

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი ახვლედიანი

სადაწნეო გვირაბების მუშაობა არაერთგვაროვან
გეოლოგიურ გარემოში

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელი სტუ-ის პროფესორი
მირიან ყალაბეგიშვილი

თბილისი 2014

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი ახვლედიანის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „სადაწნეო გვირაბების მუშაობა არაერთგვაროვან გეოლოგიურ გარემოში“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად, 2014 წ. 4 ივლისს.

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ. სრული პროფესორი
მირიან ყალაბეგიშვილი

რეცენზენტები: ტ.მ.დ. სრული პროფესორი
ირაკლი გუჯაბიძე

ტ.მ.კ. ასოცირებული პროფესორი
ჯუმბერ ნიჟარაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ავტორი: გიორგი ახვლედიანი
ნაშრომს დასახელება: **სადაწნეო გვირაბების მუშაობა არაერთგვაროვან გეოლოგიურ გარემოში**
ფაკულტეტი: სამშენებლო
ხარისხი: დოქტორის აკადემიური ხარისხი

სხდომის ჩატარების თარიღი 2014წ 4 ივლისი.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს და „ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე. ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.”

ავტორის ხელმოწერა

რ ე ზ ი უ მ ე

საშუალო და მაღალდაწვევიან ჰესების პროექტირების დროს მნიშვნელოვანია ხეობის ფერდის სიახლოვეს გამავალი გვირაბის ტრასის შერჩევა. საკითხის სწორად გადაწყვეტა მოითხოვს ფუძის გეოლოგიური მონაცემების გათვალისწინებით მიღწეული იქნას:

- მისაღები ფილტრაციული რეჟიმი მასივში (რომლის დროს დეპრესიის ზედაპირი არ უნდა აღწევდეს ფერდამდე, ხოლო ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრები, მათ შორის დაწნევის გრადიენტები და სიჩქარეები უნდა იყოს დასაშვები, რათა უზრუნველყოფილი იქნას მასივის ფილტრაციული სიმტკიცე).
- გვირაბისა და ფერდის მდგრადობა, რომლის დროს ხეობის ზედაპირიდან მოკეთებამდე მანძილი იქნება მინიმალური. გასათვალისწინებელია, რომ ფუძეების უმეტესობა ხასიათდება ანიზოტროპიით, შრეობრიობითა და ბზარიანობით, რომელთა განლაგება ქმნის ძვრის პოტენციურად საშიშ ზედაპირს. მასივში განვითარებული ფილტრაციული ნაკადი ერთის მხრივ წარმოშობს ფილტრაციულ მოცულობით (შემატივტივებელ და ჰიდროდინამიურ) ძალებს, მეორეს მხრივ - დაცურების ზედაპირებზე (ბზართა შემავსებლებზე) აცირებს ძვრის პარამეტრებს. აღნიშნული ფაქტორების გავლენა მიმართულია მდგრადობის მარაგების შემცირებისაკენ.

მეცნიერული სიახლე. ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში დამუშავებული იქნა კვლევის მეთოდთა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის ერთობლივი გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა შეფასებული იქნას:

- გვირაბის მოკეთებისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობა არაბზარმდეგი მოკეთების მქონე სადაწნეო გვირაბების არსებობისას, გეოლოგიური და ფილტრაციული მოცულობითი ძალების გათვალისწინებით;
- დასაბუთებული იქნა ხეობის ფერდის სიახლოვეს გამავალი გვირაბის ტრასის - დასაშვები მინიმალური მანძილი;
- ცემენტაციური ზონის გავლენა გვირაბის გარემომცველ მასივში ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრებზე (მათ შორის, დეპრესიის ზედაპირის გავრცელების დასაშვებ არეზე) ბზარების გახსნის სიდიდეზე და რაოდენობაზე, ხეობის ფერდის მდგრადობაზე;
- ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება.

კვლევის მეთოდთა, და გაანაგარიშების შედეგები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას არაბზარმდეგი მოკეთების მქონე სადაწნეო (ასევე უდაწნეო) გვირაბების პროექტირებისას და რეაბილიტაციის დროს:

- გვირაბის ტრასის დასაბუთებისათვის, როდესაც გვირაბის ღერძი გადის ხეობის ფერდის სიახლოვეს;
- გვირაბის მოკეთების გარემომცველი ცემენტაციურ ფარადის პარამეტრების (სიღრმე, ხვედრითი წყალშთანმთქმელობის

კოეფიციენტი) სწორად განსაზღვრისათვის, რომლის დროს მიღწეული იქნება:

- ფილტრაციული ნაკადის გაგრძელების დასაშვები არე მასივში;
- გვირაბი - მოსახვისა და ხეობის ფერდის მდგრადობა გეოლოგიური აღნაგობის (მათ შორის შრეობრიობა და ბზარიანობა);

ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის არაარმირებული მოკეთება გამაგრებითი ცემენტაცია, როგორც ფილტრაციის საწინააღმდეგო ძირითად საშუალების ეფექტურობას განსაზღვრავს ძირითადი მასივისა და ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენთა ფარდობა:

- როდესაც $K_m / K_{gz} = 20 \text{--} 10$, ამ დროს დეპრესიის ზედაპირი მთლიანად თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში (საპროექტო გადაწყვეტა).
- ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხის არსებობის პირობებში (ან სუფოზიური პროცესის არსებობისას), როდესაც $K_m / K_{gz} = 8$ და მასალა ნაწილობრივ იმეორებს მასივის ანიზოტროპიას, დეპრესიის ზედაპირი უკვე გადის ცემენტაციური ზონიდან;
- $K_m / K_{gz} = 2.5$ წარმოადგენს დეპრესიის ზედაპირის კრიტიკულ მნიშვნელობას (გვირაბის დერძიდან მნიშვნელოვნად შორდება და იწყება ხეობის ფერდის დასველება), რომლისთვისაც ჯერ არ მიუღწევია.

ამდენად, შეგვიძლია ვივარაუდოდ, რომ გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის არსებული მდგომარეობისათვის უფრო რეალისტურია $K_m / K_{gz} \approx 4$.

Operation of pressure Tunnels in heterogeneous geological mass

It is important to select the pressure tunnel route during designing medium and high-pressure hydro power plant in the vicinity of the slope of the valley. The correct solution requires considering the basis of geological data to be achieved:

- Admission seepage mode in the massif (which is not to be reached during the depression in the surface of the slope) and the seepage flow parameters, including pressure gradients and velocities should be allowed to ensure massive seepage resistance).
- tunnel and slope stability, during which the distance from the lining to a slope surface would be the minimum;

It should be noted that the bases are characterized by anisotropy, and cracking whose layout creates a potentially dangerous shear surface. Seepage flow creates the body (uplift and hydrodynamic) forces, on the one hand, and decreasing shear parameters of the slope surfaces (crack filler) on the other hand. These factors influence on the stability are aimed at reduction.

The scientific novelty. The two-dimensional problem of research methodology has been developed within the framework of the joint using boundary element and the finite element methods, which allows for assessment to be:

- Pervious pressure tunnel lining and the surrounding massif joint operation with existence of geological conditions and seepage body forces;
- justification the tunnel route the minimum allowable distance in the vicinity of the slope of the valley;
- influence of the grouting zone on the tunnel surrounding massive seepage flow parameters (including the depression curve of the admissible area, cracks parameters) and slope stability;
- Energy - economically acceptable seepage losses.

The practical value of the work.

Research methodology, and results can be used for design and rehabilitation of pervious pressure (also for unpressured) tunnels:

- Study the route of the tunnel, when the tunnel axis runs through the valley in the vicinity of the slope;
- tunnel lining surrounding grouting zone parameters (depth, density ratio permeability) correctly identify which can be reached at;
- the allowable spread of flow seepage area of the mass;
- tunnel – lining and slope stability ;
- Energy - economically acceptable filtration D losses.

Engurhesi tunnel lining not reinforced, the reinforcing grouting as a main seepage resistance solution efficiency is determined by the ratio of massive and grouting zone permeability coefficients ($K_m / (K_{gz} \cdot W)$),

- within the range of $K_m / K_{gz} = 20 - 10$ depression surface remains in the limits of grouting zone;
- at the low quality of grouting zone (or in the presence of erosive leakage process), when $K_m / K_{gz} = 8$ and material partially repeats the anisotropy of massif, depression surface already escapes grouting zone;
- $K_m / K_{gz} = 2,5$ is a critical value of depression surface (moves away significantly from the axis of tunnel and the wetting begins of the gorge slope), which it has not reached yet.

Therefore we may assume that more realistic for the present condition of strengthening grouting zone is $K_m / K_{gz} \approx 4$.

შ ი ნ ა ა რ ს ი.

	შ ე ს ა გ ა ლ ი -----	11
1.	სადაწნეო ჰიდროტექნიკური გვირაბებისადმი არსებული კვლევების მიმოხილვა -----	17
1.1	გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება გამოწვეული ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებისას -----	17
1.1.1	სქელკედლიანი სადაწნეო მილების დაძაბული მდგომარეობის თეორია. -----	18
1.1.2	სადაწნეო გვირაბი მტკიცე ქანებში -----	21
1.1.3	სადაწნეო გვირაბები ბეტონის მოსახვით მტკიცე არაბზარმედვ ქანებში -----	23
1.1.4	ბზარებიანი ბეტონის მოსახვა კლდოვან მასივის სიღრმეში განვითარებული ბზარებით -----	35
1.1.5	სადაწნეო გვირაბები და შახტები ლითონის მოსახვით -----	37
1.1.6	ჰორიზონტალური ზედაპირის ქვეშ მყოფი გვირაბის გაანგარიშება -----	39
1.2	ამოცანების გადაწყვეტა კლასიკური ამონახსნების მიხედვით -----	40
1.2.1	სადაწნეო გვირაბების თავზე არსებული მინიმალურად აუცილებელი სიღრმის გაანგარიშება -----	41
1.2.2	ფერდის სიახლოეს არსებული სადაწნეო გვირაბის გაანგარიშება. -----	42
2.	ფილტრაციის ამოცანების ამოხსნის ძირითადი მეთოდისა და ალგორითმი სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით. -----	43
2.1	სტაციონალური ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნა ორ განზომილებიანი არეებისათვის. -----	44
2.2	სადაწნეო გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული	

	ნაკადის პარამეტრების განსაზღვრა. -----	48
2.2.1	მოსახვიდან იზოტროპულ მასივში განვითარებული ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრა -----	48
2.2.2	მოსახვაში არსებული ბზარებიდან იზოტროპულ მასივში განვითარებული ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრა ----	50
2.2.3	ანიზოტროპულ მასივში უდაწნეო ფილტრაციის პარამეტრების განსაზღვრა -----	50
3.	სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი. -----	55
3.1	სასაზღვრე ელემენტების მეთოდის ძირითადი ალგორითმი	55
3.2	ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდი -----	56
3.3	გადაადგილებებისა და ძაბვების განსაზღვრა	
3.3	გამოსაკვლევი არის შიგნით. -----	63
4.	ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი სადაწნეო გვირაბის ფილტრაციული პარამეტრების ანალიზი. -----	67
4.1	ფილტრაციული კვლევები. -----	67
4.2	ფილტრაციული კვლევები მოსახვაში არსებული ნაკერის გასსნის გათვალისწინებით. -----	74
5.	ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი გვირაბის მდგრადობის საკითხები. -----	80
5.1	მდგრადობის ანალიზი სტაციონალური ფილტრაციის რეჟიმის გათვალისწინებით. -----	81
5.2	ხეობის ფერდის მდგრადობის ანალიზი პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე. -----	86
	დ ა ს კ ვ ნ ა. -----	98
	ლიტერატურა -----	101

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1.1.1	სქელკედლიანი სადაწნეო მილსადენი.	21
ნახ.1.1.2	სადაწნეო გვირაბი მტკიცე ქანებში.	22
ნახ.1.1.3.1	სადაწნეო გვირაბი ბეტონის მოსახვით მტკიცე არაბზარმდეგ ქანებში.	23
ნახ.1.1.3.2	a. რგოლის დეფორმაციის სქემა თანაბარად განაწილებული ვერტიკალური დატვირთების მოქმედებისას; b,c) რგოლში ძალების მოქმედების სქემა.	27
ნახ.1.1.3.3	წრიული ხერხელის არსებობისას მასივში ძალების განაწილება, $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ თანაფარდობის სხვადა სხვა მნიშვნელობებისათვის;	30
ნახ.1.1.3.4	მოსახვაზე დატვირთების მოქმედების სქემა.	32
ნახ. 1.1.5	გვირაბი მოსახვით რადიალური ბზარებით არაბზარებიანი მასივის ზედაპირის საზღვარზე;	36
ნახ.1.5 ბ.	გვირაბი ლითონის მოსახვით. ფოლადის მოსახვის დრეკადი გადაადგილება ტოლია:	37
ნახ. 1.2.1	გვირაბების თავზე მინიმალურად აუცილებელისიდრმის გაანგა რიშების სქემა.	41
ნახ.2	ფერდის უახლოეს არსებული სადაწნეო გვირაბის საან.სქემა.	43
ნახ.2.2.2.	ბზარის სასრულ- ელემენტული მოდელი.	52
ნახ.3.1	ლოკალური კოორდინატების საანგარიშო სქემები: a. სასაზღვრო კოეფიციენტებისათვის; b. არასასაზღვრო წერტილების კოეფიციენტებისათვის	66
ნახ.4.1.1	ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა $K_m / K_{gz} = 20$ – -10 (საპროექტო მდგომარეობა).	69
ნახ. 4.1.2.	ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა დეპრესიის ზედაპირი თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში $K_m / K_{gz} = 10$;	70
ნახ. 4.1.3.	ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა არსებობს ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხი $K_m / K_{gz} = 8$;	71
ნახ.4.1.4	ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა დეპრესიის ზედაპირის უახლოვდება ხეობის ფერდს $K_m / K_{gz} = 25$.	71
ნახ.4.1.5	დეპრესიის ზედაპირის გავრცელება ანიზოტროპიის პირობებში ფერდის სიახლოეს სადაწნეო გვირაბის არსებობისას	72

ნახ.4.1.6	დეპრესიის ზედაპირის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებებით გავრცელების მრუდები.	73
ნახ.4.2.1	ფილტრაციული ბადე მასივში	76
ნახ.4.2.2	ფილტრაციული გრადიენტები გვირაბის გარშემო ნაკერების გათვალისწინებით	77
ნახ.4.2.3	დაწნევის განაწილება მასივში ნაკერის კვეთთან	78
ნახ.4.2.4	დაწნევის და დაწნევის გრადიენტების განაწილება მასივში ნაკერის კვეთთან.	78
ნახ.4.2.5	უდაწნეო ფილტრაციის იტერაციული გაანგარიშებისას კრებადობის ზოგადი გრაფიკული წარმოდგენა	79
ნახ.5.1	“მოკეთება-მასივი” სისტემის საანგარიშო სქემა	81
ნახ.5.2	ფერდის სიახლოეს გამაგალი სადაწნეო გვირაბების მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების იზოხაზები.	84
ნახ.5.3	მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების გრაფიკი, იზოტროპიისა და ანიზოტროპიის დროს, გვირაბის ღერძიდან ფერდამდე დაშორების მიხედვით.	85
ნახ.5.2.1	“გვირაბი – მასივი” სისტემის საანგარიშო სქემა.	87
ნახ.5.2.2.	მაქსიმალური მხები ძაბვების განაწილება მასივში დეპრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.	89
ნახ.5.2.3	მთავარი ძაბვების განაწილება მასივში.	90
ნახ.5.2.4	მაქსიმალური მთავარი ეფექტური ძაბვების განაწილება მასივში დეპრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.	91
ნახ.5.2.5	მინიმალური მთავარი ძაბვების განაწილება მასივში.	92
ნახ.5.2.6	მინიმალური მთავარი ეფექტური ძაბვების განაწილება მასივში დეპრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.	93
ნახ.5.2.7	ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 35^\circ$).	94
ნახ.5.2.8	ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 25^\circ$).	95
ნახ.5.2.9	ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 15^\circ$).	96
ნახ.5.2.10	მდგრადობის მარაგების დამოკიდებულება K_m/K_{gz} ფარდობაზე, როცა $\alpha = 25^\circ$.	97

შ ე ს ა ვ ა ლ ი

პრობლემის აქტუალობა.

სამთო პირობებში ჰიდროენერგეტიკული და ჰიდრომელიორაციული დარგის განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული გვირაბების მშენებლობასთან, რასაც მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს თეორიული მეთოდების დამუშავება და სრულყოფა, ასევე მშენებლობის ტექნოლოგიის თანამედროვე დონე, მათ შორის მაღალი წარმადობის გვირაბ გამყვანი მანქანის პრაქტიკაში დანერგვა. ამჟამად, საქართველოში ჰიდროენერგეტიკული რესურსების მხოლოდ მცირე ნაწილია ათვისებული. აღნიშნული ზრდის დარგის აქტუალობას და დიდ პერსპექტივებს სახავს.

კლდოვანი მასივის პირობებში სადაწნეო დერივაციული გვირაბების უმეტესობა, ეკონომიკური შეფასებების გათვალისწინებით, პროექტირდება როგორც არაბზარმდეგი. ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედების შედეგად აღგილი აქვს გვირაბის მოსახვაში არსებული ნაკერებისა და ბზარების გახსნას, საიდანაც მასივში ვითარდება ფილტრაცია. გვირაბის გარემომცველი მასივის გეოლოგიური აღნაგობა (არაერთგვაროვნება, ანიზოტროპია, რღვევები, ბზარები და სხვა) შესაბამისად მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გვირაბის გარემომცველი მასივის ფილტრაციულ რეჟიმზე, რაც აისახება “მოკთება – მასივი” სისტემის დაბაბულ მდგომარეობაზე.

საშუალო და მაღალდაწნევიან ჰესების პროექტირების დროს მნიშვნელოვანია ხეობის ფერდის სიახლოვეს გამავალი გვირაბის ტრასის შერჩევა. საკითხის სწორად გადაწყვეტა მოითხოვს ფუძის გეოლოგიური მონაცემების გათვალისწინებით მიღწეული იქნას:

- მისაღები ფილტრაციული რეჟიმი მასივში (რომლის დროს დეპრესიის ზედაპირი არ უნდა აღწევდეს ფერდამდე, ხოლო ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრები, მათ შორის დაწნევის

გრადიენტები და სიჩქარეები უნდა იყოს დასაშვები, რათა უზრუნველყოფილი იქნას მასივის ფილტრაციული სიმტკიცე).

- გვირაბისა და ფერდის მდგრადობა, რომლის დროს ხეობის ზედაპირიდან მოკეთებამდე მანძილი იქნება მინიმალური.

გასათვალისწინებელია, რომ ფუძეების უმეტესობა ხასიათდება ანიზოტროპიით, შრეობრიობითა და ბზარიანობით, რომელთა განლაგება ქმნის ძვრის პოტენციურად საშიშ ზედაპირს. მასივში განვითარებული ფილტრაციული ნაკადი ერთის მხრივ წარმოშობს ფილტრაციულ მოცულობით (შემატივტივებელ და ჰიდროდინამიურ) ძალებს, მეორეს მხრივ - დაცურების ზედაპირებზე (ბზართა შემავესებლებზე) აცირებს ძვრის პარამეტრებს. აღნიშნული ფაქტორების გავლენა მიმართულია მდგრადობის მარაგების შემცირებისაკენ.

ფილტრაციული დანაკარგები ნორმებით არ უნდა აღემატებოდეს გვირაბის საანგარიშო ხარჯის 1%, რაც უმეტეს შემთხვევაში დარღვეულია. ფილტრაციის განვითარებისას შესაძლებელია თავი იჩინოს დაწნევის გრადიენტების, სიჩქარეებისა და ხარჯების ზრდამ, რაც ძირითადად აისახება:

- მასივში სუფოზიური მოვლენების განვითარებაზე;
- ქანების დეფორმაციის მოდულის, სიმტკიცის, ძვრის მახასიათებლებისა და შესაბამისად - გვირაბის მოსახვის ზიდვის უნარიანობის შემცირებაზე;
- ჰესის ენერგეტიკულ პარამეტრების გაუარესებაზე.

აღსანიშნავია, რომ ამჟამად ექსპლუატაციაში მყოფი ობიექტების უმეტესობა ხასიათდება გაზრდილი ბზარიანობით და თანამდევი ფილტრაციული დანაკარგებით, რაც შესაბამისად მოითხოვს რეაბილიტაციას.

ზემოთხსენებული პრობლემები დგას, როგორც პროექტირების ასე ექსპლუატაციაში მყოფი გვირაბების წინაშე. მათ გადაწყვეტაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გვირაბის გარემომცველი ცემენტაციური ზონას, რომლის პარამეტრების (სიღრმე, ხვედრითი წყალშთანმტკმელობის

კოეფიციენტი) სწორად განსაზღვრის შემთხვევაში შესაძლებელია მიღწეული იქნას:

- ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების დასაშვები არე მასივში;
- ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები;
- გვირაბის მოსახვის ზიდვის უნარიანობა - საანგარიშო მნიშვნელობით;
- მდგრადი ფერდი.

წარმოდგენილი ადასტურებს გვირაბმშენებლობის წინაშე მდგარი პრობლემების აქტუალობას, რაც მოიხოვს გაანგარიშების სათანადო მეთოდის დამუშავებასა და შესაბამისი საინჟინრო კვლევების ჩატარებას.

კვლევის თანამედროვე დონეზე დასმული საკითხების გადაწყვეტა კლასიკური მეთოდების გამოყენებით აწელება ცნობილ მათემატიკურ სიძნელეებს. ყოველივე დღის წესრიგში აყენებს თანამედროვე რიცხვითი (სასრული და სასაზღვრო) მეთოდების გამოყენების აუცილებლობას. ვარიანტული კვლევების რიცხვითი შედეგების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მიღწეული იქნას გვირაბის ღერძის მისაღები მდებარეობა, აგრეთვე მოკეთების გარემომცველი ცემენტაციურ ზონის პარამეტრები, რომლის დროს დაკმაყოფილებული იქნება უსაფრთხოების პირობები.

სამუშაოს მიზანია

შეფასებული იქნას:

- საპროექტო და საექსპლუატაციო პერიოდებში გვირაბის მოკეთებისა და ხეობის ფერდის ერთობლივი მუშაობა მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით, ამასთან დაკავშირებით ფერდამდე დასაშვები მინიმალური მანძილი, სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობების მიხედვით.
- ცემენტაციური ზონის გავლენა

- გვირაბის გარემომცველ მასივში ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრებზე (მათ შორის, დეპრესიის ზედაპირის გავრცელების არეზე), აგრეთვე, მოკეთებაში ბზარების გახსნის სიდიდეზე;
- ხეობის ფერდის მდგრადობაზე.

აღნიშნული საკითხები განიხილება გვირაბის გარემომცველი მასივის გეოლოგიური სტრუქტურის, მათ შორის არაერთგვაროვნების, ანიზოტროპულობის და სხვადასხვა სახის რღვევების გათვალისწინებით.

- მიზნის მისაღწევად საჭიროა დამუშავებული იქნას კვლევის სათანადო მეთოდთა და საანგარიშო პროგრამა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდების გამოყენებით, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ჩატარებული იქნას “მოკეთება - გარემომცველი მასივი” ერთიანი სისტემის გაანგარიშებები ფუძის გეოლოგიური აღნაგობის, აგრეთვე ცემენტაციური ზონის გავლენით მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმის თანმხლები მოცულობითი ძალების გათვალისწინებით.
- აღნიშნულის საფუძველზე ჩატარდეს ენგურჰესის დერივაციული გვირაბის გამოკვლევა ზემოთხსენებული ფაქტორების გათვალისწინებით.

კვლევის მეთოდთა

კვლევის ძირითად აპარატად გამოყენებულია სტატიკისა და ფილტრაციის შეკავშირებული სქემა. სტატიკის ამოცანებში გამოიყენება სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდები ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში.

მეცნიერული სიახლე

ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში დამუშავებული იქნა კვლევის მეთოდთა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის ერთობლივი გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა შეფასებული იქნას:

- გვირაბის მოკეთებისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობა არაბზარმდეგი მოკეთების მქონე სადაწნეო გვირაბების არსებობისას, გეოლოგიური და ფილტრაციული მოცულობითი ძალების გათვალისწინებით;
- დასაბუთებული იქნას ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი გვირაბის ტრასა - დასაშვები მინიმალური მანძილი;
- ცემენტაციური ზონის გავლენა გვირაბის გარემომცველ მასივში ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრებზე (მათ შორის, დეპრესიის ზედაპირის გავრცელების (დასაშვები) არე, აგრეთვე აგრეთვე ბზარების გახსნის სიდიდე, რაოდენობა);
- ხეობის ფერდის მდგრადობაზე;
- ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება

კვლევის მეთოდოლოგია, და გაანაგარიშების შედეგები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას არაბზარმდეგი მოკეთების მქონე სადაწნეო (ასევე უდაწნეო) გვირაბების პროექტირებისას და რეაბილიტაციის დროს:

- გვირაბის ტრასის დასაბუთებისათვის, როდესაც გვირაბი ღერძი გადის ხეობის ფერდის სიახლოეს;
- გვირაბის მოკეთების გარემომცველი ცემენტაციურ ფარადის პარამეტრების (სიღრმე, ხვედრითი წყალშთანმთქმელობის კოეფიციენტი) სწორად განსაზღვრისათვის, რომლის დროს მიღწეული იქნება:
 - ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების დასაშვები არე მასივში;
 - გვირაბი მოსახვისა და ხეობის ფერდის მდგრადობა გეოლოგიური აღნაგობის (მათ შორის შრეობრიობა და ბზარიანობა);
 - ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები.

განგარიშების შედეგები გათვალისწინებული იქნა ენგურჰესის დერივაციული გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული დანაკარგების შეფასებისათვის.

მეცნიერული დებულებების, დასკვნებისა და რეკომენდაციების სარწმუნოების დასაბუთება

სადისერტაციო ნაშრომში მოყვანილი ყველა შედეგის დამაჯერებლობა განსაზღვრულია სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის თეორიით, წარმოდგენილი დრეკადობისა და ფილტრაციის თეორიების ამონახსნებით ორგანზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში.

სამუშაოს რეალიზაცია:

ჩატარებული კვლევები მოხსენებული იქნა სტუ-ს ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა და ჰიდროენერგეტიკული მშენებლობის მენეჯმენტის კათედრაზე.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კომფერენციაზე. სამშენებლო ფაკულტეტი, სექცია ჰიდროინჟინერია. 10.06.2013წ. (მეორე ადგილი.)

პუბლიკაციები: ორი სტატია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალში „მშენებელი“, ერთი სტატია სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალში „ინჟინერია“

სამუშაოს სტრუქტურა და მოცულობა

სადისერტაციო ნაშრომში შედგება შესავალის, ხუთი თავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. სამუშაოს საერთო მოცულობა შეადგენს 108 ნაბეჭდ გვერდს, მათ შორის 36 ნახაზი, გამოყენებული ლიტერატურული წყაროების რაოდენობაა 83.

1. სადაწნეო ჰიდროტექნიკური გვირაბებისადმი არსებული კვლევების მიმოხილვა

1.1 გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება გამოწვეული ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებისას

მოცემულია კლდოვან მასივში არსებული სადაწნეო გვირაბების გაანგარიშების თეორიული მეთოდების მიმოხილვა და კრიტიკული ანალიზი.

გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება დაკავშირებულია კლდოვან მასივში გრავიტაციული ველით გამოწვეული საწყისი ძაბვების არსებობასთან. არსებული გაანგარიშებები, რომლებიც ემყარება კლასიკურ ამონახსნებს განიხილავს ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით გვირაბის გარემომცველ მასივში განვითარებული ძაბვების ანალიზს. აღნიშნული ემყარება სქელკედლიანი მილის დაძაბული მდგომარეობის თეორიას, რომელიც პირველად გამოყენებული იყო გვირაბებისათვის მოსახვის არ არსებობისას, ხოლო შემდეგ მოსახვის არსებობის გათვალისწინებით.

წარმოდგენილია დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდოლოგია (საკვლე გამოცდების ავსტრიული მეთოდი), ასევე ამონახსნები მიღებული წრიული კვეთის მქონე სადაწნეო გვირაბებისათვის, თანაბრად განაწილებული შიგა ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებისას.

გვირაბის თეორიულ კვლევებში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა მრავალმა მკვლევარმა, მათ შორის აღსანიშნავია: ბ.გ. გალიორკინის, გ.ნ. სავინის, გ.გ. კოლოსოვის, ნ.ი. მუსხელიშვილის, ს.გ. ლეხნიცკის, ბ.პ. ბოდროვის, ლ.ნ. გორელიკის, გ. კირშის, გ.ნ. სავინის ნ.ნ. ფოტიევას, მ.ნეილორის, რ.ჰილის ს. ჯეგერის, ვ.მ. მოსტკოვის, ნ.ს. ბულიჩევის, გ.გ. ზურაბოვის, ნ.ა. კასიროვას, ნ.ს. როზანოვის, ვ.ნ. სუდაკოვის შრომები. ფილტრაციულ კვლევებში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს: ი.ბ

სოკოლოვის, ვ.ნ. ქილენკოვის, დ.დ. საპეგინის, გ.მ. ზადვორნის, რ.რ. ჩუგაევის, ა.ა. ხრაპკოვის, ვ.ა. საპეგინის ე.ს. რომის, გ.ს. გეინაცის, ც.ფ. კნუტსონის, ბ.ფ. ბოხორის, კ.ა. მალცოვისა და სხვათა შრომებმა.

გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება დაკავშირებულია კლდოვან მასივში საწყისი ძაბვების არსებობასთან. ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით გვირაბის გარშემო ძაბვების ანალიზი ემყარება სქელკედლიანი მილის დაძაბული მდგომარეობის თეორიას, რომელიც პირველად გამოყენებული იყო გვირაბებისათვის მოსახვის არ არსებობისას, ხოლო შემდეგ მოსახვის არსებობის გათვალისწინებით [1, 2]. წრიული კვეთის გვირაბის შიგნიდან თანაბრად განაწილებული ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდის (საველე გამოცდების ავსტრიული მეთოდი) უკავშირდება ამონახსნებს მიღებულთ სადაწნეო გვირაბებისათვის. ასეთი კვლევების შედეგები შესაძლებელია ასევე გამოყენებულნი იქნას სადაწნეო გვირაბების უსაფრთხოების თვალსაზრისით მინიმალური ჩაღრმავების განსაზღვრისათვის [3]. ქვემოთ მოყვანილი განტოლებები გამოიყენება აგრეთვე ჰიდრაულიკური დარტყმისას გვირაბებისა და შახტების გაანგარიშებისას.

1.1.1 სქელკედლიანი სადაწნეო მილების დაძაბული მდგომარეობის თეორია.

ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედების შედეგად ტანგენციური და რადიალური დეფორმაციები ტოლი იქნება შესაბამისად:

$$\delta_t = \frac{2\pi(R+u) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{u}{R}$$

$$\delta_r = \frac{dR + du - dR}{2\pi R} = \frac{du}{dR} \tag{1.1}$$

მეორეს მხრივ დეფორმაციებსა და ძაბვებს შორის არსებობს დამოკიდებულებები:

$$\delta_t = \frac{u}{R} = \frac{1}{E} \left(\sigma_t - \frac{1}{m} \sigma_r \right)$$

$$\delta_r = \frac{du}{dR} = \frac{1}{E} \left(\sigma_r - \frac{1}{m} \sigma_t \right) \quad (12)$$

ახ

$$\sigma_t = \frac{mE}{m^2 - 1} \left(m \frac{u}{R} + \frac{du}{dR} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{mE}{m^2 - 1} \left(m \frac{du}{dR} + \frac{u}{R} \right) \quad (13)$$

სადაც E – დრეკადობის მოდულია; $1/m = \nu$ მილის პუასონის კოეფიციენტი. რადიალური გადაადგილება განისაზღვრება დიფერენციალური განტოლების ამოხსნით:

$$R^2 \frac{d^2 u}{dR^2} + R \frac{du}{dR} - u = 0 \quad (14)$$

ინტეგრების შედეგად მიიღება:

$$u = BR + C/R$$

უკანასკნელის გათვალისწინებით რადიალური და ტანგენციური ძაბვები განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

$$\sigma_r = \frac{mE}{m-1} \mathbf{B} - \frac{mEC}{(m+1)R^2} = B' - \frac{C'}{R^2}$$

$$\sigma_i = \frac{mE}{m-1} \mathbf{B} + \frac{mEC}{(m+1)R^2} = B' + \frac{C'}{R^2} \quad (1.5)$$

\mathbf{B} და \mathbf{C} ინტეგრების მუდმივები განისაზღვრებიან სასაზღვრო პირობებიდან:

$$\mathbf{R} = \mathbf{b}; \mathbf{R} = \mathbf{c}.$$

მილისათვის, რომელიც განიცდის P_i შიგა და P_e გარე წნევების მოქმედებას $\mathbf{R} = \mathbf{b}$ სათვის (ნახ.1.1.1) მიიღება:

$$\sigma_r = B' - \frac{C'}{b^2} = P_i \quad (1.6)$$

ხოლო $\mathbf{R} = \mathbf{b}$ სათვის:

$$\sigma_r = B' - \frac{C'}{b^2} = P_e \quad (1.7)$$

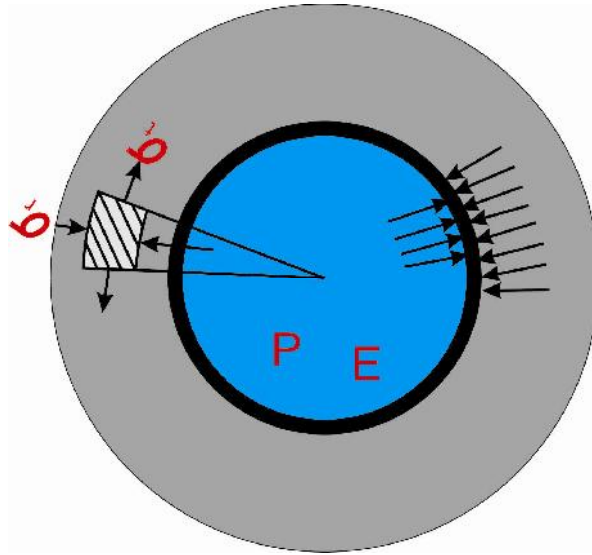
აქედან:

$$C' = \frac{P_e - P_i}{c^2 - b^2} c^2 b^2$$

$$B' = \frac{P_e c^2 - P_i b^2}{c^2 - b^2} \quad (1.8)$$

ასევე,

$\mathbf{R} = \mathbf{b}$ სათვის:



ნახ.1.1.1 სქელკედლიანი სადაწნეო მილსადენი.

$$\sigma_r = \frac{P_e c^2 - P_i b^2}{c^2 - b^2} - \frac{P_e - P_i}{c^2 - b^2} c^2 = P_i$$

$$\sigma_t = \frac{P_e c^2 - P_i b^2}{c^2 - b^2} + \frac{P_e - P_i}{c^2 - b^2} c^2 = -P_i \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \frac{2c^2 P_e}{c^2 - b^2} \quad (1.9)$$

R = c სათვის:

$$\sigma_r = \frac{P_e c^2 - P_i b^2}{c^2 - b^2} - \frac{P_e - P_i}{c^2 - b^2} = P_e$$

$$\sigma_t = \frac{P_e c^2 - P_i b^2}{c^2 - b^2} + \frac{(P_e - P_i)b^2}{c^2 - b^2} = -P_i \frac{2b^2}{c^2 - b^2} + P_e \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} \quad (1.10)$$

1.1.2. სადაწნეო გვირაბი მტკიცე ქანებში.

განიხილება გვირაბი მოსახვის სასაზღვრო პირობებით (ნახ.1.1.2):

როცა, $R = b, P_i = P$

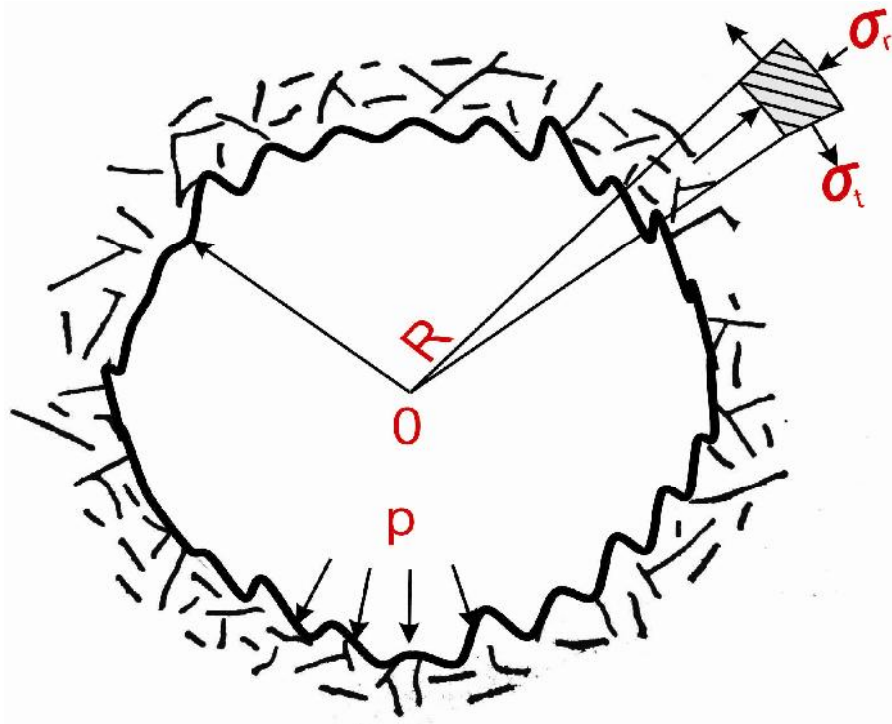
როცა, $R = \infty$, $\sigma_r = Pe = 0$.

მეორე პირობის დროს,

$$R = \infty, \quad (1.11)$$

$$\sigma_r = B' = 0, \quad B = 0, \quad \sigma_t = 0.$$

როცა, $0 < R < \infty$



ნახ.1.12 სადაწნეო გვირაბი მტკიცე ქანებში.

$$\sigma_r = -\frac{mEC}{(m+1)b^2} = P \quad C = -\frac{Pb^2(m+1)}{Em},$$

$$\sigma_t = +\frac{mEC}{(m+1)b^2} = -P.$$

(1.12)

კვლევის მასივის ნებისმიერი წერტილისათვის:

$$\sigma_r = -\sigma_t = -\frac{mEC}{(m+1)R^3} = P \frac{b}{R^3} \quad (1.13)$$

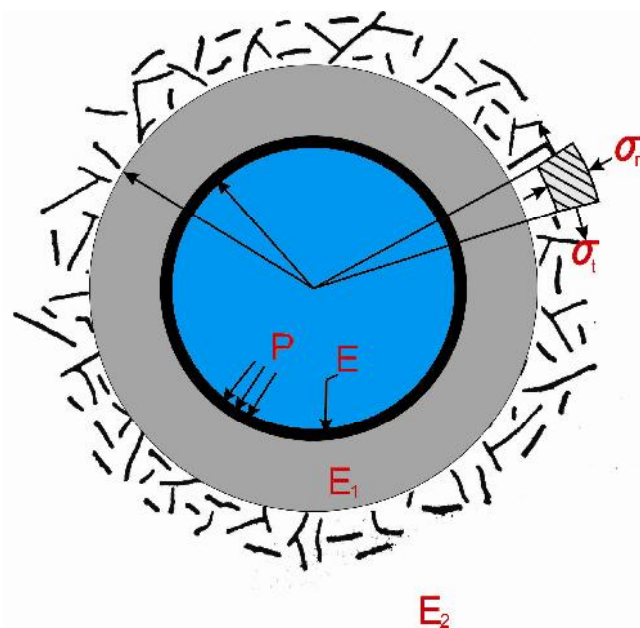
მასივის სიღრმეში σ_r, σ_t ძაბვები სწრაფად მცირდება და $R = 2b$ მანძილში ისინი გვირახის მოსახვაში აღწევენ ძაბვების 25%-ით.

1.1.3. სადაწნეო გვირახები ბეტონის მოსახვით

მტკიცე არაბზარმედეგ ქანებში.

განიხილება სადაწნეო გვირახი, რომლის მოსახვის შიგა და გარე რადიუსებია b და c (ნახ. 1.1.3.1) [4,5]. თუ გვირახის შიგა ზედაპირზე მოქმედებს P ჰიდროსტატიკური წნევა, მაშინ მოსახვაზე გადაცემული

დატვირთვა (იმის გათვალისწინებით, რომ მოსახვასა და მასივს შორის უწყვეტი კავშირია) იქნება $P_c = \lambda P$.



ნახ. 1.1.3.1 სადაწნეო გვირახი ბეტონის მოსახვით მტკიცე არაბზარმედეგ ქანებში.

როცა $C < R < \infty$, მაშინ

σ_r ძაბვები შესაძლებელია წარმოდგენილნი იქნას განტოლებით:

$$\sigma_r = \frac{m_2 E_2}{m_2 - 1} \mathbf{B}_2 - \frac{m_2 E_2 C_2}{(m_2 + 1) R^2} \quad (1.14)$$

ინდექსი 2 მიუთითებს, რომ შესაბამისი პარამეტრები განეკუთვნება კლდოვან მასივს. $R = \infty$ თვის პირობას $\sigma_r = 0$ მთელი

მასივისათვის მიყვავართ მნიშვნელობებამდე $\mathbf{B}_2 = 0$ და $\sigma_r = -\sigma_t$.

როცა ქანების ზედაპირზე $R = c$, მაშინ

$$\sigma_r = -\frac{m_2 E_2}{m_2 + 1} \frac{C_2}{c^2} = P_c = \lambda P$$

$$C_2 = -\frac{P_c c^2 (m_2 + 1)}{m_2 E_2}$$

$$B_2 = 0. \quad (1.15)$$

რადიალური გადაადგილებები მასივში, როცა $R = c$ ტოლია

$$u_{R=c} = B_2 R + \frac{C_2}{R} = \frac{P_c c^2 (m_2 + 1)}{m_2 E_2} \quad (1.16)$$

როდესაც $b < R < c$, შემოდის ინდექსი 1. როცა $R = b$, მაშინ

$$\sigma_{R=b} = \frac{m_1 E_1}{m_1 - 1} \mathbf{B}_1 - \frac{m_1 E_1}{m_1 + 1} \frac{C_1}{b^2} = P \quad (1.17)$$

როცა $R = c$, მაშინ

$$\sigma_{r=c} = \frac{m_1 E_1}{m_1 - 1} \mathbf{B}_1 - \frac{m_1 E_1}{m_1 + 1} \frac{C_1}{c^2} = \lambda P$$

$$C_1 = -\frac{m_1 + 1}{m_1 E_1} \frac{c^2 b^2}{c^2 - b^2} (1 - \lambda) P$$

$$B_1 = -\frac{m_1 - 1}{m_1 - E_1} \frac{(b^2 - \lambda c^2)}{c^2 - b^2} P \quad (1.18)$$

დრეკადი გადაადგილებების გატოლებით, როცა $R = c$ მიიღება

$$u_{R=c} = B_1 c + \frac{C_1}{c} = B_2 c + \frac{C_2}{c}$$

$$\frac{m_1 - 1}{m_1 - E_1} \frac{(b^2 - \lambda c^2)}{c^2 - b^2} c P + \frac{m_1 + 1}{m_1 E_1} \frac{c b^2}{c^2 - b^2} (1 - \lambda) P = \frac{m_2 - 1}{m_2} \frac{c}{E_2} \lambda P \quad (1.19)$$

აღნიშნული განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ

$$\lambda = \frac{P_c}{P} = \frac{\frac{2b^2}{E_1 (c^2 - b^2)}}{\frac{m_2 + 1}{m_2 E_2} + \frac{(m_1 - 1)c^2 + (m_1 + 1)b^2}{m_1 E_1 (c^2 - b^2)}} \quad (1.20)$$

მახვები ბეტონის მოსახვაში, როცა $R = b$ ტოლია

$$\sigma_{rb} = P$$

$$\sigma_{ib} = -\frac{c^2 + b^2 - 2\lambda c^2}{c^2 - b^2} P$$

(121)

როცა $R = c$, მაშინ

$$\sigma_{rc} = \lambda P$$

$$\sigma_{ic} = -\frac{2b^2 - \lambda(c^2 + b^2)}{c^2 - b^2} P$$

(122)

ანალოგიური ამონახსნები მიღებული იქნა ბ.გ. გალიორკინის, გ.ნ. სავინის, გ.გ. კოლოსოვის, ნ.ი. მუსხელიშვილის, ს.გ. ლეხნიცკისა და სხვა მეცნიერების ნაშრომებში [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] .

ბ.გ. გალიორკინის ფორმულები საშუალებას იძლევა მაგარ კლდოვან ქანებში მოუპირკეთებელი გვირაბისათვის ჩატარებული იქნას გაანგარიშებები. თუ ჩავთვლით, რომ $E_1 = E_2 = E$; $\nu_1 = \nu_0 = \nu$, მაშინ ინტერვალისათვის $r_1 \leq R \ll \infty$ ადგილი ექნება დამოკიდებულებას [10,17] :

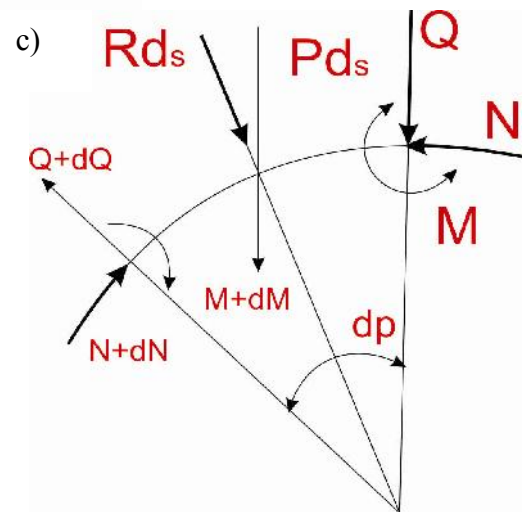
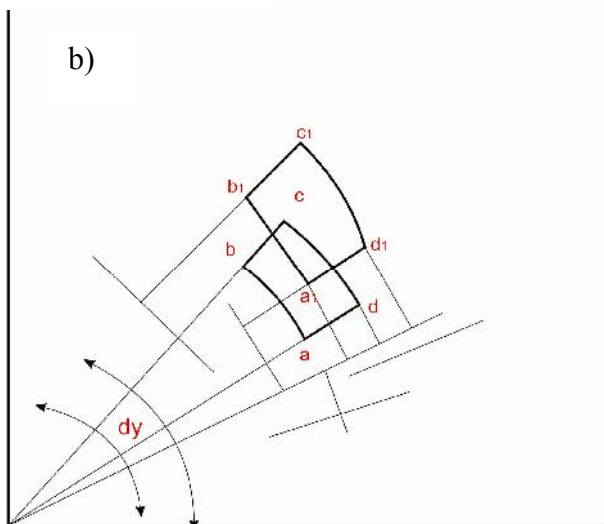
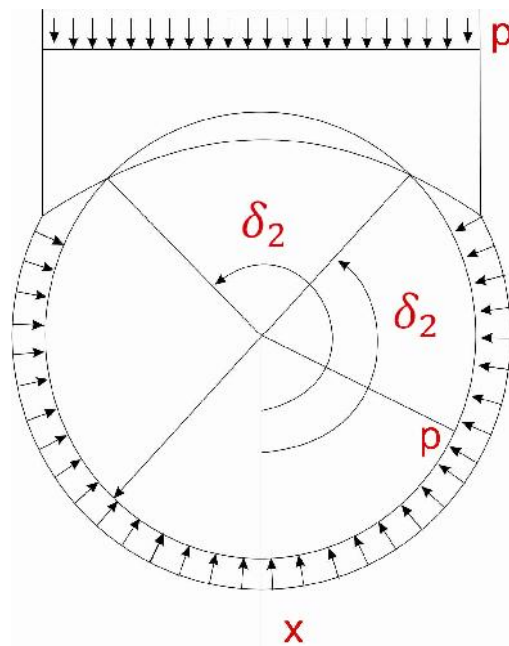
$$\sigma_r = -\sigma_\theta = Pr_1^2 / R^2 \quad (123)$$

დრეკადობის თეორიის ზუსტი ამონახსნები არ იძლევა საშუალებას მიღებული იქნას საანგარიშო ფორმულები შემთხვევისათვის, როცა მოსახვის ნაწილზე გარედან (მაგ. სამთო წნევის სახით) მოქმედებს განაწილებული დათვიროთვა.

ამ შემთხვევაში შესაზღებელია გამოყენებული იქნას ბ.პ. ბოდროვის და ლ.ნ. გორელიკის ამონახსნები (ინსტიტუტ “მეტროგიპროგრანსის“ 1936 წ.) ეს ამონახსნები იყენებენ ღრეკად გარემოში რგოლის პოტენციალური ენერჯიის მინიმუმის პრინციპს. მიხნეულია, რომ მოსახვის მასივის მხარეს დეფორმირებისას

(ნახ.1.1.32,ა) აღძრული რეაქცია დეფორმაციის სიდიდის პროპორციულია (ვინკლერის ჰიპოთეზა), ანუ:

a)



ნახ.1.1.32,ა a) რგოლის დეფორმაციის სქემა თანაბარადგანაწილებული ვერტიკალური დატვირთვის მოქმედებისას;
b,c) რგოლში ძალების მოქმედების სქემა.

სადაც, U ნებისმიერი წერტილის გადაადგილების რადიალური კომპონენტიცა,

t - გადაადგილების თანმხლები მხევი კომპონენტიცა. თუ უგულებელვყოფთ განივი და გრძივი ძალებით გამოწვეულ დეფორმაციებს, თანაფარდობა ზემოთხსენებულ სიდიდეებს შორის შეიძლება ასე ჩამოვაყალიბოთ:

$$t = -\int u d\varphi \quad (124)$$

რიცხვითი ამონახსნების მისაღებად რადიალური დეფორმაციები წარმოდგინდება ფურიეს მწკრივების სახით:

$$u = \sum_{m=1}^m (a_m \cos m\varphi + b_m \sin m\varphi) \quad (125)$$

სადაც: φ კუთხეა X ღერძისა განსახილველ წერტილისადმი; a_1, a_2, \dots, a_m ; და b_1, b_2, \dots, b_m უცნობი კოეფიციენტებია. მოსახვის კონსტრუქციისა და დატვირთვების ვერტიკალური ღერძის მიმართ სიმეტრიულობის პირობის გათვალისწინებით გამოსახულებას ექნება სახე:

$$u = \sum_{m=1}^m a_m \cos m\varphi \quad (126)$$

$$t = \int \left(-\sum_{m=1}^m a_m \cos m\varphi \right) d\varphi = -\sum_{m=1}^m \frac{1}{m} a_m \sin m\varphi \quad (127)$$

φ კუთხის შერჩევა მოხდება იტერაციული გაანგარიშებით, უკუწნევის ეპიურის ნულოვანი მნიშვნელობის ძებნისას. თუ განვსაზღვრავთ რგოლის პოტენციალურ ენერჯიას Π , როგორც გარე

ძაღებს, რეფორმაციის შიგა ძაღებს და დრეკადი რეაქციის მიერ შესრულებულ მუშაობათა ჯამს, მაშინ

a_1, a_2, \dots, a_m უცნობი კოეფიციენტები მოიძებნება პოტენციური ენერჯიის მინიმუმის პირობიდან. აღნიშნული დაიყვანება განტოლებათა სისტემის ამოხსნაზე:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial a_1} &= 0, \\ \frac{\partial \Pi}{\partial a_2} &= 0, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \frac{\partial \Pi}{\partial a_m} &= 0. \end{aligned} \tag{128}$$

გაანგარიშებების სიზუსტე განისაზღვრება m -ის მნიშვნელობით. პრაქტიკული

გაანგარიშებებისას ძირითადად საკმარისია მნიშვნელობა $m=5, \dots, 6$.

a_1, a_2, \dots, a_m კოეფიციენტების ცნობილი მნიშვნელობების მიხედვით განისაზღვრება მომენტები განივი და გრძივი ძაღები ნებისმიერ კვეთში φ კუთხის მიხედვით (ნახ. 1.13.2, **b,c**):

$$\begin{aligned} M &= \frac{EI}{r^2} \sum_{m=1}^m (1-m^2) a_m \cos m\varphi; \\ Q &= \frac{dM}{dS} = \frac{EI}{r^2} \frac{d}{rd\varphi} \left[\sum_{m=1}^m (1-m^2) a_m \cos m\varphi \right] = \\ &= \frac{EI}{r^3} \sum_{m=1}^m (1-m^2) a_m \sin m\varphi; \\ N &= Rr + \frac{EI}{r^3} \sum_{m=1}^m (1-m^2) a_m \cos m\varphi. \end{aligned}$$

(129)

წარმოდგენილი მეთოდით პროგრამირდება, რაც გაანგარიშებას მით უფრო მოხერხებულს ხდის.

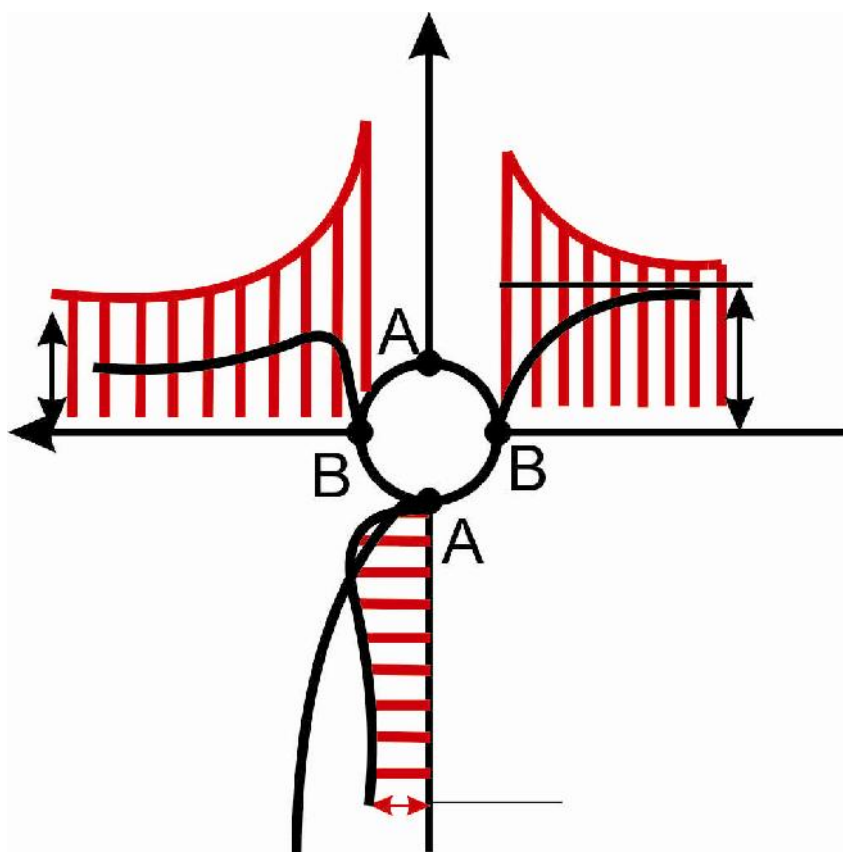
დრეკადობის თეორიის ამოცანის ამოხსნა საშუალებას იძლევა გაანგარიშებული იქნას ერთგვაროვან დრეკად მასივში წრიული ხერხელის გარშემო დაბეჭდები. r_1 რადიუსიან გამონამუშევარში საწყისი დაბეჭდების ველი შეადგენს (ნახ. 1.13.3):

$$\sigma_{y0} = \rho g(y - H),$$

$$\sigma_{x0} = \lambda \rho g(y - H),$$

$$\tau_{xy0} = 0$$

(130)



ნახ. 1.13.3 წრიული ხერხელის არსებობისას მასივში დაბეჭდების განაწილება, $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ თანაფარდობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის;

სადაც ρ - მასივის სიმკვრივეა, ხოლო g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება. მაშინ

ძაბვები მასივში განისაზღვრება *გ. კირშის* ფორმულებით:

$$\sigma_r = -\rho g \left[\frac{1+\lambda}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) + \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_1^4}{r^4} - 4 \frac{r_1^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] H;$$

$$\sigma_\theta = -\rho g \left[\frac{1+\lambda}{2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) - \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_1^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] H,$$

$$\tau_{r\theta} = -\rho g H \frac{1-\lambda}{2} \left(1 - 3 \frac{r_1^4}{r^4} + 2 \frac{r_1^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.$$

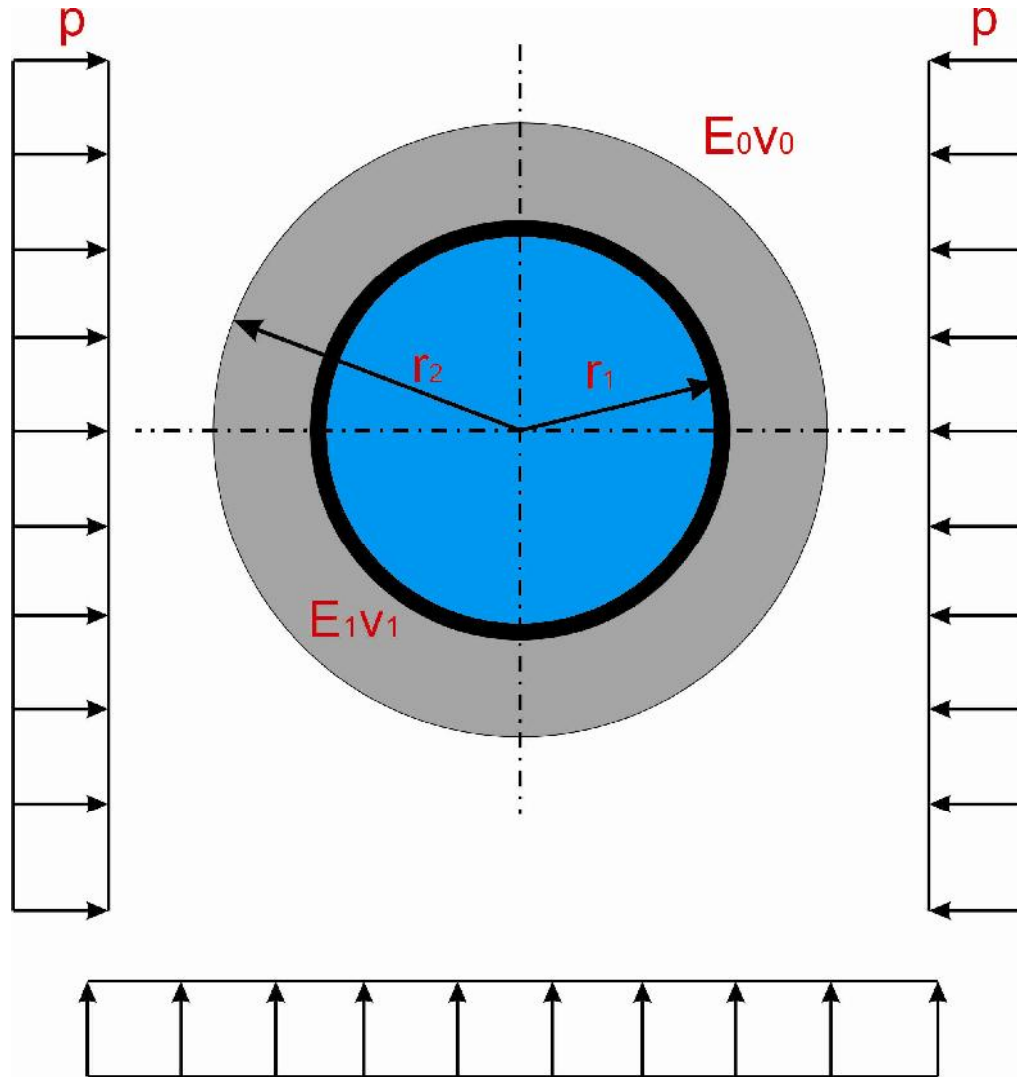
(131)

სადაც θ კუთხეა ღერძსა და საანგარიშო წერტილის მიმართულებას შორის; r - მანძილია წრის ცენტრიდან განსახილველ წერტილამდე. როცა $\theta=0$ მაშინ გამონამუშევარის კონტურზე ($r=r_1$) ნორმალური ძაბვები ტოლია

$$\sigma_\theta = \rho g H (3\lambda - 1) \tag{132}$$

როცა $\lambda < 1/3$ კონტურზე აღიძვრებიან გამჭიმავი ძაბვები. საჭიროა აღინიშნოს, რომ გაუმაგრებელი გამონამუშევარის გარშემოცველ მასივში ძაბვების განაწილება არა დამოკიდებული მისი დეფორმაციული თვისებებით და განისაზღვრება მხოლოდ საწყისი ძაბვების ველით, $\sigma_{x_0} / \sigma_{y_0} = \lambda$ თანაფარდობით და გეომეტრიული პარამეტრებით.

მუდმივი კვეთის წრიული რგოლით გამაგრებული ხერხელის შემთხვევაში სურათი იცვლება. გვირაბის დაშორებით მასივზე P და λP წნევების (მაგ. სეისმური დატვირთვების) ზემოქმედებისას (ნახ. 1.1.3.4) შესაძლებელია გამოყენებული იქნას *გ.ნ. სავინის* ამონახსნები:



ნახ. 1.134 მოსახვაზე დატვირთვის მოქმედების სქემა.

$$\sigma_{r/r=r_2} = P \left[\frac{1+\lambda}{2} (c_1 - 1) + \frac{1-\lambda}{2} (a_1 - 3c_3 - 1) \cos 2\theta \right];$$

$$\sigma_{\theta/r=r_1} = P \left[(1+\lambda)(2c_1 d - 1) - 2(1-\lambda)(3c_3 d R_1^2 - t a_1 R_1^{-2}) \cos 2\theta \right],$$

$$\sigma_{\theta/r=r_2} = P \left\{ \frac{1+\lambda}{2} [(4d-1)c_1 - 1] - \frac{1-\lambda}{2} [3(4d-1)c_3 + (1-4t)a_1 - 1] \cos 2\theta \right\}.$$

(133)

მასში შემავალი პარამეტრები განისაზღვრებიან შემდეგი ფორმულებით:

$$\chi_0 = 3 - 4\nu_0;$$

$$t = \frac{1 + \chi_0 \beta}{1 + \chi_1};$$

$$l = 1 - d;$$

$$S = 1 - t;$$

$$c_1 = \frac{R_1^2 (R_1^2 - 1)}{1 - 2d(1 - R_1^2)};$$

$$a_1 = \frac{R_1^2 (dR_1^6 + l)}{(t + SR_1^2)(dR_1^6 + l) + 3tR_1^2 d (R_1^2 - 1)^2};$$

$$c_3 = \frac{tR_1^2 (R_1^2 - 1)}{(t + 3R_1^2)(dR_1^6 + l) + 3tdR_1^2 (R_1^2 - 1)^2};$$

(134)

$$R_1 = \frac{r_1}{r_2};$$

$$\chi_1 = 3 - 4\nu_1;$$

$$\beta = \frac{E_1(1 + \nu_0)}{E_0(1 + \nu_1)};$$

$$d = \frac{1 - \beta}{1 + \chi_1}$$

(135)

ანალოგიური ფორმით შესაძლებელია მიღებული იქნას საანგარიშო ფორმულები გვირაბის გარედან და შიგნიდან წყლის წნევების, მოსახვის საკუთარი წონის და ა.შ. გათვალისწინებით.

პრაქტიკაში გავრცელებული წრიული კვეთის მოსახვის გაანგარიშების მეთოდთა ემყარება მრავალშრიანი რგოლის სქემას. ასეთი საანგარიშო სქემა ასახავს, ნაწილობრივ წრიული კვეთის სადაწნეო გვირაბების მუშაობას გარედან და შიგნიდან წყლის ჰიდროსტატიკური წნევების მოქმედებისას, მოსახვასა და გრუნტის მასივში მზარების გაჩენის, ბუნებრივი დაძაბული მდგომარეობისა და სეისმური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

ამოცანის ზუსტი ამონახსენი მიიღება დრეკადობის თეორიის წონასწორობის განტოლებებში რადიალური და კუთხური ცვლადების გაყოფით და ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების ზუსტი ამონახსენით. გაანგარიშების შედეგს წარმოადგენს გადაადგილებების ვექტორი, ძაბვების ტენზორი პოლარულ კოორდინატებში და მთავარი ნორმალური და მხები ძაბვები. აღნიშნულ ალგორითმზე დამუშავებული იქნა საანგარიშო პროგრამა.

გაუმაგრებელი და გამაგრებული დრეკადი რგოლის გარშემომცველ მასივში ძაბვების განაწილების ამოცანა, როგორც წესი იხსნება საერთო მეთოდით, რომლებიც დაიყვანება კომპლექსური ცვლადის ანალიტიკური ფუნქციების სასახდვრო ამოცანებზე. კომპლექსური პოტენციალების მოძებნა, შემდგომ ერთეული წრის გარე ან შიგა კონტურის კომფორმული გარდასახვით განსახილველ არეებზე და კოშის ტიპის ინტეგრალების ამონახსნები მიღებული იქნა **გ. ვ. კოლოსოვ - ნ. ი. მუსხელიშვილის** მიერ.

არაწრიული გვირაბების მოსახვისათვის, რომლებიც ამაგრებენ წრფივად დეფორმირებად, ერთგვაროვან და იზოტროპულ მასივს, საკონტაქტო ზედაპირზე დეფორმაციათა თავსებადობის პირობის საფუძველზე დაყრდნობით ნ.ნ. ფოტიევას მიერ დამუშავებული იქნა გაანგარიშების

მეთოდის (რომელიც ეყარება წინა მიმართულებას). კომფორტული გარდასახვის ფუნქციების კოეფიციენტები, რომლებიც ახასიათებენ მოსახვის კვეთის ფორმას განისაზღვრება წინასწარ გრაფიკული მეთოდი ან გამოითვლება პროგრამულად.

1.14 ბზარებიანი ბეტონის მოსახვა კლდოვან მასივის სიღრმეში განვითარებული ბზარებით.

თუ ბეტონის მოსახვა რადიალური მიმართულებით შეიცავს თანაბარგანაწილებულ ბზარებს, მაშინ წნევა მოსახვაზე ტოლი იქნება:

$$P_c = \frac{b}{c} P \tag{1.36}$$

კლდოვან მასივის ზედაპირზე ძაბვები ტოლი იქნება:

$$\sigma_r = -\sigma_t = \frac{b}{c} P \tag{1.37}$$

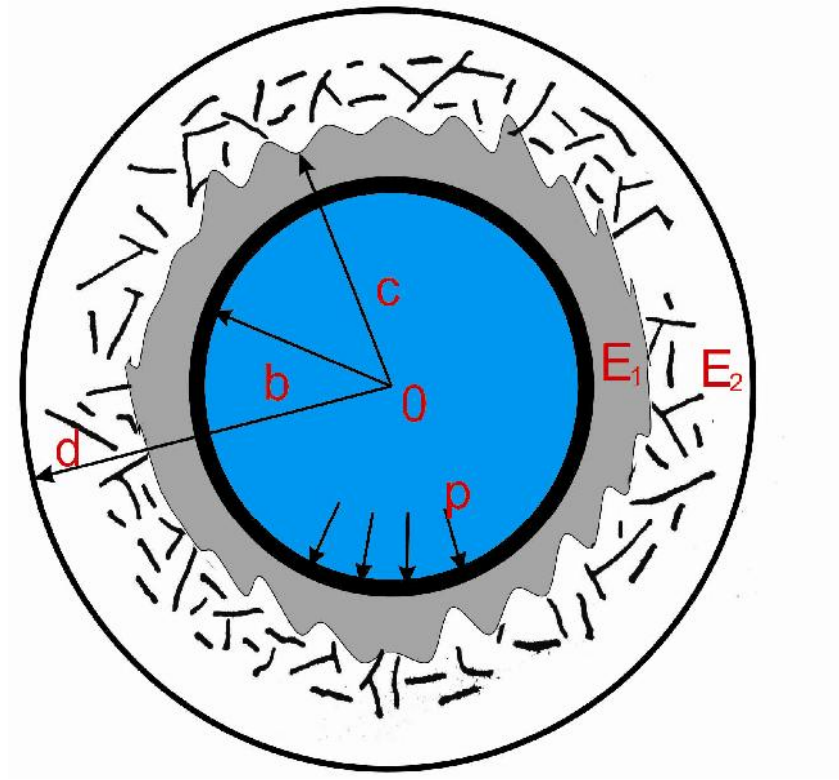
$$P_c = \frac{b}{c} P \tag{1.38}$$

$$\sigma_t = 0 \tag{1.39}$$

$$\sigma_{rc} = P_c = \frac{b}{c} P \tag{1.40}$$

კლდოვან მასივის ზედაპირზე რადიალური ძაბვები განისაზღვრება ქვემოთ მოცემული ტოლობებით (ნახ. 1.15). ბზარებიანი კლდოვანი მასივის სიღრმის ნემისმიერ წერტილში $R < d$ დიაპაზონში ძაბვები ტოლი იქნება:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 0 \\ \sigma_r &= \frac{b}{R}P\end{aligned}\tag{141}$$



ნახ. 1.15 გვირაბი მოსახვით რადიალური ბზარებით არაბზარებიანი მასივის ზედაპირის საზღვარზე:

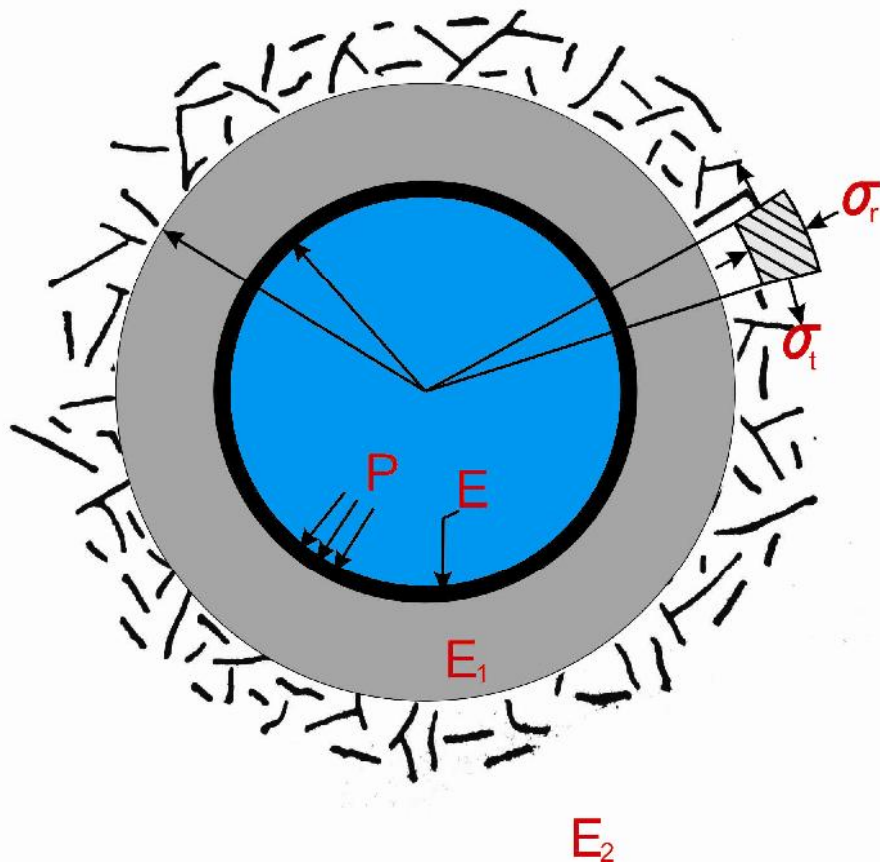
$$P_d = \frac{b}{d}P\tag{142}$$

ხოლო არაბზარებიანი მასივის სიღრმეში $d < R < \infty$:

$$\sigma_r = -\sigma_t = P \frac{b}{d} \frac{d^2}{R^2} = \frac{bd^2}{R^2}P\tag{143}$$

1.1.5 სადაწნეო გვირაბები და შახტები ლითონის მოსახვით.

არაბზარებიან მასივში (ნახ. 1.5 ბ) გვირაბის შიგა ზედაპირზე მოქმედებს P ჰიდროსტატიკური წნევა. ფოლადის მოსახვიდან ბეტონის ზედაპირზე გადაეცემა $P_b < P$ წნევა, ხოლო ბეტონის ზედაპირიდან კლდოვანი მასივს $P_c < P$.



ნახ. 1.5 ბ. გვირაბი ლითონის მოსახვით.

ფოლადის მოსახვის დრეკადი გადაადგილება ტოლია:

$$u_b = \frac{(P - P_b)b^2}{Ee} = P(1 - \lambda_1) \frac{b^2}{Ee} \quad (144)$$

სადაც: - ლითონის დრეკადობის მოდულია; μ - მოსახვის სისქვა;

$$P_b = \lambda_1 P \quad (145)$$

ფოლადის მოსახვისა და ბეტონის ზედაპირის დრეკად გადაადგილებათა, ასევე ბეტონის ზედაპირისა და კლდოვანი მასივის გადაადგილებათა ტოლობების საფუძველზე მიიღება [1]:

$$\lambda_1 = \frac{P_b}{P_c} = \frac{b^2 / Ee}{(b^2 / Ee) + [b / m_1 E_1 (c^2 - b^2)] [(m_1 - 1)(b^2 - \lambda_2^* c^2) + (m_1 + 1)(1 - \lambda_2^*) c^2]}$$

$$\lambda_2^* = \frac{P_c}{P_b} = \frac{2b^2 / E_1 (c^2 - b^2)}{(m_2 + 1) / m_2 E_2 + [(m_1 - 1)c^2 + (m_1 + 1)b^2] / m_1 E_1 (c^2 - b^2)} \quad (146)$$

ბზარებიან მასივში რადიალური ბზარებით ფოლადის მოსახვის დრეკადი გადაადგილება ტოლია:

$$u_b = \frac{(P - P_b)b^2}{Ee} = P(1 - \lambda_3) \frac{b^2}{Ee}, \quad (147)$$

$$P_b = \lambda_3 P$$

ხოლო ბეტონის მოსახვისა და კლდოვან მასივში:

$$u_b = -\frac{(P_b - P_d)(b - d)}{2E_1} + P_d \frac{d(m_2 + 1)}{m_2 E_2} \quad (148)$$

აქ d რადიალური ბზარების სიგრძეა. უწყვეტობის პირობის საფუძველზე მიიღება:

$$\lambda_3 = \frac{b^2 / Ee}{(b^2 / Ee) + [(d^2 - b^2) / 2dE_1] + [(m_2 + 1)b / m_2 E_2]} \quad (149)$$

1.1. 6. ჰორიზონტალური ზედაპირის ქვეშ მყოფი გვირაბის გაანგარიშება.

ერთგვაროვანი და იზოტროპული მასივის არსებობისას მიიღება, რომ (-X) სიღრმეზე მასივი განიცდის საკუთარი წონის მოქმედებას.

მასში გაყვანილი გვირაბი განიცდის ვერტიკალური ძაბვების ზემოქმედებას.

$$\gamma_b(-X) = \sigma_v = P^* \quad (1.50)$$

სადაც: P^* საწყისი ძაბვებია მასივში. ჰორიზონტალური მიმართულებით განვითარებული ძაბვები ტოლი იქნება:

$$\sigma_H = \gamma_b(-X), \quad (1.51)$$

ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედების შედეგად გვირაბის ცენტრიდან X მანძილის დაშორებით ტანგენციური ძაბვები ტოლი იქნება:

$$\sigma_t = P \left(\frac{R}{X} \right)^2 = -\sigma_r, \quad (1.52)$$

სადაც: σ_r - რადიალური ძაბვებია.

(-X) სიღრმეზე წონასწორობის პირობას ექნება სახე:

$$-\sigma_t \leq \sigma_H$$

ან

$$P \left(\frac{R}{X_1} \right)^2 < R\gamma_R(H - X_1)_r \quad (1.53)$$

$X_1 = R/6$ და $P = \lambda\gamma H$ აღნიშვნების შემოტანის შემდეგ წონასწორობის პირობას საბოლოოდ ექნება შემდეგი სახე:

$$\lambda \leq \left(\frac{H}{R} \right)^2 \gamma \left(\frac{\gamma R}{\gamma} \right)_r \cdot \left(\frac{n-1}{n^3} \right) \quad (1.54)$$

λ დამოკიდებულია H/R -ზე. იმ პირობით, რომ (-X) სიღრმეზე მასივის შეტივტივების (ამოწვევის) შესაძლებლობა არ არსებობს და უსაფრთხოების კოეფიციენტი უდრის 1, მიიღება:

$$P = \lambda \gamma H \leq \gamma_R H, \quad \lambda \leq (\gamma_R / \gamma), \quad (1.55)$$

რომელიც უფრო მკაცრია ვიდრე (1) პირობა.

1.2. ამოცანების გადაწყვეტა კლასიკური ამონახსნების მიხედვით.

1.2.1. სადაწნეო გვირაბების თავზე არსებული მინიმალურად აუცილებელი სიღრმის გაანგარიშება.

ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში სადაწნეო დერივაციული გვირაბების პროექტირებისას მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს მინიმალური ჩაღრმავების განსაზღვრა. წარმოდგენილი საკითხი მოიცავს აგრეთვე სათანაბრებელი რეზერვუარების არსებობას და ჰიდროდინამიკური წნევების გავლენას გვირაბში [1,2,3].

სიღრმეზე განთავსებული $2R$ დიამეტრის მქონე გვირაბში (ნახ. 1.2.1) ჰიდროდინამიკური წნევა უსაფრთხოების უზრუნველყოფის პირობის მიხედვით შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას გამოსახულებით:

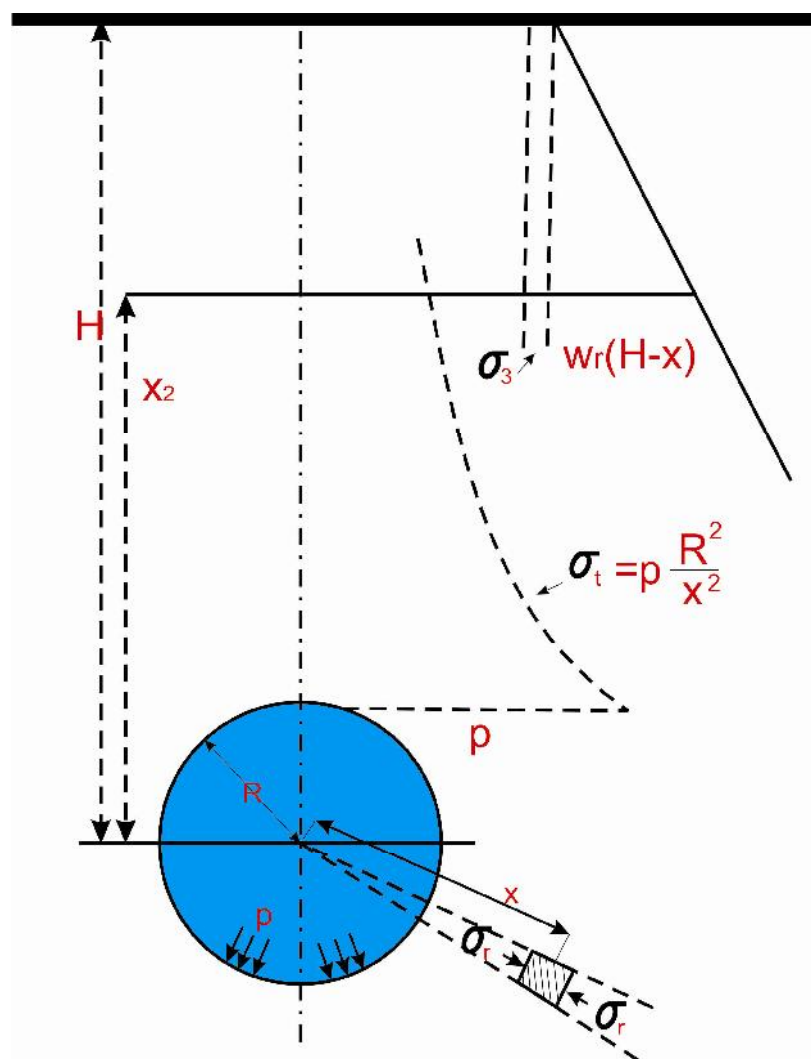
$$P/\gamma = \lambda H \quad (1.56)$$

სადაც: P - ჰიდროდინამიკური წნევაა; γ - წყლის მოცულობითი წონაა; λ - უსაფრთხოების კოეფიციენტი. ემპირიული შეფასებით P -ს უდიდესი დასაშვები მნიშვნელობა უნდა პასუხობდეს პირობას:

$$P/\gamma < 0.5H, \quad (1.57)$$

საიდანაც მიიღება, რომ $\lambda < 0.5$. თუმცა ზოგიერთი მოქმედი სადაწნეო გვირაბი დაპროექტებული იქნა მნიშვნელობებით $\lambda=1$ და $\lambda=2$ -ც კი. ასეთი მიდგომა დაფუძნებული იყო უხეშ დაშვებაზე.

კერძოდ, გვირაბის ზევით არსებული მასივის ბლოკის (ზომებით: სიგანე $B=2R$; სიმაღლე $E H$) წონა მეტი უნდა იყოს გვირაბის შესაბამის შიგა ზედაპირზე ($2R \times 1$) მოქმედ ამომგდებ ძალაზე. ამ დროს გაანგარიშებისას მიღებულია ხუთჯერადი მარაგი მდგრადობაზე.



ნახ. 12.1 გვირაბების თავზე მინიმალურად აუცილებელი სიღრმის გაანგარიშების სქემა.

ქვემოთ მოცემულია გვირაბების მდგრადობის ზოგიერთი კრიტერიუმი. ზოგიერთი ამერიკული სადაწნო გვირაბი, რომლებიც დაპროექტებულნი იქნენ მოკეთების გარეშე (ხაასის და ნანტახალას გვირაბები) მიღებული იყო, რომ $P/\gamma=H$, ხოლო ბზარებიდან მიმდინარე ფილტრაცია არ აღწევს თავისუფალ ზედაპირზე.

სიდნეის წყალმომარაგების გვირაბისათვის მიღებული იყო, რომ $P/\gamma=2.4 H$. ამ შემთხვევაში ჩაღრმავების შესაბამისი მასივის წონა ტოლია ამომგდები ძალისა, ხოლო მარაგი საერთოდ არ იყო მიღებული. ასეთი მიდგომა იყო მიღებული:

გლენ-მორისტონის გვირაბის (ლივიშის ჰიდროკვანძი) სადაწნო დერივაციული გვირაბების პროექტირებისას, რომელიც ლითონის მოპირკეთების გარეშე იყო და ითვლებოდა ყველაზე მაღალდაწნევიანად ევროპაში და

აშფორდის წყალმომარაგების კომუნალური სისტემის გვირაბის პროექტში, რომელიც გაყვანილი იქნა ლონდონის თიხოვან მასივში.

- ტერცაგი ეთანხმებოდა $P/\gamma=2H$ კრიტერიუმს.

სპრეის ჰიდროკვანძის (კალგარი კანადა) მაღალდაწნევიან ($H=65.8$ მ) გვირაბში მიღებული იყო $P/\gamma=371.0$ მ, ანუ P/γ ხუთჯერ მეტია.

1.2.2. ფერდის სიახლოეს არსებული სადაწნო გვირაბის გაანგარიშება.

ჰორიზონტისადმი α კუთხით დახრილი ფერდის არსებობისას (ნახ.2) გაანგარიშება სწარმოებს ზემოთმოყვანილი გვირაბის ანალოგიურად.

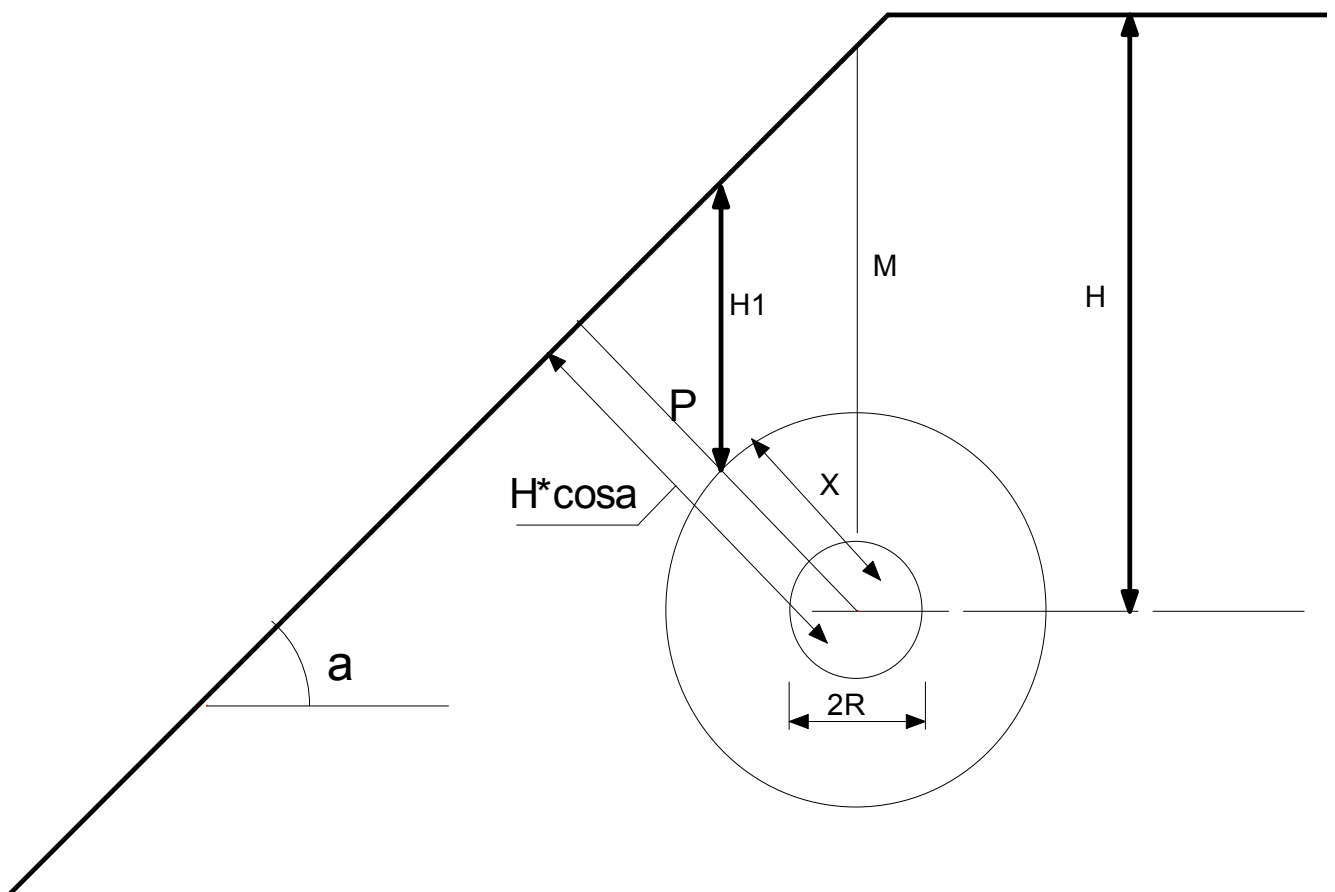
განიხილვა ძაბვები გვირაბის ცენტრიდან X მანძილზე დაშორებულ წერტილში, ამ დროს $XH = H \cos \alpha / n$, სადა n - თავისუფლად შერჩეული პარამეტრია.

ბუნებრივი ძაბვები α კუთხით დახრილი ფერდის არსებობისას ტოლია:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_z + \sigma_{H1}}{2} - \frac{\sigma_z - \sigma_{H1}}{2} \cos 2\alpha, \quad (158)$$

ხოლო წერტილში:

$$\sigma_\alpha = \frac{\gamma_R}{2} \left\{ H \frac{(n-1)}{n} (1 + K_1) \right\} - \frac{\gamma_R H (n-1)}{n} (1 - K_1) \cos 2\alpha \quad (159)$$



ნახ.2. ფერდის ახლოეს არსებული სადაწნეო გვირაბის საანგარიშო სქემა.

ტანგენციური დაბვები ტოლი იქნება:

$$\sigma_t = \frac{PR^2}{X^2} = P \frac{R^2 n^2}{H^2 \cos^2 \alpha} = \lambda_3 \gamma \frac{HR^2 n^2}{H^2 \cos^2 \alpha_r} \quad (1.60)$$

წერტილში უსაფრთხო დაბვების არსებობისათვის საჭიროა სრულდებოდეს პირობა:

$$\sigma_\alpha \geq |\sigma_t|. \quad (1.61)$$

2. ფილტრაციის ამოცანების ამოხსნის ძირითადი მეთოდები და ალგორითმი სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

2.1 სტაციონალური ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნა ორ განზომილებიანი არეებისათვის

ფილტრაციული ნაკადის სტაციონალური მოძრაობა ორ განზომილებიანი არეებისათვის აისახება კვაზიჰარმონიული დიფერენციალური განტოლებით, რომელსაც ორ განზომილებიანი არეებისათვის ააქვს სახე:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2.1)$$

სადაც: ϕ - ფილტრაციული ნაკადის წნევა; K_x , K_y - ფილტრაციის კოეფიციენტებია ანიზოტროპიის დერძების მიმართ; Q - ფილტრაციული ნაკადის ხარჯია.

ზოგადად (2.10) განტოლების ამოხსნა სრულდება შემდეგი სასაზღვრო პირობებისათვის:

- S_1 ზედაპირზე - $\phi = \phi_0$;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2.2)$$

S_2 ზედაპირზე -

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) l_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) l_y + q = 0 \quad (2.3)$$

სადაც: 4_x და 4_y ზედაპირის ნორმალის მიმართულების კოსინუსებია; q – განსახილველი არის შუა ზედაპირზე გამავალი ნაკადის ხარჯია. S_1 და S_2 ზედაპირების გაერთიანება ქმნის განსახილველი არის სრულ ზედაპირს. თუ $q=0$, მაშინ მეორე სასაზღვრო პირობა ღებულობს სახეს:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) l_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) l_y = 0 \quad (2.4)$$

უკანასკნელი წარმოადგენს შესაბამის ზედაპირზე წყალუკონადობის პირობას, ანუ

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0. \quad (2.5)$$

ექსტრემუმის ამოცანის თანახმად (2.10) განტოლების ამოხსნა (2.11) და (2.12) სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით შეესაბამება მოცემული ფუნქციონალის მინიმიზაციას:

$$\chi = \iiint_v \left[\frac{1}{2} \left\{ K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right\} - Q\phi \right] dx dy + \int_s q \phi ds \quad (2.6)$$

წარმოდგენილი ფუნქციონალის მინიმიზაცია საჭიროა

მოხდეს განსახილველი არის კვანძური წერტილების მნიშვნელობათა ϕ სიმრავლეზე (2.11) და (2.12) სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით. ელემენტების უცნობი ϕ ფუნქცია მის კვანძურ მნიშვნელობებს უკავშირდება ფორმულით:

$$\{\phi\} = [N_i, N_j, \dots, N_n] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} = [N] \{\phi\}^e \quad (2.7)$$

სადაც: $\{\phi\}$ და $\{\phi\}^e$ ფუნქციის კვანძურ მნიშვნელობათა ვექტორია; $[N]$ -ელემენტის ფორმის ფუნქციაა, რომელიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს და უწყვეტობის პირობებს ელემენტის ფარგლებში.

მთელი სისტემის ფუნქციონალის მინიმიზაციის შედეგად ვღებულობთ:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = 0 = [H] \{\phi\} + \{F\} = 0 \quad (2.8)$$

$$H_{ij} = \Sigma h_{ij}^e \quad (2.9)$$

სადაც: $[H]$ - სისტემის ფილტრაციული სიხისტის მატრიცაა და მიიღება ელემენტების სიხისტის მატრიცათა გაერთიანებით,

$$h_{ij}^e = \int_v [K_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}] dx dy \quad (2.10)$$

$\{F\}$ - სისტემის კვანძებში გამავალი ნაკადის ხარჯია,

$$F_j = \Sigma F_i^e$$

(2.11)

$$F_i^e = \int_v QN_i dV + \int_s qN_i dS$$

$$dV = dx dy dz.$$

2.2 სადაწნეო გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრების განსაზღვრა.

2.2.1 მოსახვიდან იზოტროპულ მასივში განვითარებული ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრა.

სადაწნეო გვირაბიდან გარემომცველ იზოტროპულ მასივში ფილტრირებული წყლის ხარჯი განისაზღვრება დიუზის კლასიკური ამონახსენით [10] :

$$q = 2\pi K_\phi H / Ln(R_\phi / r) \quad (2.12)$$

სადაც q – გვირაბის 1 გრძ. მ-დან ფილტრირებული წყლის ხარჯია;

K_ϕ - მასივის ფილტრაციის კოეფიციენტი; H - მოქმედი დაწნევა;

r - გვირაბის რადიუსია; R_ϕ - ფილტრაციული არის რადიუსია;

ფილტრაციის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$H = q \cdot Ln(R_\phi / r) / (2\pi K_\phi) \quad (2.13)$$

გვირაბიდან წყლის ფილტრაციის დროს განიხილება სამი არე: მოსახვა, ცემენტაციური ზონა (ფარდა) და ძირითადი მასივი. ამ შენთხვევაში ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობათა შეჯამების მეთოდის გამოყენებით, ფილტრაციის საერთო წინააღმდეგობა შედგება თანმიმდევრულად დაკავშირებულ წინააღმდეგობათა ჯამისაგან:

$$H = H_c + H_{g.c} + H_m \quad (2.14)$$

საბოლოოდ დაწნევის კარგეები განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$H = \frac{q}{2\pi} \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_c} + \frac{\ln \frac{R_{g.c}}{r_2}}{k_{g.c}} + \frac{\ln \frac{R_\phi}{R_{g.c}}}{k_\phi} \right) \quad (2.15)$$

სადაც r_2 და r_1 გვირაბის მოსახვის გარე და შიგა რადიუსებია; $R_{g.c}$ - ცემენტაციური ფარდის; $k_c, k_{g.c}, k_m$ - მოსახვის, ცემენტაციური ფარდის და მასივის ფილტრაციის კოეფიციენტებია შესაბამისად.

ფილტრაციული ნაკადის ჯამური ხარჯი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \frac{2\pi LH}{\frac{1}{k_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{g.c}} \ln \frac{R_{g.c}}{r_2} + \frac{1}{k_\phi} \ln \frac{R_\phi}{R_{g.c}}} \quad (2.16)$$

სადაც L - გვირაბის ან მისი უბნის სიგრძეა.

2.2.2 მოსახვაში არსებული ბზარებიდან იზოტროპულ მასივში განვითარებული ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრა.

არაბზარმდეგი (ბზარების ლიმიტირებული პარამეტრებით) მოსახვის მქონე სადაწნეო გვირაბიდან ფილტრაციული ხარჯი ბეტონიდან, როგორც მცირე სიდიდე ბზარებიდან განვითარებული ხარჯის მნიშვნელობასთან შედარებით, მხედველობაში არ მიიღება.

იმ შემთხვევაში, თუ ცემენტაციური ფარად არ იქნება გათვალისწინებული დაწნევის კარგვები განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$H = H_c + H_m \quad (2.17)$$

სადაც H_m განისაზღვრება (2.8) თი.

ბზარის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა H_c დამოკიდებულია ბზარში წყლის ჰიდრაულიკურ რეჟიმზე, რომელიც ძირითადად ლამინარულია. უკანასკნელ შემთხვევაში ფილტრაციული ხარჯი მიიღება დარსის კანონის საფუძველზე:

$$q = n_T k_T \frac{H_T}{h_c} \quad (2.18)$$

სადაც n_T - გვირაბის მოსახვის პერიმეტრზე განვითარებული ბზარების რაოდენობაა; k_T - ბზარების წყალჟონვადობის კოეფიციენტი, რომელიც გვირაბის სგრძ. მ-ზე გასული წყლის ხარჯია დაწნევის გრადიენტის $\frac{H_T}{h_c} = 1$ მ³/(წმ.მ) მნიშვნელობის დროს.

ბეტონში არსებული ბზარისათვის წყალჟონვადობის კოეფიციენტისათვის მიღებულია მისი საშუალო მნიშვნელობა [10]:

$$k_T = 7 \cdot 10^4 \cdot a_0^3 \quad (2.19)$$

სადაც a_0^3 - ბზარის გახსნის სიგანეა ბეტონში.

(2.13) დან განისაზღვრება H_T დაწნევის კარგები ბზარში:

$$H_T = q \cdot h_c / (n_T k_T) \quad (2.20)$$

სრული ჰიდრაულიკური დანაკარგები ბზარებისა და მასივისათვის განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$H = q \left(\frac{h_l}{n_T k_{Tc}} + \frac{\ln \frac{R_\phi}{r_2}}{2\pi k_\phi} \right) \quad (2.21)$$

სრული ფილტრაციული ხარჯი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \frac{LH}{\frac{h_l}{n_T k_{Tc}} + \frac{\ln \frac{R_\phi}{r_2}}{2\pi k_\phi}} \quad (2.22)$$

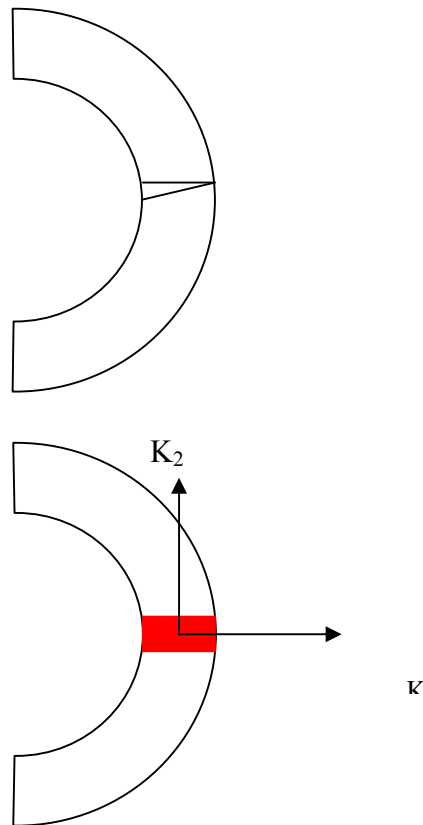
ანიზოტროპული მასივისა და ცემენტაციური ფარდის არსებობისას წარმოდგენილი გაანგარიშებები უნდა ჩატარდეს სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

გვირაბის მოსახვაში ბზარებისა და ნაკერების სასრულ - ელემენტული მოდელი წარმოდგენილი იქნა სპეციალური “ნაკერის ელემენტი“-ს გამოყენებით, რომელსაც ააქვს ანიზოტროპიის თვისება [50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60] (ნახ. 2.22).

ელემენტი გვირაბის ტანგენციური მიმართულებით არ მუშაობს, ხოლო რადიალური მიმართულებით მისი ფილტრაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება ხარჯის უწყვეტობის პირობის მიხედვით:

$$K_{\phi,e} = \frac{K_{\phi,c} a_c}{a_e} \quad (2.23)$$

სადაც: $K_{\phi,e}$ და $K_{\phi,c}$ - ელემენტისა და ნაკერის ფილტრაციის კოეფიციენტებია, ხოლო a_e , a_c - - ელემენტისა და ნაკერის სიგანეებია შესაბამისად;



ნახ. 2.2. 2. ბზარის სასრულ- ელემენტული მოდელი

2.2.3 ანიზოტროპულ მასივში უდაწნეო ფილტრაციის პარამეტრების განსაზღვრა.

ფილტრაცია კლდოვან მასივში განიხილება დარსის კანონის ფარგლებში და ორ განზომილებიანი მასივისათვის სასრული ელემენტების მეთოდების გამოყენებით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kx \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 . \quad (2.24)$$

აღნიშნული განტოლების ამოხსნა ექვივალენტურია მოცემული ფუნქციონალის მინიმიზაციისა:

$$\Phi = \int \frac{1}{2} \left[Kx \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right] dx dy, \quad (2.25)$$

სადაც: Kx, Ky - ფილტრაციის კოეფიციენტებია ღერძების გასწვრივ;
H - დაწნევის ფუნქციაა; V - ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების არეა.

ფუნქციონალის მინიმიზაციის დროს იქმნება უცნობი **Hi** ფუნქცია, რომელიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს.

უდაწნეო ფილტრაციის ამოცანის ამოსახსნელად კლდოვან მასივში გამოიყენება ლოკალური ვარიაციის მეთოდი, რომლის მიხედვით გამოსაკვლევი არისათვის საძიებელ ფუნქციას ენიჭება საწყისი მიახლოებითი მნიშვნელობა. **Hi** ფუნქციის ვარიაციის წარმოებით ყველა “ლოკალურ უბნებში” განსაზღვრული ბიჯის მიხედვით გამოითვლება ფუნქციონალის მნიშვნელობა, ისე, რომ კმაყოფილდებოდეს ამოცანის სასაზღვრო პირობები. როდესაც ფუნქციონალი აღარ შემცირდება, ანუ ვარიაციის მოცემული ბიჯის მიხედვით სისტემა აღარ მოახდენს რეაგირებას არც ერთ “ლოკალურ” არეზე, ვარიაციის ბიჯი მცირდება. იტერაციული გაანგარიშება მიმდინარეობს ფუნქციონალის ანალიზი ფონზე და გრძელდება წინასწარ მოთხოვნილი სიზუსტის დაკმაყოფილებამდე.

ამოცანის ამოხსნის შედეგად გამოსაკვლევი არეში განისაზღვრება ფილტრაციული ნაკადის ძირითადი პარამეტრები: დაწნევები, დაწნევის გრადიენტები, სიჩქარეები, ხარჯები და ფილტრაციული მოცულობითი

ძაღები. მათი გაანგარიშება მნიშვნელოვანია ერთის მხრივ სუფოზიური პროცესებისა და წყლის კარგების, მეორეს მხრივ მასივსა და ნაგებობაზე ძაღების განსაზღვრისათვის.

3.სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი.

3.1 სასაზღვრე ელემენტების მეთოდის ძირითადი ალგორითმი.

სასაზღვრე ელემენტების მეთოდი ამტარებს დამოკიდებულებებს განსახილველი არის შიგნით და ის კონტურზე საძიებელ ფუნქციებს შორის. მდენად, დიფერენციალური განტოლებები, რომელთა ამონახსნები წარმოადგენენ უცნობ ფუნქციებს არის შიგნით, იცვლებიან ექვივალენტური ინტეგრალური განტოლებებით, რომლებშიც უცნობი ფუნქციები ასახავენ მხოლოდ არის გარე კონტურს. ზოგადად, ასეთი განტოლებები წარმოადგენენ ინტეგრალურ განტოლებებს.

მდენად, სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი, რომელიც ზემოხსენებული განტოლებების ამონახსნების რიცხვით რეალიზაციას წარმოადგენენ, აგრეთვე იწოდებიან სასაზღვრო ინტეგრალური განტოლებების მეთოდად.

სასაზღვრო ამოცანათა ამოხსნაში, სინგულარილ ფუნქციათა სხვადასხვა კლასისათვის, დიდი როლი შეიტანა მრავალმა მკვლევარმა, მათ შორის აღსანიშნავია: ე. ბეტი, ვ. ვოლტერი, ს. ლაპუნოვი, კ. ნეიმანი, ა. კუანკარე, ს. სომილიანი, ე. ფრედგოლმი, ს. მიხლიანი და სხვა. მ მხრივ აღსანიშნავია ქართველ მათემატიკოსთა დიდი ღვაწლი, მათ შორის: ნ. მუსხელიშვილის, ი. ვეკუას, ვ. კუპრაძის, ა. გორგიძის და ა. რუხაძის. განსაკუთრებით დიდ აღიარებას იმსახურებენ ნ. მუსხელიშვილის შრომები რომელიც გამოქვეყნდა ჩვენი საუკუნის 30-40-იან წლებში და ეძღვნებოდა სასაზღვრო ინტეგრალური განტოლებების კვლევას დრეკადობის თეორიის ორგანზმილებიანი ამოცანის ფარგლებში. ხსენებული განტოლებების რიცხვითი ამონახსნები მიღებულ იქნა მისი მოწაფეების – ა. გორგიძის და ა. რუხაძის მიერ. აღნიშნულ ამონახსნებში წარმოდგენილია სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის ყველა კომპონენტი.

სასაზღვრო ინტეგრალური რიცხვითი ამონახსენი, რომელიც ეხებოდა სიბრტყეში ორი ჭრილის არსებობას, მიღებული იქნა ც.ლევინისა და სს.მიხლინის მიერ. აღნიშნული არე კომფორტულად იქნა ასახული წრიულ რგოლზე, რომლისთვისაც გამოიყენებოდა გრინის ფუნქციები: ელექტრონული მანქანების გაჩენამ შეამსუბუქა ხსენებული განტოლებათა ამოხსნის სირთულე. აღნიშნულმა კვლევებმა ინტენსიური განვითარება ჰპოვა ჩვენი საუკუნის 60-იან წლებში. ამ პერიოდისათვის გაჩნდნენ საზღვარგარეთული მეცნიერები: ფ. რიცოს, მ. ჯეუსონის, ტ. კრუზიას, დ. შიპის, კ.ბრეიბიას, ს. კუკერის. პ. ბენერჯის, რ. ბატერფილდის და სხვათა მეტად მნიშვნელოვანი შრომები. აღნიშნულ შრომებში განიხილებოდნენ საკითხები, რომლებიც ეძღვნებოდნენ გაანგარიშების მაღალ სიზუსტესა და საიმედოობას, აგრეთვე კვლევებს, ზედაპირის სხვადასხვა განსაკუთრებული წერტილების არსებობისას.

ქვემოთ მოცემულია სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის ძირითადი ალგორითმი ფიქტიუ დატვირთვათა და სასაზღვრო ინტეგრალების პირდაპირი მეთოდის ფორმებით.

3.2 ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდი.

კვლევის ამოცანის ამონახსნით, რომელიც განიხილავს შეყურსული ძალის მოქმედებას უსასრულო არეში, გადადგილებები და ძაბვები ზოგადად ტენტორული სახით წარმოდგინდება შემდეგნაირად:

$$U_i(X_s) = \int U_{ki}(X_s - \varphi_s) F_K(\varphi_s) dV \quad (3.1)$$

$$\delta_{ij}(X_s) = \int \delta_{kij}(X_s - \varphi_s) F_K(\varphi_s) dV \quad (3.2)$$

სადაც: $F_K(\varphi_s)$ - ზოგადად განაწილებული მოცულობითი ძალებია

X_s, φ_s - ზოგადად, გლობალური და ლოკალური კოორდინატებია.

კელვინის ამონახსნის მიხედვით, შესაძლებელია გასაზღვრული იქნას გადადგილებები და ძაბვები განსახილველი არის შემოფარგვლელი კონტურის ელემენტებისათვის. ამდენად, ნებისმიერი i -ური ელემენტისთვის გადადგილებებისა და ძაბვების კომპონენტები წარმოდგინდებიან კონტურის შემოფარგვლელ ცალკეულ ელემენტებში მოქმედი ფიქტიური ძალების მიერ გამოწვეული გადადგილებებისა და ძაბვების ჯამის სახით. საბოლოოდ, სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის საშუალებით (ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდის ფორმით), გადადგილებები და ძაბვები განისაზღვრებიან ფორმულით:

$$\begin{cases} U_s^i = \sum_{J=1}^N B_{SS}^{ij} P_S^J + \sum_{J=1}^N B_{SN}^{ij} P_N^J \\ U_N^i = \sum_{J=1}^N B_{NS}^{ij} P_S^J + \sum_{J=1}^N B_{NN}^{ij} P_N^J \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} \delta_s^i = \sum_{J=1}^N A_{SS}^{ij} P_S^J + \sum_{J=1}^N A_{SN}^{ij} P_N^J \\ \delta_N^i = \sum_{J=1}^N A_{NS}^{ij} P_S^J + \sum_{J=1}^N A_{NN}^{ij} P_N^J \end{cases} \quad (3.4)$$

სადაც: $U_N^i, U_S^i, \delta_N^i, \delta_S^i$ - გადადგილებებისა და ძაბვების კომპონენტებია i - ურ ელემენტებში; P_S^J, P_N^J - ფიქტიური დატვირთვებია კონტურის ელემენტებისთვის; $B_{SS}^{ij}, \dots, B_{NN}^{ij}, A_{SS}^{ij}, \dots, A_{NN}^{ij}$ - გავლენის სასაზღვრო კოეფიციენტებია გადადგილებებისა და ძაბვებისათვის შესაბამისად:

$$B_{SS}^{ij} = \frac{1}{2G} [(3 - 4\nu) \cos \alpha \cdot \bar{F}_1 - \bar{Y} (\sin \alpha \cdot F_2 - \cos \alpha \cdot \bar{F}_3)] \quad (3.5)$$

$$B_{SN}^{ij} = \frac{1}{2G} [(3 - 4\nu) \sin \alpha \cdot \bar{F}_1 - \bar{Y} (\cos \alpha \cdot F_2 - \sin \alpha \cdot \bar{F}_3)] \quad (3.6)$$

$$B_{NN}^{ij} = \frac{1}{2G} [(3 - 4\nu) \cos \alpha \cdot \bar{F}_1 + \bar{Y} (\sin \alpha \cdot F_2 - \cos \alpha \cdot \bar{F}_3)] \quad (3.7)$$

$$B_{NN}^{ij} = \frac{1}{2G} [(3-4V) \cos \alpha \cdot \bar{F}_1 + \bar{Y} (\sin \alpha \cdot F_2 - \cos \alpha \cdot \bar{F}_3)] \quad (3.8)$$

$$A_{SS}^{ij} = [-2(1-V)(\sin 2\alpha \cdot \bar{F}_2 - \cos 2\alpha \cdot \bar{F}_3) - Y(\sin 2\alpha \cdot F_4 + \cos 2\alpha \cdot \bar{F}_5)]$$

$$A_{SN}^{ij} = [(1-2V)(\cos 2\alpha \cdot \bar{F}_2 + \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_3) - Y(\cos 2\alpha \cdot F_4 - \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_5)] \quad (3.5)$$

$$A_{NS}^{ij} = [F_2 - 2(1-V)(\cos 2\alpha \cdot \bar{F}_2 + \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_3) - Y(\cos 2\alpha \cdot F_4 - \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_5)]$$

$$A_{NN}^{ij} = [F_2 - 2(1-V)(\cos 2\alpha \cdot \bar{F}_2 + \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_3) - Y(\cos 2\alpha \cdot F_4 - \sin 2\alpha \cdot \bar{F}_5)]$$

$$A_{NN}^{ij} = [F_3 - (1-2V)(\sin 2\alpha \cdot \bar{F}_2 - \cos 2\alpha \cdot \bar{F}_3) + Y(\cos 2\alpha \cdot F_4 + \cos 2\alpha \cdot \bar{F}_5)]$$

აქ: \bar{F}_1 - კელვინის ამოცანის ფუნდამენტური ამონახსნია ხოლო F_2, F_3, F_4, F_5 - მისი წარმოებულებია:

$$\bar{F}_1 = f(\bar{x}, \bar{y}) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\bar{y} \left(\arctg \frac{\bar{y}}{\bar{x}-a} - \arctg \frac{\bar{y}}{\bar{x}+a} \right) - (\bar{x}-a) \cdot \operatorname{en} \sqrt{(\bar{x}-a)^2 + \bar{y}^2} + (\bar{x}+a) \operatorname{en} \sqrt{(\bar{x}+a)^2 + \bar{y}^2} \right] \quad (3.9)$$

$$F_2 = f_{,\bar{x}} = +\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\operatorname{en} \sqrt{(\bar{x}-a)^2 + \bar{y}^2} - \operatorname{en} \sqrt{(\bar{x}+a)^2 + \bar{y}^2} \right] \quad (3.10)$$

$$F_3 = f_{,\bar{y}} = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\arctg \frac{\bar{y}}{\bar{x}-a} - \arctg \frac{\bar{y}}{\bar{x}+a} \right] \quad (3.11)$$

$$F_4 = f_{,\bar{x}\bar{y}} = +\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\frac{\bar{y}}{(\bar{x}-a)^2 + \bar{y}^2} - \frac{\bar{y}}{(\bar{x}+a)^2 + \bar{y}^2} \right] \quad (3.12)$$

$$F_5 = f_{,\bar{x}\bar{x}} = -f_{,\bar{y}\bar{y}} = +\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\frac{\bar{x}-a}{(\bar{x}-a)^2 + \bar{y}^2} - \frac{\bar{x}+a}{(\bar{x}+a)^2 + \bar{y}^2} \right] \quad (3.13)$$

G - ძვრის მოდულია; V - პუასონის კოეფიციენტი, $\alpha = \beta^i - \beta^j$; \bar{x} და \bar{y} - ლოკალური კოორდინატებია; a - ელემენტის ნახევარი სიგრძეა.

ამდენად, კონტურზე არსებული სასაზღვრო პირობების მიხედვით მოხდება P_S და P_N ფუნქციური დატვირთვების განსაზღვრა. კერძოდ, თუკი გამოსაკვლევი არის კონტურის ზედაპირზე მოცემული გადადგილებები, მაშინ განტოლებათა სისტემიდან გამოსაზღვრებიან ფიქტიური დატვირთვები, რომელთა მიხედვითაც განტოლებათა სისტემის ამონახსენი განისაზღვრება ელემენტებში δ_S და δ_N მდგენელი ძაბვები. თუკი სასაზღვრო პირობები მოცემულია ძაბვაში, მაშინ –დან გამოსაზღვრება ფუნქციური დატვირთვები და –დან კონტურის გადადგილებათა კომპონენტები $(U_S; U_N)$. ამოცანა შესაძლებელია ამოხსნილი იქნას შერეული სასაზღვრო პირობების შემთხვევაში. კერძოდ, როდესაც კონტურის ერთ ნაწილზე ცნობილია გადაადგილებები, ხოლო მეორეზე – ძაბვები.

სასაზღვრო ინტეგრების პირდაპირი მეთოდი ემყარება მუშაობათა ურთიერთობის პირობას. უკანასკნელის მიხედვით, თუ განსახილველი R არის C კონტური, ექვემდებარება ძალათა ორი სისტემის მოქმედებას, რომელთა გადაადგილებათა და ძაბვათა კომპონენტებია: $U_S, U_N, \delta_S, \delta_N$ და $U_S, U_N, \delta_S, \delta_N$, მაშინ ადგილი აქვს ტოლობას:

$$\int_C (\delta_S U_S + \delta_N U_N) dS = (\delta_S U_S + \delta_N U_N) dS \quad (3.14)$$

თვითეული სასაზღვრე ელემენტის ფარგლებში ძაბვებისა და გადაადგილებების მუდმივობის შემთხვევაში წინა პირობა საბოლოოს დაიყვანება შემდეგ განტოლებათა სისტემაზე:

$$\begin{aligned} \sum_{J=1}^N B_{NS}^{ij} \delta_S^J + \sum_{J=1}^N B_{NS}^{ij} \delta_S^J &= \sum_{J=1}^N U_{NS}^{ij} U_S^J + \sum_{J=1}^N A_{NS}^{ij} U_N^J \\ \sum_{J=1}^N B_{NS}^{ij} \delta_S^J + \sum_{J=1}^N B_{NN}^{ij} \delta_S^J &= \sum_{J=1}^N A_{NS}^{ij} A_S^J + \sum_{J=1}^N A_{NN}^{ij} U_N^J \end{aligned} \quad (3.15)$$

სადაც B_{SS}^{ij} , B_{NN}^{ij} , A_{SS}^{iT} , A_{MN}^{iT} , გავლენის სასაზღვრო კოეფიციენტებია ძაბვებისა და გადაადგილებებისათვის შესაბამისად:

$$B_{SS}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} U_S(F_S^i) d\bar{X} = \frac{1}{2G} [(3-4V)\bar{T}_1 \cos \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_3 \sin \alpha - \bar{T}_3 \cos \alpha)], \quad (3.16)$$

$$B_{SS}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} U_N(F_S^i) d\bar{X} = \frac{1}{2G} [(3-4V)\bar{T}_1 \sin \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_2 \cos \alpha + \bar{T}_3 \sin \alpha)], \quad (3.17)$$

$$B_{NS}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} U_S(F_N^i) d\bar{X} = \frac{1}{2G} [-(3-4V)\bar{T}_1 \sin \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_2 \cos \alpha + \bar{T}_3 \sin \alpha)], \quad (3.18)$$

$$B_{NN}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} U_N(F_N^i) d\bar{X} = \frac{1}{2G} [(3-4V)\bar{T}_1 \cos \alpha - C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_3 \sin \alpha - \bar{T}_3 \cos \alpha)], \quad (3.18a)$$

$$A_{SS}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} \sigma_S^i(F_S^i) d\bar{X} = [(1-2V)\bar{T}_2 \sin \alpha + 2(1-V)\bar{T}_3 \cos \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_4 \sin \alpha + \bar{T}_5 \cos \alpha)], \quad (3.19)$$

$$A_{SN}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} \sigma_N^i(F_S^i) d\bar{X} = [-(1-2V)\bar{T}_2 \cos \alpha + 2(1-V)\bar{T}_3 \sin \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_4 \cos \alpha - \bar{T}_5 \sin \alpha)], \quad (3.20)$$

$$A_{NS}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} \sigma_S^i(F_N^i) d\bar{X} = [(1-2V)\bar{T}_2 \cos \alpha - 2(1-V)\bar{T}_3 \sin \alpha + C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_4 \cos \alpha - \bar{T}_5 \sin \alpha)], \quad (3.21)$$

$$A_{NN}^{ij} = \int_{-a^j}^{+a^j} \sigma_N^i(F_N^i) d\bar{X} = [(1-2V)\bar{T}_2 \sin \alpha + 2(1-V)\bar{T}_3 \cos \alpha - C_{\bar{\nu}}(\bar{T}_4 \sin \alpha + \bar{T}_5 \cos \alpha)] \quad (3.22)$$

აქ: $\bar{T}_1, \dots, \bar{T}_5$ წარმოადგენენ კელვინის ფუნდამენტალური ამონახსნის $-g(\bar{X}, \bar{Y})$ და მისი წარმოებულების განსაზღვრულ ინტეგრალებს:

$$g(\bar{X}, \bar{Y}) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} en [(\bar{X} - C_{\bar{x}})^2 + (\bar{Y} - C_{\bar{y}})^2]^{1/2}, \quad (3.23)$$

$$T_1 = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[C_{\bar{y}} \left(\operatorname{arctg} \frac{C_{\bar{y}}}{C_{\bar{x}} - a^J} - \operatorname{arctg} \frac{C_{\bar{y}}}{C_{\bar{x}} + a^J} \right) - (C_{\bar{x}} - a^J) en \sqrt{(C_{\bar{x}} - a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} + (C_{\bar{x}} + a^J) en \sqrt{(C_{\bar{x}} + a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} \right], \quad (3.24)$$

$$T_2 = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[en \sqrt{(C_{\bar{x}} - a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} - en \sqrt{(C_{\bar{x}} + a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} \right] \quad (3.25)$$

$$T_3 = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\operatorname{arctg} \frac{C_{\bar{y}}}{C_{\bar{x}} - a^J} - \operatorname{arctg} \frac{C_{\bar{y}}}{C_{\bar{x}} + a^J} \right], \quad (3.26)$$

$$T_4 = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\frac{C_{\bar{y}}}{(C_{\bar{x}} - a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} - \frac{C_{\bar{y}}}{(C_{\bar{x}} + a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} \right] \quad (3.27)$$

$$T_5 = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[\frac{C_{\bar{x}} - a^J}{(C_{\bar{x}} - a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} - \frac{C_{\bar{x}} + a^J}{(C_{\bar{x}} + a^J)^2 + C_{\bar{y}}^2} \right] \quad (3.28)$$

$C_{\bar{x}}, C_{\bar{y}}$ - ლოკალური კორდინატებია. $\alpha = \beta^i - \beta^J$.

როდესაც I და J წერტილები ერთმანეთს ემთხვევა, მაშინ T_1, T_3 და T_5 კოეფიციენტები მარტივდებიან.

გავლენის სასაზღვრო კოეფიციენტების დიაგონალური წევრები, რომლებიც წარმოადგენენ საკუთრივ ელემენტების რეაქციებს, წარმოდგინდებიან შემდეგი სახით.

$$B_{SN}^{ii} = B_{NS}^{ii} = 0, \quad B_{SS}^{ii} = B_{NN}^{ii} = -\frac{3-4\nu}{4\pi G(1-\nu)} a^i en a; \quad (3.29)$$

$$A_{SN}^{ii} = A_{NS}^{ii} = 0, \quad A_{SS}^{ii} = A_{NN}^{ii} = +\frac{1}{2} \quad (3.30)$$

სასაზღვრო ინტეგრალების პირდაპირი მეთოდის სარეალიზაციო ძირითადი განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მისი გამოყენებით შესაძლებელია უშუალოდ განსაზღვრულ იქნას კონტურის ერთ ნაწილში გადაადგილებები და ძაბვები, მეორე ნაწილში სასაზღვრო პირობების არსებობის შემთხვევაში.

(ემყარება ამონახსნებს ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდის ფორმით), მიხედვით გამოსაკვლევი არის კონტური წარმოდგინდება წრფივი ელემენტების სახით. კონტურზე მოცემული სასაზღვრო პირობების (გადაადგილებების ან ძაბვების) მიხედვით განისაზღვრება გადაადგილებები და ძაბვები არის შიგნით.

არაერთგვაროვანი არეების კვლევისათვის გამოიყენება საკონტაქტო ამოცანების ფორმულირება, რომელიც გულისხმობს საკონტაქტო ზედაპირებზე ძაბვებისა და გადაადგილებების უწყვეტობის პირობას. ამდენად მეზობელი არეების საკონტაქტო ელემენტების N წყვილი შეიცავს $4N$ უცნობს, საიდანაც 2 კომპონენტი წარმოადგენს ძაბვებს σ_s, σ_n , ხოლო 2 კომპონენტი გადაადგილებებს U_s, U_n .

სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის სარეალიზაციო განტოლებათა სახე ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდის ფორმით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} b_s^i &= \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} P_n^j \\ b_n^i &= \sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} i=1, \dots, N \quad (3.31)$$

სადაც: b_s^i და b_n^i აღნიშნავენ კონტურზე საწყის სასაზღვრო პირობებს

მოცემულს ან ძაბვებით ან გადაადგილებებით; $\sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij}, \dots, \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij}$

გაგლენის განზოგადოებული სასაზღვრო კოეფიციენტებია ან ძაბვებში ან გადაადგილებებში; P_s^j, P_n^j - ფიქტიური დატვირთვებია.

3.3 გადაადგილებებისა და ძაბვების განსაზღვრა

გამოსაკვლევი არის შიგნით.

ფიქტიურ დატვირთვებისა და პირდაპირი ინტეგრალების მეთოდების გამოყენებით განისაზღვრებოდა გადაადგილებები და ძაბვები განსახილველი არის კონტურზე. არის შიგნით ნებისმიერ წერტილში გადაადგილებები და ძაბვები შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას, თუკი არსებობს ამონახსენი კონტურის შემომფარგვლელი ელემენტებისათვის. საბოლოო სახით გადაადგილებები და ძაბვები სომილიანის გარდაქმნებით წარმოდგინდებიან შემდეგი სახით:

$$U_x(P) = \sum_{j=1}^N [(1-2\nu)T_2 \sin^2 \beta^j - 2(1-\nu)T_3 \cos \beta^j + C_Y(T_4 \sin \beta^j - T_5 \cos \beta^j)] U_s^j + \quad (3.32)$$

$$\sum_{j=1}^N [(1-2\nu)T_2 \cos^2 \beta^j + 2(1-\nu)T_3 \sin \beta^j - C_Y(T_4 \cos \beta^j + T_5 \sin \beta^j)] U_s^j +$$

$$\sum_{j=1}^N [(3-4)T_1 \cos \beta^j - C_Y(T_2 \sin \beta^j + T_3 \cos \beta^j)] \frac{\delta_s^j}{2G} +$$

$$\sum_{j=1}^N [(3-4)T_1 \sin \beta^j - C_Y(T_2 \cos \beta^j + T_3 \sin \beta^j)] \frac{\delta_s^j}{2G}, \quad (3.33)$$

$$U_Y(P) = \sum_{j=1}^N [-(1-2\nu)T_2 \cos \beta^j - 2(1-\nu)T_3 \sin \beta^j - C_Y(T_4 \cos \beta^j + T_5 \sin \beta^j)] U_s^j +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{J=1}^N [-(1-2V)T_2 \text{SIN} \beta^J - 2(1-V)T_3 \text{COS} \beta^J - C_V(T_4 \text{SIN} \beta^J - T_5 \text{COS} \beta^J)] U_S^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [(3-4)T_1 \text{SIN} \beta^J + C_V(T_2 \text{COS} \beta^J + T_3 \text{SIN} \beta^J)] \frac{\delta_S^J}{2G} + \\
& + \sum_{J=1}^N [(3-4)T_1 \text{COS} \beta^J + C_V(T_2 \text{SIN} \beta^J + T_3 \text{COS} \beta^J)] \frac{\delta_S^J}{2G}, \tag{3.34}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta_x(P) = & 2G \sum_{J=1}^N [2T_4 \text{COS}^2 \beta^J + T_5 \text{SIN} 2\beta^J - C_V(T_6 \text{SIN} 2\beta^J - T_7 \text{SIN} 2\beta^J)] U_S^J + \\
& + 2G \sum_{J=1}^N [-T_5 - C_V(T_4 \text{SIN} 2\beta^J + T_7 \text{COS} 2\beta^J + T_7 \text{COS} 2\beta^J)] U_S^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [T_2 - 2(1-V)(T_2 \text{COS} 2\beta^J - T_3 \text{SIN} 2\beta^J) + C_V(T_4 \text{COS} 2\beta^J + T_5 \text{SIN} 2\beta^J)] \delta_S^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [-T_3 + (1-2V)(T_2 \text{SIN} 2\beta^J + T_3 \text{COS} 2\beta^J) + C_V(T_4 \text{SIN} 2\beta^J \\
& \quad + T_5 \text{COS} 2\beta^J)] \delta_S^J, \tag{3.35}
\end{aligned}$$

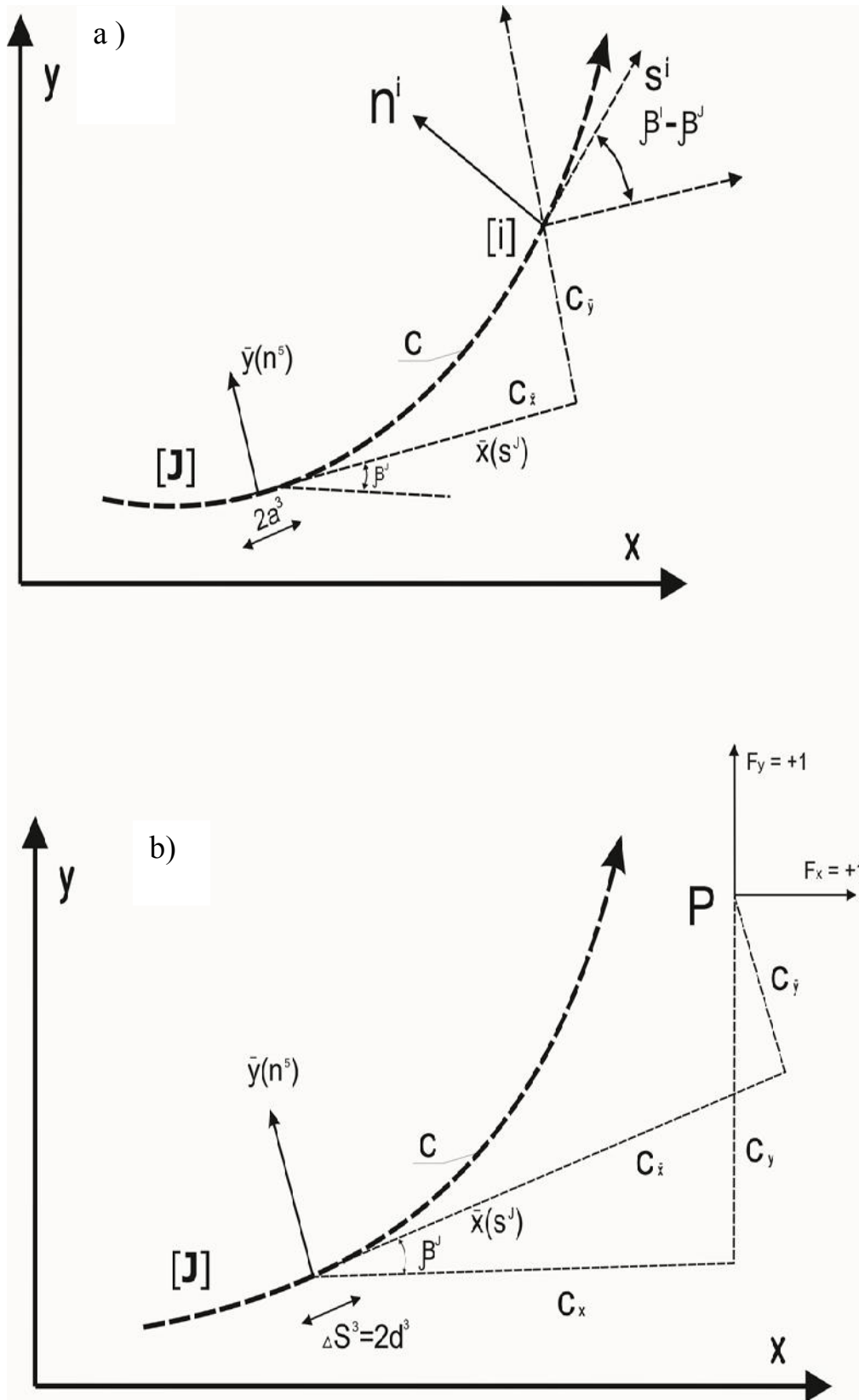
$$\begin{aligned}
\delta_x(P) = & 2G \sum_{J=1}^N [2T_4 \text{SIN}^2 \beta^J + T_5 \text{SIN} 2\beta^J + C_V(T_6 \text{COS} 2\beta^J - T_7 \text{SIN} 2\beta^J)] U_S^J + \\
& + 2G \sum_{J=1}^N [-T_5 + C_V(T_6 \text{SIN} 2\beta^J + T_7 \text{COS} 2\beta^J)] U_S^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [-T_2 + 2(1-V)(T_2 \text{COS} 2\beta^J - T_3 \text{SIN} 2\beta^J) + C_V(T_4 \text{COS} 2\beta^J + T_5 \text{SIN} 2\beta^J)] \delta_S^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [-T_3 + (1-2V)(T_2 \text{SIN} 2\beta^J + T_3 \text{COS} 2\beta^J) - C_V(T_4 \text{SIN} 2\beta^J \\
& \quad + T_5 \text{COS} 2\beta^J)] \delta_S^J, \tag{3.36}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{XY}(P) = & 2G \sum_{J=1}^N [T_5 \sin 2\beta^J + T_5 \cos 2\beta^J] - C_Y (T_6 \sin 2\beta^J + T_7 \cos 2\beta^J) \delta_s^J + \\
& + 2G \sum_{J=1}^N [C_Y (T_6 \cos 2\beta^J - T_7 \sin 2\beta^J)] U_N^J + \\
& \sum_{J=1}^N [-2(1-V)(T_2 \sin 2\beta^J + T_3 \cos 2\beta^J) + C_Y (T_4 \sin 2\beta^J - T_5 \cos 2\beta^J)] \delta_s^J + \\
& + \sum_{J=1}^N [-(1-2V)(T_2 \cos 2\beta^J - T_3 \sin 2\beta^J) - C_Y (T_4 \cos 2\beta^J + T_5 \sin 2\beta^J)] \delta_s^J,
\end{aligned}$$

სადაც T_1, \dots, T_5 ფუნქციებია, რომლებიც წარმოდგენილი არიან ფორმულებით (1629), ხოლო T_6 და T_7 განისაზღვრებიან შემდეგი გამოსახულებებით

$$T_6 = -\frac{1}{4\pi(1-V)} \left\{ \frac{(C_X - \alpha^J)^2 - C_Y^2}{(C_X - \alpha^J)^2 + C_Y^2} - \frac{(C_X + \alpha^J)^2 - C_Y^2}{[(C_X + \alpha^J)^2 + C_Y^2]^2} \right\} \quad (3.37)$$

$$T_7 = -\frac{2C_Y}{4\pi(1-V)} \left\{ \frac{C_X - \alpha^J}{(C_X - \alpha^J)^2 + C_Y^2} - \frac{C_X + \alpha^J}{[(C_X + \alpha^J)^2 + C_Y^2]^2} \right\} \quad (3.38)$$



ნახ. 3.1 ლოკალური კოორდინატების საანგარიშო სქემები:

- a. სასახლვრო კოეფიციენტებისათვის;
- b. არასასახლვრო წერტილების კოეფიციენტებისათვის.

4. ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი სადაწნეო გვირაბის ფილტრაციული პარამეტრების ანალიზი

სტატიკის ამოცანის გაანგარიშებების დროს საექსპლუატაციო დატვირთვების სახით გათვალისწინებული იყო ფილტრაციული მოცულობითი ძალები, რომლებიც განისაზღვრებოდა ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნის დროს. გაანგარიშება მიმდინარეობს ციკლური-იტერაციული თანმიმდევრობით (მოცემული ალგორითმის მიხედვით) მანამ სანამ ციკლებს შორის შედეგებს შორის განსხვავება არ იქნება მისაღები სიზუსტის ფარგლებში.

ხეობის ფერდის სიახლოეს არსებული სადაწნეო გვირაბები არაბზარმედები მოსახვით მნიშვნელოვან პრობლემებს ქმნის. ფილტრაციული ნაკადი საშიშროებას ქმნის, ერთის მხრივ სუფოზიური პროცესების, ხოლო მეორეს მხრივ მდგრადობის დაკარგვის განვითარების თვალსაზრისით. ასე მაგალითად, მდ. ოლორის გადასასვლელთან ენგურჰესის დერივაციული გვირაბის (1997 წელს) ფერდში ფილტრაციამ სუფოზიური პროცესების განვითარებასთან დაკავშირებით მდგრადობის დაკარგვის რეალური საშიშროება შექმნა.

პროექტირებისათვის საზოგადოდ მნიშვნელოვანია დერივაციული გვირაბების ღერძიდან ფერდის ზედაპირამდე დასაშვები მანძილის განსაზღვრა, რომლის დროს კმაყოფილდება უსაფრთხოების ანუ ფილტრაციული სიმტკიცისა და სტატიკური მდგრადობის პირობები.

4.1 ფილტრაციული კვლევები

ფილტრაციული სიმტკიცის შეფასება სწარმოებს დაწნევის გრადიენტების დასაშვები მნიშვნელობის მიხედვით: $I < I_{დ}$.

სადაც, I და $I_{\text{ფ}}$ მასივში განვითარებული ფილტრაციული ნაკადის დაწნევის გრადიენტების საანგარიშო და კრიტიკული მნიშვნელობებია შესაბამისად.

ნაშრომში მოცემული ყველა სახის გაანალიზება ჩატარებული იქნა ენგურის გვირაბის გეომეტრიული პარამეტრებისა და ფუძის მახასიათებლების შესაბამისად

ენგურჰესის ექსპლუატაციის პერიოდში ხეობაში თავი იჩინა ფილტრაციულმა წყაროებმა, რომელთა ხარჯების ცვლილების კანონზომიერება კორელაციურ დამოკიდებულებაშია წყალსაცავში წყლის დონესთან. დაკვირვებების შედეგებით ცალკეულ წყაროებზე წლების განმავლობაში გამოვლენილი იქნა ხარჯის ზრდის ტენდენცია. ზემოთხსენებულიდან გამომდინარე უნდა ვივარაუდოთ, რომ მშენებლობის დროს ვერ ჩატარდა სათანადო ხარისხის გამაგრებითი და შემაკვამელი ცემენტაცია, ან ექსპლუატაციის პერიოდში განვითარდა სუფოზიური პროცესი. ამასთან დაკავშირებით მოსალოდნელია, რომ დაბალხარისხიანი ცემენტაციური ზონა შეინარჩუნებდა ანიზოტროპულობას.

გვირაბის ექსპლუატაციის დროს ფილტრაციული პროცესების პროგნოზირებისათვის ჩატარებული იქნა კვლევათა სერიები, რომლის დროს გაითვალისწინებოდა გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენტის, როგორც საპროექტო და ასევე

გაზრდილი მნიშვნელობი: $K_m/K_{gz} = 20, 10, 9, 8, \dots, 3$.

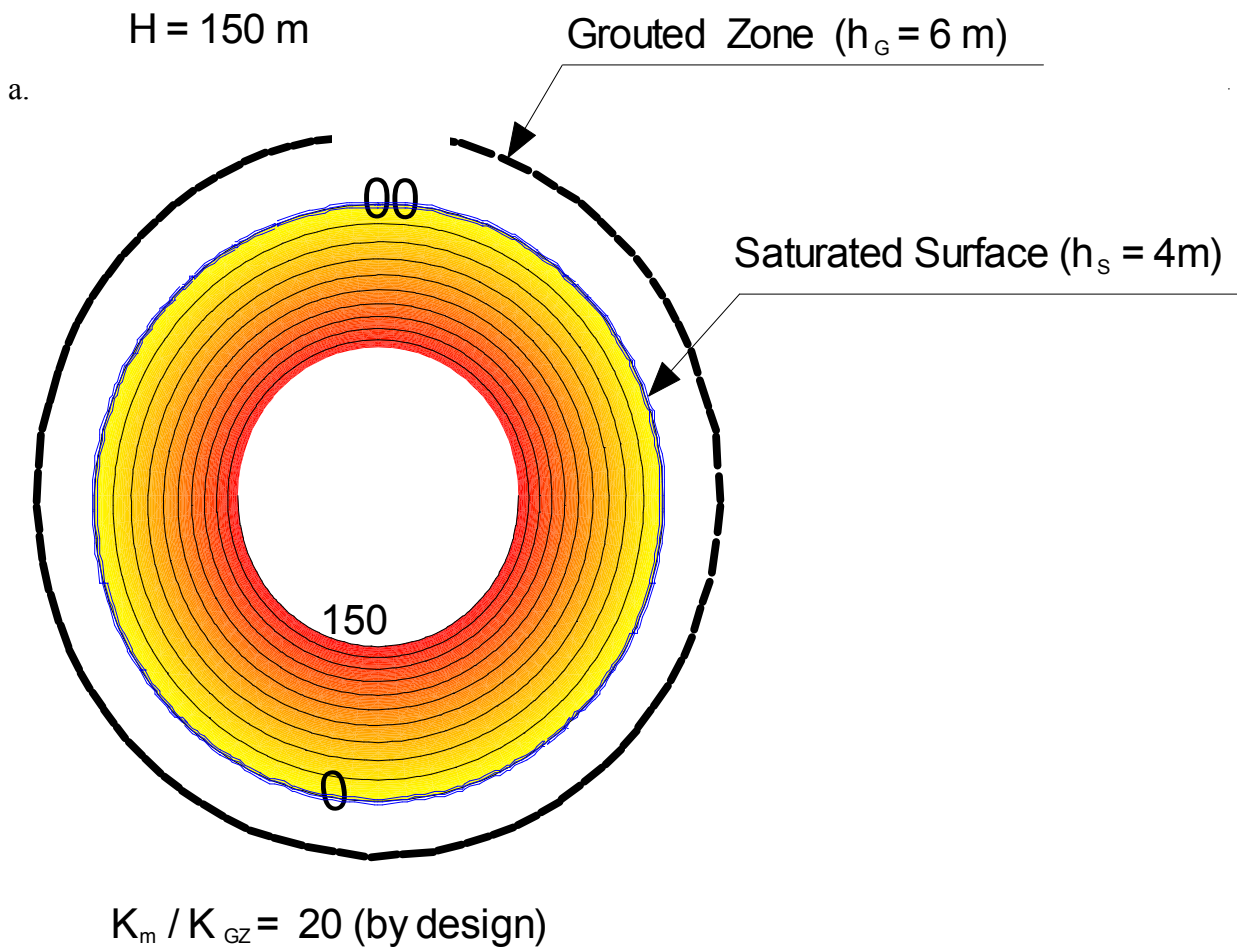
გაანგარიშებებით მიღებული იქნა (ნახ 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4), რომ:

- $K_m/K_{gz} = 20 \text{--} 10$ დიაპაზონში დეპრესიის ზედაპირი რჩება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში;
- ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხის არსებობის პირობებში (ან სუფოზიური პროცესის არსებობისას), როდესაც $K_m/K_{gz} = 8$ და მასალა ნაწილობრივ იმეორებს მასივის ანიზოტროპიას, დეპრესიის ზედაპირი უკვე გადის ცემენტაციური ზონიდან;

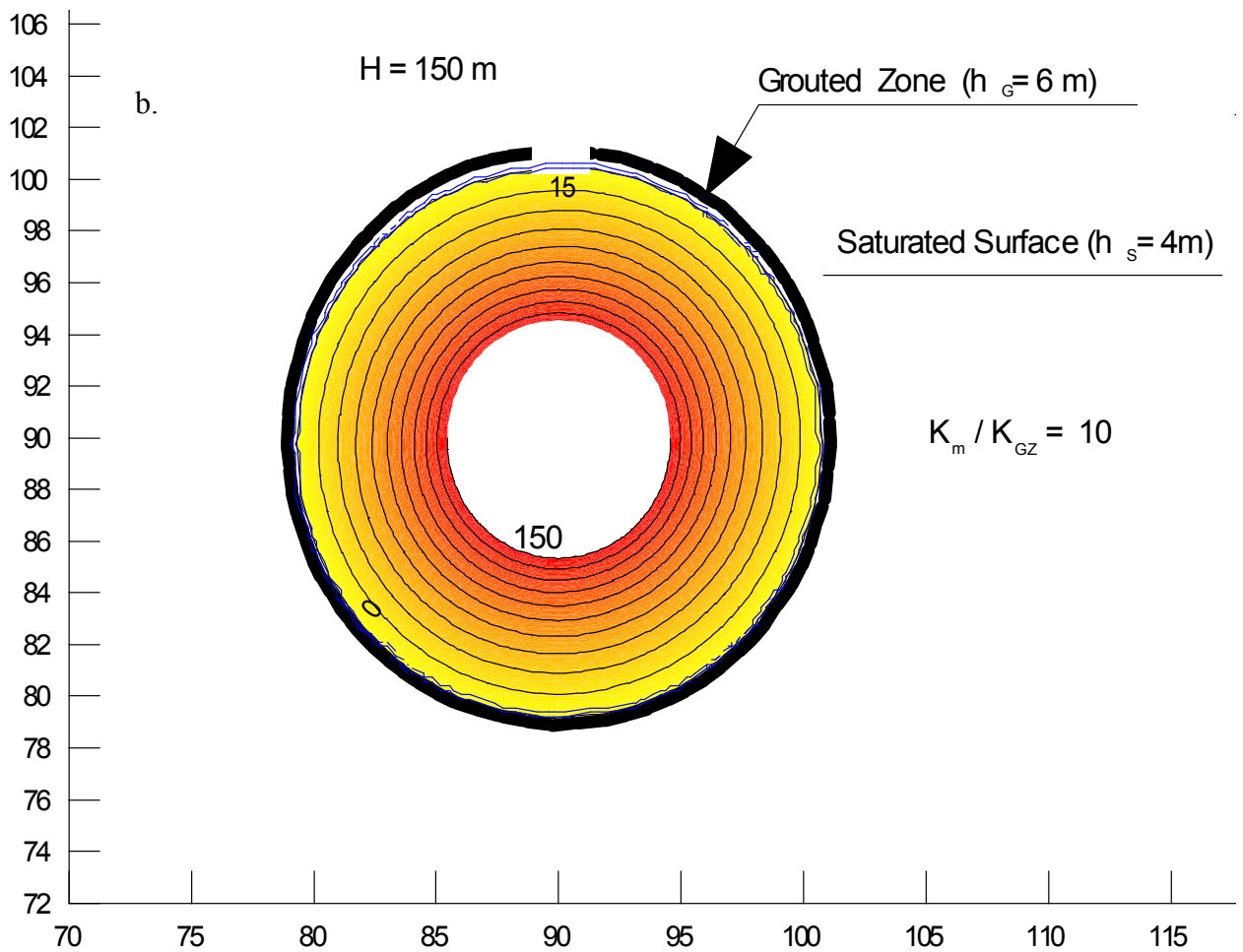
- $K_m/K_{gz}=2.5$ წარმოადგენს დებრესიის ზედაპირის კრიტიკულ მნიშვნელობას (გვირაბის ღერძიდან მნიშვნელოვნად შორდება და იწეება ხეობის ფერდის დასველება), რომლისთვისაც ჯერ არ მიუღწევია (ნახ.4.14, 4.15).

ამდენად, შეგვიძლია ვივარაუდოდ, რომ გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის არსებული მდგომარეობისათვის უფრო რეალისტურია

$$K_m/K_{gz} \approx 4$$

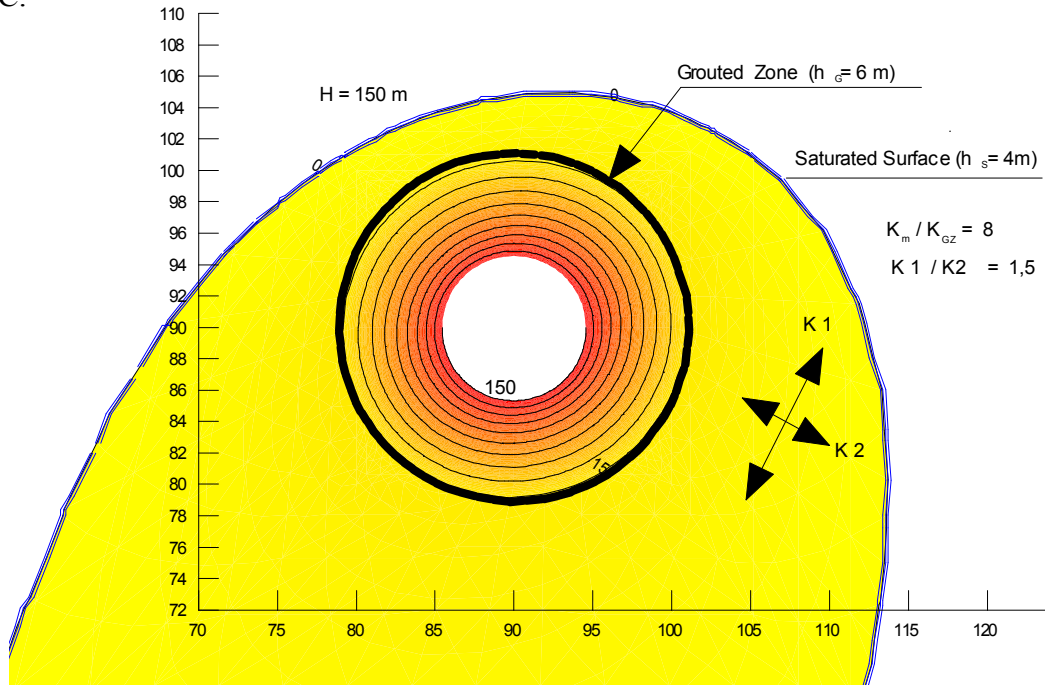


ნახ.4.1.1 ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა $K_m / K_{gz} = 20$ – 10 (საპროექტო მდგომარეობა).



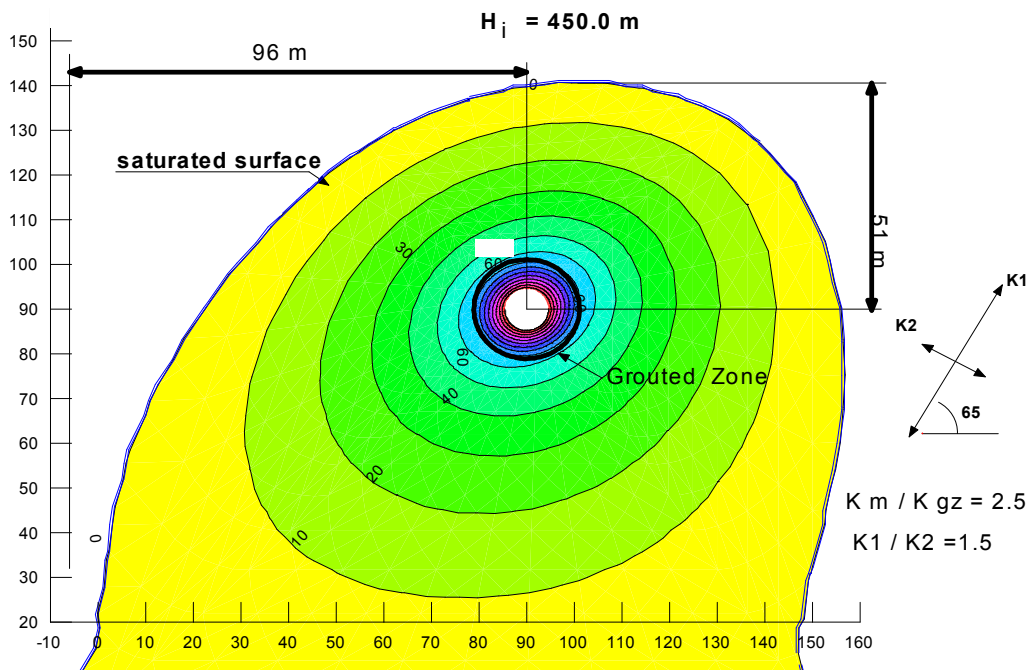
ნახ. 4.12. ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა დეპრესიის ზედაპირი თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში $K_m / K_{GZ} = 10$;

C.

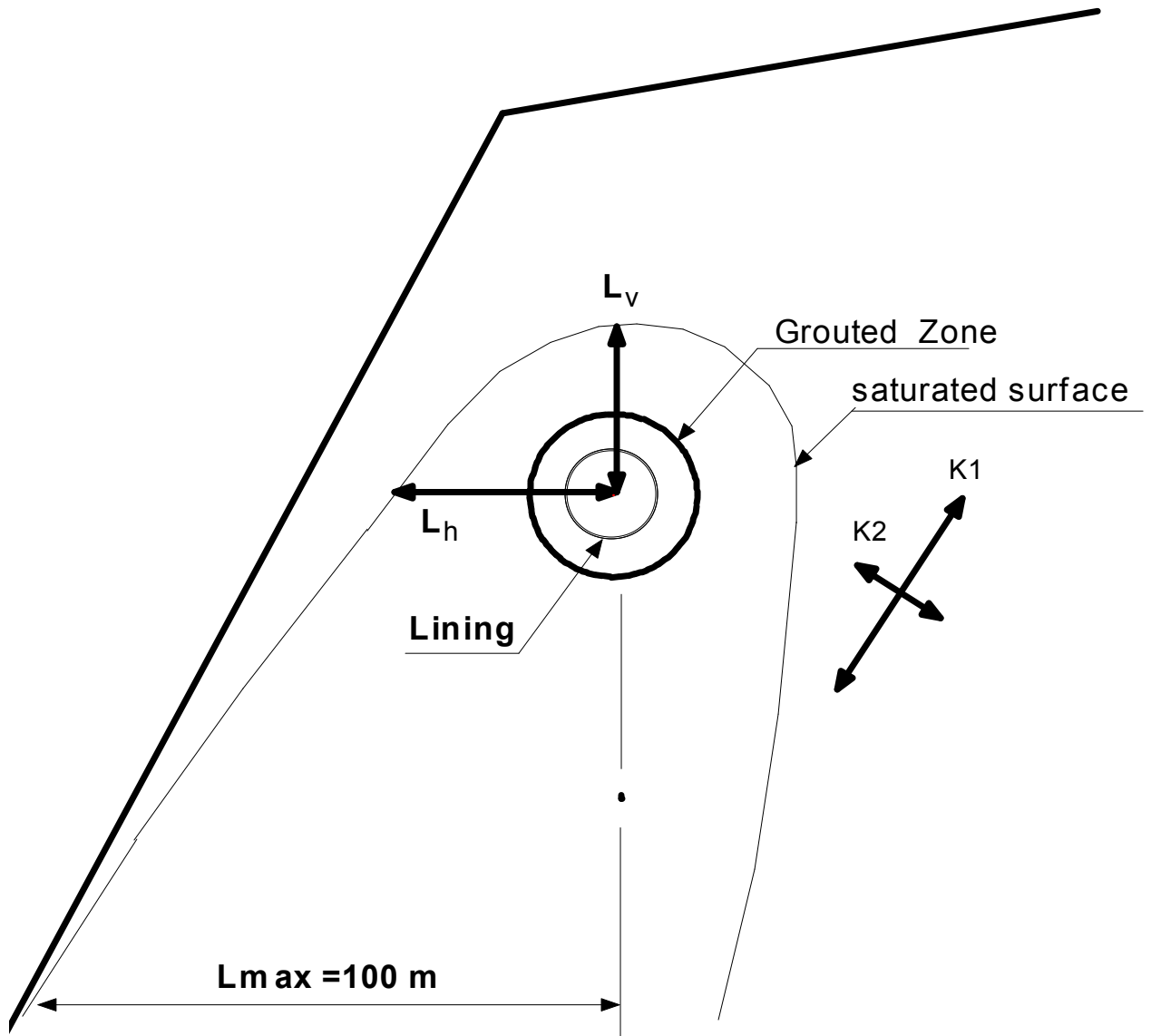


ნახ. 4.1.3. ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში, როცა არსებობს ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხი $K_m / K_{gz} = 8$;

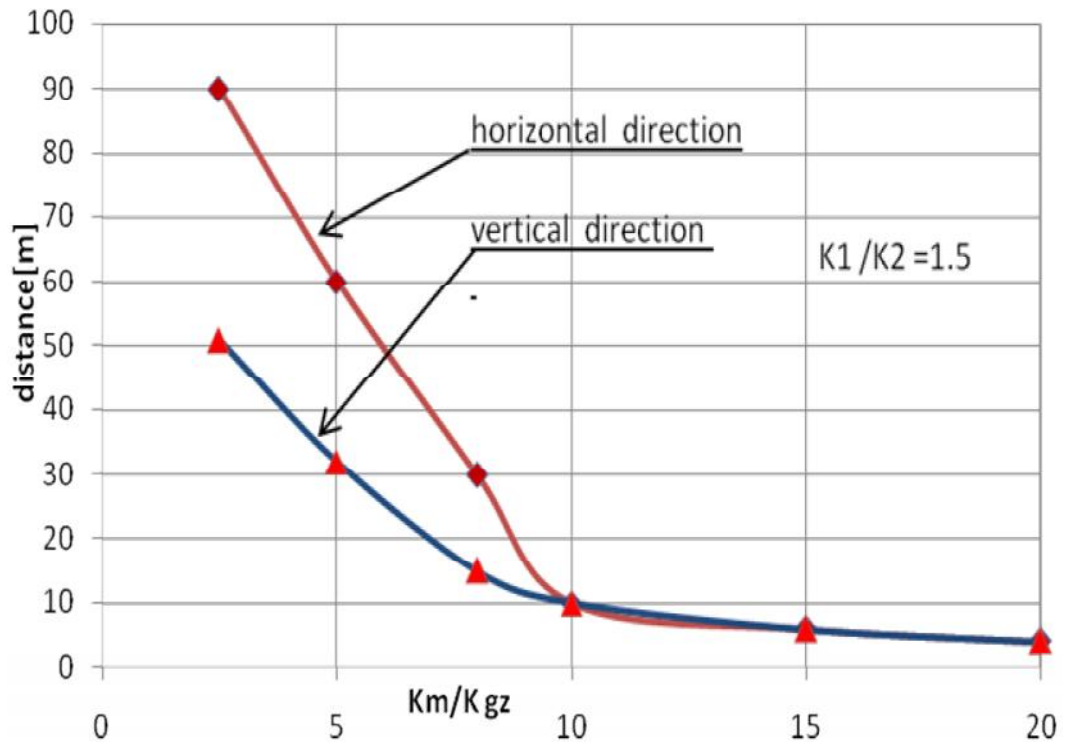
d.



ნახ. 4.14. ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მაშვიში, როცა დეპრესიის ზედაპირის უახლოვდება ხეობის ფერდს $K_m/K_{gz} = 25$.



ნახ. 4.15 დეპრესიის ზედაპირის გავრცელება ანიზოტროპიის პირობებში ფერდის სიხლოეს სადაწნეო გვირაბის არსებობისას.



ნახ. 4.1.6 დებრესიის ზედაპირის კორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებებით გავრცელების მრუდები.

გაანგარიშებებში მიიღებოდა, რომ:

- გვირაბის მოსახვაში არსებობს ბზარები, რომელთა გამტარუნარიანობა (შიგა წნევის მოქმედებისას) მეტია ვიდრე მასივის;
- გარემომცველი ცემენტაციური ფარდის სიღრმე ტოლია ენგურჰესის დერივაციული გვირაბის პროექტით განსორციელებული სიღრმის შესაბამისად $h_{ც.ფ} = 6.0$ მ;
-
- ცემენტაციური ფარდის ფილტრაციის კოეფიციენტი (ხვედრითი წყალშთანმოქმედლობის კოეფიციენტის) განიცდის ვარირებას.

$K_{\text{ც.ფ}}$ შერჩევა სწარმოებდა ფილტრაციის კოეფიციენტთა ფარდობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ($K_g / K_{\text{ც.ფ}} = 1, 2, 3, \dots$), ფუძის გეოლოგიური სტრუქტურის, გვირაბის რადიუსისა და დაწნევის მიხედვით, რომელთა დროს არ მოხდება დეპრესიის ზედაპირის გამოსოფლა და შესაბამისად ფერდზე სუფოზიური მოვლენების განვითარება.

რიცხვითი ამონახსნების შედეგებით მიღებული იქნა $R=f(K_g/K_{\text{ც.ფ}})$ დამოკიდებულების მრუდი ანიზოტროპული მასივისათვის (შრეების დახრილი განლაგებისას).

შედეგების ანალიზიდან მიღებული იქნა, რომ $K_g/K_{\text{ც.ფ}}=8.0$ მნიშვნელობა მისაღები აღმოჩნდა, რამდენადაც ამ დროს დეპრესიის ზედაპირი ვერ აღწევს ფერდამდე (ნახ.4.13). ამ შემთხვევაში ხეობის ფერდიდან გვირაბის დერდამდე დასაშვებმა $R_{\text{გინ}}$ მანძილმა შეადგინა 25 მ.

4.2 ფილტრაციული კვლევები მოსახვაში არსებული ნაკერის გახსნის გათვალისწინებით

გაანგარიშებების შემდგომ სერიებში გათვალისწინებული იქნა გვირაბის მოსახვაში ნაკერის გახსნა და მასთან დაკავშირებით ჩატარებული იქნა მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმის შესაბამისი პარამეტრების ანალიზი. საანგარიშო სქემაში ნაკერის კვეთი

მოდელირდებოდა ბზარის სასრულ- ელემენტული მოდელით (ნახ. 2.2.2). ნაკერის ელემენტის ფილტრაციის კოეფიციენტი რადიალური მიმართულებით განისაზღვრებოდა (2.30) ფორმულის გამოყენებით, ხოლო ტანგენციური მიმართულებით მისი მნიშვნელობა შეესაბამებოდა გვირაბის მასალის ფილტრაციის კოეფიციენტს. იტერაციული

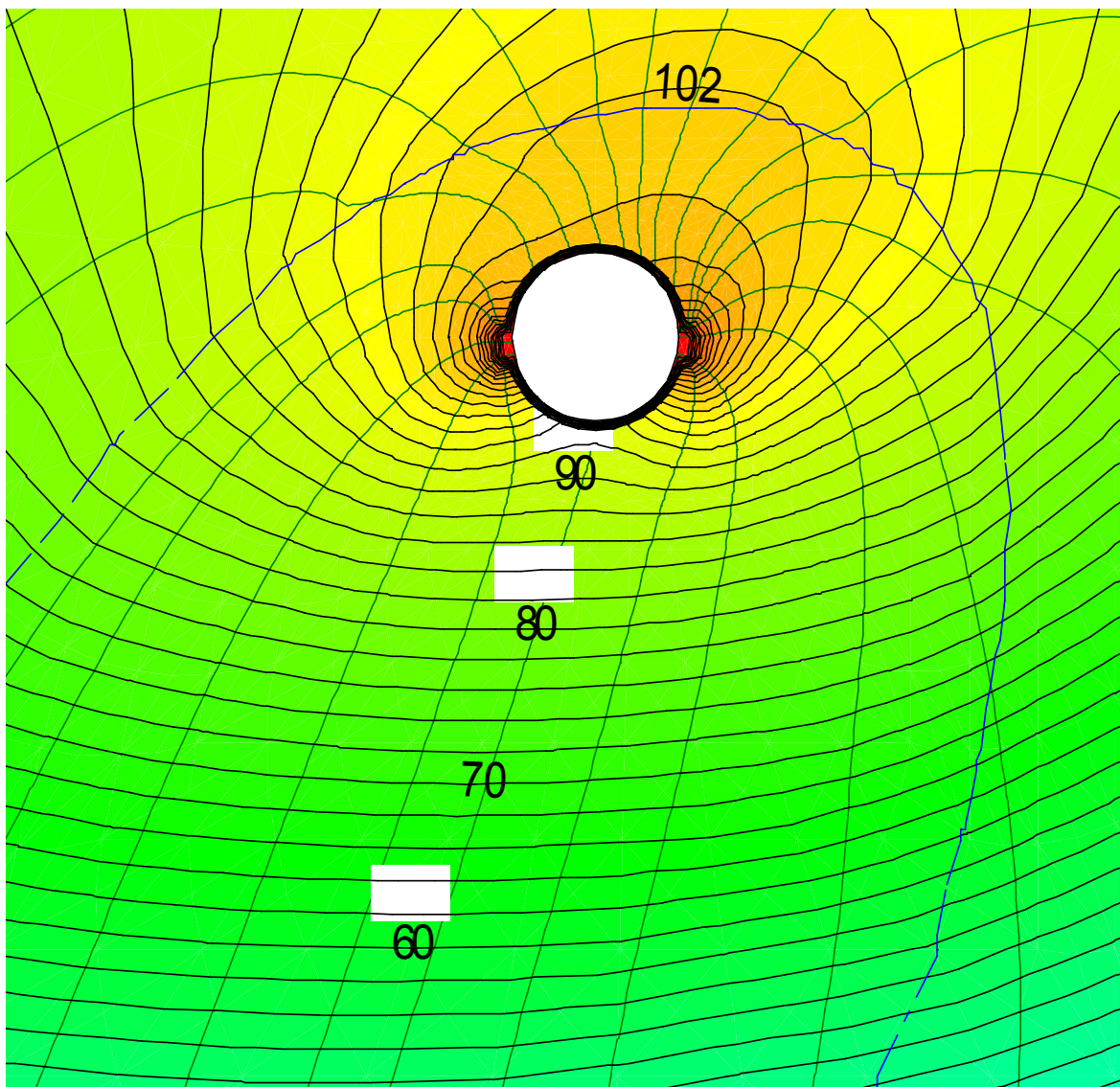
გაანგარიშებებისას, ნაკერის გახსნის მნიშვნელობები ბიჯურად იზრდებოდა. ნაკერის გახსნის ბიჯის ყოველი მნიშვნელობისას, გვირახის მოსახვაზე მასივის მხრიდან, იზრდება ფილტრაციული უკუწნევა, რომელიც კორექტირებას უკეთებს ბზარის გახსნას. სტატიკისა და ფილტრაციის შეკავშირებული სქემით ციკლური იტერაციული გაანგარიშებები, გრძელდება მანამ, სანამ გვირახის მოსახვაზე შიგა და გარე წნევების მოქმედებით არ გაჩერდება კვეთის გახსნა.

იტერაციული გაანგარიშებების დროს ბიჯის შერჩევა მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს. ბიჯის მიხედვით უნდა მოხდეს კრებადობის პირობის დამაკმაყოფილება. ამასთან დაკავშირებით იტერაციათა სავარაუდო რაოდენობა აღწავდა 200 –ს. წარმოდგენილი გაანგარიშებების დროს იტერაციათა საანგარიშო რაოდენობა იცვლებოდა 100 - 150, რომელთა დროს მიიღწეოდა კრებადობის მისაღები დონე (ნახ.4.2.4). ბიჯის მნიშვნელობა ცხადია იცვლებოდა განსახილველი ამოცანების მიხედვით. ძირითადად , როგორც ბიჯის, ასევე იტერაციათა რაოდენობას განსაზღვრავდა ფილტრაციის კოეფიციენტი ფარდობა.

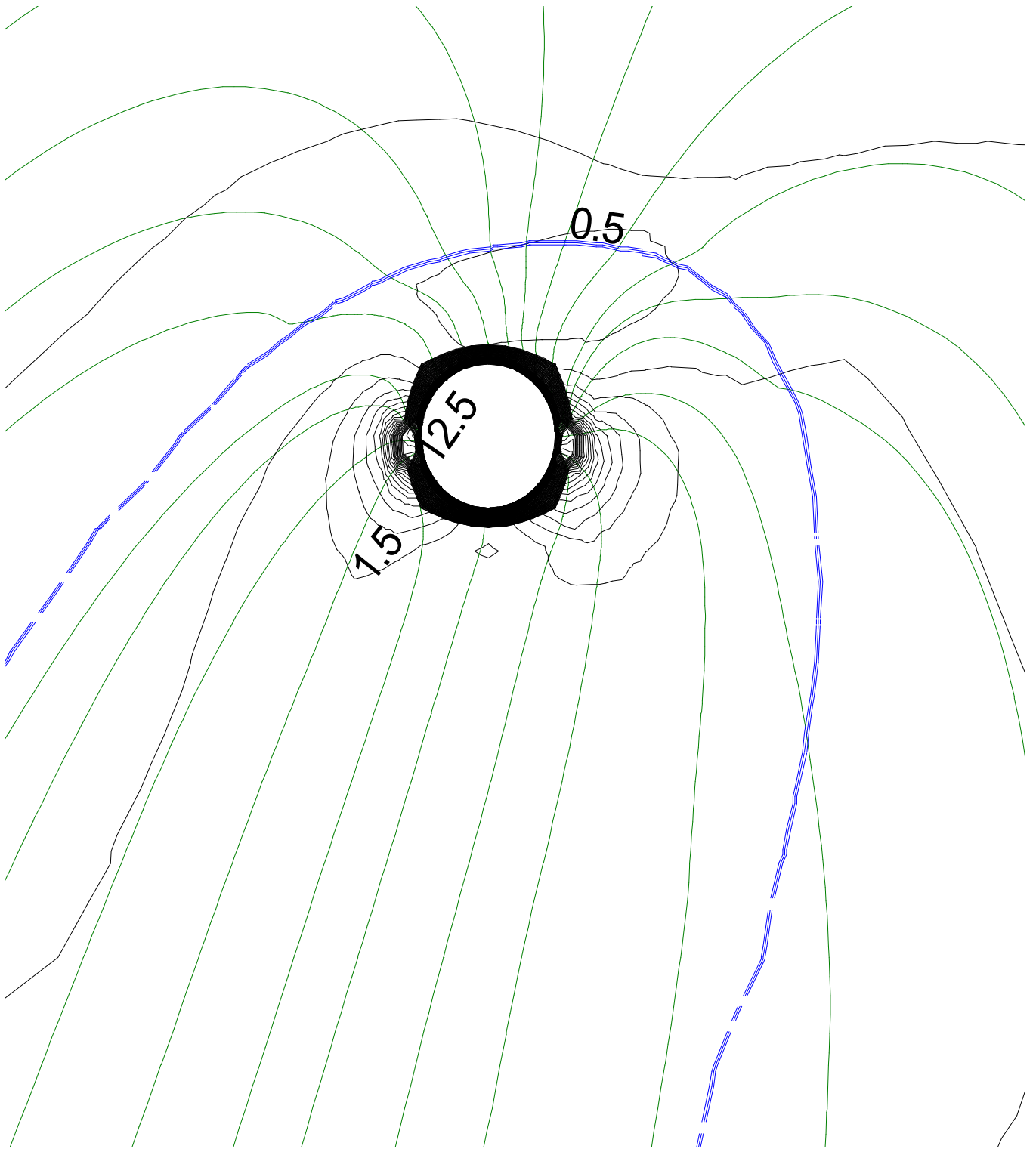
ნახაზებზე (4.2.1, 4.2.2) მოცემულია გვირახის გარემომცველ მასივში გახსნილი ნაკერის არსებობისას განვითარებული ფილტრაციული ნაკადის ბადე, ხოლო ნახაზებზე (4.2.3) დაწნევებისა და დაწნევის გრადიენტების განაწილება მასივში ნაკერის კვეთთან.

როგორც შედეგებიდან ჩანს ნაკერის კვეთებთან მეოფი მასივი ხასიათდება დაწნევის გრადიენტების კონცენტრაციის მაღალი მნიშვნელობებით ($J \approx 12_c$), ხოლო მისგან მცირე (2.5 მ) მანძილის დაშორებით ისინი მნიშვნელოვნად ვარდებიან. აღნიშნული მიუთითებს, რომ ასეთ პირობებში გვირახის ნაკერებთან კლდოვანი მასივის შესაბამის უბნებში ადგილი ექნება სუფოზიური პროცესების განვითარებას, რაც აუარესებს მასივის სტრუქტურას და შესაბამისად ამცირებს მის ზიდვის უნარიანობას. ფილტრაციული ხარჯის სიდიდე

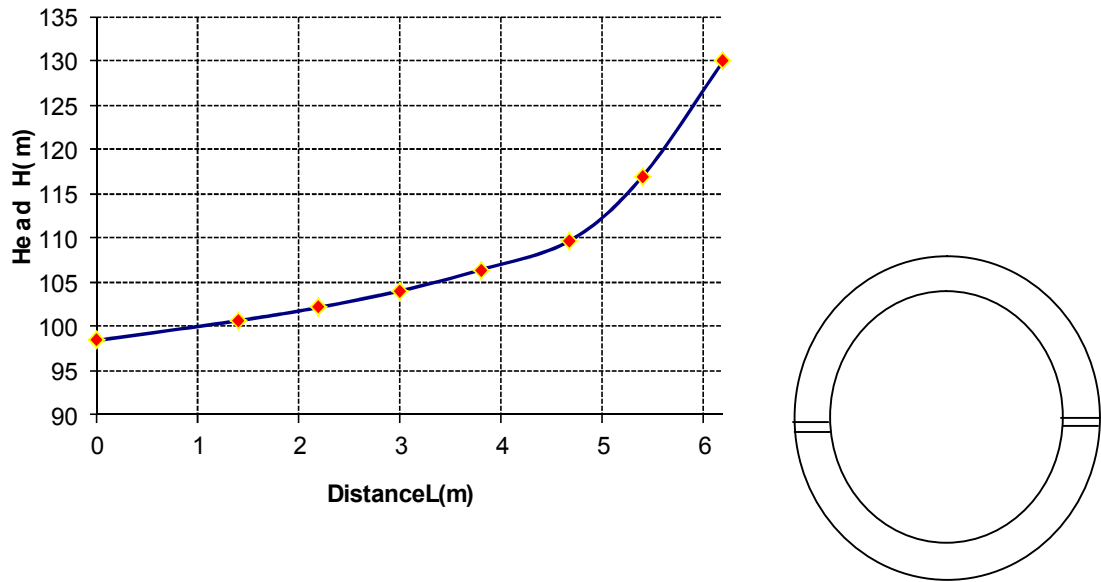
ნაკერის კვეთში, მისი 1 სმ-მდე გახსნისას, გვირახის ერთ გრძივ მეტრზე, შეადგენს 0.5715 ლ/წმ.



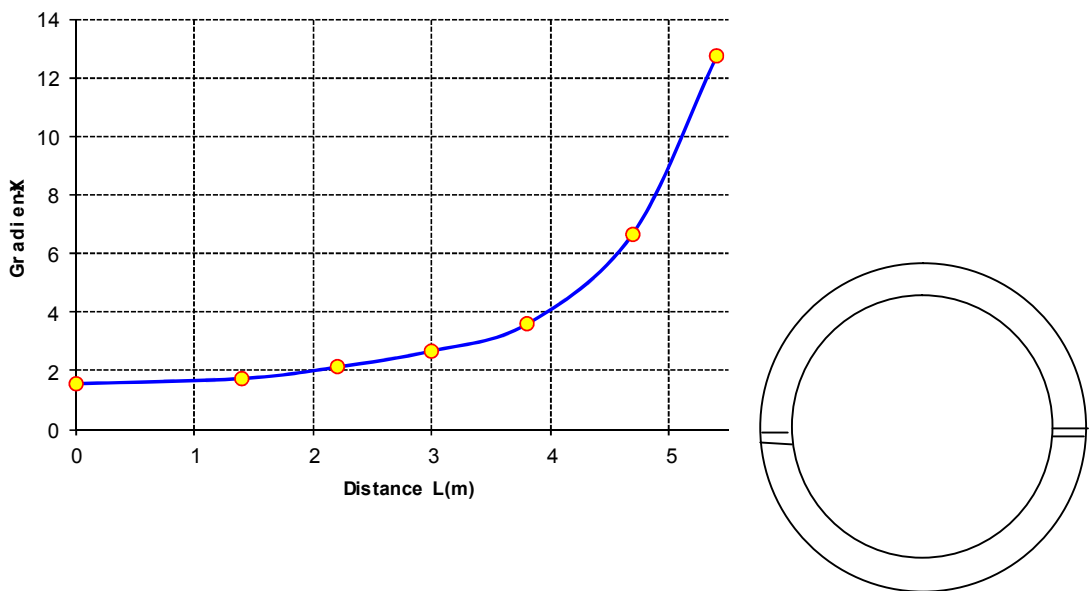
ნახ. 4.2.1 ფილტრაციული ბადე მასივში



ნახ. 4.2.2 ფილტრაციული გრადიენტები გვირაბის გარშემო ნაკერების გათვალისწინებით.

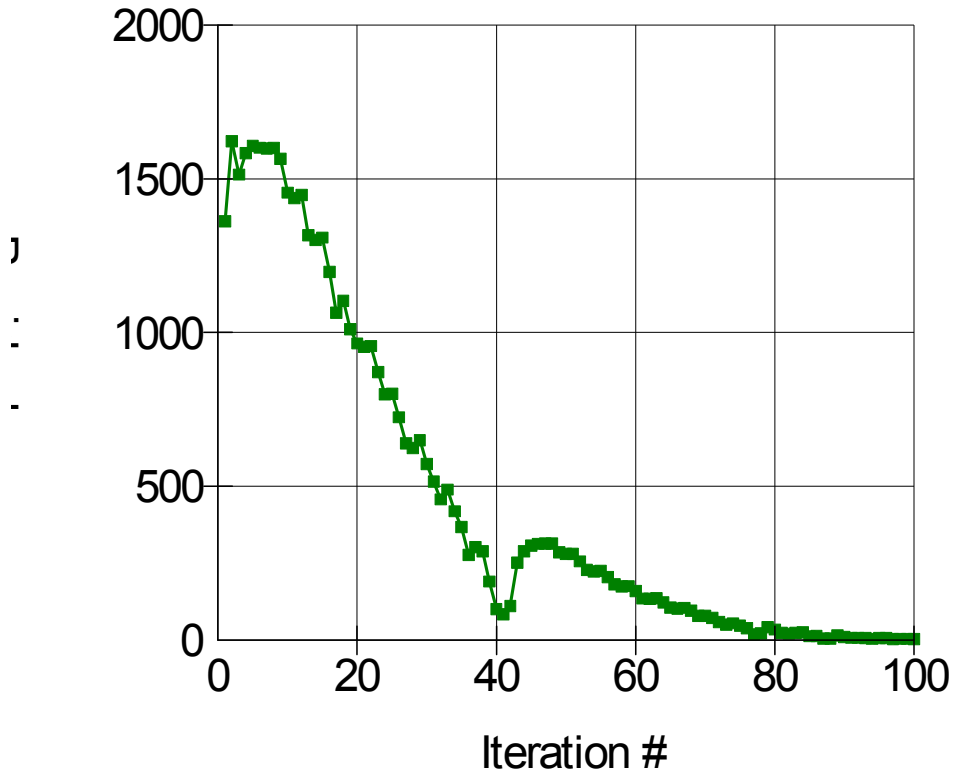


ნახ. 4.23 დაწნევის განაწილება მასივში ნაკერის კვეთთან

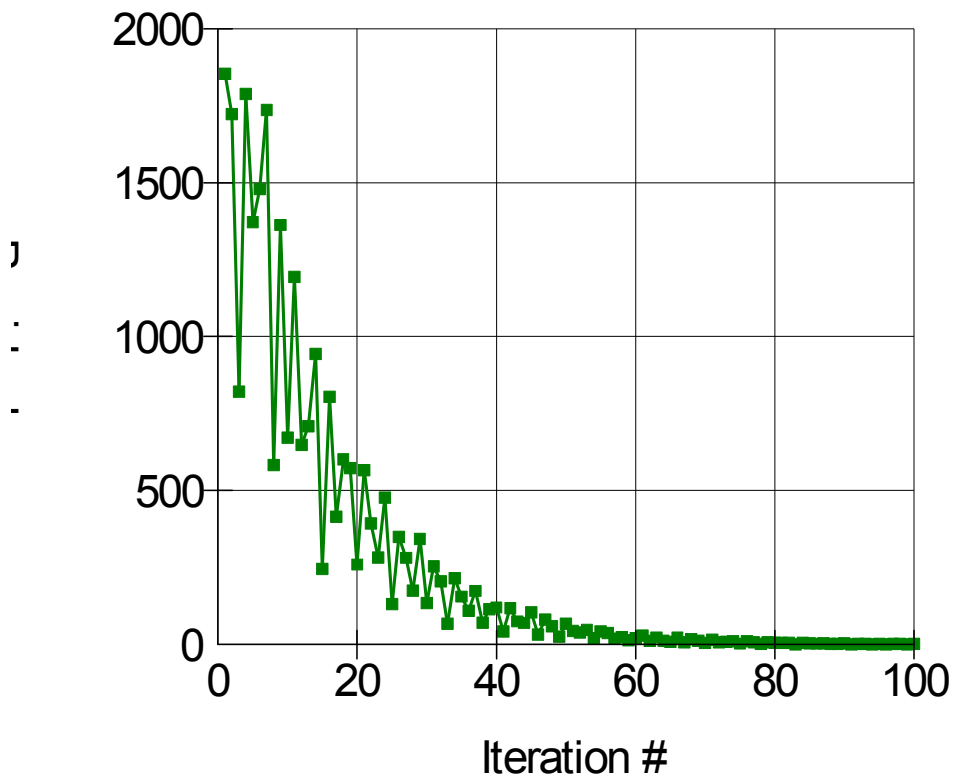


ნახ. 4.24 დაწნევის და დაწნევის გრადიენტების განაწილება მასივში ნაკერის კვეთთან.

Steady-State Analysis



Steady-State Analysis



ნახ. 4.2.5 უდაწნეო ფილტრაციის იტერაციული გაანგარიშებისას კრებადობის ზოგადი გრაფიკული წარმოდგენა

5. ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი გვირაბის მდგრადობის საკითხები.

5.1 მდგრადობის ანალიზი სტაციონალური ფილტრაციის რეჟიმის გათვალისწინებით.

მასივში განვითარებული ფილტრაცია გვირაბის გარშემო ქმნის დეპრესიის ზედაპირს, რომლის ფარგლებში ადგილი აქვს კლდოვანი გრუნტის შეტივტივებას, ამასთან დაკავშირებით გვირაბის კონცენტრაციის ზონებში ძაბვების გადანაწილებას და აგრეთვე მასალის ძვრის მახასიათებლების გაუარესებას. აღნიშნული პროცესები მით უფრო მნიშვნელოვანია, იმ შემთხვევაში, როდესაც ფერდში არსებობს ხეობის მიმართულებით ორიენტირებული დაცურების სიბრტყე. ფიტრაციული პროცესები ამ მხრივ მნიშვნელოვნად რეაგირებს ფერდის მდგრადობის მარაგებზე გაუარესების მიმართულებით.

გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით მასივში განვითარებული სტაციონალური ფილტრაციული რეჟიმის შესაბამისი დეპრესიის ზედაპირის მაქსიმალური მოხაზულობის, (თავი მეოთხე), აგრეთვე გარემომცველი ცემენტაციური ზონის გავლენის გათვალისწინებით.

“მოკეთება-გარემომცველი მასივი” სისტემისათვის მოცემულია შემდეგი სასაზღვრო პირობები (ნახ.5.1):

- ვერტიკალური წახნაგებისათვის - $\sigma_s = 0; U_n = 0;$
- ქვედა წახნაგისათვის - $U_s = 0; U_n = 0;$
- ფერდის ზედაპირისათვის - $\sigma_s = 0; \sigma_n = 0;$
- ზედა წახნაგზე გაითვალისწინება მასივის ზედა ნაწილის საკუთარი წონა. აქ, $\sigma_s, \sigma_n, U_s, U_n$ - მხები, ნორმალური ძაბვები და გადაადგილებებია შესაბამისად.

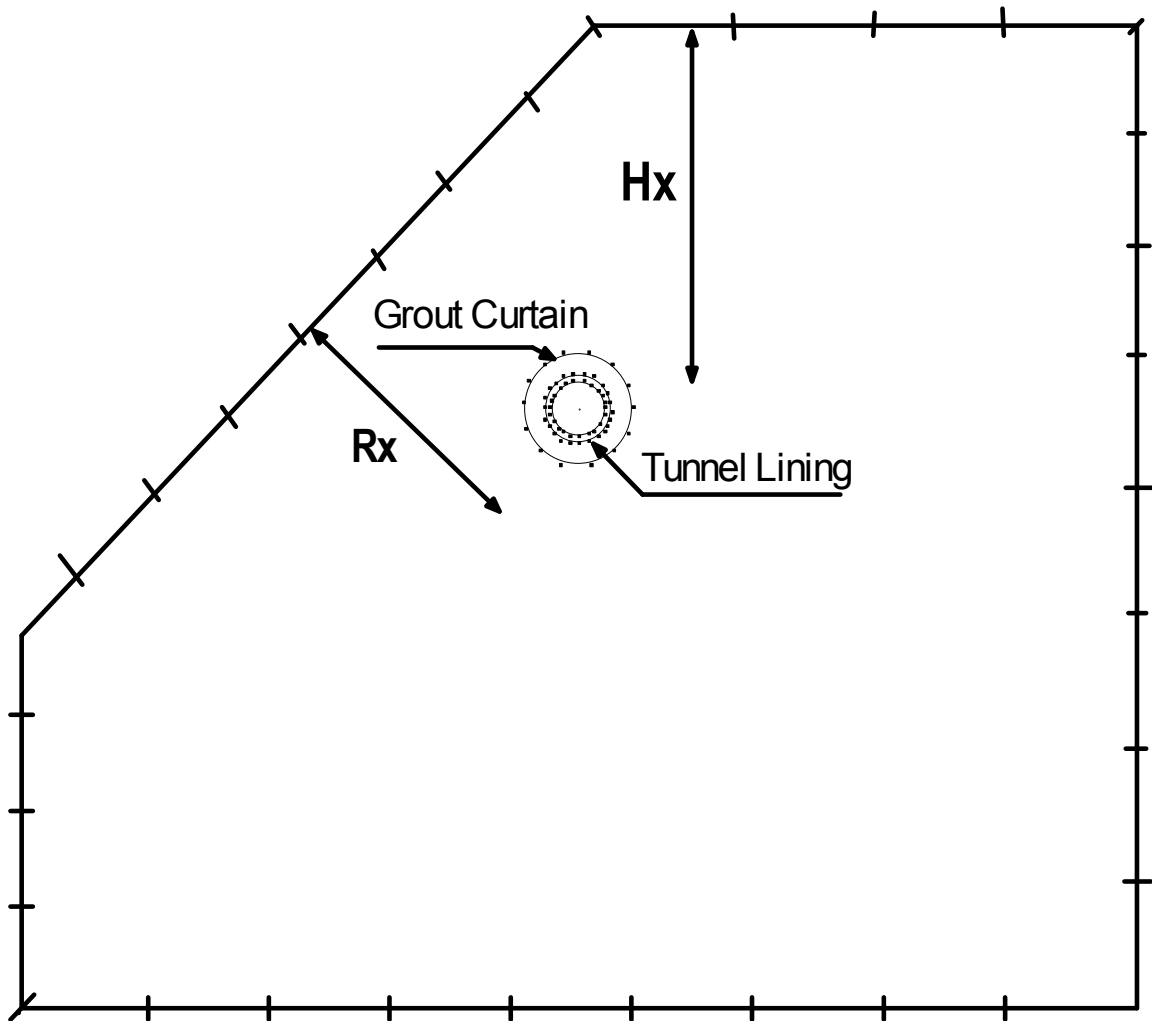
საექსპლუატაციო დატვირთვების სახით გაითვალისწინებოდა:

- საწყისი ძაბვები მასივში;
- ჰიდროსტატიკური წნევა მოსახვის ზედაპირზე,

$$q_x = \gamma(1 - \alpha_2)h; \quad (5.1)$$

- გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული წნევები მასივში, რომელიც განისაზღვრება ფორმულებით:

$$\begin{aligned} P_x &= -\gamma\alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x} \\ P_y &= -\gamma\alpha_2 \left[\frac{\partial h}{\partial y} - (1-n) \right] \end{aligned} \quad (5.2)$$



ნახ. 5.1 “მოკეთება-მასივი” სისტემის საანგარიშო სქემა

სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის გაანგარიშებათა სერიების ჩატარების დროს ძვრის ზედაპირზე მდგრადობის შეფასება სწარმოებდა ინტეგრალური მარაგის კოეფიციენტებით, ძვრაზე სიმტკიცის მარაგის ლოკალური კოეფიციენტების გათვალისწინებით:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i, \quad (53)$$

სადაც: n - ძვრის უბნის ლოკალური არეების რაოდენობაა, რომელთა ფარგლებშიც η_i შესაძლებელია ჩაითვალოს მუდმივად. η_i ძვრაზე სიმტკიცის მარაგის ლოკალური კოეფიციენტია, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით: $\eta_i = \frac{\sigma_i \cdot \text{tg} \varphi_i + c_i}{\tau_\alpha}$, აქ σ_i , და τ_α -

ძვრის სიბრტყეზე ნორმალური და მხები ძაბვებია; φ_i, c_i - გრუნტი შიგა ხახუნის კუთხე და შეჭიდულებაა ლოკალურ არეებში.

თუ $\eta_i \leq 1$, მაშინ ლოკალურ არეებში ძვრაზე სიმტკიცე უზრუნველყოფილია, ხოლო, როცა $\eta_i > 1$, მაშინ ძვრაზე სიმტკიცე დარღვეულია.

განხილული იქნა 2 საანგარიშო ვარიანტი: ა) იზოტროპული მასივის და ბ) ანიზოტროპული მასივი შრეების ფერდის პარალელური მიმართულებით ორიენტირებისას. ამ დროს დეფორმაციის მოდულების ფარდობა შრეების გრძივად და განივად შეადგენდა $\frac{E_1}{E_2} = 1.6$.

გაანგარიშების შედეგებით მიღებული იქნა, რომ:

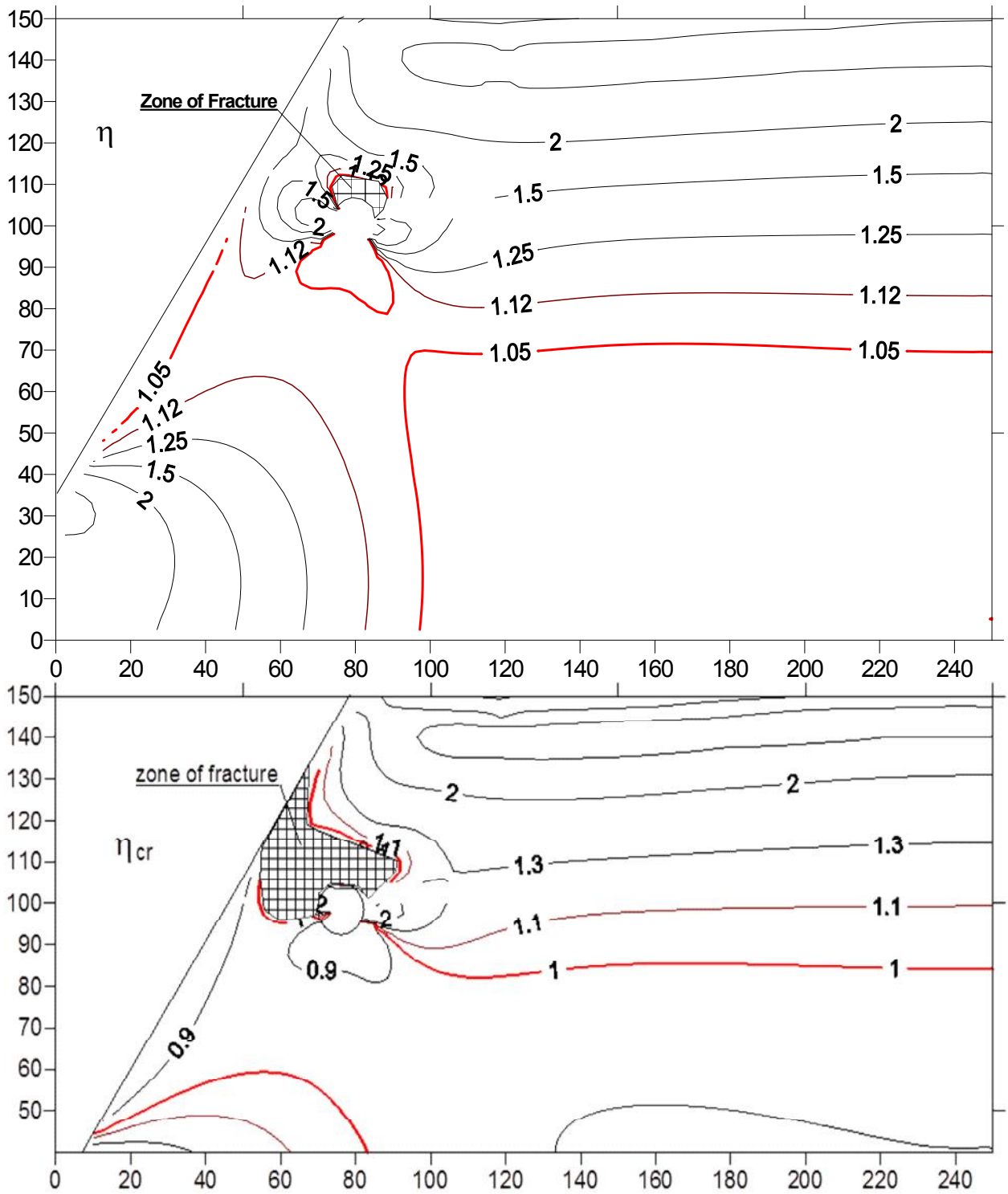
- იზოტროპული მასივის შემთხვევაში, როდესაც გვირაბიდან ღერძამდე დაშორება შეადგენდა

- $R_x=30M$, რღვევის ზონამ გვირაბის თავზე მიაღწია 6.3 მ-მდე (ნახ. 5.2). ამ დროს გამჭიმავი ძაბვების ზონამ გვირაბის თავის ზონაში მიაღწია 7 მ-მდე;
- $R_x=25M$, მასივში მყარდება ზღვრული მდგომარეობა. ამ დროს ადგილი აქვს მასივის მოლიან რღვევას.
- ანიზოტროპული მასივის შემთხვევაში მარაგის კოეფიციენტები ძვრაზე შემცირდა 25%-ით (ნახ. 5.3).

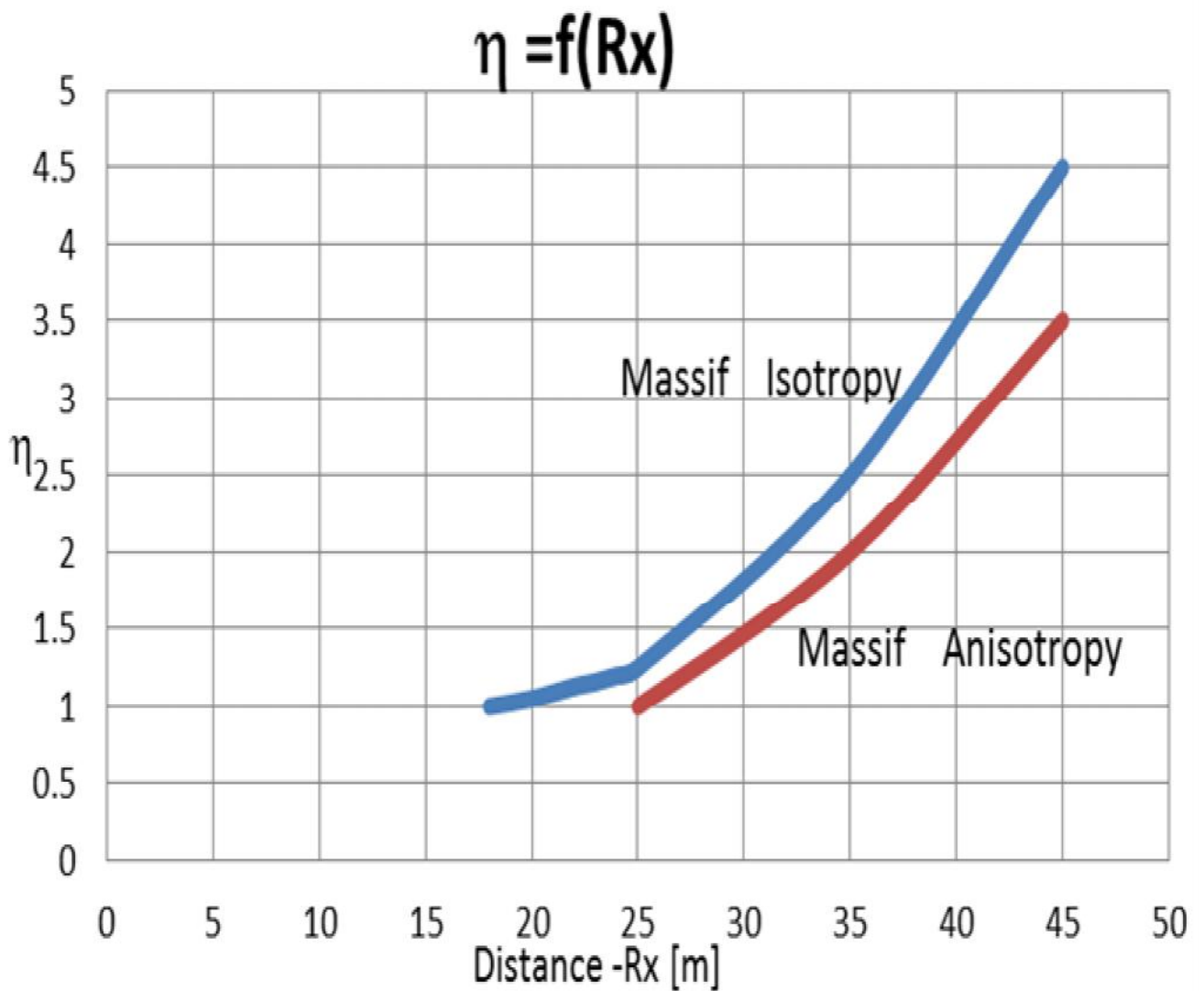
ძვრის პოტენციურად ყველაზე საშიში ზედაპირის ინტეგრალური მარაგის კოეფიციენტმა ცემენტაციის არ არსებობისას შეადგინა $K=1.21$, რაც არაადაყოფილებელია. ცემენტაციური ფარდის მოწყობის შედეგად ძვრის პოტენციურად საშიში ზედაპირის მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტმა მიაღწია $K= 4.8$ -ს, რაც მაღალი მარაგით აკმაყოფილებს მდგრადობის პირობას.

მასივში განვითარებული ფილტრაცია გვირაბის გარშემო ქმნის დეპრესიის ზედაპირს, რომლის ფარგლებში ადგილი აქვს კლდოვანი გრუნტის შეტივტივებას, ამასთან დაკავშირებით გვირაბის კონცენტრაციის ზონებში ძაბვების გადანაწილებას და აგრეთვე

მასალის ძვრის მახასიათებლების გაუარესებას. აღნიშნული პროცესები მით უფრო მნიშვნელოვანია, იმ შემთხვევაში, როდესაც ფერდში არსებობს ხეობის მიმართულებით ორიენტირებული დაცურების სიბრტყე. ფილტრაციული პროცესები ამ მხრივ მნიშვნელოვნად რეაგირებს ფერდის მდგრადობის მარაგებზე გაუარესების მიმართულებით.



ნახ. 5.2 ფერდის სიახლოეს გამაგალი სადაწნეო გვირაბების მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების იზოხაზები.



ნახ. 5.3 მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების გრაფიკი, იზოტროპიისა და ანიზოტროპიის დროს, გვირაბის ღერძიდან ფერდამდე დაშორების მიხედვით.

5.2 ხეობის ფერდის მდგრადობის ანალიზი პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე.

ხსენებულ საკითხს მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს გვირაბის მოკეთების შიგა ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე, ფერდის გეოლოგიური აღნაგობა (ანიზოტროპია, სხვადასხვა შრეობრიობა) და გვირაბის გარემომცველი ცემენტაციური ზონა.

ექსპლუატაციის პერიოდში ზოგადად ადგილი აქვს ცემენტაციური ზონის ეფექტურობის ვარდნას, რომლის მიზეზები უკავშირდება მასივში ბზარების გახსნას, ასევე გამოტუტვის და სუფოზიური პროცესების განვითარებას.

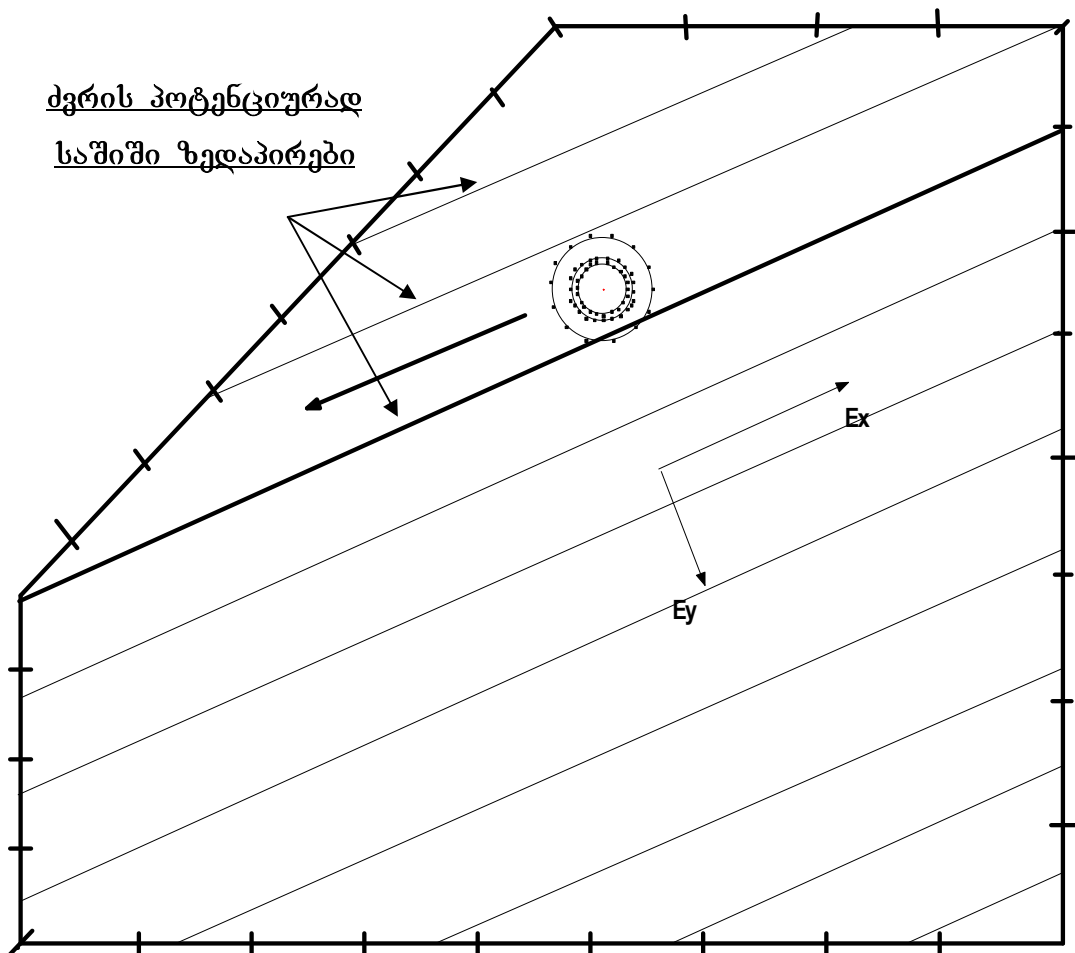
აღნიშნული საკითხები აქტუალურია ენგურჰესის გვირაბისათვის, სადაც ცალკეულ უბნებში, ექსპლუატაციის პერიოდში მოხდა ფილტრაციული დანაკარგების ზრდა. ხსენებული საკითხები მნიშვნელოვანია, ერთის მხრივ ენერგეტიკული თვალსაზრისით, მეორეს მხრივ კი მასივის მდგრადობის მხრივ, მით უფრო, როდესაც ფერდის შრეობრიობა დაცურების სიბრტყის ორიენტაციისაა.

ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის მაგალითზე ქვემოთ მოცემულია ფერდის მდგრადობაზე გაანგარიშების შედეგები დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე (ნახ.5.2.1), მასივისა და ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენტთა ფარდობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის $K_m/K_{gc} = 2 \div 10$ [1].

ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის ტრასა გადის საკმაოდ რთულ გეოლოგიურ გარემოში. აღსანიშნავია, რომ აქ ადგილი აქვს ქანების შრეობრიობას, რომელიც მასივს წარმოადგენს, როგორც ანიზოტროპულს, რომლის გამოსატულება იცვლება ბზარიანობის მიხედვით. ანიზოტროპიის კოეფიციენტის ხასიათდება მაღალი მნიშვნელობით 1.4–1.6. საცდელი ექსპერიმენტული კვლევების შედეგებით მიღებული იქნა, რომ გამაგრებითი ცემენტაციით

შედგადანიზოტროპიის კოეფიციენტის დაყვანილი იქნა მინიმუმამდე 1.04 [2].

“მოკეთება-მასივი” სისტემის გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა მასივის საწყისი დაძაბული მდგომარეობის, გვირაბის ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროსტატიკური წნევის და ფილტრაციული მოცულობითი ძალების (შემატივტივებელი წნევის) ზემოქმედების გათვალისწინებით.



ნახ. 5.2.1 “გვირაბი – მასივი” სისტემის საანგარიშო სქემა.

ძვრზე მდგრადობის შეფასება ჩატარებული იქნა ეფექტური ძაბვის მიხედვით:

$$K = \frac{(\sigma - p) \operatorname{tg} \varphi + cF}{\tau_c} \quad (5.4)$$

სადაც, σ - ნორმალური ძაბვაა ძვრის ზედაპირზე; p - ფილტრაციული წნევაა, $\operatorname{tg} \varphi$, c - ხახუნის კოეფიციენტი და ხვედრითი შეჭიდულებაა ძვრის ზედაპირზე; F - ძვრის ზედაპირის ფართობი; τ_c - მხები ძაბვის საანგარიშო მნიშვნელობაა ძვრის ზედაპირზე. სამშენებლო ნორმების მიხედვით I და II კლასის ობიექტებისათვის ძვრზე მდგრადობის მარაგი უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას $K > 1.25$ [3].

ფილტრაციული მოცულობითი ძალების შემოქმედება მასივზე განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

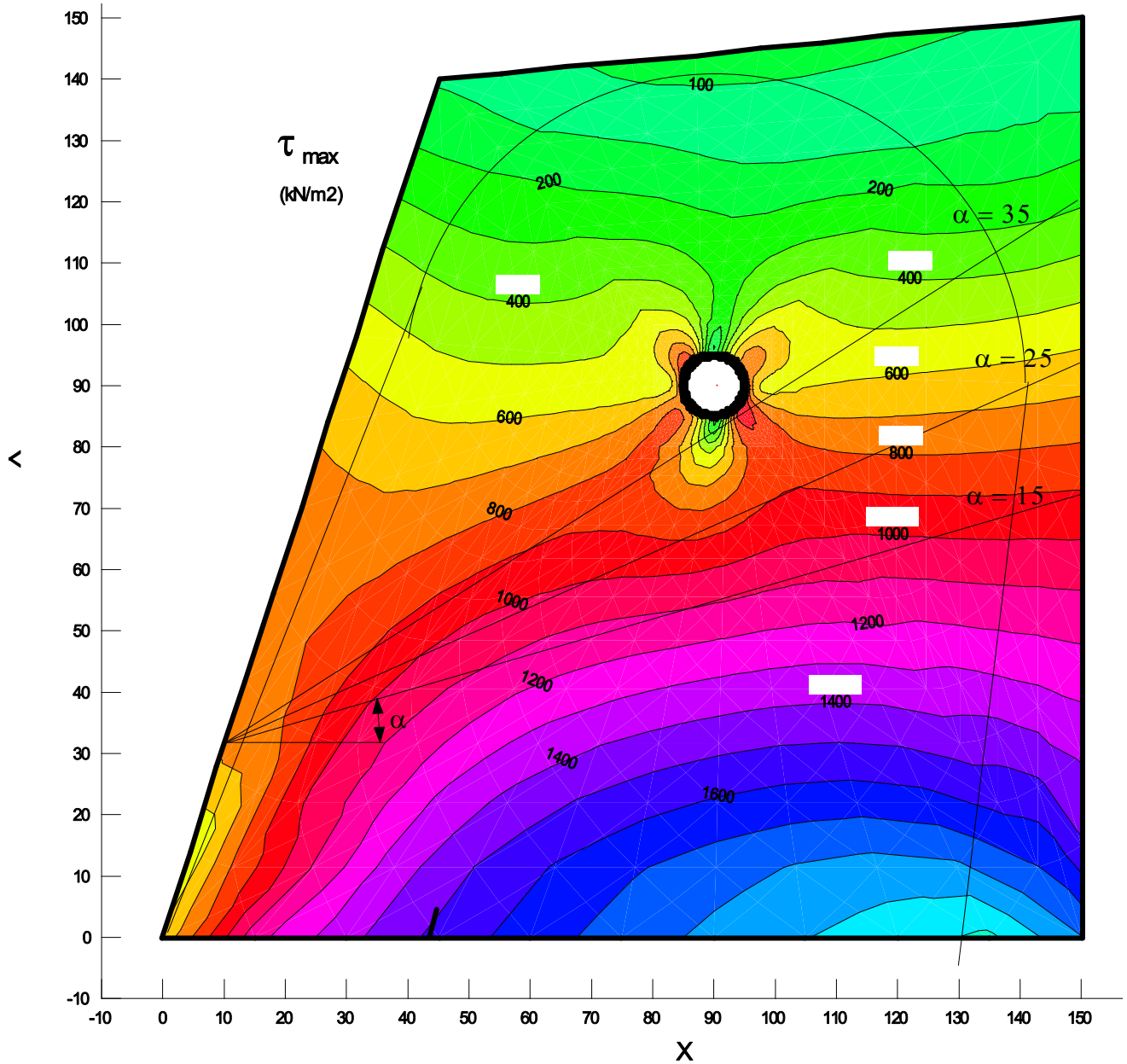
$$\begin{cases} p_x = \alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x} \\ p_y = \alpha_2 \left[(1-n) - \frac{\partial h}{\partial y} \right] \end{cases} \quad (5.5)$$

სადაც, p_x, p_y - ფილტრაციული მოცულობითი ძალების მდგენელებია ღერძების მიმართ; α_2 - უკუწნევის ეფექტური ფართობის კოეფიციენტი; n - მასალის ფორიანობაა; $\frac{\partial h}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial y}$ - წნევის გრადიენტებია ღერძების მიმართ.

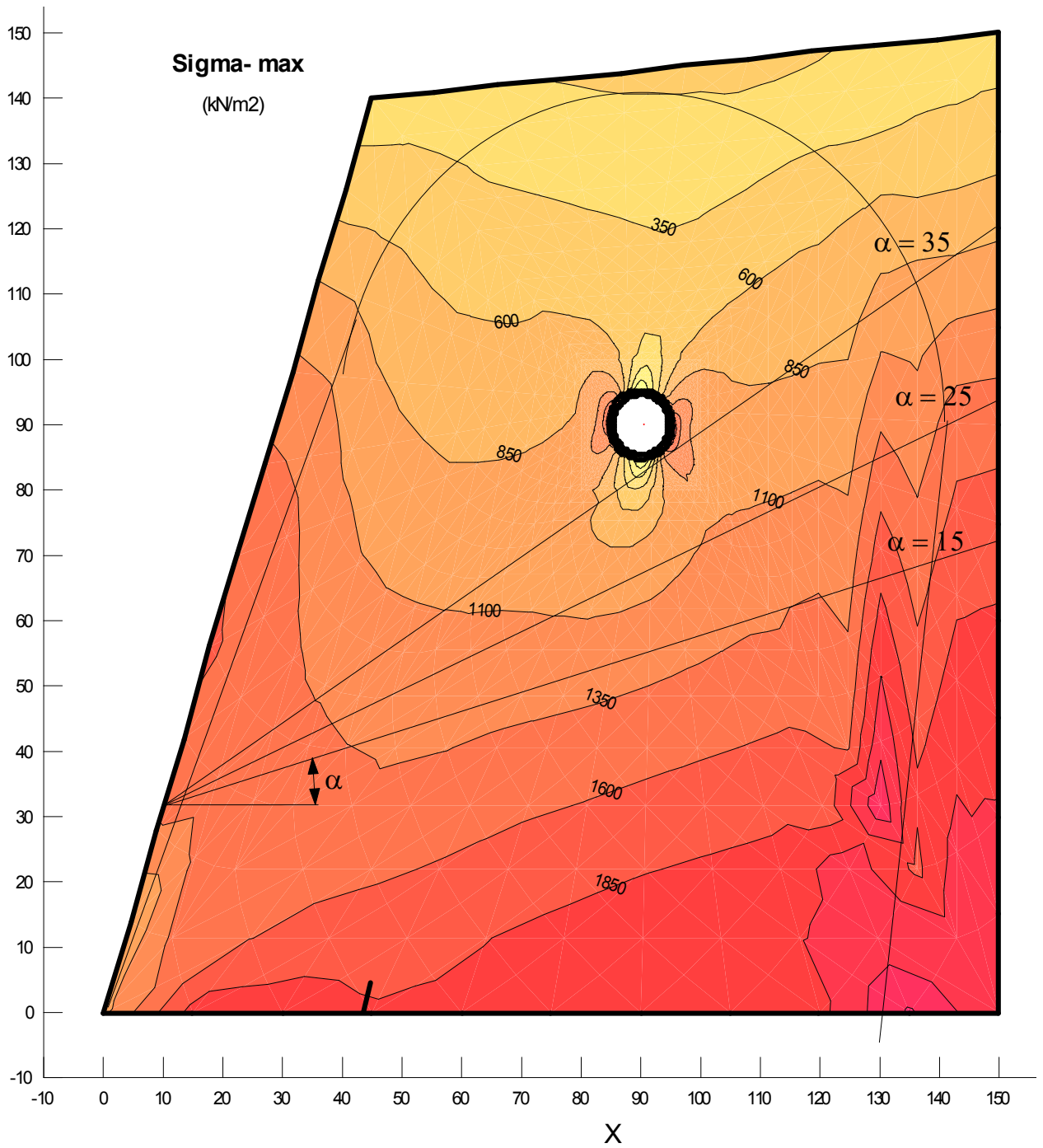
როგორც გაანგარიშების შედეგები გვიჩვენებს ხეობის ფერდში მაქსიმალური მხები ძაბვები გარკვეულად მიჰყვება დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებს (ნახ.5.2.2).

დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე ძაბვების განაწილების ეპიურების (ნახ. 5.2.3 - 5.2.9) ანალიზი აჩვენებს, რომ K_m/K_{gz} ფარდობის ზრდისას მცირდება ფილტრაციის არეში ეფექტური ნორმალური და მხები ძაბვები, მცირდება დამჭერი ძალები და შესაბამისად ძვრაზე

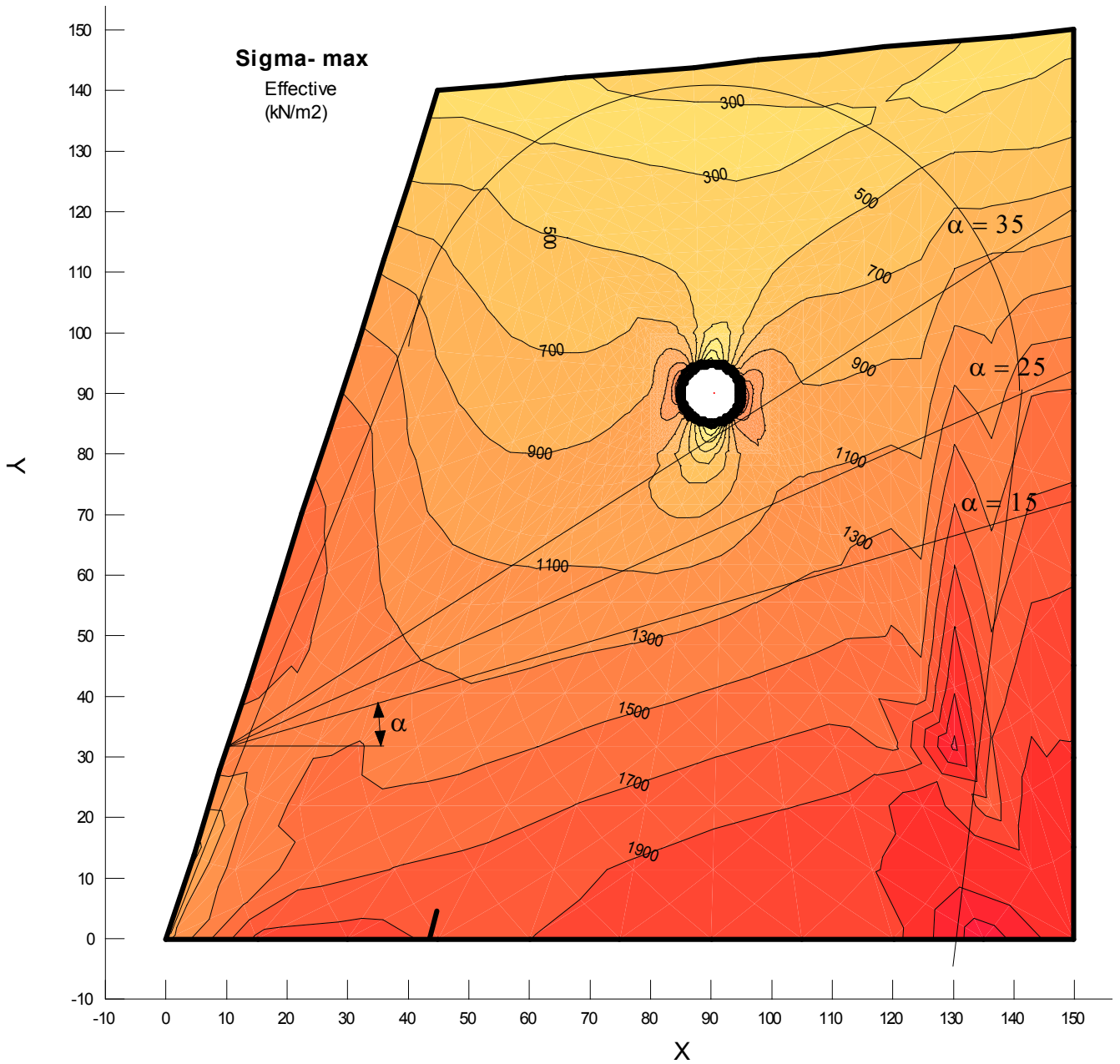
მდგრადობის მარაგები. როდესაც ფარდობააღწევს $K_m/K_{gz} = 2.5$ მარაგი უახლოვდება კრიტიკულ მნიშვნელობას (ნახ. 5.2.10).



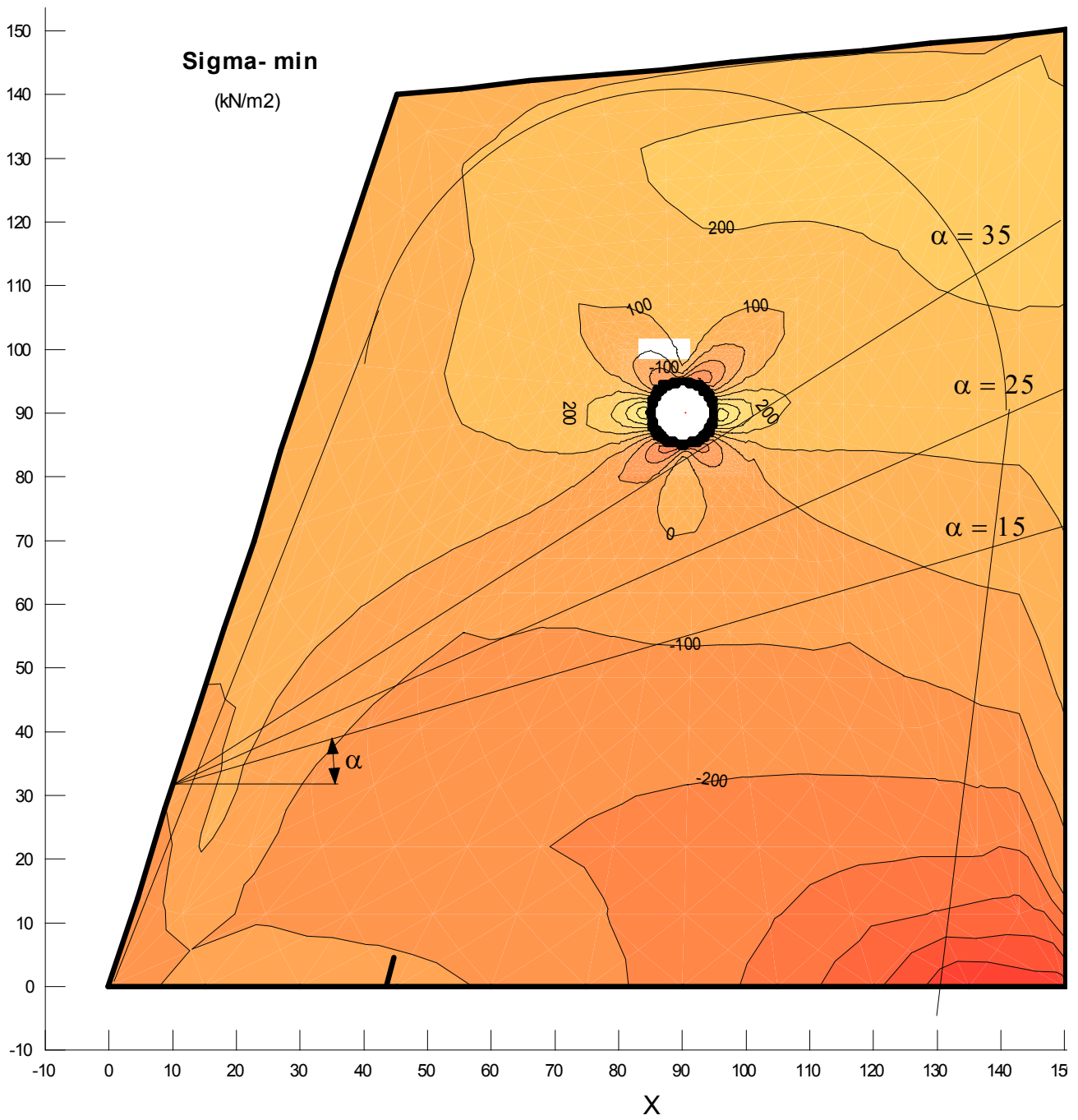
ნახ.5.2.2. მაქსიმალური მხები ძაბვების განაწილება მასივში დებრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.



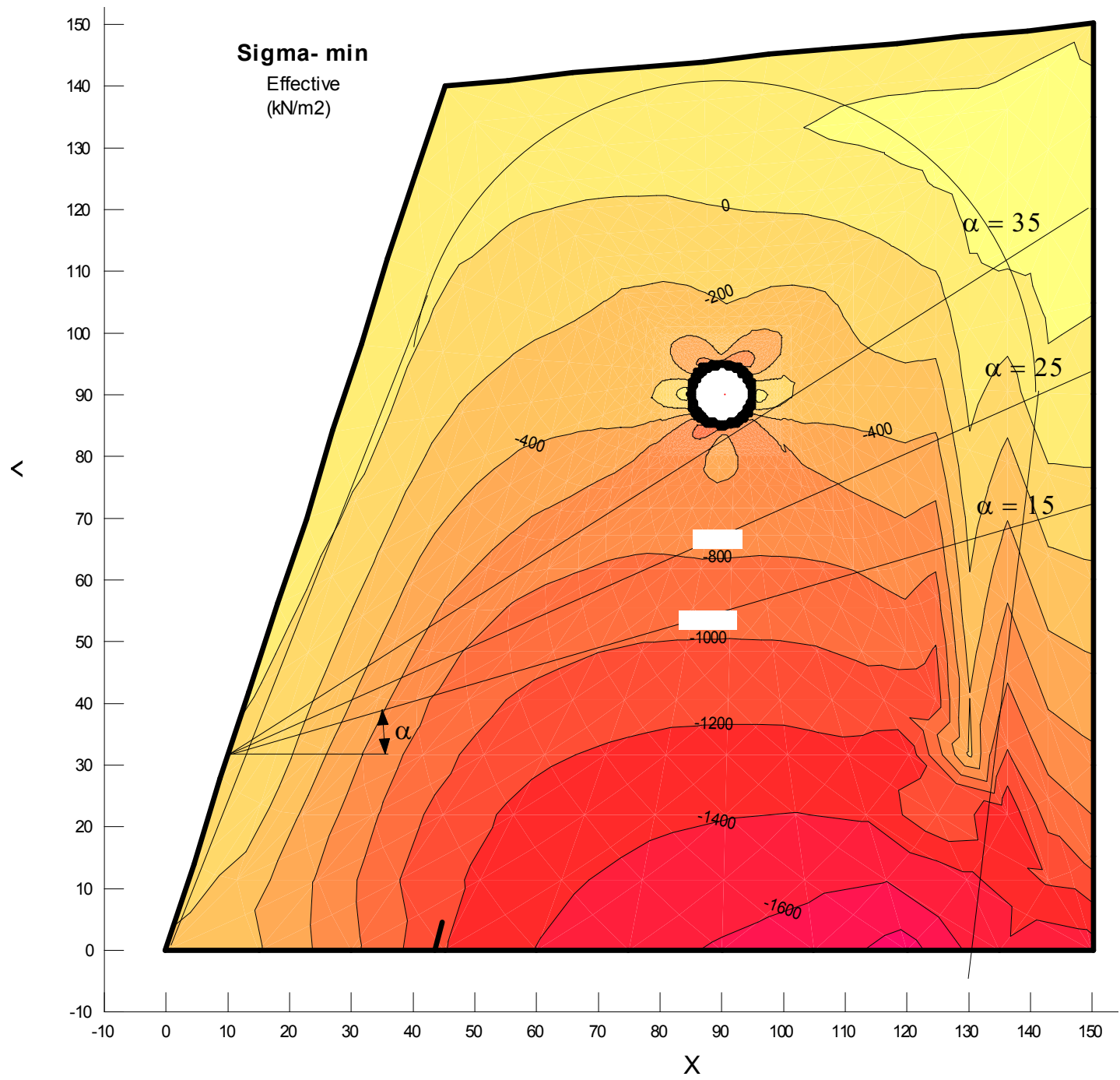
ნახ.5.2.3 მაქსიმალური მთავარი დაბევების განაწილება მასივში.



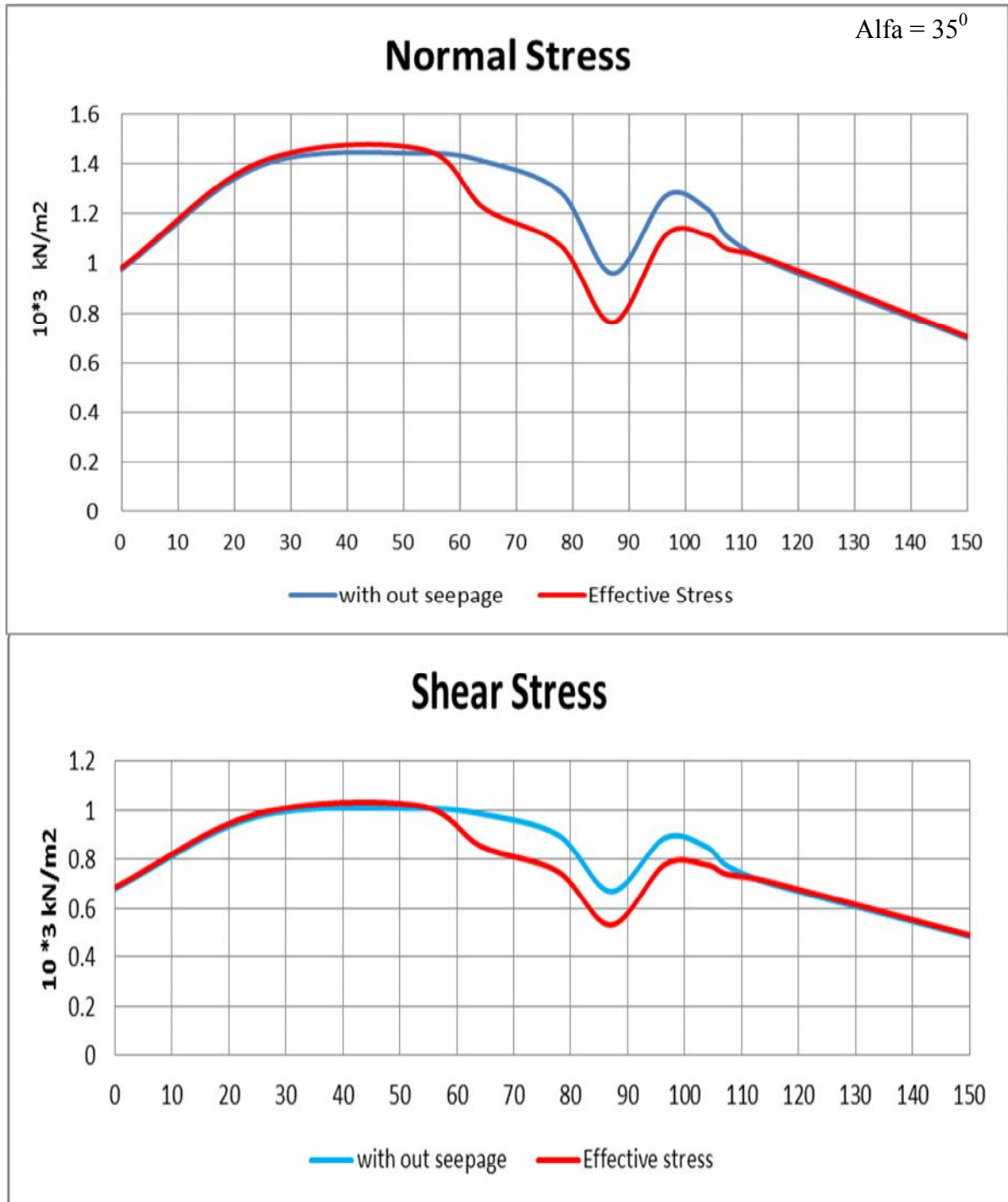
ნახ.5.2.4 მაქსიმალური მთავარი ეფექტური ძაბვების განაწილება მასივში დეპრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.



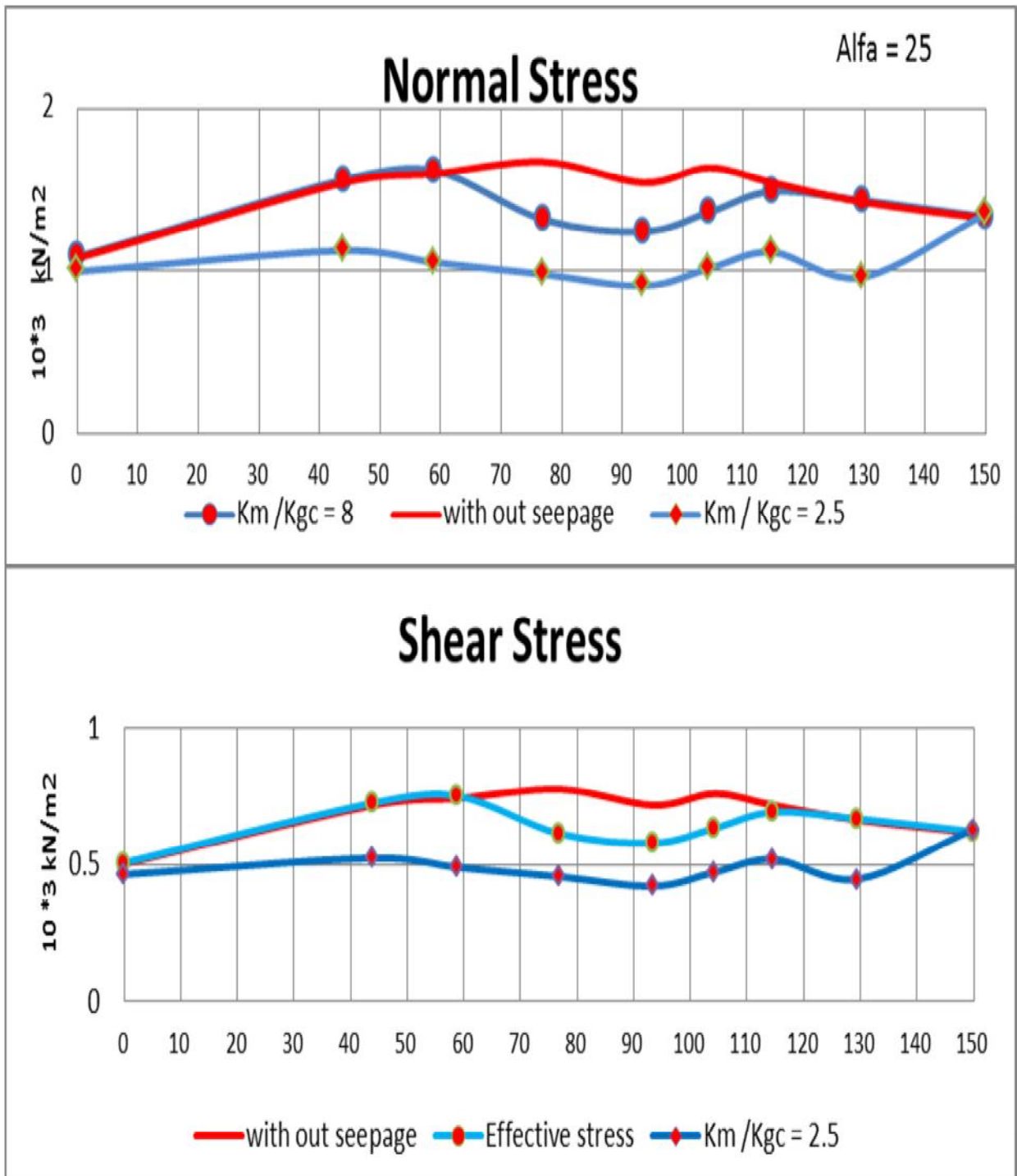
ნახ.5.2.5 მინიმალური მთავარი დაბეჭდვის განაწილება მასივში.



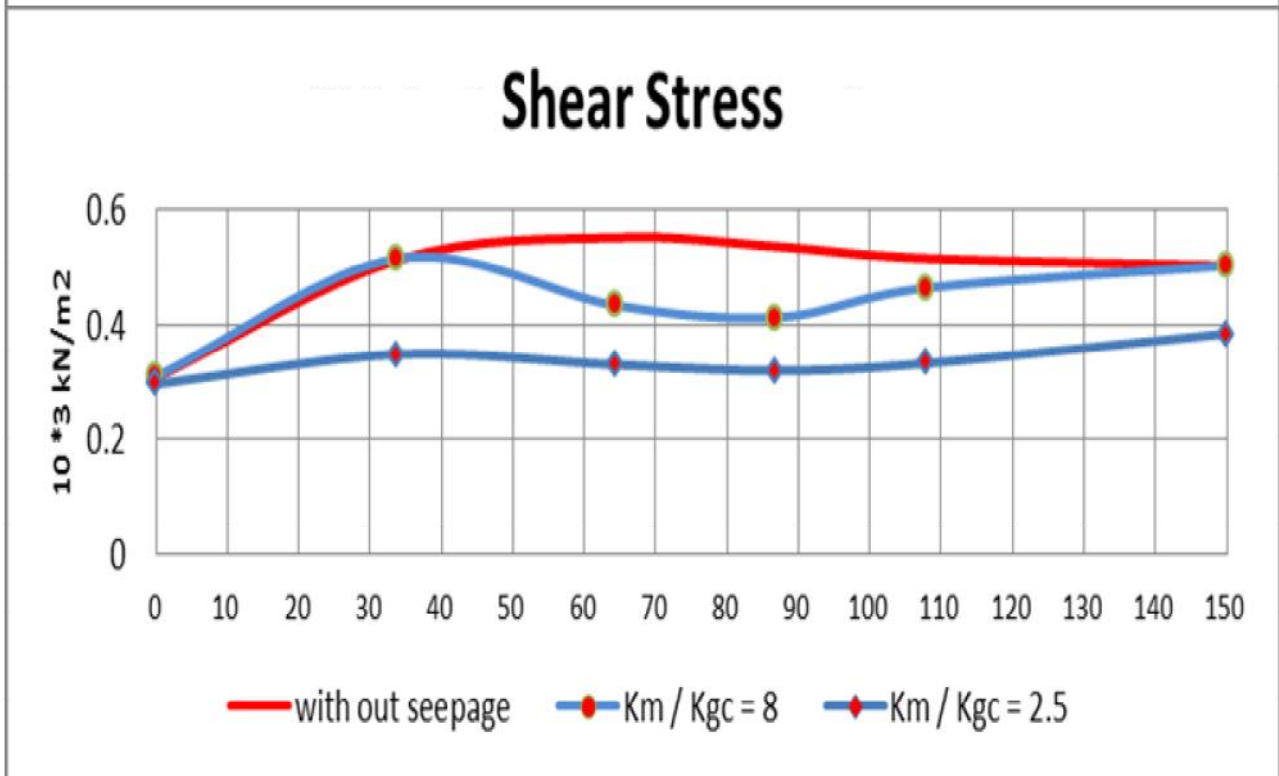
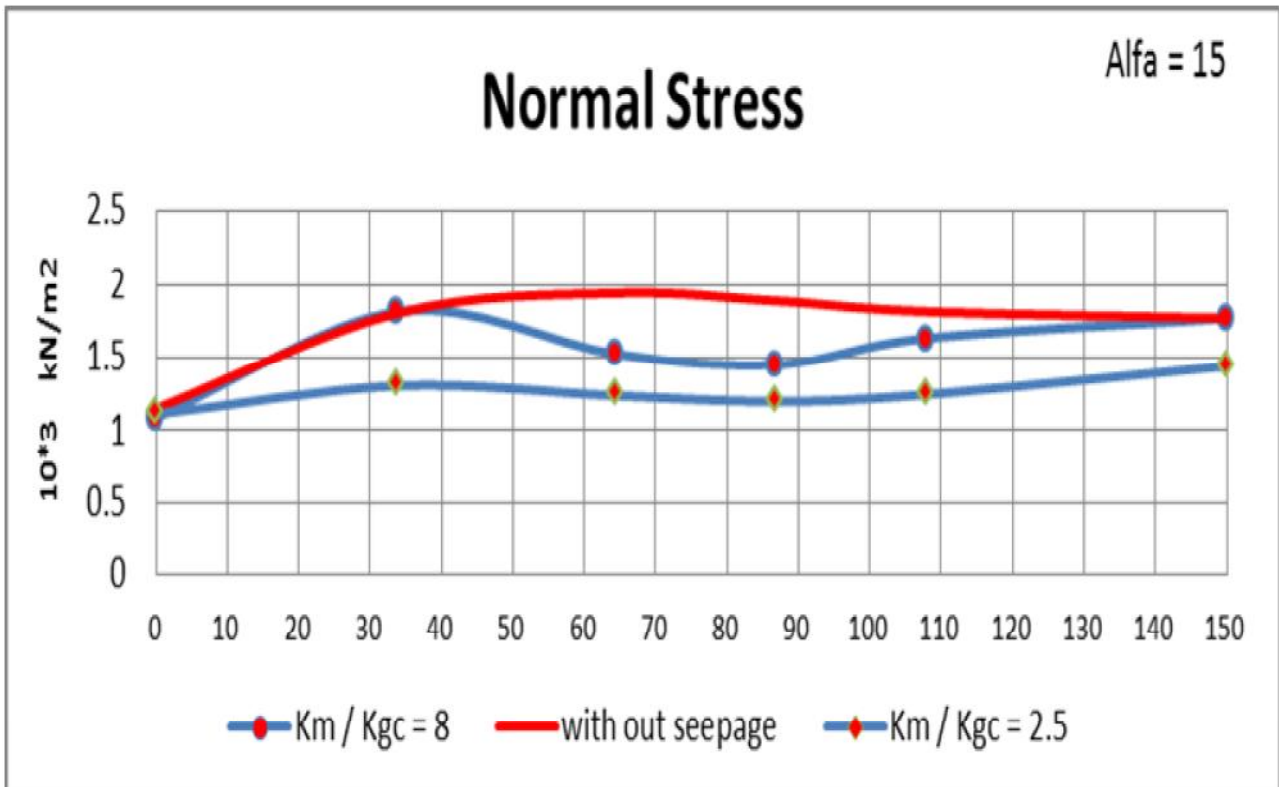
ნახ.5.2.6 მინიმალური მთავარი ეფექტური ძაბვების განაწილება მასივში დებრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$.



ნახ.5.2.7 ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 35^\circ$).

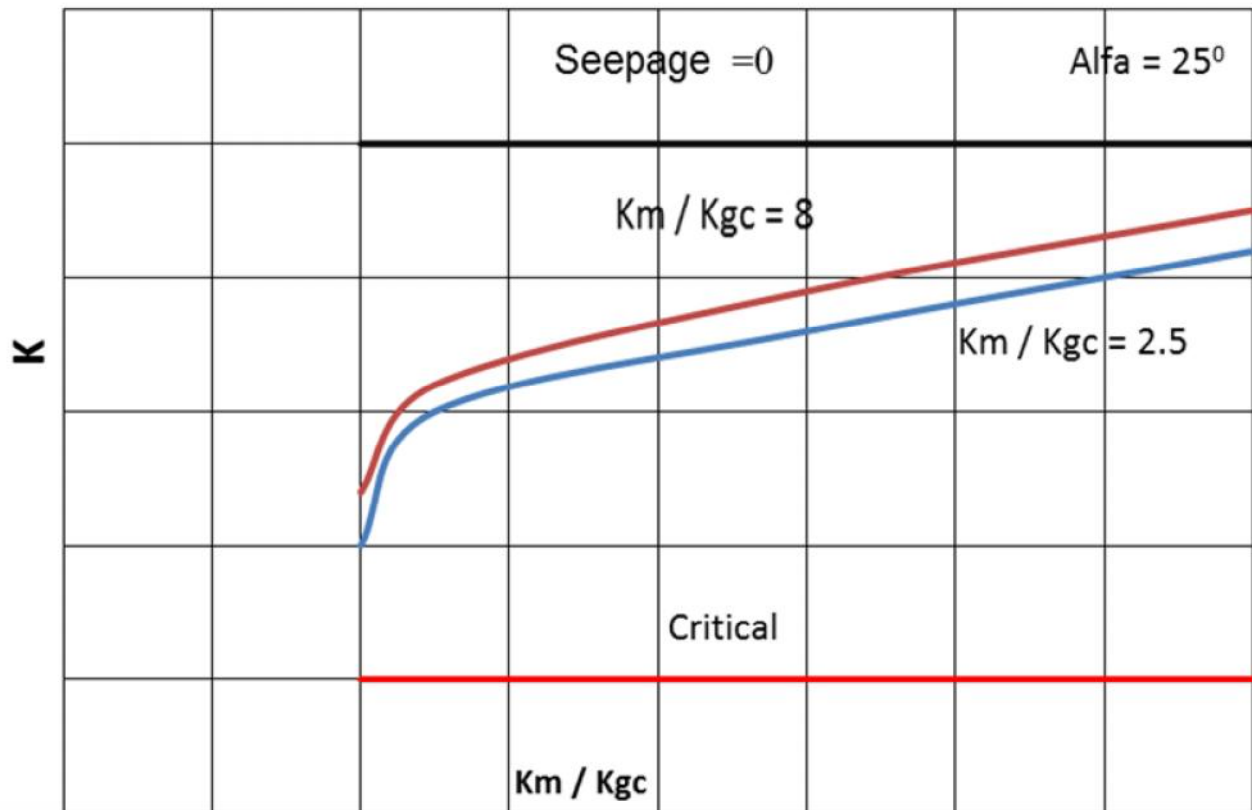


ნახ.5.2.8 ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m/K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 25^\circ$).



ნახ.5.2.9 ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა $K_m / K_{gz} = 2.5$ ($\alpha = 15^\circ$).

Stability Factor



ნახ.5.2.10 მდგრადობის მარაგების დამოკიდებულება K_m / K_{gz} ფარდობაზე, როცა $\alpha = 25^\circ$.

დ ა ს კ ვ ნ ა:

- სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის გამოყენებით დამუშავებული იქნა მეთოდთა და საანგარიშო პროგრამა 2 განზომილებიანი ამოცანების სტატიკური გაანგარიშებისათვის. სასრული ელემენტების მეთოდთან შედარებით სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი ხასიათდება საანგარიშო სქემის მნიშვნელოვანი სიმარტივით, (რაც კარგ საფუძველს ქმნის იტერაციული კვლევების ჩატარებისას დროს) და საშუალებას იძლევა:
 - “მოკეთება-გარემომცველი მასივი” სისტემის კვლევის დროს გვირახის ცენტრის კოორდინატების მარტივი ცვლილებით გარდაიქმნას ხსენებული სისტემა ისე, რომ უცვლელი დარჩეს გარემომცველი კონტურის სასაზღვრო ელემენტებით აპროქციმაცია და მიღწეული იქნას გვირახის ტრასის ვარირება;
 - დასაბუთებული იქნას ფერდის სიახლოეს მყოფი გვირახის ტრასის საპროექტო ვარიანტი, ასევე შეფასებული იქნას ექსპლუატაციის პერიოდში ხსენებული სისტემის მუშაობა (მასივის ფილტრაციული და სტატიკური სიმტკიცის, აგრეთვე მდგრადობის პირობების მიხედვით) - ხეობის ტოპოგრაფიული და გეოლოგიური პირობების, გარემომცველი ცემენტაციური ზონის, აგრეთვე მასივში განვითარებული თანამდგევი ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით.
- ენგურჰესის სადაწნეო გვირახის არაარმირებული მოკეთება, საპროექტო გადაწყვეტის შესაბამისად, წარმოადგენს წყალჟონვად კონსტრუქციას, სადაც შიდა წნევის მოქმედებისას, ჩნდება ბზარები ლიმიტირებული პარამეტრებით. ამდენად, გამაგრებითი ცემენტაცია, როგორც ფილტრაციის საწინააღმდეგო ძირითად საშუალების ეფექტურობას განსაზღვრავს ძირითადი მასივისა და ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენთა ფარდობა,

რომელის მისაღები მნიშვნელობაა - $K_m/K_{gz} = 10$. ამ დროს დეპრესიის ზედაპირი მთლიანად თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში (საპროექტო გადაწყვეტა).

- მიღებული იქნა, რომ K_m/K_{gz} ფარდობის ზრდისას, რასაც თანახლავს დეპრესიის ზედაპირის გაბარიტების შემცირება, მდგრადობის მარაგები იზრდება. როდესაც აღნიშნული ფარდობა აღწევს მახვენებელს $K_m/K_{gz} = 2.5$, მარაგი უახლოვდება კრიტიკულ მნიშვნელობას, ხოლო ფარდობა $K_m/K_{gz} = 4$ მისაღებია, რომლის დროს კმაყოფილდება მდგრადობის პირობები.
- შეფასებული იქნა ცემენტაციური ზონის ამჟამინდელი მდგომარეობა. მშენებლობის დროს ცემენტაციის დაბალი ხარისხის არსებობის, ან ექსპლუატაციის პერიოდში სუფოზიური პროცესის განვითარებისას, როდესაც $K_m/K_{gz} > 10$ დეპრესიის ზედაპირი გადის ცემენტაციური ზონიდან, ხოლო, ფარდობა $K_m/K_{gz} = 2.5$ წარმოადგენს დეპრესიის ზედაპირის კრიტიკულ მნიშვნელობას, რომლის დროს ადგილი აქვს ხეობის ფერდის დასველებას. ამ დროს ფილტრაციული ხარჯი საპროექტოსთან შედარებით იზრდება ≈ 2.5 -ჯერ.
- ცემენტაციური ზონის ფარგლებში ფილტრაციული გრადიენტები აკმაყოფილებენ ფილტრაციული სიმტკიცის პირობას, თუმცა არაა გამორიცხული მოხდეს შრეებს შორის ბზარების გახსნა და სუფოზიური პროცესების განვითარება, რაც გვირაბის რეაბილიტაციის საკითხს უფრო აქტუალურს ხდის.
- წყალჟონვადი მოკეთების არსებობის პირობებში, მასივში განვითარებული ფილტრაციული ძალების ზემოქმედებით, მნიშვნელოვნად იცვლება ხეობის ფერდის დაძაბული მდგომარეობა. შესაბამისად, დაცურების პოტენციურად საშიშ

ზედაპირებზე მდგრადობის მარაგების შეფასებისათვის საჭიროა გათვალისწინებული იქნას ფილტრაციული მოცულობითი ძალები.

- გარემომცველი ზონის ცემენტაცია წარმოადგენს მძლავრ საინჟინრო საშუალებას, რომლის გამოყენებით შესაძლებელია მოხდეს, როგორც ფილტრაციული დანაკარგების შემცირება, ასევე პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე მდგრადობის მარაგების გაზრდა, რაც საჭიროა გათვალისწინებული იქნას პროექტირების დროს.

ლიტერატურა

1. Jaeger C., Theorie Generale du Coup de Belier, Paris, 1933. 69 p.
2. Jaeger C., Technische Hydraulik, Basle, 1949. 120 p.
3. Jaeger C., Rock mechanics for hydro-power engineering, Water Power, 13, #9, 10, 1961. 98 p.
4. Hill R., The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, 1950. 167 p.
5. Reyes S.F., Deere D. U., Elastic- plastic analysis of underground openings by the finite element method, 1st Congr. Rock Mechanics, Lisabon, 2, 477 - 486, 1966.
6. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Наука, 1966. 425 с.
7. Фотиева Н. Н. Расчет обделок тоннелей некругового поперечного сечения. М. Стройиздат, 1974. 134 с.
8. Савин Г. Н. Концентрация напряжений около отверстий. М.-Л., Гостехиздат, 1951. 153 с.
9. Гуджабидзе И. К., Калабегишвили М. А. Комбинированный метод расчета подземных сооружений. «Горный журнал», №2, 1992, с.50-54.
10. Подземные гидротехнические сооружения: Учебник для студентов вузов по спец. «гидротехническое стро-во речных сооружений и гидроэлектростанций» / Под ред. В.М.Мосткова. – М.:Высшая школа, 1986. -464 с.
11. Мостков В.М. Безопасность подземных гидротехнических сооружений. НТФ «Энергопрогресс строительство» Москва 2001, 85 с.
12. Мостков В.М. Подземные сооружения большого сечения. М., 1974.
13. Мостков В.М. Подземные гидротехнические сооружения., М. 1981. 55 с.
14. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., Углетехиздат, 1954. 379 с.
15. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М., 1982 272 с..

16. Зурабов Г. Г., Гидротехнические туннели гидроэлектрических станций.
М., 1962.
17. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей. гидропроект им С. Я. Жука. – М.: Стройиздат, 1982. 287 с.
18. Соколов И.Б., Логунова В.А. Фильтрация и противодействие воды в бетоне гидротехнических сооружений. М. «ЭНЕРГИЯ», 1977, 296 с.
19. Соколов И.Б., Логунова В.А. Расчет конструкций гидросооружений по предельным состояниям с учетом противодействия воды. Юбилейная научно-тех. конференция гидротехнического факультета ЛПИ Л. . «ЭНЕРГИЯ», 1967, с. 98-99.
20. Соколов И.Б. Изменение эффективного противодействия воды в пористых материалах и оценка влияния напряженного состояния на изменение сплошности материала.- «Труды координационных совещаний по гидротехнике», 1964, вып.13, с. 118-133.
21. Соколов И.Б. Основные предпосылки метода определения сил противодействия воды в бетоне гидросооружения, принятого в главе СНиП 11 И.14-69 (тезисы доклада на совещании по фильтрации воды через бетон, бетонные конструкции и сооружения). Тбилиси, 1969, с. 26-27 (ГрузНИИЭГС).
22. Жиленков В.Н. О закономерностях фильтрации воды в трещиноватых скальных породах. «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1967, т. 84, с. 269-276.
23. Жиленков В.Н., Сапегин Д.Д. Фильтрация воды в пористых средах. Киев, «Наука думка», 1978, ч.2, 115 с.
24. Задворный Г. М. Результаты натурных наблюдений противодействия и фильтрации в скальном основании плотины Усть-Каменогорской ГЭС.
Журнал «Гидротехническое строительство», 1966, № 7, с. 2-6.
25. Ломизе Г. М. Фильтрация воды в трещиноватых породах. М., Госэнергоатомиздат, 1950. 127 с.

26. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1966. 283 с.
27. Храпков А. А. Силовое воздействие фильтрующей воды на систему сооружение – основание. « Сборник докладов по гидротехнике», 1962, вип. 4, с. 69 -81.
28. Храпков А. А. Определение контактных напряжений в подошве гравитационной плотины, вызванных силовым воздействием фильтрующей воды. . «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1968, т. 87, с. 104-121.
29. Храпков А. А., Гейнац Г.С. Влияние фильтрационных сил на напряженное состояние плотины с трещинами (тезиси доклада на на совещании по фильтрации воды через бетон, бетонные конструкции и сооружения). Тбилиси, 1969, с. 71-71.
30. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостоптехиздат, 1960. 249 с.
31. Чураков А.П. К вопросу о величине коэффициента противодействия воды. «Гидротехническое строительство», 1958, № 4, с. 42-44.
32. Чугаев Р. Р. О фильтрационных силах. «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1959, т. 63, с. 115-141.
33. Чугаев Р. Р. Об учете фильтрационных противодействия. с
34. Чугаев Р. Р. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения жидкости и фильтрационные силы для общего случая слитнопористого тела. - «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1965, т. 78, с. 214-241.
35. Кнутсон Ц.Ф., Бохор Б.Ф. Поведение пористых тел при всестороннем давлении.- В кн.: Механика горных пород (пер.с англ.). М.: «Недра», 1966, с. 407-419.
36. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
37. Желтов Ю. П. О движении однородной жидкости в деформируемых трещиноватых породах с чисто трещинной пористостью. –«ПМТФ», 1961, № 6, с. 187-189.

38. Гинзбург М. Б. Определение противодействия в гравитационных плотинах на скальном основании (по данным отечественных и зарубежных натурных исследований). М., Госэнергоиздат, 1958. 67 с.
39. Гинзбург М. Б., Мальцов К. А., Соколов И. Б. Определение величины противодействия в бетонной кладке гидротехнических сооружений. М., Госэнергоиздат, 1959. 68 с.
40. Bardonnaut M. Effect of crack on uplift distribution beneath a dam. – "Houille blanche", 1956, vol. 21, # 4, p. 421-433.
41. Рац М. В., Иванова Н. Б., Малышев Л. И. Руководство по расчету коэффициента фильтрации трещиноватых скальных массивов по параметрам трещин. М., «Стройиздат», 1979, 89 с.
42. Кассирова Н. А., Розанов Н. С., Судакова В. Н. Определение напряжений в бетонной обделке туннеля от давления грунтовых вод методом фотоупругости. «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1975, т. 108, с. 93 - 98.
43. Кассирова Н. А. Зависимость напряженного состояния обделки кругового туннеля от степени ее дренирования. «Известия ВНИИГ имю Б. Е. Веденеева», 1975, т. 106, с. 99 - 108.
44. Аргирис Д. Ж. Энергетические теоремы и расчет конструкций В кн. Современные методы расчета сложных статически неопределимых систем. Под ред. А. А. Филина. Л., 1961, с. 37-256.
45. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М., 1982, 218 с.
46. Зенкевич О. К. метод конечных элементов в технике. М., «МИР», 1975, 5418 с.
47. Морозов Е. М., Никишков Г. Н. Метод конечных элементов в механике разрушения. М., «Наука», 1980, 254 с.
48. Городецкий А. С. и др. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. М., « ТРАНСПОРТ » , 1981, 143 с.
49. Вайнберг Д. В., Городецкий А. С. и др.
Метод конечных элементов в механике деформируемых тел.
Прикладная механика, 1972, т. 8 №8, с. 3-28.

50. Золотов О.Н., Ксенофонов В.К. Расчет подземных гидротехнических сооружений методов конечных элементов в нелинейной постановке. «Гидротехническое строительство», 1983, № 12, с. 13 - 19.
51. Гордон Л.А., Готлиф А.А. Статический расчет бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений. М.: Энергоиздат, 1982, 240с.
52. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М., «Наука», 1977, 211с.
53. Мерзляков В. П. Замечания к расчету напряженного состояния в анизотропном скальном основании. «Гидротехническое строительство», 1983, № 12, с. 19 - 20.
54. Пирогов И.А. Анизотропия скальных пород и ее роль при изучении и оценке оснований высокой бетонной плотины. Труды Гидропроекта, 1974, вып.37, с.83 – 102.
55. M. Kalabegishvili , K. Chkicvadze. Safety Assessment of Enguri Pressure Tunnel. Hadrovision 2002. Issues.Solutions.New Approches. Oregon Convention Center. Portland, Oregon USA 2002.
56. Kalabegishvili M. Study of concrete gravitation dam operation in view a of cracks and seepage flow. TRANSACTIONS of the international Symposium on the Problems of Desagn, Construction and operation of Hydroulic Structures. Tbilisi 2000. p.79-82.
57. ყალაბეგიშვილი მ.ა. სტაციონალურ ფილტრაციული ამოცანის ამოხსნა ორ და სამგანზომილებიანი არეებისათვის სასრულ-ელემენტული მოდელის გამოყენებით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი (სტუ), შრომები №2 (410), თბილისი 1996, გვ.55-62.
58. ყალაბეგიშვილი მ.ა., ჭინჭარაული თ.გ. ტვიშის გრავიტაციული კაშხლის ფუძის ფილტრაციული გაანგარიშება. სტუ, შრომათა კრებული №1 (409), თბილისი 1996, გვ.55-59.
59. Калабегишвили М.А., Исследование совместной работы гравитационной плотины и оснований с учетом трещинообразования и сопутствующих фильтрционных

- процессов. ГТУ, юбилейный сборник трудов, посвященный проф. А.Горгидзе, Тбилиси, 1997.
60. Калабегишвили М.А. , Гургенидзе Д.Р. Вопросы реабилитации напорного туннеля Ингури ГЭС. Геодинамические исследования больших плотин. Труды Международного семинара. Тбилиси, 2002. , 80-84 с.
61. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Стройиздат, 1977, с.-783.
62. СНИП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические. М.: Госстрой СССР. 1985.
63. Вербецкий Г.П. Обоснование новых предложений по нормированию величины допускаемого раскрытия трещин в бетонных и конструкциях гидротехнических сооружений.- «Труды координационных совещаний по гидротехнике», 1966, вып.31, с. 58-87.
64. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М., «Стройиздат», 1976, 128 с.
65. Гольдин А.Л., Расскззов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин. М. 2001, 384 с.
66. Калабегишвили М., Давитая М. Вопросы проектирования напорных туннелей находящихся в близи склона. Журнал « ENERGY », Тбилиси, 2005, №4 (36), с.88-93.
67. Калабегишвили М., Давитая М. Анализ параметров фильтраций нетрещиностойких напорных туннелей с учетом геологической структуры массива.. Журнал « ТРАНСПОРТ », Тбилиси, 2005, №4 (20), с.39-40.
68. Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. М., «Наука», 1968, 111с.
69. Рац М.В., Чернишев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1970, 105с.

70. Роза С.А., Зеленский Б.А. Исследование механических скальных оснований гидротехнических сооружений. М. «ЭНЕРГИЯ», 1967, 163 с.
71. Исследования конструкций подземных сооружений и окружающих их скальных пород. Л., «ЭНЕРГИЯ», 1975, 80 с.
72. Шпуровой дренаж и противофильтрационная цементация в подземных гидротехнических сооружениях, вып. 61, М., «ЭНЕРГИЯ», 1978, 105 с.
73. Чумбуридзе Г.К., Ашихмен В.А., Амиридзе Н.В., Пронина Л.Э., Арутюнова М.З. Качество цементации в напорно-деривационном туннеле Ингури ГЭС. Журнал «Гидротехническое строительство», № 3, 1988. с.9-14.
74. Токачирев В.А., Аллас Э. Э., Буцацкий Г.В., Введенский В. Н. Экспериментальные исследования прочности и водопроницаемости обделок высоконапорного туннеля Ингури ГЭС с укрепительной цементацией окружающей горной породы. «Энергетическое строительство». № 2(80). М., «ЭНЕРГИЯ», 1968, с.38-43.
75. Ашихмен В.А., Пронина Л.Э., Чумбуридзе Г.К.. Цементация карстовых полостей в напорно-деривационном туннеле Ингури ГЭС // журнал «Энергетическое строительство». № 12 1989, с.46-49.
76. Чоговадзе Г.И. и др. Ингурская гидроэлектростанция. М.: Энергоатомиздат, 1987, - 200 с.
77. Ухов С.Б. Скальные основания гидротехнических сооружений. М. «ЭНЕРГИЯ», 1975, 263 с.
78. Калабегишвили М., Давитая М. Оценка устойчивости напорных туннелей находящихся вблизи карст. Журнал « ENERGY », Тбилиси, 2006, №2 (38), с.89-93.
79. Давитая М, Калабегишвили М., Самхарадзе Р. Инженерные решения по улучшению состояния деривационного туннеля Ингури ГЭС. Журнал « ТРАНСПОРТ », Тбилиси, 2006, №2 (22), с.34-36.

პუბლიკაციები სადისერტაციო თემაზე

80. მყალაბეგიშვილი, გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ, ISSN 1512-3936, სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „მშენებელი“ №4(31). 2013წ.

ქ. თბილისი. *სადაწნეო გვირაბების ფელტრაციული ანალიზი გამაგრებითი ცემენტაციის ხარისხის გათვალისწინებით*“ (გვ.115-120)

81. მყალაბეგიშვილი, გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ, ISSN 1512-3936, სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „მშენებელი“ №1(32). 2014წ.

ქ.თბილისი.” *Устойчивость напорного туннеля находящегося вблизи откоса ущелья*“ (გვ.115-120)

82. გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ,ISSN 1512-410X სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“ №1-2(15-16). 2014წ. ქ. თბილისი.

„ ხეობის ფერდის მდგრადობის საკითხები სადაწნეო გვირაბის არსებობისას“

83. გ.ახვლედიანი. სტუ, სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კომფერენცია. „ *სადაწნეო გვირაბების მდგრადობის ანალიზი, ფელტრაციული ძალების გათვალისწინებით,*“ სამშენებლო ფაკულტეტი, სექცია ჰიდროინჟინერია. 10.06.2013წ. (მეორე ადგილი.)