათვალისწინებით (დაცლილი წყალსაცავის დროს) შემოთავაზებული სქემის გამოყენებით [42]. თეძამის კოშკურა წყალმიმღების საპროექტო ზომებია: $H=44.1$ მ, $d=9.7$ მ, $d_1=7.5$ მ (ნახ. 4.2.1 , დანართი 2).



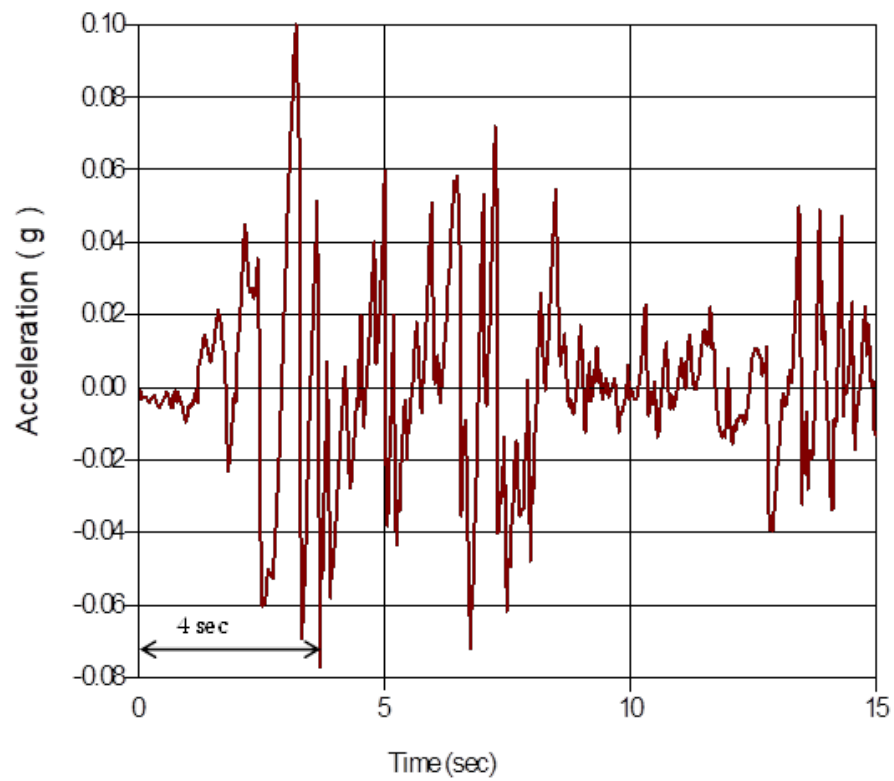
ნახ. 4.2.1 თეძამის კოშკურა წყალმიმღების საანგარიშო კონსტრუქცია.



ნახ. 4.2.2 „კომპერა წყალმიმღები - ფუძე“ სისტემის სასრულ ელემენტური მოდელი ექვივალენტური მართკუთხა კვების პრიზმული ძელის გამოყენებით



ნახ. 4.2.3 კოშკის გადაადგილება პიკური აჩქარების ($T=4\text{წმ}$) დროს



ნახ.4. 2.4 მიწისძვრის საანგარიშო აქსელეროგრამა.

კომპურა წყალმიმღები - ფუძე“ სისტემის სასრულ ელემენტული მოდელი, ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის პრიზმული ძელის გამოყენებით, მოცემულია ნახაზზე 4.2.2 .

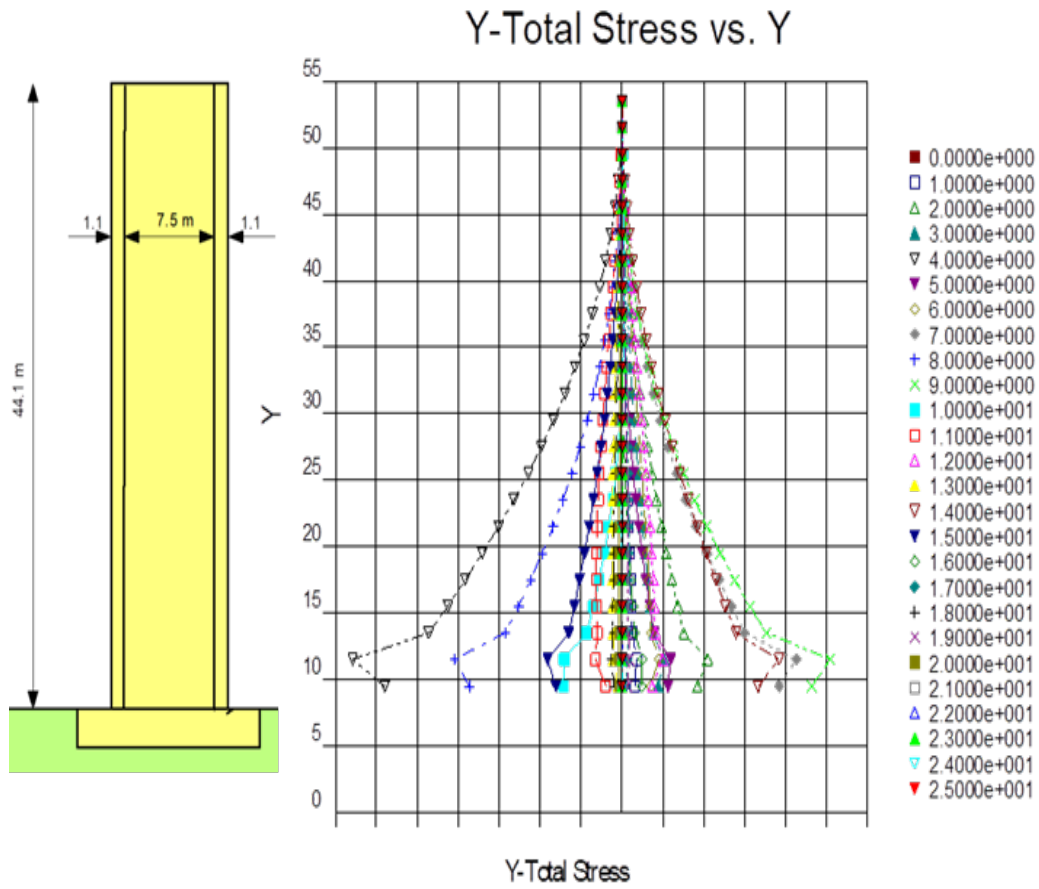
იდენტური დინამიკური ზემოქმედებისას ორ და სამ განზომილებიანი რიცხვითი ანალიზის შედეგების მიხედვით განსხვავება ცილინდრული კონსტრუქციის კორპუსში ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალურ ნორმალურ ძაბვებს ($\sigma_{y,d}$) შორის არ აღემატება 3%-ს, რაც სავსებით მისაღებია საინჟინრო თვალსაზრისით (ნახ.4,2,8).

განგარიშები ჩატარებული იქნა ვილსონის თეტა მეთოდის გამოყენებით (ინტეგრების 25 დროითი ბიჯის მიხედვით), სადაც გამოყენებული იქნა ერთ-ერთი ანალოგური აქსელეროგრამა (ნახ. 4.2,4) [31,32].

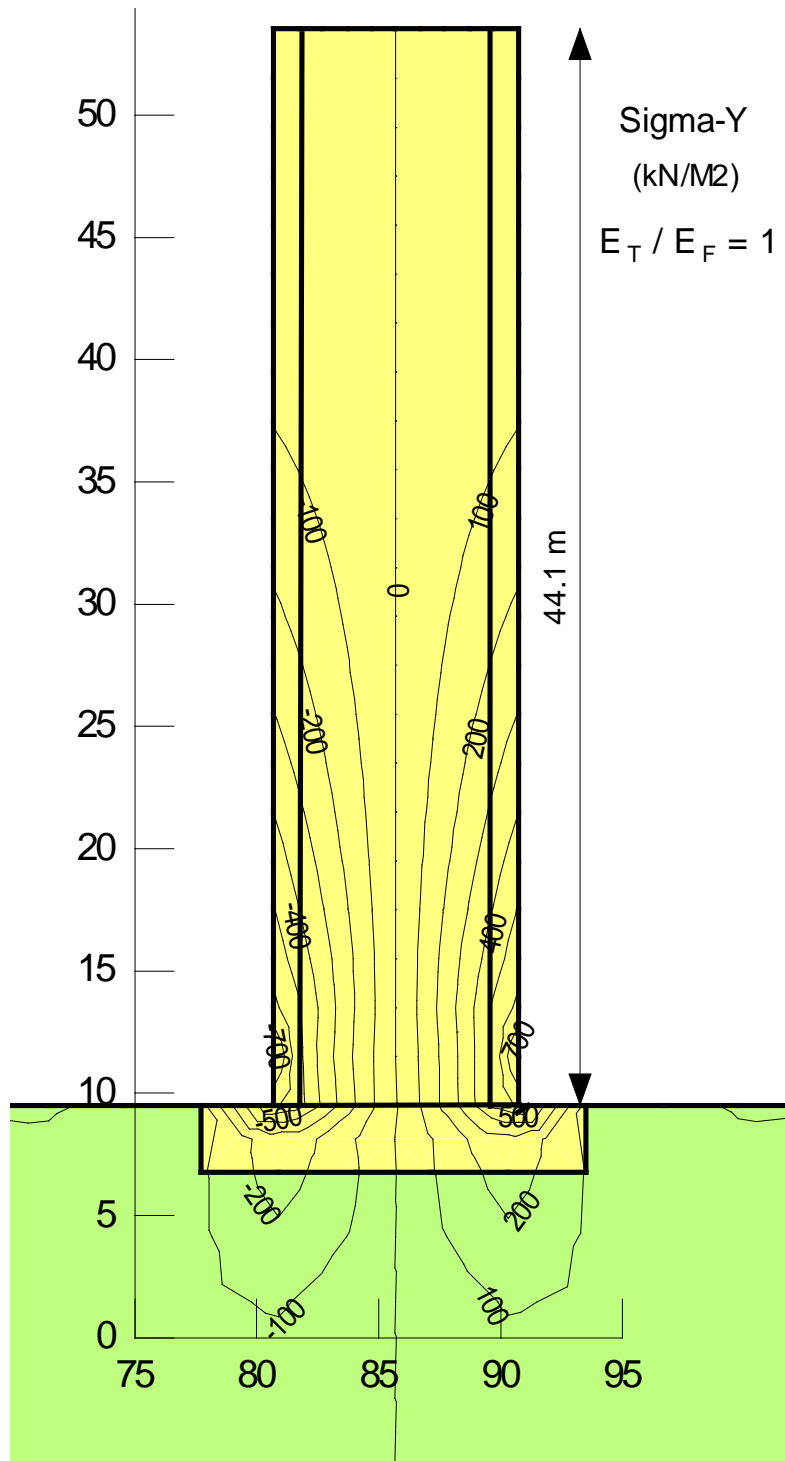
ინტეგრების დროითი ბიჯების ამონახსნების მიხედვით მაქსიმალური აჩქარების შესაბამისი ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების ($\sigma_{y,d}$) ექსტრემალური მნიშვნელობა ცილინდრულ კონსტრუქციის ფუძეში აღწევს $\pm 860 \text{ kN}/\text{m}^2$, რაც შესაბამისი ძაბვების სტატიკური მნიშვნელობის ($\sigma_{y,s} = 1060 \text{ kN}/\text{m}^2$) 81%-ს აღწევს (ნახ. 4. 2.5, 4. 2.6, 4. 2.4).

წარმოდგენილი საანგარიშო სქემის გამოყენებით ჩატარებული იქნა განგარიშები ფუძის დამყოლობის გათვალისწინებით და აგრეთვე კომპის სისქის საპროექტო რკინა ბეტონის პარამეტრების შეფასებისათვის.

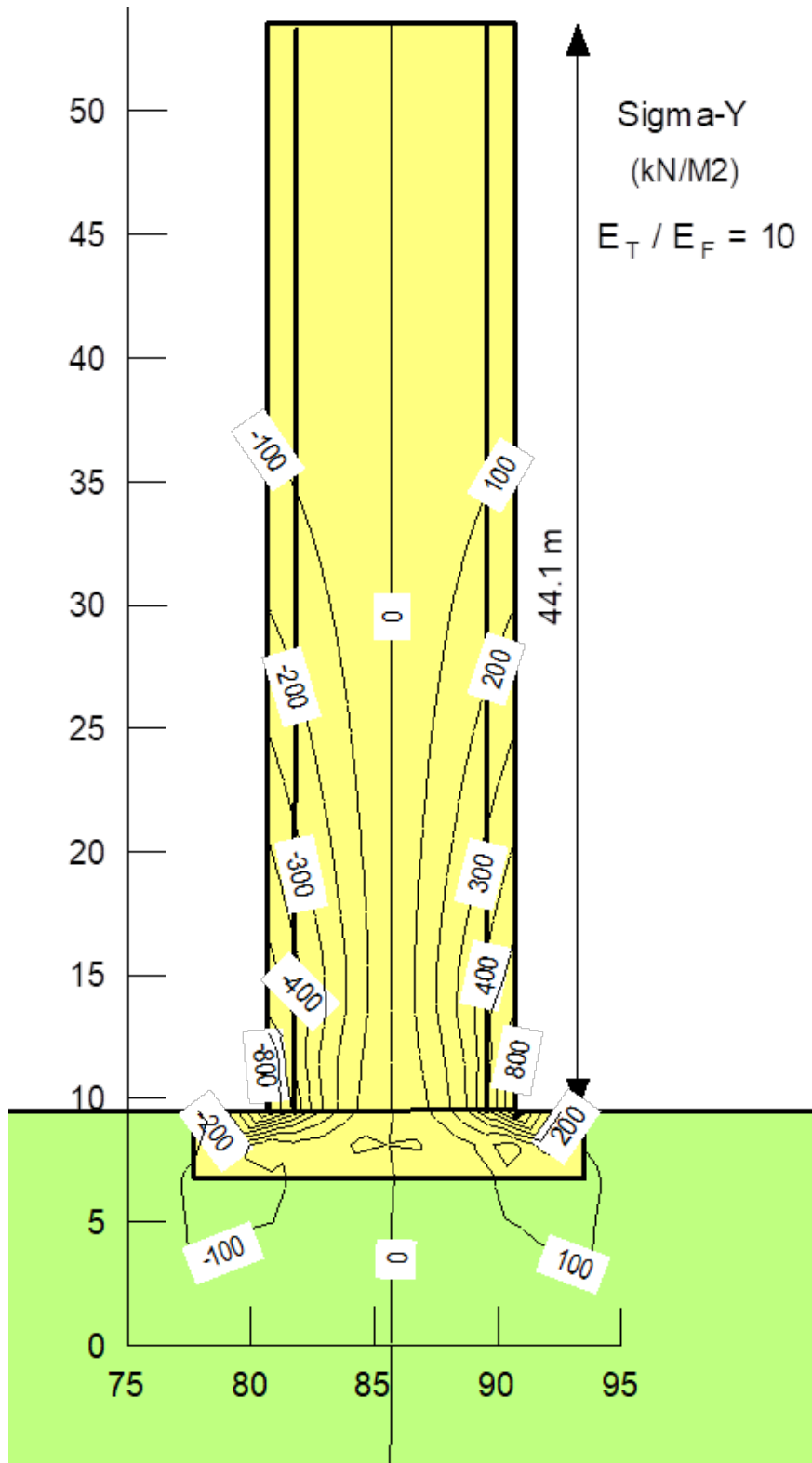
ხისტი ფუძის შემთხვევაში კომპისა და ფუძის საკონტაქტო კვეთში პიკური აჩქარების დროს ძაბვები და კომპის ჰორიზონტალური გადახრა ≈ 2 -ჯერ გაიზარდა დამყოლთან შედარებით (ნახ. 4.2.10).



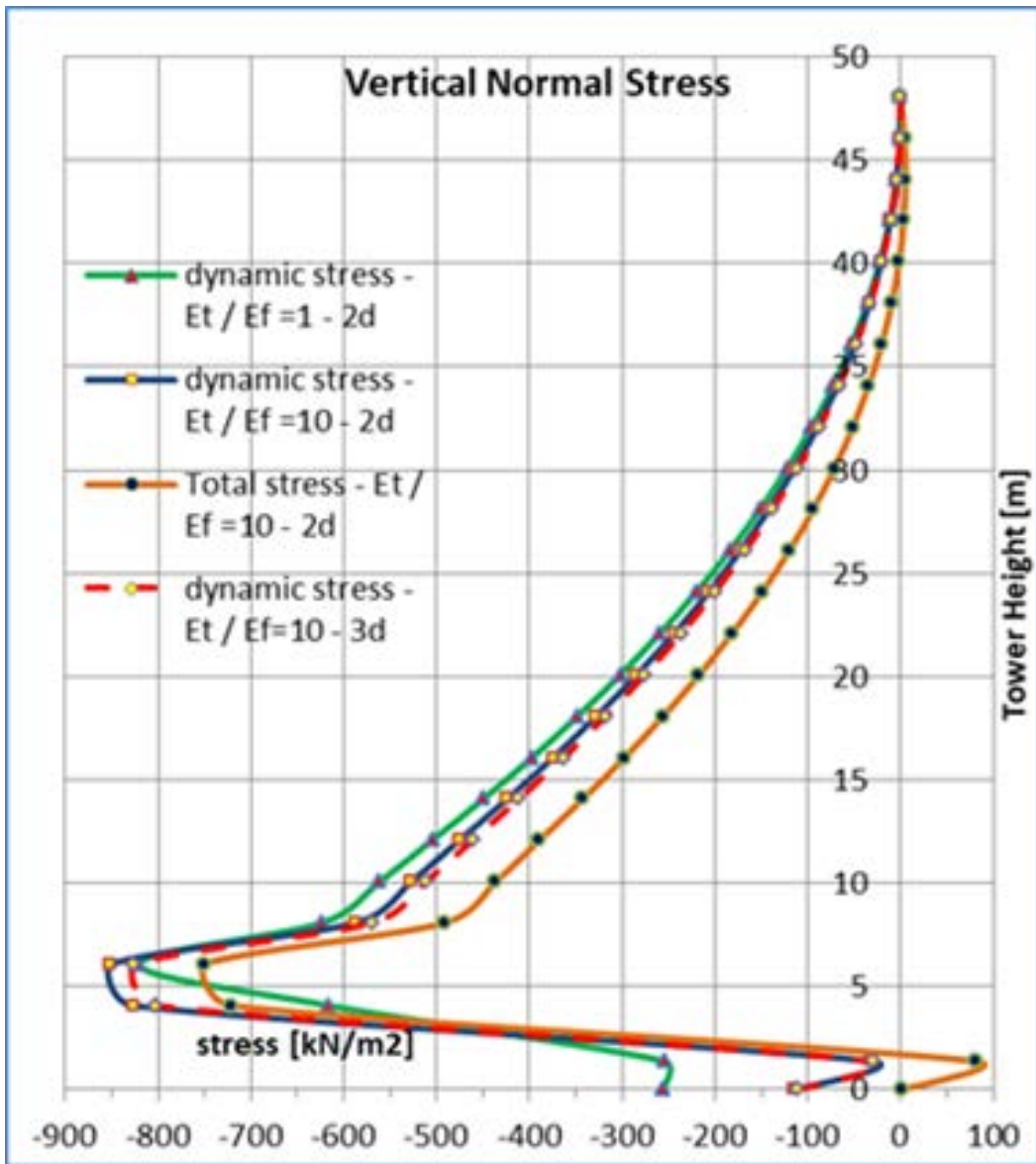
ნახ.4. 2.5 ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების ($\sigma_{y,d}$) განაწილება ცილინდრული კონსტრუქციის სიმაღლეში პიკური აჩქარების დროს (ინტეგრების დროითი ბიჯების ამონახსნების მიხედვით).



ნახ.4.2.6 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური
 ნორმალური დაბეგები ($\sigma_{y,d}$), როცა $E_T / E_F = 1$.

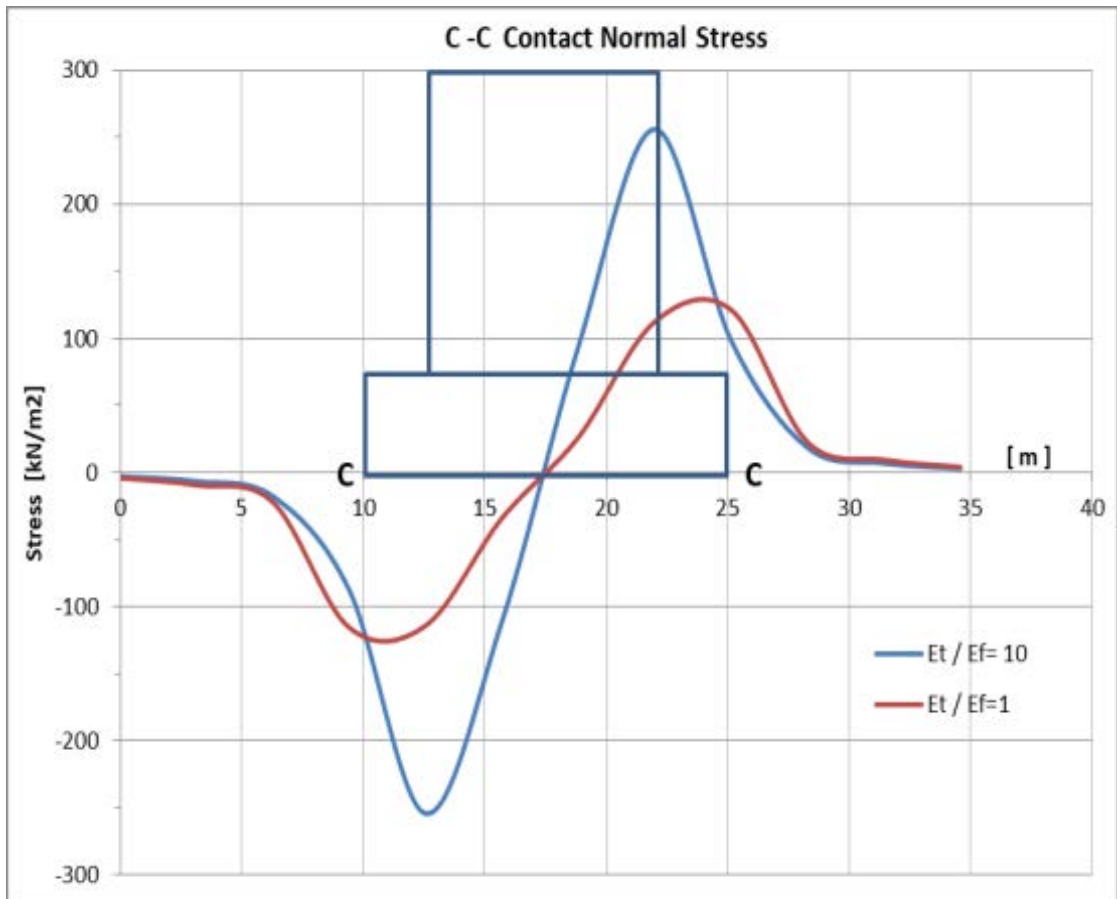


ნახ.4.2.7 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური
 ნორმალური ძაბვები ($\sigma_{y,d}$), როცა $E_T / E_F = 10$.

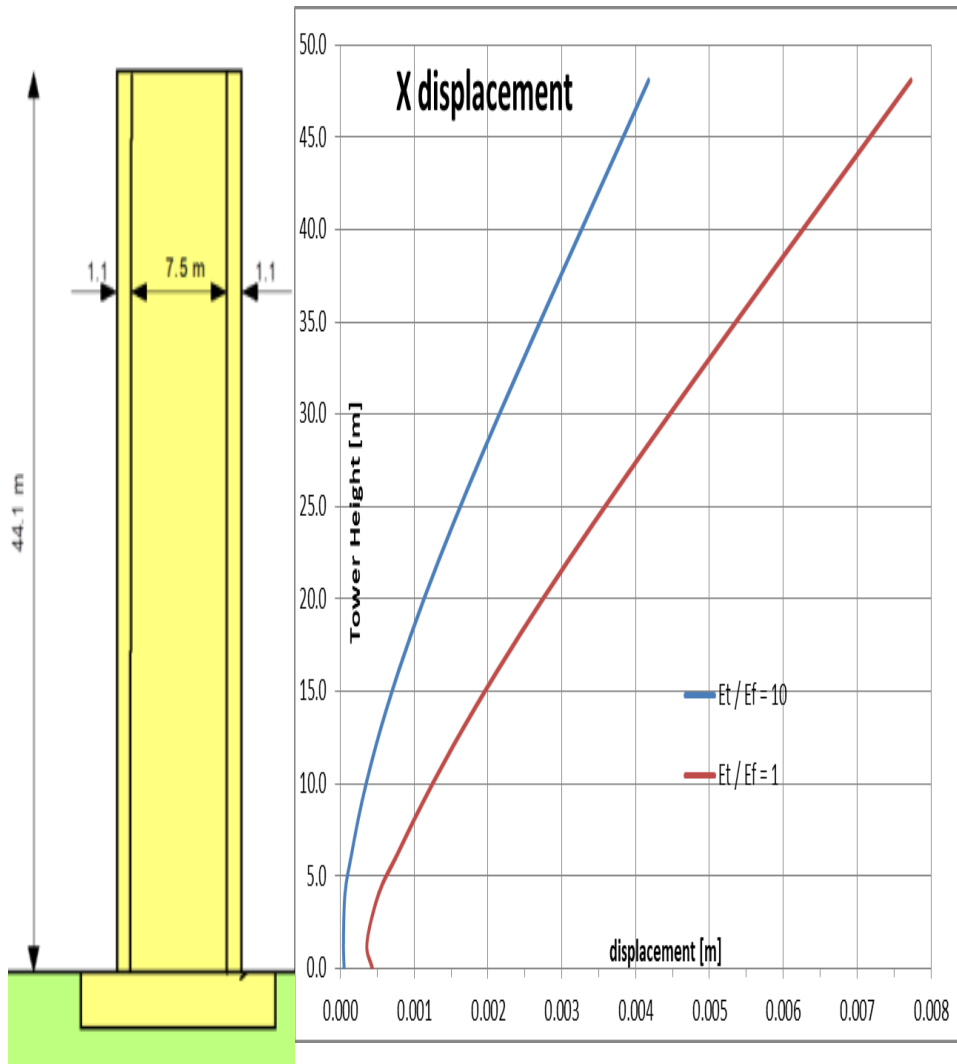


ნახ.4.2.8 ექსტრემალურ მნიშვნელობის ვერტიკალური დაბევები.

a. დინამიკური დაბევები ($\sigma_{y,d}$); B - დინამიკური $\sigma_{y,d}$ და ჯამური დაბევები σ_s .



ნახ.4. 2.9 ფუძის დამყოლობის გავლენა კოშკის ფუძეში
ძაბვების განაწილებაზე.



ნახ.4. 2.10 კოშკის ექსტრემალური გადახრები ფუძის დამყოლობის გათვალისწინებით

4.3 კომპურა წყალმიმღების გაანგარიშება სავსე წყალსაცავის დროს წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით

წყალმიმღები კომპის სეისმდეგობაზე გაანგარიშება ჩატარდა სპექტრალურ თეორიის ფარგლებში, იმის გათვალისწინებით, რომ თავისუფალი საკუთარი რხევის ფორმები სითხესა და სიცარიელეში იდენტურია. სეისმური ინერციული დატვირთვა სითხის ზემოქმედების გათვალისწინებით განისაზღვრება ფორმულით [4]:

$$S_i^*(z) = k_c g m(z) \beta (T_i^*) \eta_i^*(z) \quad (4.3.1)$$

სადაც,

- $\eta_i^*(z)$ - ფორმის კოეფიციენტი;

$$\eta_i^*(z) = X_i \|X_i\|^{-2} \int_0^H [m(z) + \mu_0(z)] X_i dz \quad (4.3.2)$$

- $\mu_0(z)$ - სითხის მიერთებული მასაა ნაგებობის მოძრაობის დროს.

უკუმშვადი სითხის შემთხვევაში იგი განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\mu_0(\theta, z) = \frac{4}{\pi} \rho_0 h \cos \theta \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{m v_m} \times \frac{K_1}{K_1'} (-1)^{\frac{m-1}{2}} \cos \frac{m\pi z}{2h} \quad (4.3.3)$$

განხილულ შემთხვევაში r_0/h -ის მცირე მნიშვნელობის დროს $\mu_0(z)$ განაწილების კანონზომიერება ნაგებობის სიმაღლეზე საკმაოდ ახლოა თანაბარ განაწილებასთან. ამდენად, პრაქტიკული გაანგარიშებებისას შესაძლებელია (3) დან მიღებული იქნას $\mu_0(\theta, 0)$ -ის უფრო გამარტივებული მნიშვნელობა.

თუ კი კონსტრუქციის კვეთი სიმაღლეში არ იცვლება ($m(z) = m = \text{const}$), მაშინ $\eta_i^*(z)$ ასევე მნიშვნელოვნად მარტივდება.

საზოგადოდ, ჰიდროდინამიკური (სეისმური) დატვირთვის გასაანგარიშებლად გამოიყენება შემდეგი დაშვებები:

- სითხე არის იდეალური, ერთგვაროვანი და უკუმშვადი.
- ტალღური მოვლენები თავისუფალ ზედაპირზე უმნიშვნელოა და მხედველობაში არ მიიღება. ჰიდროდინამიკური წნევის ცვალებადობას განაპირობებს მხოლოდ მიერთებული მასა.
- წყლის დაკავებული მოცულობის გეომეტრიული კონფიგურაციის ცვლილება რხევების დროს მხედველობაში არ მიიღება.

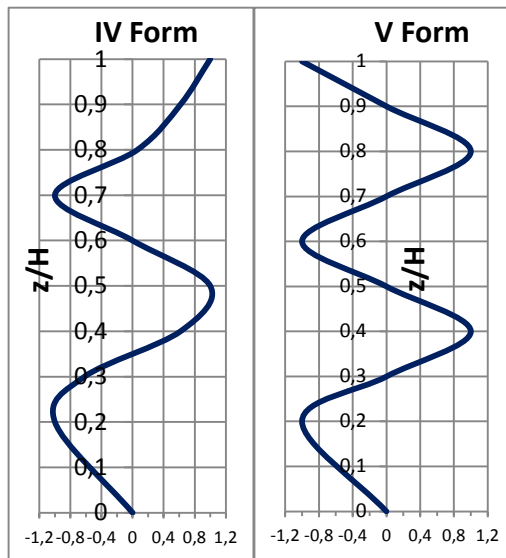
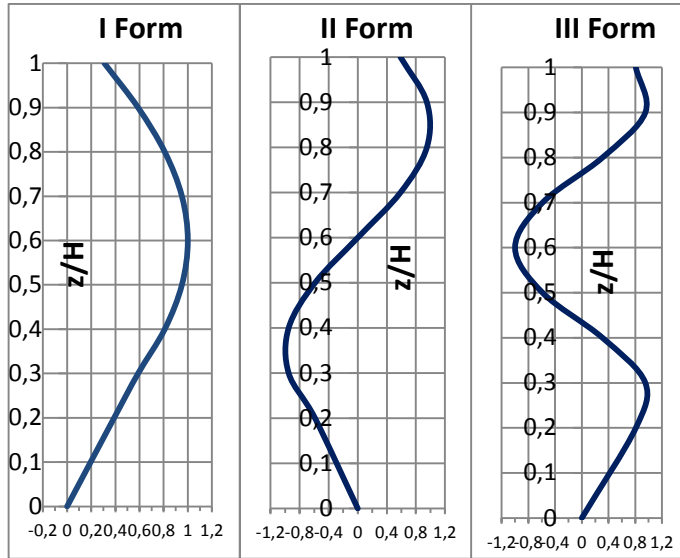
საბოლოოდ, რხევის ფორმების განსაზღვრის შემდეგ სეისმური დატვირთვებით გამოწვეული ძალებისა და ძაბვების გაანგარიშება სწარმოებს ფორმულით [2]:

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2} \quad (4.3.4)$$

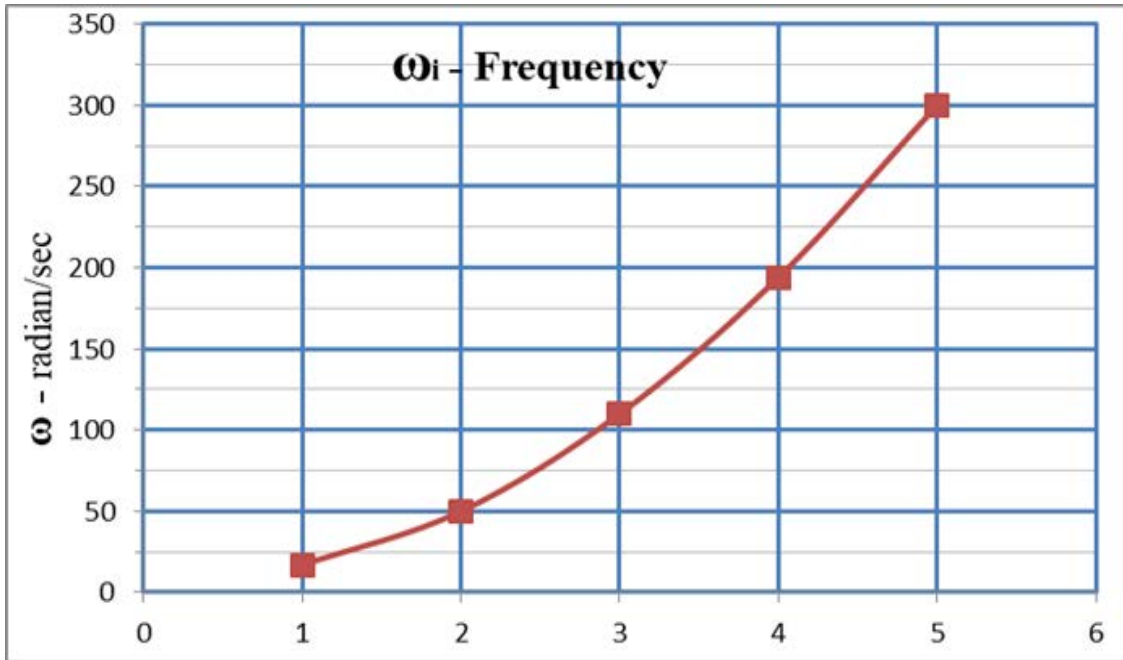
სადაც, N_i - ძალებია განსახილველ კვეთში i -ური ფორმის რხევის შესაბამისად; N – რხევის ფორმების გათვალისწინებული რაოდენობა.

სეისმური დატვირთვებით გამოწვეული ძაბვების გაანგარიშება კოშკის კონსტრუქციაში მოხერხებულია სასრულ-ელემენტული მოდელის გამოყენებით.

სპექტრალური თეორიის ფარგლებში (ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში) ჩატარებული იქნა თეძამის ჰიდროკვანძის კოშკურა წყალმიმდების ცილინდრული კონსტრუქციის (სიმაღლით 44,1 მ) სეისმური დაძაბული მდგომარეობის გაანგარიშება სავსე წყალსაცავის არსებობისას, წყლის დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით. გაანგარიშების შედეგად მიღებული იქნა რხევის 5 ფორმა შესაბამისი პარამეტრებით (ნახ.4.3.1, 4.3.2, (ცხრ.4.3.1).



ნახ. 4.3.1. კომპურა წყალმიმღების რხევის 5 ფორმა.



ნახ. 4.3.2. კომპურა წყალმიმღების რხევის 5 ფორმის შესაბამისი სიხშირეები.

ცხრ.4.3.1

z/H	რხევის ფორმები				
	I	II	III	IV	V
1	0.309	0.588	0.809	1	-1
0.9	0.588	0.951	0.951	0.618	0.002
0.8	0.809	0.951	0.309	0.0618	1
0.7	0.951	0.588	-0.588	-1	-0.001
0.6	1	0	-1	0	-1
0.5	0.951	-0.588	-0.588	1	-0.001
0.4	0.809	-0.951	0.309	0.618	1
0.3	0.588	-0.951	0.951	-0.618	0.002
0.2	0.39	-0.588	0.809	-1	-1
0	0	0	0	0	0

სეისმური ზემოქმედებისას, სავსე წყალსაცავის არსებობისას, კომპურ წყალმიმღებს, მისი მასით განვითარებული ინერციული დატვირთვების გარდა, ემატება წყლის ინერციული დატვირთვებიც, რომლებიც ზემოთ იქნა განსაზღვრული.

4.3.1 კონსოლური ძაბვები კომპურა წყალმიმღების კედელში სავსე წყალსაცავის არსებობისას

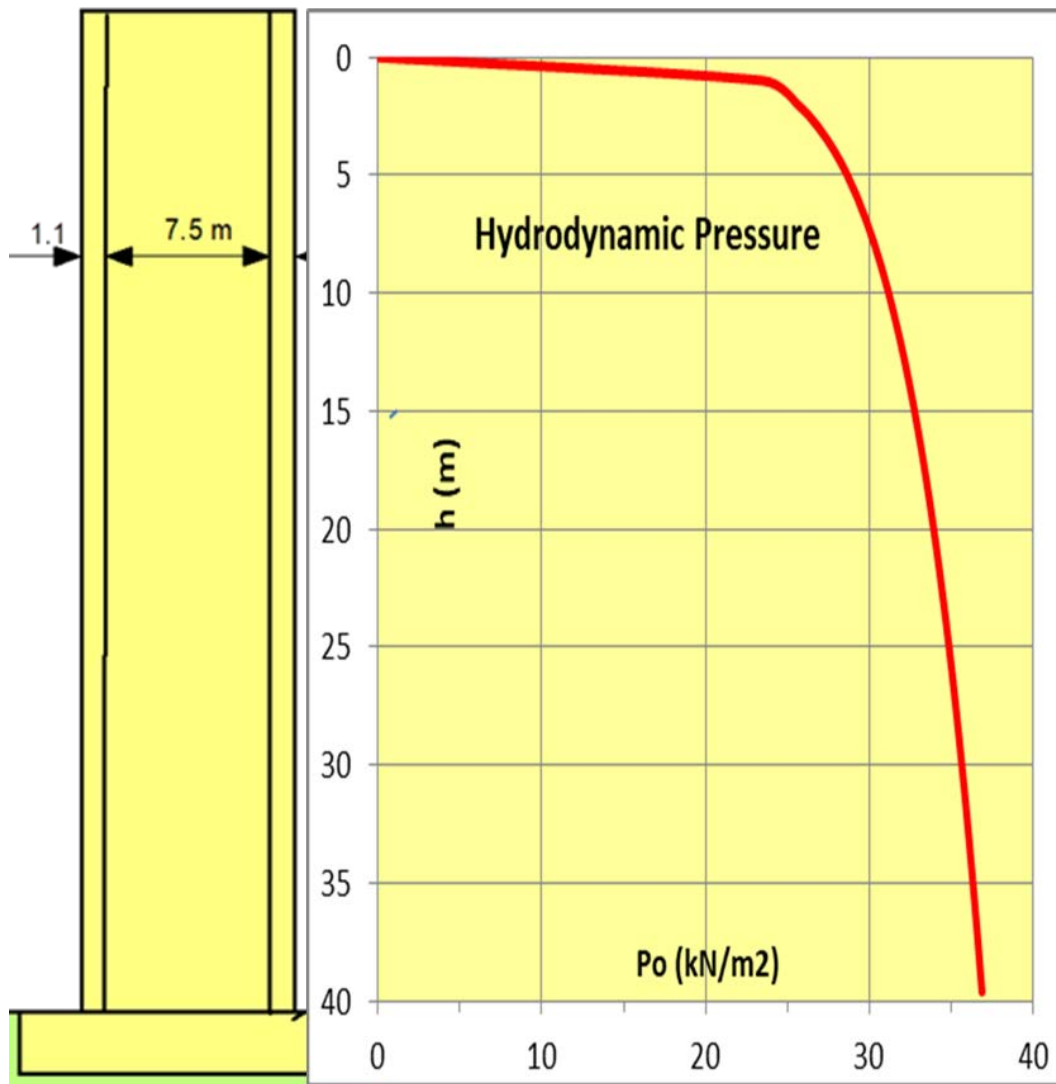
ქვემოთ მოცემულია თეძამის ჰიდროკვანძის კომპურა წყალმიმღების გაანგარიშების რიცხვითი შედეგები ჩატარებული სავსე წყალსაცავის არსებობისას, ექვივალენტური მართკუთხა კვეთის პრიზმული ძელის გამოყენებით.

გაანგარიშების შედეგად მიღებული იქნა კომპურა წყალმიმღების კორპუსზე პიკური აჩქარების დროს განვითარებული პარამეტრები (ნახ. 4.3.1.1 , 4.3.1.2, 4.3.1.3, 4.3.1.4) მათ შორის :

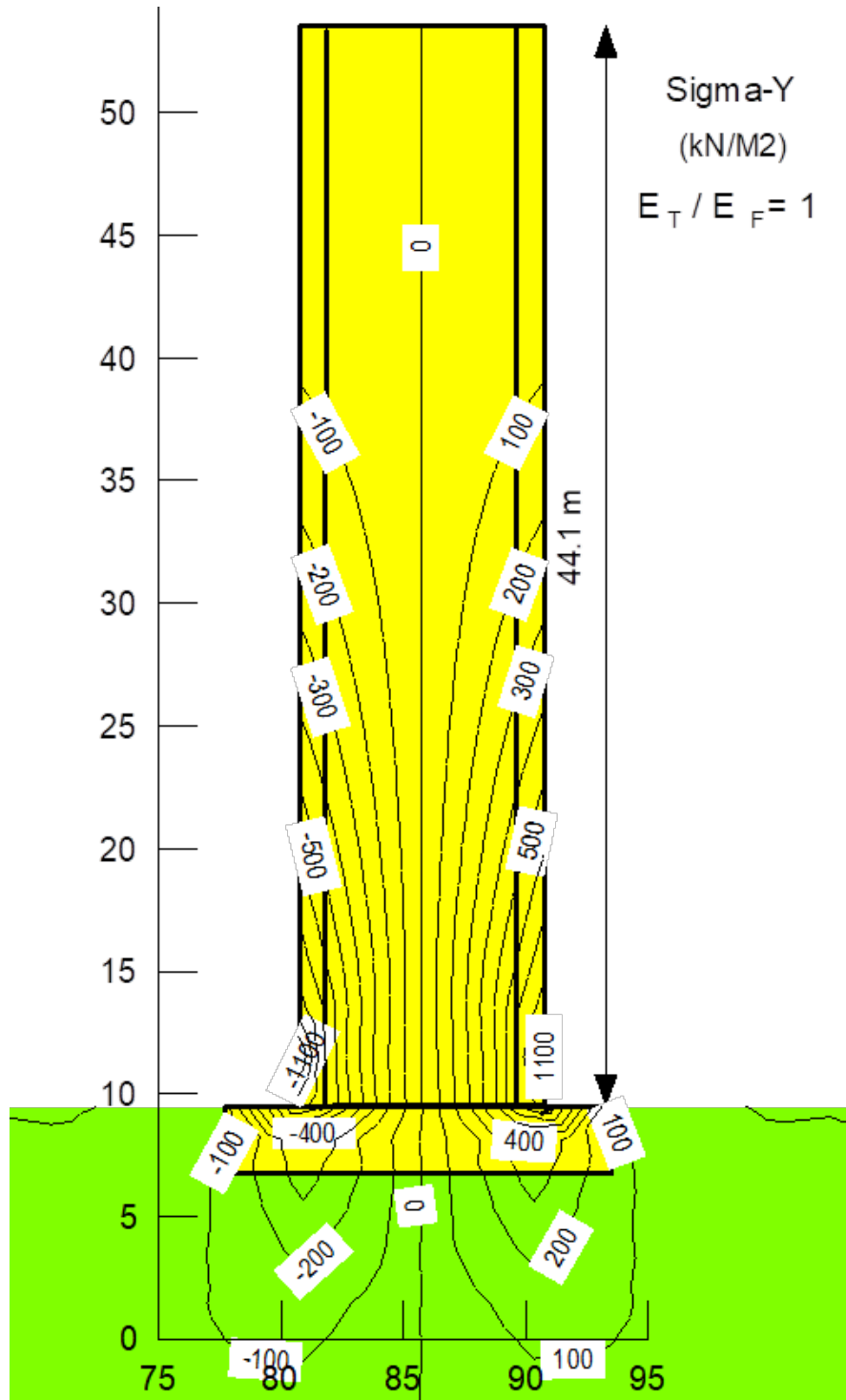
- წყალსაცავიდან განვითარებული ჰიდროდინამიკური დატვირთების ეპიურა (ნახ.4.3.1.1);
- კედლებში ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები (σ_y);
- წრიულ კვეთებში ექსტრემალური მნიშვნელობის მთავარი ძაბვები (σ_{max} , σ_{min}).

წყალსაცავიდან განვითარებული ჰიდროდინამიკური დატვირთვის გავლენით ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების ნაზრდის მაქსიმალურმა მნიშვნელობამ ფუძის კვეთთან მისი დამყოლობის გათვალისწინებით შეადგინა (ნახ. 4.3.1.2 , 4.3.1.3):

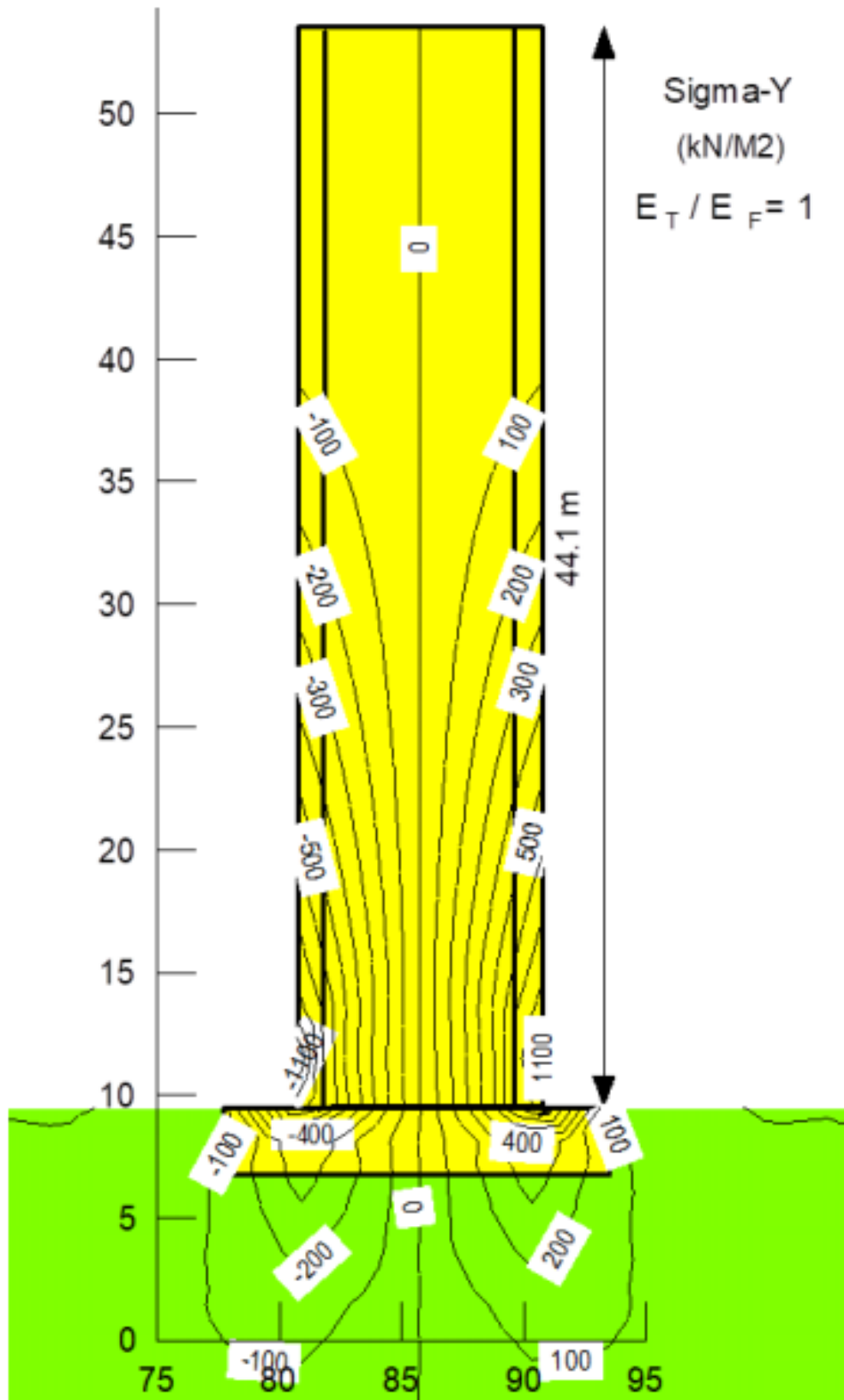
- 46%, დამყოლი ფუძის დროს ($E_T/E_F = 10$);
- 31%, ხისტი ფუძის დროს ($E_T/E_F = 1$).



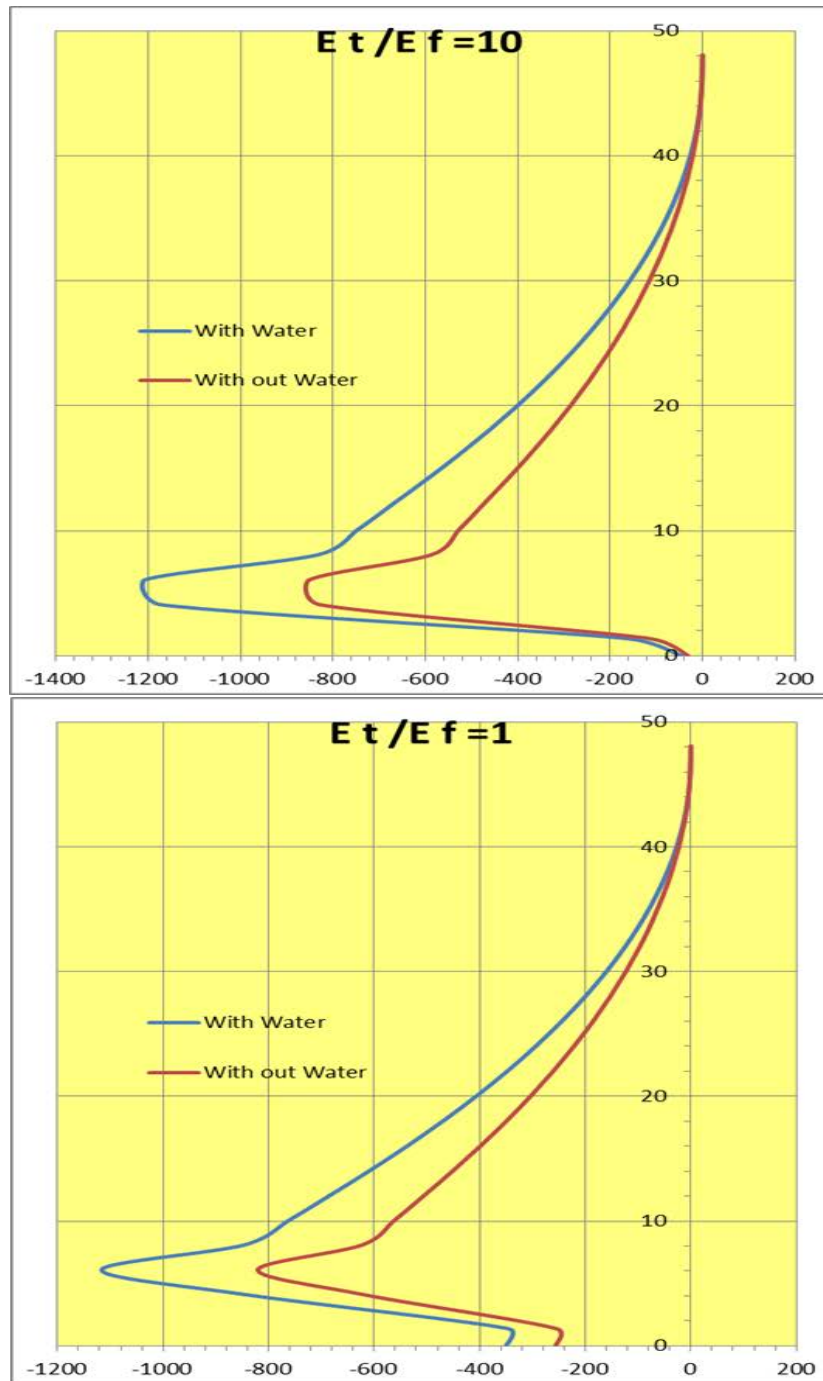
ნახ. 4.3.1.1 ჰიდროდინამიკური დატვირთვა წყალმიმღებ კოშხე პიკური აჩქარების დროს (T=4 წმ).



ნახ. 4.3.1.2 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური
ძაბვები σ_y კომპურა წყალმიმღების კედელში დამყოლი ფუძის დროს.



ნახ. 4.3.1.3 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები σ_y კომპურა წყალმიმღების კედელში ხისტი ფუძის დროს.



ნახ. 4.3.1.4 ექსტრემალური მნიშვნელობის ვერტიკალური ნორმალური დაბევები σ_y კოშკურა წყალმიმღების კედელში:

- ცარიელი წყალსაცავის დროს (წითელი ფერი);
- ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გათვალისწინებით (ლურჯი ფერი).

4.3.2 რგოლური ძაბვები კომპურა წყალმიმღების კედელში

განხილული იქნა კომპურა წყალმიმღების ფუძესთან ერთეულოვანი სისქის რგოლური კვეთის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა.

კომპის კონსტრუქციაზე ერთეულოვანი სისქის რგოლზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვები განსაზღვრული იქნა სქემის მიხედვით (ნახ. 4.3.2.1). სადაც, T_1 , T_2 , H_D - პიკური მნიშვნელობის ძალებია, კერძოდ:

- T_1 , T_2 – ზედა და ქვედა კვეთებზე მოქმედი ჯამური მხები ძაბვებია;
- H_D - ჰიდროდინამიკური დატვირთვებია რგოლის ნახევარ ზედაპირზე.

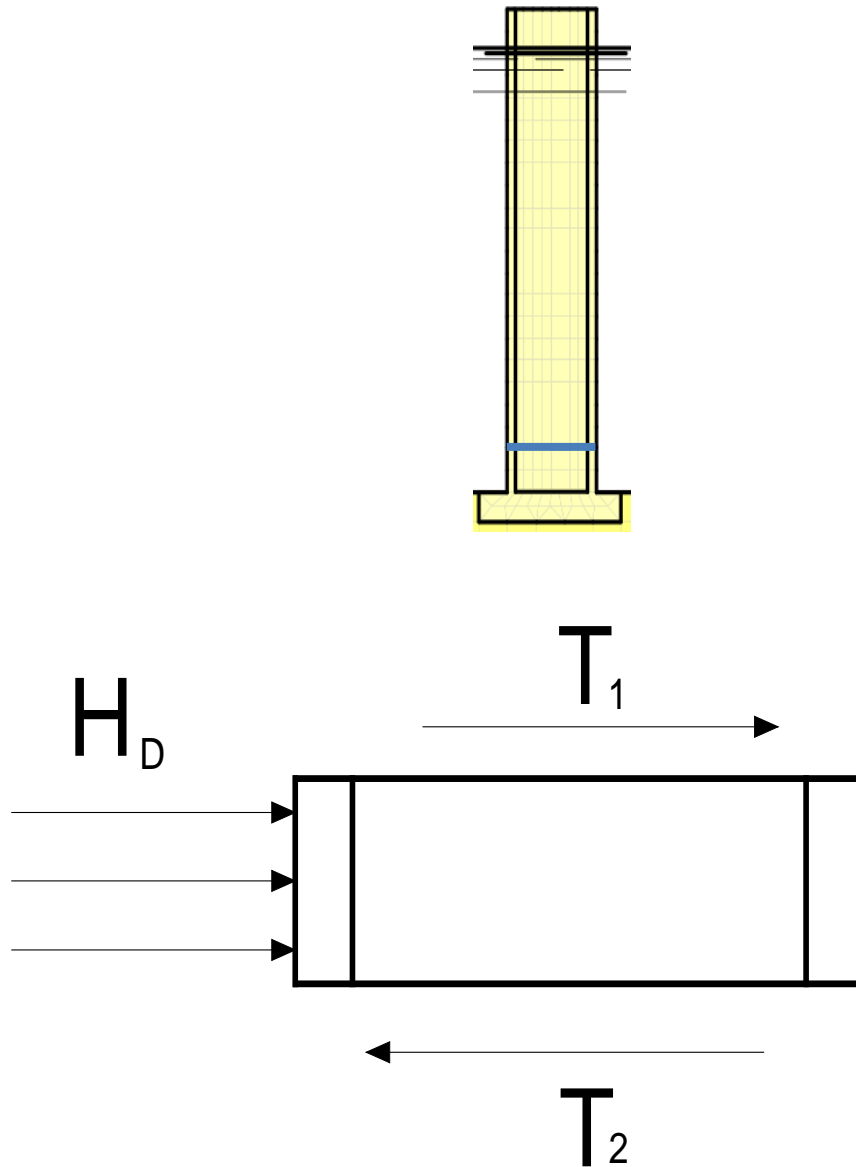
წყალმიმღების ერთეულოვანი სისქის რგოლის 2 განზომილებიანი სასრულ - ელემენტულ მოდელზე მოქმედი დატვირთვები წარმოდგენილი იქნა შემდეგი სახით:

- ჰიდროდინამიკური წნევა - H_D და,
- მისი გამაწონასწორებელი მხები ძაბვები $\Delta T = T_2 - T_1$, წარმოდგენილი მოცულობითი ძალების სახით (ნახ. 4.3.2.2).

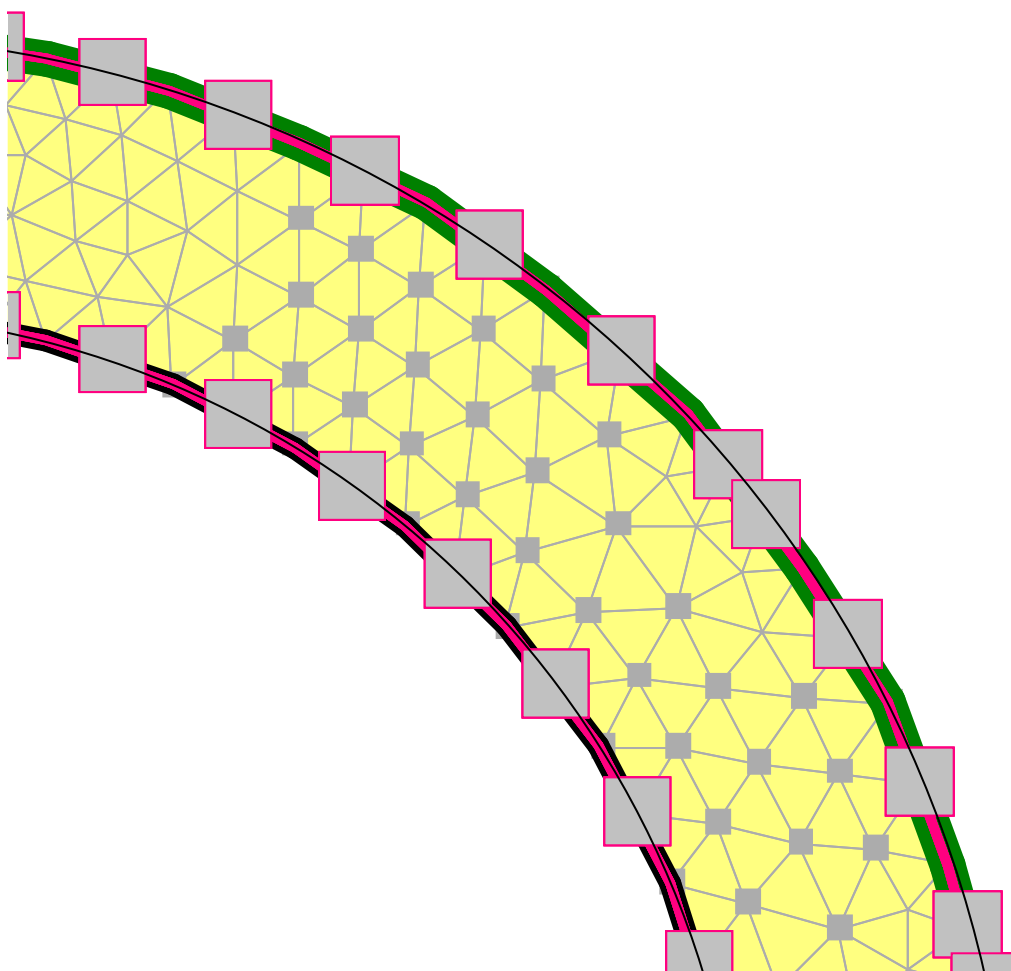
განგარიშების შედეგად მიღებული იქნა კომპურა წყალმიმღების რგოლური კვეთის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის პარამეტრები (ნახ. 4.3.2.3 - 4.3.2.10) , მათ შორის:

- მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები მხოლოდ ჰიდროსტატიკური, ასევე ჰიდროდინამიკური და ჯამური (ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური) წნევების ზემოქმედებისას (ნახ. 4.3.2.3 - 4.3.2.5);
- რგოლის ჰორიზონტალურ და კლიტის კვეთებში მთავარი ძაბვების განაწილება ჰიდროდინამიკური და, ასევე ჯამური წნევების ზემოქმედებისას (ნახ. 4.3.2.6 - 4.3.2.10);

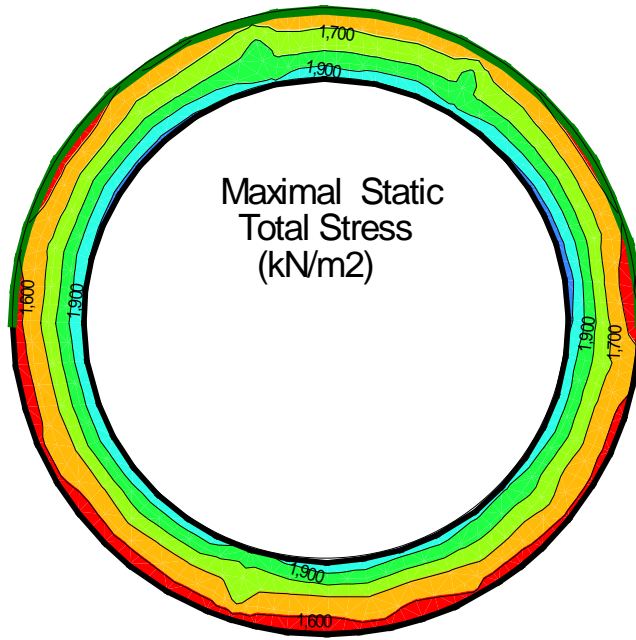
- დეფორმირებული მდგომარეობა მხოლოდ ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას (ნახ. 4.3.2.11, 4.3.2.12).



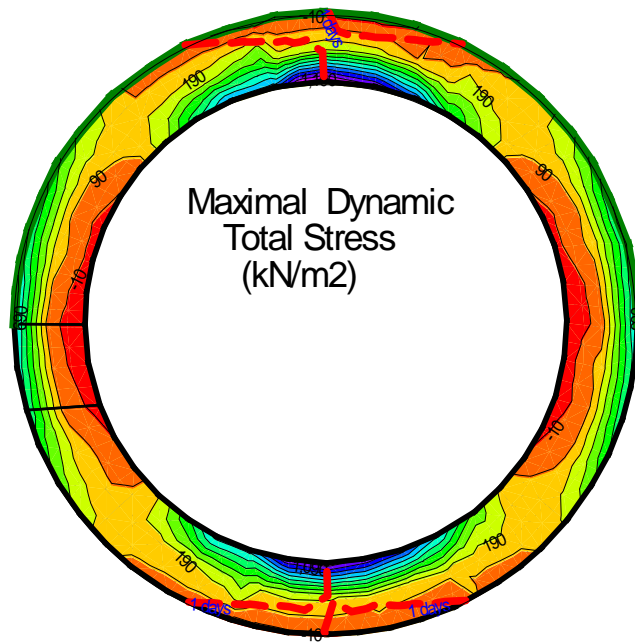
ნახ. 4.3.2.1 კომპურა წყალმიმღების კორპუსიდან ამოღებული ერთეულოვანი სისქის რგოლის დატვირთვის საანგარიშო სქემა



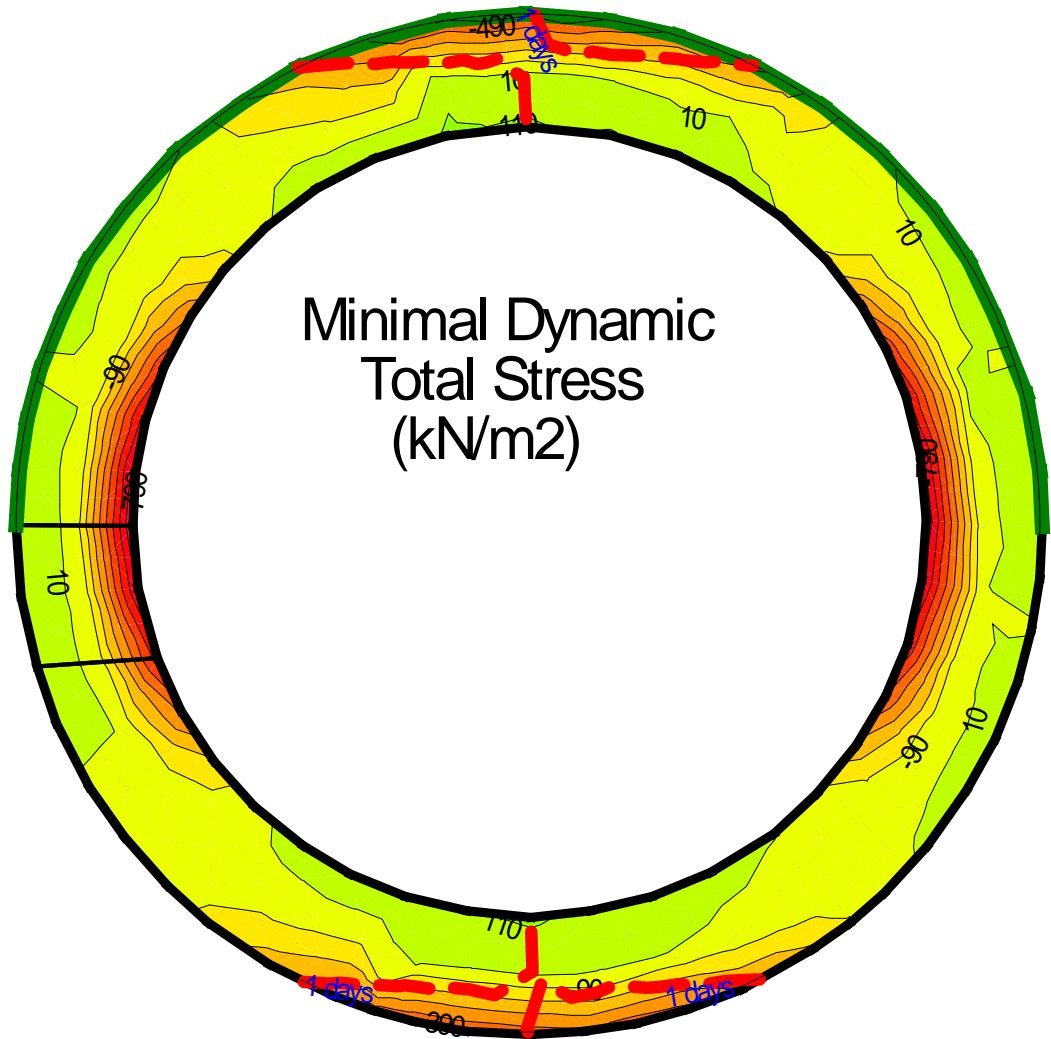
ნახ. 4.3.2.2 კომპლურა წყალმიმღების კორპუსიდან ამოღებული ერთეულოვანი
სისქის რგოლის საანგარიშო სქემა



ნახ. 4.3.2.3 მაქსიმალური მთავარი დაბევი რგოლურ კონსტრუქციაში
ჰიდროსტატიკური წნევის ზემოქმედებისას.

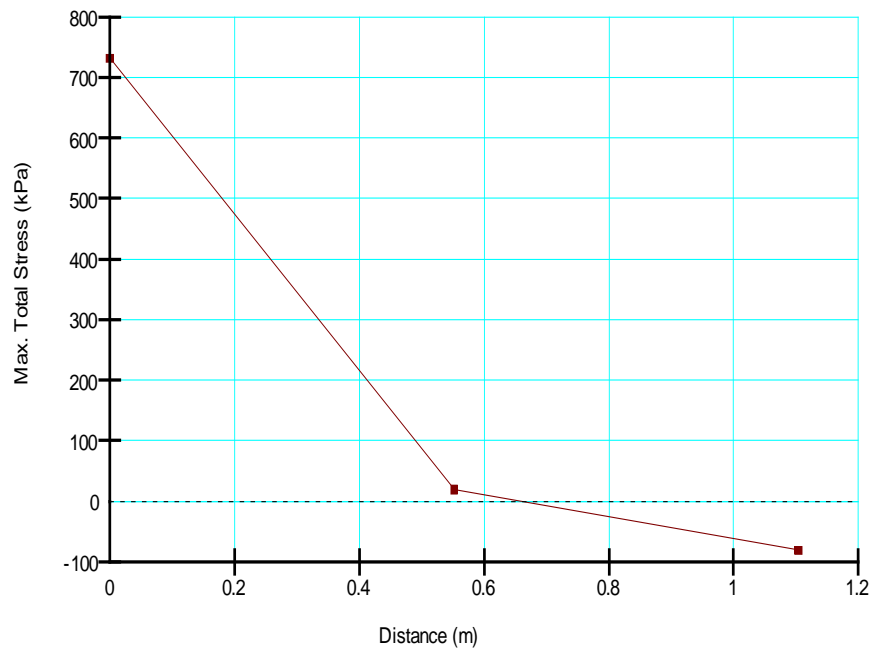


ნახ. 4.3.2.4 მაქსიმალური მთავარი დაბევი რგოლურ კონსტრუქციაში
ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას.

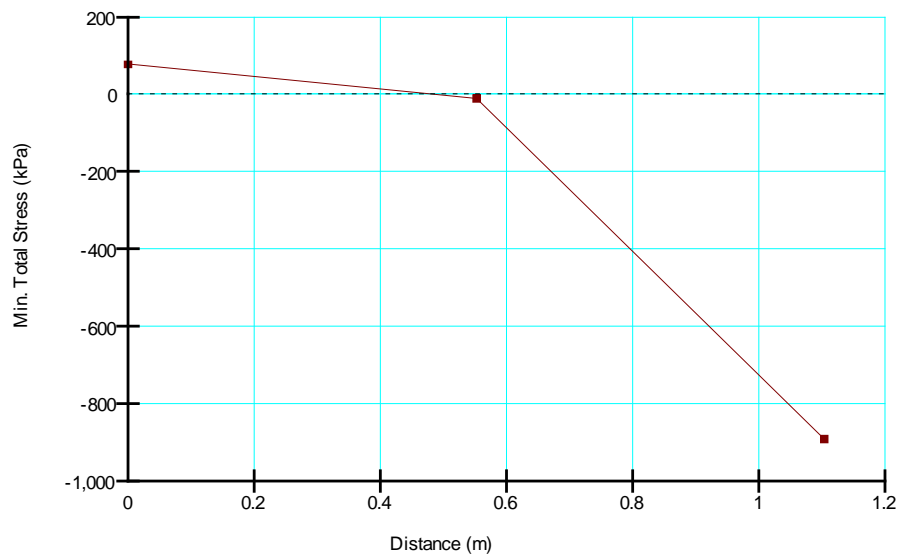


ნახ. 4.3.2.5 მინიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში
ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას.

Maximal Danamic Total Stress (Horizontal Section)

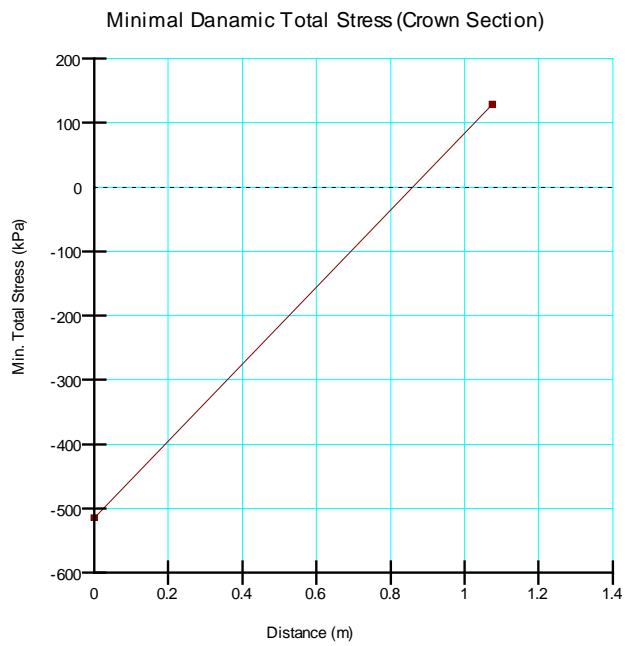
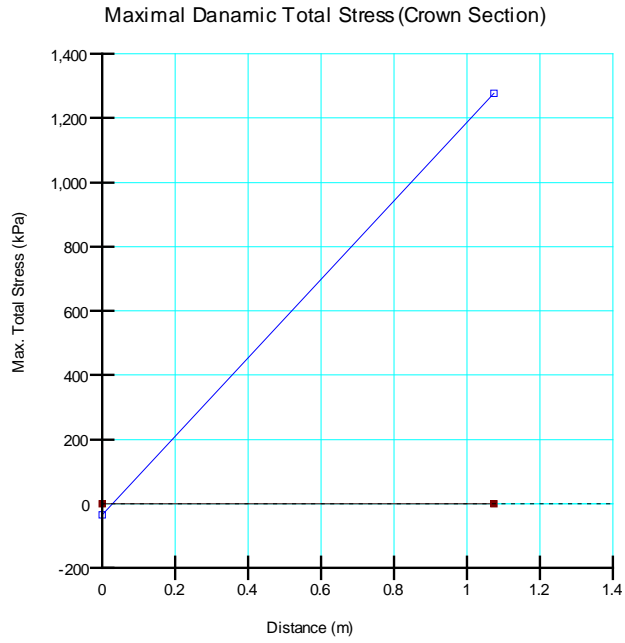


Minimal Danamic Total Stress (Horizontal Section)

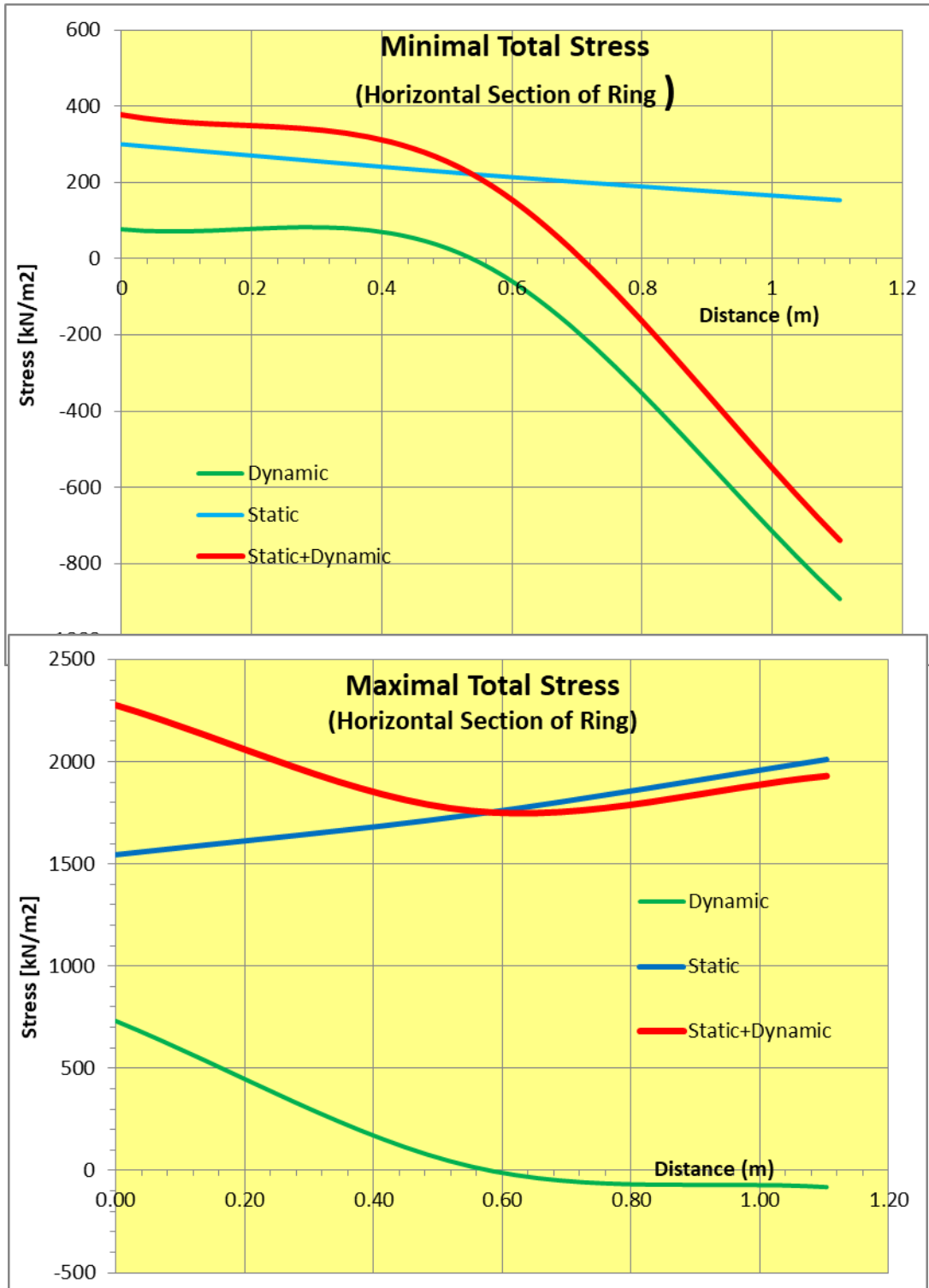


ნახ.

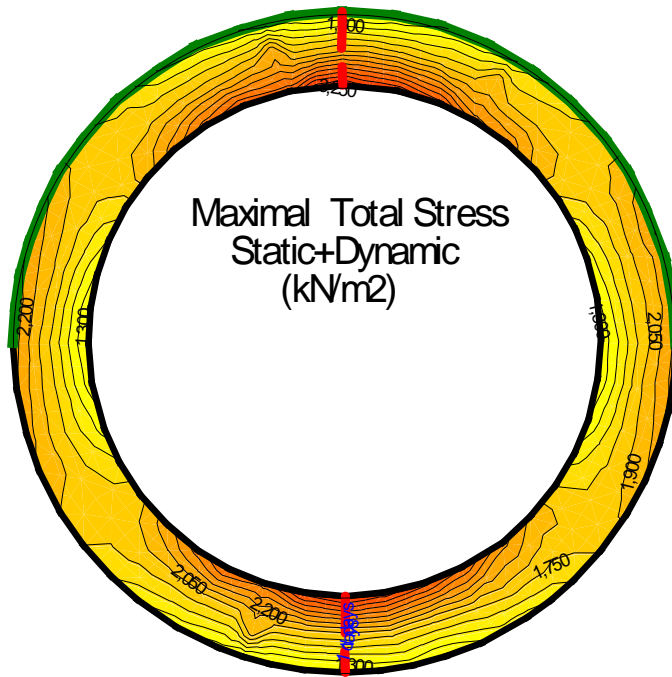
**4.3.2.6 მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები
რგოლურ კონსტრუქციის ჰორიზონტალურ კვეთში
ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას.**



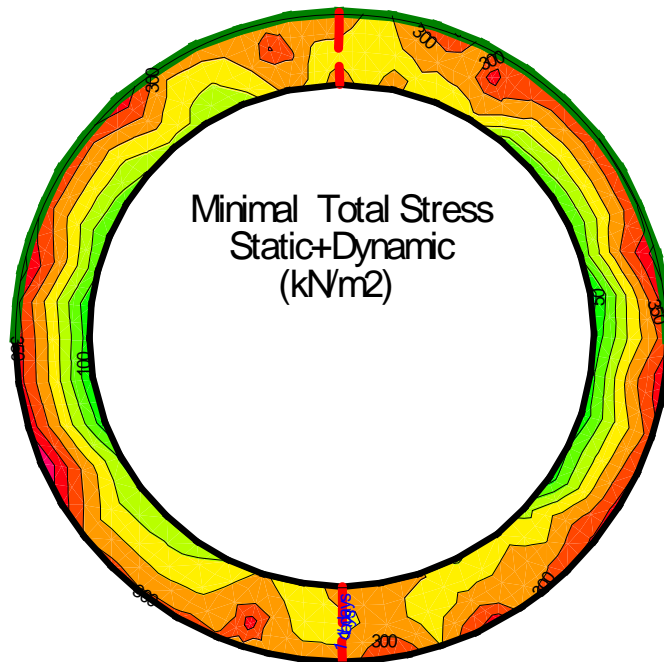
4.3.2.6 მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები
 რგოლურ კონსტრუქციის ვერტიკალურ კვეთში
 ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებისას.



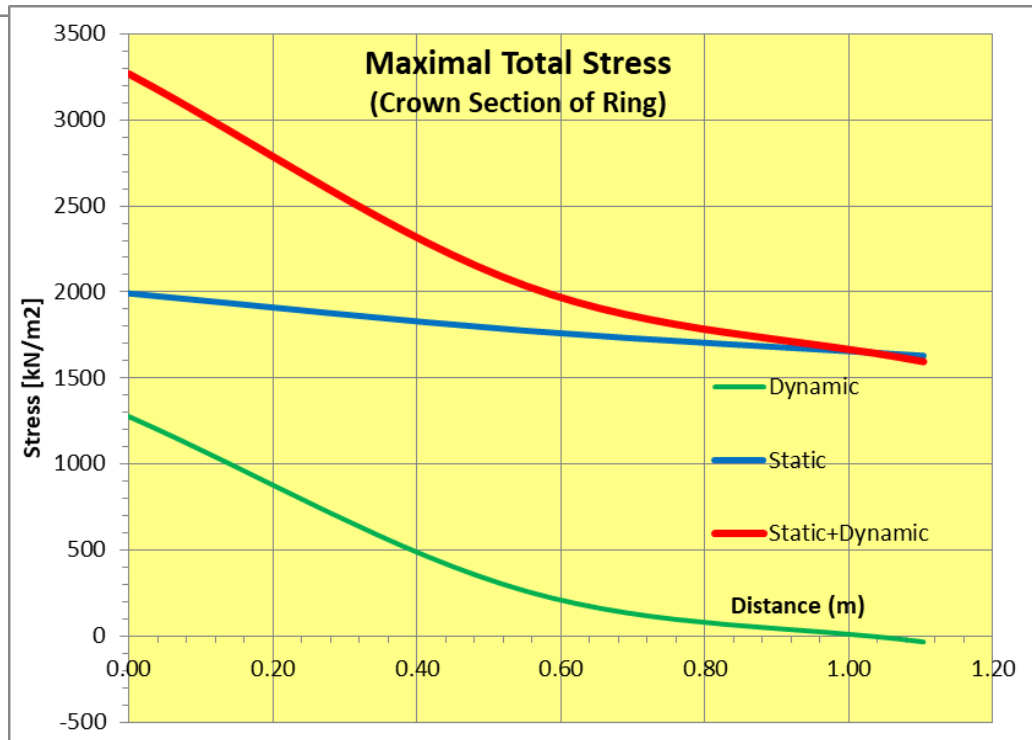
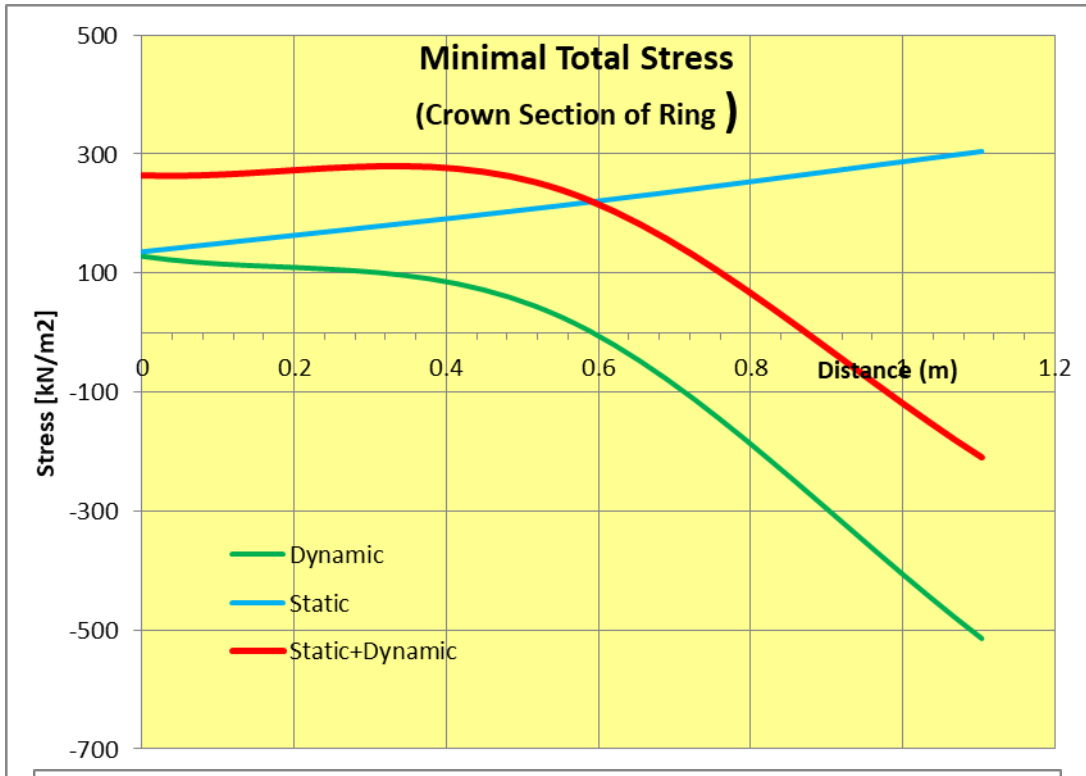
ნახ. 4.3.2.7 მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვების განაწილება რგოლურ კონსტრუქციის ჰორიზონტალურ კვეთში ჰიდროსტატიკური, ჰიდროდინამიკური წნევებისა და მათი ჯამური ზემოქმედებისას.



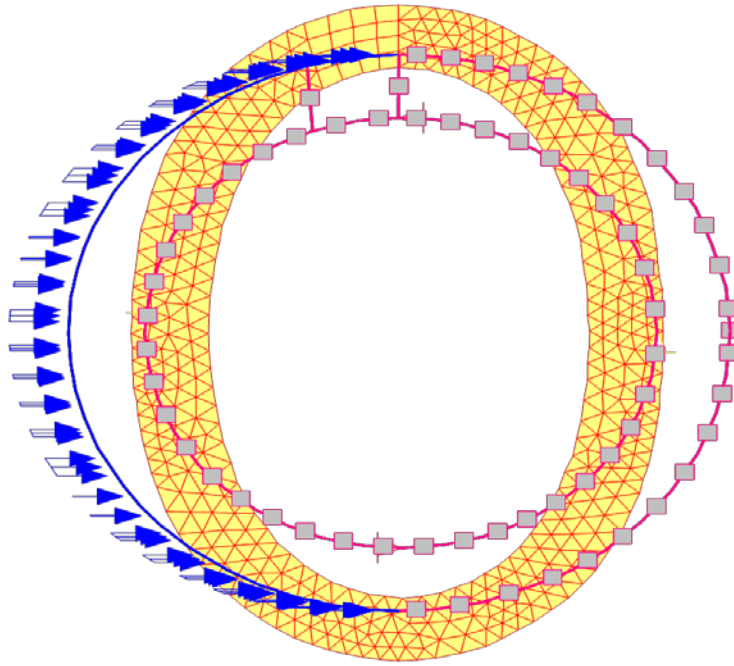
ნახ. 4.3.2.8 მაქსიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების ჯამური ზემოქმედებისას.



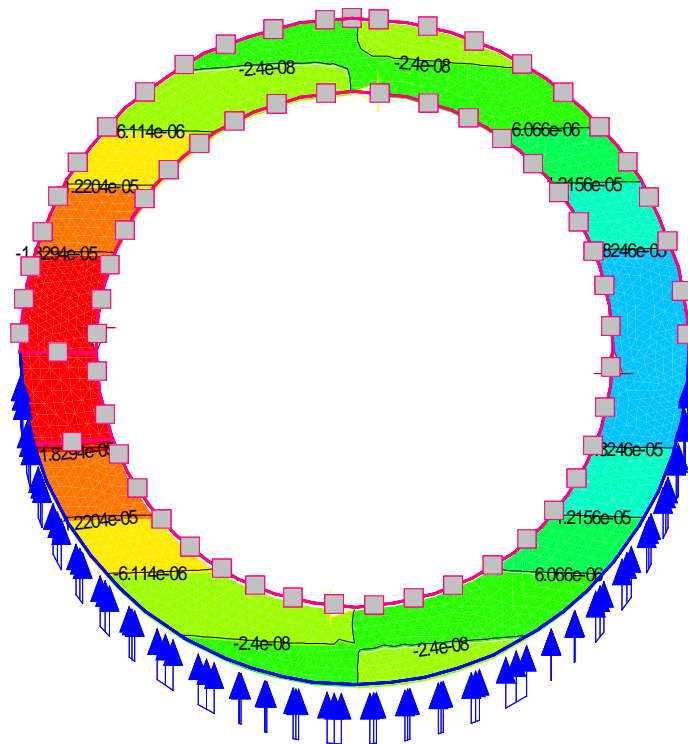
ნახ. 4.3.2.9 მინიმალური მთავარი ძაბვები რგოლურ კონსტრუქციაში ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევების ჯამური ზემოქმედებისას.



ნახ. 4.3.2.10 მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვების განაწილება რგოლურ კონსტრუქციის ვერტიკალურ კვეთში ჰიდროსტატიკური, ჰიდროდინამიკური წნევებისა და მათი ჯამური ზემოქმედებისას.



ნახ. 4.3.2.11 კომპურა წყალმიმღების დეფორმირებული წრიული კვეთი ჰიდროდინამიკური დატვირთვების ზემოქმედებით.



ნახ. 4.3.2.12 კომპურა წყალმიმღების დეფორმირებული წრიული კვეთის გადაადგილებები ჰიდროდინამიკური დატვირთვების ზემოქმედებისას.

4.4 წყალმიმღები კოშკის რკინა-ბეტონის ცილინდრული კვეთის სიმტკიცის შეფასება

კოშკის ფარდობითი სისქის (სისქისა და რადიუსის ფარდობის - t/R) სხვადასხვა მნიშვნელობების ($t/R = 0.16 \div 0.3$) გაანალიზების საფუძველზე ჯამური ძაბვების მიხედვით (საკუთარი წონისა და სეისმური ზემოქმედების დროს) მიზანშეწონილია $t/R = 0.23$. საბოლოოდ, კოშკის ძირის კვეთში ჯამური ვერტიკალური ძაბვების მიხედვით გამჭიმავმა ძაბვებმა მიაღწია 760 კნ/მ^2 (ნახ. 4.Б) ხოლო მღუნავმა მომენტმა 50979 კნ.მ .

რკინა ბეტონის ცილინდრული კვეთის სიმტკიცის პირობა ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით შეფასებული იქნა პირობით [43]:

$$K_n n_c M \leq m_h m_b R_p W_T$$

სადაც

- m_h - კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია კვეთის სიმაღლეზე;
- W_T - წინაღობის მომენტი კვეთის გაჭიმული წახნაგისათვის ბეტონის არადრეკადი თვისების გათვალისწინებით;
- n_c - დატვირთვების შეთანწყობის კოეფიციენტი;
- K_n - საიმედობის კოეფიციენტი;
- M - მღუნავი მომენტი;
- m_b - ბეტონის მუშაობის კოეფიციენტი;
- R_p - ბეტონის საანგარიშო წინააღმდეგობაა ღერძულ გაჭიმვაზე ზღვრული მდგომარეობისათვის.

კოშკის რკინა-ბეტონის კედლის ფარდობითი სისქისთვის ($t/R = 0.23$) კვეთის სიმტკიცის პირობა მაღალი მარაგებით კმაყოფილდება $K_n \approx 3$ (წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გაუთვალისწინებლად).

ცხადია, სიმტკიცის შეფასებისათვის საჭიროა ასევე გათვალისწინებული იქნას წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება, რაც წარმოდგენილ ნაშრომში არ განიხილება.

მიღებულ იქნა ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განაწილება ცილინდრული კონსტრუქციის კვეთებში. ექსტრემალური მნიშვნელობის ძაბვები ფუძის კვეთში აღწევს (ნახ. 4.2.6, 4.2.7, 4.3.1.2, 4.3.1.3):

- 1 - ცარიელი წყალსაცავის დროს, კონსტრუქციის საკუთარი წონის გარეშე $\sigma_y = \pm 735$ კნ/მ², რაც სტატიკური ძაბვების 22.5%-ს შეადგენს;
- 2 - სავსე წყალსაცავის დროს - კონსტრუქციის საკუთარი წონის გარეშე $\sigma_y = \pm 1590$ კნ/მ²;
- 3 - სავსე წყალსაცავის დროს - მღუნავი მომენტის დადებითი მნიშვნელობისა და კონსტრუქციის საკუთარი წონის გათვალისწინებით $\sigma_y = 2990$ კნ/მ²;
- 4 სავსე წყალსაცავის დროს - მღუნავი მომენტის უარყოფითი მნიშვნელობისა და კონსტრუქციის საკუთარი წონის გათვალისწინებით $\sigma_y = -215$ კნ/მ².

ამდენად, ექსტრემალური ძაბვების მნიშვნელობა ცილინდრული კონსტრუქციის ფუძის კვეთში (მღუნავი მომენტის ნიშნის გათვალისწინებით) აღწევს 2990 კნ/მ² და -215 კნ/მ².

დასკვნები

❖ ტალღური თეორიის ფარგლებში დამუშავებულ იქნა ალგორითმი და საანგარიშო პროგრამა კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებისათვის ჰიდროდინამიკური წნევის განსაზღვრისათვის სეისმური ზემოქმედების დროს (დრეკადი რხევების მიხედვით) წყალმიმღებების კონფიგურაციის (r_0/H), ასევე მათ შორის (L_1/L) და კომპსა კაშხალს შორის მანძილების (L/H) გათვალისწინებით. აღნიშნულის საფუძველზე შესაძლებელია გამოთვლილ იქნას ნაგებობათა შორის დაშორების სახიფათო ზონა;

❖ ნამახვანის შეწყვილებული ცილინდრული ტიპის წყალმიმღები ნაგებობებისათვის მიღებული იქნა წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვები, რაც ითვალისწინებს ასევე მათი კაშხლიდან დაშორების გავლენას. კერძოდ, მიღებულ იქნა, რომ:

- r_0 / H ფარდობის შემცირებისას, წყალმიმღებების სიმაღლეზე წნევის ცვლილების კანონზომიერება მით უფრო მნიშვნელოვნად იცვლება და შესაბამისად შორდება პარაბოლური განაწილების ხასიათს. ჰიდროდინამიკური წნევა კომპის სიმაღლეზე პრაქტიკულად ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას, ხოლო წყლის თავისუფალ ზედაპირთან იწყებს შემცირებას. დასტურდება ლოგიკური კანონზომიერება. კერძოდ, კაშხალსა და წყალმიმღებ ნაგებობებს შორის მანძილის გაზრდით წნევის გავლენა კომპებზე შესაბამისად მცირდება;

- წყალმიმღებ კომპებს შორის მანძილის შემცირება, მათ ურთიერთ გავლენას უფრო ზრდის, ხოლო მანძილის გაზრდა პირიქით, გავლენას ამცირებს და გარკვეული მანძილით დაშორების შემთხვევაში წნევის ეპიურა ერთი წყალმიმღებისა და კაშხლის ურთიერთქმედების მსგავსი ხდება. ამდენად, კომპებს შორის გარკვეული კრიტიკული მანძილის არსებობისას მათი ურთიერთგავლენა ქრება.

❖ კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობათა სეისმომედეგობაზე გაანგარიშებისათვის ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სპექტრალური თეორიის საფუძველზე, სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, დამუშავდა კვლევის მეთოდიკა წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით განვითარებული დატვირთვების გათვალისწინებით. წყლის ინერციული ზემოქმედების გაანგარიშება ემყარება წარმოდგენილ ნაშრომში დამუშავებულ მეთოდიკას.

❖ კომპურა ტიპის წყალმიმღების სივრცითი კონსტრუქციის დინამიკური გაანგარიშების გამარტივებული მოდელი ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით გულისხმობს წრიული ან მართკუთხა კვეთის, სიმაღლეში ცვლადი გეომეტრული პარამეტრების მქონე კონსტრუქციის მოდელირებას დაყვანილი პარამეტრების მქონე პრიზმული ძელის გამოყენებით. აღნიშნული მოდელი საშუალებას იძლევა შეირჩეს კომპის კონსტრუქციის საპროექტო პარამეტრები, მათ შორის რკ.ბეტონის კედლის ფარდობითი სისქე.

❖ ცარიელი წყალსაცავის არსებობისას ორ და სამ განზომილებიანი ამოცანების ფარგლებში ჩატარებულმა რიცხვითი ამონახსნების ანალიზმა აჩვენა შედეგების კარგი თანხვედნა. ყოველივე მყარ საფუძველს ქმნის რათა ხსენებული ორ განზომილებიანი მოდელი გამოყენებული იქნას ასევე, სავსე წყალსაცავის დროს განვითარებული წყლის დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

❖ რიცხვითი გაანგარიშებების საფუძველზე მიღებული იქნა:

➤ თეძამის ჰიდროკვანძის წყალმიმღები ნაგებობის სეისმური დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და სიმტკიცის მარაგები წყლის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

➤ წყალმიმღები კომპის რკ.ბეტონის კედლის ფარდობითი სისქის (t/r) ოპტიმალური მნიშვნელობა წყლის დინამიკური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Кульмач П.П. Гидродинамика гидротехнических сооружений, Изд. Академии наук СССР, Москва 1963. 190 с.
2. Кульмач П.П. Гидродинамическое воздействие жидкости на гибкие стенки при движении основания. труды координационных совещаний по гидротехнике, 1965, вып. 28, с. 176 – 187.
3. Кульмач П.П. Сейсмостойкость портовых гидротехнических сооружений. М. 1970. 308.
4. Шульман С. Г. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. Энергия Москва 1976. 336с.
5. Шейнин И.С. Колебания конструкций гидросооружений в жидкости (Справочное пособие по динамике гидросооружений, часть 1). — Л.: Энергия, Ленинград. отд., 1967. — 314 с.
6. Дятловский Л.И., Калининко Д.М. К вопросу о колебаниях плотин при сейсмических воздействиях. // Труды Гидропроекта. Сборник XX. Сейсмические воздействия на гидротехнические сооружения. — М., 1971. С. 109—113.
7. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений (по сравнению с разделом 5 Гидротехнических сооружений СНиП ПЛ7Л81) П 17Л85 / ВНИИГ. — Л.: ИздЛво ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. — 310 с.
8. Westergaard H.W. Water Pressure on Dams during Earthquakes. Proc. Am. Soc. Eng. — 1931. — Vol. 57. — № 9.
9. EM 1110L2L2200. Gravity Dam Design, 1995, US Army Corps of Engineers.
10. Mansouri A., Rezaei R. Considering Dynamic Analysis Results of Interactions between Concrete Dams and Reservoirs in Time Domain and Frequency Domain for Choosing the Optimal Model. European Journal of Scientific Research. 2010. Vol.46 (4). PP. 604-615.

11. Lotfi V. Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams by Decoupled Modal Approach in Time Domain. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004. Paper No. 467.
12. Hiroyuki WATANABE, Zengyan CAO. INVESTIGATION OF THE MODELLING METHOD OF THE DAM FOUNDATION - RESERVOIR SYSTEM. WCCE 2000. pp.503-512.
13. СНиП ИА 12 -2009 Строительство и сейсмических районах. М. 2008. 12 с.
14. C. C. Spyrakos. Soil-structure-water interaction of intake-outlet towers allowed to uplift. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 16 (1997) 151-159 © 1997 Elsevier Science Limited Printed in Great Britain.
15. Patel, P. N. & Spyrakos, C. C. Time domain BEM-FEM seismic analysis including basement lift-off. Engng Struct., 1990, 12(7), 195-207.
16. Patel, P. N. & Spyrakos, C. C. Uplift-sliding response of flexible structures to seismic loads. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1990, 8, 259-70.
17. Xu, C. & Spyrakos, C. C. Seismic analysis of towers including foundation uplift. Engineering Struct., 1996, 18(4), 271-78.
18. Kiger, S., Spyrakos, C. C. & Xu, C. J. Overturning stability of flexible intake/outlet towers. Final Report submitted to Waterways Experiment Station, West Virginia University, Morgantown, WV, 1993. 21
19. Daniell W.E., Taylor C.C. Full- scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower W. E. Daniell. Earthquake Engineering Structural Dynamics Edited By: Masayoshi Nakashima, Michael Fardis, and Michael C. Constantinou. 1994.
20. THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYDRODYNAMIC EFFECTS ON SEISMIC RESPONSE OF BRIDGES, Jun-jie Wang, Wei Lail, Zhi-qiang

- Wang, Xiao Wei, Shide Hu. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 3 .
21. ბუკია ზ. ჰიდროდინამიკური დატვირთვები კომპურა ტიპის წყალმიმღებ ნაგებობებზე მიწისძვრის დროს, ჟურნალი ენერგია #3(11), 1999.
 22. ბუკია ზ. ორი ცილინდრული კომპურა ტიპის წყალმიმღების კაშხალთან ურთიერთქმედება მიწისძვრის დროს, ჟურნალი ენერგია #3(15), 2000.
 23. Аргирис Дж. Современные достижения в методах расчета конструкций с применением матриц. – М.: Стройиздат, 1968. – 210 с.
 24. Баженов В. А., Гуляев А.И., Сахаров А.С., Топор А.Г. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел. – К.: НИИ строительной механики, 1993. – 374 с.
 25. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
 26. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
 27. Дубенец В.Г., Хильчевский В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів. – Чернігів, ЧДТУ.– 2003. – 346 с.
 28. Ершов И.Ф., Шахверди Г.Г. Метод конечных элементов в задачах гидродинамики и гидроупругости. – Л.: Судостроение, 1984. – 235 с.
 29. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541с.
 30. Зенкевич О. Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 308 с.
 31. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.
 32. K.-J. Bathe, Finite Element Procedures. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1996.

33. H. Friemann. Schub und Torsion in geraden Stäben. Werner, Neuwied, 1993.
34. S. Häfner, Grid-based procedures for the mechanical analysis of heterogeneous solids. Ph.D. thesis, Institute of Structural Mechanics, Bauhaus-University Weimar, 2007.
35. S. Koczyk and W. Wesse, FEM-Lösung des Problems der St. Venantschen Torsion mit Hilfe der Wölbfunktion. Technische Mechanik 12, pp. 125-130, 1991.
36. J. Smith, Highly Accurate Beam Torsion Solutions Using the p-Version Finite Element Method, NASA Technical Paper 3608, 1998.
37. W. Wagner, R. Sauer and F. Gruttmann, Tafeln der Torsionskenngrößen von Walzprofilen unter Verwendung von FE Diskretisierungen, Der Stahlbau 68, pp. 102-111, 1999.
38. D. M. Young, Iterative Solution of Large Linear Systems, New York: Academic Press, 1991. 11
39. Mario Paz, Young Hoon Kim. Dynamic Analysis of Structures Using the Finite Element Method. © Springer Nature Switzerland AG 2019.
40. Strength of Materials and Structures J. Case, L. Chilver, C. T.F. ROSS.
41. Ray W. Clough Joseph Penzien. Dynamics of Structures. Computers & Structures, Inc. 1995 University Ave. Berkeley, CA 94704 USA.
42. M. Kalabegishvili, Z. Bukia, M. Sadunishvili, G. Mchedlishvili. Tower intake seismic resistance two dimensional model.
43. Справочник проектировщика бетонных сооружений гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985.

დანართი 1

კომპურა ტიპის წყალმიმღებების კონსტრუქციები



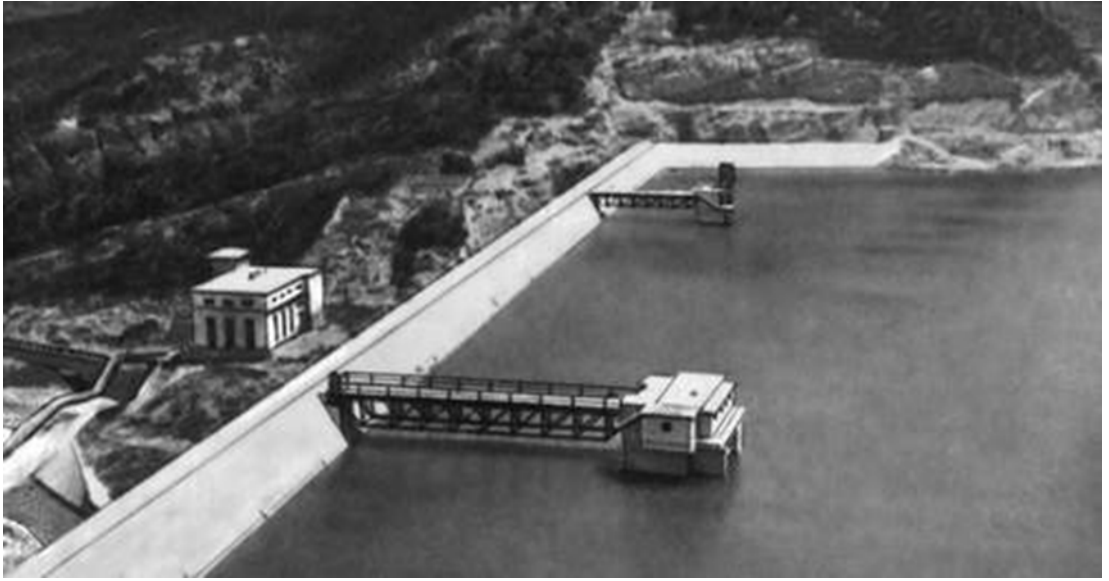
ბავარიის ნაციონალური პარკი. ფრაუნაუს (Frauenau) კომპურა წყალმიმღები



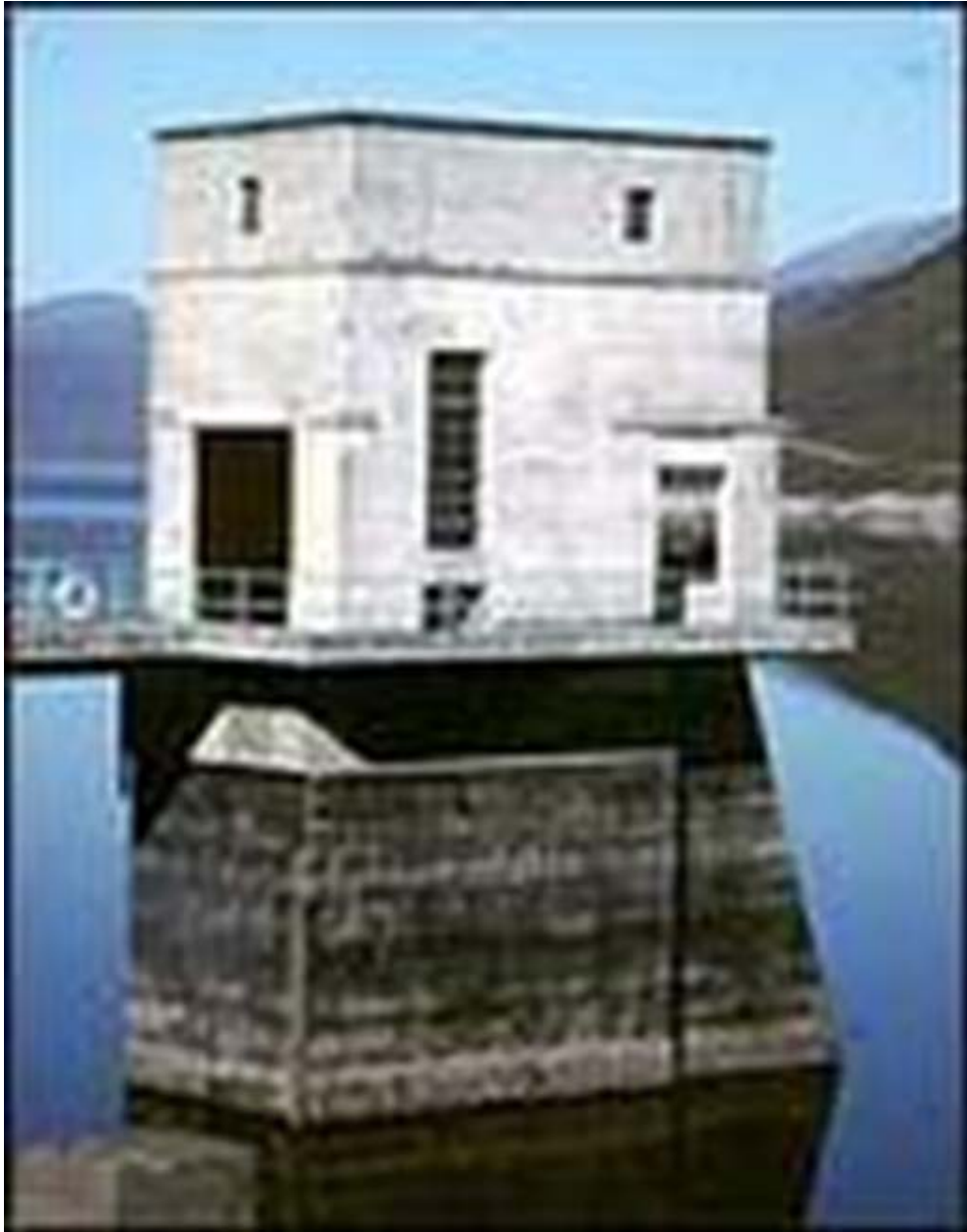
ბონდონას კომპურა წყალმიმღები



კომპურა ტიპის წყალმიმღები ბულგარეთში



რიჩარდსონის (Richardsonian) წყალმიმღები კოშკი

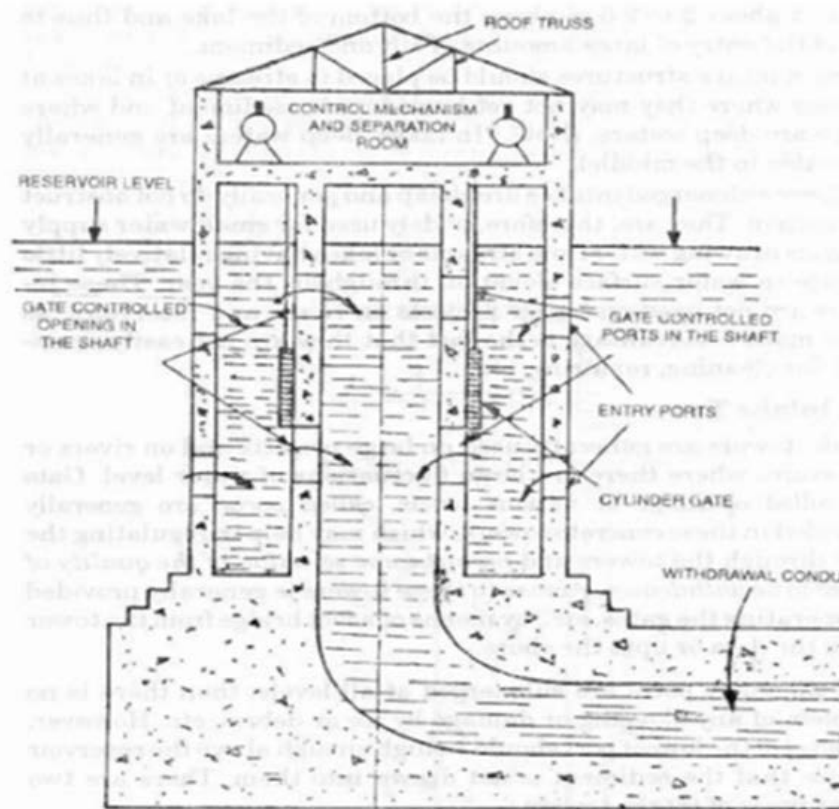


ქულმბეკის (Culmbach) კომპურა ტიპის წყალმიმღები



კომკურა ტიპის წყალმიმღებები ჰუვერას კაშხალთან

WET INTAKE TOWERS



შახტური წყალსაგდები კომპი მშენებლობის დროს
Roadford Dam in Devon, SW England.

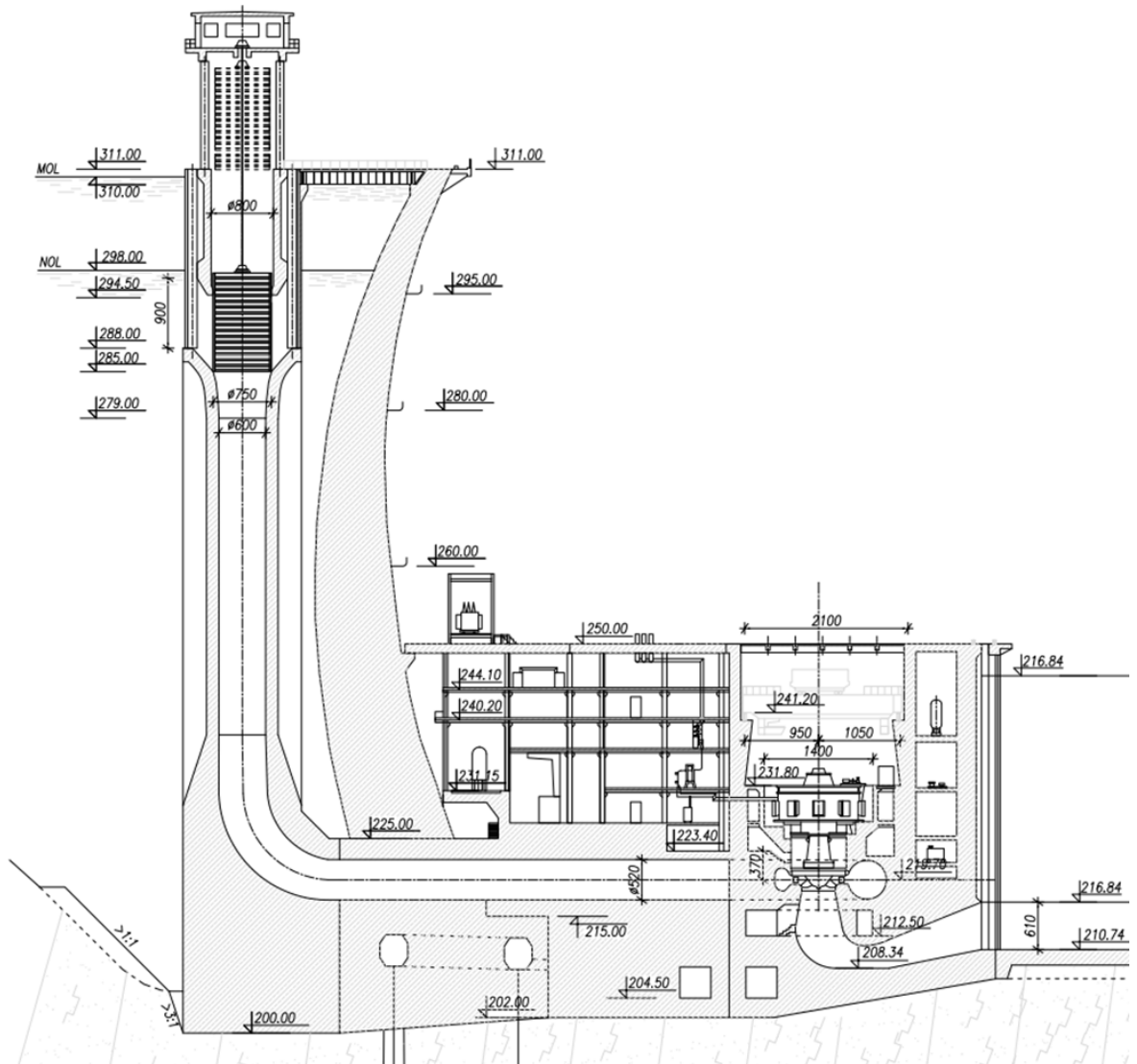


ჟინვალჰესის და სიონჰესის
კომპურა ტიპის წყალმიღებები

დანართი 2

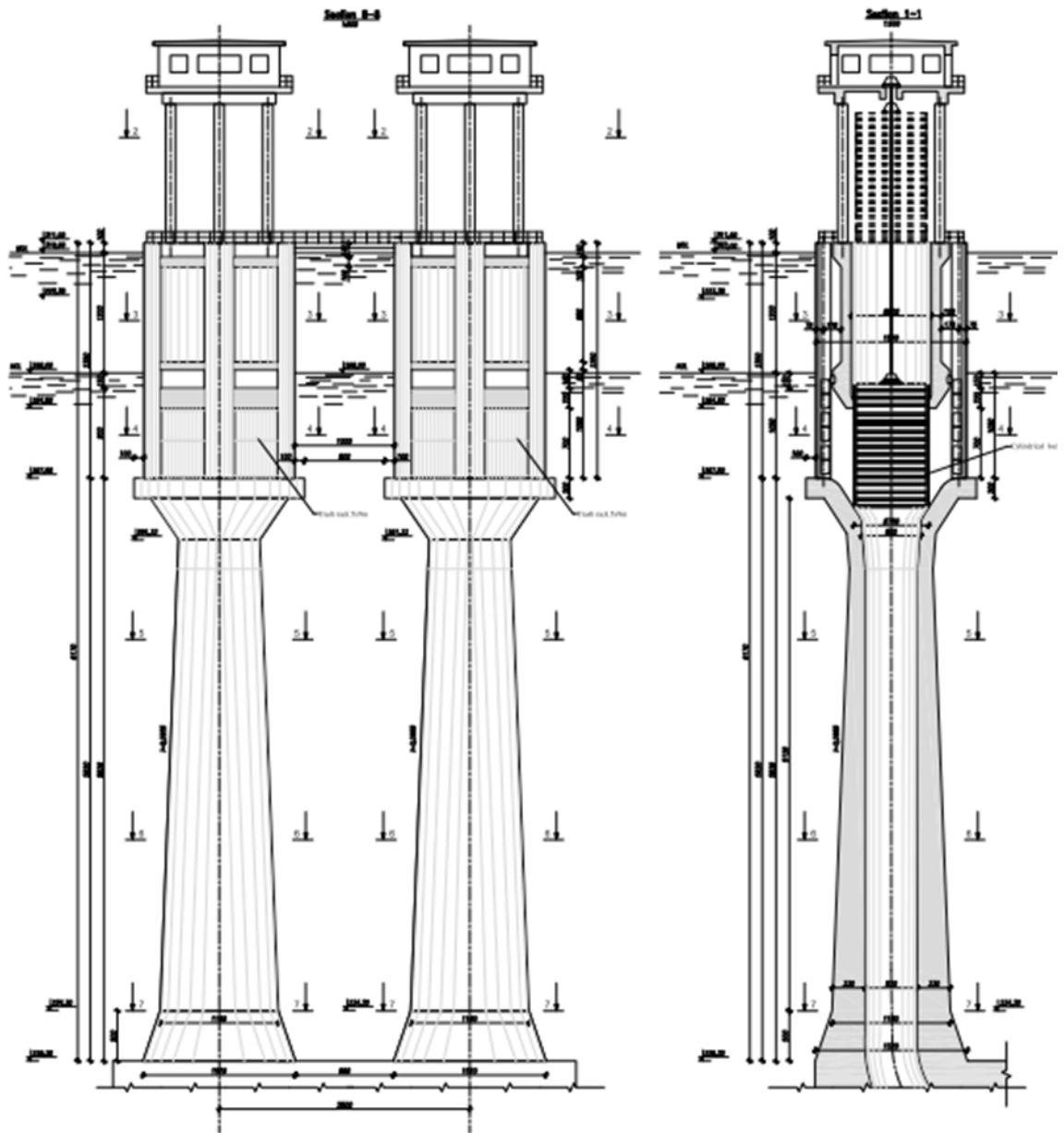
ნამახვანჭესისა და თეზამის ჰიდროკვანძის

კომპურა წყალმიმღებები



ნამახვანჭესის კომპურა წყალმიმღები

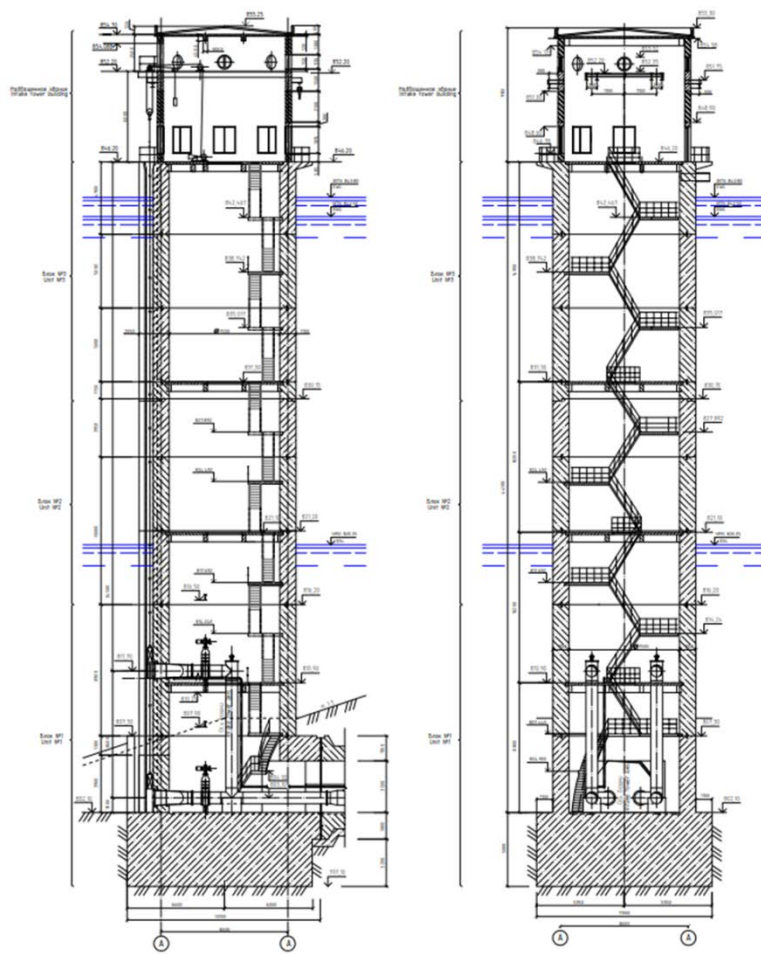
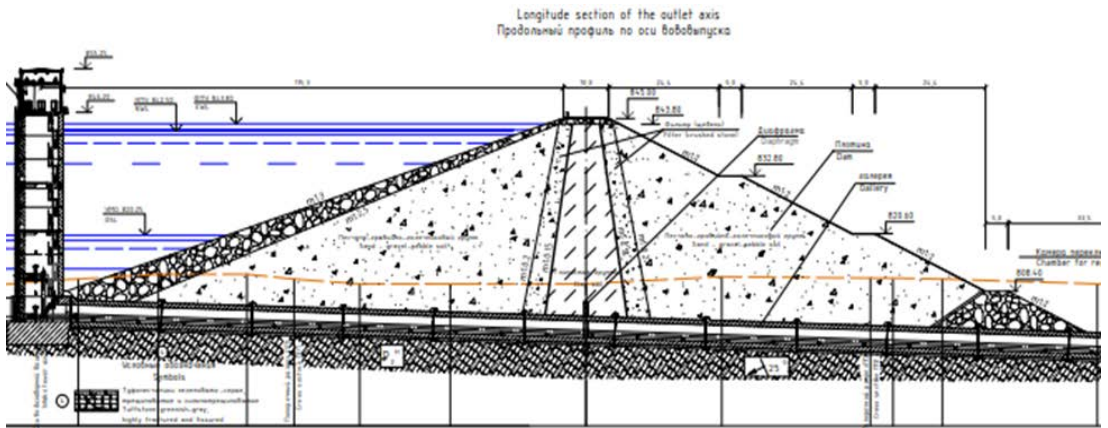
(ჭრილი სატურბინო წყალსატარის ღერძზე).



ნამოხევანის კომპურა წყალმიმღები (ხედი ზემო ბიეფიდან)



ნამოხვანის კომპურა წყალმიმღები (ფიზიკური მოდელი)



ქრილები თეძამის წყალმიმღებისა და წყალსატარის გრძივ ღერძზე

УТВЕРЖДАЮ

Зам.директора ВНИИГ
им. Б.Е. Веденеева
по научной работе
А.Г. Василевский

1990г.

Василевский
16.12.90

О Т Ч Е Т

о стажировке инженера Букия З.Г. при лаборатории математического моделирования энергетических процессов отдела № 17 ВНИИГ по изучению методов расчета водоприемников башенного типа на гидродинамическое давление при сейсмическом воздействии.

В период первого года стажировки инж.Букия З.Г. сформулировал задачу линейно-упругих колебаний водоприемника башенного типа при сейсмических воздействиях с учетом водной среды. Разработал алгоритм и программу расчета на ЭВМ водоприемника, выполнил расчеты сейсмического (гидродинамического) давления воды на водоприемник.

На втором году стажировки инж. Букия З.Г. провел дальнейшую отладку программы и приспособление ее к ЭВМ ЕС-1060. Проведение этих работ было связано с тем обстоятельством, что определение двойных интегралов, которые в раннее разработанной программе вычислялись в виде двойного суммирования было заменено специально разработанной стажером подпрограммой. Дифференциалы, используемые в исходных выражениях, были вычислены аналитически и введены в программу уже в виде готовых выражений.

Следует отметить, что в соответствии с исходными условиями дифференцирования в декартовых координатах может быть заменено на дифференцирование в цилиндрических координатах и наоборот.

Представленные формулы были преобразованы с учетом требований, необходимых для удобного ввода их в ЭВМ.

Расчет полностью был проведен в безразмерных величинах. Для сокращения времени расчета на ЭВМ, входящие в программу результаты вычислений по разработанным стажером Букия З.Г. подпрограммам были сохранены в памяти соответствующей специальной подпрограммы.

На основании разработанной программы были проведены контрольные расчеты по специально составленным тестам, результаты которых хорошо согласуются с эталонными.

Результаты показали:

При малых значениях отношения r/h (r - радиус водоприемника, h - высота) закон изменения давления по высоте водоприемной башни существенно отличается от параболической эпюры, давление оказывается почти постоянным по высоте башни и начинает уменьшаться лишь вблизи свободной поверхности, а с ростом расстояния между платиной (ограждающей средой) и водоприемником уровень давлений на водоприемник уменьшается.

Руководитель стажировки
д.т.н., проф.



Шульман С.Г.