

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

იოსებ უთმელიძე

ხიდების მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური
კოეფიციენტების განსაზღვრის მეთოდოლოგია და წრფივი-
სპექტრული მეთოდის საფუძველზე მიღებული მრუდების
კრიტიკული ანალიზი

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“

შიფრი 0732

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2023 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში
სამშენებლო ფაკულტეტი
საგზაო დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ბორის მაისურაძე

რეცენზენტები: ტ.მ.კ. ზურაბ გელაძე

ასოცირებული პროფესორი კახაბერ კობახიძე

დაცვა შედგება 2023 წლის 12 ივლისს, 12⁰⁰ საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის

სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე,

კორპუსი I, აუდიტორია 508

მისამართი: 0160 თბილისი, მ. კოსტავას №77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი

პროფ. დემურ ტაბატაძე

ნაშრომის საერთო დახასიათება

საქართველოში მშენებლობის სფეროში ძირითადად მოქმედებს ყოფილ საბჭოთა კავშირის პერიოდში დამუშავებული ნორმატიული დოკუმენტები. მას შემდეგ რაც საქართველო ევროკავშირის ასოცირებული წევრი გახდა აუცილებლობა შეიქმნა მოქმედი ნორმატიული დოკუმენტების მისადაგება ევროკავშირის ნორმატიულ დოკუმენტაციასთან, რის საშუალებასაც (თავისი სტრუქტურით) იძლევა ეს უკანასკნელი. ამ მიზნის მისაღწევად ძალზე შრომატევადი სამუშაოებია ჩასატარებელი, რომელმაც უნდა მოიცვას ხიდების სეისმომედეგობის გათვალისწინებით მშენებლობის ყველა სფერო.

ევროპული ნორმების (ეგრეთ წოდებული ევროკოდების - EN) სტრუქტურა ითვალისწინებს ეროვნულ დანართის შექმნას, რომლებიც ადაპტირებული უნდა იყოს ევროკოდების საერთო პრინციპებთან. კონკრეტულად სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრისათვის შესაძლებელია უშუალოდ ევროკოდებში რეკომენდაციის სახით მოცემული მეთოდოლოგიისა და მრუდების გამოყენება, შესაძლებელია აგრეთვე მათი შეცვლა ეროვნული დანართით, რასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს, რადგან საქართველოს ტერიტორიის უდიდესი ნაწილი სეისმოაქტიურ ზონაშია განთავსებული.

ყველა არსებულ ნორმატიულ დოკუმენტაციაში სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრის საფუძველს წარმოადგენს ერთმასიანი კონსოლური სისტემა წრფივი ოსცილატორის სახით (ვერტიკალურად განთავსებული ელემენტი), რომლის მეშვეობითაც მიიღება ცნობილი მრუდები (დინამიკური კოეფიციენტების დამოკიდებულობის გრაფიკები ნაგებობის საკუთრი რხევების პერიოდებზე), განურჩევლად ნაგებობის საანგარიშო სქემისა. მაგალითად ხიდების მალის ნაშენებისათვის (ჰორიზონტალური ელემენტებისათვის) და ბურჯებისათვის (ვერტიკალური ელემენტებისათვის) ზემოთ აღნიშნული მრუდები იდენტურია, შესაბამისად სეისმომედეგობის სპექტრული თეორია ეფუძნება დაშვებას - ნაგებობის დინამიკური რეაქციები (აჩქარებები) არ არის დამოკიდებული საანგარიშო სისტემაზე.

უმნიშვნელოვანეს საკითხში (სპექტრული თეორიის ამ დაშვებაში) მეტი სიცხადის შეტანისათვის აღსანიშნავია მთავარი, რომ სტატიკურ დატვირთვებზე

განგარიშება წარმოებს ნაგებობის კონკრეტული საანგარიშო სქემის საფუძველზე, რაც სეისმურ დატვირთვებზე განგარიშებისას შენარჩუნებულია მხოლოდ საკუთარი რხევის პერიოდების განსაზღვრისათვის, მათ საფუძველზე განსაზღვრული სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების კი კონკრეტულ საანგარიშო სქემას უკვე აღარ ითვალისწინებს, რადგან წრფივი ოსცილატორის დინამიკური რეაქციები (აჩქარებები) და მათ საფუძველზე დამუშავებული მრუდები ითვლება უნივერსალურად ყველა სახეობის ნაგებობისათვის - ძალზე დიდი დაშვებაა, რადგან სწორედ სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტებია ის მთავარი კომპონენტი, რომელიც განსაზღვრავს სეისმური ზემოქმედების სიდიდეს და შესაბამისად ნაგებობაში განვითარებულ ძალებს.

სეისმურ დატვირთვებზე განგარიშება გარდა სპექტრული თეორიისა, რომელიც სეისმურ ინტენსივობას სეისმურობის უგანზომილებო კოეფიციენტით ითვალისწინებს (ბალიანობის შესაბამისი აჩქარებების მაქსიმალური მნიშვნელობები), გამოიყენება მეორე მეთოდიც - მიწისძვრების რეალური ინსტრუმენტული ჩანაწერები (ძირითადად აქსელეროგრამები), რომელიც ძირითადი მეთოდია გეომეტრიულად არაწრფივი ამოცანების შემთხვევაში. ამ მეთოდის გამოყენება განსაკუთრებით ეფექტურია მაშინ, როდესაც არსებობს ჩანაწერების სოლიდური მონაცემთა ბანკი, რომლებიც გარკვეული სიზუსტით ასახავენ მოცემულ რეგიონში მიწისძვრების ხასიათს.

ყველა საერთაშორისო ნორმებში (მათ შორის საქართველოში მოქმედ ნორმებშიც) მოთხოვნილია, რომ საანგარიშოდ შერჩეული რეალური ჩანაწერი იყოს ყველაზე სახიფათო მოცემული ნაგებობისათვის (შერჩეულმა რეალურმა ჩანაწერმა, აჩქარებების სახით, უნდა უზრუნველყოს კონკრეტულ ნაგებობაში მაქსიმალური ძალების განვითარება), მაგრამ არ არის მოცემული განგარიშებისათვის საჭირო რეალური ჩანაწერის შერჩევის მეთოდოლოგია, რომელსაც ამ მიზნის მისაღწევად გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს.

თემის სამეცნიერო აქტუალობა. საქართველოში ძირითადად მოქმედებს ყოფილ საბჭოთა კავშირის პერიოდში დამუშავებული ნორმატიული დოკუმენტები, თუმცა დღესდღეისობით განგარიშებებში უპირატესობა ენიჭება

ამერიკულ ნორმებს AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Official) და ევროპულ სტანდარტებს EN (European Standard).

ევროკოდები ისეთი ნორმატიული დოკუმენტია, რომელიც ითვალისწინებს ეროვნულ დანართის შექმნას, რომლებიც ადაპტირებული უნდა იყოს ევროკოდების ძირითად პრინციპებთან. ასეთი ნორმატივის მნიშვნელოვანი შემადგენელი ნაწილია სეისმური მშენებლობის ნორმები, რომლის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მოცემულობაა რეაქციის სპექტრების განსაზღვრა.

საქართველოში მოქმედ ნორმატიული დოკუმენტაციიდან ევროკოდებზე გადასვლა გულისხმობს სეისმურ დატვირთვებზე გაანგარიშებისას ძირითადად რეალური (ან სინთეზური) აქსელეროგრამების გამოყენებას, რომლებიც გარკვეული სიზუსტით უნდა ასახავდნენ მოცემულ რეგიონში მიწისძვრების მოსალოდნელ ხასიათს. რეალური ჩანაწერების ან მათ საფუძველზე მიღებული სინთეზური აქსელეროგრამების შერჩევის წესს (საანგარიშო აქსელეროგრამების შერჩევის წესს) გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს მაქსიმალური ძალების მისაღებად, რაც წესით ასახული უნდა იყოს საერთაშორისო ნორმატიულ დოკუმენტაციაში. მაგრამ ამ მნიშვნელოვან საკითხს ყველა ცნობილი ნორმატივი გვერდს უვლის.

ძალზე აქტუალურია აღნიშნულ საკითხში სიცხადის შეტანა და აუცილებლობას წარმოადგენს ისეთი მეთოდოლოგიის დამუშავება, რომლის საფუძველზეც შესაძლებელი გახდება მოცემული კონკრეტული ნაგებობისათვის (მათ შორის ხიდების ძირითადი ორი მზიდი ელემენტებისათვის - მალის ნაშენებისათვის და ბურჯებისათვის) მონაცემთა ბანკიდან შეირჩეს ისეთი საანგარიშო რეალური ჩანაწერი, რომელიც უზრუნველყოფს ნაგებობებში მაქსიმალური ძალების აღძვრას, აღნიშნული საკითხი წარმოადგენს მოცემული სამეცნიერო ნაშრომის ერთ მიმართულებას.

ამასთანავე აუცილებლობას წარმოადგენს რომ დამუშავებული მეთოდოლოგია გამოყენების თვალსაზრისით იყოს მარტივი მომხმარებლებისათვის, რაც გაზრდის მის პრაქტიკულ დანიშნულებას.

ასევე აქტუალურია სეისმომედეგობის სპექტრული თეორიის დინამიკური კოეფიციენტების მრუდების კრიტიკული ანალიზი და მათი გამოყენების არეალის

დადგენა გარკვეული ტიპის მალის ნაშენებისათვის და იმ შემთხვევაში, თუ კონკრეტული ამოცანა თავის შედეგებით აღმოჩნდა გამოყენების არეალის მიღმა - მაშინ საჭიროა მეთოდოლოგიის დამუშავება ამ კლასის ამოცანებისათვის.

სამეცნიერო სიახლე. ნაშრომის სამეცნიერო სიახლეა:

- ხიდების მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრის და აქსელეროგრამების შერჩევის მეთოდოლოგიის დამუშავება;
- ხიდების მალის ნაშენებისათვის სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების სიდიდის განსაზღვრა;
- სხვადასხვა სისტემის ხიდების მალის ნაშენებისათვის ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის მრუდის აგება;
- EN-ში ეროვნული დანართისათვის სარეკომენდაციო დებულებების შედგენა.

სამუშაოს მიზანი. ხიდების მალის ნაშენების სეისმურ დატვირთვებზე გაანგრიშების მეთოდოლოგიის დამუშავება, რომელიც საშუალებას მოგვცემს შეირჩეს აქსელეროგრამების მონაცემთა ბანკიდან საანგარიშო აქსელეროგრამა (ან მათი ჯგუფი), რომელთა საფუძველზეც რხევის პროცესში კონსტრუქციაში განვითარდება მაქსიმალური ძალები.

სეისმომდეგობის სპექტრული თეორიის დინამიკური კოეფიციენტების მრუდების კრიტიკული ანალიზი ხიდების მალის ნაშენების შემთხვევაში და მათი გამოყენების არეალის განსაზღვრა, ხოლო იმ ამოცანათა კლასისათვის რომლებიც გასულია ამ არეალიდან, მეთოდოლოგიის შემუშავება, რომლის გამოყენების შემთხვევაში უზრუნველყოფილი იქნება გაანგარიშებისათვის საჭირო სიზუსტის შედეგები.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ხიდების მალის ნაშენები, კერძოდ კი ჭრილკოჭური სისტემის რკინაბეტონის მალის ნაშენები, რომლებიც შედგენილია ანაკრები წინასწარ დაძაბული კოჭებისაგან, სიგრძით $L= 15.0, 18.0, 21.0, 24.0, 33.0$ მ.

განხილულია აგრეთვე ჭრილკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენები, სიგრძით $L=42.6, 63.6$ მ და უჭრკოჭური სისტემის

ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენები, საანგარიშო სქემებით: 42+63+42 მ, 3x63 მ, 63+2x84+63 მ.

ორივე ტიპის მალის ნაშენისათვის მიღებულია სავალი ნაწილის გაბარიტი 11.5 მ, ორმხრივი ტროტუარების სიგანით 1.5 მ.

სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე გაანგარიშება ჩატარებული იქნა მუდმივი დატვირთვების ნორმატიული მნიშვნელობებისათვის, რაც იძლევა ანალიზის საშუალებას, როდესაც ამოცანები რეალიზებულია სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტების საფუძველზე.

მალის ნაშენის საკუთარი რხევის სიხშირეთა სპექტრი და შესაბამისი რხევის პერიოდები განისაზღვრა საანგარიშო კომპლექს MIDAS Civil 2019-ის დახმარებით. საანგარიშო აქსელეროგრამები შეირჩა გაერთიანებული ევროპის პროექტის „Internet-Site for European Strong-Motion DataBase” და იტალიის აქსელერომეტრიული არქივის - Italian Accelerometric Archive მონაცემთა ბაზიდან, ხოლო მათი ჰარმონიკებად დაშლაში გამოყენებულია ფურიეს მწკრივების თეორიის საფუძველზე დამუშავებული რიცხვითი გამოთვლითი პლატფორმა MATLAB.

მალის ნაშენების აჩქარებები (მახასიათებელ დისკრეტულ წერტილებში) განისაზღვრა საანგარიშო კომპლექს MIDAS Civil 2019-ის დახმარებით, ხოლო რეაქციის სპექტრები აიგო საანგარიშო კომპლექს SeismoSignal-ის გამოყენებით, რომელიც საფუძვლად დაედო დინამიკური კოეფიციენტების მრუდების აგებას.

კვლევის ძირითადი მიზანი და ამოცანები. ხიდების მალის ნაშენების სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრა და მათ მისაღებად დამუშავდა მეთოდოლოგია, რომლის საფუძველზეც აქსელეროგრამების მონაცემთა ბანკიდან შესაძლებელია შეირჩეს ისეთი აქსელეროგრამა, რომელიც კონკრეტულ კონსტრუქციაში რხევის პროცესში განაპირობებს ძაღვების მაქსიმალურ სიდიდეს.

წრფივი-სპექტრული თეორიის საფუძველს დინამიკური მრუდების სახით წარმოადგენს წრფივი ოსცილატორის (ვერტიკალური კონსოლური ღერო კონსოლის ბოლოში ერთი მასით) ბაზაზე მიღებული სეისმური რეაქციები

აჩქარებების სახით, რაც არ ითვალისწინებს სხვადასხვა კონსტრუქციების ძალზე მრავალფეროვან საანგარიშო სქემებს.

აქედან გამომდინარე, აუცილებლობას წარმოადგენს სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრა კონკრეტული სისტემის მალის ნაშენებისათვის. მრუდები იგება კონკრეტული მალის ნაშენებისათვის და ხდება მათი შედარება სხვადასხვა ნორმატივებში მოცემულ მრუდებთან, რაც შესაბამის ანალიზს ექვემდებარება.

კვლევის შედეგების გამოყენების სფერო. სადისერტაციო ნაშრომს გააჩნია პრაქტიკული ღირებულება ხიდმშენებლობის სფეროში. ჩატარებული კვლევები საფუძველს იძლევა ხიდების მალის ნაშენების გაანგარიშებაში დაზუსტდეს მიწისძვრის ვერტიკალური რეაქციის სპექტრების მრუდები EN-ის ეროვნულ დანართში მათი გამოყენების მიზნით და შემუშავდეს აღნიშნული სტანდარტისათვის დანართში გასათვალისწინებელი რეკომენდაციები, რაც საბოლოო ჯამში მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს ხიდების სეისმომედეგობის გაანგარიშების სფეროში.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ცალკეული შედეგები მოხსენებული იყო 2021 წლის 28-30 ივლისს ZOOM პლატფორმაზე II საერთაშორისო სამეცნიერო -პრაქტიკულ სემინარზე **"ევროპული ინოვაციური ტექნოლოგიები მშენებლობაში და გარემოს ინჟინერიაში"**; 2021 წლის 9-11 სექტემბერს ქ. ქუთაისში საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XII საერთაშორისო კონფერენციაზე; 2022 წლის 20-22 მაისს ქ. ერევანში საერთაშორისო სამეცნიერო და ტექნიკურ კონფერენციაზე **"საინჟინრო მეცნიერებათა პრობლემები"**; 2022 წლის 24-26 ივნისს ქ. თბილისში საერთაშორისო კონფერენციაზე **„მულტიდისციპლინარული სამეცნიერო კვლევების გლობალური პრაქტიკა“**; 2022 წლის 27-29 ივლისს ქ. თბილისში სტუდენტთა საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - **„ინოვაციური ტექნოლოგიები ინჟინერიაში“**; 2022 წლის 24-26 აგვისტოს ქ. ბათუმში საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XIII საერთაშორისო კონფერენციაზე და 2023 წლის 16-17 თებერვალს ქ. თბილისში სტუდენტთა საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - **„ინოვაციური ტექნოლოგიები ინჟინერიაში“**.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემის ირგვლივ სხვადასხვა ქვეყნის რეფერირებულ ჟურნალში გამოქვეყნებულია 5 სამეცნიერო სტატია და 1 მონოგრაფია.

დისერტაციის სტრუქტურა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება: შესავლის, ორი თავის, დასკვნის, გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხის 65 დასახელებით, 29 ცხრილისა და 104 ნახაზისაგან. ნაშრომი წმოდგენილია 150 ნაბეჭდ გვერდზე.

ნაშრომის შინაარსი

ნაშრომის პირველ თავში - „ლიტერატურის მიმოხილვა“ - მოყვანილია სეისმური დატვირთვებზე გაანგარიშების თეორიები და სხვადასხვა ნორმატიულ დოკუმენტაციაში მიღებული სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტები. ასევე წარმოდგენილია სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის, დინამიკური თეორიის და სპექტრული თეორიის კრიტიკული ანალიზი.

1.1. ქვეთავში - სეისმურ დატვირთვებზე გაანგარიშების თეორიები - მოყვანილია სეისმომედეგობის სტატიკური, დინამიკური და სპექტრული თეორიები.

1.1.1. ქვეთავში - სეისმომედეგობის სტატიკური თეორია - მოყვანილია სტატიკური თეორიის აღწერა.

თეორიის მიხედვით ნაგებობის გაანგარიშებისას დინამიკური ზემოქმედების ძალები იცვლებოდა სტატიკური ძალებით $F(t) = F$, ამიტომაც ეწოდა ამ თეორიას „სტატიკური“ თეორია.

ამ თეორიის მთავარი დაშვებაა, რომ ნაგებობის აჩქარებები გაიგივებულია ფუძის გრუნტების აჩქარებებთან, რაც ერთადერთ შემთხვევაშია შესაძლებელი - თუ ნაგებობა განიხილება როგორც აბსოლუტურად ხისტი მყარი ტანი, ნულოვანი დრეკადი გადადგილებებით, რაც რეალობისაგან შორსაა.

სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის შექმნის საფუძველს წარმოადგენს დაშვება, რომლის მიხედვით გარკვეული დროის პერიოდში განვითარებული ნაგებობის რხევითი პროცესი განხილულია მყისიერ აქტად და სეისმური დატვირთვები წარმოდგენილია სტატიკური დატვირთვის ნაწილის სახით $F = kQ$, რაც სრულფასოვნად ვერ ასახავს ნაგებობათა რხევის პროცესს - საანგარიშო მოდელი ძალზე გამარტივებულია, რადგან გარდა მყისიერი დატვირთვისა და

მისგან გამოწვეული მყისიერი გადაადგილებებისა არსებობენ დრეკადი გადაადგილებებიც, რომლებიც დროის ფუნქციას წარმოადგენენ.

1.1.2. ქვეთავში - სეისმომედეგობის დინამიკური თეორია - მოყვანილია დინამიკური თეორიის აღწერა.

სტატიკური თეორიისაგან განსხვავებით, ამ თეორიის მიხედვით სეისმური ზემოქმედება განიხილება როგორც იძულებითი დინამიკური ზემოქმედება, რომელიც ნაგებობაში იწვევს იძულებით რხევებს. ამიტომ ეს ზემოქმედება ზოგადად აისახება სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტით $\beta = \frac{1}{1 - (\frac{\theta}{\varphi})^2}$,

რომლის განსაზღვრისათვის საჭირო იყო უპირველეს ყოვლისა თავისუფალი (საკუთარი) რხევის φ სიხშირეების განსაზღვრა, ხოლო შემდეგ განისაზღვრებოდა სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტი $\beta = f(\varphi, \theta)$, იმ მოცემულობის გათვალისწინებით რომ მიწისძვრის დომინანტური რხევის სიხშირეების და შესაბამისი პერიოდების ზუსტი განსაზღვრა შეუძლებელია. მიწისძვრის ზემოქმედების სიხშირე θ შეირჩეოდა მოცემული საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების მიხედვით.

1.1.3. ქვეთავში - სეისმომედეგობის სპექტრული თეორია - მოყვანილია სპექტრული თეორიის აღწერა.

სეისმომედეგობის სპექტრულ თეორიაში მთავარი აქცენტი გადატანილია დინამიკური მრუდების მიღებაზე, რომელმაც ფართო გავრცელება ჰპოვა და აისახა საერთაშორისო ნორმატიულ დოკუმენტაციაში.

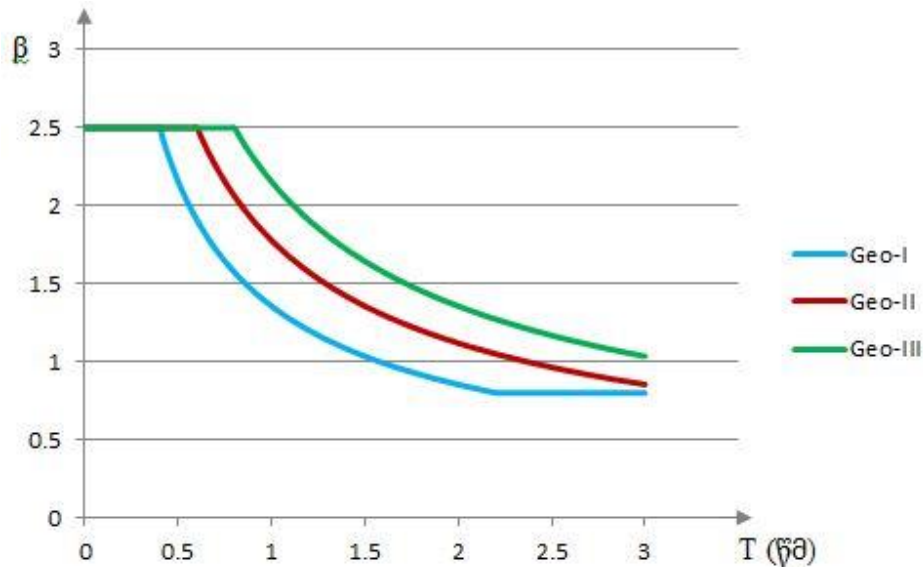
დინამიკური მრუდების მისაღებად კონსტრუირებული იყო დრეკადი სისტემა ერთი თავისუფლების მქონე ხარისხით, რომელსაც ჰქონდა თავისუფალი რხევის სიხშირეების (შესაბამისად პერიოდების) რეგულირების საშუალება (წრფივი ოსცილატორი).

სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების მრუდები მიღებულია ერთმასიანი წრფივი ოსცილატორის ბაზაზე, რაც ვერ მოიცავს ნაგებობათა სხვადასხვა მრავალფეროვან საანგარიშო სქემების მთელ სპექტრს, რაც ამ მოქმედი თეორიის ძირითადი ნაკლია.

1.2. ქვეთავში - სხვადასხვა ნორმატიულ დოკუმენტაციაში მიღებული სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტები - მოყვანილია საქართველოს,

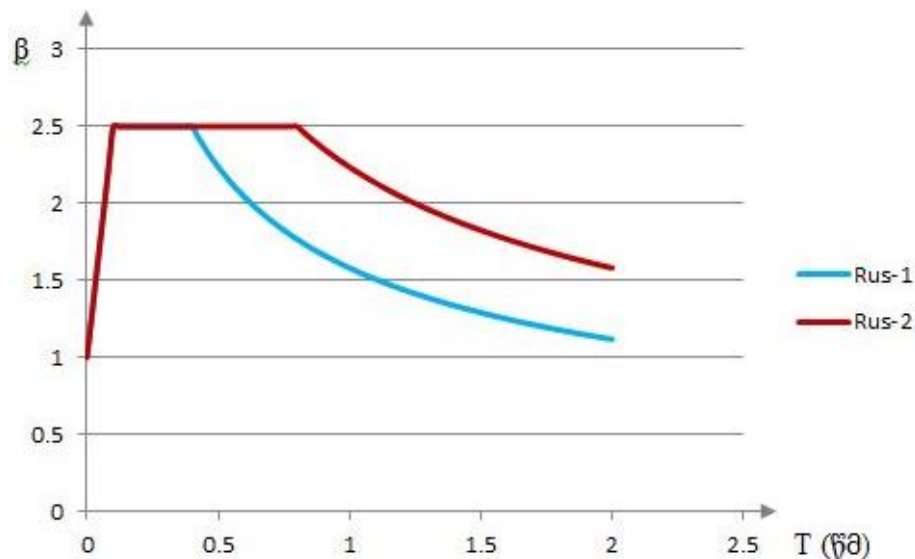
რუსეთის ფედერაციის, ევპორულ და აშშ-ის ნორმატივებში მოცემული სპექტრული მრუდები.

1.2.1. ქვეთავში - საქართველოში მიღებული ნორმატივის მიხედვით მიღებული სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტები (სპექტრული მრუდები) - მოყვანილია საქართველოში მოქმედი ნორმატიული დოკუმენტში მოცემული სპექტრული მრუდები.



ნახ. 1. სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების სპექტრული მრუდები გრუნტების კატეგორიის მიხედვით (პირობითად Geo სტანდარტით)

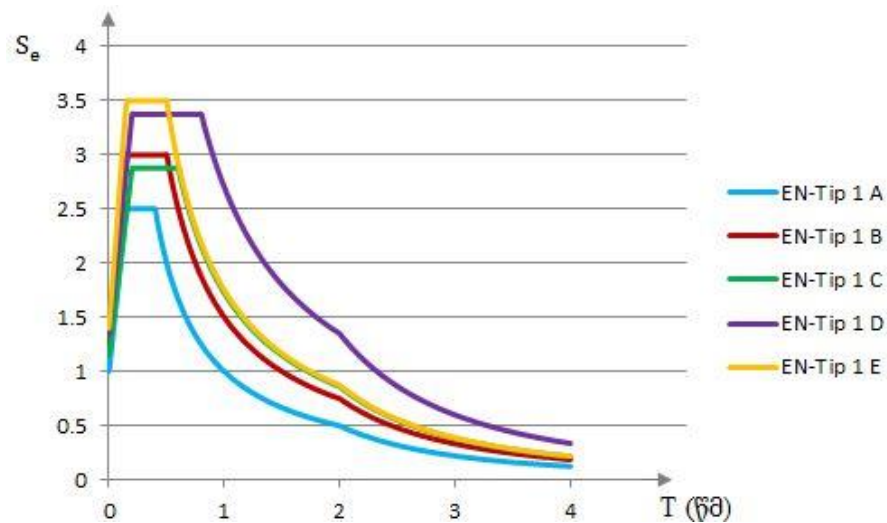
1.2.2. ქვეთავში - რუსეთის ფედერაციაში მიღებული ნორმატივის მიხედვით მიღებული სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტები (სპექტრული მრუდები) - მოყვანილია რუსეთის ფედერაციაში მოქმედი ნორმატიული დოკუმენტში მოცემული სპექტრული მრუდები.



ნახ. 2. სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების სპექტრული მრუდები (პირობითად Rus სტანდარტით)

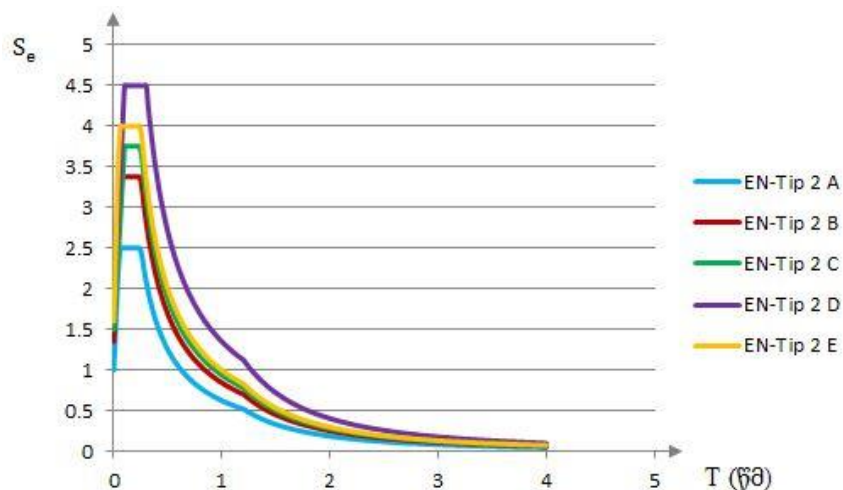
1.2.3. ქვეთავში - ევროპული ნორმატივების მიხედვი მიღებული დრეკადი რეაქციის სპექტრები (სპექტრული მრუდები) - მოყვანილია ევროპული ნორმატივებით სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების სიდიდის განსაზღვრა, რომელიც ეფუძნება დრეკადი რეაქციების განსაზღვრას. სეისმური დატვირთვების განსაზღვრას არეგულირებს ნორმატიული დოკუმენტი „სეისმომდეგი კონსტრუქციების დაპროექტება (EN 1998)“.

1-ლი ტიპის შესაბამისი ჰორიზონტალური დრეკადი რეაქციის სპექტრი (5%-იანი მილევის კოეფიციენტით) მოცემულია ნახ. 5-ზე.



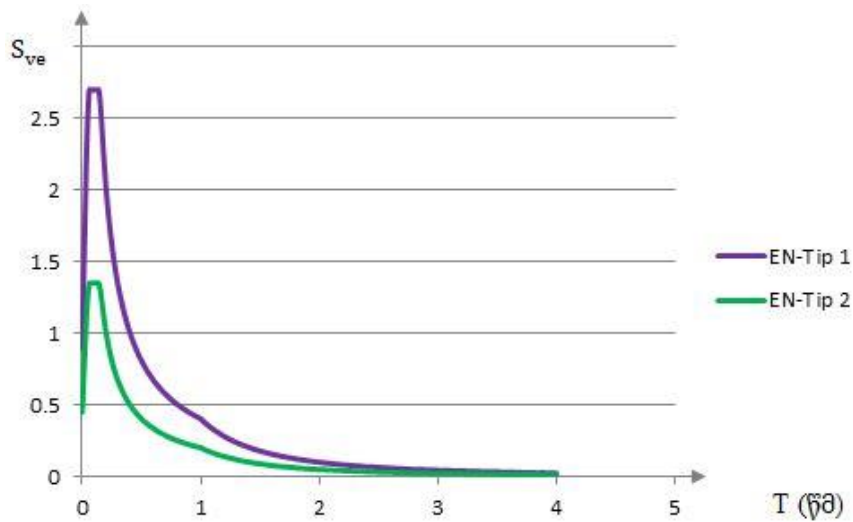
ნახ. 3. 1-ლი ტიპის დრეკადი რეაქციის სპექტრი

მე-2 ტიპის შესაბამისი ჰორიზონტალური დრეკადი რეაქციის სპექტრი (5%-იანი მილევის კოეფიციენტით) მოცემულია ნახ. 6-ზე.



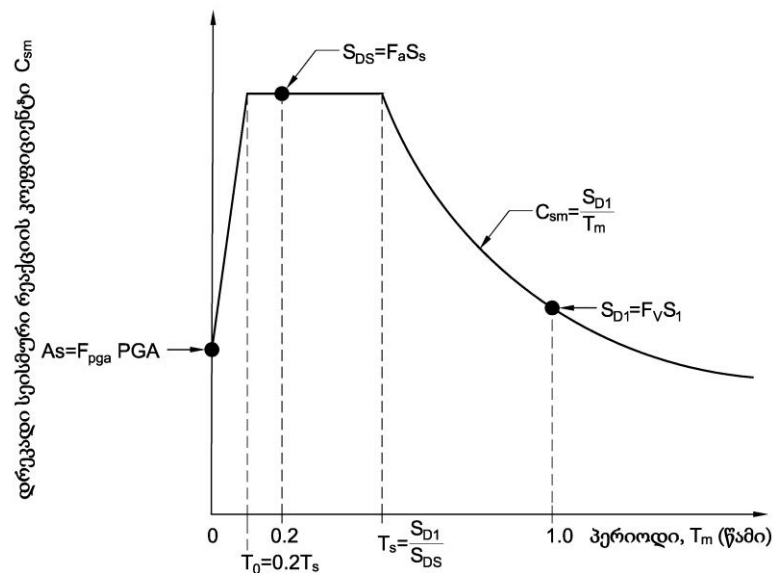
ნახ. 4. მე-2 ტიპის დრეკადი რეაქციის სპექტრი

1-ლი და 2-ლი ტიპებისათვის ვერტიკალური დრეკადი რეაქციის სპექტრული მრუდები (5%-იანი მილევის კოეფიციენტებით) მოცემულია ნახ. 7-ზე.



ნახ. 5. 1-ლი და მე-2 ტიპის მიწისძვრებისათვის ვერტიკალური დრეკადი რეაქციის სპექტრული მრუდები

1.2.4. ქვეთავში - აშშ-ის ნორმატივების მიხედვი მიღებული დრეკადი სეისმური რეაქციის კოეფიციენტები (სპექტრული მრუდები) - მოყვანილია აშშ-ში მიღებულია სტანდარტი - AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS (საპროექტო სპეციფიკაციები), რომელშიც სპექტრები დამოკიდებულია გრუნტის პიკური აჩქარების კოეფიციენტზე PGA , სპექტრული აჩქარების კოეფიციენტზე $T=0.2$ წამის შემთხვევაში S_s და სპექტრული აჩქარების კოეფიციენტზე $T=1.0$ წამის შემთხვევაში S_1 .



ნახ. 6. საანგარიშო რეაქციის სპექტრი

1.3. ქვეთავში - სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის კრიტიკული ანალიზი - მოყვანილია სეისმომედეგობის სტატიკური თეორიის ანალიზი, რომელიც აჩვენებს, რომ სრულფასოვნად ვერ ასახავს ნაგებობათა რხევის პროცესს.

ამ თეორიის საფუძველი ის დაშვებაა, რომ ნებისმიერი კონსტრუქციის ნაგებობა განიხილება როგორც აბსოლუტურად ხისტი მყარი ტანი, ნულოვანი დრეკადი გადაადგილებებით (რაც რეალობისაგან შორსაა), ამ დაშვებამ კი თავისთავად განაპირობა მეორე დაშვება, რომლითაც ნაგებობების რეაქციად (გარკვეულ დისკრეტულ წერტილებში განვითარებულ მაქსიმალურ აჩქარებებად) ითვლება მიწისძვრის მაქსიმალური აჩქარებები (ბალიანობის მიხედვით 0.1g, 0.2g და 0.4g) და არა კონსტრუქციის დრეკადი გადაადგილებებით განპირობებული აჩქარებები, რომლებიც რიგ შემთხვევაში შესაძლებელია აღემატებოდნენ მიწისძვრის მაქსიმალურ აჩქარებებს.

1.4. ქვეთავში - სეისმომედეგობის დინამიკური თეორიის კრიტიკული ანალიზი - მოყვანილია სეისმომედეგობის დინამიკური თეორია, რომელშიც მოძრაობის განტოლებებს არაერთგვაროვან დიფერენცირებულ განტოლებათა სახე აქვს, რომლის მარჯვენა ნაწილით გამოისახება იძულებითი რხევები.

როგორც ყველა რთული ფუნქციის აპროქსიმაცია და ჩაწერა ჰარმონიული ფუნქციების სახით, აქაც ფუნქციის აპროქსიმაცია და ჩაწერა ფუნქციის ჰარმოკების სახით დაკავშირებულია მნიშვნელოვან დაშვებებთან, რაც მიღებულ შედეგებზეც ჰპოვებს ასახვას. ეს გარემოება ამცირებს გაანგარიშების შესაძლებლობებს და რიგ შემთხვევებში მიუღებელს ხდის მის შედეგებს.

1.5. ქვეთავში - სეისმომედეგობის სპექტრული თეორიის კრიტიკული ანალიზი - მოყვანილია სეისმომედეგობის სპექტრული თეორია, რომლის საფუძველს წარმოადგენს საკუთარი (თავისუფალი) რხევების სიხშირეთა φ_i (შესაბამისად პერიოდების T_i) სპექტრის განსაზღვრა, რომელთა საფუძველზეც განისაზღვრება სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტები, შესაბამისი მრუდების $\beta_i = f(T_i)$ გამოყენებით.

პროგრესის მიუხედავად, რომ შესაძლებელი გახდა სეისმომედეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრა კონსტრუქციის დინამიკური რეაქციების საფუძველზე, თეორია ერთ მთავარ დაშვებას ეფუძნება - დინამიკური რეაქციების (შესაბამისად $\beta_i = f(T_i)$ მრუდების) განსაზღვრა ეფუძნება ვერტიკალური ელემენტის ერთმასიანი კონსოლური სისტემის ხისტად

ჩამაგრებული ოსცილატორის მონაცემებს და არ ითვალისწინებს სხვადასხვა კონსტრუქციების ძალზე მრავალფეროვან საანგარიშო სქემებს.

ნაშრომის მეორე თავში - „კვლევა, შედეგები და მათი განსჯა” - მოყვანილია კვლევის მეთოდოლოგია, რეალიზებული ამოცანები და მიღებული შედეგები და მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრა.

2.1. ქვეთავში - კვლევის მეთოდოლოგია - მოყვანილია ხიდების მალის ნაშენებისათვის ყველაზე საშიში სეისმური ზემოქმედების (აქსელეროგრამების) შერჩევის მეთოდოლოგია.

2.1.1. ქვეთავში - ხიდების მალის ნაშენებისათვის ყველაზე საშიში სეისმური ზემოქმედების (აქსელეროგრამების) შერჩევის მეთოდოლოგია - მოყვანილია ხიდის მალის ნაშენებზე სეისმური ზემოქმედების შერჩევა, რომელიც ეფუძნება კრიტერიუმს, რომ შეირჩეს ისეთი აქსელეროგრამა, რომელიც განაპირობებს მალის ნაშენზე მაქსიმალური ძაღვების განვითარებას. შერჩეული აქსელეროგრამის საფუძველზე კი კონკრეტული ხიდის მალის ნაშენისათვის დამუშავდება შესაბამისი ვერტიკალური სპექტრის მრუდები.

პირველი ეტაპი მოიცავს საანგარიშო კონსტრუქციის (სახიდე გადასასვლელების მალის ნაშენების) საკუთარი რხევის პერიოდების განსაზღვრას;

- მეორე ეტაპზე მონაცემთა ბანკიდან უნდა შეირჩეს აქსელეროგრამების ჯგუფი იდენტური (ან მაქსიმალურად მიახლოებული) მაგნიტუდებით და შესაბამისი მიწისძვრის ინტენსივობით, რომლებიც ესადაგებიან საპროექტო ობიექტის ადგიმდებარეობას.

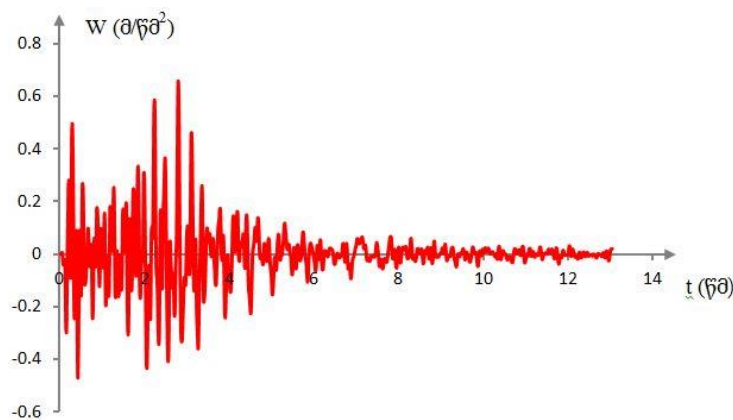
მნიშვნელოვანი, რომ აქსელეროგრამების შერჩეული ჯგუფი ხასიათდებოდეს ძირითადი ფაზით (დროის მონაკვეთით, რომელზეც პიკური მნიშვნელობები მაქსიმუმს აღწევენ), რომლებსაც ხანგრძლივი დროის პერიოდი გააჩნიათ.

- მესამე ეტაპზე თითოეული აქსელეროგრამიდან გამოიყოფა ძირითადი ფაზები (როგორც მთლიანი აქსელეროგრამის მახასიათებელი მონაკვეთები), რომლებიც ექვემდებარებიან ჰარმონიულ ფუნქციებად (ჰარმონიკებად) დაშლას, რაც იძლევა საშუალებას რომ განისაზღვროს თითოეული ჰარმონიკის შესაბამისი რხევის სიხშირეების, შესაბამისად რხევის პერიოდებს (პირველი რხევის ფორმის,

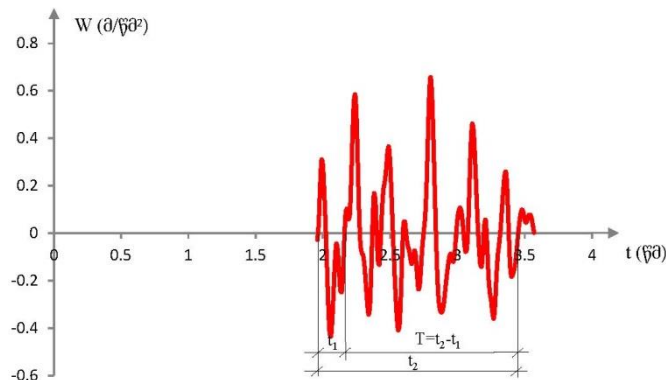
როგორც დომინანტური ფორმის პრიორიტეტით), სწორედ ეს აქსელეროგრამა (აქსელეროგრამების ჯგუფიდან შერჩეული აქსელეროგრამა) მიიღება საანგარიშო აქსელეროგრამად.

- მეოთხე ეტაპზე საანგარიშო აქსელეროგრამის საფუძველზე რეალიზდება კონკრეტული ამოცანა (განისაზღვრება მალის ნაშენში განვითარებული ძალები), რაც იძლევა შესაბამისი ანალიზის საშუალებას (მიღებული შედეგები შედარდება სპექტრული თეორიით მიღებულ შედეგებთან), რამაც ცხადყო, რომ დამუშავებული მეთოდოლოგიით ძალების სიდიდეები მნიშვნელოვნად აღემატება სპექტრული თეორიით მიღებულ შედეგებს, რაც ცაკლე განსჯის საგანია.

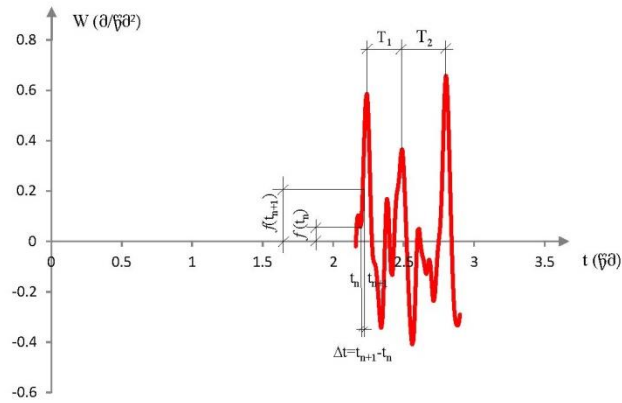
თეორიულად შესაძლებელია აქსელეროგრამების (ნახ. 7) დაშლა მისი მოქმედების მთელი პერიოდისათვის, ჩვენი ამოცანისთვის კი საკმარისია გამოიყოს მთავარი ფაზა (მახასიათებელი მონაკვეთი, რომელზეც აჩქარებების მნიშვნელობები განსაკუთრებით დიდია) და ჰარმონიკებად დაიშალოს აქსელეროგრამის ეს მონაკვეთი (ნახ. 8).



ნახ. 7. მიწისძვრის ჩანაწერი აქსელეროგრამის სახით



ნახ. 8. აქსელეროგრამიდან გამოყოფილი ფაზა, რომელიც ექვემდებარება ჰარმონიკებად დაშლას



ნახ. 9. გამოყოფილ ფაზაში იტერაციული პროცესის ბიჯი (დროითი ბიჯი) და მისი შესაბამისი ორდინატები - აჩქარებები

ფურცეს მწკრივს $f(t)$ ფუნქციისათვის დროის T ინტერვალში (აქსელოგრაშიდან გამოყოფილი ფაზის განმავლობაში) აქვს შემდეგი სახე :

$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cdot \cos \pi k \frac{t}{T} + B_k \cdot \sin \pi k \frac{t}{T} \right) \quad (1)$$

სადაც:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d\tau, \quad A_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos \pi n \frac{t}{T} d\tau \quad \text{და} \quad B_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin \pi n \frac{t}{T} d\tau;$$

-მწკრივის კოეფიციენტებია.

მთავარი ფაზა T იყოფა დროის მცირე (სასრულ) ინტერვალებად Δt , შესაბამისად ინტეგრირების ბიჯი იცვლება სასრული დროის ბიჯით $d\tau = \Delta t$, ხოლო ინტეგრალები იცვლება სასრული ჯამებით, რომლის ზედა ზღვარი იქნება $N = T/\Delta t$. მწკრივის კოეფიციენტების გამოსახულებებში დროის მიმდინარე ფაქტორის (t -ს) მაგივრად გვექნება $n \cdot \Delta t$, შესაბამისად მივიღებთ:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d\tau = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{W_n + W_{n+1}}{2} \cdot \Delta t = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{n=1}^N (W_n + W_{n+1});$$

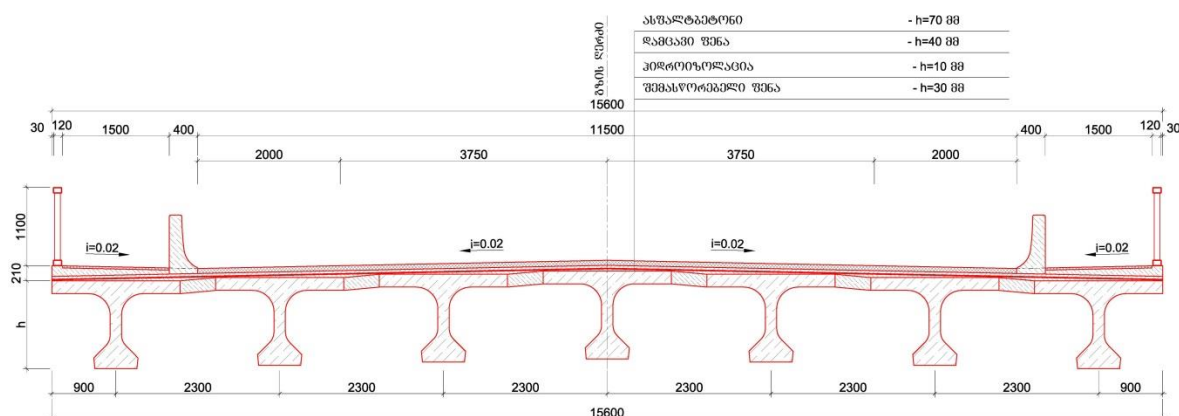
$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos \pi n \frac{t}{T} d\tau = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{W_n + W_{n+1}}{2} \cdot \Delta t \right) \cdot \cos \frac{\pi n}{N} = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{n=1}^N (W_n + W_{n+1}) \cdot \cos \frac{\pi n}{N}$$

$$B_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin \pi n \frac{t}{T} d\tau = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{W_n + W_{n+1}}{2} \cdot \Delta t \right) \cdot \sin \frac{\pi n}{N} = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{n=1}^N (W_n + W_{n+1}) \cdot \sin \frac{\pi n}{N}$$

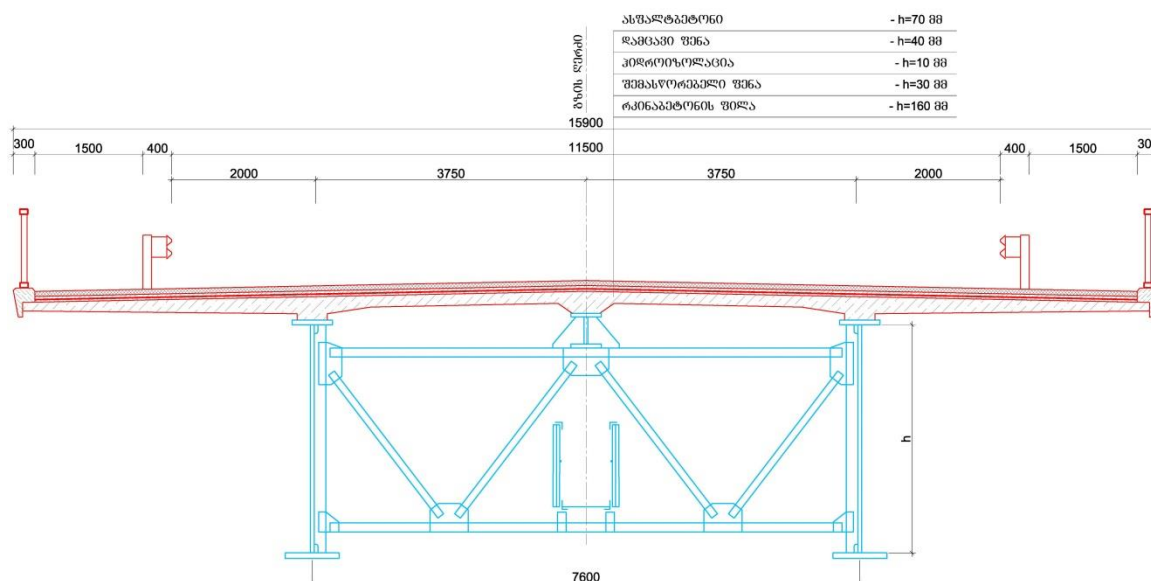
2.2. ქვეთავში - რეალიზებული ამოცანები და მიღებული შედეგები - მოყვანილია განხილული მალის ნაშენების ძირითადი მახასიათებლები, მალის ნაშენის საკუთარი რხების პერიოდების განსაზღვრა, საანგარიშო აქსელეროგრამების შერჩევის ეტაპები, ჭრილკოჭური სისტემის წინასწარ

დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე, ჭრილკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე და უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე.

2.2.1. ქვეთავში - განხილული მალის ნაშენების ძირითადი მახასიათებლები - მოყვანილია ნაშრომში განხილული ჭრილკოჭური სისტემის წინასწარ დაძაბული მალის ნაშენები, მთლიანი სიგრძით $L=15.0$ მ, $L=18.0$ მ, $L=21.0$ მ, $L=24.0$ მ და $L=33.0$ მ, ჭრილკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენები, მთლიანი სიგრძით $L=42.6$ მ და $L=63.6$ მ და ასევე უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენები საანგარიშო სიგრძით $L=42.0+63.0+42.0$ მ, $L=3 \times 63.0$ მ და $L=63.0+2 \times 84.0+63.0$ მ, რომელთა განივი კვეთების ძირითადი გეომეტრიული ზომები მოცემულია ნახ. 10-ზე და ნახ. 11-ზე.



ნახ. 10. რკინაბეტონის ჭრილკოჭური სისტემის მალის ნაშენების განივი კვეთი



ნახ. 11. ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების განივი კვეთი

მალის ნაშენის ძირითადი მახასიათებლები (სიგრძე, სიხისტე და ნორმატიული დატვირთვები), რომლებიც მოცემულია ცხრილ 1-ში შეესაბამება მალის ნაშენის შუა კვეთს.

ცხრილი 1

მალის ნაშენის ძირითადი მახასიათებლები

მალის ნაშენის მთლიანი სიგრძე (სქემა) (მ)	მალის ნაშენის საანგარიშო სიგრძე (სქემა) (მ)	მალის ნაშენის სიხისტე ExI (ტxმ ²)	ნორმატიული დატვირთვის ინტენსივობა q (ტ/მ)
1	2	3	4
15.0	14.4	4 516 050	18.50
18.0, 21.0 და 24.0	17.4, 20.4 და 23.4	4 540 200	19.60
33.0	32.2	4 761 140	20.66
42.6	42.0	11 340 000	18.54
63.6	63.0	24 344 000	14.78
42.3+63.0+42.3	42.0+63.0+42.0	7 750 424	16.94
63.3+63.0+63.3	3x63.0	11 484 354	17.34
63.3+2x84.0+63.3	63.0+2x84.0+63.0	24 534 928	17.46

2.2.2. ქვეთავში - მალის ნაშენთა საკუთარი რხევის პერიოდების განსაზღვრა - მოყვანილია მალის ნაშენისათვის საკუთარი რხევის პერიოდები და სიხშირეები რხევის პირველი სამი ფორმისთვის, რომელიც მოცემულია ცხრილ 2-ში, რისთვისაც გამოყენებული იყო საანგარიშო კომპლექსი MIDAS Civil 2019, რომელიც დამუშავებულია სასრული ელემენტების მეთოდის საფუძველზე.

ცხრილი 2

მალის ნაშენის საკუთარი რხევის პერიოდები და სიხშირეები

L=15.0 მ			
რხევის ფორმა	წრიული სიხშირე რად/წმ	სიხშირე 1/წმ	პერიოდი წმ
1	2	3	4
1	40.211	6.399	0.156
2	145.181	23.106	0.043
3	345.091	54.923	0.018
L=18.0 მ			
1	2	3	4
1	39.073	6.219	0.161
2	133.936	21.317	0.047
3	337.339	53.689	0.019

ცხრილი 2 (გაგრძელება)

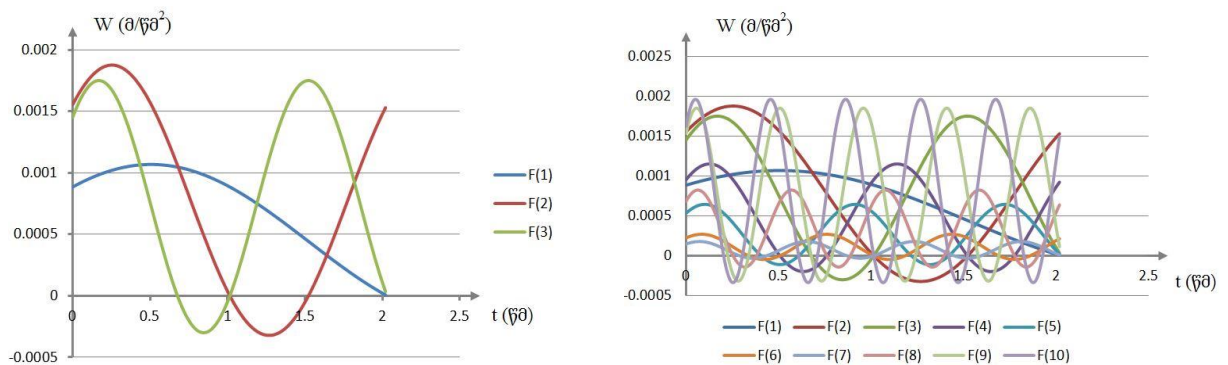
L=21.0 მ			
1	2	3	4
1	28.845	4.591	0.218
2	102.948	16.385	0.061
3	245.164	39.019	0.026
L=24.0 მ			
1	2	3	4
1	22.132	3.522	0.284
2	81.045	12.899	0.078
3	201.931	32.138	0.031
L=33.0 მ			
1	2	3	4
1	15.787	2.513	0.398
2	58.815	9.361	0.107
3	150.255	23.914	0.042
L=42.6 მ			
1	2	3	4
1	10.799	1.719	0.582
2	30.984	4.931	0.203
3	71.703	11.411	0.088
L=63.6 მ			
1	2	3	4
1	7.390	1.176	0.850
2	23.110	3.678	0.272
3	53.047	8.443	0.118
L=42.0+63.0+42.0 მ			
1	2	3	4
1	5.978	0.951	1.051
2	13.154	2.093	0.478
3	39.97	6.362	0.157
L=3x63.0 მ			
1	2	3	4
1	6.26	0.996	1.004
2	11.412	1.816	0.551
3	50.210	7.991	0.125
L=63.0+2x84.0+63.0 მ			
1	2	3	4
1	4.760	0.758	1.320
2	10.358	1.649	0.607
3	36.543	5.816	0.172

2.2.3. ქვეთავში - საანგარიშო აქსელეროგრამების შერჩევის ეტაპები - მოყვანილია საანგარიშო აქსელეროგრამების პაკეტების შერჩევისათვის

გამოყენებული ბერკლის უნივერსიტეტის „Pacific Earthquake Engineering Research Center: NGA Database”, ევროპის პროექტის „Internet-Site for European Strong-Motion DataBase” და იტალიის აქსელერომეტრიული არქივის - Italian Accelerometric Archive მონაცემთა ბანკში არსებული აქსელეროგრამები.

აქსელეროგრამების მონაცემთა ბანკიდან შევირჩიეთ სხვადასხვა აქსელეროგრამები კლასიფიცირებული სეისმურობის მიხედვით სხვადასხვა გრუნტის კატეგორიებისათვის. შემდეგ ყოველი მიწისძვრისთვის გამოვყავით ვერტიკალური მდგენელი, რომლის მნიშვნელოვანი ფაზა ფურიეს მწკრივის საფუძველზე დავშალეთ ჰარმონიკებად.

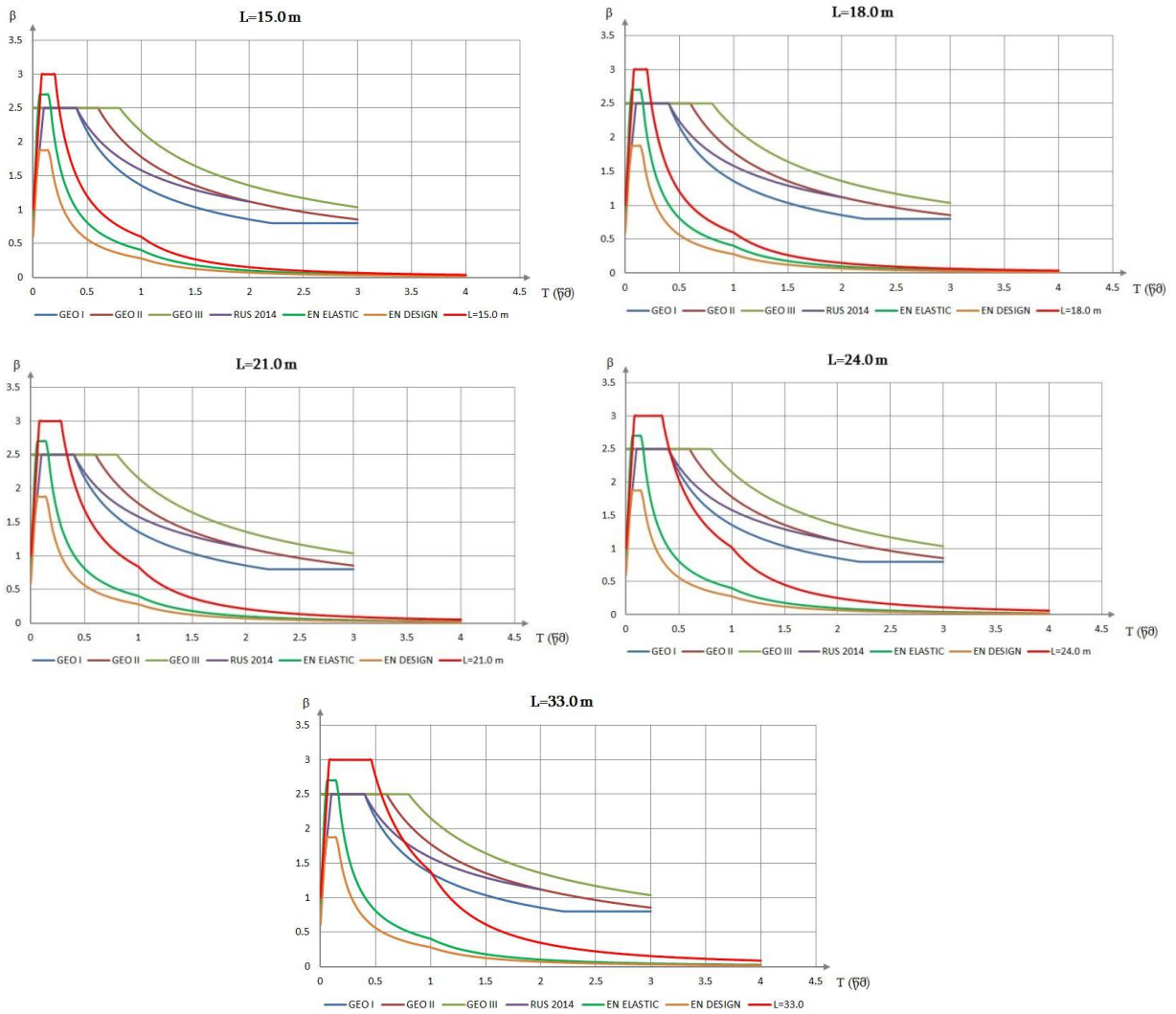
ერთ-ერთი ასეთ აქსელეროგრამას წარმოადგენს ფრიურის ჩანაწერი (16.09.1977 წელი), რომლის ჰარმონიკებად დაშლის გრაფიკული გამოსახულება მოცემულია ქვემოთ (ნახ. 12).



ნახ. 12. ფრიურის ჩანაწერის აქსელეროგრამიდან გამოყოფილი ფაზის ჰარმონიული ფუნქციები

2.2.4. ქვეთავში - ჭრილკოჭური სისტემის წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე - მოყვანილია რკინაბეტონის მალის ნაშენი ჭრილკოჭური სისტემის (მთლიანი სიგრძეებით L=15, 18, 21, 24 და 33 მ). პირდაპირი დინამიური მეთოდით განვსაზღვრეთ წინასწარ დაძაბული მალის ნაშენის აჩქარებები, რომლის საფუძველზეც პროგრამა SeismoSignal საფუძველზე ავაგეთ აჩქარებების სპექტრები.

კვლევაში განხილული ყველა წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენისათვის ჩვენს მიერ მიღებული სპექტრებით და ასევე სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, CHИП, EN და AASHTO) მიხედვით მოხდა მალის ნაშენების გაანგარიშება, მათი შედარება და მიღებული შედეგების ანალიზი.

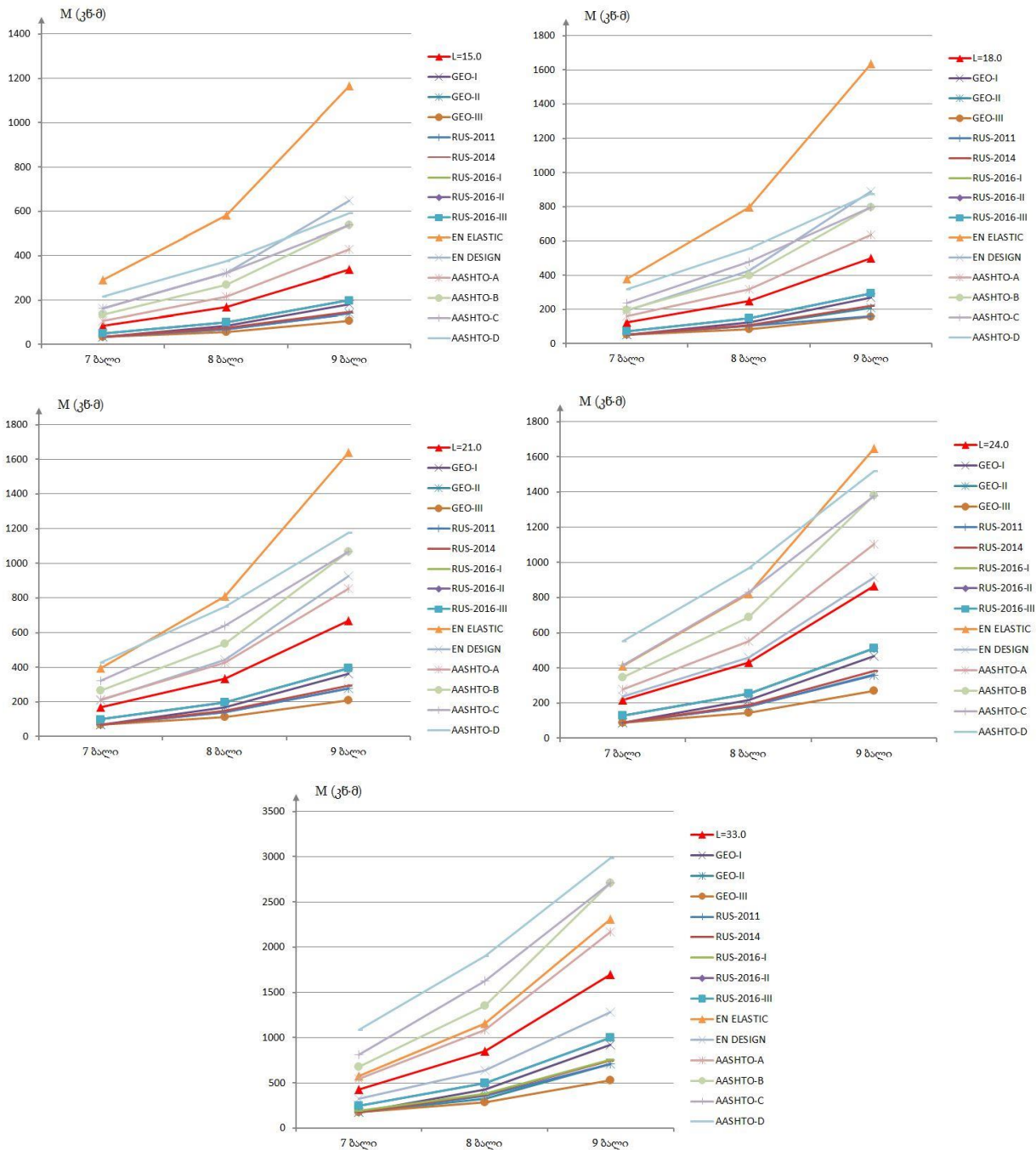


ნახ. 13. კრილკოჭური წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენის რეაქციის სპექტრები

სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, CHиП, EN და AASHTO) მიხედვით და ასევე ჩვენს მიერ დადგენილი სპექტრების გათვალისწინებით მიღებული შედეგების თვალნათლივ წარმოსაჩენად აიგო გრაფიკები კვლევაში განხილული ყველა წინასწარ დაძაბული მალის ნაშენისათვის, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 14-ზე.

ჩვენს მიერ ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენების (სიგრძით L=15.0 მ, L=18.0 მ, L=21.0 მ და L=24.0 მ) საკუთარი რხევის პირველი სამი პერიოდი გათვალისწინებით შერჩეული აქსელეროგრამების საფუძველზე მიღებული რეაქციის სპექტრით განსაზღვრული ძალების სიდიდეები მნიშვნელოვნად აღემატება GEO და CHиП ნორმატიულ დოკუმენტებში მოცემული სპექტრებით მიღებულ ძალებს და არ აღემატება EN საანგარიშო სპექტრით მიღებულ სიდიდეს. L=24.0 მ სიგრძის მალის ნაშენისათვის

განსაზღვრული რეაქციის სპექტრით მიღებული ძალების სიდიდე თითქმის უახლოვდება EN-ში მოცემულ სარეკომენდაციო საანგარიშო სპექტრით მიღებულ ძალების სიდიდეს.



ნახ. 14. სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტისა და ახალი სპექტრების მიხედვით წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის ძალის ნაშენის ძალების მნიშვნელობები

ასევე L=33.0 მ სიგრძის წინასწარ დაძაბული ძალის ნაშენის საკუთარი რხევის პირველი სამი პერიოდის გათვალისწინებით შერჩეული აქსელეროგრამების საფუძველზე მიღებული რეაქციის სპექტრით განსაზღვრული ძალების სიდიდეები მნიშვნელოვნად აღემატება GEO და CHиП ნორმატიულ

დოკუმენტებში მოცემულ სპექტრებით მიღებულ ძაღვებს, ხოლო იგივე ძაღვების სიდიდე მდებარეობს EN საანგარიშო სპექტრისა და EN დრეკადი რეაქციის სპექტრის მიხედვით მიღებულ ძაღვების სიდიდეებს შორის.

სხვადასხვა ნორმატიულ დოკუმენტებში (GEO, СНиП და AASHTO) მოცემული ვერტიკალური სპექტრები მიღებულია ჰორიზონტალური სპექტრის გარდაქმნით და ითვალისწინებენ გრუნტის სხვადასხვა კატეგორიებს. მხოლოდ EN ნორმატიულ დოკუმენტში არის მოცემული ვერტიკალური ზემოქმედების სპექტრი დამოუკიდებლად და იგი გრუნტის კატეგორიაზე არ არის დამოკიდებული, რაც ჩვენს მიერ მიღებულმა კვლევებმაც დაადასტურა – გრუნტის სხვადასხვა კატეგორიებისათვის მიწისძვრის რეაქციის სპექტრების საფუძველზე კვლევის შედეგად მიღებული ახალი სპექტრის დიაპაზონი უცვლელია, ამიტომ ყველა კატეგორიის გრუნტისათვის შესაძლებელია ვერტიკალური რეაქციის ერთი სპექტრით სარგებლობა.

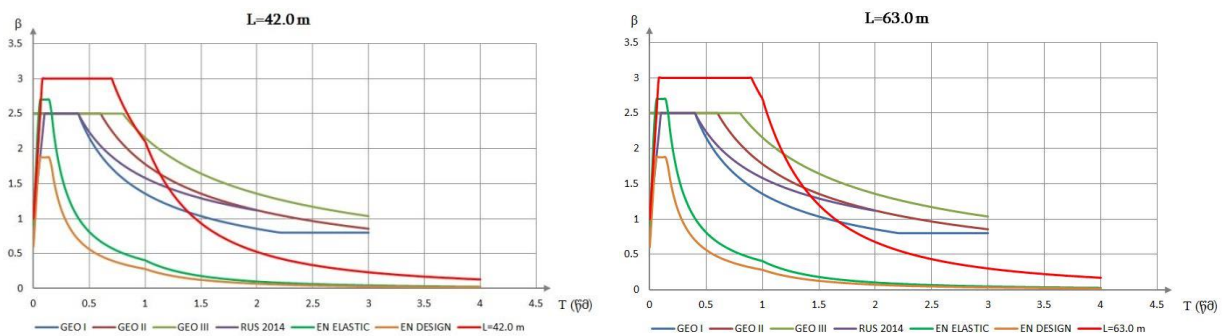
საქართველოში მოქმედი სამშენებლო ნორმები და წესები – „სეისმომედეგი მშენებლობა“ ითვალისწინებს $L=18.0$ მ-ზე მეტი სიგრძის მალის ნაშენის გაანგარიშებას ვერტიკალური სეისმური სპექტრით. ამ ნორმებში მოცემული სპექტრებით ვიღებთ ძაღვების ძაღზე დაბალ სიდიდეებს და ამიტომაც, სავარაუდოდ, 15.0 მ სიგრძის მალის ნაშენების გაანგარიშება ვერტიკალურ მდგენელზე უფლებელყოფილია. EN და AASHTO შესამისად რეაქციის სპექტრის მიხედვით მიღებული ძაღვები 7 ბალიანი მიწისძვრისას შეადგენს მინიმუმ 15% სტატიკური მღუნავი მომენტის სიდიდისა, რაც მეტად დიდი მნიშვნელობაა, მისი უფლებელყოფა დაუშვებელია და აუცილებლად მხედველობაშია მისაღები $L=15.0$ მ სიგრძის მალის ნაშენისთვის მიწისძვრის ვერტიკალური მდგენელისაგან გამოწვეული ძაღვების განხილვა.

2.2.5. ქვეთავში - ჭრილკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე - მოყვანილია ჭრილკოჭური სისტემის ფოლად-რკინაბეტონის მალის ნაშენები (მთლიანი სიგრძეებით $L=42.6$ და 63.6 მ).

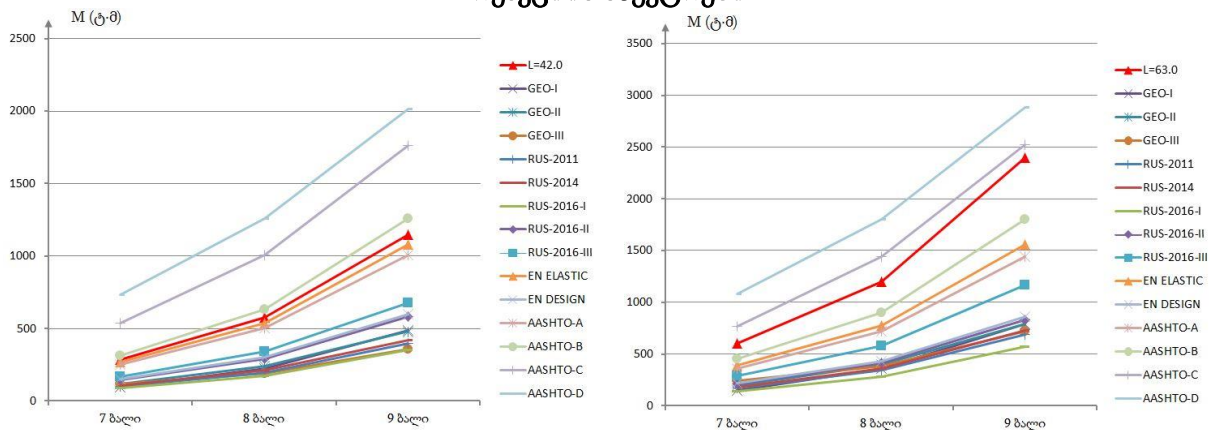
საანგარიშო კომპლექსურ პროგრამა MIDAS Civil აგებულ იქნა ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების საანგარიშო მოდელები და ამ საანგარიშო

მოდელზე გამოქმედეთ გრუნტის კატეგორიების მიხედვით კლასიფიცირებული შვიდი აქსელეროგრამა.

ორივე ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის სხვადასხვა კატეგორიის გრუნტებისათვის მიღებული სპექტრებით და ასევე სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, CHиП, EN და AASHTO) მიხედვით მოხდა მალის ნაშენების გაანგარიშება, მათი შედარება და ანალიზი.



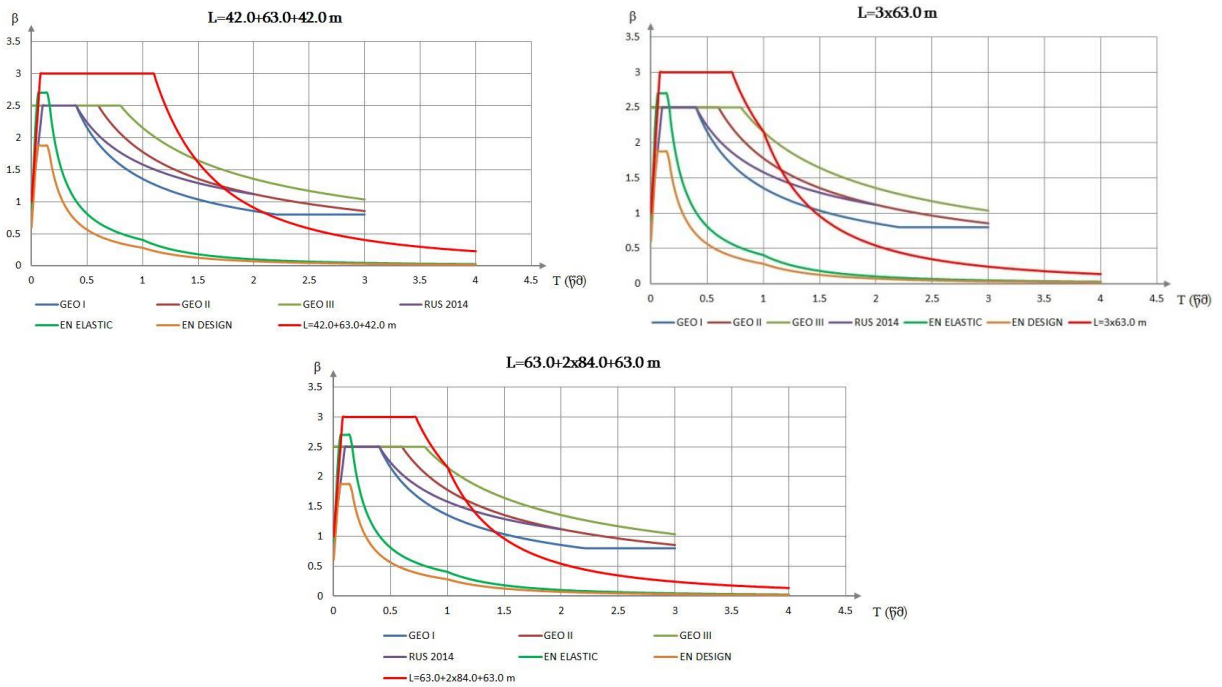
ნახ.15. ჭრილკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენის რეაქციის სპექტრები



ნახ. 16. სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტისა და ახალი სპექტრების მიხედვით ჭრილი სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების ძაღვების მნიშვნელობები

2.2.6. ქვეთავში - უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების გაანგარიშება სტატიკურ და სეისმურ დატვირთვებზე - მოყვანილია უჭრკოჭური სისტემები (საანგარიშო სქემით $L=42.0+63.0+42.0$ მ, 3×63.0 მ და $63.0+2 \times 84.0+63.0$ მ).

კვლევაში განხილული ფოლადრკინაბეტონის სამივე სახის მალის ნაშენისათვის სხვადასხვა კატეგორიის გრუნტებისათვის კვლევით მიღებული სპექტრებით და ასევე სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, CHиП, EN და AASHTO) მიხედვით მოხდა მალის ნაშენების გაანგარიშება, მათი შედარება და შედეგების ანალიზი.



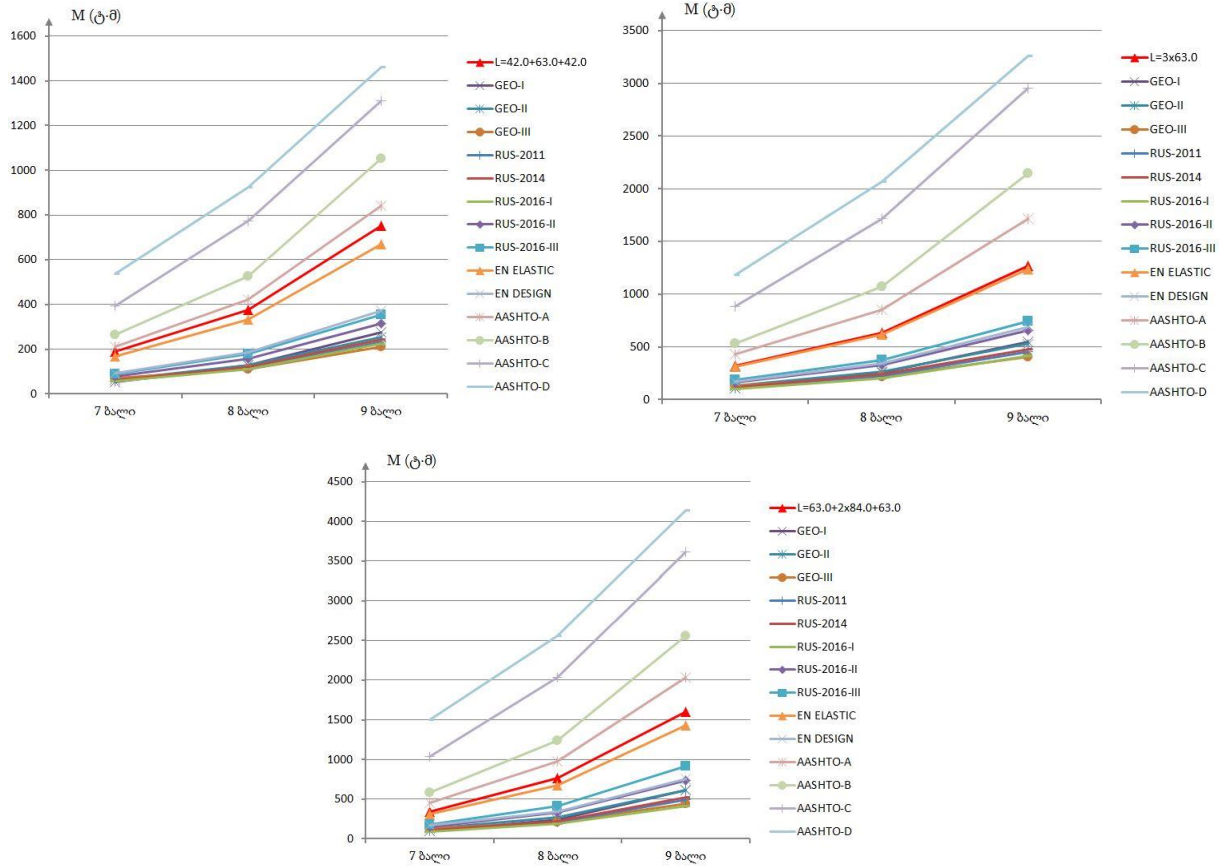
ნახ. 17. უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენის რეაქციის სპექტრები
 უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის სამივე სიგრძის მალის უჭრი სისტემის ფოლადრკინაბეტონის სამივე სქემის მალის ნაშენებისათვის გრუნტის სამივე კატეგორიისათვის სხვადასხვა ბალების შემთხვევაში გაანგარიშებულ იქნა.

სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, СНиП, EN და AASHTO) მიხედვით და ასევე ჩვენს მიერ დადგენილი ახალი სპექტრების გათვალისწინებით აიგო გრაფიკები კვლევაში განხილული უჭრი სისტემის სამივე ფოლად-რკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის, რომელიც წარმოდგენილია ნახ 18-ზე.

კვლევებმა აჩვენა, რომ უჭრი სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენების საკუთარი რხევის პირველი სამი ფორმის პერიოდების გათვალისწინებით შერჩეული აქსელეროგრამების საფუძველზე მიღებული ვერტიკალური რეაქციის სპექტრით განსაზღვრული ძალების სიდიდეები მნიშვნელოვნად აღემატება GEO და СНиП ნორმატიულ დოკუმენტებში მოცემული სპექტრებით მიღებულ ძალებს და ასევე აღემატება EN ნორმატიულ დოკუმენტში მოცემული სპექტრით მიღებულ ძალების სიდიდეს.

სხვადასხვა ნორმატიულ დოკუმენტებში (GEO, СНиП და AASHTO) მოცემული ვერტიკალური სპექტრები ითვალისწინებენ გრუნტის სხვადასხვა კატეგორიებს და ისინი მიღებულია ჰორიზონტალური სპექტრის გარდაქმნით. მხოლოდ EN ნორმატიულ დოკუმენტში არის მოცემული ვერტიკალური სპექტრი

გრუნტის კატეგორიაზე დამოუკიდებლად, რაც ჩვენმა კვლევებმაც დაადასტურა – გრუნტის სხვადასხვა კატეგორიების მიუხედავად მიწისძვრის აქსელეროგრამების რეაქციის სპექტრების საფუძველზე მიღებული ახალი სპექტრის დიაპაზონი უცვლელია, ამიტომ შესაძლებელია ყველა კატეგორიის გრუნტისათვის ერთი ვერტიკალური რეაქციის სპექტრით სარგებლობა.



ნახ. 18. სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტისა და ახალი სპექტრების მიხედვით უჭრკოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენის ძალეების მნიშვნელობები

სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტებით (GEO, СНиП და AASHTO) გათვალსიწინებულია გრუნტის კატეგორიის კოეფიციენტები, ხოლო EN ნორმატიულ დოკუმენტებში გრუნტის კოეფიციენტები უგულებელყოფილია.

EN ნორმატიულ დოკუმენტების მიხედვით ვერტიკალური სპექტრები (განსხვავებით ჰორიზონტალური სპექტრებისა) გრუნტის კატეგორიაზე არ არის დამოკიდებული, შესაბამისად, ყველა კატეგორიისთვის $S=1.0$, რადგან ვერტიკალური მიმართულებით სიხისტეები დიდია. სხვადასხვა ნორმატიული დოკუმენტის (GEO, СНиП და AASHTO) მიხედვით ვერტიკალური სპექტრი მიიღება ჰორიზონტალური სპექტრის გარდაქმნით და შესაბამისად ამ ნორმატივების მიხედვით ვერტიკალური სპექტრის მიღებისას გრუნტის

კატეგორიის კოეფიციენტი გათვალისწინებულია. ამიტომ ამ ნორმატივის ეროვნული დანართის დამუშავებისას ეს გარემოება მხედველობაშია მისაღები.

კვლევებმა აჩვენეს, რომ EN ნორმატიულ დოკუმენტში მოცემული ვერტიკალური სპექტრები ძირითადად გამოსადეგია რკინაბეტონის წინასწარ დამაბული მალის ნაშენებისათვის, რომლებსაც გააჩნიათ 0.3 წმ-ზე ნაკლები სიდიდის საკუთარი რხევის პერიოდები, ხოლო ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის კი, რომლებსაც გააჩნიათ 0.58 წმ-ზე მეტი სიდიდის საკუთარი პერიოდები, იგი არ ასახავს რეალობას.

ასევე აღსანიშნავია, რომ EN-ის ნორმატიულ დოკუმენტებში ვერტიკალური სპექტრი მოცემულია ვიწრო პერიოდიანი სპექტრის სახით. ჩვენს მიერ შესრულებული კვლევები აჩვენებს, რომ დიდი პერიოდიანი მალის ნაშენებისათვის იგი იძლევა მცირე სიდიდის ძალებს, ვიდრე კვლევაში მიღებული დიდ პერიოდიანი სპექტრები.

2.3. ქვეთავში - მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრა - მოყვანილია მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები განისაზღვრა თითოეული კატეგორიის გრუნტის შესაბამისი მიწისძვრის აქსელეროგრამების მიხედვით. ცხრილში 3 მოცემულია სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები წინასწარ დამაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის, ცხრილში 4 მოცემულია სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები ჭრილვოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის და ცხრილში 5 კი – სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები უჭრვოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის მალის ნაშენებისათვის.

ცხრილი 3

სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები წინასწარდამაბული მალის ნაშენებისათვის				
№	მალის ნაშენი	I კატეგორია	II კატეგორია	III კატეგორია
1	2	3	4	5
1	L=15.0 მ	3.18	3.31	3.43
2	L=18.0 მ	3.34	3.50	3.91
3	L=21.0 მ	3.08	3.22	3.17
4	L=24.0 მ	3.35	2.91	3.51
5	L=33.0 მ	3.58	3.43	2.95

ცხრილი 4

სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები ჭრილი სისტემის ფოლადრკინაბეტონისათვის				
№	მალის ნაშენი	I კატეგორია	II კატეგორია	III კატეგორია
1	2	3	4	5
1	L=42.0 მ	2.94	3.19	2.49
	L=63.0 მ	2.23	2.71	2.46

ცხრილი 5

სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტები უჭრი სისტემის ფოლადრკინაბეტონისათვის				
№	მალის ნაშენი	I კატეგორია	II კატეგორია	III კატეგორია
1	2	3	4	5
1	L=42.0+63.0+42.0 მ	1.91	2.46	2.44
2	L=3x63.0 მ	3.48	4.19	3.95
3	L=63.0+2x84.0+63.0 მ	2.91	3.23	3.27

ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ განხილული მალის ნაშენებისათვის სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების სიდიდის საშუალო მაჩვენებელია $\beta=3.03$ და შესაბამისად ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტის სიდიდე უნდა მივიჩნიოთ $\beta=3.0$ ტოლად.

დასკვნები

1. რეკომენდებულია EN-ის ნორმატიული დოკუმენტის ეროვნული დანართისათვის ხიდების მალის ნაშენების სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტების განსაზღვრის და აქსელეროგრამების შერჩევის მეთოდოლოგია;

2. ჩატარებული კვლევის შედეგად დადგენილ იქნა, რომ ხიდების მალის ნაშენებზე აქსელეროგრამების სახით ჩაწერილი სეისმური ზემოქმედების შედეგად მიღებული რეაქციის სპექტრების მრუდების გამოყენებით მალის ნაშენში მიიღება მინიმუმ ორჯერ მეტი სიდიდის ძალები, ვიდრე ძალები მიღებული რეაქციის სპექტრებით, რომლებიც არ ითვალისწინებენ საკუთარი რხევის პერიოდებს.

3. ჩატარებული კვლევის შედეგად კოჭოვანი სისტემის ხიდების მალის ნაშენებისათვის ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის სეისმომდეგობის დინამიკური კოეფიციენტის სიდიდე რეკომენდებულია მიღებულ იქნას $\beta=3.0$.

4. ჩატარებული კვლევების საფუძველზე წინამდებარე ნაშრომში მოცემული ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის გამოყენება რეკომენდებულია ყველა კატეგორიის გრუნტის შემთხვევაში.

5. EN-ის ნორმატიულ დოკუმენტის ეროვნული დანართისათვის რეკომენდებულია ვერტიკალური სეისმურ მდგენელზე გაანგარიშება ჩატარდეს $L=15.0$ მ და მეტი სიგრძის მალის ნაშენებისთვის.

6. წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის მალის ნაშენები სიგრძით $L=15.0 \div 24.0$ მ ექვემდებარება EN-ის ნორმატიულ დოკუმენტში მოცემულ სარეკომენდაციო რეაქციის სპექტრების გამოყენებას, ხოლო სიგრძით $L=33.0$ მ მალის ნაშენის შემთხვევაში საჭიროა ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევებით მიღებული ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის გამოყენება.

7. კვლევებმა აჩვენა, რომ დიდ პერიოდიანი მალის ნაშენებისათვის აუცილებელია ფართო არეალის სპექტრების გამოყენება.

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. უთმელიძე ი. ჭრილ-კოჭური სისტემის ფოლადრკინაბეტონის $L=42.6$ მ სიგრძის მალის ნაშენისათვის რეაქციის სპექტრების განსაზღვრის შესახებ. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები №2(524) 2022 წელი 105-117 გვ.
<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2022-2-105-118>.
2. Rurua N., Maisuradze B., Utmelidze I. Methodology for determining the dynamic coefficients of seismic resistance of superstructure of bridges. FROM A SERIES OF MONOGRAPHS "ECOLOGY OF THE ENVIRONMENT" Volume II EUROPEAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING. 2022 year. p. 800-812.
3. Rurua N., Maisuradze B., Datukishvili G., Utmelidze I. ON THE DETERMINATION OF VERTICAL RESPONSE SPECTRUM FOR PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE SUPERSTRUCTURE. International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies. 2022 year. p. 187-197.
4. მაისურაძე ბ., უთმელიძე ი. ვერტიკალური რეაქციის სპექტრის განსაზღვრა $L=15.0$ მ სიგრძის კოჭოვანი მალის ნაშენისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ასი წლის იუბილისადმი მიძღვნილი სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენცია ინოვაციური ტექნოლოგიები ინჟინერიაში მოხსენებათა კრებული. 2022 წ. 220-231 გვ.

5. Rurua N., Maisuradze B., Utmelidze I. ON THE DETERMINATION OF ELASTIC RESPONSE SPECTRUM FOR COMPOSITE STEEL AND CONCRETE CONTINUOUS SPAN SUPERSTRUCTURE WITH A SCHEME L=42.0+63.0+42.0m. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science 2022 y. pp. 673-682
<http://t-science.org/arxivDOI/2022/12-116.html>.
6. მაისურაძე ბ., უთმელიძე ი. უჭრი სისტემის L=3x63.0 მ სიგრძის მალის ნაშენის რეაქციის სპექტრის განსაზღვრა. სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენცია ინოვაციური ტექნოლოგიები ინჟინერიაში მოხსენებათა კრებული. 2023 წელი 185-196 გვ.

Resume

The paper discusses the methodology for determining the dynamic coefficients of the seismic resistance of superstructures of bridges, the most dangerous accelerogram selection method for the superstructures of bridges, the plotting of the curves of dynamic coefficients taking into account specific calculation schemes, the determination of the forces based on them and the comparison with the results obtained by the spectral theory, as well as the critical analysis of the theories of seismic resistance.

The work presents the topics of modern seismic resistance theory, which are either not studied at all, or its study is currently underway. The calculation of superstructures and their constituent structures based on real earthquake records (for example, accelerograms) gives a significantly higher magnitude of forces than the results obtained using the spectral theory established by all existing normative documents.

The selection of required accelerograms (or their group) from the accelerograms data bank is based on the identity of magnitudes - the magnitude of the accelerograms found in the accelerograms data bank shall correspond to the magnitude of the construction site, although this is not enough to select the most dangerous accelerogram for the structure in question.

Taking into account the issues discussed in the work and their specificity, have been selected such types of superstructures which have a wider use in bridge construction. These are: reinforced concrete superstructures made of prestressed non-diaphragm beams, composite steel and concrete beams superstructure of simple span and continuous span, consisting of I-beams jointed with reinforced concrete deck slab.

According to the reporting scheme, all prestressed reinforced concrete superstructures (length L=15, 18, 21, 24 and 33 m) and composite steel and concrete beam superstructures (length L=42.6 and 63.6 m) are simple spans. The continuous span composite steel and concrete beam (scheme L=42.0+63.0+42.0 m, 3x63.0 m and 63.0+2x84.0+63.0 m) systems are considered as well.

Through the reporting program SeismoSignal, vertical reaction spectra were constructed for different categories of soils, which were compared with the vertical spectra given in the normative documents of different countries (GEO, СНиП, EN and

AASHTO). Based on the spectral theory, the forces in superstructures were determined using the curves of vertical spectra given in various normative documents and obtained by us.

The analysis of the calculation results included separate reinforced concrete superstructures and separate composite steel and concrete beam superstructures (differentiated for simple span and continuous span systems).

Due to the fact that the studies included calculations for superstructures based on individually processed dynamic curves, the results of which had to be compared with the results of calculations based on various normative documents (GEO, СНиП, EN and AASHTO), calculations on static and seismic loads were performed only for normative values of dead loads (load unification method). Based on the fact that live loads have different values in the normative documents of different countries, it would have an adverse effect on the correct comparison and analysis of the seismic spectral curves during the calculation, and the differences in the values of the forces in the superstructures would not only be influenced by the spectral curves, but also be affected by the live load values. For the same purpose, $\Gamma=11.5$ m was chosen as the dimension of traffic way of all superstructures.

None of the valid normative documentation provides a method for selecting a report record (in the form of a specific accelerogram) from the data bank of real earthquake records, according to which the calculation performed ensures the generation (development) of the greatest forces in a certain type of structures (including superstructures of bridges), which is the primary task of calculating the seismic resistance of the structures.

The basis of the currently widespread spectral theory of seismicity is the dynamics coefficients of curves obtained on the basis of dynamic responses (accelerations) of a linear oscillator. Accordingly, these curves are universal for all types of structures (regardless of the calculation system, distribution of masses and stiffnesses) and if the frequency spectrum of its own oscillations, its corresponding oscillation periods are determined based on these curves, the coefficients of dynamism corresponding to the oscillation form are easily determined.

The adequacy of the universality of these curves was doubted when earthquakes occurred on superstructures, and the area of their distribution was determined on the example of specific superstructures, and a methodology was developed for the class of tasks that went out of this area, based on which it will be possible to obtain more accurate results.

The work is based on the results of the implementation of specific tasks and the corresponding analysis, based on which the limits of the spectral theory were determined, and for the class of tasks that are beyond the limits of the operation, the appropriate methodology was determined, which is a scientific novelty and will have practical application. In addition, the processed recommendations and the received response spectrum curves form the basis for the creation of national annexes in Eurocodes.