საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ლეონტინა გალდავა

სტატიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა არსებული გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცეზე

დისერტაცია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

თბილისი
2014

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის ჰიდროსაინჟინრო დეპარტამენტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: პროფესორი არჩილ მოწონელიძე
პროფესორი ტარიელ კვიციანი

რეცენზენტები: პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი
ტ.მ.კ. პაატა ტუღუში

დაცვა შედგება 2014 წლის 27 ივნის, 15$^{\underline{00}}$ სთ-ზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის აუდიტორიაში
მისამართი: თბილისი 0175, კოსტავას 68^{ბ}, პირველი კორპუსი, მე-3 სართული

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება
სტუ-ს ბიბლიოთეკასა და სტუ-ს ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს
სწავლული მდივანი: პროფესორი დ. ტაბატაძე

სარჩევი

შესავალი ... 8
1. გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის საანგარიშო მეთოდების რეტროსპექტული მიმოხილვა ... 9
1.1. კლასიკური ანალიზური მეთოდები ... 9
1.2. საკონტაქტო ამოცანები - კოჭური მეთოდი და ნახევრად ანალიზური მეთოდი ... 13
1.3. სასრული ელემენტების მეთოდით გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცეზე ანგარიში ჰორიზონტალური შრეებით თანდათანობითი აგების გათვალისწინებით ... 15
1.4. გრავიტაციული კაშხლების მდგრადობის და სიმტკიცის ანალიზი კატასტროფების თეორიის პოზიციებიდან ... 25
2. არსებული ბეტონის კაშხლების კომპლექსური რეტროსპექტული სტატიკური ანალიზის მეთოდიკა ... 34
2.1. მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა ... 35
2.1.1. ეტაპი ღ-1: ბეტონის მოდელი ბრტყელი დეფორმაციის ამოცანებისათვის ... 36
2.1.2. ეტაპი ღ-1: კონსტიტუციური მოდელი ინტერფეისებისათვის (საკონტაქტო ზედაპირებისათვის) ... 47
2.1.3. ეტაპი ღ-2: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში ... 54
2.1.4. ეტაპი ღ-3: ბზარის წარმოშობის და გავრცელების ანალიზი ... 59
3. ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის გავლენა არსებული გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ... 69
3.1. ეტაპი ღ-4: ციკლური დატვირთვებისა და ბეტონის ასაკის გავლენა ინტერფეისებზე ... 75
4. სტატიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა გრეისის გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ... 86
4.1. საწყისი მონაცემები ... 86
4.2. სისტემაზე მოქმედებს მხოლოდ კაშხლის საკუთარი წონა (სამშენებლო შემთხვევა) ... 92
4.3. სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე (საექსპლუატაციო შემთხვევა) ... 95
4.4. სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე ... 99
4.5. სტატიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა გრეისის კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ... 115
დასკვნები ... 126
ლიტერატურა ... 129

ნაშრომში წარდგენილი ცხრილების ნუსხა:

ცხრილი 2.1: მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა........ 35
ცხრილი 4.1:........ 105
ცხრილი 4.2:........ 106
ცხრილი 4.3:........ 107
ცხრილი 4.4:........ 108
ცხრილი 4.5:........ 109
ცხრილი 4.6:........ 110
ცხრილი 4.7:........ 111
ცხრილი 4.8:........ 112
ცხრილი 4.9:........ 113
ცხრილი 4.10:........ 114
ცხრილი 4.11:........ 119
ცხრილი 4.12:........ 120
ცხრილი 4.13:........ 121
ცხრილი 4.14:........ 122
ცხრილი 4.15:........ 123
ცხრილი 4.16:........ 124
ცხრილი 4.17:........ 125

ნაშრომში წარდგენილი ნახაზების ნუსხა:

ნახ.1.1: არათანაბარი კუმშვის მეთოდით გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა........11
ნახ.1.2: დრეკადობის თეორიის მეთოდით მეთოდით გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა........12
ნახ.1.3: ბეტონის კუმშვის პირობითი დიაგრამის წარმოდგენა წრფივად ტეხილი მრუდის სახით........17
ნახ.1.4: გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა ფენობრივად აგების მხედველობაში მიღებით........19
ნახ. 1.5: სისტემა "პირობითი გრავიტაციული კაშხალი – ერთგვაროვანი კლდოვანი ფუძის" სანგარიშო სქემა ფენობრივი აგების მხედველობაში მიღებით........21
ნახ. 1.6: ძაბვების განაწილების ეპიურები ჰორიზონტალურ კვეთებში........22
ნახ. 1.7: σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები ჰორიზონტალურ კვეთებში........24
ნახ. 1.8: სისტემის სტაბილური წონასწორობის სქემა........26
ნახ. 1.9: კაშხლის რღვევის სქემა ნახტომისებრი სქემა წყლის ჰ სიღრმის ნახტომისებრი ცვლილებისას........27
ნახ. 1.10: ნახტომის სქემა სისტემაში – ფაზის ტრაექტორია კვეთს დაშტრიხულ ფართს........30
ნახ. 1.11: ბზარის გაჩენის სქემა კაშხლის ფუძეში........31
ნახ. 2.1: ერთღერძა კუმშვის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გაჭიმვა-კუმშვის ფარგლებში, როდესაც $\alpha=\sigma_3/\sigma_1=0.05$........45
ნახ. 2.2: ერთღერძა კუმშვის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გაჭიმვა-კუმშვის ფარგლებში, როდესაც $\alpha=\sigma_3/\sigma_1=-0.05$........46
ნახ. 2.3: მხები ძაბვა-დეფორმაციების მოდელი ინტერფეისისათვის........49
ნახ. 2.4: ნორმალური ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილების მოდელი ინტერფეისისათვის........53
ნახ. 2.5: აღწერილი მეთოდით მიღებული შედეგების შედარება [15]-ში მოყვანილ ექსპერიმენტულ მონაცემებთან ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისისათვის A პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის........55
ნახ. 2.6: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში $\sigma(t) = 7{,}0$ მპა-ის დროს........58
ნახ. 2.7: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში $\sigma(t) = 1{,}1$ მპა-ის დროს........58
ნახ. 2.8: ბზარი დრეკად ბლოკში........62
ნახ. 2.9: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება........64
ნახ. 2.10: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება........65
ნახ. 2.11: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება........67
ნახ. 3.1: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (კუმშვა-კუმშვა) n ციკლებისა t ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც $\alpha=0{,}05$........77
ნახ. 3.2: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) n ციკლებისა t ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც $\alpha= -0{,}05$........78
ნახ. 3.3: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) n ციკლებისა t ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც $\alpha= -0{,}10$........79
ნახ. 3.4: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) n ციკლებისა t ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც $\alpha= -0{,}15$........80
ნახ. 3.5: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილების მრუდები ცვალებადი A პარამეტრის შემთხვევებში n დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობასთან და t ბეტონის ასაკთან კავშირში........83
ნახ. 3.6: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითიგადაადგილების მრუდები ცვალებადი A პარამეტრის შემთხვევებში n........84

ნახ. 3.7: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითიგადაადგილების მრუდები ცვალებადი A პარამეტრის შემთხვევებში n 85
ნახ. 4.1: გრეისის კაშხალი და მისი ადგილმდებარეობა. 86
ნახ. 4.2: გრეისის კაშხალი (გეგმა და ხედი ქვედა ბიეფიდან)........87
ნახ. 4.3: გრეისის კაშხლის ცენტრალური (B15 და B16 ბლოკები) განივი ჭრილები. 87
ნახ. 4.4: გრეისის კაშხლის წყალსაცავის ავსება-დაცლის გრაფიკი (1996-2006 წლები)........88
ნახ. 4.5: ბლოკ B15-ის და მისი ფუძის სანგარიშო სქემად შერჩევის თანმიმდევრობა........89
ნახ. 4.6: სასრული ელემენტების მეთოდით სანგარიშო სისტემა "გრეისის კაშხალი – ფუძე". 90
ნახ. 4.7: საანგარიშო შემთხვევების ძირითადი სქემები........91
ნახ. 4.8: სისტემის ჰორიზონტალური u *(X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები*........92
ნახ. 4.9: სისტემის ვერტიკალური v *(Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები*........92
ნახ. 4.10: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x *ძაბვების იზოუბნები*........93
ნახ. 4.11: ვერტიკალური ნორმალური σ_y *ძაბვების იზოუბნები.* 94
ნახ. 4.12: მხები τ *ძაბვების იზოუბნები*........94
ნახ. 4.13: მაქსიმალური მთავარი σ_1 *ძაბვების იზოუბნები.* 95
ნახ. 4.14: სისტემის ჰორიზონტალური u *(X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.* 96
ნახ. 4.15: სისტემის ვერტიკალური v *(Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.* 96
ნახ. 4.16: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x *ძაბვების იზოუბნები*........97
ნახ. 4.17: ვერტიკალური ნორმალური σ_y *ძაბვების იზოუბნები*........98
ნახ. 4.15: მხები τ *ძაბვების იზოუბნები*........98
ნახ. 4.19: მაქსიმალური მთავარი σ_1 *ძაბვების იზოუბნები*........99
ნახ. 4.20: სისტემის ჰორიზონტალური u *(X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები*........100
ნახ. 4.21: სისტემის ვერტიკალური v *(Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.* 100
ნახ. 4.22: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x *ძაბვების იზოუბნები.* 101
ნახ. 4.23: ვერტიკალური ნორმალური σ_y *ძაბვების იზოუბნები*........101
ნახ. 4.24: მხები τ *ძაბვების იზოუბნები.* 102
ნახ. 4.25: სისტემის "გრეისის კაშხალი – ფუძე – წყალსაცავი" საანგარიშო სქემა სასრული ელემენტების მეთოდით (ფრაგმენტი). 103
ნახ. 4.26: σ_y *ძაბვები საკონტაქტო კვეთში (7080 – 7359). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.* 105
ნახ. 4.27: σ_y *ძაბვები 2-2 კვეთში (6943 – 7152). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.* 106
ნახ. 4.28: σ_y *ძაბვები 3-3 კვეთში (6962 – 6955). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.* 107
ნახ. 4.29: σ_y *ძაბვები 4-4 კვეთში (7001 – 7003). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.* 108
ნახ. 4.30: σ_y *ძაბვები 5-5 კვეთში (7016 – 7017). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი -* σ_y *ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.* 109

ნახ. 4.31: σ_y ძაბვები 6-6 კვეთში (7034 – 7043). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.............................110

ნახ. 4.32: σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7062 – 8033). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.............................111

ნახ. 4.33: σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7167 – 7066). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.............................112

ნახ. 4.34:. σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7154 – 8220). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.............................113

ნახ. 4.35: σ_y ძაბვები 10-10 კვეთში (7154 – 8220). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.............................114

ნახ. 4.36: ჰორიზონტალური u გადაადგილებების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.....................................116

ნახ. 4.37: ვერტიკალური v გადაადგილებების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.....................................116

ნახ. 4.38: გადაადგილებების მაგნიტუდების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.....................................117

ნახ. 4.39: ძაბვების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით....................................117

ნახ. 4.40: მაქსიმალური მთავარი ძაბვების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.....................................118

ნახ. 4.41: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-2 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................119

ნახ. 4.42: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-4 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................120

ნახ. 4.43: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-6 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................121

ნახ. 4.43: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-8 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................122

ნახ. 4.45: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-9 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................123

ნახ. 4.46: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-10 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)....................................124

ნახ. 4.47: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-11 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით)..125

შესავალი

მაღალი ბეტონის კაშხლების ფაქტიური ისტორია დაიწყო ჰუვერის (ყოფილი ვლისბოულდერის) თაღოვან-გრავიტაციული კაშხლის აგებით, რომლის სიმაღლე არის 221 მ. ამ თაღოვან-გრავიტაციული კაშხლის მშენებლობა მდ. კოლორადოზე (აშშ) დაიწყო 1932, ხოლო დასრულდა 1936 წელს. ამის შემდეგ მსოფლიოში სხვადასხვა ტიპის ათასობით ბეტონის კაშხალი აიგო, მათ შორის საქართველოშიც. მიუხედავად დიდი გამოცდილებისა, ინჟინრებისთვის დღესაც არის ღიად დარჩენილი საკითხები, რომლებიც ამ კაშხლების მუშაობას უკავშირდება და მოითხოვს გადაწყვეტას. ამით იქნება მიღწეული ის, რომ შესაძლებელი გახდება მათი სრული საექსპლუატაციო პოტენციალის დადგენა.

კომპიუტერული ტექნოლოგიების სწრაფმა განვითარებამ მე-20 საუკუნის 60-იანი წლებიდან გამოიწვია ბეტონის კაშხლების სიმტკიცის ანგარიშებისადმი მიდგომებში თვისობრივი ნახტომი. წინ წამოიწია და თანდათანობით დომინანტური პოზიციები დაიჭირა მათემატიკის რიცხვითმა, მეთოდებმა, როგორებიც არის სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი და სასრული ელემენტების მეთოდი. ეს უკანასკნელი დღეს წარმოადგენს ძირითად და, ფაქტიურად, ერთადერთ ზუსტ და საიმედო სანგარიშო მეთოდს.

მიუხედავად იმისა, რომ სასრული ელემენტების მეთოდი ეფუძნება ვარიაციულ მიდგომას, მისი უდიდესი უპირატესობა არის ის, რომ მისი საშუალებით შესაძლებელია გაანგარიშდეს კაშხალი, მისი ფუძე და წყალსაცავი, როგორც ერთიანი სისტემა. ამ მეთოდისთვის არ არის პრობლემა მასალის არაერთგვაროვნება, ანიზოტროპულობა, აგების თანმიმდევრობის გათვალისწინება, ფიზიკური არაწრფივობა, ბზარწარმოქმნა, ფილტრაცია მოცულობითი ფორმულირება და სხვ.

კაშხლების სასრული ელემენტებით ანგარიშების პიონერები იყვნენ პროფ. ო. ზინკევიჩი, პროფ. რ. კლაფი, პროფ. ე. უილსონი, პროფ. ლიამ ფინი და სხვ. მათი ღვაწლი უდიდესია კაშხლების ანალიზის დღევანდელი

მაღალი დონის მიღწევაში. საქართველოში აღნიშნულმა მეთოდმა კაშხლების ანგარიშებში ფეხი მოიკიდა 70-ანი წლებიდან (ა. მოწონელიძე, მ. ყალაბეგიშვილი, ბ.აბულაძე).

სადისერტაციო ნაშრომი ეხება არსებული და “გადაღლილი” ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიშს ორი მნიშვნელოვანი ფაქტორის – მასალის (ბეტონის) ასაკისა და ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით. ამ უკანასკნელში იგულისხმება წყალსაცავის ავსება-დაცლის ციკლები, რომელთა რაოდენობაც რეგულირების სახეზეა დამოკიდებული. ამ ფაქტორების გათვალისწინება საშუალებას იძლევა დადგინდეს ნაგებობის სიმტკიცის რესურსები.

ნაშრომი წარმოდგენილია 131 გვერდზე და შედგება შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნებისა და ციტირებული ლიტერატურის სიისგან. ტექსტში ჩართულია 76 ნახაზი და 18 ცხრილი.

1. გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის საანგარიშო მეთოდების რეტროსპექტული მიმოხილვა

1.1. კლასიკური ანალიზური მეთოდები

ბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ყველაზე ადრეული ანალიზური საანგარიშო მეთოდი ეფუძნება დაშვებას, რომლის თანახმადაც კაშხალი წარმოდგენს კლდოვან ფუძეში ხისტად ჩამაგრებულ ძელს, რომელიც განიცდის ორი სახის დეფორმაციას ბრტყელი ამოცანის ფარგლებში: გაჭიმვა-კუმშვის და ღუნვის. ეს მეთოდი ჩვენში ცნობილია სამი დასახელებით: მასალათა გამძლეობის მეთოდი, არათანაბარი კუმშვის მეთოდი და ელემენტარული მეთოდი [1]. ინგლისურენოვან ლიტერატურაში მას მოიხსენიებენ როგორც გრავიტაციულ მეთოდს.

ამ მეთოდის მიხედვით განიხილება კაშხლის ჰორიზონტალური კვეთები (ნახ. 1.1) და იანგარიშება ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები σ_y სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგებზე შემდეგი გამოსახულებიდან:

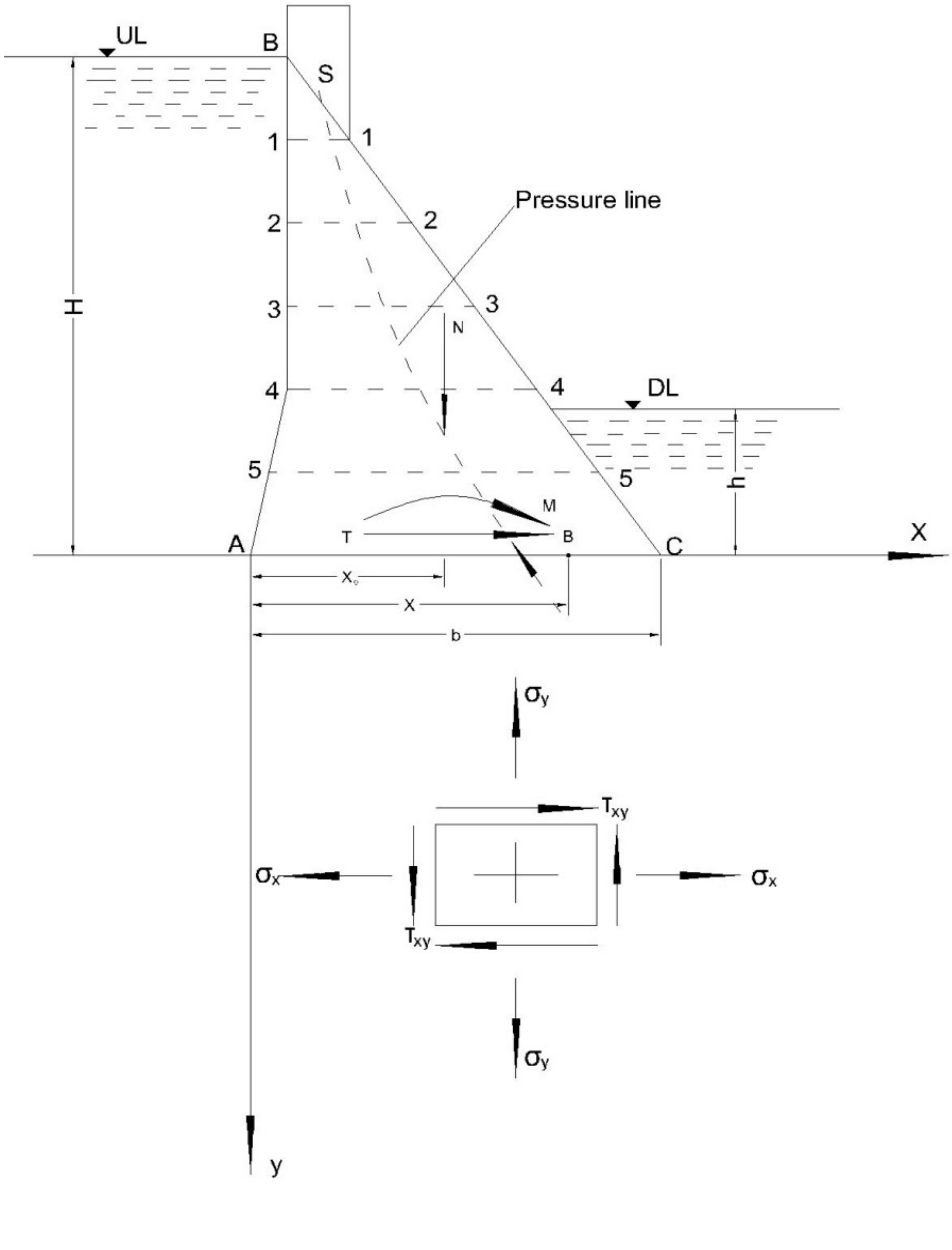
$$\sigma_y = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \qquad (1.1)$$

სადაც N არის განსახილველი კვეთის ზემოთ მოქმედი ყველა ვერტიკალური ძალის ჯამი; F - განსახილველი კვეთის ფართობი ($F = b*1$, b – სექციის სიგანე); M - განსახილველი კვეთის ზემოთ მოქმედი ყველა ძალის მღუნავი მომენტების ჯამი კვეთის სიმძიმის ცენტრის მიმართ; W – კვეთის წინაღობის მომენტი ($W=\frac{b^2}{6}$).

σ_y ძაბვის განსაზღვრის შემდეგ იანგარიშება ჰორიზონტალური ნორმალური ძაბვა σ_x და მხები τ ძაბვები განსახილველი წერტილის დონეზე ელემენტარული პრიზმის ამოჭრისა და მისი წონასწორობის პირობების განხილვის შედეგად. ამის შემდეგ ცნობილი ფორმულებით იანგარიშება მთავარი ძაბვები და მათი მიმართულებები იგივე წერტილებში.

აღსანიშნავია ის, რომ აღწერილი მეთოდი დღემდე წარმატებით გამოიყენება დაბალი კაშხლების გაანგარიშებისა. ამ მეთოდს აქვს შედდეგი უარყოფითი მხარეები:

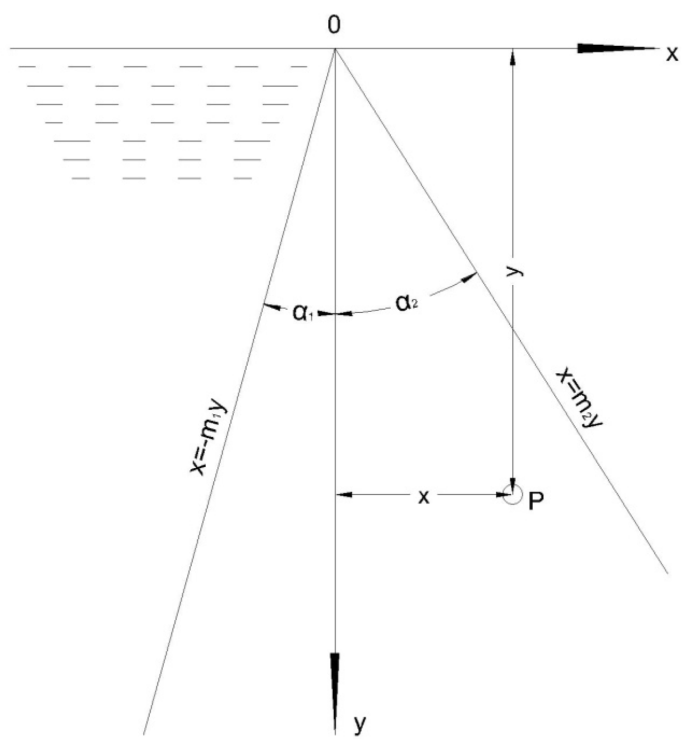
1. მას არ შეუძლია ნაგებობის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე ფუძის გავლენის მხედველობაში მიღება. ეს გავლენა კი მნიშვნელოვანია ფუძიდან დაახლოებით 1/3 – 1/4 სიმაღლეზე;



ნახ. 1.1: *არათანაბარი კუმშვის მეთოდით გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა.*

2. მას არ შეუძლია ძაბვების განსაზღვრა კაშხლის ტანში. იგულისხმება, რომ ძაბვები მასში ნაწილდება სწორი ხაზის კანონით.

ელემენტარული მეთოდის პარალელურად დამუშავდა ე.წ. დრეკადობის თეორიის მეთოდი, რომელიც ამოცანას განიხილავს ბრტყელი დეფორმაციის ფარგლებში [1]. ნაგებობაზე მოქმედებს საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა. განიხილება უსასრულო სიგრძის სამკუთხა პროფილე (ნახ. 1.2). ძაბვები გამოისახება როგორც კოორდინატების წრფივი ფუნქციები შემდეგი სახით:



ნახ.1.2: დრეკადობის თეორიის მეთოდით გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= a_1 x + b_1 y\\ \sigma_y &= a_2 x + b_2 y\\ \tau &= a_3 x + b_3 y\end{aligned} \tag{1.2}$$

a და b კოეფიციენტები განისაზღვრებიან სასაზღვრო პირობებიდან კაშხლის წახნაგებზე (წონასწორობის პირობები). ისინი არიან ფუნქციები ბეტონისა და წყლის მოცულობითი წონების, აგრეთვე სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგების დახრების γ, γ_1, m_1 და m_2:

$$(\sigma_x, \sigma_y, \tau) = f(\gamma, \gamma_1, m_1, m_2) \tag{1.3}$$

ძაბვის კომპონენტების განსაზღვრის შემდეგ გაიანგარიშება მთავარი ძაბვები და მათი მიმართულებები განსახილველი კვეთის ნებისმიერ წერტილში.

1.2. საკონტაქტო ამოცანები - კოჭური მეთოდი და ნახევრად ანალიზური მეთოდი

კლასიკური ანალიზური მეთოდები ვერ ითვალისწინებენ ფუძის გავლენას კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. კოჭური მეთოდი, რომელიც მიეკუთვნება ე.წ. საკონტაქტო ამოცანების კლასს, გარკვეულწილად ასწორებს ამ ხარვეზს და იძლევა შესაძლებლობას განისაზღვროს გადაადგილებები, დეფორმაციები და ძაბვები კაშხლისა და კლდოვანი ფუძის საკონტაქტო ზედაპირზე [2].

კოჭური მეთოდის მიხედვით პირველ ეტაპზე გაიანგარიშება ფუძეში ხისტად ჩამაგრებული სამკუთხა პროფილის მქონე კაშხალი. იხსნება კაშხლის გაღუნული ღერძის დიფერენციალური განტოლება

$$\frac{E_c * I(y)}{1-\nu_c^2} * \frac{d^2u}{dy^2} = -M(y), \tag{1.4}$$

სადაც E_c და ν_c შესაბამისად, კაშხლის მასალის (ბეტონი) დრეკადობის მოდული და პუასონის კოეფიციენტია; $I(y)$ - კაშხლის განსახილველი ჰორიზონტალური კვეთის ინერციის მომენტი, მისი სიმძიმის ცენტრზე გამავალი ღერძის მიმართ; $M(y)$ - მღუნავი მომენტი კაშხლის საკუთარი წონისა და ჰიდროსტატიკური წნევისაგან კვეთის სიმძიმის ცენტრის მიმართ; u – კაშხლის კვეთების სიმძიმის ცენტრების ჰორიზონტალური გადაადგილებები.

ზემოდ მოყვანილი დიფერენციალური განტოლებიდან განისაზღვრება $\frac{d^2u}{dy^2}$ შემდეგ ძაბვათა წრფივი განაწილების კანონიდან გამომდინარე განისაზღვრება ძაბვის კომპონენტები. ვიცით რა ძაბვათა კომპონენტების მნიშვნელობანი, ფარდობითი დეფორმაციებისათვის ჰუკის განზოგადოებული კანონის და კოშის განტოლებების გამოყენებით ვპოულობთ კაშხლის ღერძის წერტილების გადაადგილებათა კომპონენტებს U_d და V_d.

ანგარიშების მეორე ეტაპზე საკონტაქტო ზედაპირზე საძიებელი σ_y და τ რეაქტიული ძაბვები განისაზღვრება წონასწორობისა და აგრეთვე იმ პირობებიდან, რომლებიც გამოისახებიან იგივეობებით:

$$\begin{aligned} U_d &\equiv U_f \\ V_d &\equiv V_f \end{aligned} \tag{1.5}$$

სადაც U_f და V_f შესაბამისად, ფუძის ზედაპირის წერტილების ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გადაადგილებებია, რომლებიც ჩაიწერება [3]-ში მოყვანილი კლასიკური ნახევარსიბრტყის ამოცანის ფორმით და ჩებისევის პოლინომების გამოყენებით [2]. გამოსახულებიდან (1.5) და წონასწორობის პირობებიდან განისაზღვრებიან უცნობი კოეფიციენტები.

გვეცოდინება რა კოეფიციენტთა მნიშვნელობები, σ_y და τ კონტაქტური ძაბვები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით:

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{1-x_1^2}}\left[A_0 + A_1x_1 + A_2\left(2x_1^2 - 1\right)\right] \tag{1.6}$$

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1-x_1^2}}\left[B_0 + B_1x_1 + B_2\left(2x_1^2 - 1\right)\right] \tag{1.7}$$

სადაც A_0, A_1, A_2, B_0, B_1 და B_2 გამოსახულებიდან (1.5) და წონასწორობის პირობებიდან განსაზღვრული კოეფიციენტებია.

საკონტაქტო ამოცანების კლასს შეიძლება მივაკუთვნოთ ე.წ. ნახევრადანალიზური მეთოდიც [4]. ამ მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ საანგარიშო სქემიდან "კაშხალი-ფუძე" ვარდება ფუძე და მისი გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე იცვლება გარკვეული კანონით განაწილებული ძაბვებით, რომლებიც კაშხლის ძირში მიიღება როგორც სასაზღვრო პირობები და კაშხალი იანგარიშება სასრული ელემენტების მეთოდით. ამოცანა ორ ეტაპად იხსნება. პირველ ეტაპზე კოჭური მეთოდით იანგარიშება ნორმალური ძაბვები საკონტაქტო ზედაპირზე, ხოლო მეორე ეტაპზე იანგარიშება უშუალოდ კაშხალი სასრული ელემენტების მეთოდით.

1.3. სასრული ელემენტების მეთოდით გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცეზე ანგარიში ჰორიზონტალური შრეებით თანდათანობითი აგების გათვალისწინებით

სასრული ელემენტების მეთოდის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანისი უპირატესობა გამოიხატება იმაში, რომ იტერაციული ციკლების

საშუალებით შესაძლებელია მასალების მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებების გათვალისწინება დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის მიხედვით. ფაქტიურად, ამ შემთხვევაში, საანგარიშო სისტემა განიხილება როგორც არაწრფივი დრეკადი არე. სემ-ის ამ უპირატესობაზე დაყრდნობით შესაძლებელია კაშხალი გაანგარიშებული იქნას მისი თანდათანობით, ჰორიზონტალურ შრეებად აგების, ანუ მშენებლობის გრაფიკის და პროცესის მხედველობაში მიღებით [5]. ანგარიშებისადმი ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა გათვალისწინებული იქნას აგების რეალური პროცესი და მისი გავლენა დასრულებული კაშხლის ჩამოყალიბებულ დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. გარდა ამისა, ეს მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დატკეპნილბეტონიანი კაშხლების გაანგარიშებისას, რადგან ის სრულად შეესაბამება ამ ტიპის კაშხლების ფენობრივად დატკეპვნის სქემას.

ამ მეთოდის რეალიზებისთვის აუცილებელია ბეტონის კუმშვის $\sigma-\varepsilon$ დიაგრამის არსებობა და მისი წარმოდგენა წრფივად ტეხილი მრუდის სახით თითოეული ტეხილისათვის (მონაკვეთისთვის) დრეკადობის მოდულის E_i $(i=1,2,3,\ldots k)$ მუდმივი მნიშვნელობის მინიჭებით (ნახ. 1.3).

ზემოდთქმულიდან გამომდინარე E_i–ის ცვლილება შეიძლება წარმოდგენილი იქნა შემდეგი ხარისხობრივი დამოკიდებულებით:

$$E_i = E_{in}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right)^{n_i} \tag{1.8}$$

სადაც:

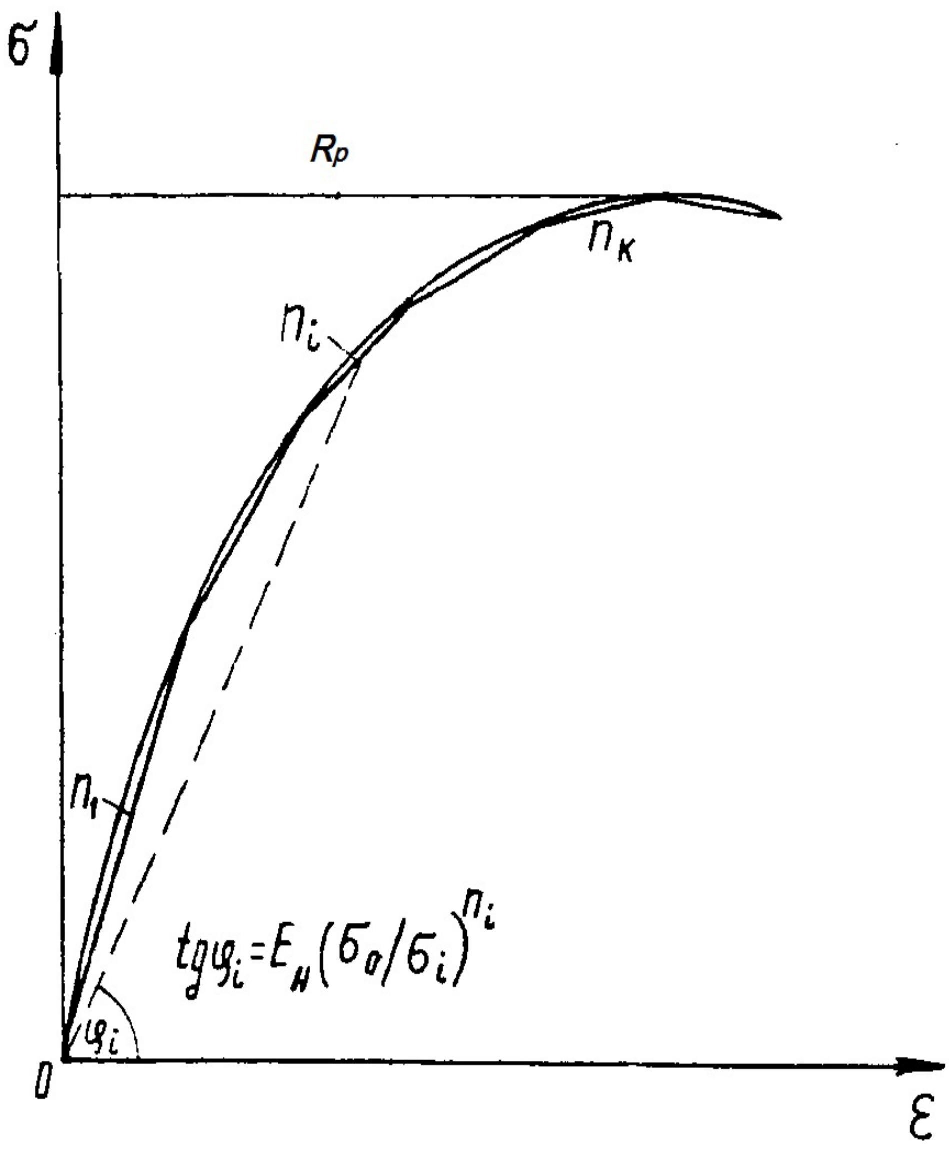
E_{in} - საწყისი დრეკადობის მოდული

$\sigma_0 = 1$ მპა - ფორმალური სიდიდე

σ_i - მაქსიმალური მკუმშავი მთავარი ძაბვა, რომელიც შეესაბამება i –ური მონაკვწთის ცენტრს

n_i - i–ური მონაკვეთის სიმრუდის მახასიათებელი $(0\angle n_i\angle 1)$.

წრფივად ტეხილი დიაგრამის ინტერპოლირება $S(x)$ სპლაინ-ფუნქციის საშუალებით [6] ძალიან მოსახერეხებელია სასრულელემენტიან სქემაში იტერაციული ანგარიშებისას [7].



ნახ.1.3: ბეტონის კუმშვის პირობითი დიაგრამის წარმოდგენა წრფივად ტეხილი მრუდის სახით.

გრავიტაციული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიშის მეთოდიკა პირდაპირ არის დაკავშირებული ამოცანის ფიზიკურად არაწრფივ ფორმულირებასთან, რაც გულისხმობს მიღებული შედეგების სუპერპოზიციას (პირდაპირ დაჯამებას).

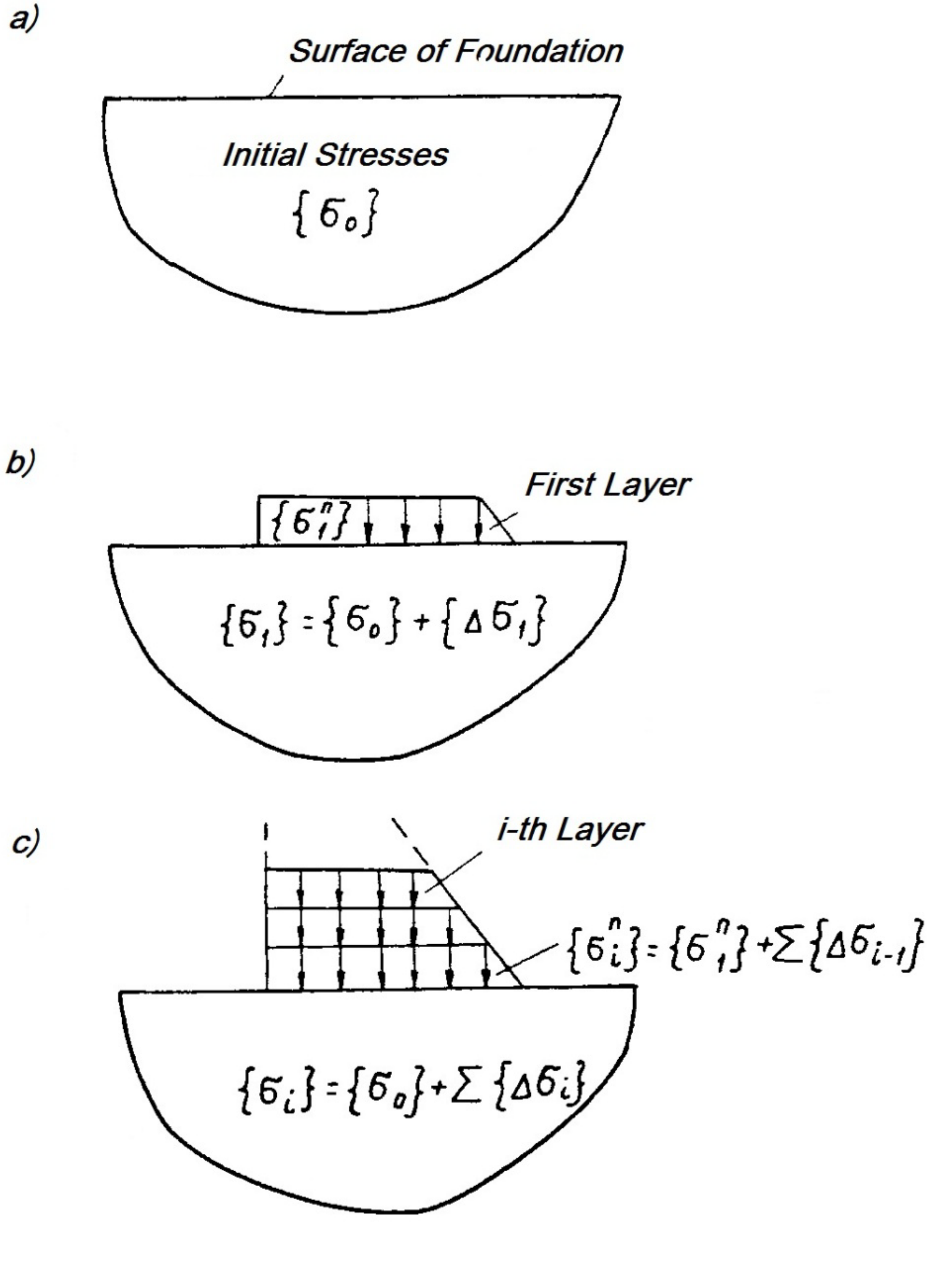
ანგარიშების საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 1.4-ზე, ხოლო მათი თანმიმდევრობა კი ასეთია. ბეტონის პირველი ფენის დადებამდე, კლდოვან ფუძეში უკვე ჩამოყალიბებულია ისტორიული დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა (ნახ. 1.4a). ეს მდგომარეობა შეიძლება გამოისახოს $\{\sigma_0\}$ მატრიცა-ვექტორის საშუალებით. პირველი ფენის დადების შემდეგ (ნახ. 1.4b), ფუძეში ჩამოყალიბდება $\{\Delta\sigma_1\}$ ძაბვები. მეორე ფენის პირველზე დადების შემდეგ, ანალოგიურად მოხდება ძაბვების გადანაწილება, როგორც ეს მოხდა პირველი ფენის დადების შემდეგ და ა.შ. ბოლო ფენის დადების შემდეგ ჩამოყალიბდება სისტემა "კაშხალი – ფუძის" საბოლოო დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა. სწორედ კუბური სპლაინ-ფუნქციით ინტერპოლირებული ბეტონის კუმშვის დიაგრამ ზუსტად მიესადაგება ზემოდ აღწერილ საანგარიშო სქემას. მისი საშუალებით ანგარიშების ყველა ეტაპზე ზუსტდება სიხისტის განზოგადოებული მატრიცა, რომელიც სასრული ელემენტების მეთოდის განმსაზღვრელი წევრია.

რასაკვირველია ყოველი ახალი ფენის დადების შემდეგ საანგარიშო სქემის კვანძების კოორდინატები იცვლება შემდეგი კანონზომიერებით:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \Delta x_{i-1} \\ y_i &= y_{i-1} + \Delta y_{i-1} \end{aligned} \tag{1.9}$$

სადაც x_i, y_i - კვანძების კოორდინატები კაშხლის აგების i–ურ ეტაპზე;

$$\begin{aligned} \Delta x_{i-1} &= u_{i-1} \\ \Delta y_{i-1} &= v_{i-1} \end{aligned} \tag{1.10}$$



***ნახ.1.4:** გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშო სქემა ფენობრივად აგების მხედველობაში მიღებით.*

სადაც u_{i-1}, v_{i-1} არის კვანძების გადაადგილებები სასრული ელემენტების განტოლების ამოხსნის შედეგად მშენებლობის (i-1) ეტაპზე. ანგარიშების საწყის ეტაპზე

$$\Delta x_{i-1} = \Delta y_{i-1} = 0$$

ზემოდმოყვანილი სქემის მიხედვით მიღებული შედეგები შეიძლება გაანალიზდეს პირველი ჯგუფის ზღვრული მდგომარეობის მეთოდით.

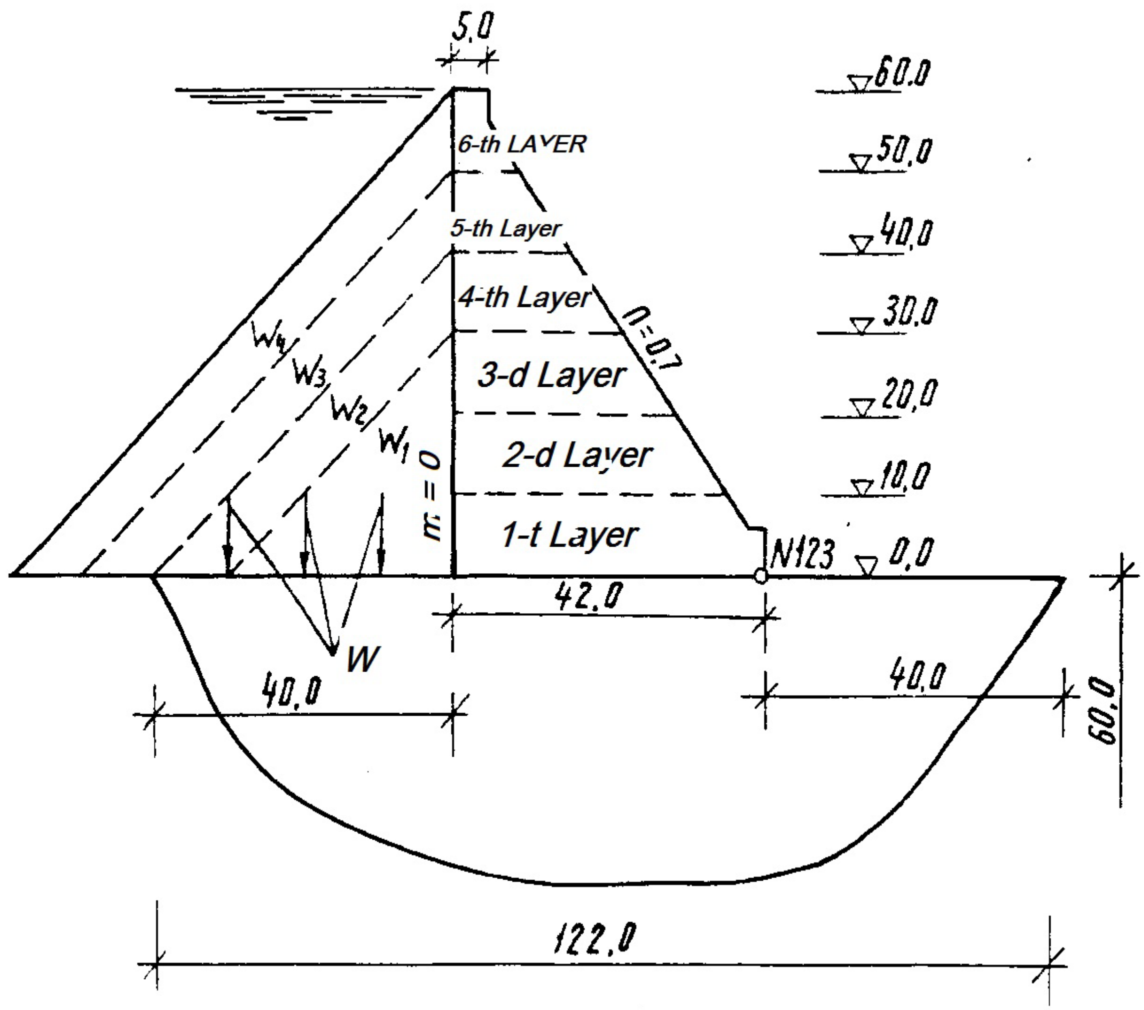
ქვემოთ მოყვანილია სისტემა “პირობითი გრავიტაციული კაშხალი – ერთგვაროვანი კლდოვანი ფუძის” აღნიშნული მიდგომით გაანგარიშების შედეგები.

სანგარიშო სქემა დაყოფილი არის 411 სამკუთხოვან ელემენტად, რომლებიც შეერთებულია 243 კვანძში. საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 1.5 – ზე.

სისტემის მექანიკური მახასიათებლები შემდეგია: ფუძის დრეკადობის მოდული $E_f = 8250$ მპა, პუასონის კოეფიციენტი $\nu_f = 0.18$. ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდული $E_{in.c} = 25000$ მპა, პუასონის კოეფიციენტი $\nu_c = 0.17$.

ჩაითვალა, რომ კაშხალი შენდება ექვს ფენად. განხილული იქნა ძალოვანი ფაქტორების ზემოქმედების სამი შემთხვევა:

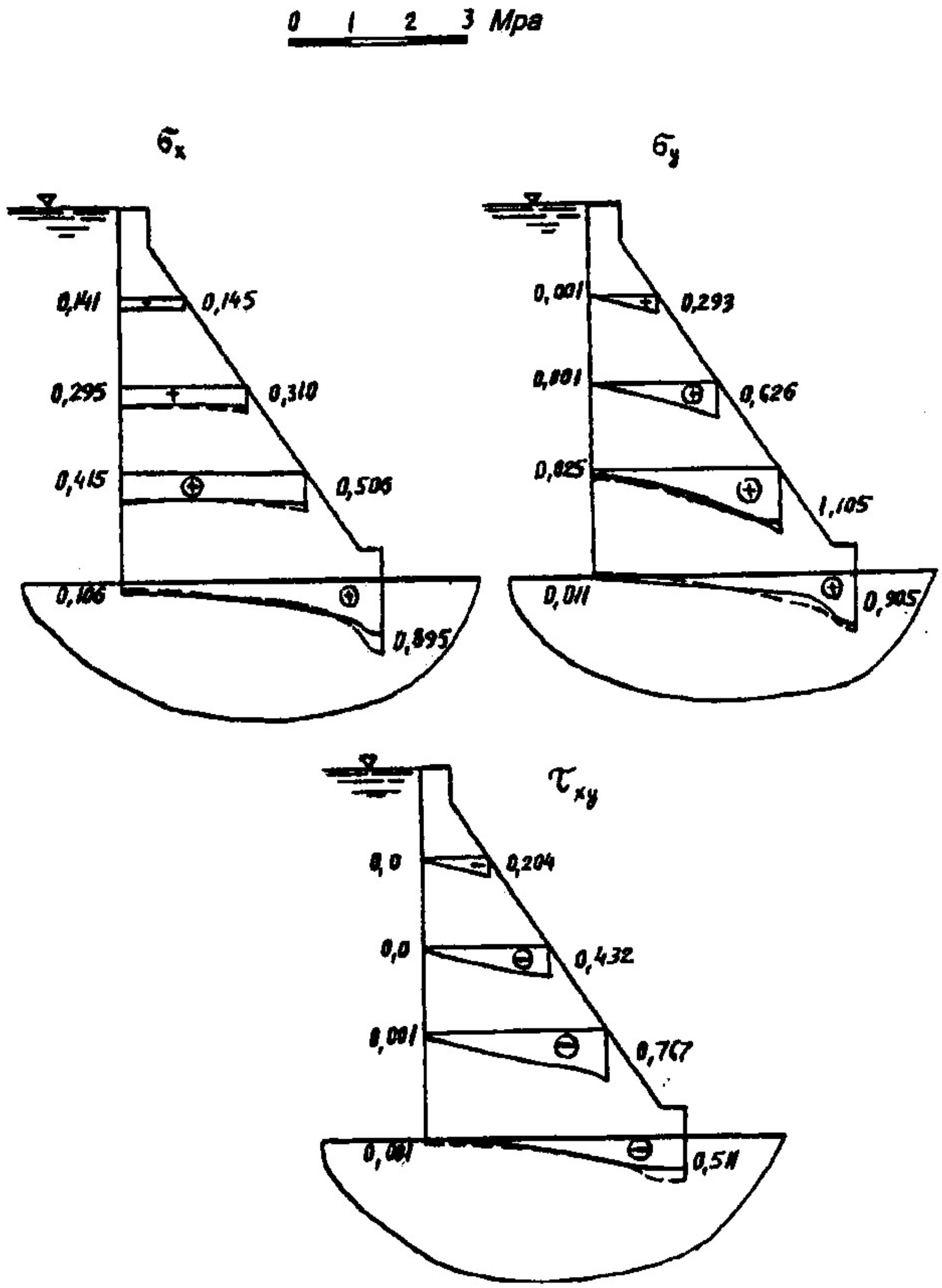
1. კაშხალზე მოქმედებს ფენების დადების შედეგად თანდათანობით ზრდადი საკუთარი წონა;
2. კაშხალზე მოქმედებს ფენების დადების შედეგად თანდათანობით ზრდადი საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე კაშხლის სიმაღლის ნახევრიდან;
3. კაშხალზე მოქმედებს ფენების დადების შედეგად თანდათანობით ზრდადი საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე კაშხლის სიმაღლის ნახევრიდან და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე.



ნახ. 1.5: სისტემა "პირობითი გრავიტაციული კაშხალი – ერთგვაროვანი კლდოვანი ფუძის" სანგარიშო სქემა ფენობრივი აგების მხედველობაში მიღებით.

ნახ. 1.6 – ზე მოცემულია მოცემულია σ_x, σ_y და τ ძაბვების განაწილების ეპიურები დასრულებული მშენებლობის შემთხვევაში, როდესაც კაშხალზე მოქმედებს მხოლოდ საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ნახ. 1.7. – ზე მოცემულია σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები ჰორიზონტალურ კვეთებში მესამე სანგარიშო შემთხვევის დროს



ნახ. 1.6: ძაბვების განაწილების ეპიურები ჰორიზონტალურ კვეთებში.

———— აგების თანმიმდევრობის გაუთვალისწინებლად;
----------- აგების თანმიმდევრობის გათვალისწინებით.

დამატებით მოქმედებს ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური წნევა წყალსაცავის ფუძეზე.

როგორც შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, წყალსაცავის ფუძეზე ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა გარკვეულწილად ამსუბუქებს სადაწნეო წახნაგის მუშაობის პირობებს და პრაქტიკულად გამორიცხავს გამჭიმავი ძაბვების წარმოშობას, მაშინ როდესაც უდაწნეო წახნაგზე იკვეთება მკუმშავი ძაბვების შემცირების ტენდენცია.

ცნობილია, რომ კაშხლის სიმტკიცის შესაფასებლად გამოიყენება ე.წ. უსაფრთხოების განზოგადოებული კოეფიციენტი K_g^r. ის წარმოადგენს რღვევისწინა ძალოვანი ფაქტორის (მაგალითად, მთავარი ძაბვა) N_f ფარდობას დასაშვებ ძალოვან ფაქტორთან $[N]$.

$$K_g^r = \frac{N_{m.f.}}{[N]} \tag{1.11}$$

ეს გამოსახულება სრულად ვერ აღწერს კაშხლის საიმედობას. უფრო მიზანშეწონილია შემდეგი ფორმულის გამოყენება:

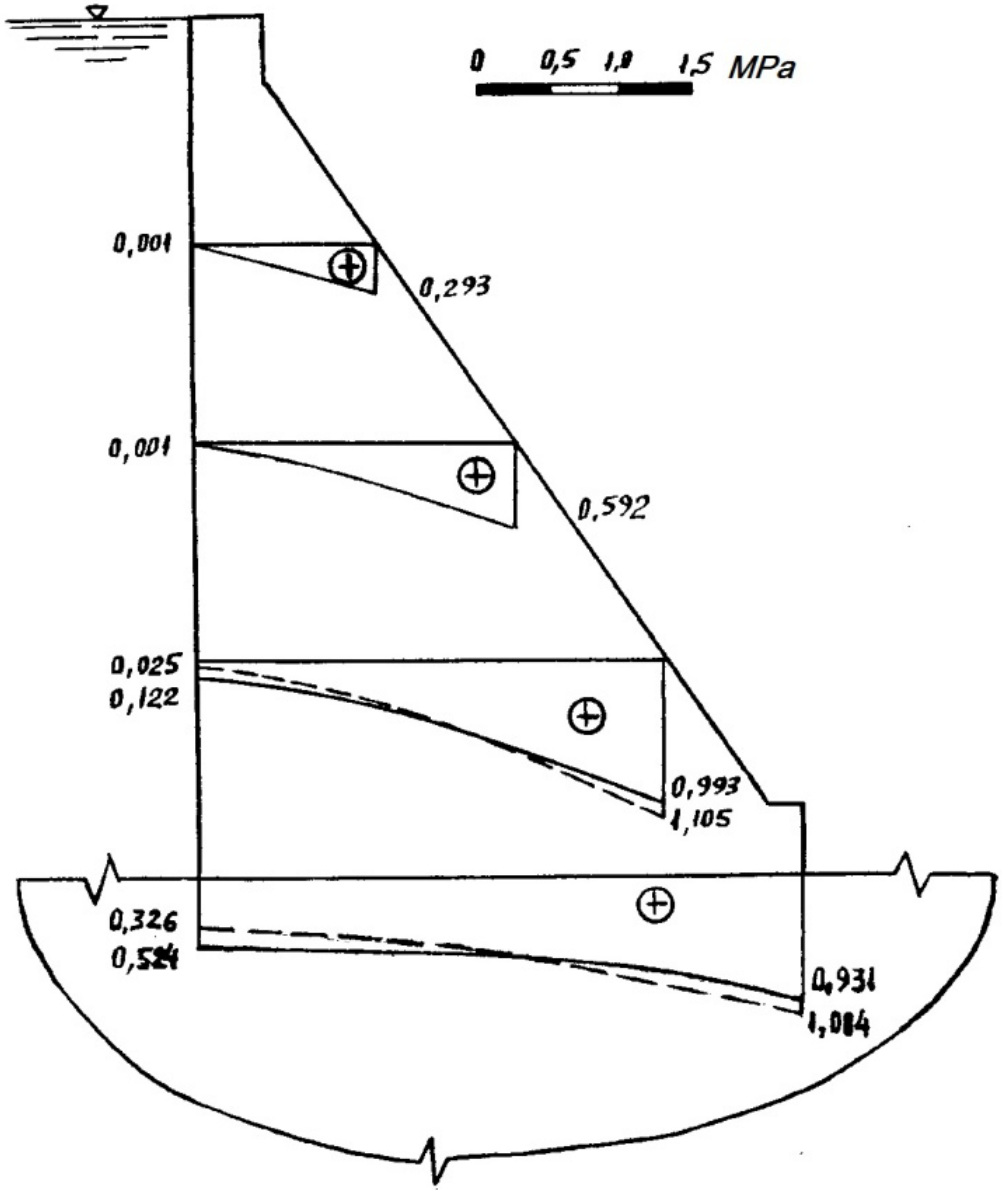
$$\sigma_{1av}^p = \frac{\Sigma\sigma_1^p}{n_1} \tag{1.12}$$

სადაც:

$\Sigma\sigma_1^p$ - საანგარიშო სქემაში შემავალი კაშხლის ყველა საკვანძო წერტილში მთავარი მკუმშავი ძაბვების ჯამი;

n_1 - იმ კვანძების რაოდენობა, სადაც მხოლოდ მკუმშავი σ_1^p ძაბვებია დაფიქსირებული.

კაშხლის საპროექტო ვარიანტის ანგარიშის შემდეგ იანგარიშება მისი უფრო ეკონომიკური (შევიწროებული) პროფილები მანამდე, სანამ σ_1 არ გაუტოლდება R_p - ს. ამ შემთხვევაში იანგარიშება მთავარი მკუმშავი ძაბვების საშუალო მნიშვნელობა:



ნახ. 1.7: σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები ჰორიზონტალურ კვეთებში.

——— წყალსაცაის ფსკერზე ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევის გათვალისწინებით;

----------- ამ დაწნევის გაუთვალისწინებლად.

$$\sigma_{1av} = \frac{\Sigma\sigma_1}{n_2} \tag{1.13}$$

სადაც $\Sigma\sigma_1$ - კაშხლის ეკონომიკურ პროფილში მთავარი მკუმშავი ძაბვების ჯამი;

n_2 - იმ კვანძების რაოდენობა, რომლებშიც ფიქსირდება σ_1 მკუმშავი ძაბვები.

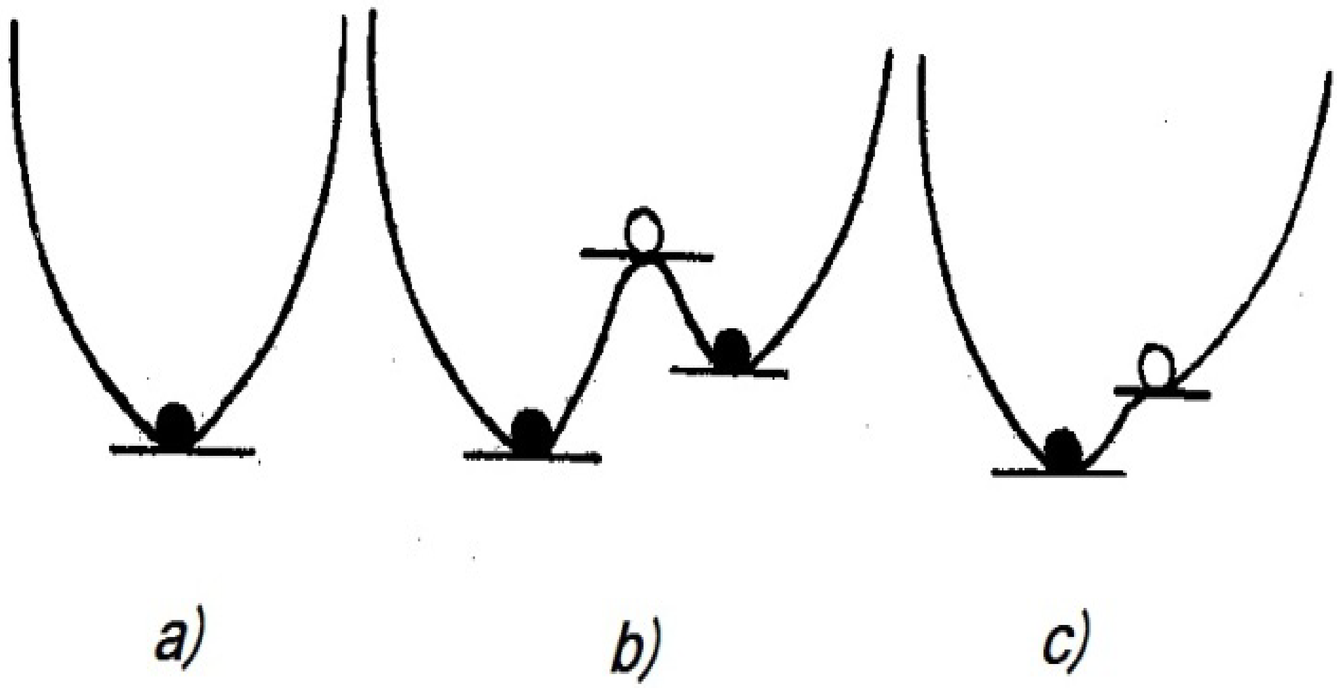
გვაქვს რა σ_{1av} და σ_1^p მნიშვნელობები, უსაფრთხოების კოეფიციენტი შეიძლება განგარიშდეს შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$K_l = \frac{\sigma_{1av}}{\sigma_1^p} \tag{1.14}$$

1.4. გრავიტაციული კაშხლების მდგრადობის და სიმტკიცის ანალიზი კატასტროფების თეორიის პოზიციებიდან

ტრადიციული, დეტერმინისტული მიდგომის თანახმად, იმისათვის, რომ ნაგებობებში დავინახოთ მიმდინარე პროცესები, საჭიროა პირველი ან მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებების სისტემების ამოხსნა. მიუხედავად ამისა, დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლილებების დინამიკური პროცესები ხშირად ნახტომისებურად ვითარდება. ნახტომები კი ხდება ერთი თვისობრივი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს. მაგალითად, კაშხლის მდგრადი მდგომარეობიდან მდგრადობის დაკარგვა, სტაბილური დაძაბული მდგომარეობიდან რღვევის ფაზაში გადასვლა და ა.შ. თვისობრივი მდგომარეობის ამ უეცარ ცვლილებებს კარგად აღწერს მათემატიკური მოდელირების ერთ-ერთი საინტერესო ფორმა – კატასტროფების თეორია. მისი არსი შეიძლება მოკლედ შემდეგნაირად ავხსნათ ნახ. 1.8-ის მიხედვით. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ სისტემის სტაბილური წონასწორობა შეესაბამევა რაღაც $V(x)$ ფუნქციის მინიმუმებს, ხოლო არასტაბილური წონასწორობა -

$V(x)$ ფუნქციის მაქსიმუმებს. სწორედ ამ უკანასკნელი დარღვევის შემთხვევაში ხდება ე.წ. "კატასტროფა", ანუ ერთი თვისობრივი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა.



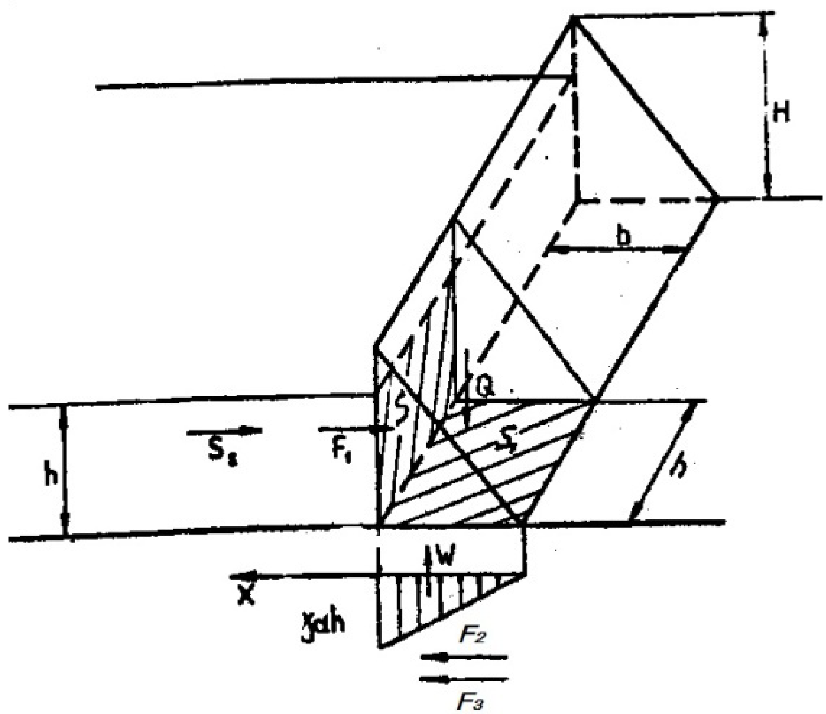
ნახ. 1.8: სისტემის სტაბილური წონასწორობის სქემა.

გრავიტაციული კაშხლების მდგრადობის ანალიზი კატასტროფების თეორიაზე დაყრდნობით, მოცემულია [8]-ში.

განვიხილოთ გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობა ჰიდროსტატიკური დაწნევისა და სეისმური ზემოქმედების შემთხვევაში. დავუშვათ ორი შესაძლო ვერსია აღნიშნული პრობლების ამოსახსნელად.

პირველ ვერსიაში დავუშვათ, რომ უნდა შევარჩიოთ კაშხლის ორი პარამეტრიც: სიგანე ფუძეში (b) და სიმაღლე (H), რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ კაშხლის მდგრადობა ავსებული წყალსაცავის შემთხვევაში სეისმური ზემოქმედების დროს. ამ შემთხვევაში

მდგრადობის დაკარგვად უნდა ჩავთვალოთ წყალსაცავში წყლის h სიღრმის ნახტომისებრი ცვლილება. დავუშვათ h არის ფუძის სიგანის ნაწილი (ნახ. 1.9)



ნახ. 1.9: კაშხლის რღვევის სქემა ნახტომისებრი სქემა წყლის h სიღრმის ნახტომისებრი ცვლილებისას.

ჰიდროსტატიკური წნევის ინტენსივობა არის

$$P(h) = \gamma h, \tag{1.15}$$

სადაც γ არის წყლის მოცულობითი წონა.

ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგის გარკვეულ S ფართზე არის:

$$F_1 = \frac{2}{3}\gamma h^3 \tag{1.16}$$

შეჭიდულობის ძალა არის:

$$F_2 = cS_p = cbh \tag{1.17}$$

ხახუნის ძალა:

$$F_3 = f(Q - W) \tag{1.18}$$

სადაც Q არის კაშხლის წონა

$$Q = \gamma_1 V = 0.5\gamma_1 bHh \tag{1.19}$$

γ_1 არის ბეტონის ხვედრითი წონა, W - ფილტრაციული დაწნევა კაშხლის ფუძეზე

$$W = 0.5\gamma \alpha b h^2 \tag{1.20}$$

V არის კაშხლის ნაწილის მოცულობა (h სიგანის ფარგლებში); α - ფილტრაციული წნევის შემამცირებელი კოეფიციენტი. აქედან გამომდინარე, ხახუნის ძალა ტოლი იქნება:

$$F_3 = f(0.5\gamma_1 bHh - 0.5\gamma \alpha b h^2) \tag{1.21}$$

პირველი მიახლოებით, სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის მიხედვით, სეისმური ძალის სიდიდე გამოისახება შემდეგნაირად:

$$S_s = K_s Q \tag{1.22}$$

სადაც K_s არის სეისმურობის კოეფიციენტი.

სისტემის პოტენციალური ენერგიის კრიტიკული წერტილების ზედაპირის განტოლება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$F_1 - (F_2 + F_3) + S_s = 0 \tag{1.23}$$

ან შემდეგნაირად:

$$h^3+\frac{3}{4}f\alpha bh^2-\frac{3}{4}\frac{2c+f\gamma_1 H}{\gamma}bh+\frac{3}{2}\frac{k_s Q}{\gamma}=0 \qquad (1.24)$$

დავუშვათ, რომ

$$P_1=\frac{3}{4}f\alpha b; \qquad P_2=-\frac{3}{4}\frac{2c+f\gamma_1 H}{\gamma}b \quad \text{და} \quad P_3=\frac{3}{4}\frac{k_s Q}{\gamma}$$

მაშინ განტოლება (1.24) მიიღებს შემდეგ ფორმას:

$$h^3+P_1h^2+P_2h+P_3=0 \qquad (1.25)$$

ეს განტოლება არ არის მდგრადი P_1h^2 წევრის გამო.

გამოვიყენოთ ახალი კოორდინატთა სისტემა და დავუშვათ, რომ $h=y-\frac{P_1}{3}$. მაშინ განტოლება (1.25)-ს ექნება შემდეგი სახე:

$$y^3+(P_2-\frac{1}{3}P_1^2)y+(P_3-\frac{P_1P_2}{3}+\frac{2}{27}P_1^3)=0 \qquad (1.26)$$

ჩავსვათ

$$c_1=P_2-\frac{1}{3}P_1^2 \quad \text{და} \quad c_2=(P_1-\frac{PP_2}{3}+\frac{2}{27}P_1^3),$$

მაშინ განტოლება (1.26) მიიღებს შემდეგ ფორმას:

$$y^3+c_1y+c_2=0 \qquad (1.27)$$

ეს განტოლება მდგრადია და ამიტომ კატასტროფების ჯგუფის განტოლება იქნება:

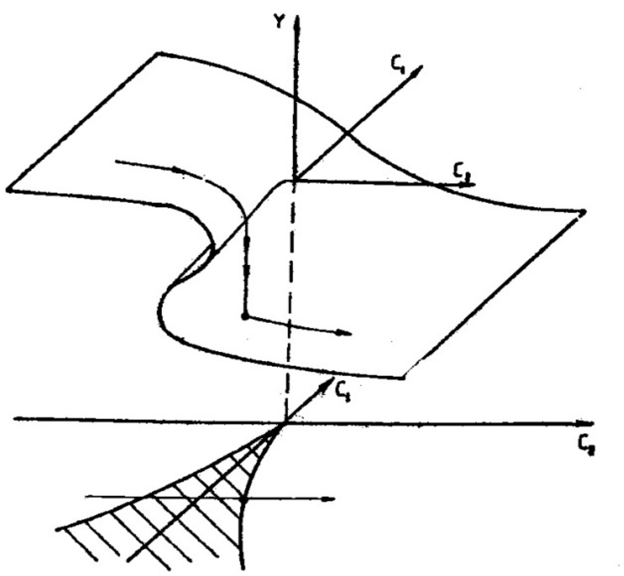
$$4c_1^3 + 27c_2^2 = 0 \tag{1.28}$$

რადგანაც c_2 შეიცავს P_3-ს მუდმივ მნიშვნელობას, სეისმური დატვირთვების ცვალებადობა იწვევს მხოლოდ c_2-ის ცვალებადობას. თუ ეს ცვლილება ისეთია, რომ ფაზის ტრაექტორია კვეთს დაშტრიხულ ფართს (ნახ. 1.10) შიგნიდან გარეთ, მოხდება ნახტომი სისტემაში, რომელიც შეესაბამება c_2-ის ცვლილებას ზემოდან ქვედა (ნულოვან) დონეზე, ე.ი. მოხდება კაშხლის ძვრა ფუძეში.

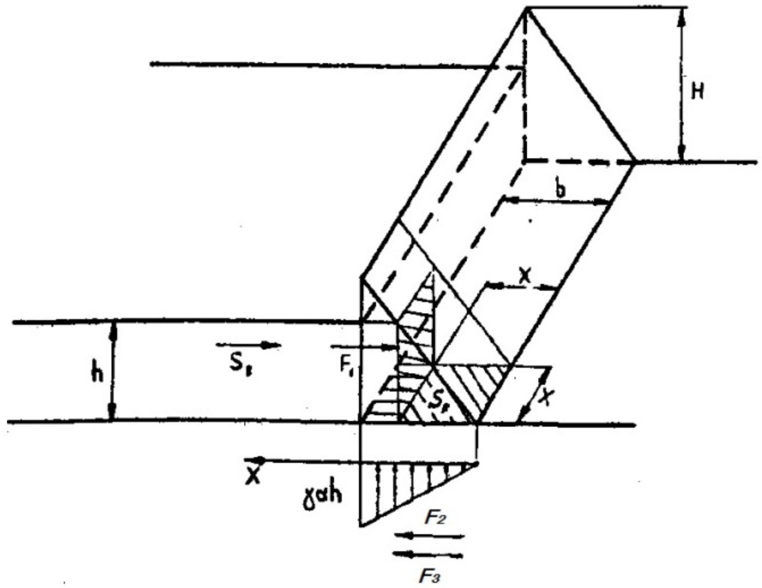
მეორე ვერსიაში დაშვებულია, რომ წყლის სიღრმე h არის კონტროლირებადი პარამეტრიც. H და b არის მუდმივი სიდიდეები. ამოცანის ამოხსნის მიზანია დავადგინოთ h –ის და სეისმური ძალის რა სიდიდეების დროს გაჩნდება ბზარი ფუძეში.

ვუშვებთ, რომ პირველი ბზარი გაჩენა შეესაბამება x სიდიდეების ნახტომს ზემოდან ქვედა (ნულოვან) დონეზე.

დავუშვათ, რომ ბზარის სიგანე ტოლია $(b\text{-}x)$ –ის (ნახ. 1.11)



ნახ. 1.10: ნახტომის სქემა სისტემაში – ფაზის ტრაექტორია კვეთს დაშტრიხულ ფართს.



ნახ. 1.11: ბზარის გაჩენის სქემა კაშხლის ფუძეში.

დავუშვათ, რომ წყლის სიღრმე არის h და $x*x$ - კაშხლის ფუძის ფართობის ნაწილი. ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე ტოლია:

$$F_1 = \frac{1}{2}\gamma h^2 x \tag{1.29}$$

შეჭიდულობის ძალა არის:

$$F_2 = cx^2 \tag{1.30}$$

ფილტრაციული დაწნევა ტოლია:

$$W(x) = \int_0^x \frac{\gamma \alpha h}{b} x * 2x dx = \frac{2}{3}\frac{\gamma \alpha h}{b} x^3 \tag{1.31}$$

კაშხლის წონა h –ის ფარგლებში ტოლია:

$$Q = \frac{1}{2}\gamma_1 h x^2 \tag{1.32}$$

ხახუნის ძალა ტოლია:

$$F_3 = f(Q-W) = \frac{1}{2} f\gamma_1 hx^2 - \frac{2}{3}\frac{\gamma\alpha h}{b} fx^3 \qquad (1.33)$$

სეისმური ზალის სიდიდე განისაზღვრება (1.22) გამოსახულებიდან. აქედან გამომდინარე, კრიტიკული წერტილების პოტენციური ენერგიის ზედაპირის განტოლება აქვს შემდეგი ფორმა:

$$F_1 - (F_2 + F_3) + S_s = 0 \qquad (1.34)$$

ან

$$x^3 - \frac{3(2c + f\gamma_1 h)b}{4\gamma\alpha hf} x^2 + \frac{3}{4}\frac{bh}{\alpha f} x + \frac{3}{2}\frac{bk_s Q}{\gamma\alpha hf} = 0 \qquad (1.35)$$

დავუშვათ, რომ

$$P_1 = -\frac{3(2c + f\gamma_1 h)b}{4\gamma\alpha hf}; P_2 = \frac{3}{4}\frac{bh}{\alpha f} \quad \text{და} \quad P_3 = \frac{3}{2}\frac{bk_s Q}{\gamma\alpha hf} = 0$$

მაშინ (1.26) განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$x^3 + P_1 x^2 + P_2 x + P_3 = 0 \qquad (1.36)$$

გადავწეროთ (1.36) გამოსახულება ახალ საკოორდინატო სისტემაში:

$$y^3 + (P_2 - \frac{1}{3}P_1^2)y + (P_3 + \frac{P_1 P_2}{3} + \frac{2}{27}P_1^3) = 0 \qquad (1.37)$$

დავუშვათ, რომ

$$c_1 = P_2 - \frac{1}{3}P_1^2 \quad \text{და} \quad c_2 = P_3 - \frac{P_1 P_2}{3} + \frac{2}{27}P_1^3$$

მაშინ განტოლება (1.37) მიიღებს შემდეგ ფორმას:

$$y^3 + c_1 y + c_2 = 0 \tag{1.38}$$

ამ ზედაპირის პროექცია ან კატასტროფების კომპლექტის განტოლება იქნება:

$$4c_1^3 + 27c_2^2 = 0 \tag{1.39}$$

ამ შემთხვევაში შეგვიძლია განვსაზღროთ $k_s Q$ და h-ის ის მნიშვნელობები, რომლის დროსაც კაშხალს მოუვა ავარია.

კატასტროფების თეორიის დამახასიათებელია ის, რომ არ არის საჭირო განტოლებების ამოხსნა. აუცილებელია მხოლოდ პარტამეტრების ცვლილებების დიაპაზონის დადგენა.

2. არსებული ბეტონის კაშხლების კომპლექსური რეტროსპექტული სტატიკური ანალიზის მეთოდიკა

არსებული და დიდი ხნის ექსპლუატაციაში მყოფი ბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ზუსტი ანგარიშისას მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული მისი ექსპლოატაციის ისტორია. ქვემოთ მოყვანილია ექსპლოატაციაში მყოფი ძველი გრავიტაციული კაშხალების კომპლექსური რეტროსპექტული ანგარიშის მეთოდიკა, რომელშიც არის მცდელობა მაქსიმალურად დაახლოვოს კაშხლისა და მისი მასალის მოდელები ექსპლოატაციის რეალურ პირობებთან. შემოთავაზებული მეთოდიკა შედგება შემდეგი ეტაპებისგან:

ა) ბეტონის არაწრფივი დრეკადი რღვევის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა ბრტყელი დეფორმაციის პირობებისათვის;

ბ) საკონტაქტო ზონის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა;

გ) ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში ბოლცმან-ვოლტერას წრფივი შთამომავლობითი ცოცვადობის თეორიისა და მოდიფიცირებული არაწრფივი დრეკადი რღვევის მოდელის ბაზაზე;

დ) კაშხალის ტანში ბზარის გაჩენისა და გავრცელების ანალიზი დისკრეტულბზარებიანი მოდელისა და ბეტონის რღვევის კრიტერიუმის გამოყენებით;

ე) კაშხალის არსებული მდგომარეობის ანგარიში რეტროსპექტული ანალიზის შედეგად ნაგებობისა და მასალის მოდიფიცირებული მოდელის გათვალისწინებით (მაგ. ბზარის გაჩენა);

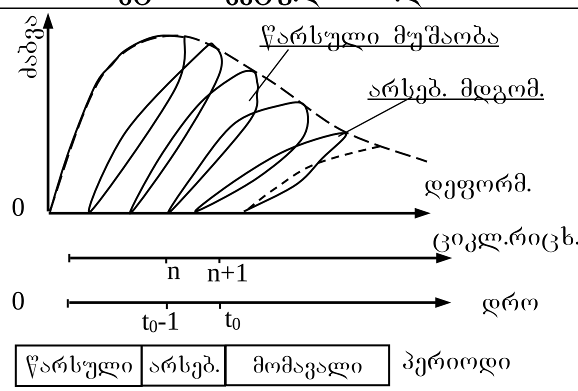
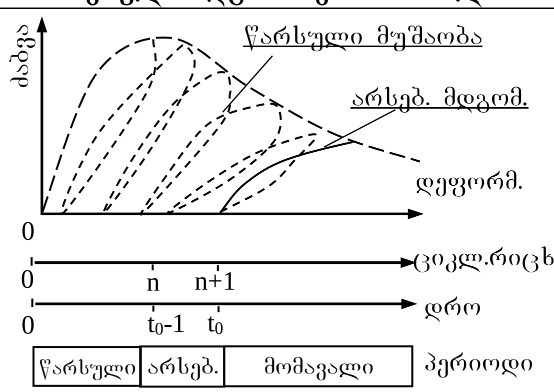
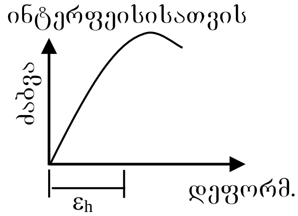
ამ მეთოდიკის ძირითადი პრინციპები აღწერილია [9]-ში. ქვემოთ მოყვანილია მეთოდიკის არსი. ამ მეთოდიკის პრინციპებს ეყრდნობა ჩვენს მიერ დამუშავებული საკითხები - სტატიკური ციკლური დატვირთვების

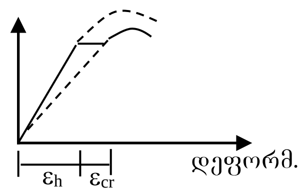
და ბეტონის ასაკის გავლენა კაშხლის სიმტკიცეზე, რომლებიც შემდეგ თავებშია განხილული.

2.1. მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა

მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა მოცემულია ცხრილ 2.1 - ში

ცხრილი 2.1: მეთოდიკის რეალიზების თანმიმდევრობა.

დეფორმაციის სახეობა	**რეტროსპექტული ანალიზი**	**არსებული მდგომარეობის ანალიზი**
		
	ანალიზის ეტაპი	**ანალიზის ეტაპი**
ბეტონი ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში	<u>**1. ეტაპი R-1**</u>(1) **საწყისი მონაც.:** ბეტონის და ინტერფეისების სიხისტე და სიმტკიცე **ანალიზის მეთოდი:** ბეტონის არაწრფ. დრეკადი რღვევის მოდელი**.** რღვევის მოდელი ინტერფეისისათვის  **შედეგი:** კაშხლის საწყისი დდმ - $(\sigma,\varepsilon)_{Initial}$.	5. ეტაპი P-2**(2)** **საწყისი მონაც.:** ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე (ეტაპიდან R-4); კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$ (ეტაპიდან P-1). **ანალიზის მეთოდი:** ცოცვადობის ε_{cr} დეფ-ის ანალიზი მოდიფ-ლი ბოლცმან-ვოლტერას თეორიით. მოდიფ-ლი არაწრფ. დრეკადი რღვევის მოდელი კაშხლის ბეტონისთვის. **შედეგი:** ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე; კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$.

ცოცვადობის დეფორმაცია	2. ეტაპი R-2[1] **საწყისი მონაც.:** ბეტონის საწყისი სიხისტე და სიმტკიცე (ეტაპიდან R-1); კაშხლის საწყისი დდმ - $(\sigma,\varepsilon)_{Initial}$. (ეტაპიდან R-1). **ანალიზის მეთოდი:** ცოცვადობის ε_{cr} დეფ-ის ანალიზი მოდიფ-ლი ბოლცმან-ვოლტერას თეორიით. მოდიფ-ლი არაწრფ. დრეკადი რღვევის მოდელი კაშხლის ბეტონისთვის.  **შედეგი:** ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე; კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$.	6. ეტაპი P-3[2] **საწყისი მონაც.:** ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე (ეტაპიდან P-2); კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$ (ეტაპიდან P-2). **ანალიზის მეთოდი:** კაშხლის რღვევის კრიტერ. ბრტყ. დეფ-ის პირობებში; ინტერფეისის რღვევის კრიტერ. დისკრეტული რღვევის მოდელი; ფოროვანი წნევების მომატება ბზარებში. **შედეგი:** ბზარის გაჩენა და გავრცელება ბეტონში და/ან ინტერფეისში; კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$.
ბზარის წარმოქმნა და გავრცელება	3. ეტაპი R-3[1] **საწყისი მონაც.:** ბეტონის მოდიფიცირებული სიხისტე და სიმტკიცე (ეტაპიდან R-2); კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$ (ეტაპიდან R-2). **ანალიზის მეთოდი:** კაშხლის რღვევის კრიტერ. ბრტყ. დეფ-ის პირობებში; ინტერფეისის რღვევის კრიტერ. დისკრეტული რღვევის მოდელი; ფოროვანი წნევების მომატება ბზარებში. **შედეგი:** ბზარის გაჩენა და გავრცელება ბეტონში და/ან ინტერფეისში; კაშხლის მოდიფიცირებული დდმ - $(\sigma, \varepsilon)_{Modified}$.	
[1] **R** = რეტროსპექტული ანალიზი; [2] **P** = არსებული მდგომარეობის ანალიზი;		

2.1.1. ეტაპი R-1: ბეტონის მოდელი ბრტყელი დეფორმაციის ამოცანებისათვის

გრავიტაციული კაშხლის მუშაობის შეფასება უნდა მოხდეს ბრტყელ დეფორმაციათა ამოცანების ფარგლებში.

ჩვენს მიერ წარმოდგენილი კაშხლის კონსტიტუციური მოდელი ეყრდნობა ჰიპოდრეკად (არაწრფივი დრეკადი რღვევა) ფორმულირებას. ეს მოდელი კარგად აღწერს მიმდევრობითად შეუქცევად ძაბვა-დეფორმაციის დამოკიდებულებას.

ამ მიდგომის მთავარი უპირატესობა გამოიხატება იმაში, რომ ის მარტივად მიესადაგება რიცხვით ანალიზს და ანალიზისთვის აუცილებელი მონაცემები თავისუფლად შეიძლება მივიღოთ ბეტონის ნიმუშის ერთღერძა კუმშვაზე გამოცდიდან. აღნიშნულ მოდელს შეუძლია გაითვალისწინოს ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულება პიკურ ძაბვებამდეც კი, ანუ გაითვალისწინოს პლასტიკური მოცულობითი ზრდა კუმშვის დროს (დილატანსია), რომელიც დამახასიათებელია ბეტონისთვის რღვევის წინა ეტაპზე.

კონსტიტუციური მოდელი იყენებს ბეტონის რღვევის კრიტერიუმებს ბრტყელი დეფორმაციების და ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის ამოცანებისთვის.

შემოთავაზებული მოდელი ბეტონის ორღერძოვან ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებას ცვლის ერთღერძა ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებებით. ამ მიდგომის მიხედვით დეფორმაციის ნაზრდის სიდიდე თითოეული მთავარი მიმართულებისათვის იანგარიშება მთავარი ძაბვის ნაზრდის მიხედვით იმავე მიმართულებით.

- *ბეტონის ერთღერძა მუშაობა*

ბეტონის, როგორც სამშენებლო მასალის, მუშაობა უშუალოდ არის დამოკიდებული მის არსებულ დაძაბულ მდგომარეობაზე. ამის უმარტივესი მაგალითია ბეტონის ერთღერძა მუშაობა. რაც უფრო ზოგადი ხდება ძაბვითი მდგომარეობა (ორღერძა ან სამღერძა), მასალის მოქმედება უფრო რთულდება. მიუხედავად ამისა, ბეტონის ერთღერძა მუშაობა შეიძლება

გამოყენებული იქნას უფრო რთული მოდელების საფუძვლად, რომლებიც აღწერენ ნაგებობის უფრო რთულ მუშაობას.

რადგანაც ბეტონის მუშაობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე (როგორებიცაა კომპონენტების პროპორცია, შემავსებლების მახასიათებლები, მოდებული დატვირთვის სახეზე და ა.შ.), ძალიან რთულია მოინახოს ერთი განსაკუთრებული ანალიზური დამოკიდებულება, რომელიც აღწერდა ძაბვა-დეფორმაციების მრუდებს, რომელიც ზუსტად აღწერდა ყველა ტიპის ბეტონის მუშაობას. მიუხედავად ამისა, ქვემოთ მოყვანილი გამოსახულებას შეუძლიოა საკმაოდ ზუსტად აღწეროს ზოგადად ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციების მრუდები.

$$\frac{\sigma}{\sigma_c}=\frac{\dfrac{E_0}{E_c}\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_c}}{1+\left(\dfrac{E_0}{E_c}-2\right)\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_c}+\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2} \tag{2.1}$$

სადაც:

E_0 არის ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდული;

E_c - ბეტონის მკვეთი დრეკადობის მოდული პიკური ძაბვის დროს;

σ_c და ε_c – შესაბამისად, მაქსიმალური მკუმშავი ძაბვა და შესაბამისი დეფორმაცია.

იმისათვის, რომ დადგინდეს დრეკადობის მხები მოდული ძაბვა-დეფორმაციების მრუდის ნებისმიერ წერტილში, მოსახერხებელია ე.წ. არაწრფივობის β ინდექსის გამოყენება, რომელიც აღწერს ძაბვა-დეფორმაციების მრუდის იმ წერტილს, რომელიც შეესაბამისება ბეტონის მაქსიმალურ მკუმშავ ძაბვას და იანგარიშება როგორც:

$$\beta=\frac{\sigma}{\sigma_c} \tag{2.2}$$

ავღნიშნოთ $A= E_0/E_c$ და მივიღოთ მხედველობაში ის, რომ $\varepsilon_c=\sigma_c/E_c$ და $\varepsilon=\sigma/E_s$ (სადაც E_s არის ბეტონის მკვეთი დრეკადობის მოდული σ ძაბვის დროს). E_s – ის გამოსახულება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$E_s = E_c(A_1 + \sqrt{A_1^2 - \beta^2}) \tag{2.3}$$

სადაც

$$A_1 = \frac{A-\beta(A-2)}{2} \tag{2.4}$$

შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ ძაბვა-დეფორმაციების მრუდის ნებისმიერ წერტილში მხებ E_t და მკვეთ E_s დრეკადობის მოდულებს შორის მართებულია შემდეგი დამოკიდებულება:

$$E_t = \frac{E_s^2}{E_s - \frac{\partial E_s}{\partial \sigma}\sigma} \tag{2.5}$$

განტოლებები (2.2) - (2.4) გამოსახულება (2.5) – თან ერთად გამოიყენება დრეკადობის მხები მოდულის შემდეგი გამოსახულების მიღებისათვის:

$$E_t = \frac{2E_s(\frac{E_s}{E_c} - A_1)}{A} \tag{2.6}$$

- *ბეტონის ორღერძა მუშაობა*

შემდგომში, განტოლება (2.1) გამოყენებული იქნება ბეტონის მუშაობის აღწერისას ორღერძა ძაბვით მდგომარეობაში. კერძოდ, დრეკადი, ერთგვაროვანი და ორთოტროპული მასალისთვის, ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულება დიფერენციალურ ფორმაში, მთავარი ძაბვების გამოყენებით, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{E_{t1}} & -\dfrac{\nu_t}{\sqrt{E_{t1}E_{t2}}} \\ -\dfrac{\nu_t}{\sqrt{E_{t1}E_{t2}}} & \dfrac{1}{E_{t2}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \end{Bmatrix} \tag{2.7}$$

სადაც

ν_t არის პუასონის კოეფიციენტი:

$$\nu_t = \sqrt{\nu_{t1}\nu_{t2}} \tag{2.8}$$

იმისათვის, რომ განვსაზღროთ დრეკადობის მხები მოდულები E_{t1} და E_{t2} მთავარი ძაბვების მიმართულებებით, β პარამატრი, რომელიც შეესაბამება ერთღერძა კუმშვას, უნდა განზოგადდეს ორღერძა დაძაბულ მდგომარეობისთვის β_i $(i=1,2)$:

$$\beta_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ci}} \tag{2.9}$$

სადაც ინდექსი i აღნიშნავს σ_1 და σ_2 მთავარი ძაბვების მიმართულებებს და ზღვრულ σ_{ic} ძაბვებს. ამის გარდა, (2.6) დამოკიდებულება შეიძლება მოდიფიცირდეს დრეკადობის მხები მოდულის E_{ti} $(i=1,2)$ განსასაზღვრავად მთავარი ძაბვების მიმართულებებით:

$$E_{ti} = \frac{2E_{si}\left(\dfrac{E_{si}}{E_{ci}} - A_{1i}\right)}{A_i} \tag{2.10}$$

სადაც

$$E_{si} = E_{ci}\left(A_{1i} + \sqrt{A_{1i}^2 - \beta_i^2}\right) \tag{2.11}$$

$$A_{1i} = \frac{A_i - \beta_i (A_i - 2)}{2} \tag{2.12}$$

$$A_i = \frac{E_{0i}}{E_{ci}} \tag{2.13}$$

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_{ci}} \tag{2.14}$$

ამის შემდეგ, (2.10) – (2.14) განტოლებების პარამეტრები გაიანგარიშება ბეტონის დაძაბული მდგომარეობის შემდეგი ფორმებისათვის: კუმშვა – კუმშვა (CC) , გაჭიმვა – კუმშვა (TC) და გაჭიმვა – გაჭიმვა (TT). მაქსიმალური მკუმშავი ძაბვების მნიშვნელობები გაიანგარიშება [8] – ს მიხედვით.

- *ბეტონის კონსტიტუციური კანონის მოდიფიცირება ბრტყელი დეფორმაციის ამოცანებისთვის*

თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ბეტონის გამოცდის მონაცემები პრაქტიკურად არ არსებობს, ზოგიერთი იყენებს ბეტონის სამღერძა გამოცდის მონაცემებს და დაჰყავს ის ორღერძა კუმშვაზე [10]. ჩვენ ვიყენებთ რღვევის ოთხპარამეტრიან კრიტერიუმს, რომელიც შემდეგნაირად გამოისახება [11]:

$$a\frac{J_{2p}}{\sigma_c^2} - b\frac{\sqrt{J_{2p}}}{\sigma_c} - c\frac{\sigma_{1p}}{\sigma_c} - d\frac{I_{1p}}{\sigma_c} - 1 = 0 \tag{2.15}$$

სადაც

$$I_{1p} = \sigma_{1p} + \sigma_{2p} + \sigma_{3p} \tag{2.16}$$

$$J_{2p} = \frac{1}{6}\left[\left(\sigma_{1p} - \sigma_{2p}\right)^2 + \left(\sigma_{2p} - \sigma_{3p}\right)^2 + \left(\sigma_{3p} - \sigma_{1p}\right)^2\right] \tag{2.17}$$

ამ გამოსახულებებში $\sigma_{1p} \geq \sigma_{2p} \geq \sigma_{3p}$ არიან პიკური მდგომარეობის შესაბამისი მთავარი ძაბვები, σ_c - ბეტონის ერთღერძა სიმტკიცე კუმშვაზე და a, b, c, d პარამეტრები, რომლებიც განისაზღვრებიან ექსპერიმენტალურად.

არაწრფივობის ინდექსი, რომელიც ზემოდ არის აღწერილი, მიყვანილია მოცულობითი ამოცანების კლასებისთვის შემდეგი ფორმით:

$$\beta = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ip}} \quad (i = 1,2,3) \tag{2.18}$$

სადაც σ_{ip} ($i=1,2,3$) არის პიკური ძაბვის ვექტორის შესაბამისი კომპონენტები.

ზოგადი დამოკიდებულება მკვეთი ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებების ტრანსვერსალურად იზოტროპული (ორთოტროპული) მასალებისათვის მთავარ ძაბვებში ჩაიწერება შემდეგნაირად [12]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_2}{E_2} & \frac{-\nu_1}{E_1} \\ \frac{-\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_2}{E_2} \\ \frac{-\nu_1}{E_1} & \frac{-\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \tag{2.19}$$

ბრტყელი დეფორმაციების ამოცანებისთვის ამ გამოსახულებაში $\varepsilon_3=0$. ამ შემთხვევაში (2.19) განტოლების დიფერენციალური ფორმა აღწერს მხებ ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულებას ბრტყელი დეფორმაციებისთვის. ამ შემთხვევაში ჩაითვლება, რომ მასალის მექანიკური მახასიათებლები E_i და ν_i ($i=1,2$) ჩაინაცვლებიან შესაბამისი E_{ti} and ν_{ti} ($i=1,2$) მნიშვნელობებით. განტოლება (2.18)-დან განისაზღვრება σ_{ip} [13]:

$$\sigma_{ip} = \frac{\sigma_i}{\beta} \quad (i = 1,2,3) \tag{2.20}$$

თუ ჩავსვავთ (2.20) გამოსახულებას (2.15)-ში მივიღებთ:

$$a\frac{J_2}{\beta^2\sigma_c^2} - b\frac{\sqrt{J_2}}{\beta\sigma_c} - c\frac{\sigma_1}{\beta\sigma_c} - d\frac{I_1}{\beta\sigma_c} - 1 = 0 \tag{2.21}$$

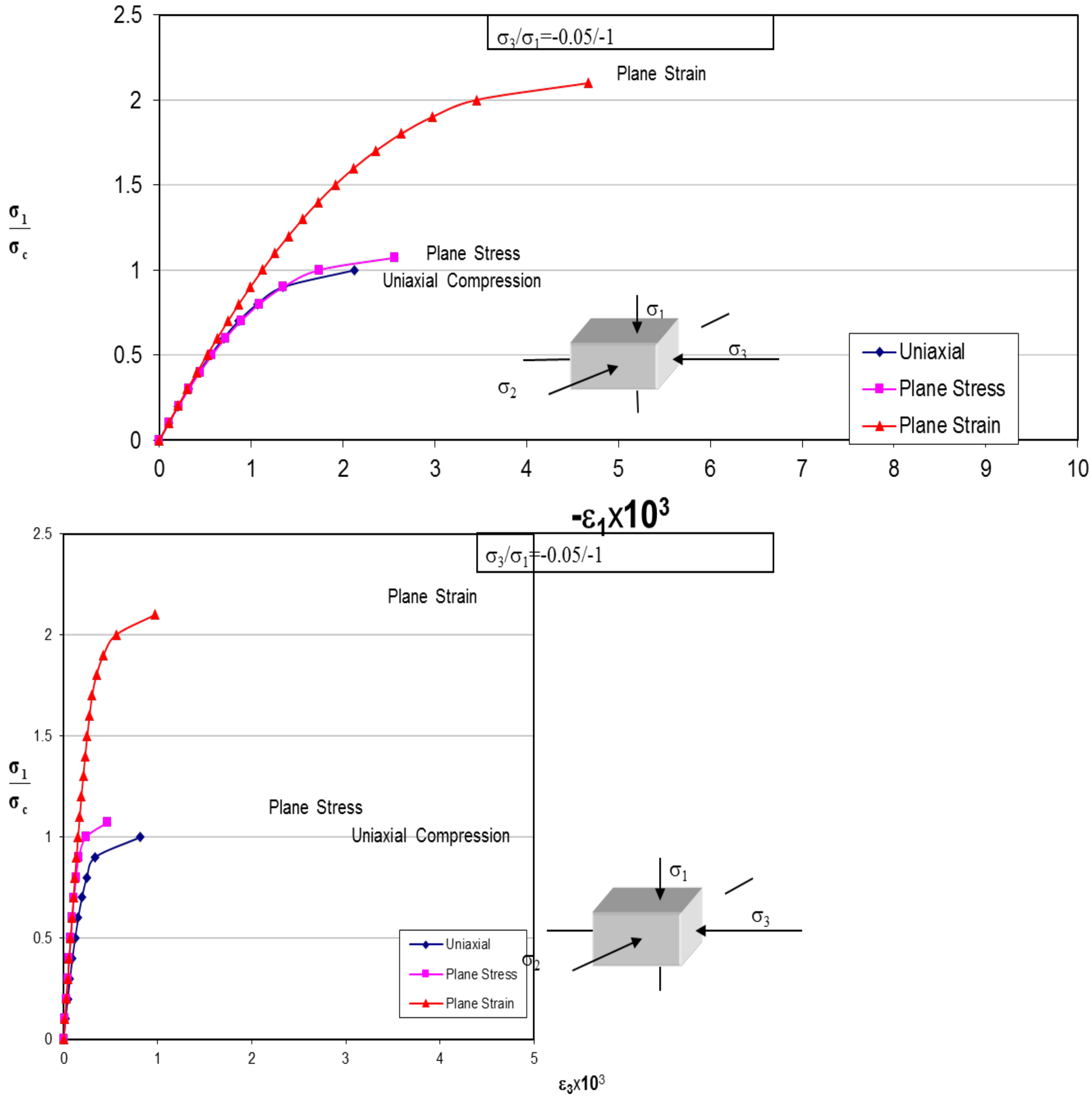
საიდანაც შეიძლება მივიღოთ შემდეგი გამოსახულება β-ს განსაზღვრისათვის:

$$\beta^2 + \frac{b\sqrt{J_2} + c\sigma_1 + dI_1}{\sigma_c} - a\frac{J_2}{\sigma_c^2} = 0 \tag{2.21}$$

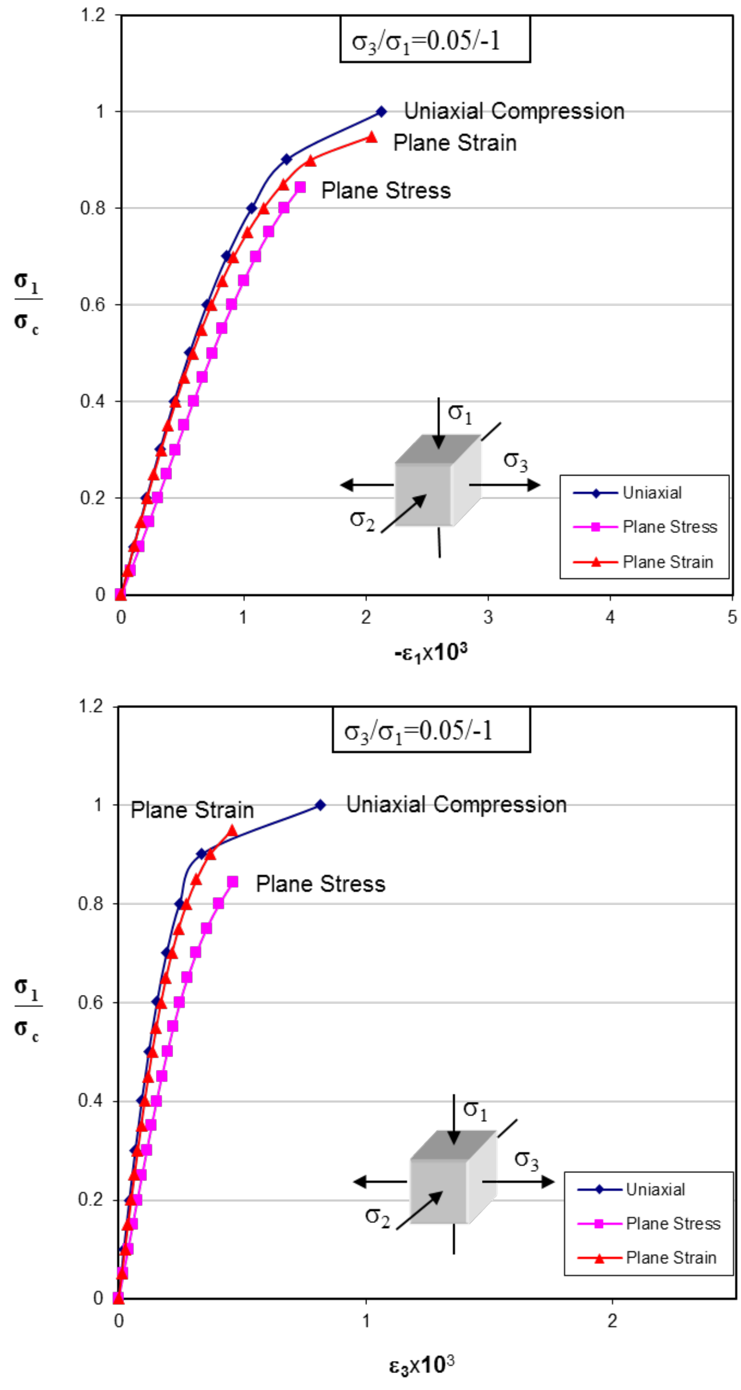
- *ანალიზის შედეგები*

ანალიზი დაიწყო ძაბვების კუმშვა-კუმშვის ფორმით, როდესაც $\alpha=\sigma_3/\sigma_1=0.05$ (ნახ. 2.1). ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციის მრუდი ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში ძალიან ახლოსაა ერთღერძიან კუმშვის დიაგრამასთან, თუმცა სიმტკიცე კუმშვაზე მნიშვნელოვნად იზრდება ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში, მაშინაც კი როდესაც α-ს მნიშვნელობა დაბალია. კერძოდ, სიმტკიცე კუმშვაზე თითქმის ორჯერ მეტია ერთღერძა კუმშვის შესაბამის სიმტკიცეზე კუმშვაზე. α-ს მნიშვნელობის გაზრდის შედეგად $\alpha=0.10$ და $\alpha=0.15$, სიდიდეემდე სიმტკიცე კუმშვაზე მნიშვნელოვნად იზრდება. ანალიზის დროს ჩვენ უფრო მეტად არ გაგვიზრდია α-ს მნიშვნელობა, რადგან გრავიტაციული კაშხლებისთვის ის იმყოფება 0 – 0,2 –ის ფარგლებში ($0.00 \le \alpha \le 0.20$).

უფრო მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა გაჭიმვა-კუმშვის ფორმა, რადგან ასეთი ზონები შეიძლება გაჩნდეს გრავიტაციული კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე. ნახ. 2.2 – დან ჩანს, რომ, როდესაც $\alpha=-0.05$, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში უფრო მაღალია, ვიდრე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს, თუმცა უფრო ნაკლებია ვიდრე ერთღერძა კუმშვის შემთხვევაში. შემდეგმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში მცირდება α-ს მნიშვნელობის გაზრდით. მაგალითად, როდესაც $\alpha=-0.10$, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში თითქმის



ნახ. 2.1: ერთღერძა კუმშვის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გაჭიმვა-კუმშვის ფარგლებში, როდესაც $\alpha=\sigma_3/\sigma_1=0.05$.



ნახ. 2.2: ერთღერძა კუმშვის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გაჭიმვა-კუმშვის ფარგლებში, როდესაც $\alpha=\sigma_3/\sigma_1=-0.05$.

ტოლია ანალოგიური სიდიდეზე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს. როდესაც *α=–0.15,* ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ნაკლებია ანალოგიური სიდიდეზე ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის დროს.

ანალიზიდან გამომდინარე დგინდება, რომ ბრტყელი დეფორმაცია აუარესებს ბეტონის მუშაობას გაჭიმვა-კუმშვის ზონაში გრავიტაციული კაშხლის სადაწნეო წახნაგის სიახლოვეს, სადაც მოსალოდნელია გამჭიმავი ბზარების წარმოშობა და გავრცელება კაშხლის ტანში. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია გრავიტაციული კაშხლების ანგარიში ბრტყელი დეფორმაციების პირობებში, რათა მოხდეს ბზარის შესაძლო წარმოშობის სწორი განსაზღვრა.

2.1.2. ეტაპი **R-1:** *კონსტიტუციური მოდელი ინტერფეისებისათვის (საკონტაქტო ზედაპირებისათვის)*

ფუძის გავლენას შესწავლას კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგანაც ეს გავლენა ვრცელდება ფუძიდან კაშხლის სიმაღლის თითქმის ერთ მესამედზე. კლასიკურ სასრული ელემენტების ანგარიშში ფუძე და კაშხალი ერთიან საანგარიშო სისტემაში განიხილება. ეს მოდელი არც ისე ზუსტად აღწერს იმ პროცესებს, რომლებიც საკონტაქტო ზედაპირზე ხდება, ანუ არ ხდება საკონტაქტო ზედაპირზე ურთიერთმიმართ გადაადგილებების დაფიქსირება, რადგან ეს კონტაქტი ხისტად ჩამაგრებული სქემის ტოლფასია. ამ პრობლემის გადასაჭრელად საჭიროა დამოდელირდეს უშუალოდ ინტერფეისი. ამისათვის გამოიყენება სპეციალური საკონტაქტო ელემენტები, რომლებიც ანალოგიური ელემენტები შეიძლება გამოყენებული იქნას არა მარტო კაშხლისა და

ფუძის საკონტაქტო ზედაპირზე, არამედ კაშხლის დასხმულ ფენებს შორის კონტაქტის დასამოდელირებლად.

ზოგადად, ინტერფეისის მუშაობა მისი მოსაზღვრე მასალების თვისებებზეა დამოკიდებული. ინტერფეისის მუშაობა არაწრფივია, ამიტომ აუცილებელია ისეთი მოდელის დამუშავება, რომელიც ამ არაწრფივობას აღწერს.

კონსტიტუციური დამოკიდებულება ინტერფეისებისებისათვის ეფუძნება ჰიპოდრეკად (არაწრფივი დრეკადი რღვევა) მოდელს. ამ მიდგომის საშუალებით შესაძლებელია ძვრის ცდებიდან მიღებული მხები ძაბვების – ფარდობითი გადაადგილებების მრუდის სიმულირება პიკურ მხებ ძაბვებამდეც კი, რომლის დროსაც წარმოიშობა დილატანსიის ეფექტი კვანძებს შორის.

ინტერფეისის ელემენტების არაწრფივი დამოკიდებულება შეიძლება ჩაიწეროს დიფერენციალური ფორმით:

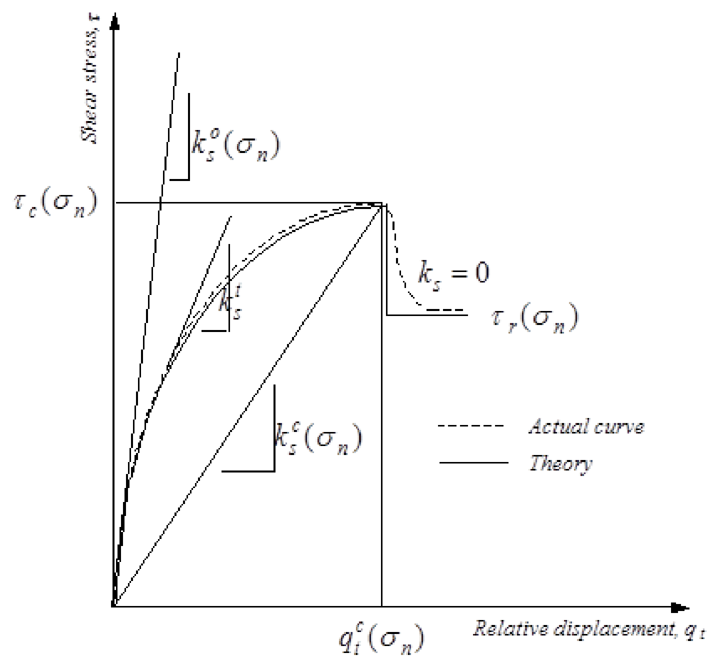
$$\begin{bmatrix} \partial\sigma_t \\ \partial\sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s^t & 0 \\ 0 & k_n^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial q_t \\ \partial q_n \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

სადაც k_s^t და k_n^t არის ინტერფეისის სიხისტის მატრიცის მძვრელი და ნორმალური კომპონენტები და მათი მნიშვნელობები ზოგადად დამოკიდებულია არსებულ ძაბვით მდგომარეობაზე.

ქვემოთ მოყვანილია ძვრის ძაბვა-დეფორმაციების და ნორმალური ძაბვა-დეფორმაციების კონსტიტუციური დამოკიდებულებები.

- *მხები ძაბვა-დეფორმაციების მოდელი*

ბეტონსა და კლდეს შორის ძვრაზე ტიპური ცდის შედეგები მოცემულია ნახ. 2.3 - ზე. ძვრის მოდული ძაბვითი მდგომარეობის ნებისმიერ საფეხურზე (τ, σ_n) ჩაიწერება შემდეგნაირად:



ნახ. 2.3: მხები ძაბვა-დეფორმაციების მოდელი ინტერფეისისათვის.

$$k_s^t = \frac{2k_s^s\left(\frac{k_s^s}{k_s^c} - A_1\right)}{A} \tag{2.23}$$

სადაც:

$$k_s^s = k_s^c(A_1 + \sqrt{A_1^2 - \beta^2}) \tag{2.24}$$

$$k_s^c = \frac{k_s^0}{A} \tag{2.25}$$

$$A_1 = \frac{A - \beta(A-2)}{2} \tag{2.26}$$

ამ განტოლებებში შემავალი მხები ძაბვის პარამეტრი β_τ ანალოგიურია არაწრფივობის β პარამეტრის და ის შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\beta_\tau = \frac{\tau}{\tau_c} \tag{2.27}$$

სადაც τ_c არის ინტერფეისის სიმტკიცე ძვრაზე. მოდელის უცნობი სიდიდეები, რომლებიც უნდა განისაზღვრონ, არიან: ძვრის სიხისტის საწყისი კოეფიციენტი k_s^0, ინტერფეისის სიმტკიცე ძვრაზე τ_c და უგანზომილებო პარამეტრიც A, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს საწყის ძვრის სიხისტეს და ძვრის სიხისტის მკვეთ მნიშვნელობას რღვევის მომენტში. ყველა ეს პარამეტრი დამოკიდებულია ნორმალ ძაბვებზე და შეიძლება განზოგადნენ ინტერფეისში ნორმალური ძაბვების მნიშვნელობებთან შესაბამისობაში, როგორც ქვემოთ არის აღწერილი.

ძვრაზე სიხისტის საწყისი კოეფიციენტის განზოგადება. როგორც ზემოდ იყო ნახსენები, ძვრის სიხისტის საწყისი k_s^0 კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ინტერფეისში ნორმალური σ_n ძაბვის მნიშვნელობაზე. კარჯანის (ინდოეთი) გრავიტაციული კაშხლის ფუძეში არსებული ბზარის ანალიზის საფუძველზე, ავტორებმა გამოიყენეს მოდელი, რომელიც შემდეგნაირად ასახავს k_s^0–ის და σ_n -ის ურთიერთკავშირს [14]:

$$k_s^0 = K\gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \tag{2.28}$$

სადაც:

K არის სიხისტის უგანზომილებო მაჩვენებელი;

γ_w - წყლის ხვედრითი წონა;

P_a - ატმოსფერული წნევა;

n - ძვრაზე სიხისტის მაჩვენებელი.

უნდა აღინიშნოს, რომ (2.28) განტოლება არ არის მართებული იმ შემთხვევაში, როდესაც ნორმალური ძაბვა ნულის ტოლია (σ_n=0). მიუხედავად იმისა, რომ ეს განტოლება ვარგისია გრუნტი-ნაგებობის ურთიერთობების ამოცანებში, ის ვერ აღწერს სრულად კლდესა და ბეტონს შორის, აგრეთვე ბეტონის ორ ფენას შორის კონტაქტებს. იმისათვის, რომ განტოლების ეს ნაკლი დაიძლიოს, საჭიროა (2.28) განტოლების მოდიფიცირება შემდეგი მარტივი გზით. დავუმატოთ განტოლების მარჯვენა მხარეს ინტერფეისში ძვრის სიხისტის საწყისი მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება ნულოვან ნორმალურ ძაბვას, ე.ი.:

$$k_s^0 = \left(k_s^0\right)^{\sigma_n = 0} + a\left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \tag{2.29}$$

სადაც: $a=K\gamma_w$ არის სიხისტის პარამეტრი (გამოსახული იგივე განზომილებაში, რაც k_s^0).

ზემოდმოყვანილი სახით განტოლება (2.29) გამოყენებული იქნა [15]-ში ბეტონისა და კლდის ინტერფეისის მუშაობის შესასწავლად.

$\left(k_s^0\right)^{\sigma_n = 0}$ -ის მნიშვნელობის დასადგენად საკმარისია ძვრაზე კლასიკური ცდა ნულოვანი ნორმალური ძაბვების შემთხვევაში. პარამეტრი a შეიძლება ადვილად განისაზღვროს მხები ძაბვები-ფარდობითი გადაადგილებების მრუდებიდან, რომლებიც აგებულია ინტერფეისში ნორმალური ძაბვების სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. ხშირად მიიღება, რომ საწყისი ძვრის მნიშვნელობა წრფივად არის დამოკიდებული ნორმალური ძაბვის მნიშვნელობებზე, ანუ n=1.

ინტერფეისის ძვრაზე სიმტკიცის განზოგადება. τ_c მხები ძაბვის პიკური მნიშვნელობა არის აგრეთვე ინტერფეისში ნორმალური ძაბვის ფუნქცია

ნახ. 2.3. მორი-კულონის კრიტერიუმის მიხედვით ის განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\tau_c = c + \sigma_n \tan\phi \tag{2.30}$$

სადაც:

c არის შეჭიდულობა;

ϕ - შინაგანი ხახუნის კუთხე (ეს პარამეტრები შეიძლება აგრეთვე განისაზღვროს უშუალოდ ძვრის ცდებიდან).

მას შემდეგ, რაც მიღწეული იქნება ძვრაზე სიმტკიცის ზღვრული მნიშვნელობა, მოხდება რღვევა ძვრაზე და k_s –ის მნიშვნელობა მიუახლოვდება ნულს. მიუხედავად ამისა, ინტერფეისში რჩება სიმტკიცის გარკვეული დონე ნახ. 2.3.

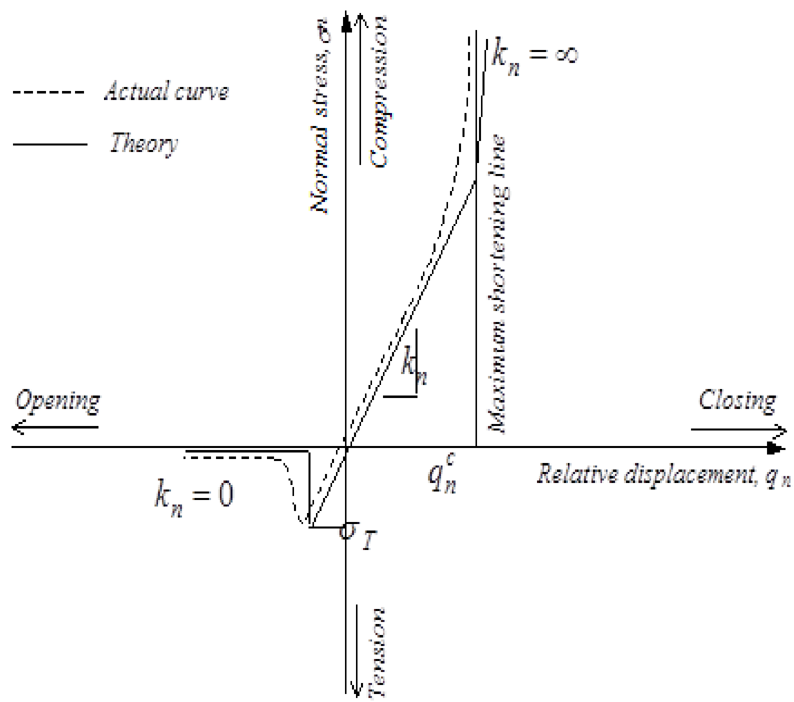
- *ნორმალური ძაბვა-დეფორმაციების მოდელი*

ნორმალური ძაბვა-დეფორმაციების მოდელი მოცემული ნახ. 2.4-ზე. ზოგადად, ნორმალური ძაბვა-დეფორმაციების დამოკიდებულება არაწრფივია (დაშტრიხული ზონა ნახ. 2. –ზე). მიუხედავად ამისა, უშვებენ, რომ ეს დამოკიდებულება ზღვრულ მკუმშავ და გამჭიმავ რღვევებს შორის არის წრფივი, ე.ი. ნორმალური სიხისტე ითვლება მუდმივ სიდიდედ: k_n=*const* [16].

დაშვებულია, რომ ინტერფეისებს კაშხალსა და ფუძეს შორის, აგრეთვე კაშხლის დაგებულ ფენებს შორის, შეუძლია მიიღონ გარკვეული სიდიდის გამჭიმავი ძაბვები. მაგალითად, Upper Stillwater-ის დატკეპნილბეტონიანი გრავიტაციული კაშხალი დაპროექტებული იყო 1,24 მპა სიდიდის მინიმალურ სიმტკიცეზე გაჭიმვაზე ბეტონის ფენებს შორის [17].

გამჭიმავი ძაბვა გავლენას ახდენს ინტერფეისის წერტილების ურთიერთ ფარდობით გადაადგილებებზე, როდესაც სიმტკიცე გაჭიმვაზე ინტერფეისში მიაღწევს თავის ზღვრულ მნიშვნელობას, ე.ი. როდესაც

$\left|\sigma_n\right| \geq \left|\sigma_n^t\right|$. ამის შემდეგ ინტერფეისს აღარ შეუძლია წინააღმდეგობა გაუწიოს გამჭიმავ ძაბვებს და ის გაიხსნება, ე.ი. ძაბვები დაეცემა ნულამდე. ძვრაზე და ნორმალური სიხისტის კოეფიციენტების საწყისი



ნახ. 2.4: ნორმალური ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილების მოდელი ინტერფეისისათვის.

მნიშვნელობები უახლოვდება ნულს. ძაბვები გადანაწილდება გაუხსნელ კონტაქტებში. იგივე პრინციპი ვრცელდება კუმშვის ზონებშიც ნახ. 2.4.

- *ანალიზის შედეგები*

ინტერფეისის ზემოდ აღწერილი მოდელის ბაზაზე მიღებული შედეგები შედარებული იქნა ნატურაში ძვრაზე ჩატარებული ცდების შედეგებს [15] ბეტონსა და კლდეს შორის. თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების შედარების შედეგად დადგინდა, რომ ამ ორ მრუდს შორის

გარკვეული სხვაობა გამოწვეული იყო ინტერფეისში ძვრაზე სიმტკიცის თეორიულ და რეალურ სიდიდეებს შორის სხვაობით. მიუხედავად ამისა, შეიძლება დავასკვნათ, რომ (2.23 – 2.26) გამოსახულებები კარგად აღწერენ მხები ძაბვები-ფარდობითი გადაადგილებების რეალურ (ნატურალ) მრუდს. ანალიზის შემდეგ ეტაპებზე მოხდა თეორიული მრუდებისთვის A პარამეტრის ცვლადი მნიშვნელობების აღება.

გარკვეული სხვაობა თეორიულ და ექსპერიმენტულ მრუდებს შორის, რომელიც გამოწვეული იყო ძვრაზე სიმტკიცის თეორიულ და რეალურ სიდიდეებს შორის სხვაობით, დაფიქსირდა იმ შემთხვევისთვის, როდესაც σ_n = 3.08 კგ/სმ^2 და σ_n = 8.01 კგ/სმ^2, მაშინ, როდესაც საკმაოდ კარგი კორელაცია დაფიქსირდა იმ შემთხვევისთვის, როდესაც σ_n = 11.89 კგ/სმ^2 (ნახ. 2.5)

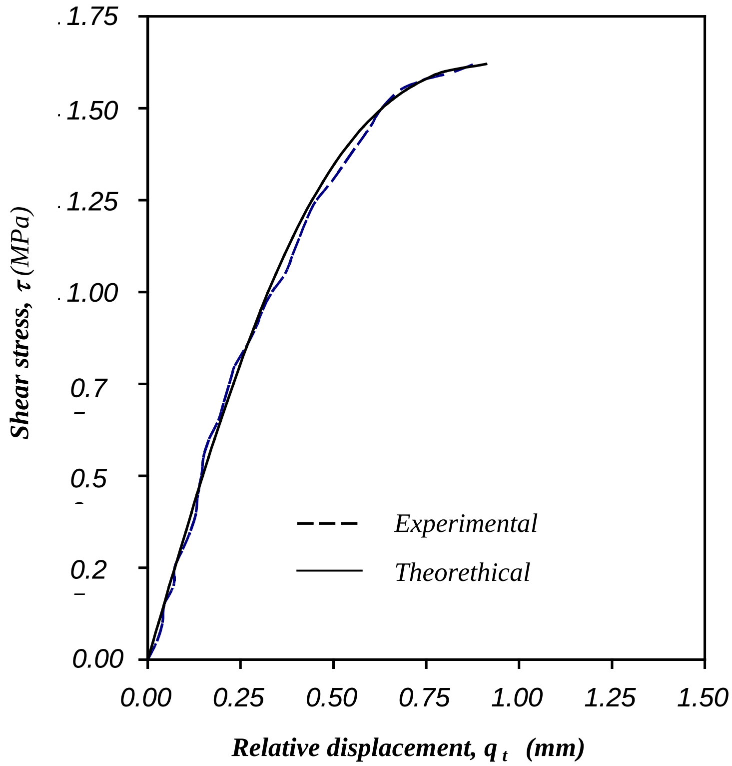
2.1.3. ეტაპი R-2: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში

როგორც გვიჩვენებს ბეტონის კაშხლებზე მრავალწლიანი ნატურული დაკვირვებების, ასევე ლაბორატორული ექსპერიმენტების შედეგები, ბეტონის ცოცვადობის თვისებას და დაღლილობას მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს თვით ნაგებობის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. იმისათვის, რომ საანგარიშო მეთოდიკაში გათვალისწინებული იქნას ბეტონის ცოცვადობის პროცესი, საჭიროა ვიცოდეთ საანგარიშო სისტემის (კაშხალი – ფუძე) საწყისი დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და მასალის საწყისი მექანიკური მახასიათებლები.

ანგარიშები ტარდება სამ ეტაპად:

- ეტაპი 1 – იანგარიშება სისტემა “კაშხალი – ფუძის” საწყისი დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობა;
- ეტაპი 2 – სისტემა “კაშხალი – ფუძე” იანგარიშება იმ პერიოდისთვის, როდესაც კაშხალის ბეტონის სიმტკიცე მიაღწევს თავის პიკურ მნიშვნელობას. ეს, უმრავლეს შემთხვევაში, ხდება

ბეტონის ჩასხმიდან 8-10 წლის შემდეგ [18, 19]. მიღებულია, რომ ამ დროისათვის ბეტონში ცოცვადობის პროცესი დამთავრებულია. თუ კაშხლის ტანში წარმოიშობა ბზარები, საჭიროა ანგარიშები



σ_n =11.89 kg/sm^2
c =3.1 kg/sm^2
$\tan\phi$ =1.1
k_{so} =230.0 kg/cm^3
a=10.0 kg/sm^3
n=1
P_a =1.033 kg/cm^2

$$A=\frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right)^2+\frac{2}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right)+\frac{4}{3}$$

ნახ. 2.5: აღწერილი მეთოდით მიღებული შედეგების შედარება [15]-ში მოყვანილ ექსპერიმენტულ მონაცემებთან ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისისათვის A პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის.

ჩატარდეს ბზარწარმოქმნისა და ცოცვადობის პროცესის მხედველობაში მიღებით;

- ეტაპი 3 – იანგარიშება სისტემის არსებული (ან მომავალი) დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა. ბეტონის მექანიკური მახასიათებლები ზუსტდება [20] დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლების და ექსპლუატაციის t პერიოდის გათვალისწინებით. იმ შემთხვევაში თუ აღმოჩნდა ბზარები, მაშინ ჩაითვლება, რომ ცოცვადობის პროცესი გრძელდება ბზარის წვეროებში.

ბეტონში ცოცვადობის პროცესის აღსაწერად გამოიყენება ბოლცმან-ვოლტერას წრფივი მემკვიდრეობითი თეორია. ამ თეორიის მიხედვით, ცოცვადობის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განტოლების ყველაზე ზოგადი ფორმა ერთგანზომილებიანი ამოცანებისათვის შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად [21]:

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{E(t)}+\int_{0}^{t}\frac{K(t)}{E(t)}\sigma(t)dt \tag{2.31}$$

სადაც:

ε(t) - ჯამური (დრეკადი და ცოცვადობის) დეფორმაცია დროის t მომენტისათვის;

K(t) - ცოცვადობის ფუნქცია, რომელიც დამოკიდებულია დატვირთვის ასაკზე და t დროზე;

E(t) - ბეტონის დრეკადობის მოდული, რომელიც დამოკიდებულია დატვირთვის ასაკზე და იცვლება t დროსთან ერთად;

σ(t) - ძაბვა დროის t მომენტისათვის;

ცოცვადობის ფუნქცია შეიძლება გაანგარიშდეს შემდეგი განტოლების საშუალებით:

$$K(t) = \delta_2 e^{\delta_1 t} \tag{2.32}$$

ამ განტოლებაში δ_1 და δ_2 კოეფიციენტები განსაზღვრავენ ცოცვადობის პროცესის ხარისხს და მიიღებიან ექსპერიმენტული გზით. მაგალითად, δ_1 მიიღება, როგორც ბეტონის ფარდობითი შემოკლების სიჩქარე როგორც დროის ფუნქცია.

- *ანალიზის შედეგები*

იმისათვის, რომ ცოცვადობის სრული პროცესი ზუსტად იქნას აღწერილი, საჭიროა განისაზღვროს:

ა) ცოცვადობის *K(t)* ფუნქცია;

ბ) δ_1 და δ_2 კოეფიციენტები, რომლებიც გამოიყენება *K(t)* ფუნქციის საანგარიშოდ და დამოკიდებულნი არიან იმ დროზე, რომლის განმავლობაშიც ხდება ცოხცვადობის პროცესზე დაკვირვება;

გ) დრეკადობის მოდული *E(t);*

ც) $\sigma(t)$ ძაბვები t დროის ნებისმიერ მონაკვეთში;

ჰ) ცოცვადობის აღდგენა დატვირთვის მოხსნის შემდეგ;

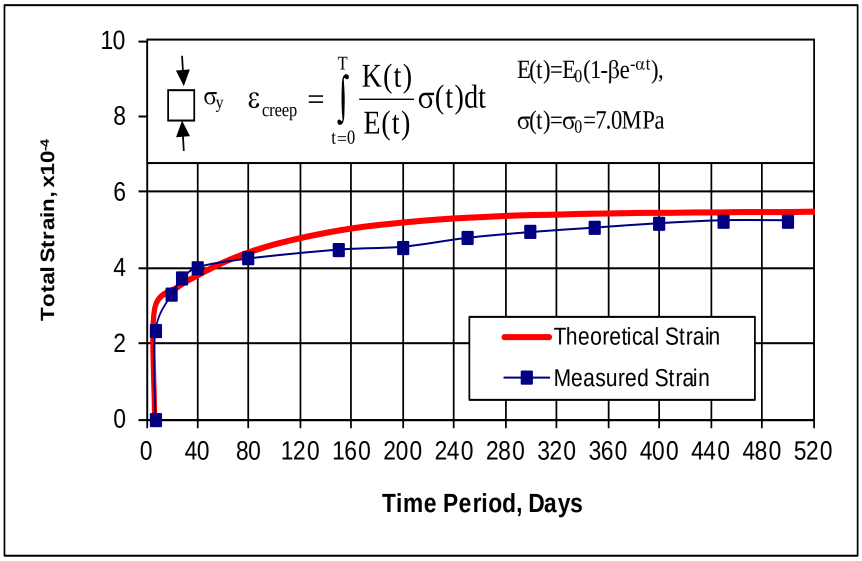
ი) ცოცვადობის პროცესი ციკლური დატვირთვების დროს.

ცოცვადობის პროცესს საგრძნობი გავლენა აქვს ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციების მრუდზე, რომელზეც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია კაშხალში დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა.

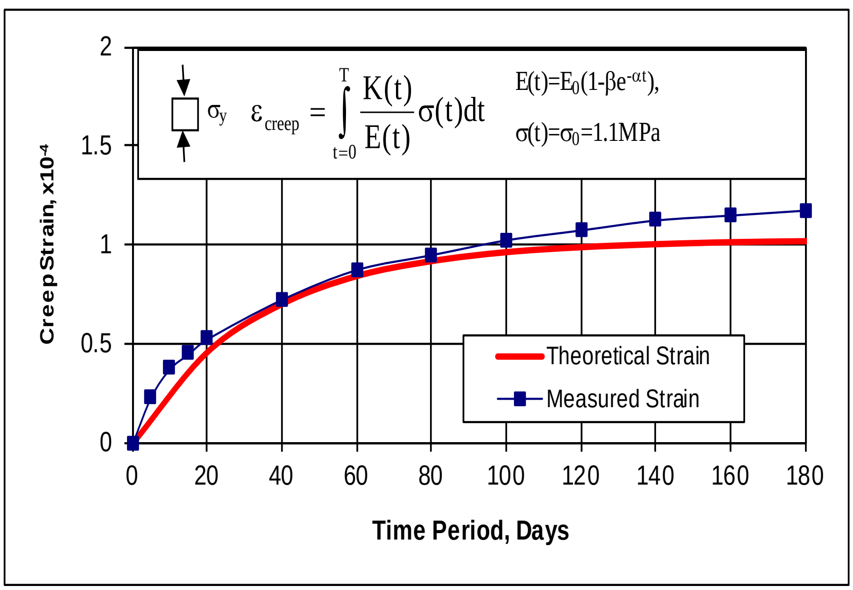
ნახ. 2.6 - ზე მოცემულია დრეკადი და ცოცვადობისგან გამოწვეული ჯამური დეფორმაციები [22]. ექსპერიმენტალური მრუდი მიღებულია 7 დღის ნიმუშის გამოცდის შედეგად. თავდაპირველად, ანგარიშებში მიღებული იქნა დრეკადობის *E* მოდულის მუდმივი მნიშვნელობა, მაგრამ

უფრო ზუსტი შედეგები მიიღება, როცა გამოვიყენებთ *E(t)* –ს ცვლად მნიშვნელობებს, დამოკიდებულს *t* დროზე.

ნახ. 2.7 -ზე მოცემულია ცოცვადობის დეფორმაცია, რომელიც მიღებულია 28 დღის ასაკის ბეტონის ნიმუშის გამოცდის შედეგად.



ნახ. 2.6: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში ***σ(t) = 7,0 მპა-ის დროს.***



ნახ. 2.7: ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში ***σ(t) = 1,1 მპა-ის დროს.***

უნდა აღინიშნოს, რომ თეორიული მოდელის მიხედვით ცოცვადობის პროცასი სტაბილირდება დახლოებით 180 – 540 დღეში (0,5 – 1,5 წელი). ექსპერიმენტები კი აჩვენებენ, რომ ეს პროცესი უფრო დიდხანს გრძელდება. ამიტომ საჭიროა შემდგომი კვლევები, რათა მოხდეს თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების კარგი კორელაცია.

2.1.4. ეტაპი R-3: ბზარის წარმოშობის და გავრცელების ანალიზი

რღვევის მექანიკის ამოცანების მოდელირების მთავარი პრობლემა არის ბზარის წვეროში გაჩენილი უსასრულო სიდიდის ძაბვა [23]. ეს ხდება იმიტომ, რომ ძაბვის/დეფორმაციის $r^{-1/2}$ ხარისხის სინგულარობა (r არის ბზარის წვეროდან) ჩნდება ბზარის წვეროს სიახლოვეს. ამის გამო, სასრული ელემენტების ძალიან ხშირი ბადის გამოყენებაც კი არ იძლევა სასურველ სიზუსტეს. ხშირად იყენებენ სპეციალურ ბზარის წვეროს ელემენტებს პრობლემის მოსახსნელად. ამის ალტერნატული მიდგომაა, შეიცვალოს ასეთი ელემენტი მოდიფიცირებული იზოპარამეტრული კვადრატული სასრულო ელემენტებით [24, 25] და იზოპარამეტრული კვადრატული სასაზღვრო ელემენტებით [26, 27] გარკვეული კვანძების ადგილის შეცვლის გზით. ასეთი ელემენტების გამოყენება აღარ ხდის აუცილებელს შემოვიყვანოთ საანგარიშო სქემაში ბზარის წვეროს ელემენტები და ეს ამარტივებს ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორის გამოთვლას ბზარის წვეროსთან. გარდა ამისა, აღარ არის აუცილებელი ძალიან ხშირი ბადის შექმნა ბზარწარმოქმნის ზონაში ზუსტი ამონახსნის მისაღებად.

რღვევის მექანიკის თეორიები გულისხმობს, რომ ბზარის წვეროსთან ძაბვები არის უსასრულო და ისინი ხასიათდებიან ძაბვის ინტენსიობის ფაქტორით K. როდესაც აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას (რომელიც ცნობილია როგორც K_c ან რღვევის სიბლანტე), ჩნდება კატასტროფული

ბზარი ან სწრაფი რღვევა. რღვევის სიბლანტე K_c არის მასალის მექანიკური მახასიათებელი, რომელიც არ არის დამოკიდებული ნაგებობის გეომეტრიაზე ან დატვირთვის სახეობაზე. ძაბვის ინტენსიობის ფაქტორი არ არის ძაბვა თავისთავად. ის ზომავს იმას, თუ რამდენად ახლოს არის ბზარი თავის კრიტიკულ სიგრძესთან, როდესაც ის იწყებს წარმოშობას ნაგებობაში.

ცნობილია რღვევის სამი კლასიკური ფორმა, რომლებიც ეფუძნება ბზარის გვერდების ფარდობით მოძრაობას: (1) ბზარის გახსნის ფორმა (ფორმა I); (2) ბზარის დაცურების ფორმა (ფორმა II) და (3) ბზარის გახსნის ფორმა (ფორმა III). ამ სამიდან პირველი ორი მისაღებია გრავიტაციული კაშხლებისათვის, თუმცა ფორმა I არის ყველაზე მნიშვნელოვანი, რადგანაც უმრავლეს შემთხვევებში გრავიტაციული კაშხლების ტანში ბზარები ჩნდება გამჭიმავი ძაბვების ზონაში (მაგალითად, კაშხლის ინტერფეისებთან და კაშხალსა და ფუძეს შორის კონტაქტში.

ნაშრომ [28]-ში მოყვანილია გამოსახულებების მთელი სერია ძაბვებისა და გადაადგილებებისათვის ბზარის წვერთან. ძაბვის ინტენსიობის ფაქტორი K იანგარიშება ძაბვის და გადაადგილების ექსტრაპოლირების შემდეგი მეთოდებით.

ა) გადაადგილების ექსტრაპოლირების მეთოდი (ბრტყელი ძაბვითი მდგომარეობა):

$$K_I = \frac{E\sqrt{2\pi}}{4(1-\nu^2)}\left(\frac{u_2}{\sqrt{r}}\right)_{r\to 0} \tag{3.33}$$

K_I –ს ზუსტი მნიშვნელობის მიღების მაგივრად r=0 – თან, აიგება K_I –ს მნიშვნელობების და r მანძილებს შორის დამოკიდებულება (3.33) – ის მიხედვით და გამოიყენება სწორი ხაზის ექსტრაპოლირება K_I –ის მისაღებად ბზარის წვერთან (r=0).

ბ) ძაბვის ექსტრაპოლირების მეთოდი (ბრტყელი დეფორმაცია):

$$K_I = \sqrt{2\pi}\left(\frac{\sigma_{22}}{\sqrt{r}}\right)_{r\to 0} \qquad (3.34)$$

როგორც წინა შემთხვევაში, აიგება K_I –ს მნიშვნელობების და r მანძილებს შორის დამოკიდებულება (3.34) – ის მიხედვით და გამოიყენება სწორი ხაზის ექსტრაპოლირება K_I –ის მისაღებად ბზარის წვერთან (r=0).

- *ანალიზის შედეგები – პარამეტრული კვლევები ძაბვის ინტენსიობის ფაქტორების საანგარიშოდ*

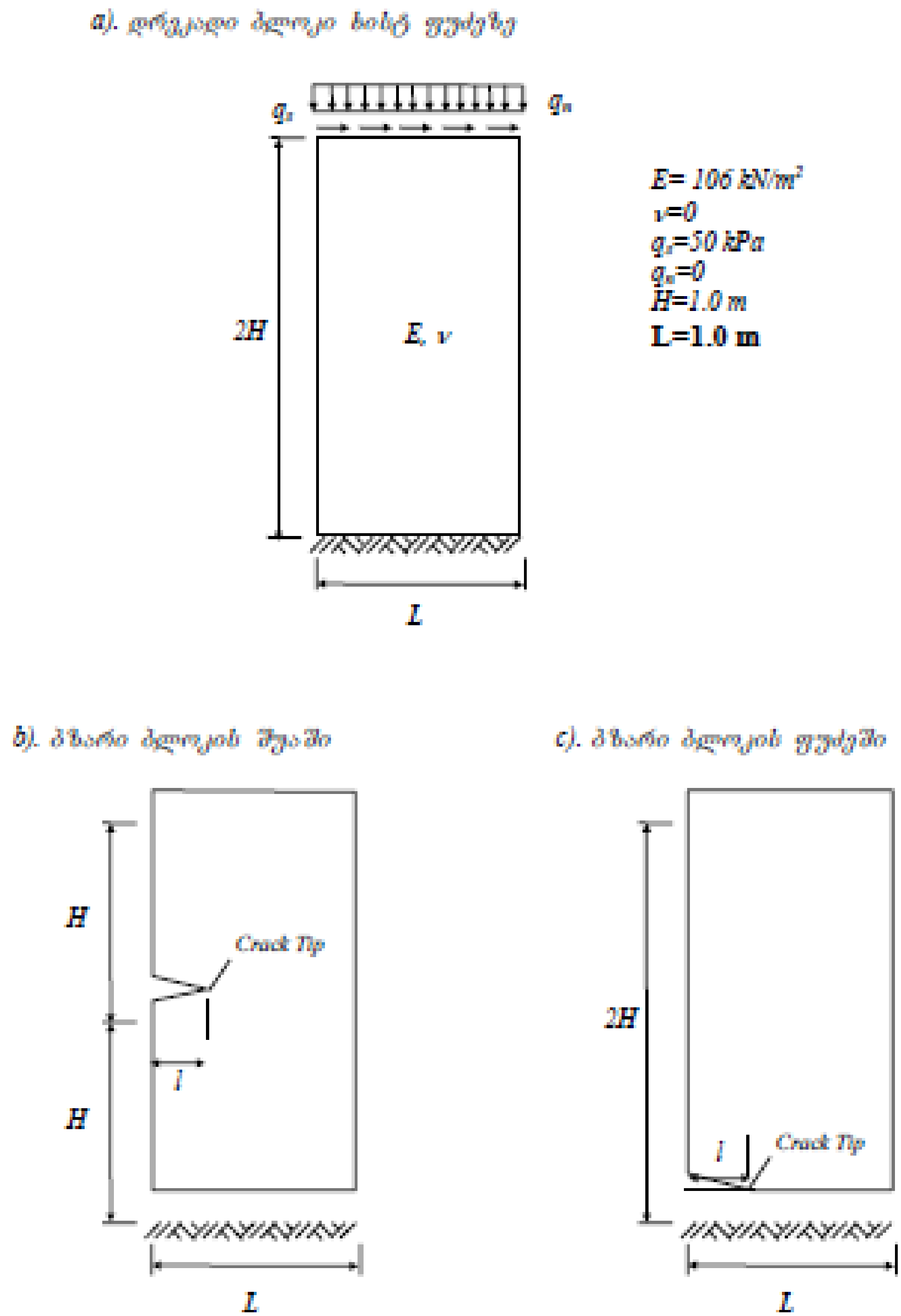
პარამეტრული კვლევების ერთი ძირითადი მიზანი იყო დადგენილიყო ინტერფეისების იზოპარამეტრული კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტების და კვადრატული სინგულარული სასაზღვრო ელემენტების რიცხვითი მდგრადობა და საიმედოობა ბზარის წვერთან. მეორე მიზანი იყო კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტების და კვადრატული სინგულარული სასაზღვრო ელემენტების ოპტიმალური ზომების დადგენა ბზარის წვეროს სიახლოვესთან.

ანალიზი ჩაუტარდა დრეკად ბლოკს, რომელზეც მოდებული არის თანაბრადგანაწილებული მხები დატვირთვა ზედა წახნაგზე. ანგარიშების დროს გამოყენებული ბლოკის გეომეტრია, მასალის მექანიკური თვისებები და მოდებული ძალები ნაჩვენებია ნახ. 2,8ა ზე.

ჩატარდა დაახლოებით 400 კომპიუტერული გამოთვლა სხვადასხვა შემთხვევებისთვის. გამოყენებული სხვადასხვა სასრული ელემენტების – სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი. ანგარიშები ჩატარდა ბლოკში არსებული ბზარის სხვადასხვა ზომებისთვის. ბზარი განთავსებული იქნა როგორც ბლოკის შუაში, ასევე მის ძირში (ნახ. 2,8 b და ნახ. 2,8 c).

ანგარიშები დაიწყო დრეკად ბლოკში ბზარის ცენტრში განთავსებით. ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი K_I გაანგარიშებული იქნა 8-კვანძიანი

კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტების და 8-კვანძიანი კვადრატული სინგულარული სასაზღვრო ელემენტების გამოყენებით.

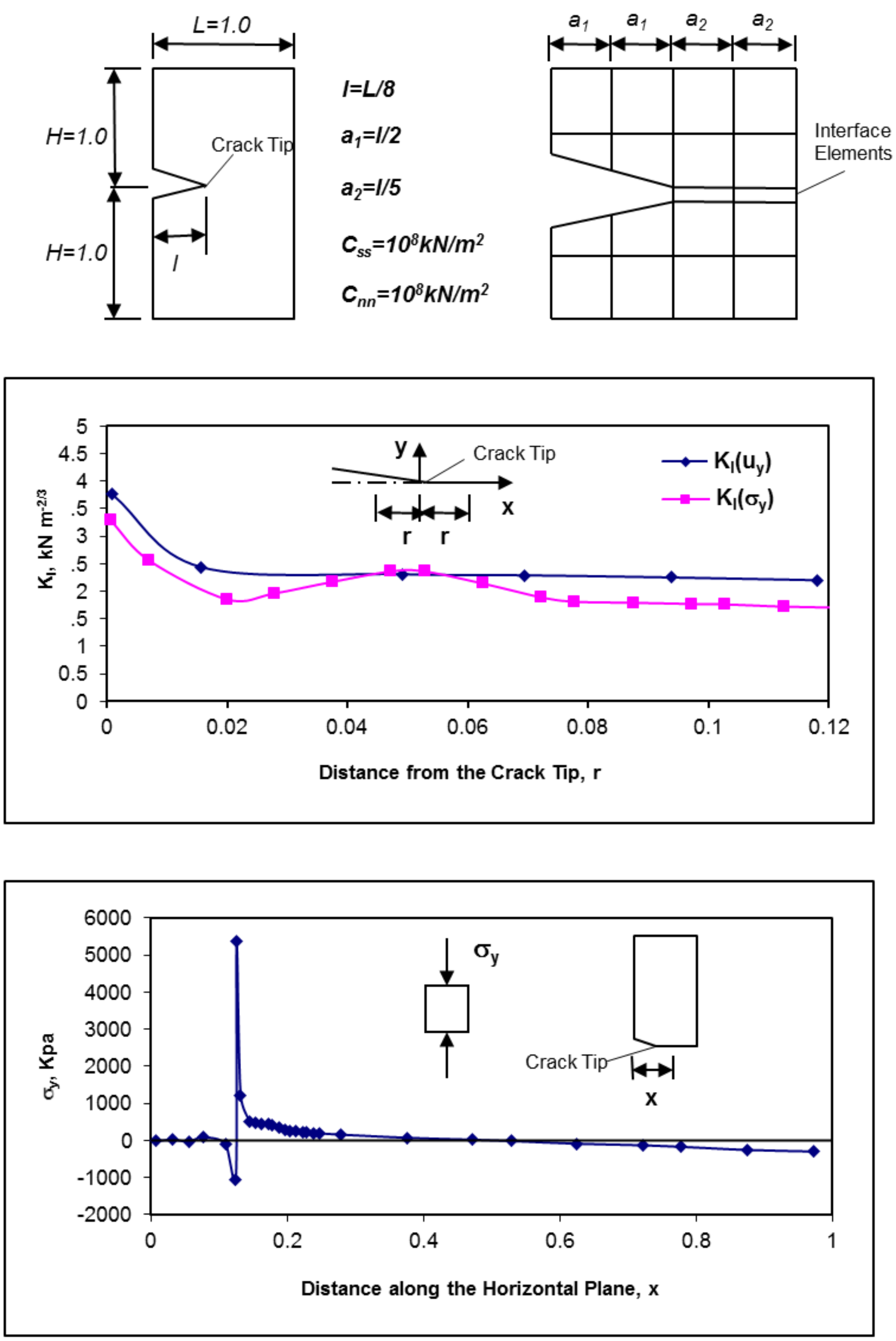


ნახ. 2.8: ბზარი დრეკად ბლოკში.

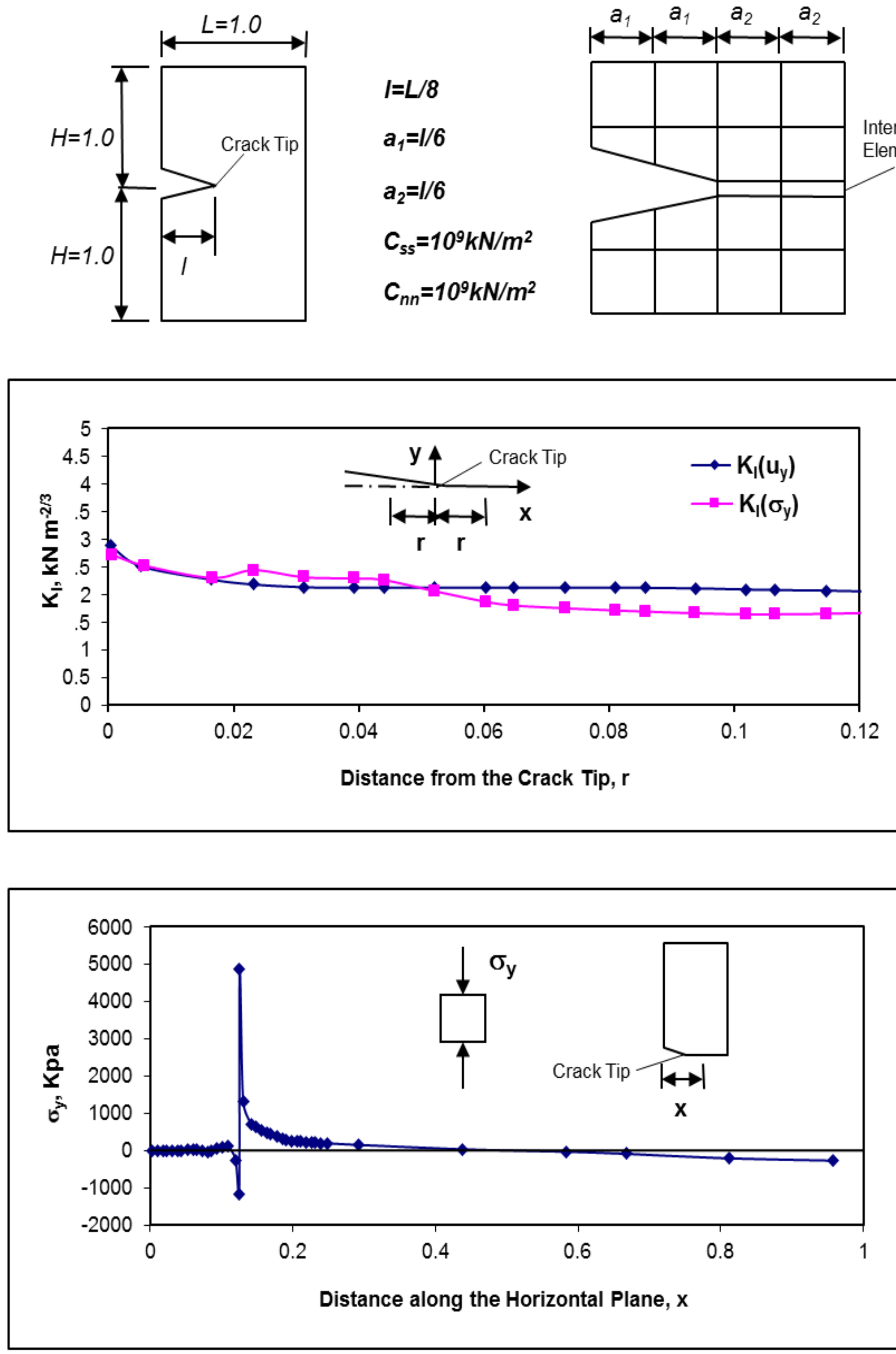
სინგულარული ელემენტები განთავსებული იქნა ბზარის გასწვრივ მისი წვეროს ორივე მხარეს. ბზარის ახლოს გამოყენებული იქნა ხშირი ბადე, განსაკუთრებულად უფრო პატარა ზომის ელემენტები განთავსდა ბზარის წვეროს გარშემო. როგორც საწყისი მნიშვნელობა, ინტერფეისის ელემენტებისთვის ნორმალური და მხები სიხისტის კოეფიციენტები აღებული იქნა $C_{nn}=C_{ss}=10^8$ კნ/მ^3.

თავდაპირველად ჩაითვალა, რომ ბზარის სიგრძე ტოლი იყო *l=L/8,* სადაც *L* არის ბლოკის სიგანე. ანგარიშები დაიწყო იმ დაშვებით, რომ $a_1 = a_2 = l/2$ და მომდევნო ანგარიშებში ის მცირდებოდა *l/5*- დე (ნახ. 2.9 და 2.10). ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი K_I-ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული იქნა ორივე, გადაადგილების და ძაბვის ექსრაპოლირების მეთოდებით. უნდა აღინიშნის, რომ თავდაპირველად K_I -ს მნიშვნელობები, რომლებიც მიღებული იქნა ნორმალური u_y გადაადგილებების გამოყენებით, მიყვანილი იქნა იმ მნიშვნელობებამდე, რომლებიც მიღებული იქნა ნორმალური σ_y ძაბვების გამოყენებით. მიუხედავად ამისა, როდესაც a_2-ის მნიშვნელობა ტოლი იყო *l/5*–ის, K_I -ს მნიშვნელობები, მიღებულები ორი ალტერნატული მეთოდით, განსხვავდებოდნენ ერთმანეთისაგან (ნახ. 2.9. ამის მიზეზი შეიძლება იყოს ინტერფეისის ელემენტების ნორმალური და მხები სიხისტის კოეფიციენტების მნიშვნელობები, რომლებიც აღებული იქნა $C_{nn}=C_{ss}=10^8$ კნ/მ^3–ის ტოლი. ეს მნიშვნელობები აღებული იქნა ნაშრომი [28]-დან. მაგალითად, დადგენილი იქნა, რომ ინტერფეისის ელემენტები რიცხობრივად მდგრადია, როდესაც ნორმალური და მხები სიხისტის კოეფიციენტების მნიშვნელობები ტოლია $C_{nn}=C_{ss}=10^8$ კნ/მ^3 –ის, როდესაც ბზარი განთავსებულია ბლოკის შუაში. მიუხედავად ამისა, ძაბვის მაღალი მნიშვნელობები ჩნდება ბზარის წვეროს სიახლოვეს, მაგრამ ეს შეიძლება არ იყოს რეალური. ამის გამო, ანგარიშების შემდეგ ეტაპებზე გადაწყდა გაზრდილიყო C_{nn} და C_{ss} -ს მნიშვნელობები 10^9 კნ/მ^3 -დე.

ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი K_I -ს მნიშვნელობები, რომლებიც გაანგარიშებული იქნა ორივე, გადაადგილების და ძაბვის



ნახ. 2.9: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება.



ნახ. 2.10: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება.

ექსტრაპოლირების მეთოდებით, დაუახლოვდნენ ერთმანეთს როდესაც $C_{nn}=C_{ss}=10^9$ კნ/მ^3.

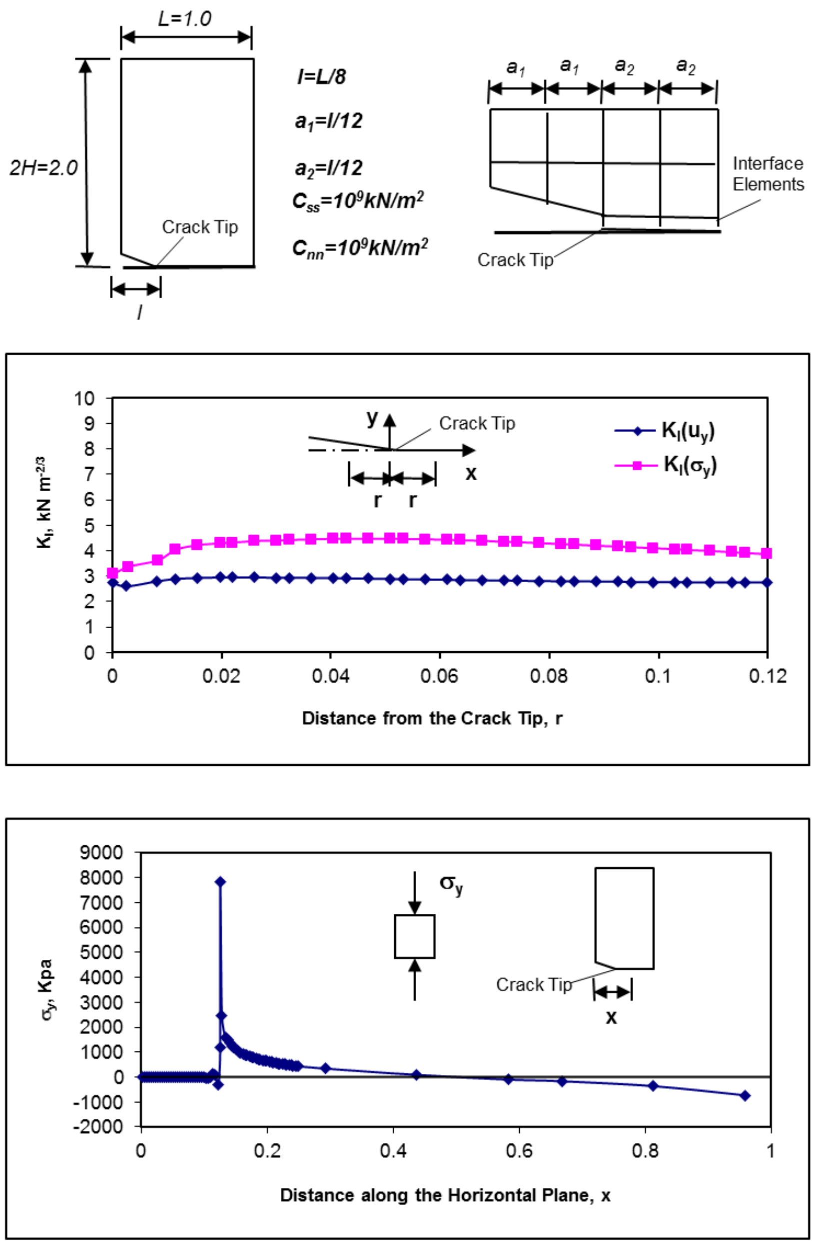
ეს შედეგები კარგად ემთხვევა იმ შედეგებს, რომლებიც მიღებულია 8-კვანძიანი იზოპარამეტრული კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტების გამოყენებისას.

აქედან გამომდინარე, შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ინტერფეისის იზოპარამეტრული კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტები შეიძლება წარმატებით იქნას გამოყენებული დრეკად სხეულებში ბზარების გაჩენისა და გავრცელების დამოდელირების ამოცანებში.

ანგარიშების შემდეგ ეტაპზე ბზარი განთავსდა დრეკადი ბლოკის ფუძეში. ინტერფეისის ელემენტებისთვის ნორმალური და მხები სიხისტის კოეფიციენტები აღებული იქნა $C_{nn}=C_{ss}=10^9$ კნ/მ^3. დაშვებული იქნა, რომ ბზარის სიგრძე არის $l=L/8$, სადაც L არის ბლოკის სიგანე. ანგარიშები დაიწყო $a_1 = a_2 = l/2$ –ის შემთხვევისთვის და ანგარიშების შემდგომ საფეხურებზე სასრული ელემენტების ბადე ხშირდებოდა $a_1 = a_2 = l/3, l/4, l/5, l/6, l/8, l/10$ და $l/12$ -ის მიხედვით (ნახ. 2.11). ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი K_I -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული იქნა ორივე, გადაადგილების და ძაბვის ექსტრაპოლირების მეთოდებით.

მიუხედავად იმისა, რომ ბზარის წვეროსთან საკმაოდ მაღალი სიხშირის მადეა, K_I -ის მნიშვნელობები, რომლებიც მიღებულია ნორმალური u_y გადაადგილებების საშუალებით, აჩვენებს ნაკლებ გაბნევას, ვიდრე ის მნიშვნელობები, რომლებიც მიღებულია ვერტიკალური σ_y ძაბვების საშუალებით. ბზარის წვეროსთან სასრული ელემენტების ბადის სიხშირის თანდათანობითი გაზრდის შემდეგ, ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი K_I -ს მნიშვნელობები უახლოვდება გადაადგილების და ძაბვის ექსრაპოლირების მეთოდებით მიღებულ ანალოგიურ მნიშვნელობებს (ნახ. 2.11).

უნდა აღინიშნოს, რომ სასრული ელემენტების ბადის სიხშირის აუცილებელი ხარისხი, რომელიც საჭიროა მაღალი სიზუსტის შედეგების



ნახ. 2.11: ძაბვის ინტენსივობის K_I ფაქტორის გაანგარიშება.

მისაღებად, უფრო მაღალია, ვიდრე იმ შემთხვევისთვის, როდესაც ბზარი განთავსებულია ბლოკის შუაში. ეს გამოწვეულია ძაბვის უფრო მაღალი მნიშვნელობით ბლოკის ფუძეში.

შეიძლება დავასკვნათ, რომ გადაადგილების ექსტრაპოლირების მეთოდი უფრო უხეში ბადის შემთხვევაშიც კი იძლევა K_I –ის უფრო მისაღებ სიდიდეებს, ვიდრე ძაბვის ექსტრაპოლირების მეთოდი. მიუხედავად ამისა, როდესაც ბზარი განთავსებულია ბლოკის ფუძეში, ბადის სიხშირის აუცილებელი ხარისხი გაცილებით მაღალია, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც ბზარი ბლოკის შუაშია. ეს შედეგები კარგად ემთხვევა იმათ, რომლებიც მიღებულია რვაკვანძიანი იზოპარამეტრული კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტების გამოყენებით. აქედან შეიძლება დავასკვნათ, რომ ინტერფეისის იზოპარამეტრული კვადრატული სინგულარული სასრული ელემენტები წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნან დრეკადი სხეულის ფუძეში ბზარის წარმოშობისა და გავრცელების ამოცანის მოდელირებაში.

3. ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის გავლენა არსებული გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე

გარდა ძირითადი შეთანწყობისა და შესაძლო განსაკუთრებული შეთანწყობის ძალებისა, არსებული კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე შესამჩნევ გავლენას ახდენს ნაგებობის ასაკი და ჰიდროსტატიკური დაწნევის სიდიდის პერიოდული ცვლილება ნაგებობის ექსპლუატაციის ისტორიის განმავლობაში. ამ უკანასკნელში იგულისხმება წყალსაცავის რეგულირების გრაფიკი, რომლის მიხედვითაც წყალსაცავი გარკვეული პერიოდულობით ივსება და იცლება. ბუნებრივია ეს პრობლემა დგას მარეგულირებელი წყალსაცავების შემთხვევაში. ჰიდროსტატიკური დაწნევის ცვლილების გავლენა კაშხლების მუშაობაზე მით უფრო შესამჩნევია, რაც უფრო მაღალია კაშხალი.

არსებული პრობლემა პირველად განხილული იქნა [30, 31] – ში. ჩვენს მიერ მოხდა ამ თეორიის მორგება კონკრეტული ნაგებობითვის. ფაქტიურად ამ ნაშრომში პირველად არის მცდელობა დაყვანილი იქნას თეორიული მოსაზრებები პრაქტიკულ გამოყენებამდე. გარდა ამისა, შეტანილი იქნა გარკვეული კორექტივები პროცესის განმსაზღვრელ განტოლებაში, მასში შემავალი ზოგიერთი კოეფიციენტის დაზუსტების მხრივ.

ქვემოთ მოყვანილია ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში ბეტონის განმსაზღვრელი მოდელის მოდიფიცირების სქემა, რომლის შედეგად შესაძლებელია გათვალისწინებული იქნას ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის (ეიჯინგი) გავლენა გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ყურადღება ძირითადათ გამახვილებულია ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების მნიშვნელობების დამოკიდებულებაზე ზემოდ აღნიშნულ პროცესებზე.

ეს მიდგომა საშუალებას იძლევა მხედველობაში მივიღოთ ბეტონის სიმტკიცის შემცირების ეფექტი (დაღლილობა) ციკლური დატვირთვების დროს, აგრეთვე ასაკის ეფექტი ბეტონის სიმტკიცეზე. კონკრეტულად, ბეტონის სიმტკიცე ერთღერძა კუმშვის დროს σ_c განტოლებებში 2.2, 2.9 და 2.18, შეიძლება შეიცვალოს ბეტონის სიმტკიცით, რომელიც მოდიფიცირებულია დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებისა და კაშხლის ექსპლუატაციის t პერიოდის გათვალისწინებით:

$$\sigma_c = \sigma_c (n, t) \tag{3.1}$$

ფარდობითი ε_c დეფორმაციის მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება ბეტონის მაქსიმალურ ნორმალურ მკუმშავ ძაბვას, შეიძლება მოდიფიცირდეს დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებისა და კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდის t შესაბამისად:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c (n, t) \tag{3.2}$$

ცნობილია აგრეთვე, რომ ციკლური დატვირთვა იწვევს ბეტონის სიხისტის შემცირებას. ამავე დროს, დროთა განმავლობაში დრეკადობის მოდული იზრდება. ეს ორი ეფექტი მიიღება მხედველობაში შემოთავაზებულ მიდგომაში ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდულის მოდიფიცირებით დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლების კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდის t შესაბამისად:

$$E_0 = E_0 (n, t) \tag{3.3}$$

ციკლური დატვირთვები. ციკლური დატვირთვა იწვევს ნაგებობის მნიშვნელოვან არაწრფივ მუშაობას და მასალის მექანიკური მახასიათებლების საგრძნობ ცვლილებას. შედეგად ვღებულობთ იმას, რომ

დატვირთვა-განტვირთვის (წყალსაცავის ავსება-დაცლა) ციკლების რიცხვის გაზრდის შედეგად საგრძნობლას მცირდება ბეტონის მექანიკური მახასიეთებელი – დრეკადობის მოდული.

ნაშრომში ვეყრდნობით იმ ემპირიკულ დამოკიდებულებებს, რომლებიც მიღებული იყო ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად და გამოქვეყნებულია [32]–ში. ექსპერიმენტები ჩატარდა ენგურის თაღოვანი კაშხლიდან ამოღებულ ბეტონის ნიმუშებზე, რომლებიც პერიოდულად იტვირთებოდა-განიტვირთებოდა ნელი ციკლური მკუმშავი დატვირთვებით. ცდების შედეგების ინტერპოლირების შემდეგ, შედგა ქვემოდ მოყვანილი დამოკიდებულებები, რომლებიც აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების გაუარესების პროცესს დატვირთვა-განტვირთვის ციკლებთან დამოკიდებულებაში.

$$\begin{aligned} \sigma_c(n) &= (1 - a_\sigma^n \lg n)\sigma_c \\ E_0(n) &= (1 - a_E^n \lg n)E_0 \\ \varepsilon_c(n) &= (1 - a_\varepsilon^n \lg n)\varepsilon_c \end{aligned} \tag{3.4}$$

სადაც a_σ^n, a_E^n და a_ε^n პარამეტრები აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების გაუარესების პროცესს ციკლური დატვირთვების დროს. n არის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობა, რომელიც შეესაბამება კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდში წყალსაცავის ავსება-დაცლის ციკლების რაოდენობას.

გამოკვლევებმა დაგვანახა, რომ ზემოდ მოყვანილი პარამეტრების მნიშვნელობები შეიძლება იცვლებოდეს გარკვეულ ფარგლებში ბეტონის სხვადასხვა კლასისათვის და მათი კონკრეტული მნიშვნელობები შეიძლება მიღებული იქნას მხოლოდ ბეტონის ნიმუშების ციკლურ დატვირთვებზე გამოცდის შედეგად. კონკრეტულად, ხსენებული პარამეტრების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ დიაპაზონებში:

$$0{,}05 \le a_{\sigma}^{n} \le 0{,}25$$
$$0{,}10 \le a_{E}^{n} \le 0{,}30 \qquad (3.5)$$
$$0{,}10 \le a_{\varepsilon}^{n} \le 0{,}30$$

ამ ნაშრომში გამოყენებილია [32]-ში მოყვანილი კონკრეტული რიცხვითიო მნიშვნელობები. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ მასალის პარამეტრების გაუარესების მაჩვენებელი და ბეტონის სიმტკიცე პირდაპირ დამოკიდებულია ძაბვით მდგომარეობაზე, ე.ი. ბეტონის ნიმუშის დატვირთვის სიდიდეზე. მაგალითად, ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 51,5% -ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ, როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2σ_c–ის, სადაც σ_c არის ბეტონის სიმტკიცე ერთღერძა კუმშვის დროს.

როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.5σ_c–ის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 29,3% -ით (33390-დან 23620 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.8σ_c–ის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 20,9% -ით (28390-დან 22500 მპა-დე) იგივე რაოდენობის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ.

ნაშრომში ჩვენ გამოვიყენეთ ზემოდ მოყვანილი კოეფიციენტების გასაშუალოებული მნიშვნელობები, რომლების კარგად აღწერენ ნაგებობის რეალურ მუშაობას ციკლური დატვირთვების დროს.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მასალის მახასიათებლების და ბეტონის სიმტკიცის გაუარესების ხარისხი სტატიკური ციკლური დატვირთვების დროს დამოკიდებულია აგრეთვე გამოსაცდელი ბეტონის ნიმუშის ასაკზე. მაგალითად, 28 დღის ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 51,5%-ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან

გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2σ_c –ის. ამავე დროს, 365 დღის (1 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 49,0%-ით (39830-დან 21750 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2σ_c –ის. 1825 დღის (5 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა შემცირდა 42,0%-ით (42460-დან 20310 მპა-დე) იგივე რაოდენობის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლი იყო 0.2σ_c –ის. ეს მონაცემები მიუთითებს სხვაობა არ არის მნიშვნელოვანი და პრაქტიკული მიზნებისათვის ეს შეიძლება იგნორირებული იყოს.

<u>მასალის ასაკი (ეფექტი)</u>. ანალოგიური მიდგომა იქნა გამოყენებული ბეტონის ასაკის გავლენის შესასწავლად გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების დროში ცვლილების დასადგენად კვლავ გამოყენებული იქნა ლოგარითმული ფუნქცია. ეს დამოკიდებულებები შეიძლება შემდეგნაირად ჩაიწეროს:

$$\begin{aligned} \sigma_c(t) &= (1 + a_\sigma^t \lg t)\sigma_c \\ E_0(t) &= (1 + a_E^t \lg t)E_0 \\ \varepsilon_c(t) &= (1 + a_\varepsilon^t \lg t)\varepsilon_c \end{aligned} \tag{3.6}$$

სადაც a_σ^t, a_E^t და a_ε^t პარამეტრები აღწერენ ბეტონის მახასიათებლების ცვლილების პროცესს ბეტონის ასაკთან დამოკიდებულებაში. t არის წლების რაოდენობა, რომელიც შეესაბამება კაშხლის ექსპლუატაციის პერიოდს.

გამოკვლევებმა დაგვანახა, რომ ზემოდ მოყვანილი პარამეტრების მნიშვნელობები შეიძლება იცვლებოდეს გარკვეულ ფარგლებში ბეტონის სხვადასხვა კლასისათვის და მათი კონკრეტული მნიშვნელობები

შეიძლება მიღებული იქნას მხოლოდ არსებული ნაგებობიდან სხვადასხვა ასაკის ბეტონის ნიმუშების გამოცდის შედეგად. კონკრეტულად, ხსენებული პარამეტრების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ დიაპაზონებში:

$$
\begin{aligned}
0{,}05 \le a_\sigma^t &\le 0{,}15 \\
0{,}05 \le a_E^t &\le 0{,}15 \qquad (3.7) \\
0{,}05 \le a_\varepsilon^t &\le 0{,}10
\end{aligned}
$$

პარამეტრების აღნისნული მნიშვნელობები მოცემულია [32]-ში და ისინი მიღებულია ენგურის კაშხლიდან სხვადახვა პერიოდში ამოღებული ნიმუშების გამოცდას. კარგად ჩანს, რომ a_σ^t, a_E^t და a_ε^t პარამეტრების მნიშვნელობები ზოგადად ნაკლებია a_σ^n, a_E^n და a_ε^n - მნიშვნელობებზე. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ ასაკის გავლენა ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციების მრუდზე ნაკლებია, ვიდრე ციკლური დატვირთვების. მიუხედავად ამისა, აღსანიშნავია, რომ შესაძლებელია არსებობდეს ექსპლუატაციის წლების და ციკლების რაოდენობის სხვადასხვა კომბინაციები. მაგალითად, ექსპლუატაციის პერიოდში წყალსაცავი იცლება და ივსება წელიწადში ერთხელ, მაშინ ციკლების რაოდენობა ემთხვევა ექსპლუატაციის წლების რაოდენობას (n=t), მაგრამ, თუ ციკლი წელიწადში ორჯერ ხდება, მაშინ ციკლების რაოდენობა ექსოლუატაციის წლებზე ორჯერ მეტია (n=2t).

ბეტონის ზემოდ მოყვანილი მექანიკური მახასიათებლები ჩართული არიან (2.1) კონსტიტუციურ განტოლებაში, რათა შესწავლილი იქნად ბეტონის გადაღლა ციკლური დატვირთვებისა და ასაკის გავლენის შედეგად.

- *ანალიზის შედეგები*

ანალიზებში ბეტონის ასაკის ეფექტი შესწავლილი იქნა ციკლურ ზემოქმედებებთან ერთად. ანალიზის მიზანი იყო დადგენილიყო, თუ როგორ იცვლებოდა ბეტონის მექანიკური მახასიათებლები ბეტონის

ასაკთან და ნელ სტატიკურ ციკლურ დატვირთვებთან ერთად და რა გავლენას ახდენს ისინი ბეტონის ძაბვა-დეფორმაციების მრუდზე ბრტყელი დეფორმაციის და ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის ფარგლებში. ანალიზები ჩატარდა კუმშვა-კუმშვისა და კუმშვა-გაჭიმვის დატვირთვებისათვის. გაჭიმვა-გაჭიმვის ვარიანტისათვის დაშვებულია, რომ ის აღწერს წრფივად პროცესს და სიმტკიცე გაჭიმვაზე იცვლება კუმშვაზე სიმტკიცის პროპორციულად.

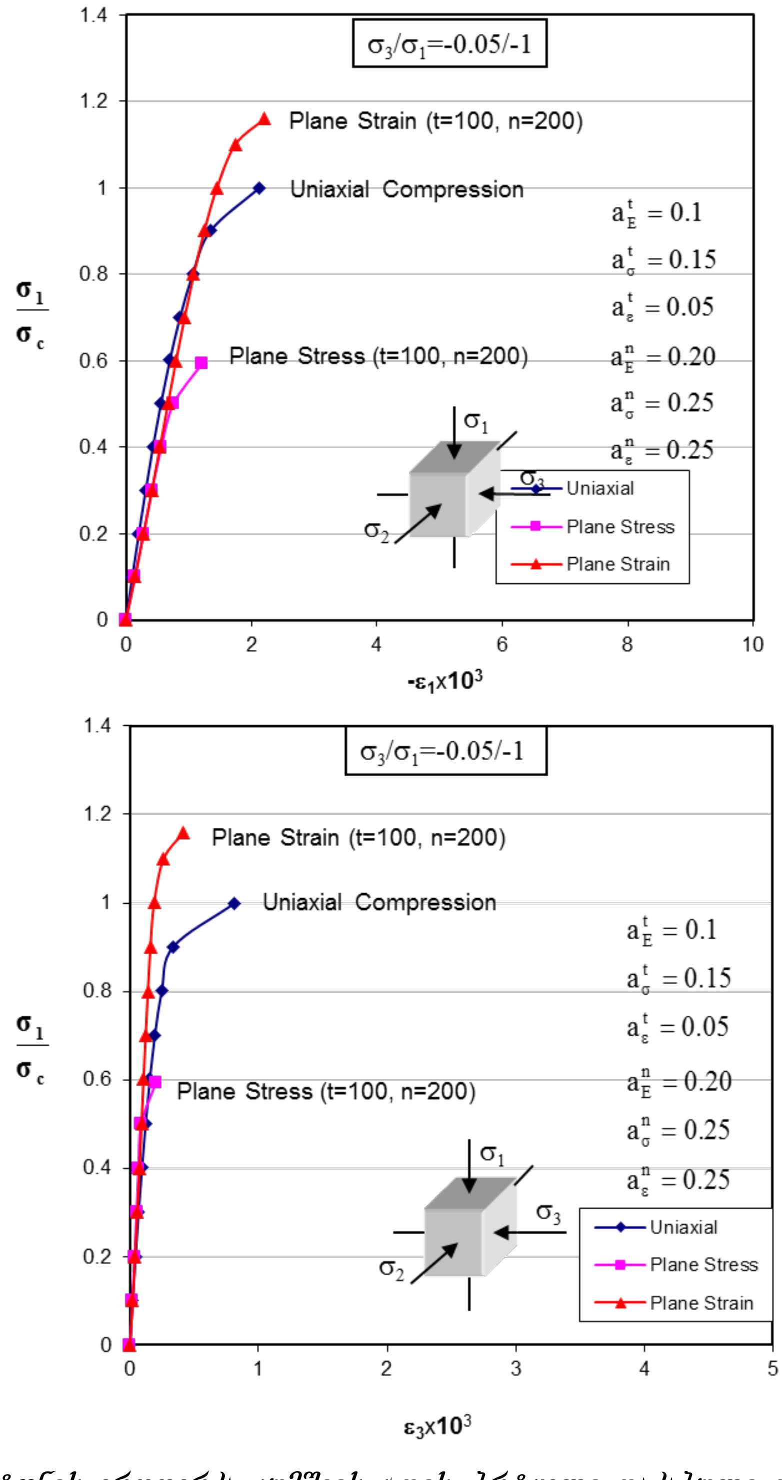
ჯამში ჩატარდა 200-დე კომპიუტერული ანგარიშები α-ს სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის (α არის მინიმალური მთავარი მიმართულების დროს ძაბვის მნიშვნელობის ფარდობა და მაქსიმალური მთავარი მიმართულების დროს არსებულ ძაბვასთან), როდესაც t=0, 10, 25, 50 და 100, აგრეთვე როდესაც n = t და n = 2t.

ნახ. 3.1 – 3.4 –ზე მოცემულია ანალიზის შედეგები დატვირთვის სხვადასხვა ფორმების დროს. ზოგადად რიცხვითმა ანგარიშებმა აჩვენა, რომ მასალის მექანიკური მახასიათებლების მნიშვნელოვანი შემცირება ხდება უკვე მაშინ, როდესაც n=10.

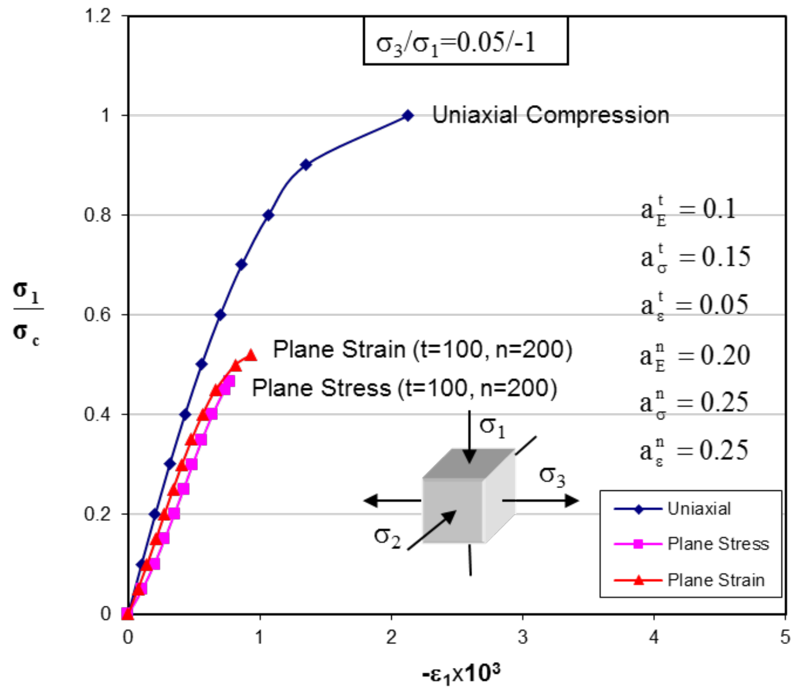
ზოგადი დასკვნა შეიძლება გაკეთდეს შემდეგნაირი: ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების გაუარესების ხარისხი იზრდება დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლების გაზრდასთან ერთად. ბეტონის ასაკს აქვს გარკვეული დადებითი ეფექტი ბეტონის მექანიკური მახასიათებლებზე, მაგრამ მათი გაუარესების ხარისხი ორივე ხსენებული ფაქტორის ერთობლივი მოქმედების დროს კვლავ რჩება მნიშვნელოვანი. მაგალითად, როდესაც $\alpha = -0{,}15$, t=100 and n=200, ნიმუში ირღვევა და ჩნდება ბზარი ბრტყელი დეფორმაციის მდგომარეობის შემთხვევაში, როდესაც მკუმშავი ძაბვა უტოლდება ერთღერძა კუმშვის დროს ბეტონის სიმტკიცის დაახლოებით 20%-ს.

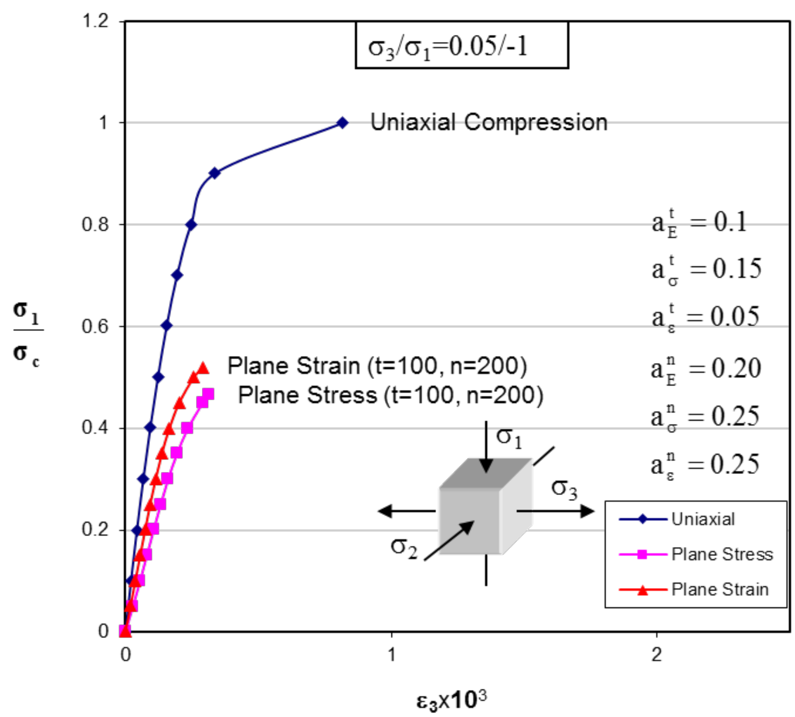
3.1. ეტაპი R-4: ციკლური დატვირთვებისა და ბეტონის ასაკის გავლენა ინტერფეისებზე

ძვრის ცდებიდან, რომლებიც ითვალისწინებენ აგრეთვე სტატიკურ ციკლურ დატვირთვებს, მხები ძაბვები-ფარდობითი გადაადგილებების მრუდების მიღება საკმაოდ რთულია. ამიტომ ვეყრდნობით წინა პარაგრაფში მოყვანილ ციკლური დატვირთვებისა და ბეტონის ასაკის გავლენის რიცხვით შეფასებებს უშუალოდ კაშხლის ტანში. შეიძლება დავასკვნათ, რომ დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების დიდ რაოდენობა შეამცირებს ინტერფეისების სიმტკიცეს.

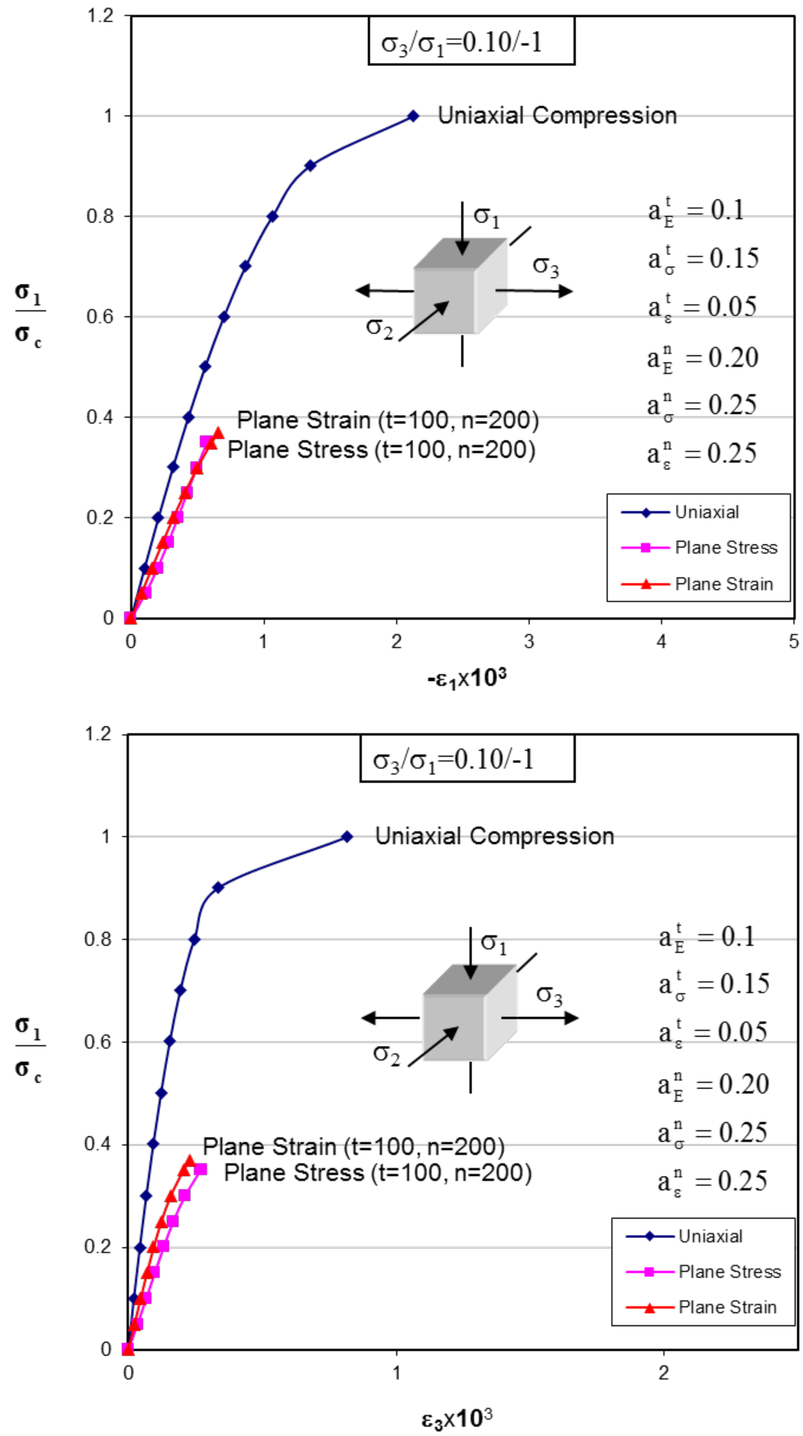


ნახ. 3.1: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (კუმშვა-კუმშვა) **n** *ციკლებისა* **t** *ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც* **α=0,05.**

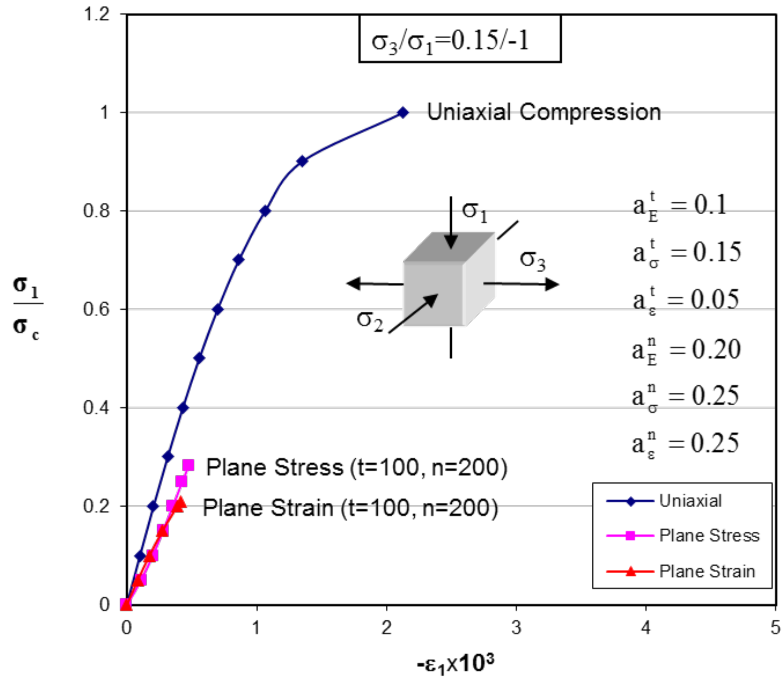


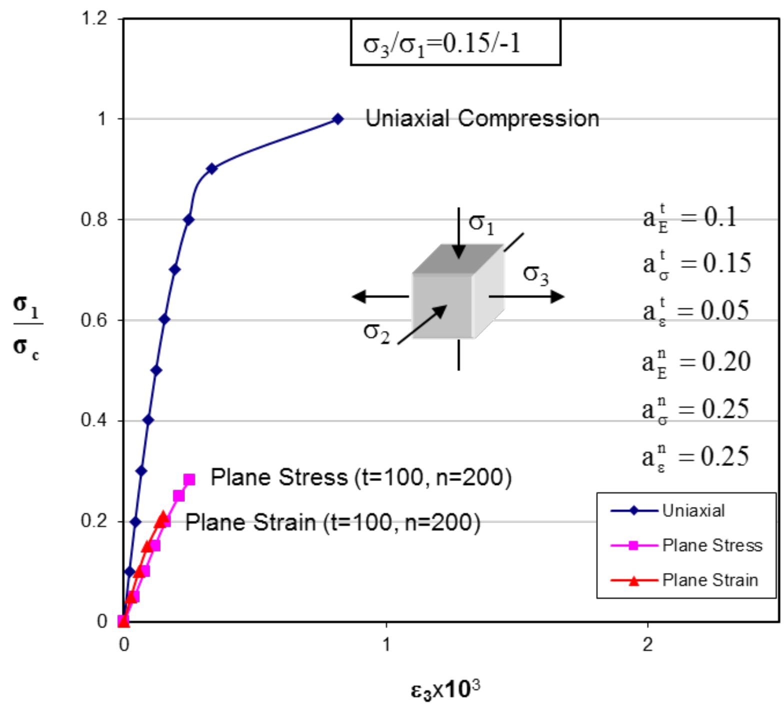


ნახ. 3.2: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) **n** *ციკლებისა* **t** *ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც* α= **- 0,05.**



ნახ. 3.3: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) n ციკლებისა t ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც α= - 0,10.





ნახ. 3.4: ბეტონის ერთღერძა კუმშვის ცდის, ბრტყელი დაძაბული და ბრტყელი დეფორმაციების შედეგების შედარება (გაჭიმვა-კუმშვა) **n** *ციკლებისა* **t** *ასაკის მხედველობაში მიხედვით, როდესაც* α= **- 0,15.**

ციკლური დატვირთვის გავლენა k_s^0 ძვრის სიმტკიცეზე შეიძლება გათვალისწინებული იქნას საწყისი ძვრის სიხისტის მოდიფიკაციის გზით $\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0}$ ნულოვანი ნორმალური ძაბვასთან დამოკიდებულებაში. წინა პარაგრაფის ანალოგიურად, შეიძლება გამოვიყენოთ შემდეგი ემპირიკული დამოკიდებულება ნულოვან ნორმალურ ძაბვასთან ასოცირებული $\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0}$ საწყისი ძვრის სიხისტის სიდიდის ვარდნის დასადგენად. დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებთან დამოკიდებულებით ხსენებული დამოკიდებულება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0} = (1-a_k^n \lg n)\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0} \tag{3.8}$$

სადაც:

a_k^n - პარამეტრი, რომელიც აღწერს ნულოვან ნორმალურ ძაბვასთან ასოცირებული საწყისი ძვრის სიხისტის სიდიდის ვარდნას სტატიკური ციკლური დატვირთების დროს;

n - კაშხლის ექსპლუატაციის შესაბამისი დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობა.

სტატიკური ციკლური დატვირთების შედეგად ინტერფეისებში ძვრის სიმტკიცის ვარდნა შეიძლება გათვალისწინებული იქნას c შეჭიდულობის სიდიდის მოდიფიცირებით (2.30) გამოსახულებაში. ძვრის სიმტკიცის ვარდნა დატვირთვა-განტვირთვის n ციკლებთან დამოკიდებულებში შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ემპირიკული დამოკიდებულებიდან:

$$\tau_c = c(1-a_\tau^n \lg n) + \sigma_n \tan\phi \tag{3.9}$$

სადაც:

a_τ^n - პარამეტრი, რომელიც აღწერს შეჭიდულობის სიდიდის ვარდნას სტატიკური ციკლური დატვირთების დროს;

ზემოდ ნახსენები კოეფიციენტები იცვლება შემდეგ ფარგლებში:

$$\begin{aligned} 0{,}10 \le a_\tau^n \le 0{,}25 \\ 0{,}15 \le a_k^n \le 0{,}30 \end{aligned} \qquad (3.10)$$

ბეტონის ასაკი გათვალისწინებული იქნა ანალოგიური გზით. კერძოდ, ნულოვან ნორმალურ ძაბვასთან ასოცირებული საწყისი ძვრის სიხისტის სიდიდის ვარდნის განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0} = (1 + a_k^t \lg t)\left(k_s^0\right)^{\sigma_n=0} \qquad (3.11)$$

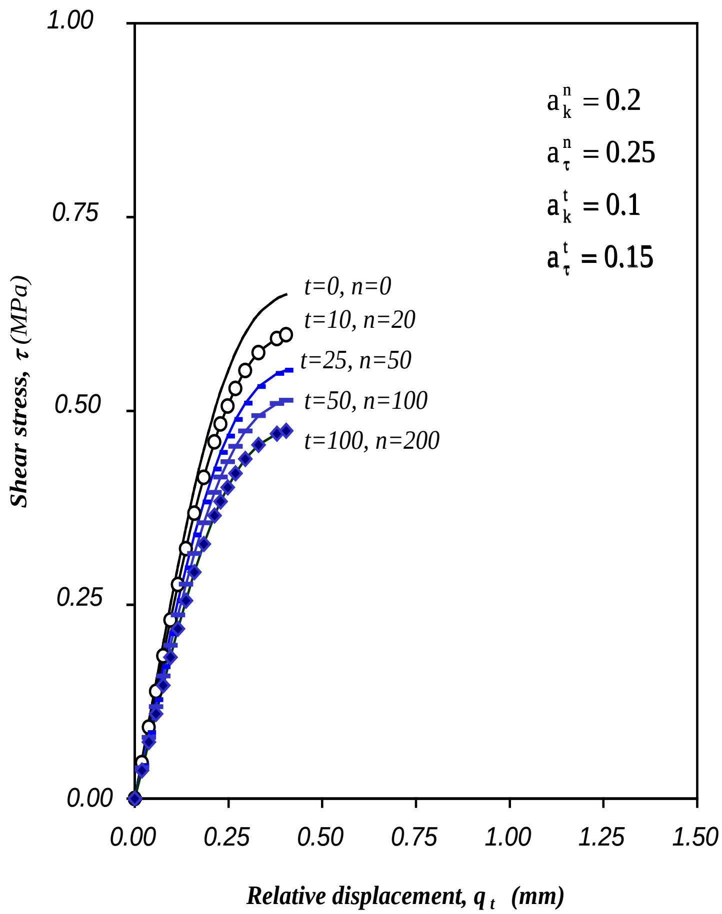
ინტერფეისებში ძვრის სიმტკიცეზე ასაკის გავლენა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\tau_c = c(1 + a_\tau^t \lg t) + \sigma_n \tan\phi \qquad (3.12)$$

შესაბამისი კოეფიციენტების მნიშვნელობები იცვლება შემდეგ ფარგლებში:

$$\begin{aligned} 0{,}05 \le a_\tau^t \le 0{,}15 \\ 0{,}10 \le a_k^t \le 0{,}20 \end{aligned} \qquad (3.13)$$

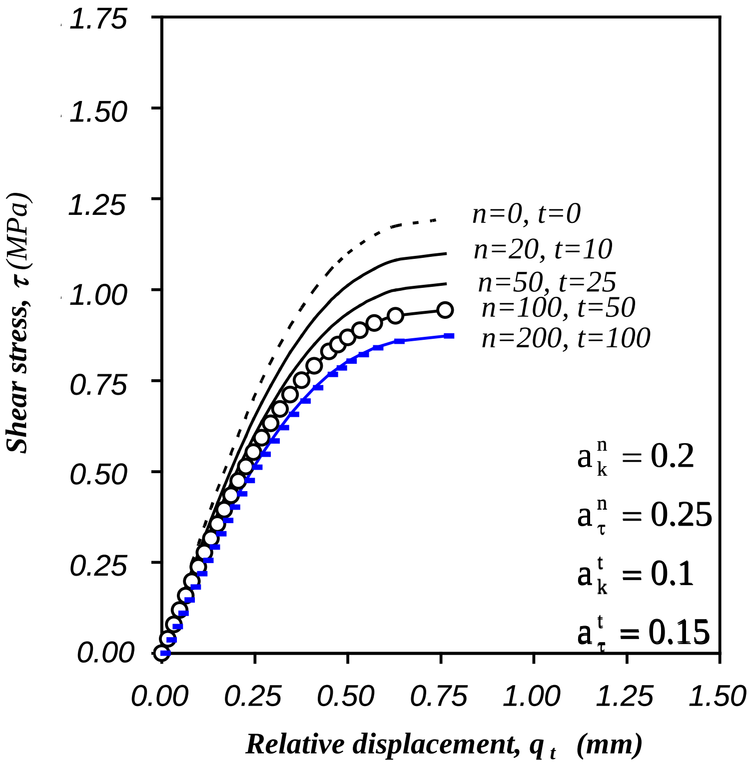
ანგარიშების რამოდენიმე შედეგი მოცემულია ნახ. 3.5 – 3.6-ზე. ისინი ციკლური დატვირთვების და ბეტონის ასაკის გავლენას ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილებების მრუდებზე. ცხადად ჩანს, რომ ციკლური დატვირთვები იწვევენ საკონტაქტო კავშირების მასალის მახასიათებლების მნიშვნელოვან ვარდნას. აქედან გამომდინარე, სადაც შესაძლებელია, უნდა მიმდინარეობდეს მონიტორინგ, რათა მისი მასალები გამოყენებული იქნას ზემოდ მოყვანილი პარამეტრების მოდიფიცირებისათვის არსებულ მდგომარეობასთან შესაბამისად.



σ_n =3.08 kg/sm^2
c =3.1 kg/sm^2
tanϕ =1.1
k_{so} =230.0 kg/cm^3
a=10.0 kg/sm^3
n=1
P_a =1.033 kg/cm^2

$$A = \frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right)^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right) + \frac{4}{3}$$

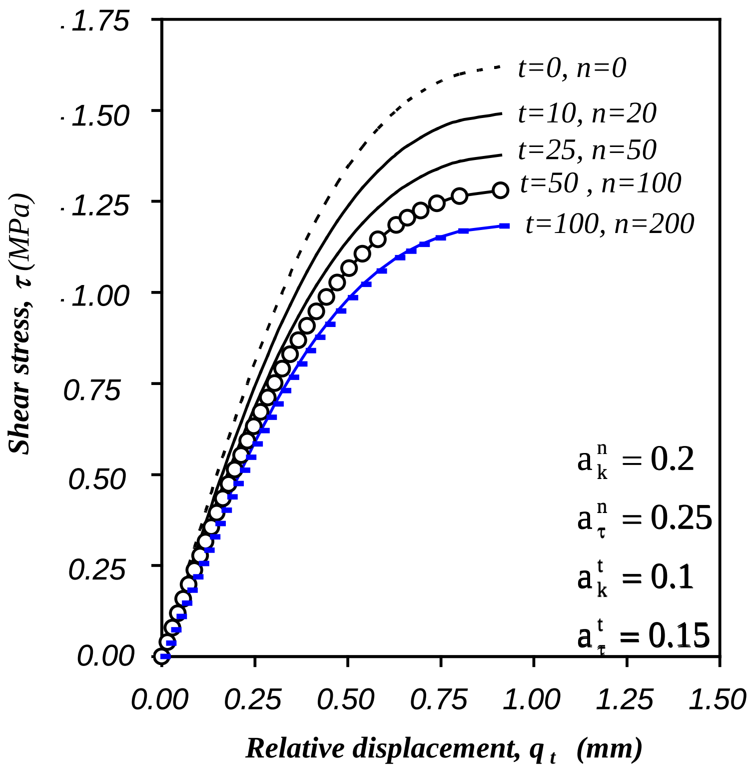
ნახ. 3.5: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითი გადაადგილების მრუდები ცვალებადი **A** *პარამეტრის შემთხვევებში* **n** *დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობასთან და* **t** *ბეტონის ასაკთან კავშირში.*



$\sigma_n = 8.01$ kg/sm^2
$c = 3.1$ kg/sm^2
$\tan\phi = 1.1$
$k_{so} = 230.0$ kg/cm^3
$a = 10.0$ kg/sm^3
$n = 1$
$P_a = 1.033$ kg/cm^2

$$A = \frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c + \sigma_n \tan\phi}\right)^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c + \sigma_n \tan\phi}\right) + \frac{4}{3}$$

*ნახ. 3.6: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითიგადაადგილების მრუდები ცვალებადი **A** პარამეტრის შემთხვევებში **n** დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობასთან და **t** ბეტონის ასაკთან კავშირში.*



$\sigma_n = 11.89$ kg/sm^2

$c = 3.1$ kg/sm^2

$\tan\phi = 1.1$

$k_{so} = 230.0$ kg/cm^3

$a = 10.0$ kg/sm^3

$n = 1$

$P_a = 1.033$ kg/cm^2

$$A = \frac{1}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right)^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{\sigma_n}{c+\sigma_n \tan\phi}\right) + \frac{4}{3}$$

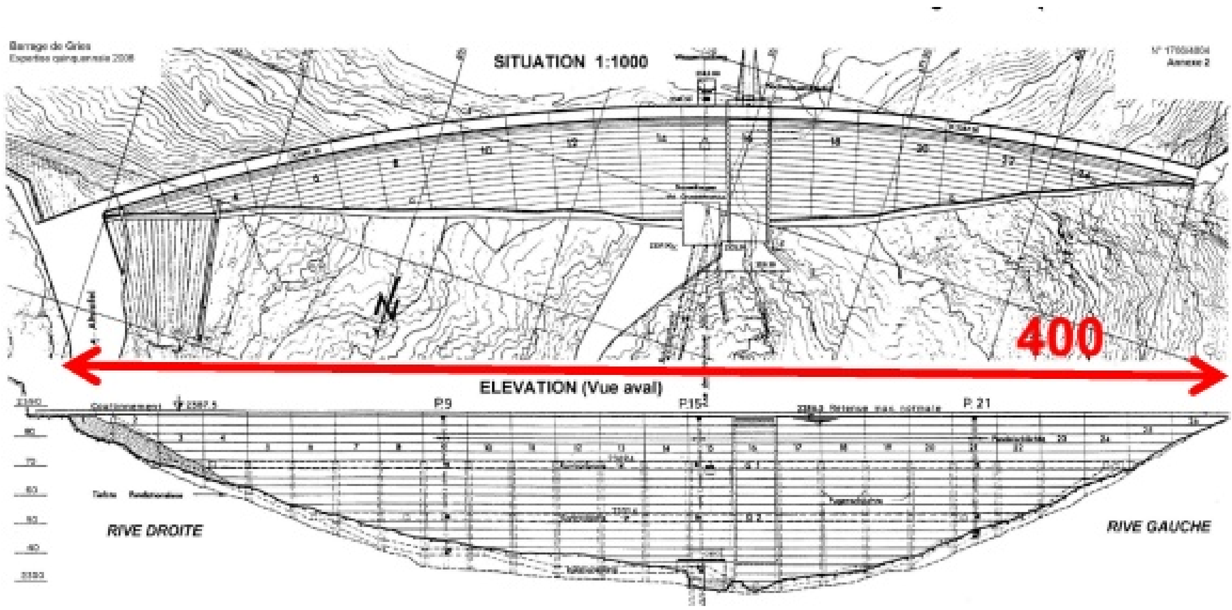
*ნახ. 3.7: ბეტონსა და კლდეს შორის ინტერფეისში მხები ძაბვა-ფარდობითიგადაადგილების მრუდები ცვალებადი **A** პარამეტრის შემთხვევებში **n** დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობასთან და **t** ბეტონის ასაკთან კავშირში.*

4. სტატიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა გრეისის გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე

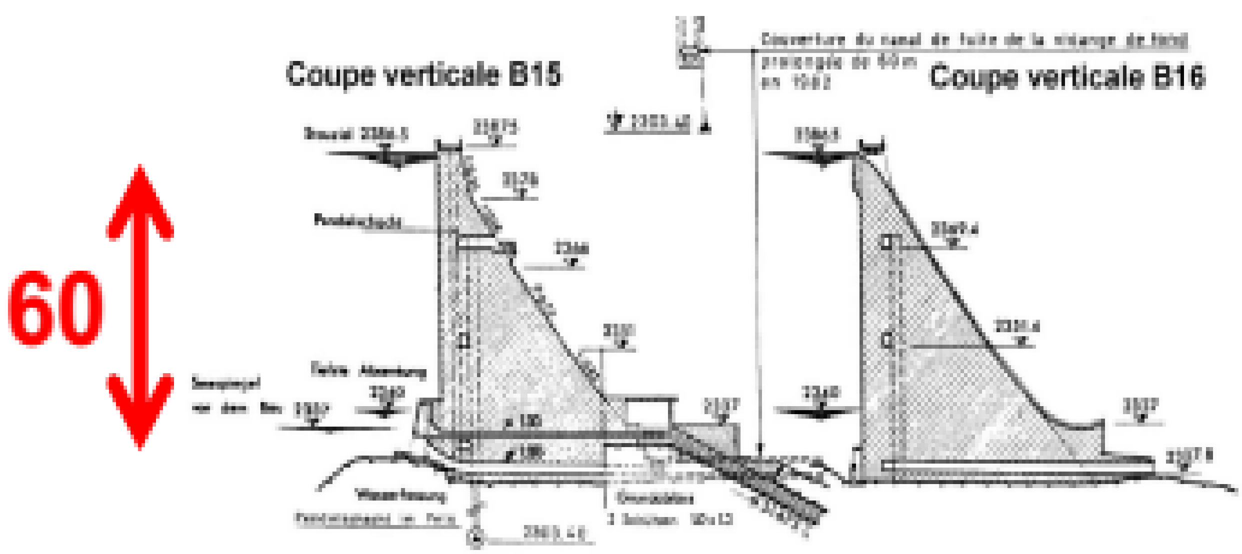
4.1. საწყისი მონაცემები

ზემოდ აღწერილი მეთოდიკა აპრობირებული იქნა 60 მ სიმაღლის გრეისის (Greis) გრავიტაციული კაშხლის საანგარიშოდ, რომელიც მდებარეობს ვალაისის (Valais) კანტონში (შვეიცარია). ის ექსპლუატაციაში შევიდა 1965 წელს და დღემდე ქმნის ენერგეტიკული დანიშნულების წყალსაცავს[1]. კაშხლის ადგილმდებარეობა და ზოგიერთი გეომეტრიული პარამეტრიც მოცემულია ნახ. 4.1, 4.2 და 4.3-ზე.

ნახ. 4.1: გრეისის კაშხალი და მისი ადგილმდებარეობა.



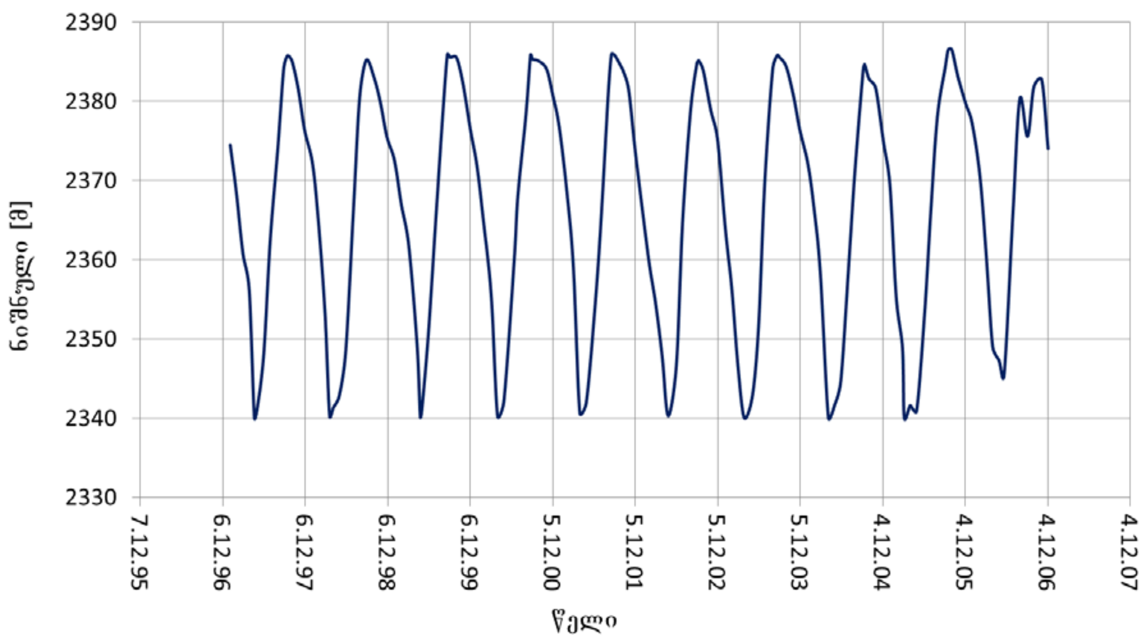
ნახ. 4.2: გრეისის კაშხალი (გეგმა და ხედი ქვედა ბიეფიდან).



ნახ. 4.3: გრეისის კაშხლის ცენტრალური (B15 და B16 ბლოკები) განივი ჭრილები.

წყალსაცავი ძირითადათ იკვებება გრეისის მყინვარის დნობით. მყინვარი მდებარეობს შვეიცარიისა და იტალიის საზღვარზე და მისი სიგრძე დაახლოებით 5 კმ-ია, ხოლო ფართობი - 5.26 კმ^2 (2008 წლის მონაცემების თანახმად). ამასთანავე, საინტერესოა ის ფაქტიც, რომ რეზერვუარის სრული შევსების დროს, ნორმალური შეტბორვის დონე (ნშდ) აღწევს 2386 მეტრ ნიშნულს, რომელიც ყველაზე მაღალია შვეიცარიაში არსებულ წყალსაცავებს შორის.

გრეისის კაშხალი ქმნის სეზონური რეგულირების ენერგეტიკულ წყალსაცავს, რომლის სრული მოცულობა შეადგენს 18.6 მლნ. მ^3, ხოლო სარკის ზედაპირის ფართობი – 0.5 კმ^2. წყალსაცავის ავსება-დაცლა ხდება წელიწადში ერთხელ. ამ ციკლების ტიპური გრაფიკი მოცემულია ნახ. 4.4 –ზე.



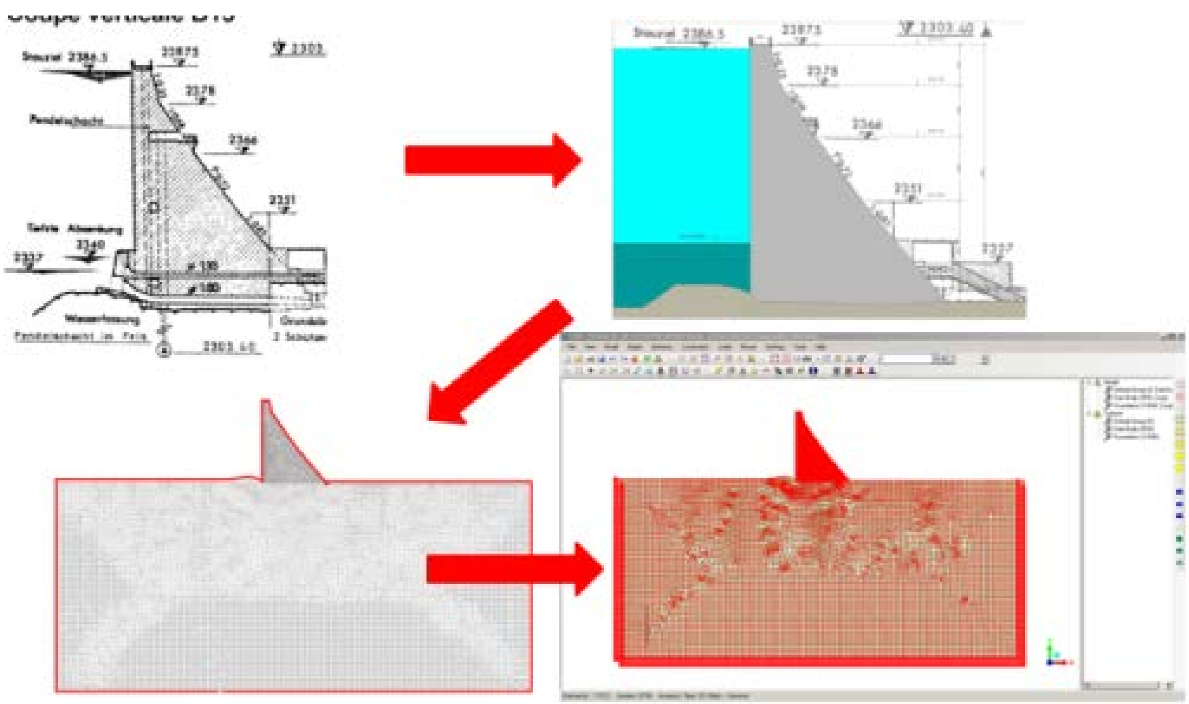
ნახ. 4.4: გრეისის კაშხლის წყალსაცავის ავსება-დაცლის გრაფიკი (1996-2006 წლები).

კაშხალს აქვს ვერტიკალური სადაწნეო წახნაგი, ხოლო უდაწნეო წახნაგის დახრა იცვლება 0,68-დან 0,85-ის ფარგლებში, კაშხლის ზედა ნაწილის დახრა (ზღვის დონიდან ∇ 2387,5 –სა და ∇2378,0 მ-ს შორის)

ტოლია 0,25-ის. კაშხლის ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდული E_i =20000 მპა (2*0[6] ტ/მ[2]), პუასონის კოეფიციენტი – $\nu = 0{,}2$ და სიმკვრივე – $\gamma = 2{,}55$ ტ/მ^3. კაშხალი აგებულია ერთგვაროვან კლდოვან ფუძეზე. მისი დრეკადობის მოდული E_f = 10000 მპა (1*10^6 ტ/მ^2), პუასონის კოეფიციენტი – $\nu_f = 0{,}2$ სიმკვრივე – $\gamma_f = 2.55$ ტ/მ^3.

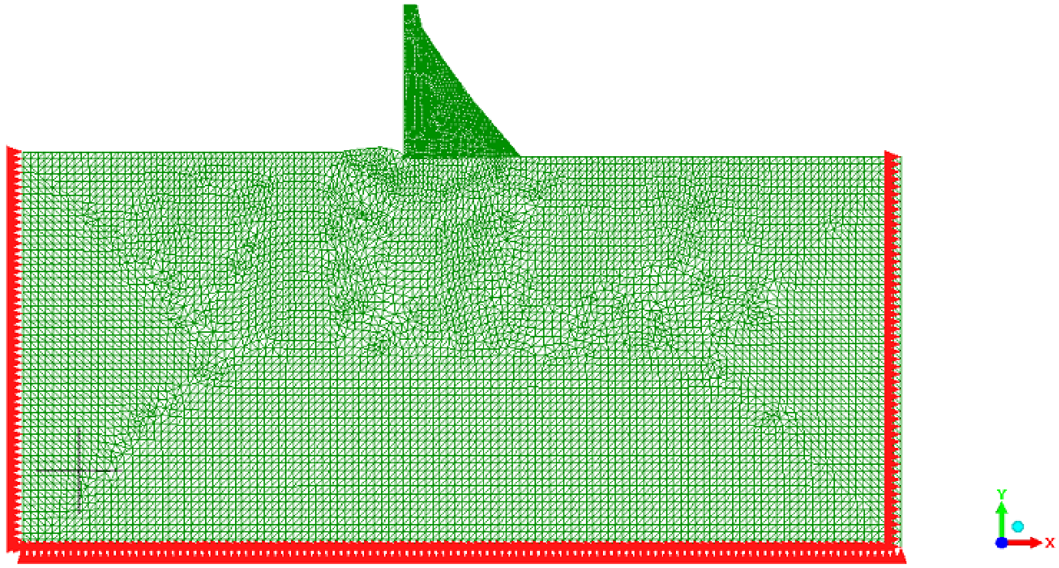
საანგარიშოდ გამოყენებული იქნა პროგრამა LISA 8.0.0. საანგარიშო სისტემის "გრეისის კაშხალი – ფუძე" ბადის სამკუთხა ელემენტების რაოდენობა არის 17022, ხოლო კვანძების – 8790.

შერჩეული იქნა ბლოკ B15-ის განივი კვეთი, რომლის ტრანსფორმაცია სასრული ელემენტების საანგარიშო სქემად მოცემულია ნახ. 4.5-ზე.



ნახ. 4.5: ბლოკ B15-ის და მისი ფუძის სანგარიშო სქემად შერჩევის თანმიმდევრობა.

ნახ. 4.6-ზე მოცემულია თვით საანგარიშო სისტემის სასრულელემენტოვანი სქემა.



ნახ. 4.6: სასრული ელემენტების მეთოდით სანგარიშო სისტემა “გრეისის კაშხალი – ფუძე”.

ნახ. 4.7-ზე მოცემულია საანგარიშო სისტემიდან ამოღებული ფრაგმენტი – თვით კაშხალი და ფუძის ნაწილი.

სტატიკური ციკლური დატვირთებისა და ბეტონის ასაკის გავლენის შესასწავლად თავდაპირველად საჭიროა სისტემის დაძაბულ დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიში კაშხლის ბეტონის საწყისი (საპროექტო) მექანიკური მახასიათებლების გამოყენებით.

რეალიზებული იქნა შემდეგი საანგარიშო სქემები, როდესაც სისტემაზე მოქმედებს:

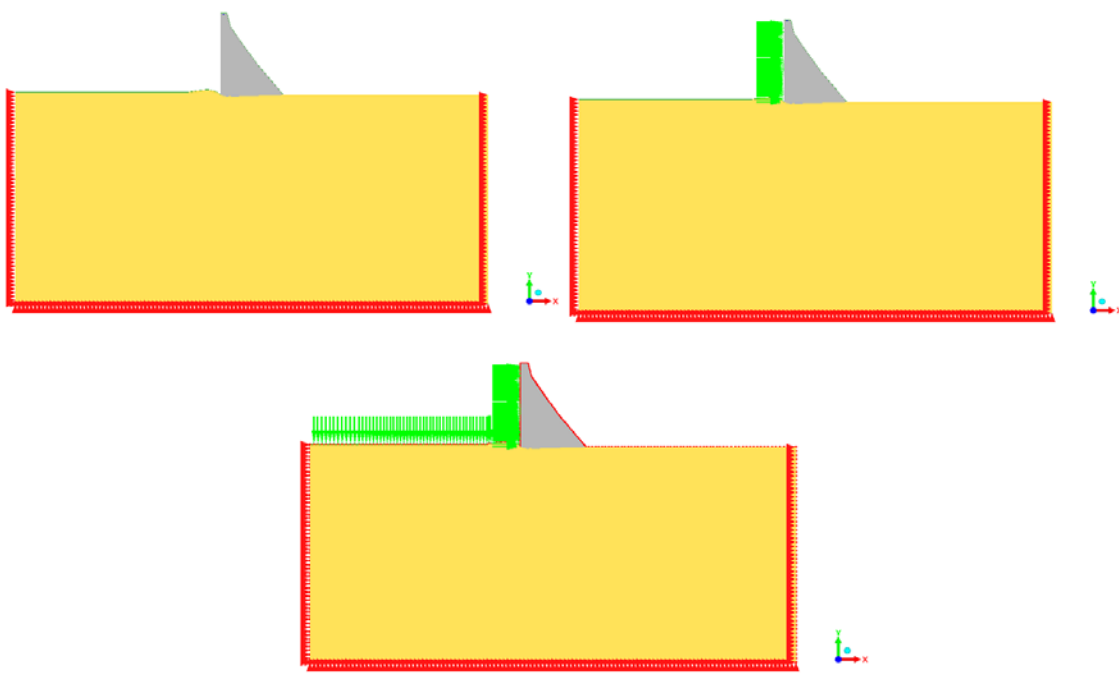
1. მხოლოდ კაშხლის საკუთარი წონა;
2. საკუთარიწონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე;
3. საკუთარიწონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე;
4. საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა

წყალსაცავის ფუძეზე ბეტონის მოდიფიცირებული მექანიკური მახასიათებელის (დრეკადობის მოდული) მხედველობაში მიღებით, რომელიც ითვალისწინებს ციკლური დატვირთვების გავლენას ბეტონის თვისებებზე;

5. საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფუძეზე ბეტონის მოდიფიცირებული მექანიკური მახასიათებელის (დრეკადობის მოდული) მხედველობაში მიღებით, რომელიც ითვალისწინებს კაშხლის გავლენას ბეტონის თვისებებზე;

ყველა ამ შემთხვევისათვის გაანგარიშებული იქნა გადაადგილებები, ფარდობითი დეფორმაციები, ძაბვის კომპონენტები, მთავარი ძაბვები და მათი მიმართულებები როგორც ბადის ელემენტებში, ასევე კვანძებში.

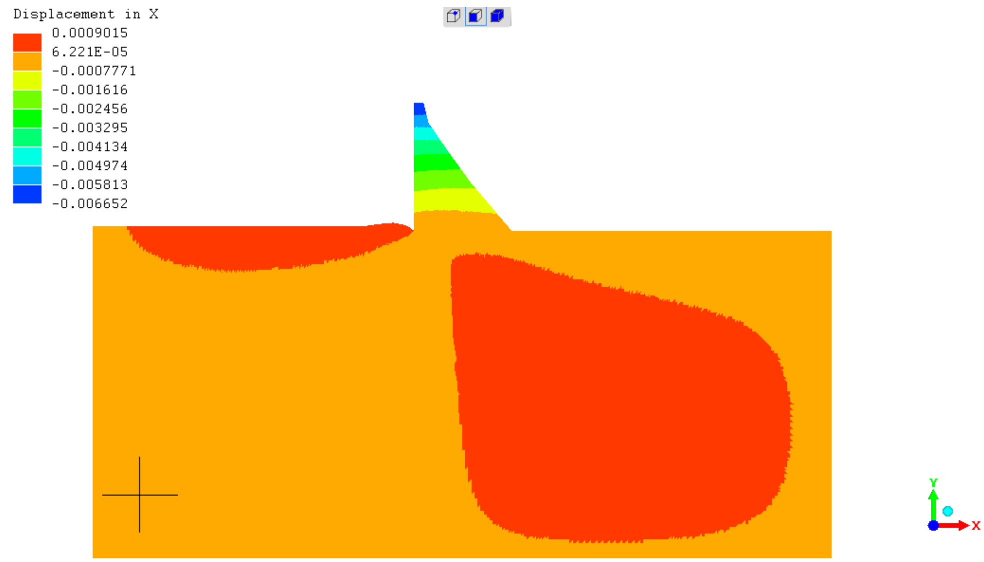
ნახ. 4.7-ზე მოცემულია ამ საანგარიშო შემთხვევების ძირითადი სქემები



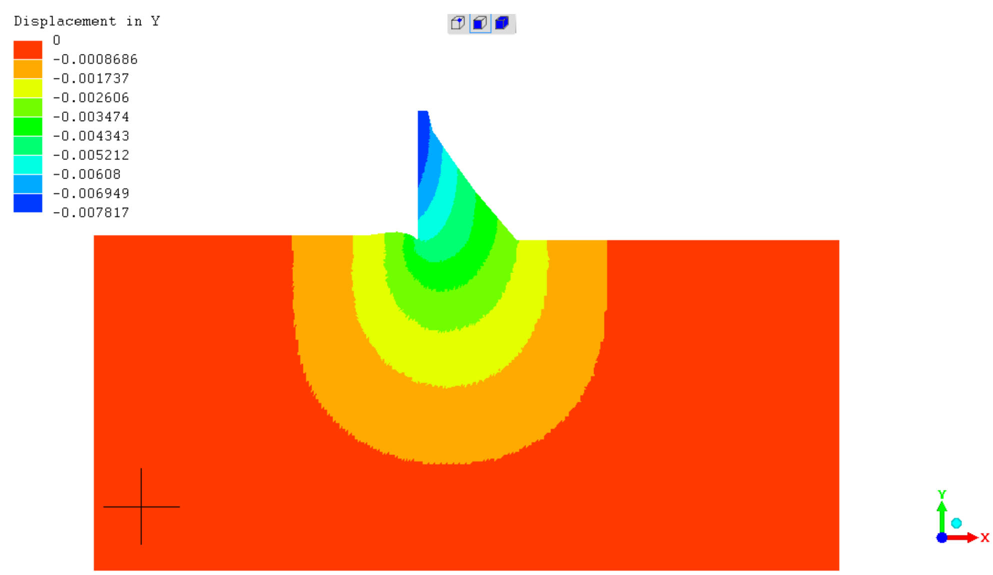
ნახ. 4.7: საანგარიშო შემთხვევების ძირითადი სქემები.

4.2. სისტემაზე მოქმედებს მხოლოდ კაშხლის საკუთარი წონა (სამშენებლო შემთხვევა)

ნახ. 4.8 და 4.9-ზე მოცემულია სისტემაში ჰორიზონტალური *u* და ვერტიკალური *v* გადაადგილებების იზოუბნები.



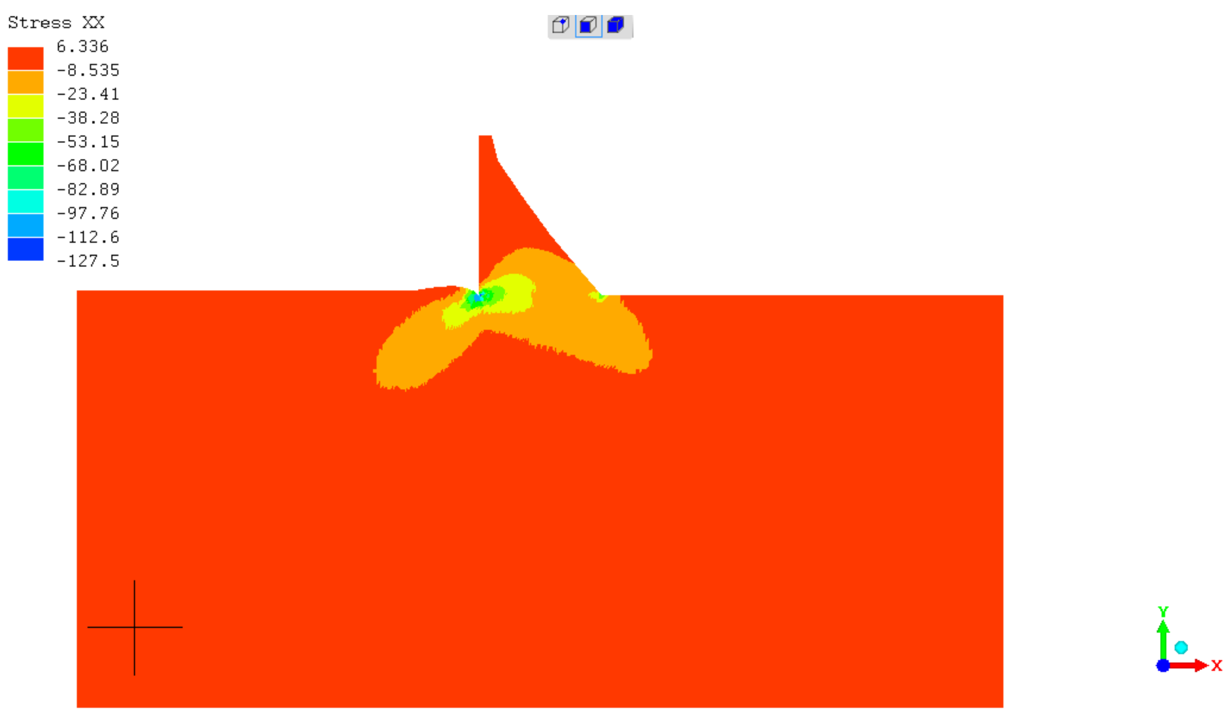
ნახ. 4.8: სისტემის ჰორიზონტალური u (X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.



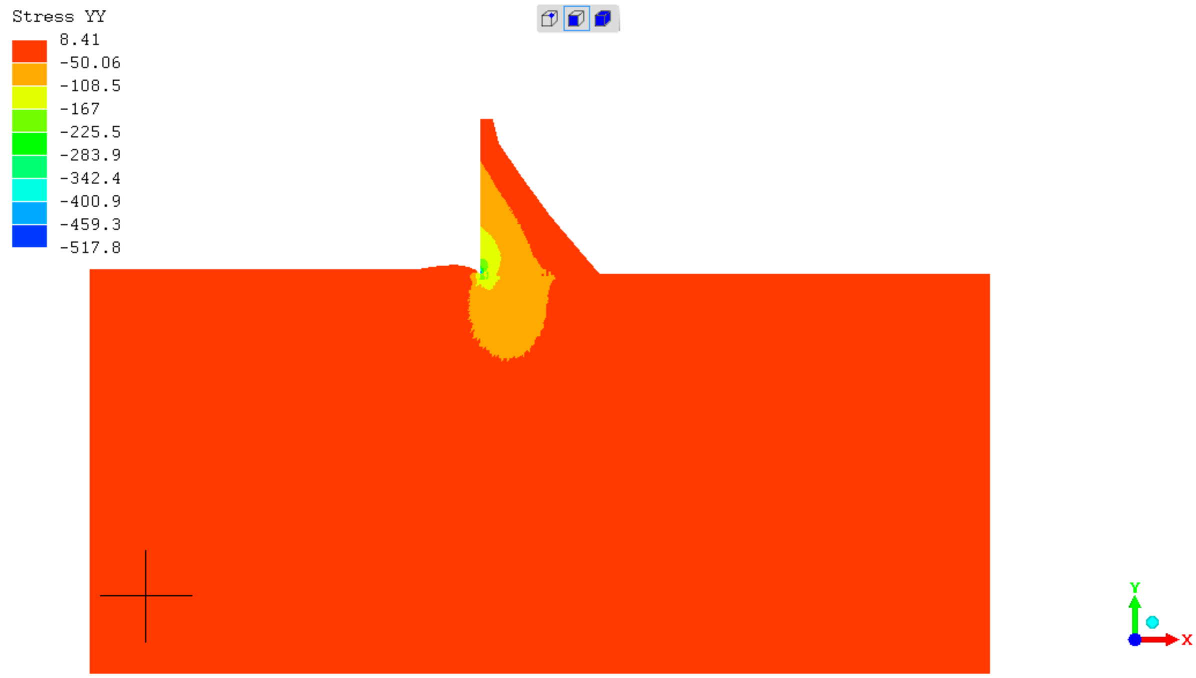
ნახ. 4.9: სისტემის ვერტიკალური v (Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.

შედეგებიდან ჩანს, რომ მაქსიმალური ჰორიზონტალური გადაადგილებები (-0,665 სმ) ფიქსირდება კაშხლის თხემის ზონაში (მუქი ლურჯი ფერი) და მეთოდურად მცირდება ფუძისაკენ. აღსანიშნავია ის, რომ გადახრის ვექტორი მიმართულია ზედა ბიეფისაკენ. ანალოგიური სიტუაციაა ვერტიკალური გადაადგილებების მხრივაც. მაქსიმალური ვერტიკალური გადაადგილებები (-0,782 სმ) აღინიშნება კაშხლის თხემის ზონაში და ვრცელდება სადაწნეო წახნაგის თითქმის შუამდე (მუქი ლურჯი ფერი). ყურადღებას იქცევს ვერტიკალური გადაადგილების სურათი ფუძეში. მისი სურათი კარგად ემთხვევა ბუსინესკის კლასიკური ამოცანის (ვერტიკალური შეყურსული ძალა ნახევარსიბრტყის ზედაპირზე) თვისობრივ შედეგს, რაც მიუთითებს ჩვენი სანგარიშო სქემის სიზუსტეზე.

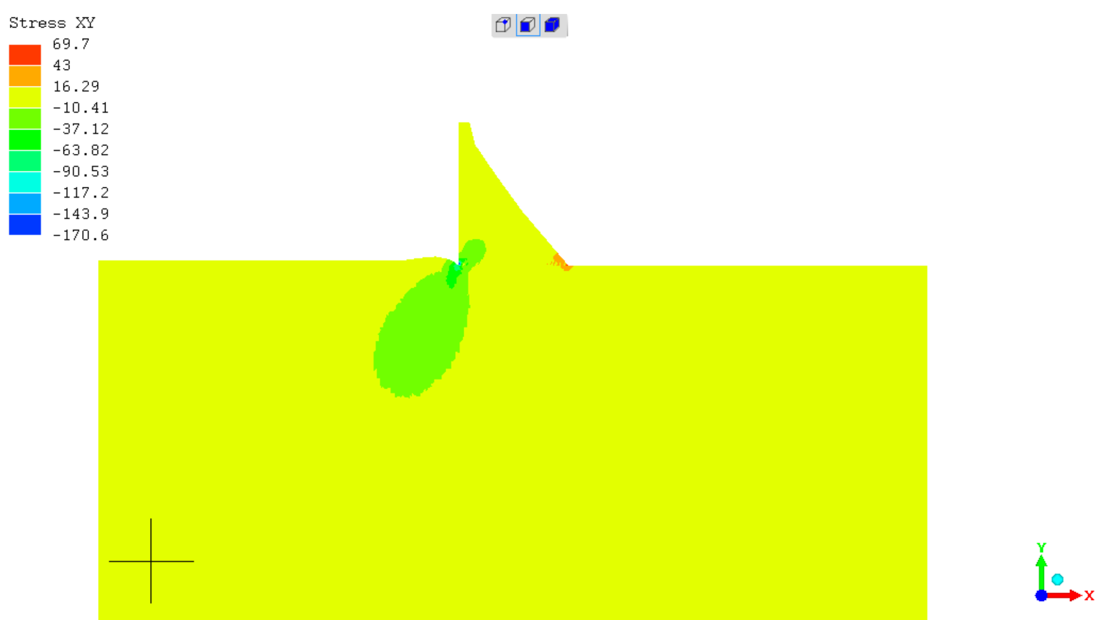
ნახ. 4.10, 4.11, 4.12 და 4.13-ზე მოცემულია სისტემაში ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x, ვერტიკალური ნორმალური σ_y, მხები τ და მაქსიმალური მთავარი σ_1 ძაბვების იზოუბნები.



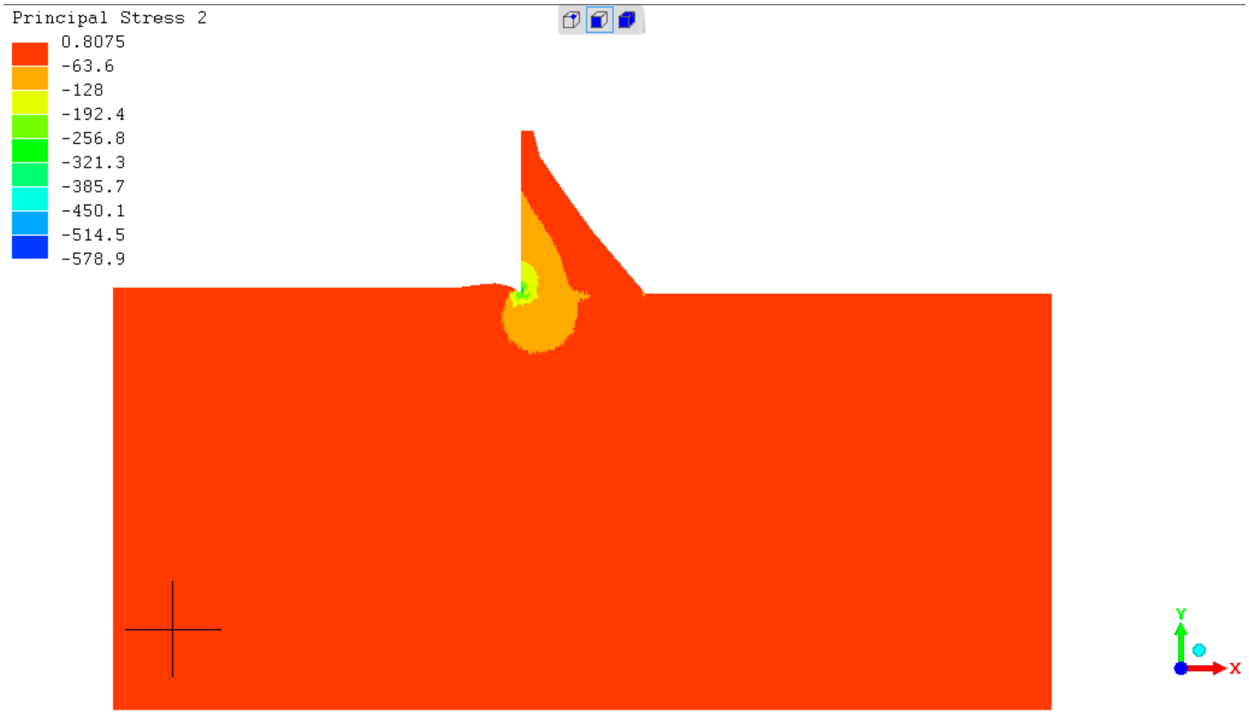
ნახ. 4.10: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x ძაბვების იზოუბნები.



ნახ. 4.11: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების იზოუბნები.



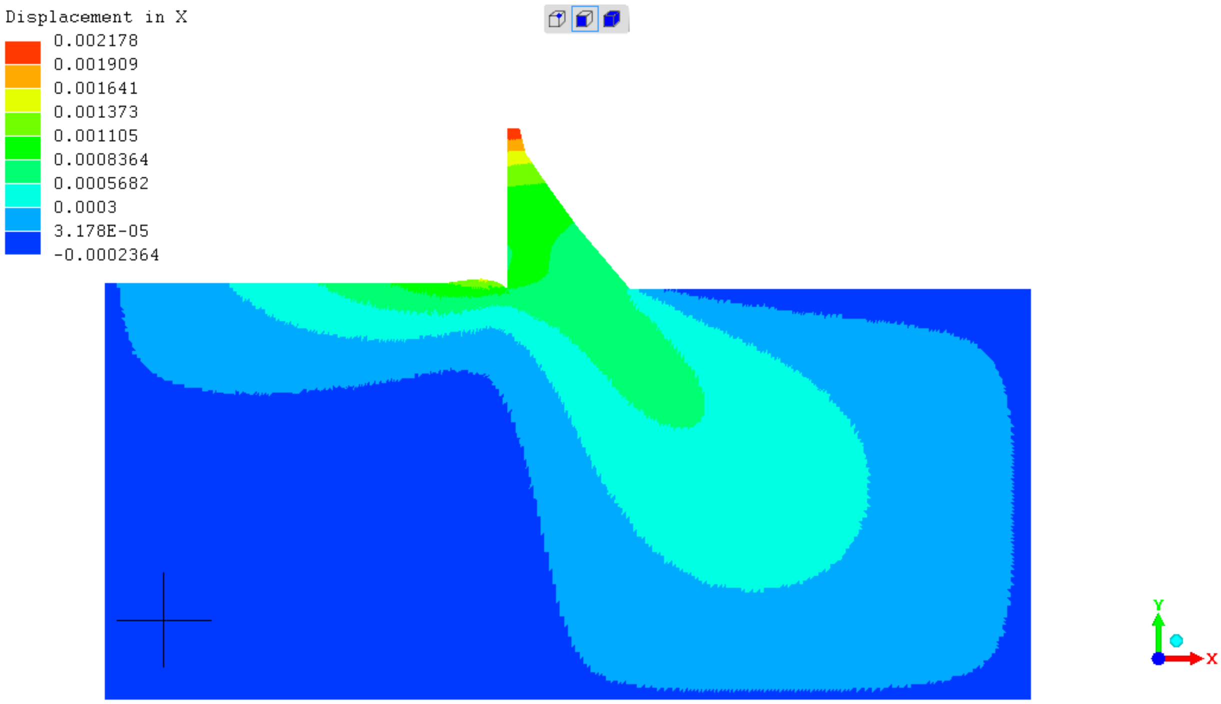
ნახ. 4.12: მხები τ ძაბვების იზოუბნები.



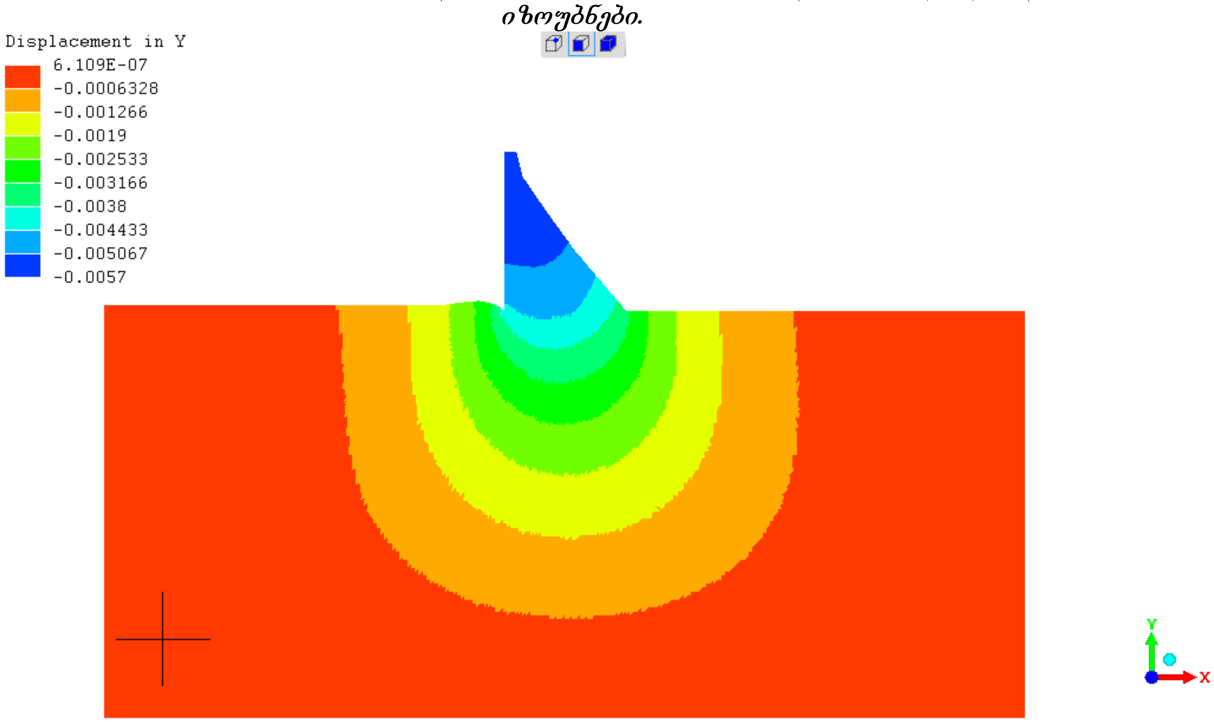
ნახ. 4.13: მაქსიმალური მთავარი σ_1 ძაბვების იზოუბნები.

4.3. სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე (საექსპლუატაციო შემთხვევა)

საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 4.7 –ზე. ნახ. 4.14 და 4.15 მოცემულია საანგარიშო სისტემაში ჰორიზონტალური *u* და ვერტიკალური *v* გადაადგილებების იზოუბნები.



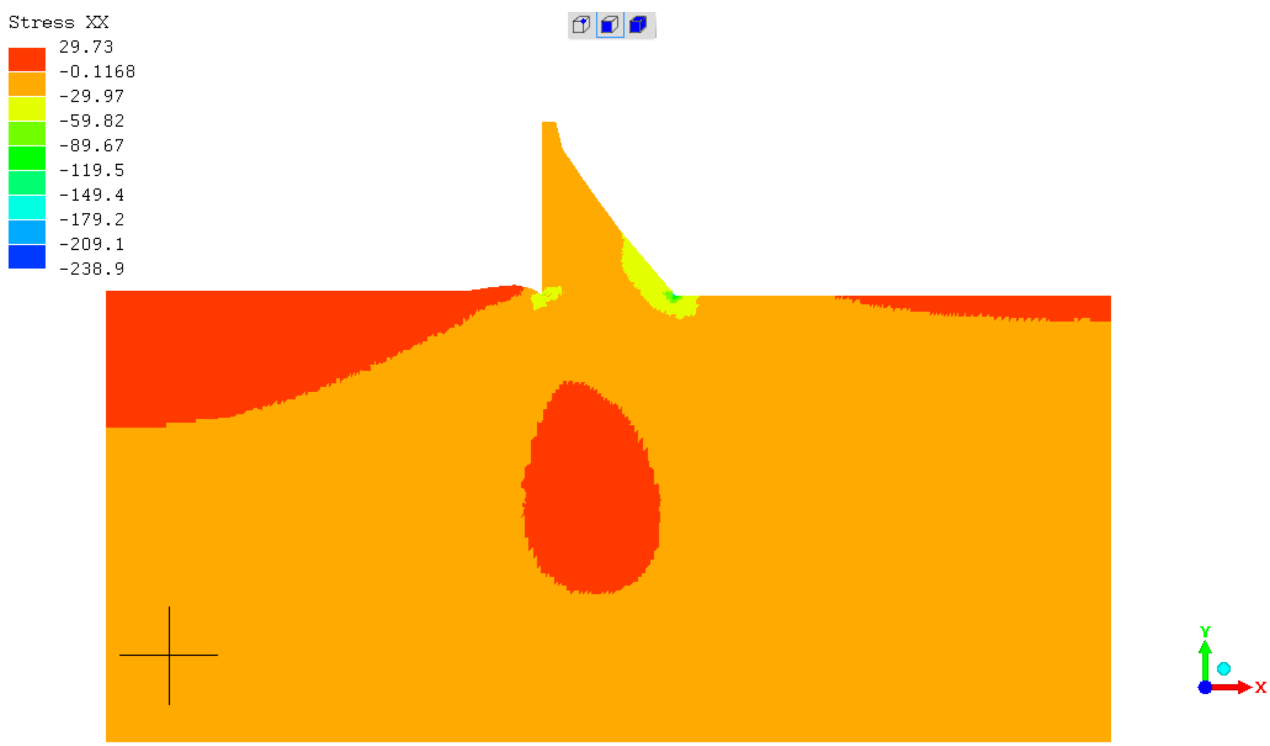
ნახ. 4.14: სისტემის ჰორიზონტალური **u** *(X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.*



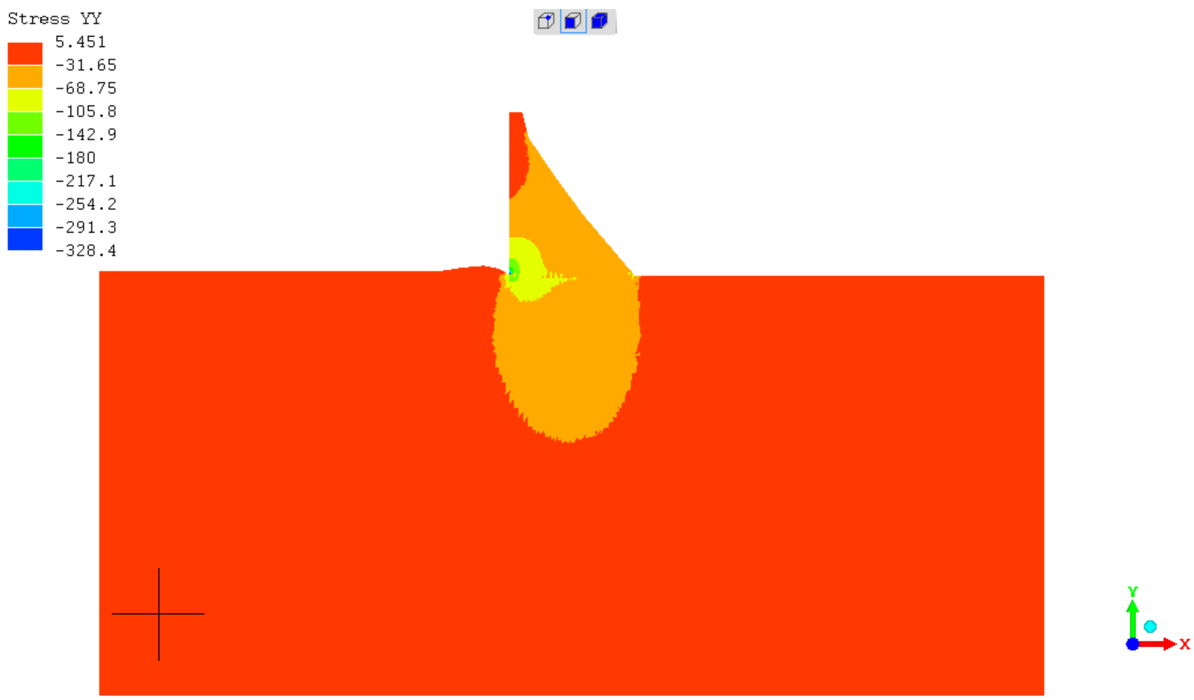
ნახ. 4.15: სისტემის ვერტიკალური **v** *(Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.*

შედეგებიდან ჩანს, რომ მაქსიმალური ჰორიზონტალური გადაადგილებები (-0,2178 სმ) ფიქსირდება კაშხლის თხემის ზონაში (ნარინჯისფერი) და მეთოდურად მცირდება ფუძისაკენ. აღსანიშნავია ის, რომ გადახრის ვექტორი მიმართულია ზედა ბიეფისაკენ. ანალოგიური სიტუაციაა ვერტიკალური გადაადგილებების მხრივაც. მაქსიმალური ვერტიკალური გადაადგილებები (-0,57 სმ) აღინიშნება კაშხლის თხემის ზონაში და ვრცელდება კაშხლის ტანის ზედა 2/3-ზე (მუქი ლურჯი ფერი).

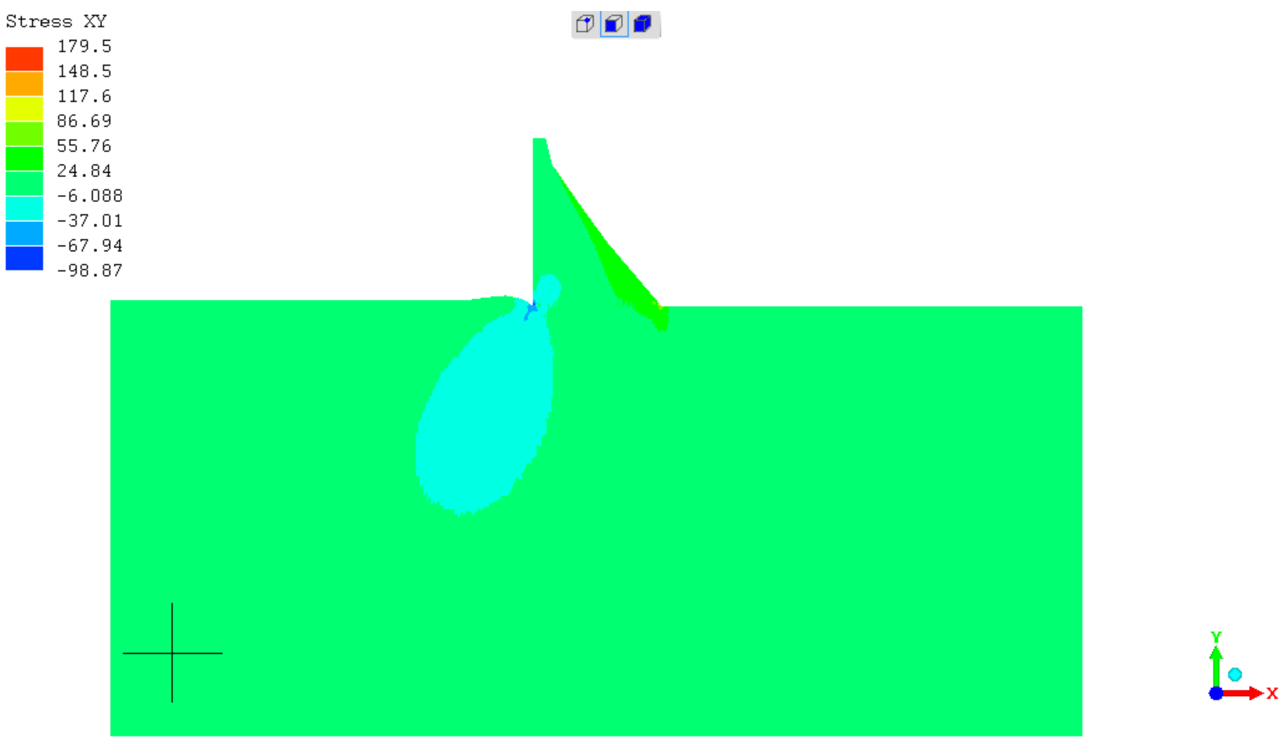
ნახ. 4.16, 4.17, 4.18 და 4.19-ზე მოცემულია სისტემაში ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x, ვერტიკალური ნორმალური σ_y, მხები τ და მაქსიმალური მთავარი σ_1 ძაბვების იზოუბნები.



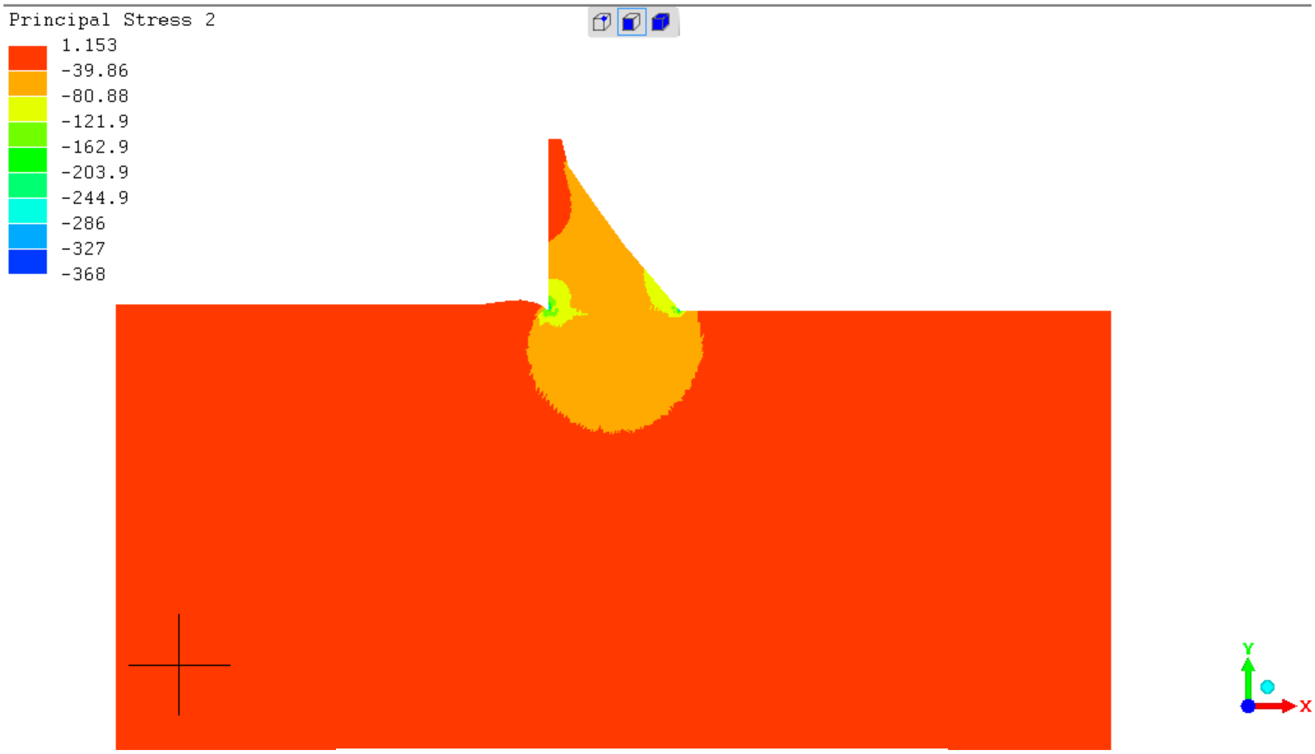
ნახ. 4.16: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x ძაბვების იზოუბნები.



ნახ. 4.17: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების იზოუბნები.



ნახ. 4.18: მხები τ ძაბვების იზოუბნები.



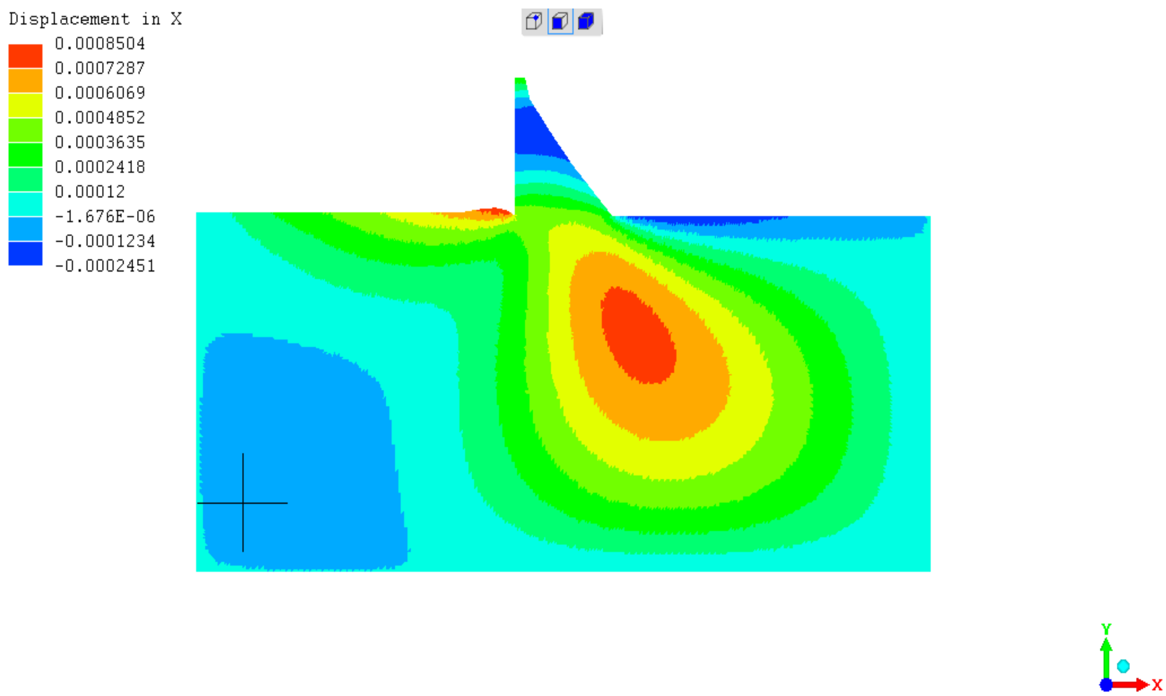
ნახ. 4.19: მაქსიმალური მთავარი σ_1 ძაბვების იზოუბნები.

4.4. სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე

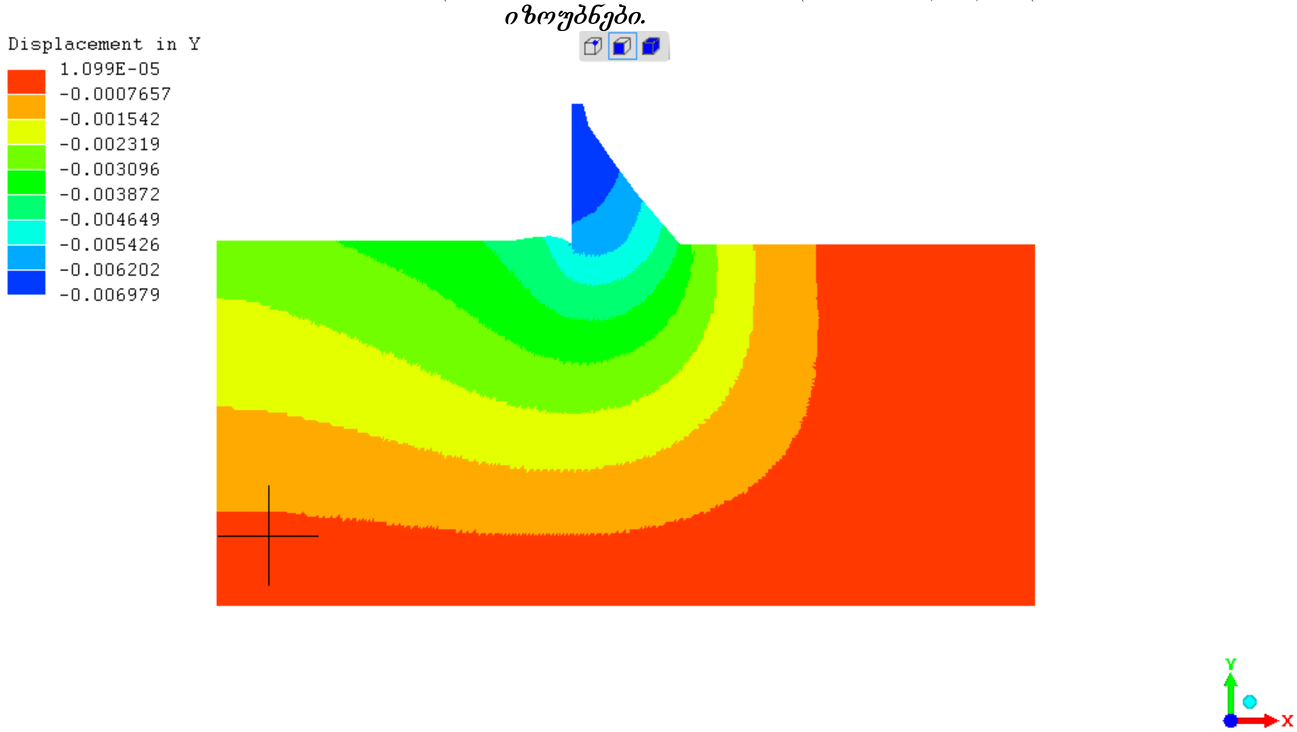
გარდა საკუთარი წონისა და ჰიდროსტატიკური დაწნევისა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე, სისტემა გაანგარიშებული იქნა დამატებით დატვირთვაზე – ვერტიკალურ ჰიდროსტატიკურ დატვირთვაზე წყალსაცავის ფსკერზე. დატვირთვის ამ კომპონენტს სასრული ელემენტების სქემაში ნაკლები ყურადღეობა ექცეოდა და, ამის გამო, გადაწყდა შეგვესწავლა ამ უკანასკნელის რეალური გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 4.7 –ზე.

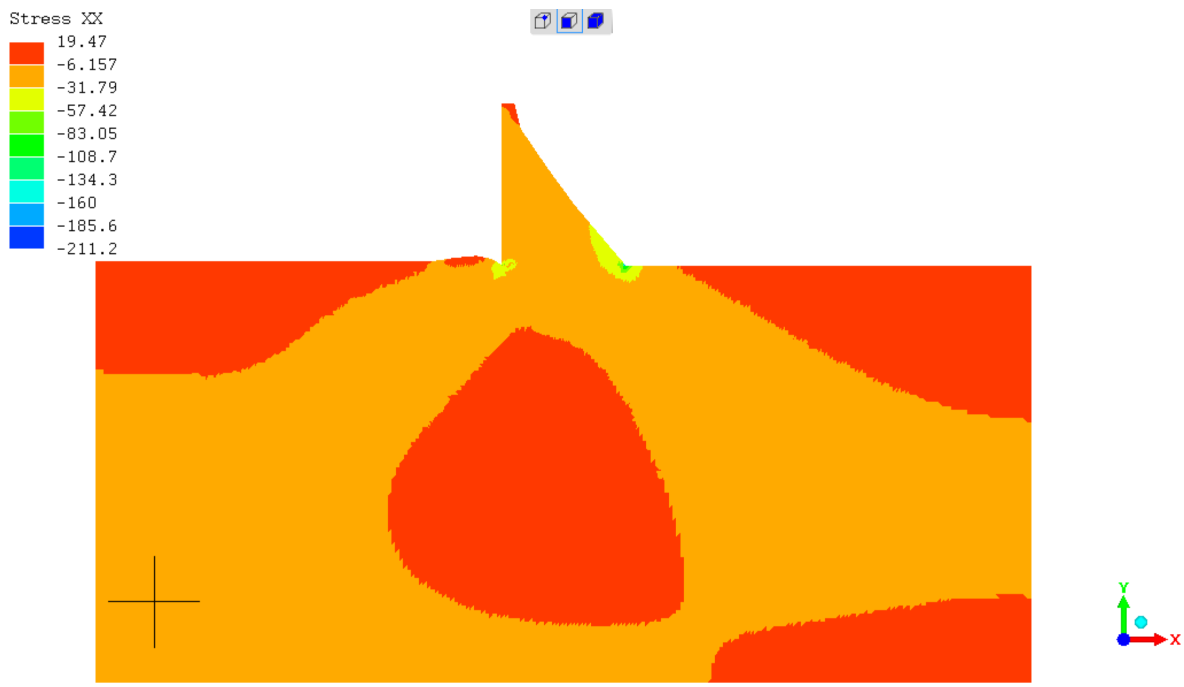
გაანალიზების მიზნით ქვემოთ მოყვანილია გადაადგილებებისა და ძაბვების იზოუბნების ზოგიერთი ნახაზები.



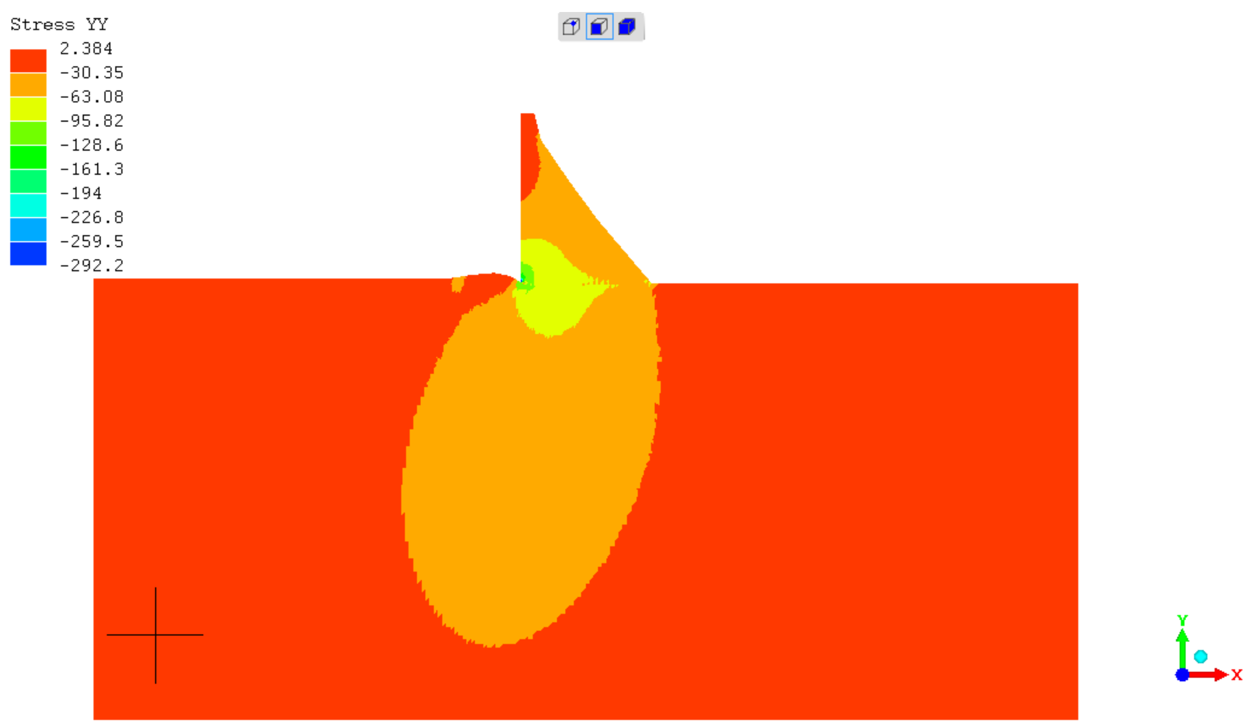
ნახ. 4.20: სისტემის ჰორიზონტალური **u** *(X ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.*



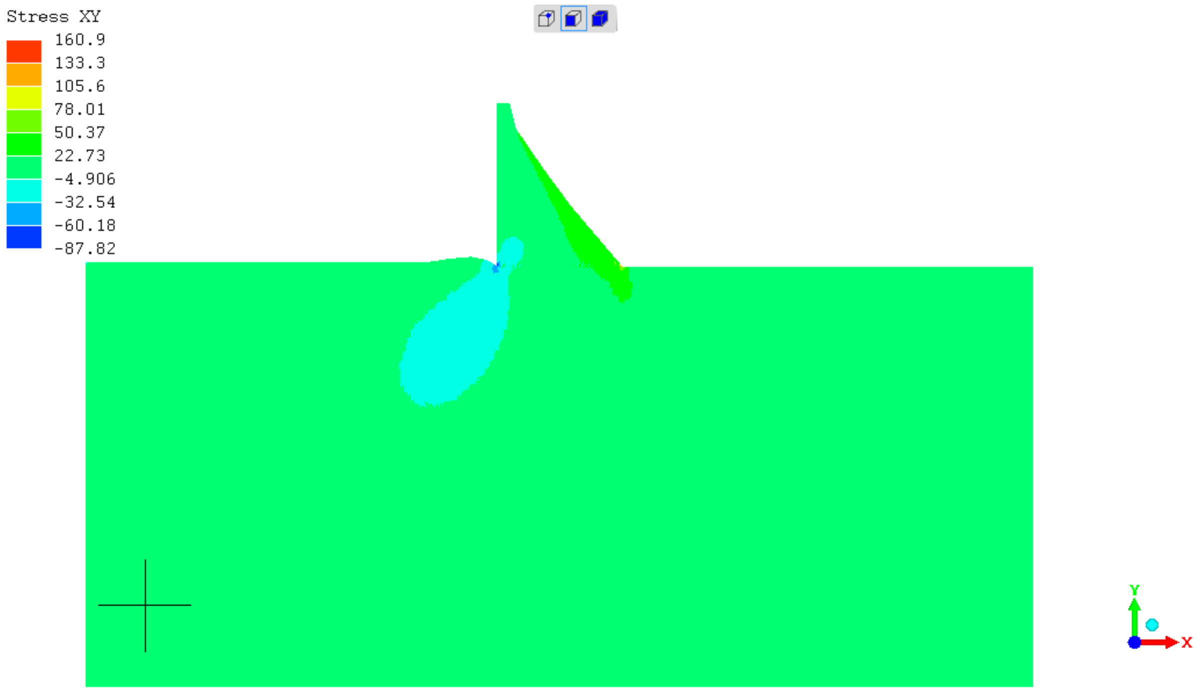
ნახ. 4.21: სისტემის ვერტიკალური **v** *(Y ღერძის მიმართულებით) გადაადგილებების იზოუბნები.*



ნახ. 4.22: ჰორიზონტალური ნორმალური σ_x ძაბვების იზოუბნები.



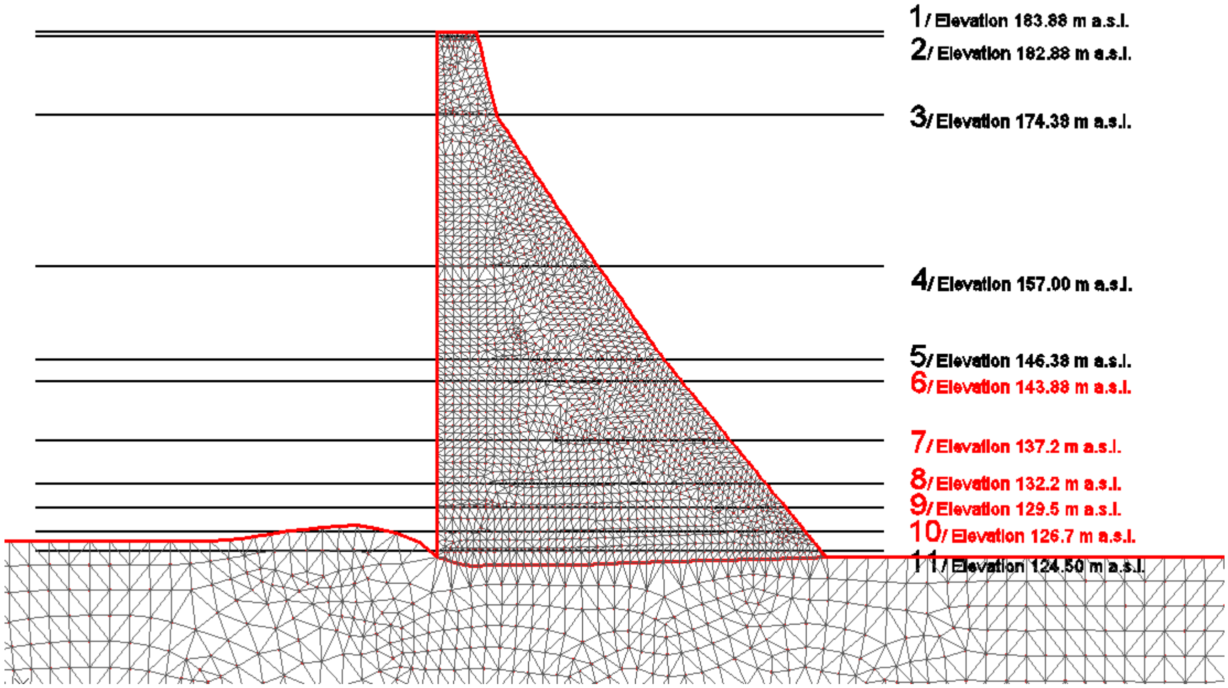
ნახ. 4.23: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების იზოუბნები.



ნახ. 4.24: მხები τ ძაბვების იზოუბნები.

გარდა სისტემის დაძაბული-დეფორმირებული მდგომარეობის ზოგადი სურათისა, ჩვენს კონკრეტულო ინტერესს წარმოადგენს, თუ რა გავლენა აქვს ჰიდროსტატიკის ვერტიკალურ მდგენელს უშუალოდ კაშხლის მდგომარეობაზე. ქვემოთ მოყვანილია ამ საკითხის ანალიზი უფრო დაწვრილებით.

ნახ. 4.25-ზე მოცემულია საანგარიშო სისტემიდან ამოღებული ფრაგმენტი – თვით კაშხალი და ფუძის ნაწილი.



ნახ. 4.25: სისტემის "გრეისის კაშხალი – ფუძე – წყალსაცავი" საანგარიშო სქემა სასრული ელემენტების მეთოდით (ფრაგმენტი).

ამოცანის ამოხსნის შედეგად მიღებული ვრცელი ინფორმაციიდან მოვიყვანოთ მხოლოდ ნაწილს, რომელიც გვაძლევს საშუალებას გამოვიტანოთ დასკვნები წყალსაცავის ფუძეზე ზემოქმედების გავლენის შესახებ უშუალოდ კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

შერჩეული იქნა ათი განივი კვეთი და ერთი თხემის სიბრტყე, რომლებშიც გაკეთდა შედეგების ანალიზი. ბუნებრივია, სისტემის ყველაზე კრიტიკული და საპასუხისმგებო არის კაშხალსა და ფუძეს შორის საკონტაქტო კვეთი (კვეთი №11).

ცხრ. 4.1 – ის ზედა ფრაგმენტში მოცემულია კვეთის ნომერი და მდებარეობა ზღვის დონიდან, ხოლო ქვედა, ძირითად, ნაწილში - კვანძების ნუმერაცია, კოორდინატები, აგრეთვე σ_y ძაბვები კვანძებში შემდეგი საანგარიშო შემთხვევებისათვის:

- საანგარიშო სისტემაზე მოქმედებს მხოლოდ საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა კაშხლის სადაწნეო წახნაგზე და

- სისტემაზე მოქმედებს საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე და ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე.

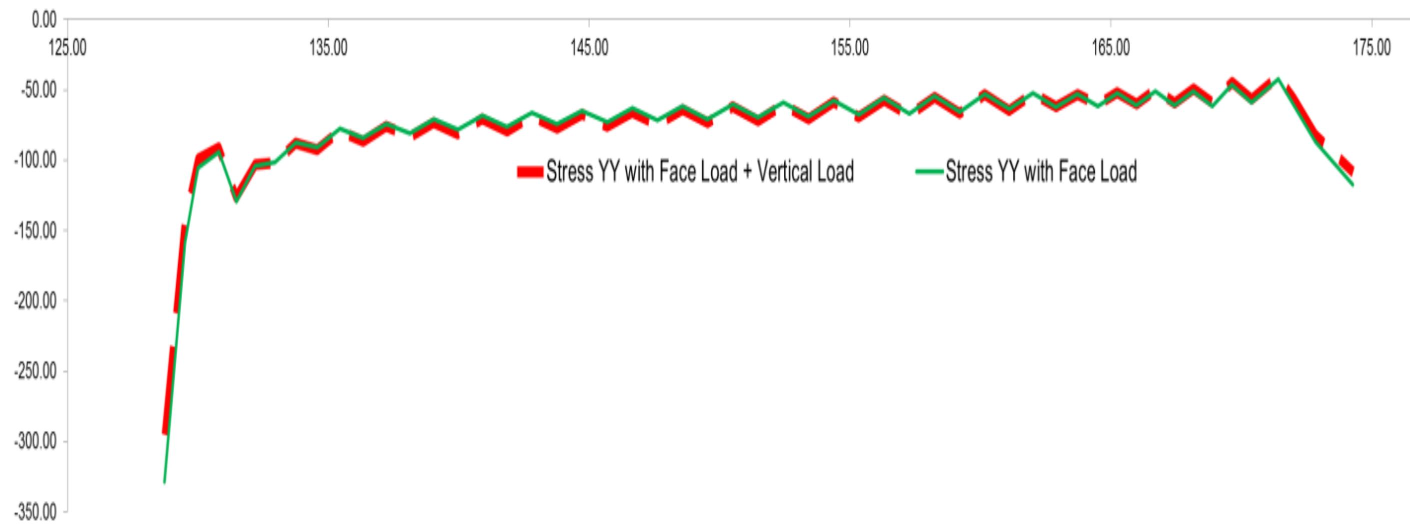
კვანძი №7080 არის კაშხლის სადაწნეო წახნაგისა და ფუძის ზედაპირის კვეთის წერტილი, ხოლო კვანძი №7359 - უდაწნეო წახნაგისა და ფუძის ზედაპირის კვეთის წერტილი, ცხრილში მოყვანილი სხვა წერტილების ნომრები მათ შორის არის განლაგებული.

ძაბვების გრაფიკული გამოსახულებები (ეპიურები) მოცემულია ნახ. 4.26 - ზე. შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს რომ ვერტიკალურ ჰიდროსტატიკურ დაწნევას წყალსაცავის ფსკერზე აქვს შესამჩნევი გავლენა კაშხლის წახნაგებზე ძაბვების მნიშვნელობებზე, თუმცა კაშხლის ტანში ეს გავლენა უმნიშვნელოა. მიღებული შედეგების ნაწილი გამოქვეყნებულია [33]-ში.

ცხრილი 4.1:

Aligm	11
Elevation	124.5

Point	7080	7310	7391	7312	7311	7388	7383	7382	7325	7324	7326	7348	7328	7327	7329	7358	7331	7330	7332	7359
X	128.72	129.50	130.00	130.80	131.47	132.19	132.96	133.75	134.58	135.44	136.33	137.23	138.13	139.04	139.96	140.90	141.85	142.80	143.77	144.73
Y	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50	124.50
Stress YY with Face Load	-328.62	-158.74	-105.57	-93.91	-129.03	-104.36	-101.60	-87.21	-90.78	-77.29	-83.95	-73.92	-80.51	-70.81	-78.05	-67.97	-75.96	-65.98	-74.26	-64.61
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-295.33	-144.52	-98.85	-91.13	-126.10	-102.86	-101.75	-87.87	-92.32	-78.93	-86.26	-76.14	-83.26	-73.33	-81.03	-70.60	-79.01	-68.63	-77.29	-67.21
	111.27%	109.84%	106.80%	103.05%	102.32%	101.46%	99.85%	99.25%	98.32%	97.93%	97.32%	97.09%	96.69%	96.57%	96.32%	96.28%	96.13%	96.14%	96.08%	96.13%



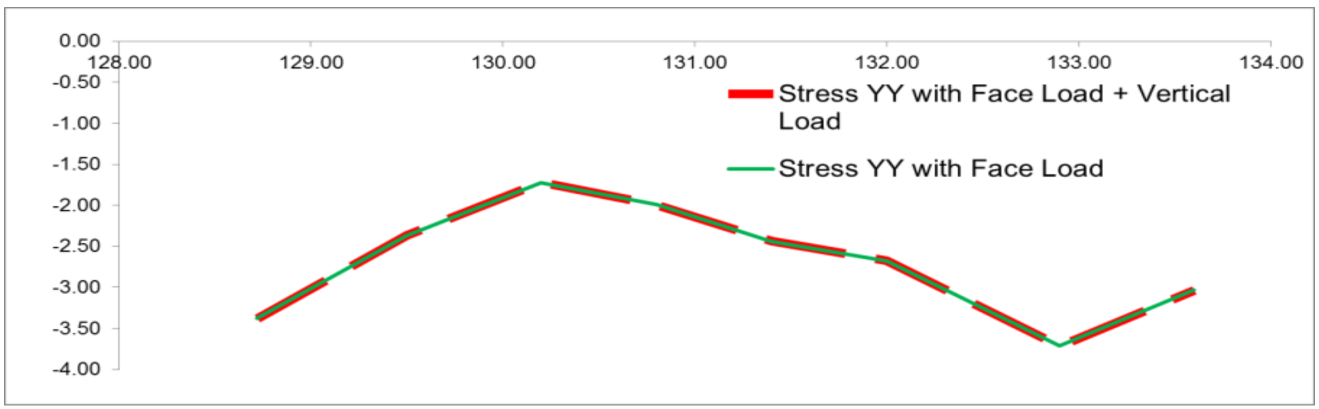
ნახ. 4.26: σ_y ძაბვები საკონტაქტო კვეთში (7080 – 7359). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის სრული სურათის წარმოსადგენად (4.2 – 4.19) ცხრილებში და (4.27 – 4.35) ნახაზებზე მოყვანილია ანალოგიური მონაცემები კაშხლის 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 9-9 და 10-10 ჰორიზონტალურ კვეთებში (ნახ. 4.25).

ცხრილი 4.2:

Aligm	2
Elevation	182.88

Point	6943	7171	7392	7587	7403	7404	7376	7152
X	128.72	129.50	130.20	130.80	131.40	132.00	132.90	133.60
Y	182.88	182.88	182.88	182.88	182.88	182.88	182.88	182.88
Stress YY with Face Load	-3.38	-2.37	-1.72	-1.99	-2.44	-2.68	-3.71	-3.03
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-3.38	-2.37	-1.72	-1.99	-2.44	-2.68	-3.71	-3.03
	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

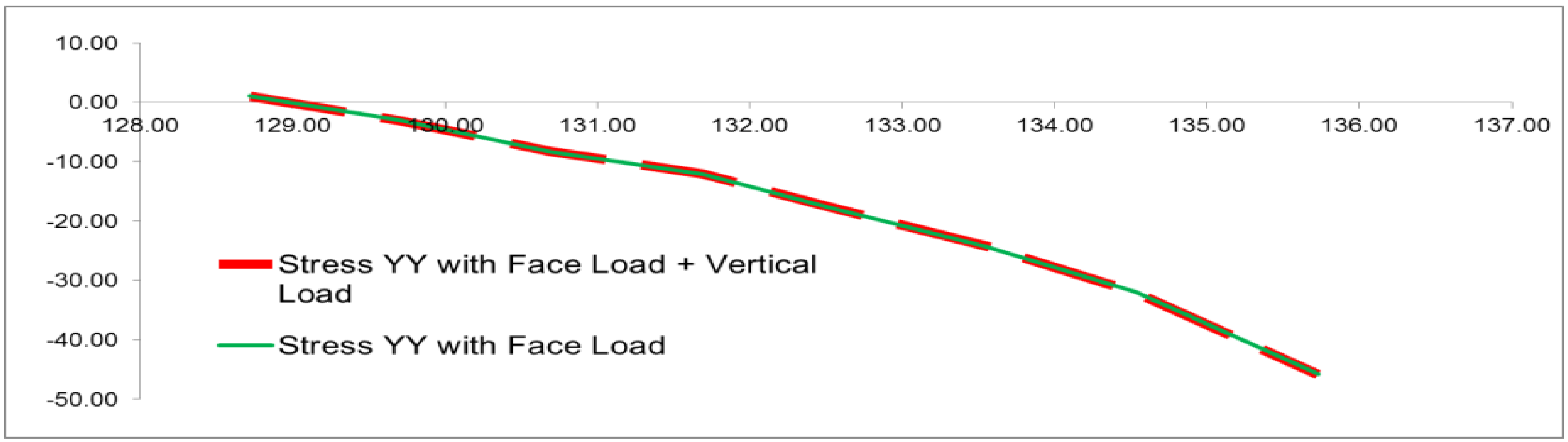


ნახ. 4.27: σ_y ძაბვები 2-2 კვეთში (6943 – 7152). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.3:

Number	3
Elevation	174.38

Point	6962	7189	7419	7789	7792	7411	7184	6955
X	128.72	129.69	130.69	131.69	132.53	133.54	134.53	135.73
Y	174.38	174.38	174.38	174.38	174.38	174.38	174.38	174.38
Stress YY with Face Load	1.02	-3.04	-8.28	-12.06	-17.70	-24.21	-32.00	-45.78
Stress YY with Face Load + Vertical Load	1.02	-3.04	-8.28	-12.06	-17.70	-24.21	-32.00	-45.78
	99.98%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

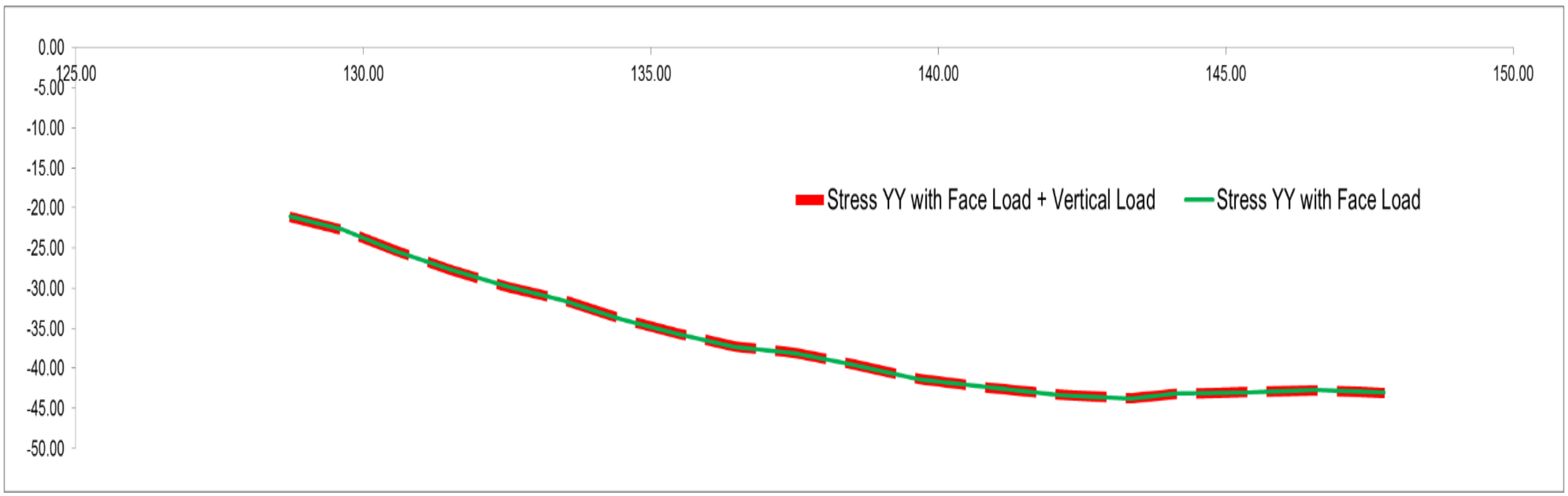


ნახ. 4.28: σ_y ძაბვები 3-3 კვეთში (6962 – 6955). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.4:

Aligm	4
Elevation	157

Point	7001	7230	7467	7674	7674	7873	8043	8182	8307	8467	8531	8403	8275	8147	8091	7928	7669	7460	7233	7003
X	128.72	129.64	130.58	131.54	131.54	132.51	133.49	134.47	135.46	136.46	137.49	138.43	139.66	140.88	142.11	143.35	144.15	145.37	146.57	147.76
Y	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00	157.00
Stress YY with Face Load	-21.04	-22.71	-25.38	-27.72	-27.72	-29.85	-31.51	-33.86	-35.67	-37.30	-38.06	-39.39	-41.37	-42.41	-43.30	-43.76	-43.16	-42.98	-42.75	-43.07
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-21.10	-22.76	-25.41	-27.73	-27.73	-29.84	-31.49	-33.84	-35.65	-37.27	-38.04	-39.37	-41.36	-42.40	-43.30	-43.77	-43.16	-42.99	-42.77	-43.10
	99.71%	99.80%	99.90%	99.97%	99.97%	100.02%	100.05%	100.07%	100.07%	100.07%	100.07%	100.06%	100.04%	100.02%	100.01%	99.99%	99.99%	99.97%	99.95%	99.92%



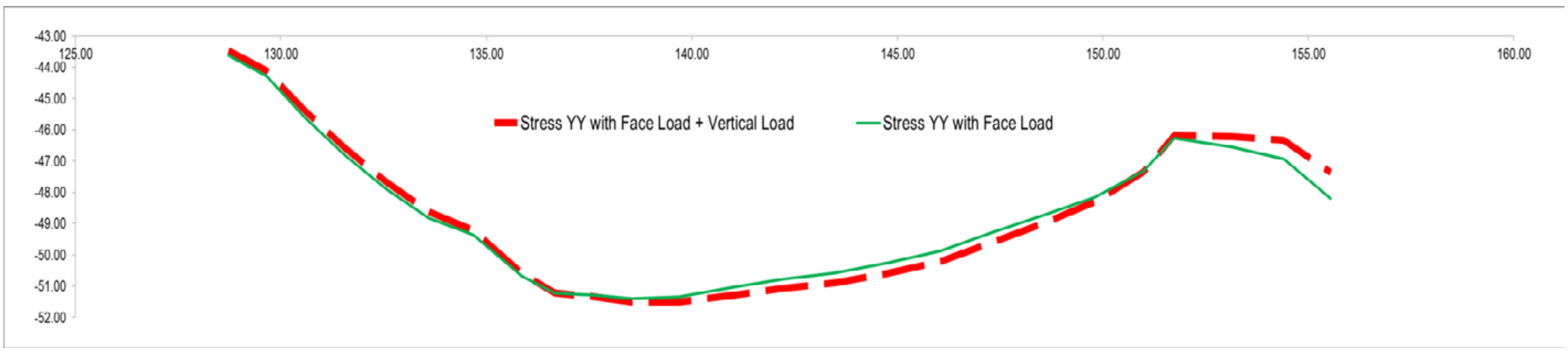
ნახ. 4.29: σ_y ძაბვები 4-4 კვეთში (7001 – 7003). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.5:

Aligm	5
Elevation	146.38

Point	7016	7245	7475	7683	7971	8061	8138	8309	8498	8588
X	128.72	129.65	130.59	131.56	132.56	133.60	134.69	135.86	136.67	137.59
Y	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38
Stress YY with Face Load	-43.62	-44.29	-45.63	-46.82	-47.90	-48.82	-49.36	-50.68	-51.23	-51.29
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-43.47	-44.11	-45.40	-46.59	-47.67	-48.62	-49.22	-50.59	-51.21	-51.33
	100.35%	100.42%	100.49%	100.51%	100.48%	100.40%	100.30%	100.17%	100.02%	99.93%

Point	8640	8704	8749	8716	8647	8576	8461	8282	8187	8062	7895	7706	7478	7246	7017
X	138.55	139.69	141.08	142.24	143.48	144.77	146.05	147.31	148.56	149.81	150.99	151.73	153.15	154.40	155.54
Y	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38	146.38
Stress YY with Face Load	-51.41	-51.35	-51.03	-50.77	-50.57	-50.25	-49.87	-49.28	-48.73	-48.16	-47.31	-46.26	-46.55	-46.94	-48.20
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-51.51	-51.52	-51.28	-51.07	-50.90	-50.59	-50.21	-49.59	-48.98	-48.30	-47.34	-46.19	-46.22	-46.33	-47.37
	99.81%	99.67%	99.51%	99.42%	99.36%	99.32%	99.33%	99.37%	99.50%	99.70%	99.94%	100.16%	100.72%	101.32%	101.75%

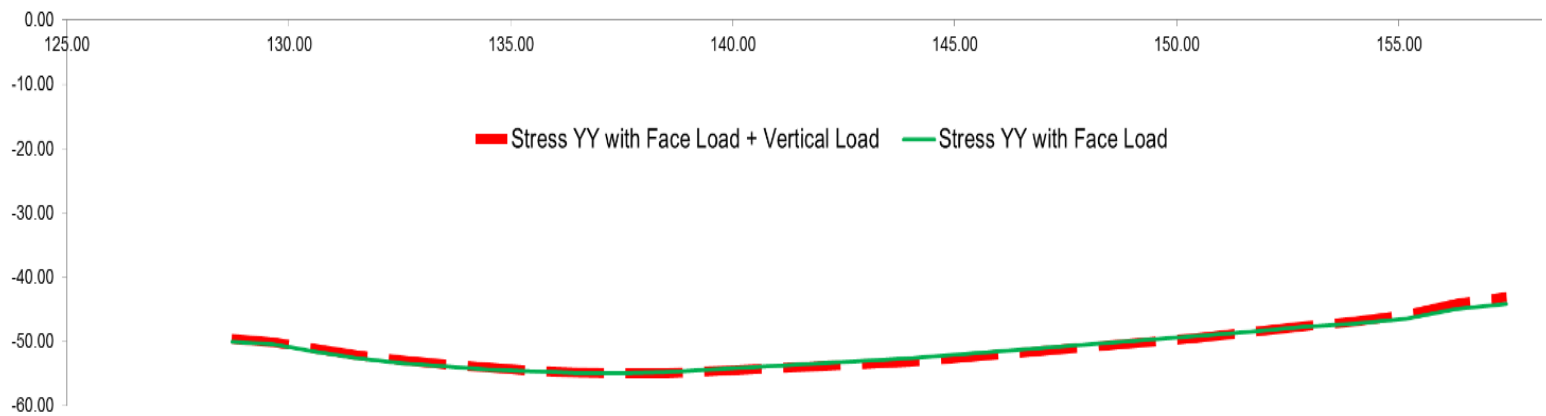


ნახ. 4.30: σ_y ძაბვები 5-5 კვეთში (7016 – 7017). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.6:

Aligm	6
Elevation	~ 143.88

Point	7034	7264	7597	7644	7843	8013	8162	8290	8399	8557	8619	8703	8264	8128	7967	7722	7510	7273	7043
X	128.72	129.65	130.60	131.55	132.54	133.54	134.56	135.55	136.53	137.51	138.47	144.00	150.43	151.62	152.80	153.98	155.16	156.31	157.43
Y	143.88	143.88	143.88	143.89	143.91	143.92	143.93	143.91	143.88	143.86	143.86	143.95	143.77	143.91	144.01	144.10	144.16	144.17	144.16
Stress YY with Face Load	-50.00	-50.50	-51.63	-52.58	-53.34	-53.93	-54.39	-54.70	-54.86	-54.90	-54.80	-52.60	-49.19	-48.47	-47.81	-47.25	-46.45	-45.01	-44.22
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-49.60	-50.08	-51.19	-52.14	-52.95	-53.60	-54.15	-54.55	-54.82	-54.96	-54.97	-53.13	-49.49	-48.59	-47.73	-46.93	-45.84	-44.08	-43.07
	100.80%	100.84%	100.87%	100.84%	100.75%	100.62%	100.45%	100.26%	100.07%	99.88%	99.70%	99.00%	99.41%	99.75%	100.17%	100.70%	101.33%	102.09%	102.65%



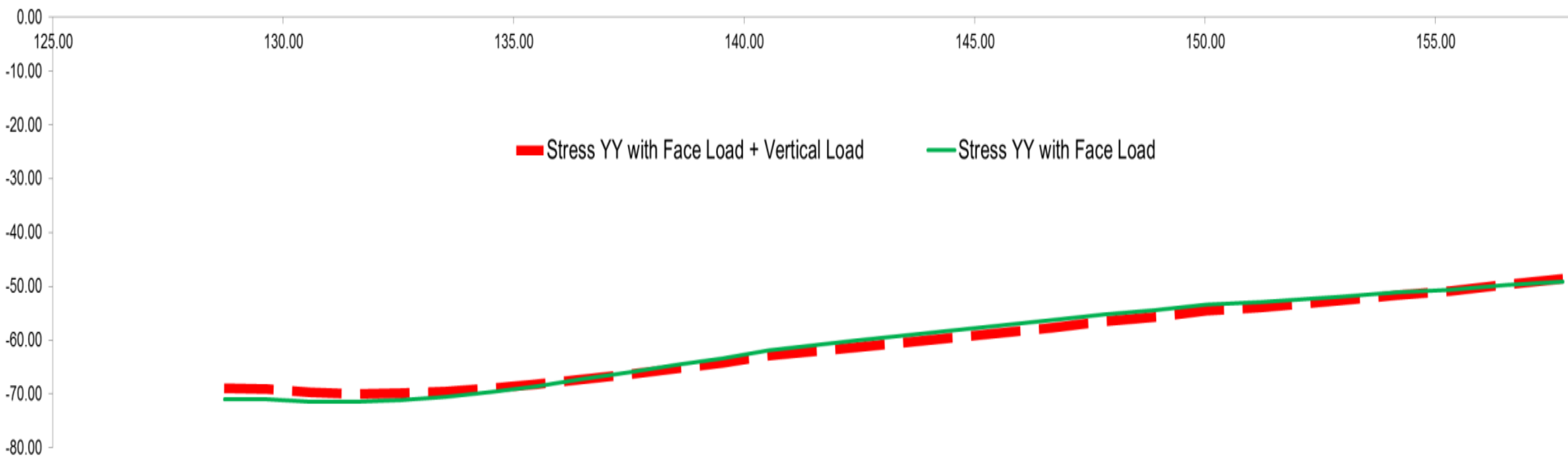
ნახ. 4.31: σ_y ძაბვები 6-6 კვეთში (7034 – 7043). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.7:

Aligm	7
Elevation	~ 137.2

Point	7062	7291	7513	7724	7891	8060	8211	8331	8445	8506	8591	8668
X	128.72	129.65	130.60	131.57	132.54	133.53	134.52	135.51	136.50	137.50	138.50	139.53
Y	137.20	137.21	137.20	137.19	137.18	137.17	137.16	137.15	137.14	137.15	137.18	137.23
Stress YY with Face Load	-70.97	-71.01	-71.46	-71.52	-71.19	-70.52	-69.61	-68.51	-67.28	-65.99	-64.70	-63.45
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-69.00	-69.14	-69.71	-69.99	-69.93	-69.59	-69.00	-68.23	-67.31	-66.31	-65.26	-64.22
	102.85%	102.71%	102.50%	102.18%	101.79%	101.35%	100.89%	100.42%	99.95%	99.53%	99.15%	98.80%

Point	8722	7109	7115	8790	8734	8690	8606	8509	8453	8371	8217	8033
X	140.54	142.43	146.68	147.83	148.89	150.04	151.22	153.04	154.17	155.32	156.55	157.77
Y	137.20	137.20	136.91	136.91	136.90	136.94	136.91	136.51	136.58	136.62	136.70	136.78
Stress YY with Face Load	-61.89	-60.10	-56.29	-55.23	-54.43	-53.37	-52.92	-51.84	-51.19	-50.65	-49.79	-49.12
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-62.85	-61.29	-57.67	-56.57	-55.67	-54.49	-53.87	-52.57	-51.68	-50.86	-49.70	-48.68
	98.46%	98.06%	97.61%	97.64%	97.76%	97.94%	98.23%	98.60%	99.05%	99.57%	100.17%	100.90%



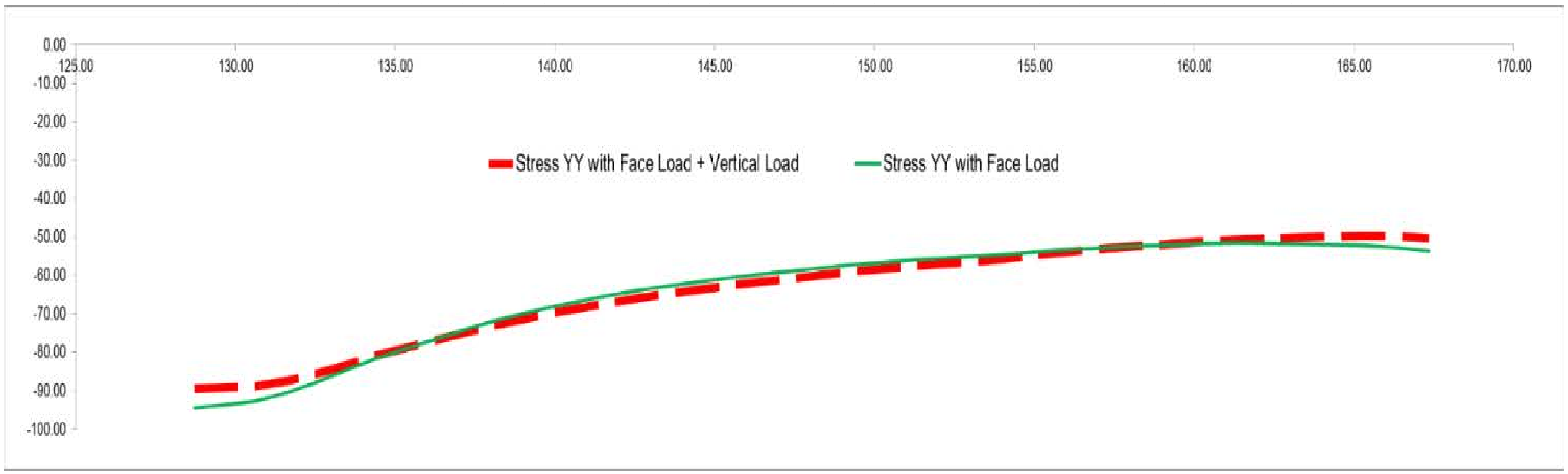
ნახ. 4.32: σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7062 – 8033). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.8:

Aligm	8
Elevation	~ 132.2

Point	7167	7390	7537	7702	7818	8059	8194	8537	8578	8541	8540	8500	8499	8559	8558	8587
X	128.72	129.67	130.62	131.58	132.53	133.48	134.43	137.40	138.18	139.02	139.89	140.78	141.69	142.63	143.58	145.46
Y	132.20	132.20	132.21	132.23	132.25	132.27	132.30	132.07	131.95	131.89	131.86	131.86	131.89	131.91	131.94	132.00
Stress YY with Face Load	-94.45	-93.76	-92.72	-90.58	-87.77	-84.62	-81.48	-73.61	-71.65	-69.92	-68.23	-66.67	-65.21	-63.86	-62.67	-60.63
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-89.46	-89.23	-88.88	-87.57	-85.60	-83.26	-80.82	-74.52	-72.91	-71.42	-69.93	-68.53	-67.17	-65.91	-64.75	-62.70
	105.58%	105.07%	104.32%	103.45%	102.53%	101.64%	100.82%	98.77%	98.27%	97.89%	97.56%	97.29%	97.07%	96.90%	96.79%	96.69%

Point	8525	8524	8582	8581	8572	8539	8521	8520	8423	8328	8203	8018	7925	7726	7522	7296	7066
X	146.40	147.34	149.24	150.22	151.25	153.68	154.65	155.69	157.82	159.02	160.27	161.49	162.71	163.92	165.10	166.24	167.35
Y	132.03	132.06	132.15	132.23	132.36	132.41	132.40	132.25	132.28	132.23	132.29	132.35	132.40	132.46	132.50	132.51	132.49
Stress YY with Face Load	-59.74	-58.91	-57.34	-56.62	-55.96	-54.82	-54.18	-53.42	-52.52	-52.09	-51.72	-51.64	-51.74	-51.91	-52.22	-52.67	-53.55
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-61.77	-60.88	-59.13	-58.29	-57.47	-55.97	-55.13	-54.11	-52.69	-51.99	-51.18	-50.67	-50.32	-50.01	-49.82	-49.77	-50.28
	96.71%	96.76%	96.97%	97.14%	97.37%	97.94%	98.29%	98.72%	99.68%	100.19%	101.06%	101.91%	102.83%	103.80%	104.80%	105.83%	106.50%

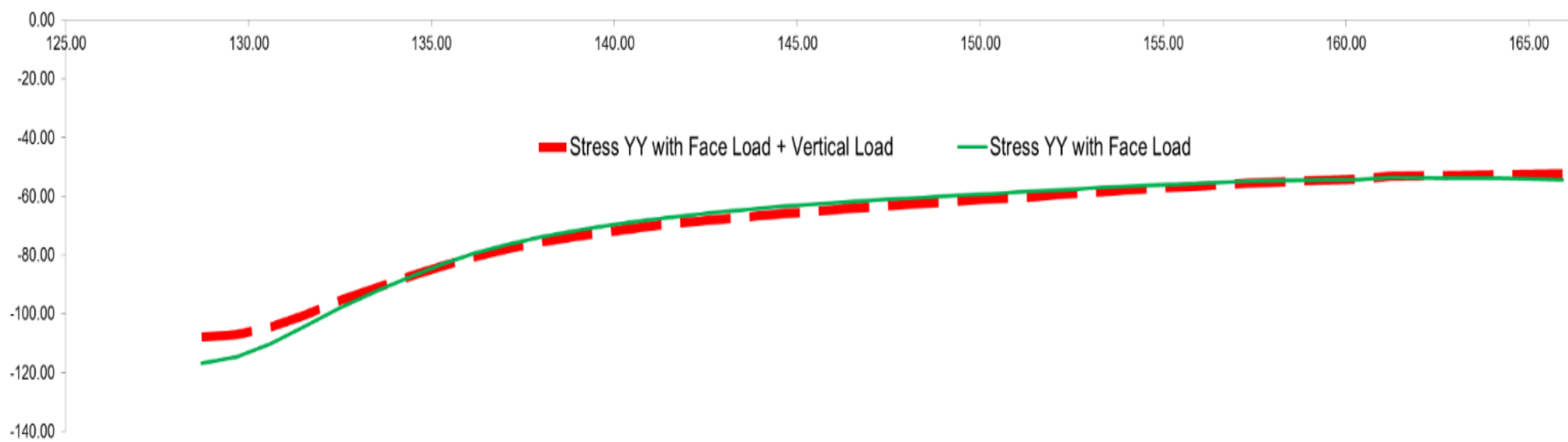


ნახ. 4.33: σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7167 – 7066). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.9:

Aligm	9
Elevation	~ 129.5

Point	7154	7378	7548	7758	7816	8088	8172	8205	8204	8219	8218	8265	8266	8237	8177	8176	8179	8247	8169	8168	8192	8220
X	128.72	129.67	130.61	131.53	132.50	133.62	134.55	135.37	136.19	137.07	138.03	138.97	139.90	140.82	141.76	142.70	143.66	144.61	145.56	146.50	147.45	148.40
Y	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50
Stress YY with Face Load	-116.72	-114.69	-110.29	-104.41	-97.95	-91.52	-86.74	-82.79	-79.46	-76.50	-73.76	-71.59	-69.80	-68.19	-66.83	-65.58	-64.52	-63.51	-62.65	-61.79	-61.11	-60.36
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-107.95	-107.20	-104.59	-100.41	-95.53	-90.60	-86.54	-83.36	-80.50	-77.92	-75.54	-73.61	-71.98	-70.50	-69.22	-68.00	-66.95	-65.93	-65.04	-64.12	-63.36	-62.53
	108.13%	106.99%	105.45%	103.99%	102.53%	101.01%	100.23%	99.32%	98.71%	98.17%	97.65%	97.26%	96.96%	96.73%	96.56%	96.44%	96.36%	96.33%	96.33%	96.37%	96.44%	96.54%

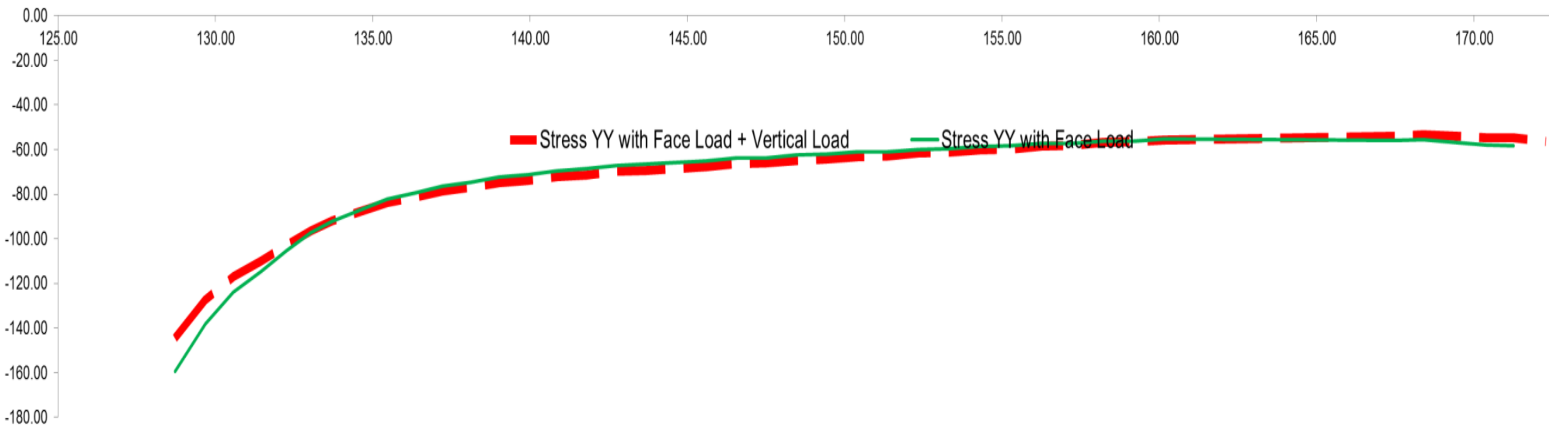


ნახ. 4.34:. σ_y ძაბვები 7-7 კვეთში (7154 – 8220). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

ცხრილი 4.10:

Aligm	10
Elevation	~ 128.77

Point	7078	7306	7538	7626	7893	7979	7974	7806	7898	7950	7954	7946	7918	7811	7810	7923	7813	7941
X	128.72	129.67	130.58	131.44	132.26	133.04	133.72	135.47	136.34	137.21	138.11	139.02	139.94	140.86	141.80	142.75	143.70	145.61
Y	126.70	126.72	126.68	126.72	126.73	126.70	126.66	126.87	126.85	126.86	126.87	126.88	126.89	126.90	126.92	126.94	126.96	127.01
Stress YY with Face Load	-159.40	-138.14	-123.87	-114.59	-105.27	-97.15	-91.98	-82.37	-79.48	-76.50	-74.67	-72.47	-71.24	-69.47	-68.65	-67.17	-66.64	-65.01
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-144.42	-127.63	-117.02	-110.06	-102.92	-96.27	-92.10	-83.67	-81.21	-78.53	-76.94	-74.89	-73.80	-72.09	-71.32	-69.85	-69.31	-67.60
	110.37%	108.23%	105.86%	104.12%	102.29%	100.92%	99.86%	98.46%	97.87%	97.42%	97.05%	96.76%	96.53%	96.37%	96.25%	96.18%	96.14%	96.17%



ნახ. 4.35: σ_y ძაბვები 10-10 კვეთში (7154 – 8220). წითელი და წყვეტილი ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები მეორე შემთხვევისათვის – ყველა ძალის ერთობლივი მოქმედება; მწვანე ტეხილი ხაზი - σ_y ძაბვები პირველი შემთხვევისათვის – მხოლოდ საკუთარი წონა ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე.

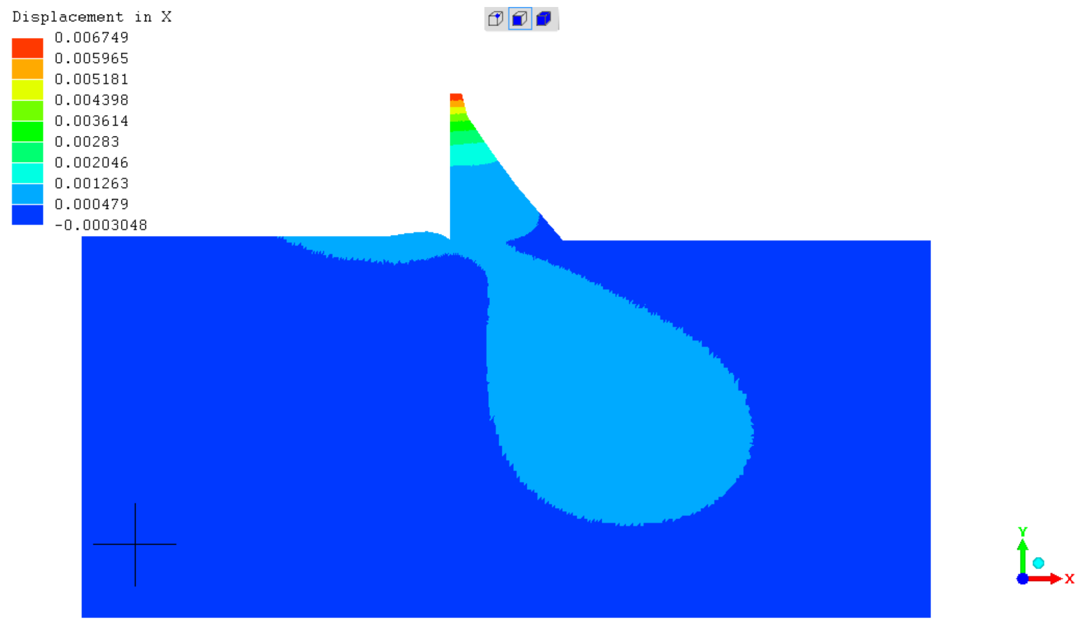
4.5. სტატიკური ციკლური დატვირთების და ბეტონის ასაკის გავლენა გრეისის კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე

ჩვენს ხელთ არსებული მონაცემებით გრეისის კაშხალი ექსპლუატაციაშია 48 წელიწადი. ვინაიდან მისი წყალსაცავი სეზონური რეგულირებისაა, დაცლა-ავსების ციკლი $n = 48$.

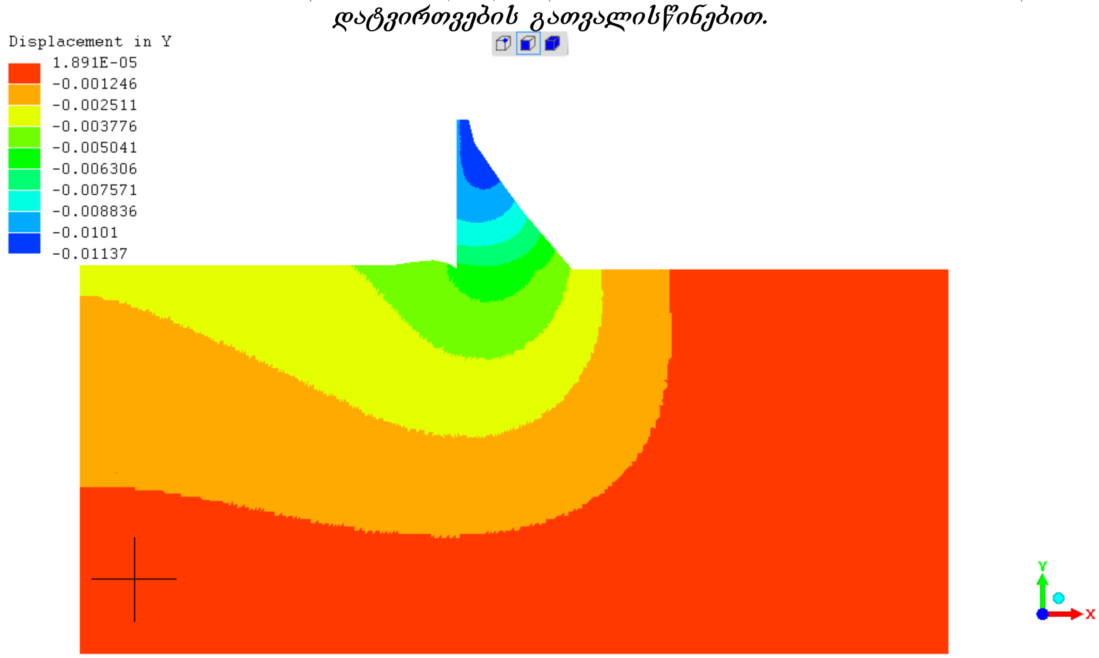
მესამე თავში აღწერილი მეთოდიკის გამოყენება სისტემის “გრეისის კაშხალი – ფუძე” მოხდა შემდეგი თანმიმდევრობით.

1. თავდაპირველად გაანგარიშებული იქნა გრეისის კაშხლის საპროექტო ვარიანტი კლდოვან ფუძესთან ერთად. კაშხლის აღებული იქნა საწყისი (საპროექტო) ბეტონის დრეკადობის მოდული E_0. კაშხალზე მოქმედებს მისი საკუთარი წონა და ჰიდროსტატიკური დაწნევა როგორც სადაწნეო წახნაგზე, ასევე წყალსაცავის ფსკერზე. გაანგარიშებული იქნა გადაადგილები, დეფორმაციები, ძაბვის კომპონენტები, მთავარი ძაბვები და მათი მიმართულებებე როგორც ბადის ელემენტებში, ასევე კვანძებში;
2. მიღებული მაქსიმალური ძაბვები გაანალიზებული იქნა (3.4), (3.5), (3.6) და (3.7) გამოსახულებების საშუალებით. ავსება-დაცლის ციკლების რაოდენობა $n = 48$ და ექსპლუატაციის წლების რაოდენობა $t=48$ წელიწადი. ანალიზის შედეგად დადგინდა (3.4 და 3.5 პირობები), რომ დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა დავარდა $E_{n=48} = 0{,}4*10^6$ ტ/მ^2-დე ციკლური დატვირთვების შედეგად. რაც შეეხება ასაკს, მისი გავლენა ბეტონის დრეკადობის მოდულზე დადებითია (3.6 და 3.7 პირობები). დრეკადობის მოდული გაიზარდა და გახდა - $E_{t=48} = 2{,}7*10^6$ ტ/მ^2
3. სისტემა “გრეისის კაშხალი-ფუძე” გაანგარიშებული იქნა მეორე სანგარიშო ეტაპზე მიღებული დრეკადობის მოდულის მოდიფიცირებული მნიშვნელობის გათვალისწინებით.

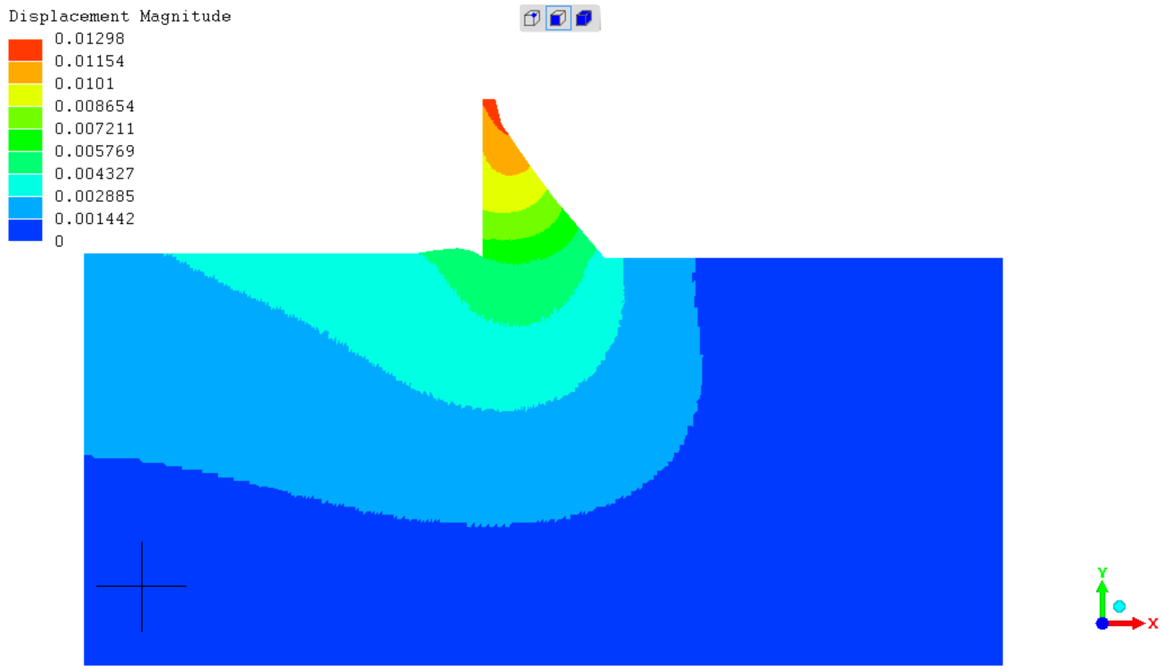
ნახ. 4.36 – 4.40 –ზე მოყვანილია გაანგარიშების ზოგიერთი შედეგი ნელი სტატიკური ციკლების გათვალისწინებით, როდესაც $n = 48$.



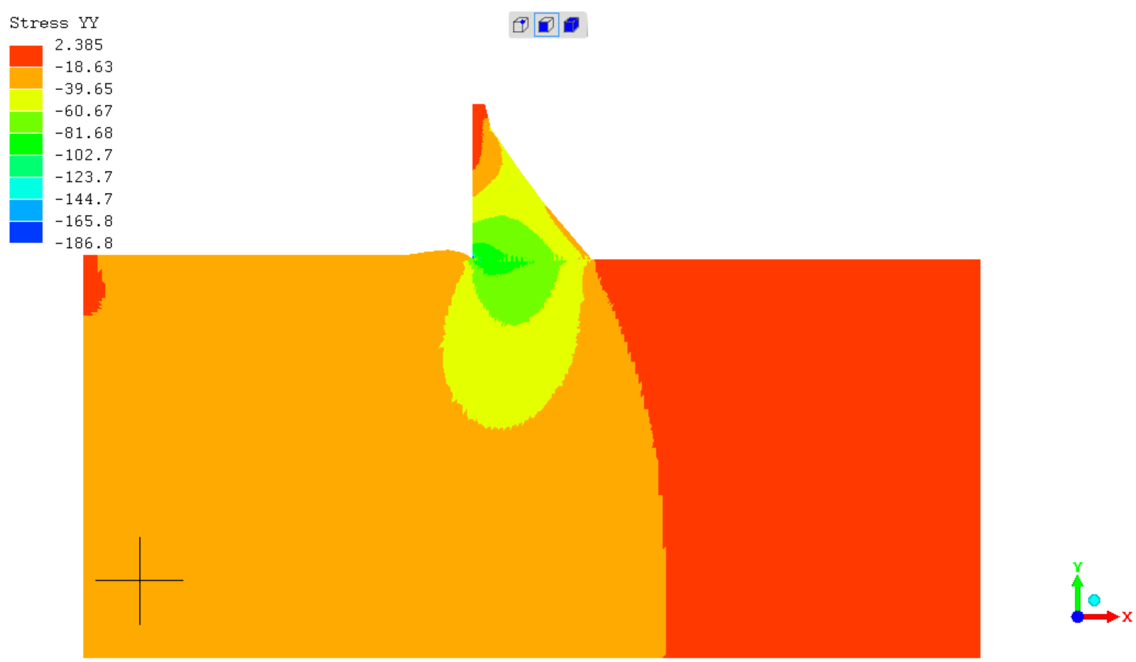
*ნახ. 4.36: ჰორიზონტალური **u** გადაადგილებების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.*



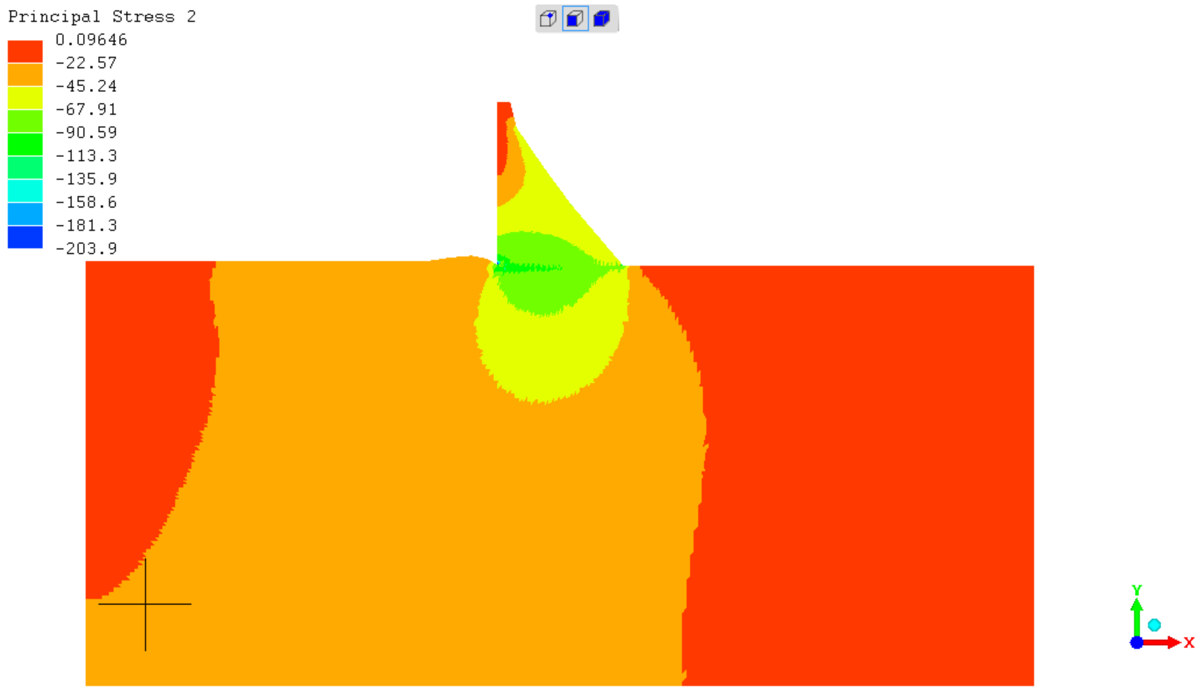
ნახ. 4.37: ვერტიკალური v გადაადგილებების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.



ნახ. 4.38: გადაადგილებების მაგნიტუდების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.



ნახ. 4.39: ძაბვების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.



ნახ. 4.40: მაქსიმალური მთავარი ძაბვების იზოუბნები სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით.

ცხრილებში 4.11 – 4.19 და ნახ. 4.41 – 4.49-ზე მოყვანილია კაშხლის ტანის ზოგიერთ ჰორიზონტალურ კვეთში (ნახ. 4.25) ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების მნიშვნელობები და ეპიურები იმ საანგარიშო შემთხვევისთვის, როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური დაწნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე. შედარებულია სამი სხვადასხვა შემთხვევა:

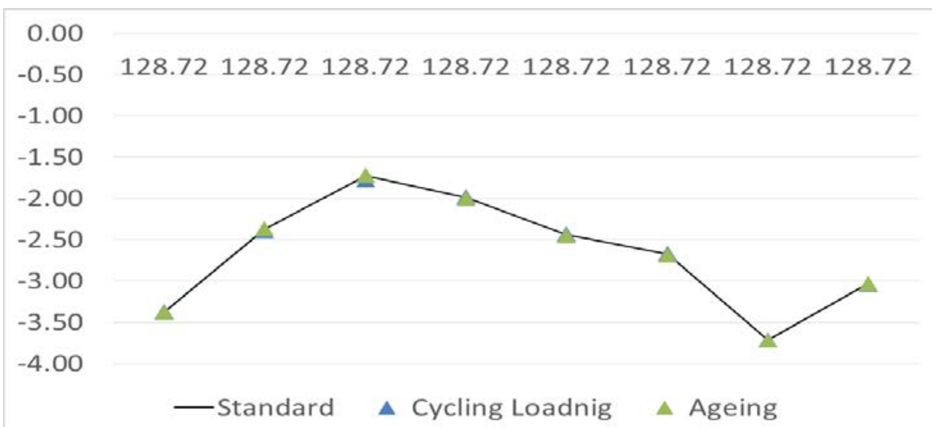
- სტანდარტული ანუ საპროექტო ვარიანტი - (ანგარიშებში ფიგურირებს ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდული);
- ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით (n = 48);
- ბეტონის ასაკის გათვალისწინებით (t=48).

შედეგები ნათლად გვაჩვენებენ ყველა ზემოდ ჩამოთვლილი ფაქტორის გავლენის ხარისხს კაშხლის დაძაბულ დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. ზოგადად შეიძლება ითქვას, რომ ციკლური დატვირთვები კაშხლის

დაძაბულ დეფორმირებულ მდგომარეობაზე უარყოფით გავლენას ახდენენ, მაშინ, როდესაც ბეტონის ასაკი პირიქით, აუმჯობესებს მის მექანიკურ მახასიათებლებს. გავლენის ძირითადი ასპექტები გაშუქებულია დასკვნებში.

ცხრილი 4.11:

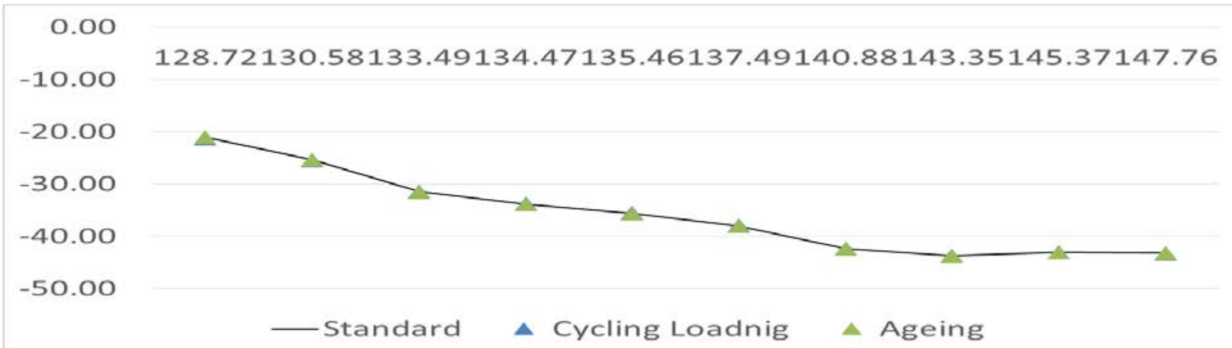
Aligm	2							
Elevation	182.88							
Point	6943	7171	7392	7587	7403	7404	7376	7152
X	128.72	128.72	128.72	128.72	128.72	128.72	128.72	128.72
Standard	-3.38	-2.37	-1.72	-1.99	-2.44	-2.68	-3.71	-3.03
Cycling Loadnig	-3.36	-2.39	-1.78	-1.98	-2.43	-2.67	-3.71	-3.04
Ageing	-3.38	-2.36	-1.71	-2.00	-2.45	-2.68	-3.71	-3.03



***ნახ. 4.41:** ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-2 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).*

ცხრილი 4.12:

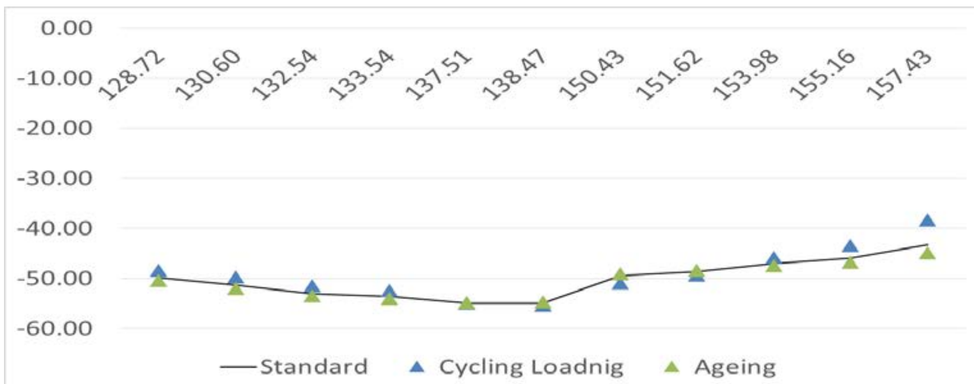
Aligm	4									
Elevation	157									
Point	7001	7467	8043	8182	8307	8531	8147	7928	7460	7003
X	128.72	130.58	133.49	134.47	135.46	137.49	140.88	143.35	145.37	147.76
Standard	-21.11	-25.42	-31.50	-33.84	-35.65	-38.03	-42.39	-43.76	-43.00	-43.13
Cycling Loadnig	-21.34	-25.51	-31.44	-33.76	-35.55	-37.93	-42.35	-43.78	-43.05	-43.26
Ageing	-21.05	-25.40	-31.52	-33.87	-35.67	-38.05	-42.39	-43.75	-42.99	-43.12



ნახ. 4.42: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-4 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

ცხრილი 4.13:

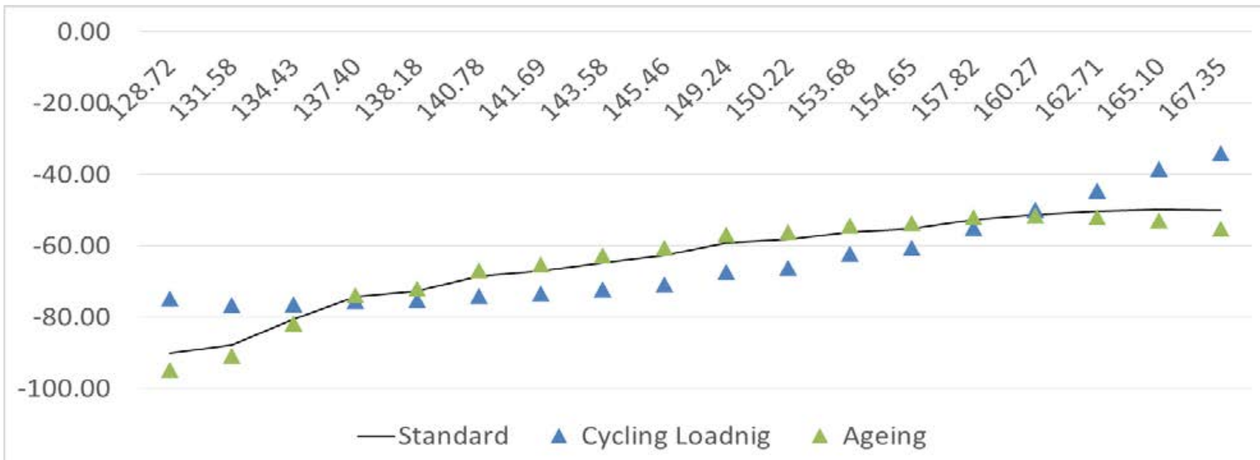
Aligm	6										
Elevation	~143.88										
Point	7034	7597	7843	8013	8557	8619	8264	8128	7722	7510	7043
X	128.72	130.60	132.54	133.54	137.51	138.47	150.43	151.62	153.98	155.16	157.43
Standard	-49.81	-51.34	-53.03	-53.65	-54.90	-54.88	-49.46	-48.60	-47.01	-45.97	-43.28
Cycling Loadnig	-48.33	-49.68	-51.50	-52.34	-54.99	-55.36	-50.86	-49.30	-45.77	-43.45	-38.29
Ageing	-50.40	-51.92	-53.52	-54.05	-54.82	-54.68	-49.03	-48.39	-47.42	-46.79	-44.89



ნახ. 4.43: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-6 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

ცხრილი 4.14:

Aligm	8																
Elevation	~132.2																
Point	7167	7702	8194	8537	8578	8500	8499	8558	8587	8582	8581	8539	8521	8423	8203	7925	7522	7066
X	128.72	131.58	134.43	137.40	138.18	140.78	141.69	143.58	145.46	149.24	150.22	153.68	154.65	157.82	160.27	162.71	165.10	167.35
Standard	-90.18	-87.68	-80.66	-74.28	-72.69	-68.38	-67.05	-64.67	-62.66	-59.16	-58.33	-56.06	-55.21	-52.78	-51.24	-50.35	-49.79	-50.19
Cycling Loadnig	-74.76	-76.73	-76.43	-75.49	-75.32	-74.00	-73.41	-72.13	-70.76	-67.29	-66.18	-62.28	-60.64	-54.89	-49.92	-44.45	-38.59	-34.03
Ageing	-94.88	-90.76	-81.70	-73.82	-71.86	-66.80	-65.29	-62.64	-60.48	-56.95	-56.19	-54.32	-53.68	-52.08	-51.47	-51.91	-53.01	-55.16



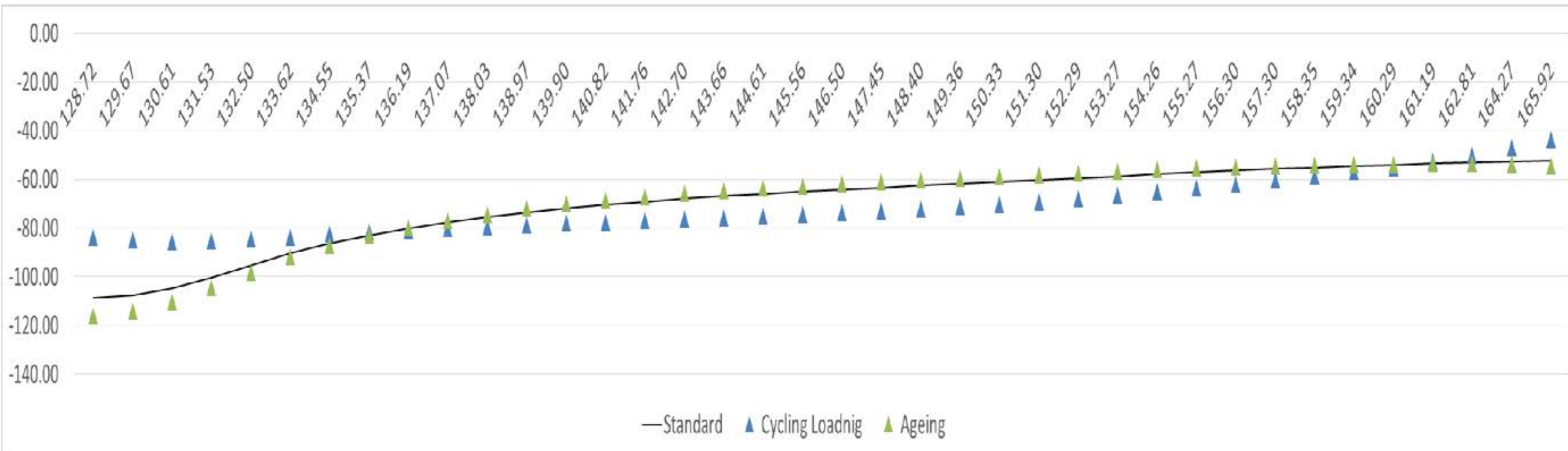
ნახ. 4.44: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-8 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

ცხრილი 4.15:

Aligm	9
Elevation	~129.5

Point	7154	7378	7548	7758	7816	8088	8172	8205	8204	8219	8218	8265	8266	8237	8177	8176	8179	8247	8169	8168
X	128.72	129.67	130.61	131.53	132.50	133.62	134.55	135.37	136.19	137.07	138.03	138.97	139.90	140.82	141.76	142.70	143.66	144.61	145.56	146.50
Standard	-108.77	-107.67	-104.70	-100.30	-95.30	-90.31	-86.24	-83.06	-80.25	-77.72	-75.37	-73.47	-71.89	-70.43	-69.18	-67.99	-66.97	-65.96	-65.09	-64.19
Cycling Loadnig	-83.75	-84.88	-85.51	-85.13	-84.38	-83.80	-82.28	-81.74	-80.86	-80.11	-79.38	-78.71	-78.13	-77.49	-76.92	-76.27	-75.69	-75.01	-74.37	-73.63
Ageing	-116.07	-114.18	-109.99	-104.34	-98.09	-91.82	-87.08	-83.19	-79.90	-76.95	-74.21	-72.02	-70.20	-68.56	-67.15	-65.84	-64.72	-63.64	-62.71	-61.77

8192	8220	8228	8209	8208	8213	8243	8242	8246	8234	8233	8158	8157	8216	8394	8255	8089	7912
147.45	148.40	149.36	150.33	151.30	152.29	153.27	154.26	155.27	156.30	157.30	158.35	159.34	160.29	161.19	162.81	164.27	165.92
-63.45	-62.63	-61.89	-61.09	-60.36	-59.50	-58.69	-57.86	-57.10	-56.41	-55.70	-55.05	-54.65	-54.29	-53.30	-52.97	-52.53	-52.26
-72.96	-72.12	-71.27	-70.24	-69.19	-67.90	-66.58	-65.09	-63.57	-61.97	-60.26	-58.42	-56.82	-55.26	-52.74	-50.24	-46.99	-43.51
-61.01	-60.19	-59.47	-58.71	-58.05	-57.28	-56.59	-55.91	-55.31	-54.84	-54.37	-54.02	-53.93	-53.87	-53.26	-53.47	-53.84	-54.47



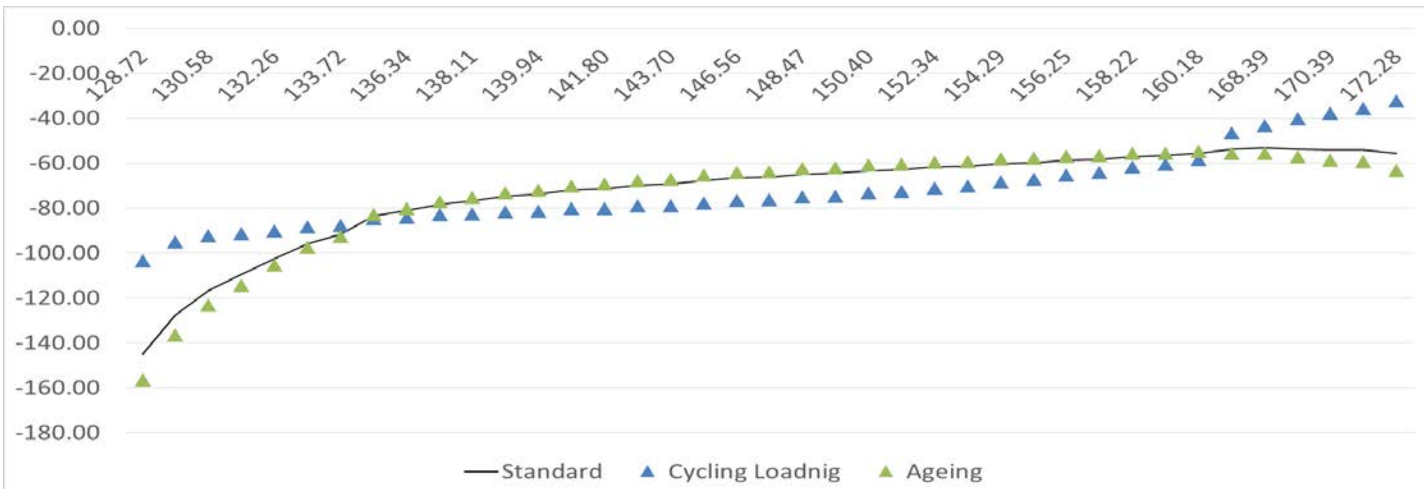
ნახ. 4.45: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-9 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

ცხრილი 4.16:

Aligm	10
Elevation	~128.77

Point	7078	7306	7538	7626	7893	7979	7974	7806	7898	7950	7954	7946	7918	7811	7810	7923	7813	7941	7823	7822	7862
X	128.72	129.67	130.58	131.44	132.26	133.04	133.72	135.47	136.34	137.21	138.11	139.02	139.94	140.86	141.80	142.75	143.70	145.61	146.56	147.51	148.47
Y	126.70	126.72	126.68	126.72	126.73	126.70	126.66	126.87	126.85	126.86	126.87	126.88	126.89	126.90	126.92	126.94	126.96	127.01	127.03	127.06	127.10
Stress YY with Face Load	-159.41	-138.13	-123.85	-114.57	-105.25	-97.14	-91.96	-82.36	-79.47	-76.50	-74.66	-72.47	-71.25	-69.47	-68.65	-67.18	-66.64	-65.02	-63.91	-63.61	-62.48
Stress YY with Face Load + Vertical Load	-237.74	-209.77	-188.86	-173.70	-157.48	-142.97	-132.69	-113.85	-107.16	-100.57	-95.55	-90.24	-86.24	-81.74	-78.42	-74.48	-71.65	-65.71	-62.59	-60.37	-57.42
	67.05%	65.85%	65.58%	65.96%	66.83%	67.94%	69.31%	72.34%	74.16%	76.06%	78.14%	80.30%	82.61%	84.99%	87.55%	90.20%	93.02%	98.94%	102.10%	105.37%	108.83%

7861	7900	7899	7931	7930	7938	7933	7932	7949	7948	7937	7922	7760	7611	7622	7491	7370	7134
149.43	150.40	151.37	152.34	153.31	154.29	155.26	156.25	157.24	158.22	159.20	160.18	167.49	168.39	169.50	170.39	171.25	172.28
127.13	127.17	127.20	127.23	127.27	127.30	127.34	127.37	127.40	127.43	127.45	127.48	126.67	126.70	126.72	126.67	126.58	126.68
-62.20	-61.14	-60.92	-59.87	-59.64	-58.61	-58.39	-57.40	-57.25	-56.25	-56.14	-55.39	-55.86	-55.70	-56.96	-57.95	-58.41	-60.84
-55.34	-52.65	-50.76	-48.23	-46.47	-44.10	-42.44	-40.20	-38.66	-36.57	-35.23	-33.50	-27.30	-25.77	-24.82	-24.10	-23.66	-23.05
112.39%	116.14%	120.02%	124.14%	128.35%	132.90%	137.60%	142.78%	148.07%	153.81%	159.35%	165.36%	204.60%	216.18%	229.45%	240.45%	246.83%	264.01%



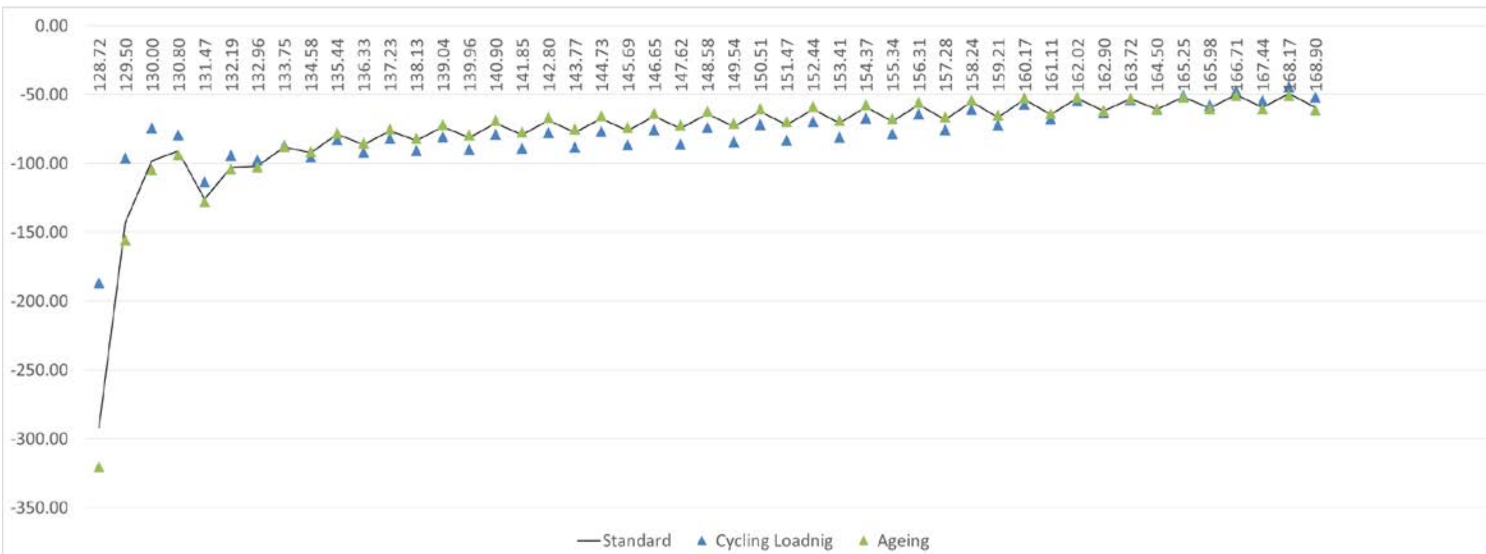
ნახ. 4.46: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-10 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

ცხრილი 4.17:

Aligm	11
Elevation	124.5

Point	7080	7310	7391	7312	7311	7388	7383	7382	7325	7324	7326	7348	7328	7327	7329	7358	7331	7330	7332	7359	7334	7333
X	128.72	129.50	130.00	130.80	131.47	132.19	132.96	133.75	134.58	135.44	136.33	137.23	138.13	139.04	139.96	140.90	141.85	142.80	143.77	144.73	145.69	146.65
Standard	-292.22	-143.05	-98.23	-90.99	-125.86	-102.69	-101.77	-87.87	-92.38	-78.99	-86.38	-76.25	-83.42	-73.47	-81.22	-70.78	-79.23	-68.82	-77.53	-67.43	-76.07	-65.90
Cycling Loadnig	-186.77	-95.90	-73.99	-79.17	-113.29	-94.09	-97.39	-86.98	-95.10	-82.57	-91.69	-81.85	-90.65	-80.55	-89.84	-78.85	-88.88	-77.68	-87.99	-76.66	-86.57	-75.34
Ageing	-320.08	-155.50	-104.64	-93.66	-127.87	-104.00	-102.45	-87.78	-91.57	-78.02	-85.10	-74.89	-81.73	-71.80	-79.23	-68.89	-77.01	-66.76	-75.13	-65.28	-73.64	-63.69

7335	7360	7337	7336	7338	7361	7340	7339	7341	7362	7343	7342	7344	7363	7350	7349	7351	7352	7346	7345	7347	7389	7173	7172	7174
147.62	148.58	149.54	150.51	151.47	152.44	153.41	154.37	155.34	156.31	157.28	158.24	159.21	160.17	161.11	162.02	162.90	163.72	164.50	165.25	165.98	166.71	167.44	168.17	168.90
-74.72	-64.04	-73.41	-62.33	-72.18	-60.72	-70.97	-59.09	-69.64	-57.29	-68.07	-55.37	-66.53	-53.33	-64.45	-52.56	-62.10	-53.04	-60.87	-51.78	-60.02	-50.21	-59.25	-49.42	-59.36
-85.75	-73.62	-84.41	-71.68	-82.83	-69.46	-80.75	-66.94	-78.34	-64.04	-75.45	-60.72	-71.97	-56.97	-67.77	-54.54	-63.41	-53.41	-60.44	-50.57	-57.61	-47.16	-54.48	-44.11	-51.82
-72.15	-61.78	-70.83	-60.12	-69.66	-58.63	-68.63	-57.19	-67.51	-55.63	-66.23	-54.00	-65.09	-52.33	-63.46	-51.93	-61.57	-52.76	-60.75	-51.88	-60.34	-50.75	-60.16	-50.51	-60.98



ნახ. 4.47: ვერტიკალური ნორმალური σ_y ძაბვების ეპიურები მე-11 კვეთში როდესაც სისტემაზე მოქმედებს კაშხლის საკუთარი წონა, ჰიდროსტატიკური წნევა სადაწნეო წახნაგზე და ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური დაწნევა წყალსაცავის ფსკერზე (უწყვეტი ხაზი – საპროექტო ვარიანტ, ცისფერი სამკუთხედი – ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით, მწვანე სამკუთხედი – ასაკის გათვალისწინებით).

დასკვნები

1. დიდი ხნის განმავლობაში ექსპლუატაციაში მყოფი ბეტონის კაშხლების არსებული დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანგარიშისას აუცილებელია მიღებული იქნას მხედველობაში მისი ექსპლოატაციის ისტორია.
2. ექსპლუატაციის ისტორის გათვალისწინებისას უნდა ჩატარდეს:
   ა) ბეტონის არაწრფივი დრეკადი რღვევის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა ბრტყელი დეფორმაციის პირობებისათვის;
   ბ) საკონტაქტო ზონის განმსაზღვრელი მოდელის შერჩევა;
   გ) ცოცვადობის დეფორმაციების ანგარიში;
   დ) კაშხალის ტანში ბზარის გაჩენისა და გავრცელების ანალიზი;
   ე) წყალსაცავის ავსება-დაცლის ციკლების რაოდენობის გავლენის ანალიზი ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებზე, კერძოდ მის დრეკადობის მოდულზე;
   ვ) ბეტონის ასაკის გავლენის ანალიზი ბეტონის მექანიკურ მახასიათებლებზე, კერძოდ მის დრეკადობის მოდულზე;
3. ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვა (წყალსაცავის ავსება-დაცლის ციკლები) იწვევს გრავიტაციული კაშხლის ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების საგრძნობ ცვლილებას, კერძოდ ციკლების რიცხვის გაზრდის შედეგად საგრძნობლად მცირდება ბეტონის მექანიკური მახასიეთებელი – დრეკადობის მოდული.
4. დრეკადობის მოდულის გაუარესების მაჩვენებელი და ბეტონის სიმტკიცე პირდაპირ დამოკიდებულია ძაბვით მდგომარეობაზე. მაგალითად, ბეტონის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 51,5% -ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ, როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლია $0.2\sigma_c$ –ის, სადაც σ_c არის ბეტონის სიმტკიცე ერთღერძა კუმშვის დროს. როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლია $0.5\sigma_c$ –ის, დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 29,3% -ით (33390-დან 23620 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ. როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა

ტოლია 0.8σ_c –ის, დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 20,9% -ით (28390-დან 22500 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ;

5. მასალის მახასიათებლების და ბეტონის სიმტკიცის გაუარესების ხარისხი სტატიკური ციკლური დატვირთვების დროს დამოკიდებულია აგრეთვე გამოსაცდელი ბეტონის ნიმუშის ასაკზე. მაგალითად, 28 დღის ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 51,5%-ით (39780-დან 19300 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლია 0.2σ_c –ის. ამავე დროს, 365 დღის (1 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 49,0%-ით (39830-დან 21750 მპა-დე) 150 დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლია 0.2σ_c–ის. 1825 დღის (5 წელიწადი) ასაკის ბეტონის ნიმუშის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობა მცირდება 42,0%-ით (42460-დან 20310 მპა-დე) იგივე რაოდენობის დატვირთვა-განტვირთვის ციკლის მოდების შემდეგ და როდესაც მოდებული ძალისგან გამოწვეული ძაბვა ტოლია 0.2σ_c–ის.
6. ნელი სტატიკური ციკლური დატვირთვა იწვევს ინტერფეისების (კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო სიბრტყე, ბეტონის ფენებს შორის საკონტაქტო სიბრტყეები) მასალის მახასიათებლის (ძვრის მოდული) მნიშვნელოვან ვარდნას;
7. გრიესის გრავიტაციული კაშხლის (შვეიცარია) მაგალითზე შესწავლილი იქნა წყალსაცავის ფსკერზე ვერტიკალური ჰიდროსტატიკური ძალის გავლენა კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს რომ ვერტიკალურ ჰიდროსტატიკურ დაწნევას წყალსაცავის ფსკერზე აქვს შესამჩნევი გავლენა კაშხლის წახნაგებზე ძაბვების მნიშვნელობებზე საკონტაქტო ზედაპირთან ახლოს. ზემოდ ეს გავლენა მცირდება. უშუალოდ კაშხლის ტანში ზოგადად ეს გავლენა უმნიშვნელოა;
8. გრიესის კაშხლის ანგარიშის შედეგები აჩვენებს, რომ სტატიკური ციკლური დატვირთვა (ჩვენს შემთხვევაში 48 ციკლი) მნიშვნელოვნად ცვლის კაშხლის დაძაბულ დეფორმირებულ მდგომარეობას ინტერფეისის ზონაში. ზოგადად ეს

გავლენა ვრცელდება დაახლოებით ინტერფეისიდან ზემოდ კაშხლის 1/4 სიმაღლეზე. ზოგადად შეიძლება ითქვას, რომ ციკლური დატვირთვები კაშხლის დაძაბულ დეფორმირებულ მდგომარეობაზე უარყოფით გავლენას ახდენენ, მაშინ, როდესაც ბეტონის ასაკი პირიქით, აუმჯობესებს მის მექანიკურ მახასიათებლებს.

ლიტერატურა

1. მოწონელიძე, ნ.., ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, ნაწილი I, "განათლება, თბილისი, 1977
2. Гудушаури, И.И. Балочный метод расчета гравитационных плотин треугольного сечения. Известия ТНИИСГЕИ, том 10(44). Госэнергоиздат, М., 1968
3. Флорин, В.А. Расчеты основанийгидротехнических сооружений, Стройиздат, 1948 г
4. Моцонелидзе, А.Н., Полуаналитическое решение задачи определения напряженно-деформированного состояния бетонных плотин. Труды ГПИ, в сб. «Проектирование и строительство гидротехнических сооружений», №8(278), Тбилиси, 1984, с. 34-38
5. Калабегишвили, М., Влияние очередности возведения плотины на ее напряженное состояние. Научные труды ГПИ №1(313), Тбилиси, 1987, сс. 50-54
6. Алберг. Дж., Нильсон, Э., Уолш, Дж. Теория сплайнов и ее приложения – М., Мир, 1972, 316 с.
7. Моцонелидзе, А.Н., Использование сплайн-функции для интерполяции криволинейных поверхностей бетонных плотин. Сообщения АН гсср, Тбилиси, т.106, №1, Апрель, 1982, с. 109-112
8. Motsonelidze, A., Jokhadze, P. Stability and Strength of Gravity Dams fro the Positions of the Catastrophe Theory, Georgian Technical University , Transactions, #1(374), TbilisiS
9. Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. (1973) 'Behaviour of Concrete Under Biaxial Stresses', *J. Engng. Mech. Div., ASCE, Vol. 99, No. EM4, Aug., 853-866.*
10. Lin, Z. (1995) 'Application of Non-Linear Finite Strip Method to Concrete Structures and Tests on Damaged Beams', PhD Thesis, South Bank University, London, UK.
11. Hsieh, S. S., Ting, E. C. and Chen, W. F. (1979) 'An Elastic-Fracture Model for Concrete', *Proc. 3d Eng. Mech. Div. Spec. Conf., ASCE, Austin, Tex., 437-440.*
12. Lekhnitskii, S. G. (1963) 'Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic body', *Translation from Russian, Holden Day, San Francisco*
13. Lin, Z. and Raoof, M. (1993) 'A Simple Biaxial Tangent Constitutive Model for Concrete Under Static Monotonic Loading Only', *Proc. Instn Civ. Engrs, Structs & Bldgs, 99, Feb., 49-54.*

14. Varadarajan, A. and Sharma, K. G. (1989) ‘Effect of a Shear Seam in the Foundation of Karjan Dam’, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 13, 435-442.*
15. Ge Xiurun (1981) ‘Non-Linear Analysis of a Joint Element and its Application in Rock Engineering’, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 5, 229-245*
16. Goodman, R. E. and Dubois, J. (1972) ‘Duplication of Dilatancy in Analysis of Jointed Rocks’, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 98, No. SM4, Apr., 399-422.*
17. Hansen, K. D. and Reinhardt, W. G. (1991) Roller Compacted Concrete Dams, *McGraw-Hill, New York.*
18. Zaitsev, I.V., (1982), ' Modelirovanie Deformatsii i Prochnosti Betona Metodami Mekhaniki Razrushenia ', *Moskva, ' Stroiizdat ', 196 p., (Rus.).*
19. Lordkipanidze, M., Balavadze, K., (1989), ' Novoe Predstavlenie o Rabote Betona vo Vremeni ', *' Soobshenia Akademii Nauk Gruzinskoi SSR ', No. 3, pp. 134-140, (Rus.).*
20. Gobbi, E. and Taliercio, A.L.F., (1998), ' Fatigue Life and Change in Mechanical Properties of Plain concrete under Triaxial Deviatoric cyclic Stresses ', *Magazine of Concrete Research, Rel. 5499, ENEL, Ricerca Polo Idraulico e Strutturale., Milano, 22 p.*
21. Tsitovich, N.A., (1973), ' Mekhanika Gruntov ', *Izdatelstvo ' Visshaia Shkola ', Moskva, 280 p. (Rus).*
22. Alexandrovski S. V., Bagri V. I.., (1970), 'Polzuchest Betona pri Periodicheskikh Vozdeistviakh', *Stroiizdat, Moskva, 164 p. (Rus).*
23. Saouma, V.E., Milner, D., “On Why Fracture Mechanics should be Used in Dam safety Evaluation”, *Dam Engineering,* Vol 7, No. 3, pp. 215-231, Oct. 1996.
24. Henshell, R. D. and Shaw K.G. (1975) "Crack tip finite elements are unnecessary", *Int. J. Numer. Meth. in Engng, Vol. 9, pp. 495 – 507.*
25. Barsoum, R. S. (1976) "On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics", *Int. J. Numer. Meth. in Engng, Vol. 10, pp. 25-37.*
26. Remzi, E. M. (1981) "Boundary integral equation stress analysis of incompressible and nearly incompressible materials", *PhD Thesis, Imperial College, University of London.*
27. Blandford, G. E., Ingraffea, A. R. and Liggett, J. A. (1981) "Two-dimensional stress intensity factor computations using the boundary element method", *Int. J. Numer. Meth. in Engng, Vol. 17, pp. 387-404.*
28. Irwin, G. R. (1958) "Fracture", *in Handbook der Physic, Vol. 79, Springer-Verlag, Berlin, pp. 551-590.*
29. M. Raoof, A. Motsonelidze, V. Abuladze (1998) “Numerical Stability of Zero Thickness Interface Finite Elements in the Zones with High Stress Gradients”, Journal of Power Engineering, N4, 1998, ISSN 1512-0120.

30. M. Raoof, G. Mazza, A. Motsonelidze, V. Abuladze, Constitutive Model for Concrete in Plane Stress State Accounting for the Effect of Fatigue of Concrete under Static Cyclic Loading
31. Motsonelidze, A., Koltuniuk, R., Abuladze, V. A Technique for Complex Static Retrospective Analysis of Old Concrete Gravity Dam, Jurnali “energia” #.2(26), 2003.
32. Osidze, V. I., Khoperia D. L. (1987) “Deformation Parameters of Concrete of Inguri Arch Dam subject to Static Cyclic Compressive Loading”, *in Construction of Hydro Power Stations in Mountainous Regions, EnergoAtomIzdat, Moscow., pp. 52-58, (Rus.).*
33. გალდავა, ლ., ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა წყალსაცავის ფსკერზე ჰიდროსტატიკური დაწნევის გათვალისწინებით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები №. . . თბილისი, 2014