

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნიკო ფოფორაძე

ქ. თბილისში, მდინარე მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე
გავრცელებული აქტიური მეწყრული სხეულების საინჟინრო-
გეოლოგიური კვლევა და მდგრადობის შეფასება

სადოქტორო პროგრამა გეოლოგია

შიფრი 0532.1.3

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამთო-გეოლოგიური და მთის მდგრადი განვითარების ფაკულტეტი
გამოყენებითი გეოლოგიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები:

პროფესორი მარინე მარდაშოვა

ასოც. პროფესორი გიორგი ტლაშაძე

რეცენზენტები: გმმკ ზ. ვარაზაშვილი

აკად. დოქტორი გ. გაფრინდაშვილი

დაცვა შედგება 2026 წლის „14“ ივლისი, 14:00 საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური
ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე,

კორპუსი III, აუდიტორია 437

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას №77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,

პროფესორი

დ.თევზაძე

თემის აქტუალურობა

მეწყრული პროცესები ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული და დამანგრეველი გეოდინამიკური მოვლენაა, რომელიც განსაკუთრებით მძიმედ აისახება ურბანულ გარემოზე. ფერდობების ჩამოქცევა იწვევს არა მხოლოდ მნიშვნელოვანი ინფრასტრუქტურული ობიექტების დაზიანებას, არამედ მოსახლეობის სიცოცხლესა და სოციალურ-ეკონომიკურ მდგომარეობასთანაც პირდაპირ კავშირშია. დღეისათვის ქალაქებში, სადაც ტერიტორიული სივრცის დეფიციტი განსაკუთრებით დიდ პრობლემას ქმნის, ხშირად ხდება არახელსაყრელი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების მქონე სივრცეების ათვისება, რაც არსებითად ზრდის მეწყრული პროცესების განვითარების ალბათობას. ასეთ შემთხვევებში მეწყრული ფერდობების მდგრადობის შეფასება და მათი მართვა ურბანული განვითარების პირობებში ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევაა.

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპირო გამოირჩევა რთული საინჟინრო-გეოლოგიური მდგომარეობით, რაც მეწყრული პროცესების განვითარებისათვის ხელსაყრელ პირობებს ქმნის. დედაქალაქის ურბანული განვითარების დაჩქარებამ, საინჟინრო-სამშენებლო ოპტიმალური ტერიტორიული რესურსების დეფიციტმა და კლიმატური რეჟიმის მკვეთრმა ცვლილებებმა გამოიწვია მეწყრული პროცესების გააქტიურების ტენდენცია.

განსაკუთრებულ პრობლემას წარმოადგენს ის გარემოება, რომ ცალკეული მეწყრული უბნებისათვის ხშირად არ არსებობს დეტალური საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევები: ფერდობების გეოლოგიური აგებულება, ამგები გრუნტებისა და ქანების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები, ჰიდროგეოლოგიური პირობები და ფერდობების წონასწორობის მდგომარეობა. რიგ შემთხვევებში ლაბორატორიულად მიღებული სიმტკიცის პარამეტრები სრულად ვერ ასახავს ბუნებრივ პირობებში არსებული მასივის რეალურ მდგომარეობას, რაც საჭიროებს დამატებით ანალიტიკურ მიდგომებს, მათ შორის უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენებას.

აქედან გამომდინარე, აქტუალურია ისეთი კვლევის განხორციელება, რომელიც დაფუძნებული იქნება კონკრეტული მეწყრული უბნების დეტალურ საინჟინრო-გეოლოგიურ შესწავლაზე, ფერდობების მდგრადობის გაანგარიშებაზე, ლაბორატორიული და უკუანგარიშით მიღებული პარამეტრების შედარებით ანალიზზე, ასევე თანამედროვე დისტანციური მეთოდების: დრონული ფოტოგრამეტრიის, ციფრული სიმადლური მოდელებისა და სამგანზომილებიანი მოდელირების გამოყენებაზე.

კვლევის მიზანი და ამოცანები

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე შერჩეული მეწყრული უბნების საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების დეტალური შესწავლა, მეწყრული პროცესების განვითარების გამომწვევი ფაქტორების შეფასება და ფერდობების მდგრადობის გაანგარიშება სხვადასხვა ბუნებრივ და ანთროპოგენურ პირობებში.

აღნიშნული მიზნის მისაღწევად კვლევის ფარგლებში დაისახა შემდეგი ამოცანები გადაწყვეტა:

- შერჩეული მეწყრული უბნების გეოლოგიური, გეომორფოლოგიური და ჰიდროგეოლოგიური პირობების შეფასება;
- მეწყრული სხეულების ამგები გრუნტებისა და ქანების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების შესწავლა საველე და ლაბორატორიული კვლევების საფუძველზე;
- ლაბორატორიულად მიღებული სიმტკიცის პარამეტრების შეფასება და მათი შესაბამისობის დადგენა ბუნებრივ პირობებში არსებული ფერდობების რეალურ მდგომარეობასთან;
- უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენება მეწყრული პროცესების განვითარების მომენტში მოქმედი რეალური საანგარიშო პარამეტრების დასადგენად;

- ფერდობების მდგრადობის გაანგარიშება სხვადასხვა მდგომარეობაში, მათ შორის ბუნებრივ პირობებში, ანთროპოგენური ჩარევის შემდგომ და მეწყრული პროცესის განვითარების შემდეგ ეტაპზე;
- ფერდობების მდგრადობის კოეფიციენტების განსაზღვრა მშრალ და საჭიროების შემთხვევაში წყალგაჯერებულ მდგომარეობაში;
- დროული ფოტოგრამეტრიის გამოყენებით მეწყრული სხეულების მორფოლოგიური და გეომეტრიული პარამეტრების დაზუსტება;
- ციფრული სიმაღლური მოდელებისა (DEM) და სამგანზომილებიანი (3D) მოდელების საფუძველზე მეწყრული სხეულების სივრცითი აგებულების, დეფორმირებული უბნებისა და შესაძლო გადაადგილების ნიშნების შეფასება.

მეცნიერული სიახლე

ქალაქ თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპირო მეწყრული პროცესების გავრცელებით ერთ-ერთ ყველაზე რთულ საინჟინრო-გეოლოგიურ ზონად არის მიჩნეული. მიუხედავად მაღალი რისკებისა, აღნიშნული ტერიტორია არასაკმარისად არის შესწავლილი, ჩატარებული კვლევები კი უმეტესად ზოგადი ხასიათისაა.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს:

1. შემუშავებულია ფერდობის მდგრადობის უკუგანგარიშის მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ერთი მეწყრული სხეულის მეზობელი, გენეტიკურად დაკავშირებული და გეომეტრიულად განსხვავებული უბნების დაწყვილებას და უზრუნველყოფს ორი დამოუკიდებელი განტოლების მიღებას, რაც შესაძლებელს ხდის გრუნტის ძვრის ძირითადი პარამეტრების — კუთრი შეჭიდულობისა (c) და შიგა ხახუნის კუთხის (φ) — ერთდროულ განსაზღვრას.
2. დახვეწილია გრუნტის მექანიკური პარამეტრების განსაზღვრის ალტერნატიული საინჟინრო მიდგომა, რომელიც დაფუძნებულია ზღვრული

წონასწორობის პირობებზე და იძლევა საანგარიშო მახასიათებლების მიღების შესაძლებლობას ლაბორატორიული კვლევების გარეშე ან მათი შეზღუდულობის პირობებში.

3. გაფართოებულია ფერდობის მდგრადობის საანგარიშო მოდელი ჰიდროგეოლოგიური ფაქტორების ინტეგრაციით, კერძოდ მიწისქვეშა წყლების ფილტრაციული ზემოქმედებისა და ჰიდროდინამიკური დაწოლის გათვალისწინებით, რაც უზრუნველყოფს ფერდობის ქცევის უფრო რეალისტურ შეფასებას.
4. ჩამოყალიბებულია ურბანული ფერდობების საინჟინრო-გეოლოგიური შეფასების ინტეგრირებული მეთოდოლოგიური მიდგომა, რომელიც აერთიანებს საველე კვლევებს, უკუანგარიშის მეთოდს და დისტანციურ ტექნოლოგიებს (დრონული ფოტოგრამეტრია, ციფრული სიმალური მოდელები, სამგანზომილებიანი მოდელირება).
5. მეწყრული პროცესების კლასიფიკაციის საერთაშორისო და ქართული მიდგომების შედარებით დადგინდა, რომ ისინი ურთიერთშემავსებელ სისტემებს წარმოადგენენ.

პრაქტიკული მნიშვნელობა

შერჩეული მეწყრული უბნების მაგალითზე განხორციელდა მეწყრული პროცესების განვითარების პირობების კომპლექსური ანალიზი. კვლევაში გაერთიანებულია საველე საინჟინრო-გეოლოგიური დაკვირვებები, ლაბორატორიული კვლევები, ფერდობების მდგრადობის მრავალეტაპიანი გაანგარიშებები, უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენება, დრონული ფოტოგრამეტრია, ციფრული სიმალური და სამგანზომილებიანი მოდელების შექმნა.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ლაბორატორიულად მიღებული სიმტკიცის პარამეტრებისა და უკუანგარიშით განსაზღვრული საანგარიშო მახასიათებლების შედარებას. კვლევამ აჩვენა, რომ ცალკეულ შემთხვევებში ლაბორატორიული მონაცემები შეიძლება ზედმეტად მაღალი იყოს და სრულად ვერ ასახავდეს მასივის რეალურ სიმტკიცეს. ამ თვალსაზრისით, უკუანგარიშის

მეთოდის გამოყენება იძლევა უფრო საიმედო საანგარიშო პარამეტრების მიღების შესაძლებლობას.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მსგავსი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების მქონე სხვა ფერდობებზე, მეწყრული პროცესების შეფასებისა და მათი მდგრადობის ანალიზისათვის. კვლევის შედეგები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ შემთხვევებში, როდესაც ფერდობის მდგრადობაზე გავლენას ახდენს ანთროპოგენური ფაქტორები.

მიღებული შედეგები საშუალებას მოგვცემს:

- შევაფასოთ ბუნებრივი და ანთროპოგენური ფაქტორების როლი მეწყრული პროცესების განვითარებაში;
- დავადგინოთ, როგორ იცვლება ფერდობის მდგრადობის კოეფიციენტი სხვადასხვა საანგარიშო მდგომარეობაში;
- განვსაზღვროთ ფერდობის მდგრადობის კოეფიციენტი;
- შევაფასოთ ლაბორატორიულად მიღებული და უკუანგარიშით განსაზღვრული ფიზიკურ-მექანიკური პარამეტრების სანდოობა;
- დრონული ფოტოგრამეტრიის, DEM-ისა და 3D მოდელირების გამოყენებით დაზუსტდეს მეწყრული სხეულების სივრცითი აგებულება და საინჟინრო-გეოლოგიური ინტერპრეტაცია.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები

კვლევის ფარგლებში ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე შერჩეულ იქნა სამი მეწყრული უბანი, რომლებიც განსხვავდებიან როგორც გეოლოგიურ-მორფოლოგიური პირობებით, ისე საფრთხის ხასიათითა და მასშტაბით. ორი მათგანი უშუალო საფრთხეს უქმნის მიმდებარე საცხოვრებელ შენობებსა და ინფრასტრუქტურას, ხოლო მესამე, მდ. უკანხევის მეწყრული უბანი, მიუხედავად

იმისა, რომ დაუსახლებელ ტერიტორიაზე განვითარებული, პოტენციურად საფრთხის შემცველია ხევის შესაძლო გადაკეცვისა და წყლის შეგუბების თვალსაზრისით.

შერჩეულ მეწყრულ უბნებზე განხორციელდა საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების დეტალური შეფასება. კვლევის პროცესში გაანალიზდა ფერდობების გეოლოგიური აგებულება, გეომორფოლოგიური თავისებურებები, ჰიდროგეოლოგიური პირობები, მეწყრული სხეულების მორფოლოგია და მათი განვითარების გამომწვევი ბუნებრივი და ანთროპოგენური ფაქტორები. იმ უბნებზე, სადაც შესაძლებელი იყო ნიმუშების აღება, ჩატარდა ლაბორატორიული კვლევები გრუნტებისა და ქანების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების დასადგენად.

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე გავრცელებული მეწყრული სხეულების საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევა განხორციელდა კომპლექსური, ეტაპობრივი და ურთიერთდაკავშირებული მეთოდური მიდგომის საფუძველზე. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მეწყრული უბნების იდენტიფიკაცია, მათი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების შეფასება, გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური პარამეტრების განსაზღვრა, ფერდობთა მდგრადობის დაანგარიშება და საბოლოოდ მეწყრული საფრთხეების რისკის დადგენა. აღნიშნული ამოცანების გადასაჭრელად გამოყენებულ იქნა როგორც საველე და ლაბორატორიული, ისე ჰიდროგეოლოგიური, საანგარიშო და გეოინფორმაციული მეთოდები.

კვლევის ფარგლებში განხორციელდა არსებული საარქივო, კარტოგრაფიული და სატელიტური მასალების დამუშავება, საკვლევი უბნების შერჩევა, დეტალური საველე საინჟინრო-გეოლოგიური აგებმა და კვლევები, ნიმუშების აღება და მათი ლაბორატორიული შესწავლა, ჰიდროგეოლოგიური დაკვირვებები, აგრეთვე ფერდობთა მდგრადობის დაანგარიშება სპეციალიზებული კომპიუტერული პროგრამების გამოყენებით. ფერდობთა მდგრადობა შეფასდა სხვადასხვა საანგარიშო მეთოდის საფუძველზე, რაც შესაძლებელს ხდიდა მიღებული შედეგების ურთიერთშედარებასა და კრიტიკული პირობების გამოვლენაში.

კვლევის პრაქტიკულ ნაწილში მნიშვნელოვანი ადგილი დაეთმო თანამედროვე დისტანციურ და გეოინფორმაციულ ტექნოლოგიებს. განხორციელდა მეწყრული სხეულების დრონული გადაღება, მიღებული მასალების საფუძველზე შედგა რელიეფისა და მეწყრული სხეულების სამგანზომილებიანი მოდელები, სხვადასხვა პერიოდულობით მიღებული მონაცემების შედარების საფუძველზე შესაძლებელი გახდა მეწყრული პროცესების დინამიკაზე დაკვირვება. აღნიშნული მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ უბნებზე, სადაც საჭიროა მეწყრული სხეულის გეომეტრიისა და დეფორმაციული ცვლილებების შეფასება.

ამგვარად, კვლევის მეთოდიკა ეფუძნებოდა ტრადიციული საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევების, რიცხვითი მოდელირების, კომპიუტერული ანალიზისა და თანამედროვე დრონულ-გეოინფორმაციული ტექნოლოგიების ერთობლივ გამოყენებას, რაც ქმნის სანდო საფუძველს მეწყრული პროცესების რაოდენობრივი შეფასებისა და ფერდობთა მდგრადობის ანალიზისათვის.

კვლევის ძირითადი შედეგები და მათი გამოყენების სფერო

კვლევის მნიშვნელოვანი ნაწილი დაეთმო ფერდობების მდგრადობის გაანგარიშებას. მდგრადობის ანალიზი განხორციელდა სხვადასხვა საანგარიშო მდგომარეობისათვის: ფერდობის ბუნებრივ პირობებში, ფერდობის ძირის ჩამოჭრის შემდგომ და მეწყრული პროცესის განვითარების შემდეგ. მიღებული შედეგების შედარებამ აჩვენა, რომ ცალკეულ შემთხვევებში ლაბორატორიულად განსაზღვრული სიმტკიცის პარამეტრები სრულად ვერ ასახავს ბუნებრივ პირობებში არსებული გამოფიტული და დანაპრალიანებული მასივის რეალურ მდგომარეობას. აღნიშნულმა გარემოებამ განაპირობა უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენება, რომლის საფუძველზეც დადგინდა უფრო საიმედო საანგარიშო პარამეტრები.

კვლევის ფარგლებში გამოყენებულ იქნა დრონული ფოტოგრამეტრიის მეთოდიც. მის საფუძველზე მიღებული მასალები გამოყენებული იქნა მეწყრული სხეულების მორფოლოგიური თავისებურებების, გეომეტრიული პარამეტრებისა და სივრცითი აგებულების დასაზუსტებლად. მდ. უკანხევის მეწყრული უბნისათვის სხვადასხვა პერიოდში აგებული ციფრული სიმაღლური მოდელების (DEM) შედარებამ არ აჩვენა მეწყრული სხეულის მასშტაბური გადაადგილება. მცირე ცვლილებები დაფიქსირდა მხოლოდ ცალკეულ ლოკალურ უბნებზე, რაც შეიძლება აიხსნას დასაშვები ცდომილებით ან ფოტოგრამეტრიული მოდელირების ადგილობრივი უზუსტობებით.

ამრიგად, ნაშრომში წარმოდგენილია ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე შერჩეული სამი მეწყრული უბნის საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევის, ფერდობთა მდგრადობის გაანგარიშების, უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენებისა და დრონული ფოტოგრამეტრიის შედეგები. მიღებული მონაცემები საშუალებას იძლევა შეფასდეს მეწყრული პროცესების გამომწვევი ძირითადი ფაქტორები, განისაზღვროს ფერდობების მდგრადობის კოეფიციენტები სხვადასხვა პირობებში და გაუმჯობესდეს მსგავსი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების მქონე ურბანული ფერდობების შეფასების მეთოდოლოგიური საფუძველი.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა:

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს შესავლს, 8 თავს, 40 ქვეთავს, დასკვნებსა და გამოყენებული ლიტერატურის სიას. ლიტერატურის სიაში მითითებულია 27 დასახელების ნაშრომი ქართულ, ინგლისურ და რუსულ ენებზე. ნაშრომის საერთო მოცულობა შეადგენს 159 ნაბეჭდ გვერდს და ახლავს 6 ცხრილი, 12 ნახაზი და 4 ფოტოსურათი.

თავი 1. შესავალი

მეწყრული პროცესები ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული და დამანგრეველი გეოდინამიკური მოვლენაა, რომელიც განსაკუთრებით მძიმედ აისახება ურბანულ გარემოზე. ფერდობების ჩამოქცევა იწვევს არა მხოლოდ მნიშვნელოვანი ინფრასტრუქტურული ობიექტების დაზიანებას, არამედ მოსახლეობის სიცოცხლესა და სოციალურ-ეკონომიკურ მდგომარეობასთანაც პირდაპირ კავშირშია. დღეისათვის ქალაქებში, სადაც ტერიტორიული სივრცის დეფიციტი განსაკუთრებით დიდ პრობლემას ქმნის, ხშირად ხდება არახელსაყრელი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების მქონე სივრცეების ათვისება, რაც არსებითად ზრდის მეწყრული პროცესების განვითარების ალბათობას. ასეთ შემთხვევებში მეწყრული ფერდობების მდგრადობის შეფასება და მათი მართვა ურბანული განვითარების პირობებში ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევაა.

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპირო გამოირჩევა რთული საინჟინრო-გეოლოგიური მდგომარეობით, რაც მეწყრული პროცესების განვითარებისათვის ხელსაყრელ პირობებს ქმნის. დედაქალაქის ურბანული განვითარების დაჩქარებამ, საინჟინრო-სამშენებლო ოპტიმალური ტერიტორიული რესურსების დეფიციტმა და კლიმატური რეჟიმის მკვეთრმა ცვლილებებმა გამოიწვია მეწყრული პროცესების გააქტიურების ტენდენცია.

თავი 2. ლიტერატურის მიმოხილვა

ქალაქ თბილისის გეოლოგიური შესწავლის ისტორია მჭიდროდ არის დაკავშირებული კავკასიის სამთო სამსახურის შექმნასთან (1868 წ.). აღნიშნული ინსტიტუციის დაფუძნების შემდეგ, გეოლოგიური კვლევები უფრო მიზანმიმართული და სპეციფიკური გახდა, განსაკუთრებით ქალაქ თბილისში და მის მიმდებარე ტერიტორიებზე, სადაც კვლევის ერთ-ერთი ძირითადი მიმართულება სამკურნალო თერმული წყლების შესწავლა იყო.

აღნიშნული კვლევები ქმნის მყარ საფუძველს თბილისის გეოლოგიური და საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების შესწავლისათვის. თუმცა, მიუხედავად არსებული მასალის სიღრმისა და მოცულობისა, ქალაქის რთული გეოდინამიკური

გარემო და აქტიური ურბანული განვითარება განაპირობებს ახალი, მიზნობრივი კვლევების აუცილებლობას, განსაკუთრებით მეწყრული პროცესების მიმართულებით. თბილისის რელიეფი, გეოლოგიური და ჰიდროგეოლოგიური თავისებურებები ხელს უწყობს ფერდობთა სტაბილურობის დარღვევას, რის შედეგადაც მეწყრული პროცესების განვითარება მნიშვნელოვან საფრთხეს უქმნის როგორც მოსახლეობას, ასევე სხვადასხვა დანიშნულების შენობებსა და საინჟინრო ინფრასტრუქტურას.

მეწყრული პროცესები წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გეოდინამიკურ საფრთხეს, რომელიც პირდაპირ გავლენას ახდენს ურბანულ და საინჟინრო ინფრასტრუქტურაზე. მათი სწორად იდენტიფიკაცია და კლასიფიკაცია წარმოადგენს საფუძველს ფერდობთა მდგრადობის შეფასების, რისკის ანალიზისა და პრევენციული ღონისძიებების დაგეგმვისათვის.

საერთაშორისო პრაქტიკაში მეწყრების კლასიფიკაციის ყველაზე გავრცელებულ სისტემას წარმოადგენს D.J. Varnes-ის მიერ 1978 წელს შემუშავებული სქემა, რომელიც ეფუძნება მოძრაობის ტიპსა და გადაადგილებული მასალის მახასიათებლებს. საქართველოში კი ფართოდ გამოიყენება საინჟინრო-გეოლოგიური სკოლის საფუძველზე ჩამოყალიბებული გენეტიკური კლასიფიკაცია, რომელიც ორიენტირებულია პროცესის გამომწვევ მიზეზებსა და მექანიზმებზე.

მეთოდოლოგიური თვალსაზრისით, ვარნესის სისტემა უფრო მეტად შეესაბამება გლობალური სტანდარტიზაციის მოთხოვნებს, ხოლო საქართველოში დანერგილი სისტემა ეფექტურია რეგიონული გეოდინამიკური ანალიზისა და საინჟინრო დაგეგმარებისთვის. საქართველოს რთულ გეოლოგიურ გარემოში, სადაც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სეისმურობა, გამოფიტვისა და სუფოზიური პროცესები და ანთროპოგენური ზემოქმედება, გენეტიკური მიდგომა იძლევა უფრო ღრმა ინტერპრეტაციის შესაძლებლობას.

თავი 3. ქ. თბილისის ტერიტორიის ფიზიკურ-გეოგრაფიული და გეოლოგიური პირობების მიმოხილვა

ქ. თბილისის ტერიტორია აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა სისტემის აღმოსავლეთი დაბოლოებაა, რომელიც აგებულია პალეოგენისა და ნეოგენის ასაკის კლდოვანი დანალექი, ფლიშური და ვულკანოგენური ქანებით. მათი მნიშვნელოვანი ნაწილი გადაფარულია მეოთხეული ასაკის ნალექებით. ქალაქის ფარგლებში განედური მიმართულების ნაოჭები აგებულია პალეოგენის ასაკის ქანებით, ქალაქგარეთ კი უპირატესად ვრცელდება ნეოგენური ქანები, რომლებიც წარმოდგენილია როგორც ზღვიური, ისე კონტინენტური მოლასური ტიპის ნალექებით. ქვემოთ მოცემულია აღნიშნული ასაკის ქანების სტრატეგრაფიული დახასიათება.

ქალაქ თბილისის ტერიტორიასა და მის შემოგარენში დომინირებს ნაოჭური დისლოკაციები, ანტიკლინებისა და სინკლინების მონაცვლეობით. ამასთან, ბოლო წლებში ჩატარებული გეოფიზიკური კვლევები ადასტურებს სიღრმული რღვევის არსებობას, რომლის საერთო მიმართულება, სავარაუდოდ, თანხვდება მდინარე მტკვრის ხეობის აზიმუტს.

მორფოლოგიურად, თბილისის ტერიტორია ღრმად ჩაზნექილი ქვაბულია, რომელიც თითქმის ყველა მხრიდან შემოსაზღვრულია დაბალი და საშუალო სიმაღლის მთებით. ქვაბულის ფსკერის აბსოლუტური ნიშნულები ზღვის დონიდან საშუალოდ 380–600 მეტრს შორის მერყეობს. მდინარე მტკვრის ხეობა ხასიათდება რთული გეოლოგიურ-ტექტონიკური პირობებითა და მკვეთრად განსხვავებული მორფოლოგიური ფორმებით. იგი მოქცეულია ორ მსხვილ ნაოჭა მათა სისტემას შორის: ჩრდილოეთით აღმოსავლეთ კავკასიონის ინტენსიურად დისლოცირებულ სამხრეთ ფერდობთა ზონას, ხოლო სამხრეთით - მცირე კავკასიონის აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-ბლოკურ სისტემას შორის.

ქალაქ თბილისისა და მისი შემოგარენის ჰიდროგეოლოგიური შესწავლა მჭიდროდ არის დაკავშირებული ტერიტორიის ინტენსიურ ურბანულ განვითარებასა და რეკონსტრუქციულ პროცესებთან. ქალაქის მარჯვენა სანაპიროს ციცაბო ფერდობები და მცირედ გაბალახიანებული ზედაპირი განაპირობებს ინფილტრაციის დაბალ მაჩვენებელს, მარცხენა სანაპიროზე კი, შედარებით რბილი ფერდობებისა და მცენარეული საფარის განვითარების გამო, ინფილტრაცია

მნიშვნელოვნად მაღალია. მიწისქვეშა წყლები ინფილტრაციის შედეგად იჟონება და გროვდება მეოთხეული და უფრო ძველი ქანების ნაპრალებსა და ფორებში. მეოთხეული ასაკის ფხვიერი ნალექები შეიცავს ფოროვან ცირკულაციაში არსებულ გრუნტის წყლებს, ხოლო უფრო ძველი (ეოცენური) ქანები ნაპრალურ წყლებს, რომლებიც ზედა ნაწილში უმეტესად უდაწნევო და ცივია, ხოლო ქვედა ჰორიზონტებში დაწნევიანი და თერმული.

თავი 4. მეწყრული პროცესების წარმოქმნა-განვითარების განმაპირობებელი ძირითადი ფაქტორები

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე მეწყრული პროცესების განვითარებაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს გეოლოგიურ-ლითოლოგიური პირობები, ფერდობების მორფოლოგია, ატმოსფერული ნალექები, ზედაპირული და მიწისქვეშა წყლები, სეისმური ზემოქმედება და ანთროპოგენური ჩარევა.

მეწყრული პროცესების წარმოქმნა-განვითარება განპირობებულია როგორც ბუნებრივი, ისე ანთროპოგენური ფაქტორების ერთობლივი ზემოქმედებით. კონკრეტულ ტერიტორიაზე მეწყრის ჩამოყალიბებას იშვიათად განაპირობებს მხოლოდ ერთი მიზეზი; უმეტეს შემთხვევაში პროცესი ვითარდება მაშინ, როდესაც გეოლოგიური აგებულება, რელიეფის დახრილობა, წყლის რეჟიმი, სეისმური ზემოქმედება და ადამიანის საქმიანობა ერთობლივად არღვევს ფერდობის ბუნებრივ წონასწორობას.

თავი 5. მეწყრების კლასიფიკაცია და ეტაპობრივი განვითარების ისტორია

მეწყრული პროცესების სწორი კლასიფიკაცია მნიშვნელოვანი წინაპირობაა მათი გენეზისის, განვითარების მექანიზმის, დინამიკისა და საფრთხის ხარისხის შესაფასებლად. კლასიფიკაცია საშუალებას იძლევა მეწყრული მოვლენები დაიყოს ისეთი ნიშნების მიხედვით, როგორებიცაა მოძრაობის ტიპი, გადაადგილებული მასალის რაობა, პროცესის სიჩქარე, განვითარების მიზეზი და ფერდობის მდგრადობის დარღვევის მექანიზმი.

ანგარიშში მეწყრული პროცესები დაჯგუფებულია მათი წარმოშობის წამყვანი ფაქტორების მიხედვით და გამოიყოფა სანაპირო (ბაზისური), კლიმატოგენური (კონსისტენტური), ტექტოსეისმოგენური, სუფოზიური და ტექნო-ანთროპოგენური მეწყრები. აღნიშნული კლასიფიკაცია ეფუძნება საინჟინრო-გეოლოგიურ სკოლაში ჩამოყალიბებულ გენეტიკურ მიდგომას და მორგებულია თბილისის ტერიტორიის გეოლოგიურ, ჰიდროგეოლოგიურ და გეომორფოლოგიურ პირობებზე. ამით მიღწეულია მეწყრების ტიპების მკაფიო გამიჯვნა მათი განვითარების მექანიზმებისა და დინამიკის მიხედვით.

თანამედროვე საინჟინრო-გეოლოგიურ პრაქტიკაში მეწყრული პროცესების შეფასებისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება როგორც საერთაშორისო, ისე რეგიონული კლასიფიკაციების გამოყენებას.

თავი 6. მეწყრული პროცესების თეორიული საფუძვლები და კვლევის მეთოდოლოგია

მეწყერი წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ და დამანგრეველ გეოდინამიკურ პროცესს, რომელიც ვითარდება მაშინ, როდესაც ფერდობზე მოქმედი მძვრელი ძალები აჭარბებს შემაკავებელ ძალებს, რის შედეგადაც მეწყრული მასა გადაადგილება ფერდობის დახრილობის მიმართულებით.

მეწყრული პროცესის სწორი ანალიზისა და მისი განვითარების მექანიზმის განსაზღვრისათვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს მეწყრული სხეულის მორფოლოგიური აგებულების დეტალურ შესწავლას. მეწყრული სხეული წარმოადგენს სტრუქტურულად ორგანიზებულ სისტემას, რომელიც შედგება ერთმანეთთან დაკავშირებული ელემენტებისგან. აღნიშნული ელემენტების იდენტიფიკაცია და მათი სივრცითი მდებარეობის სწორად განსაზღვრა, საშუალებას გვაძლევს შევავსოთ მეწყრული სხეულის განვითარების პროცესი, გადაადგილების მიმართულება და სტაბილურობის მდგომარეობა.

მეწყრის მასშტაბისა და პოტენციური საშიშროების რისკის შეფასებისათვის აუცილებელია მისი გეომეტრიული პარამეტრების დადგენა, რადგან გადაადგილებული მასალის მოცულობა პირდაპირ კავშირშია, დეფორმაციების

ინტენსივობასთან, გავრცელების არეალთან და საბოლოოდ ურბანულ გარემოზე ზემოქმედების ხარისხთან. მეწყრის ზომითი დახასიათება მხოლოდ სიგრძისა და სიგანის მითითებით არ არის საკმარისი, საინჟინრო-გეოლოგიურ პრაქტიკაში გამოიყენება სტანდარტიზებული გეომეტრიული პარამეტრების სისტემა, რომელიც უზრუნველყოფს გაზომვებისა და აღწერების ერთგვაროვნებას, ამარტივებს მონაცემთა ერთიან სისტემაში ინტეგრაციას და შემდგომ შეფასებას და ქმნის საიმედო ბაზას ინვენტარიზაციისა და სივრცითი ანალიზისთვის.

მეწყრული პროცესების შესწავლა წარმოადგენს კომპლექსურ, მრავალეტაპიან კვლევით ერთობლიობას, ვინაიდან მათი ფორმირება და დინამიკა დამოკიდებულია ურთიერთდაკავშირებული ბუნებრივი და ანთროპოგენური ფაქტორების ერთობლიობაზე. მეწყრული პროცესის გენეზისის, განვითარების მექანიზმის, აქტიურობის ხარისხის, სივრცითი გავრცელებისა და პოტენციური რისკების ხარისხის შეფასება შესაძლებელია მხოლოდ ინტეგრირებული კვლევების საფუძველზე. ამ მიზნით, მეწყრული პროცესების კომპლექსური შესწავლა მოითხოვს შემდეგი მეთოდოლოგიების სინთეზურ გამოყენებას: კამერალური, გეოლოგიური, გეომორფოლოგიური, ჰიდროგეოლოგიური, გეოფიზიკური, გეოდეზიური, ლაბორატორიული და გეოინფორმაციული მეთოდები.

მეწყრული პროცესების შესწავლა ეფუძნება როგორც გეოლოგიურ-გეომორფოლოგიურ, ისე გეოტექნიკურ და საანგარიშო მეთოდებს. ფერდობთა მდგრადობის ანალიზისათვის გამოიყენება ზღვრული წონასწორობის მეთოდები, რიცხვითი მეთოდები, ალბათობისა და საიმედოობის მიდგომები, უკუანგარიშის მეთოდი, ასევე ემპირიული და ნახევრადემპირიული მიდგომები.

თავი 7. კვლევის პრაქტიკული მეთოდიკა

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე გავრცელებული მეწყრული სხეულების საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევა განხორციელდა კომპლექსური, ეტაპობრივი და ურთიერთდაკავშირებული მეთოდური მიდგომის საფუძველზე. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მეწყრული უბნების იდენტიფიკაცია, მათი საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების შეფასება, გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური

პარამეტრების განსაზღვრა, ფერდობთა მდგრადობის დაანგარიშება და საბოლოოდ მეწყრული საფრთხეების რისკის დადგენა. აღნიშნული ამოცანების გადასაჭრელად გამოყენებულ იქნა როგორც საველე და ლაბორატორიული, ისე ჰიდროგეოლოგიური, საანგარიშო და გეოინფორმაციული მეთოდები.

კვლევის ფარგლებში განხორციელდა არსებული საარქივო, კარტოგრაფიული და სატელიტური მასალების დამუშავება, საკვლევი უბნების შერჩევა, დეტალური საველე საინჟინრო-გეოლოგიური აგეგმვა და კვლევები, ნიმუშების აღება და მათი ლაბორატორიული შესწავლა, ჰიდროგეოლოგიური დაკვირვებები, აგრეთვე ფერდობთა მდგრადობის დაანგარიშება სპეციალიზებული კომპიუტერული პროგრამების გამოყენებით. ფერდობთა მდგრადობა შეფასდა სხვადასხვა საანგარიშო მეთოდის საფუძველზე, რაც შესაძლებელს ხდიდა მიღებული შედეგების ურთიერთშედარებასა და კრიტიკული პირობების გამოვლენაში.

კვლევის პრაქტიკულ ნაწილში მნიშვნელოვანი ადგილი დაეთმო თანამედროვე დისტანციურ და გეოინფორმაციულ ტექნოლოგიებს. განხორციელდა მეწყრული სხეულების დრონული გადაღება, მიღებული მასალების საფუძველზე შედგა რელიეფისა და მეწყრული სხეულების სამგანზომილებიანი მოდელები, სხვადასხვა პერიოდულობით მიღებული მონაცემების შედარების საფუძველზე შესაძლებელი გახდა მეწყრული პროცესების დინამიკაზე დაკვირვება. აღნიშნული მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ უბნებზე, სადაც საჭიროა მეწყრული სხეულის გეომეტრიისა და დეფორმაციული ცვლილებების შეფასება.

ამგვარად, კვლევის მეთოდიკა ეფუძნებოდა ტრადიციული საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევების, რიცხვითი მოდელირების, კომპიუტერული ანალიზისა და თანამედროვე დრონულ-გეოინფორმაციული ტექნოლოგიების ერთობლივ გამოყენებას, რაც ქმნის სანდო საფუძველს მეწყრული პროცესების რაოდენობრივი შეფასებისა და ფერდობთა მდგრადობის ანალიზისათვის.

თავი 8. მეწყრული სხეულების ანალიზი და მდგრადობის გაანგარიშება

კვლევის ფარგლებში გამოვლენილი მეწყრული უბნებიდან დეტალური საინჟინრო-გეოლოგიური შესწავლისათვის შეირჩა სამი საკვლევი ობიექტი, რომლებიც ხასიათდება მეწყრული პროცესების განვითარებისათვის ხელსაყრელი პირობებით, გამოხატული მორფოლოგიური ნიშნებით, რთული გეოლოგიური აგებულებითა და გაზრდილი საინჟინრო რისკებით. აღნიშნულ უბნებზე განხორციელდა მეწყრული სხეულების დეტალური კვლევა, მათი გეოლოგიური, გეომორფოლოგიური და ჰიდროგეოლოგიური პირობების შეფასება, ამგები გრუნტებისა და ქანების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა, აგრეთვე ფერდობთა მდგრადობის გაანგარიშება.

მეწყრული სხეულების ანალიზი განხორციელდა როგორც საველე და ლაბორატორიული კვლევების, ისე კომპიუტერული მოდელირების შედეგების საფუძველზე. თითოეული საკვლევი უბნისათვის შეიქმნა შესაბამისი საინჟინრო-გეოლოგიური მოდელი, რომლის მიხედვითაც შეფასდა ფერდობის წონასწორობის მდგომარეობა, გამოვლინდა კრიტიკული სრიალის ზედაპირები და განისაზღვრა მდგრადობის კოეფიციენტები სხვადასხვა პირობებისა და მეთოდების გამოყენებით.

ამასთან ერთად, კვლევის ფარგლებში გამოყენებული დრონული ფოტოგრამეტრიის შედეგებმა შესაძლებელი გახადა მეწყრული სხეულების მორფოლოგიური ელემენტების, გეომეტრიული პარამეტრებისა და სივრცითი გავრცელების უფრო მაღალი სიზუსტით შეფასება. ციფრული სიმაღლური და სამგანზომილებიანი მოდელების გამოყენებამ მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა როგორც მეწყრული სხეულების დეტალური ანალიზის, ისე მათი დინამიკური ცვლილებების დადგენა.

ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე შერჩეული სამი უბნიდან ორი უშუალოდ საფრთხეს უქმნის მოსახლეობასა და მიმდებარე განაშენიანებას, რადგან მეწყრული სხეულები განვითარებულია მრავალსართულიანი საცხოვრებელი სახლების სიახლოვეს. ასეთ პირობებში ფერდობის მდგრადობის დარღვევა არა მხოლოდ გეოლოგიურ პრობლემას, არამედ მნიშვნელოვან სოციალურ და საინჟინრო რისკსაც წარმოადგენს, ვინაიდან მეწყრული პროცესის გააქტიურებამ

შესაძლებელია უშუალო ზიანი მიაყენოს საცხოვრებელ შენობებს, მათ კონსტრუქციულ მდგრადობასა და მიმდებარე ინფრასტრუქტურას. მესამე საკვლევი უბანი, მიუხედავად იმისა, რომ უშუალოდ დასახლებულ ტერიტორიაზე არ არის განვითარებული, ასევე მაღალი რისკის მქონედ იქნა მიჩნეული, რადგან მეწყრულმა პროცესმა შესაძლებელია გადაკეტოს ხევი, გამოიწვიოს მისი შეფუბება და ამ გზით შექმნას მეორადი, თუმცა მასშტაბური საფრთხე ქალაქ თბილისისათვის.

პირველი საკვლევი მეწყრული უბანი მდებარეობს ქ. თბილისში, ბაგებში ზ. საკანდელძის ქუჩაზე. აღნიშნულ მონაკვეთზე დაგეგმილი იყო სამი მრავალსართულიანი საცხოვრებელი შენობის მშენებლობა, რაც უბნის საინჟინრო-გეოლოგიურ შეფასებას განსაკუთრებულ მნიშვნელობას ანიჭებს. ვინაიდან ფერდობის მდგრადობის დარღვევა პირდაპირ უკავშირდება როგორც საპროექტო ობიექტების, ისე მიმდებარე ტერიტორიაზე არსებულ სხვა საცხოვრებელ შენობებს.

ფერდობის თავდაპირველი, ბუნებრივი მდგომარეობისათვის მდგრადობის კოეფიციენტი მიღებულ იქნა დაახლოებით $F_s = 1.5$ -ის ფარგლებში, რაც მიუთითებს, რომ ბუნებრივ პირობებში ფერდობი იმყოფებოდა დასაშვებ, თუმცა ზღვრულთან შედარებით ახლოს მყოფ მდგომარეობაზე. ფერდობის ძირის ჩამოჭრის შემდგომი მდგომარეობისათვის მიღებულ იქნა $F_s = 0.9$, რაც უკვე მკაფიოდ მიუთითებს ფერდობის არამდგრადობაზე და სრულ შესაბამისობაშია რეალურად განვითარებულ მეწყრულ პროცესთან. მესამე ეტაპზე, ანუ მეწყრის განვითარების შემდგომ არსებულ მდგომარეობაში, გაანგარიშებით მიღებული იქნა დაახლოებით $F_s \approx 2.0$, რაც მიუთითებს, რომ მეწყრული პროცესის შემდეგ ფერდობმა მიაღწია ახალ, შედარებით უფრო სტაბილურ წონასწორულ მდგომარეობას და განმეორებითი დესტაბილიზაციის საფრთხე მოცემულ პირობებში მნიშვნელოვნად შემცირებულია.

ამრიგად, შესრულებულმა გაანგარიშებებმა აჩვენა, რომ ფერდობის ბუნებრივი მდგომარეობა შედარებით სტაბილური იყო, ხოლო ფერდობის ძირის ხელოვნურმა ჩამოჭრამ გადაწყვეტი როლი ითამაშია წონასწორობის დარღვევასა და მეწყრული პროცესის განვითარებაში. ამავე დროს, მეწყერის ჩამოყალიბების შემდგომ მასივმა მიაღწია ახალ წონასწორულ მდგომარეობას. მიღებული შედეგები ადასტურებს,

რომ აღნიშნულ უბანზე მეწყრული პროცესის ძირითადი მაპროგნოზირებელი ფაქტორი იყო ანთროპოგენური ჩარევა, კერძოდ ფერდობის ძირის ჩამოჭრა, ხოლო უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენებამ შესაძლებელი გახადა ფერდობის რეალური საინჟინრო-გეოლოგიური მდგომარეობის უფრო სარწმუნო შესწავლა და ანალიზი.

მეორე საკვლევ მიწის მდებარეობს ქ. თბილისში, მარუხის გმირების ქუჩის მიმდებარე ტერიტორიაზე. აღნიშნული უბანი დეტალური საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევისათვის შეირჩა იმის გამო, რომ აქ განვითარებული მეწყრული პროცესები უშუალო საფრთხეს უქმნის მრავალსართულიან საცხოვრებელ შენობასა და მის მიმდებარე ინფრასტრუქტურას. საკვლევ ტერიტორია ხასიათდება რთული გეოლოგიური აგებულებით, რელიეფითა და აქტიური ანთროპოგენური ზემოქმედებითა.

ანალიზმა აჩვენა, რომ ფერდობის თავდაპირველ, ბუნებრივ მდგომარეობაში მდგრადობის კოეფიციენტი დაახლოებით $F_s = 4.5$ -ის ფარგლებში იყო, რაც მიუთითებს, რომ ფერდობი ბუნებრივ პირობებში სტაბილურ მდგომარეობაში იმყოფებოდა. ფერდობის ძირის ჩამოჭრის შემდგომ კი მდგრადობის კოეფიციენტი შემცირდა დაახლოებით $F_s = 0.89$ -მდე, რაც უკვე აშკარად მიუთითებს არამდგრად მდგომარეობაზე და სრულ შესაბამისობაშია რეალურად განვითარებულ მეწყრულ პროცესთან. მესამე ეტაპზე, ანუ არსებული მდგომარეობისათვის, როდესაც მეწყრული პროცესი უკვე განვითარებულია და ფერდობმა ახალი წონასწორობის მდგომარეობა მიიღო, მიღებულ იქნა დაახლოებით $F_s = 1.49$, რაც მიუთითებს, რომ ამ ეტაპზე ფერდობი კვლავ ინარჩუნებს სტაბილურ მდგომარეობას.

მიღებული შედეგები ცხადყოფს, რომ მეორე საკვლევ უბანზე მეწყრული პროცესის განვითარებაში გადამწყვეტი როლი შეასრულა ანთროპოგენურმა ჩარევამ, კერძოდ ფერდობის ძირის ჩამოჭრამ, რომელმაც ფერდობის ბუნებრივი წონასწორობა დაარღვია და მნიშვნელოვნად შეამცირა მისი მდგრადობა. ამავე დროს, არსებული მდგომარეობისათვის მიღებული მდგრადობის კოეფიციენტი მიუთითებს, რომ მეწყრული პროცესის განვითარების შემდეგ ფერდობზე ჩამოყალიბებულია შედარებით სტაბილური მდგომარეობა, თუმცა მისი საინჟინრო-გეოლოგიური შეფასება კვლავ საჭიროებს ყურადღებას,

განსაკუთრებით დამატებითი ტექნოგენური დატვირთვების ან ინტენსიური დანესტიანების პირობებში.

მესამე საკვლევი უბანი მდებარეობს ქ. თბილისში, წყნეთის ტერიტორიაზე, მდინარე უკანხევის ხეობის ფარგლებში. აღნიშნული უბანი დეტალური საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევისათვის შეირჩა არა უშუალოდ საცხოვრებელ განაშენიანებაზე ზემოქმედების გამო, არამედ მისი პოტენციური საშიშროების მასშტაბიდან გამომდინარე. კერძოდ, მოცემულ მონაკვეთზე განვითარებულმა მეწყრულმა პროცესმა შესაძლებელია გამოიწვიოს ხევის ნაწილობრივი ან სრული გადაკეტვა, რაც თავის მხრივ უკავშირდება წყლის შეგუბებასა და შემდგომი უეცარი გარღვევის რისკს. აღნიშნული საშიშროების რისკი ლოკალური ხასიათის პრობლემას სცილდება და განიხილება უფრო ფართო არეალზე მოქმედ საფრთხედ.

მდინარე უკანხევის მეწყრული სხეულის მასშტაბებიდან გამომდინარე, ფერდობის მდგრადობის გაანგარიშება განხორციელდა სამი საანგარიშო ჭრილის მიხედვით. ვინაიდან მეწყრული სხეულის საერთო ფართობი დაახლოებით 40 ჰა-ს აღწევს და იგი სივრცობრივად არაერთგვაროვანი აგებულებით ხასიათდება, საანგარიშო ჭრილები შერჩეული იქნა იმგვარად, რომ მოეცვა მეწყრის ფარგლებში არსებული სამი ყველაზე კრიტიკული მონაკვეთი.

მდგრადობის გაანგარიშების შედეგებმა აჩვენა, რომ საკვლევი მეწყრული სხეულის ფარგლებში ფერდობის მდგრადობის ხარისხი სივრცობრივად ცვალებადია. პირველი საანგარიშო ჭრილისათვის, რომელიც მარჯვენა ფერდობზეა გატარებული, მშრალ მდგომარეობაში მიღებული მდგრადობის კოეფიციენტი შეადგენს $F_s = 1.17$ -ს, ხოლო წყალგაჯერებულ მდგომარეობაში იგი მცირდება $F_s = 1.06$ -მდე. აღნიშნული მნიშვნელობები მიუთითებს, რომ მოცემული მონაკვეთი ბუნებრივ პირობებშიც კრიტიკულთან მიახლოებულ მდგომარეობაში იმყოფება, ხოლო გაწყლოვანების შემთხვევაში მისი მდგრადობა კიდევ უფრო მცირდება.

მეორე საანგარიშო ჭრილი ასევე მეწყრული სხეულის მარჯვენა ფერდობზე იქნა გატარებული. ამ ჭრილის მიხედვით მშრალ მდგომარეობაში მიღებული მდგრადობის კოეფიციენტი შეადგენს $F_s = 1.26$ -ს, ხოლო წყალგაჯერებულ მდგომარეობაში იგი მცირდება $F_s = 0.98$ -მდე. აღნიშნული შედეგი განსაკუთრებით საყურადღებოა, რადგან წყალგაჯერების პირობებში მდგრადობის კოეფიციენტი

ერთზე ნაკლები ხდება, რაც ფერდობის არამდგრად მდგომარეობაზე და მეწყრული პროცესის გააქტიურების რეალურ შესაძლებლობაზე მიუთითებს. შესაბამისად, მარჯვენა ფერდობის ფარგლებში გაწყლოვანება ერთ-ერთ მთავარ დესტაბილიზაციის ფაქტორად უნდა იქნეს განხილული.

მესამე საანგარიშო ჭრილი გატარებული იქნა მეწყრული სხეულის მარცხენა ფერდობზე. ამ მონაკვეთზე მშრალ მდგომარეობაში მიღებული მდგრადობის კოეფიციენტი შეადგენს $F_s = 1.30$ -ს, ხოლო წყალგაჯერებულ მდგომარეობაში — $F_s = 1.26$ -ს. მიღებული შედეგები აჩვენებს, რომ მარცხენა ფერდობზე წყალგაჯერების გავლენა მდგრადობის კოეფიციენტზე შედარებით სუსტია. აღნიშნული შეიძლება აიხსნას იმით, რომ მარცხენა ფერდობზე დელუვიური ნალექები შედარებით მცირე სიმძლავრით არის წარმოდგენილი, ძირითადი ქანები ნაკლებად არის გამოფიტული, ხოლო მათი დახრის კუთხე მარჯვენა ფერდობთან შედარებით ნაკლებია. შესაბამისად, მოცემული მონაკვეთი შედარებით უფრო მდგრადი პირობებით და დაბალი საფრთხის რისკით ხასიათდება.

ამრიგად, ჩატარებული გაანგარიშებების საფუძველზე დგინდება, რომ მეწყრული სხეულის ფარგლებში ყველაზე კრიტიკულ მდგომარეობაში იმყოფება მარჯვენა ფერდობი, განსაკუთრებით წყალგაჯერების პირობებში. პირველი და მეორე ჭრილების შედეგები მიუთითებს, რომ ატმოსფერული ნალექების ინტენსიური ინფილტრაცია და გრუნტების გაწყლოვანება მნიშვნელოვნად ამცირებს ფერდობის მდგრადობას და ზრდის მეწყრული პროცესების გააქტიურების ალბათობას. მარცხენა ფერდობი, მესამე ჭრილის მონაცემების მიხედვით, შედარებით დაბალი საფრთხის რისკით ხასიათდება, თუმცა მთლიანად მეწყრული სხეულის მასშტაბისა და ტექტონისმოგენური ბუნების გათვალისწინებით, მისი მონიტორინგი მაინც აუცილებელია.

დასკვნა

1. შემუშავებულია ფერდობის მდგრადობის უკუანგარიშის მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ერთი მეწყრული სხეულის მეზობელი, გენეტიკურად დაკავშირებული და გეომეტრიულად განსხვავებული უბნების დაწყვილებას და უზრუნველყოფს ორი დამოუკიდებელი განტოლების მიღებას, რაც შესაძლებელს ხდის გრუნტის ძვრის ძირითადი პარამეტრების — კუთრი შეჭიდულობისა (c) და შიგა ხახუნის კუთხის (φ) — ერთდროულ განსაზღვრას.
2. დახვეწილია გრუნტის მექანიკური პარამეტრების განსაზღვრის ალტერნატიული საინჟინრო მიდგომა, რომელიც დაფუძნებულია ზღვრული წონასწორობის პირობებზე და იძლევა საანგარიშო მახასიათებლების მიღების შესაძლებლობას ლაბორატორიული კვლევების გარეშე ან მათი შეზღუდულობის პირობებში.
3. გაფართოებულია ფერდობის მდგრადობის საანგარიშო მოდელი ჰიდროგეოლოგიური ფაქტორების ინტეგრაციით, კერძოდ მიწისქვეშა წყლების ფილტრაციული ზემოქმედებისა და ჰიდროდინამიკური დაწოლის გათვალისწინებით, რაც უზრუნველყოფს ფერდობის ქცევის უფრო რეალისტურ შეფასებას.
4. ჩამოყალიბებულია ურბანული ფერდობების საინჟინრო-გეოლოგიური შეფასების ინტეგრირებული მეთოდოლოგიური მიდგომა, რომელიც აერთიანებს სავსელე კვლევებს, უკუანგარიშის მეთოდს და დისტანციურ ტექნოლოგიებს (დრონული ფოტოგრამეტრია, ციფრული სიმბოლური მოდელები, სამგანზომილებიანი მოდელირება).
5. მეწყრული პროცესების კლასიფიკაციის საერთაშორისო და ქართული მიდგომების შედარებით დადგინდა, რომ ისინი ურთიერთშემავსებელ სისტემებს წარმოადგენენ.
6. ბაგების, ზურაბ საკანდელიძის ქუჩის საკვლევე უბნის მაგალითზე დადასტურდა, რომ მხოლოდ ლაბორატორიულად მიღებული სიმტკიცის პარამეტრების გამოყენება ზოგ შემთხვევაში ვერ ასახავს ფერდობის რეალურ მდგომარეობას. უკუანგარიშის მეთოდის გამოყენებამ შესაძლებელი გახადა

ისეთი საანგარიშო პარამეტრების მიღება, რომლებიც უკეთ შეესაბამება მასივის რეალურად მდგომარეობას.

7. მარუხის გმირების ქუჩის უბანზე მეწყრის ჩამოყალიბების შემდეგ ფერდობმა მიიღო შედარებით ახალი წონასწორული მდგომარეობა, სადაც მდგრადობის კოეფიციენტი დაახლოებით $F_s \approx 1.49$ -ს შეადგენს. მიუხედავად ამისა, ტერიტორია კვლავ საჭიროებს საინჟინრო-გეოლოგიურ კონტროლს, განსაკუთრებით დამატებითი ტექნოგენური დატვირთვისა და ინტენსიური ნალექების პირობებში.
8. მდინარე უკანხევის მეწყრულ უბანზე სხვადასხვა პერიოდში აგებული ციფრული სიმაღლური მოდელების შედარებამ მასშტაბური გადაადგილება არ აჩვენა, რაც მიუთითებს, რომ დაკვირვების პერიოდში მეწყრული სხეულის ძირითადი ნაწილი შედარებით სტაბილურ მდგომარეობაში იმყოფებოდა. მიუხედავად ამისა, უბნის მასშტაბის, ტექტოსეისმოგენური ბუნებისა და ხევის შესაძლო გადაკეტვის რისკის გათვალისწინებით, პერიოდული მონიტორინგი აუცილებელია.
9. მიღებული შედეგების საფუძველზე შეიძლება ითქვას, რომ ქ. თბილისის მტკვრის მარჯვენა სანაპიროზე მეწყრული საფრთხეების შემცირებისათვის აუცილებელია სამშენებლო სამუშაოების დაწყებამდე დეტალური საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევების ჩატარება, ფერდობთა მდგრადობის გაანგარიშება, ზედაპირული და მიწისქვეშა წყლების კონტროლი, ფერდობების უკონტროლო ჭრა და მაღალი რისკის მქონე უბნებზე სისტემური მონიტორინგის წარმოება.

აპრობაცია

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი საკითხები მოხსენების სახით გაშუქდა საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციებსა და კოლოკვიუმებზე.

პუბლიკაციები

1. ნიკო ფოფორაძე. მეწყრული პროცესების კლასიფიკაციის თანამედროვე სისტემები და მათი შედარებითი ანალიზი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, N2 (540), 2026
2. ნიკო ფოფორაძე. ქ. თბილისის შემოვლითი რკინიგზის ტრასის გასწვრივ განვითარებული საშიში გეოლოგიური პროცესების მიმოხილვა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, N1 (519), 2021.
3. ნიკო ფოფორაძე. ქ. თბილისში რ. გოგიაშვილის ქუჩაზე განვითარებული მეწყრული სხეულის მდგრადობის ანგარიში GEO5 პროგრამის გამოყენებით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, N1 (519), 2021.
4. მ. მარდაშოვა, ნ. მომცელიძე ნ. ფოფორაძე. საყდრისის საბადოს ტერიტორიაზე გროვული გამოტუტვის საწარმოო უბნის მოედნების ფერდობების მდგრადობის შეფასება წყალგაჯერებული ქანების პირობებისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველოს საინჟინრო აკადემია, ყოველკვარტალური რეფერირებადი და რეცენზირებადი საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი N2, 2020.
5. ნიკო ფოფორაძე, მ. მარდაშოვა, ზ. კაკულია, ნ. მომცელიძე. ორთაქალაში მდებარე სამშენებლო უბნის საინჟინრო-გეოლოგიური პირობების დახასიათება. სტუ, სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 2019.
6. ნიკო ფოფორაძე, მ. მარდაშოვა, ნ. ფოფორაძე, ზ. კაკულია, გ. ჭიაურელი, ნ. მომცელიძე. Mineralogical Society of Georgia, Georgian Technical University „ Power of geology is the precondition for regeneration of economics“ Book of abstracts 5th International ScientificPractical Conference of up-to-date problems of geology 29-30 May, 2019.

Abstract

Engineering-Geological Investigation and Stability Assessment of Active Landslide Bodies Distributed along the Right Bank of the Mtkvari River in Tbilisi

The results of engineering-geological investigations conducted in recent years in the city of Tbilisi and its surrounding areas reveal that various hazardous geological processes are intensively manifested within this territory. The damage caused by these processes significantly affects both the socio-economic conditions of the population and the city's critical infrastructure. The study area is characterized by the complex occurrence of geodynamic processes, the most important of which are gravitational phenomena (landslides, rockfalls, and rock collapses), as well as mudflows and erosion processes (deep, areal, and lateral).

The activity of landslide processes represents one of the main geological threats to the capital city. These processes annually cause substantial economic losses and, in some cases, lead to fatalities. Notably, since the beginning of the 21st century, an intensification trend of landslide activity has been observed. This can be explained by both the depletion of territorially optimal resources for engineering-construction development within the city and global climate change, which contributes to increased precipitation intensity and alterations in the groundwater regime.

At present, a significant portion of Tbilisi's urban development is taking place within zones characterized by complex engineering-geological conditions, which in the past were considered methodologically unacceptable for construction. This is further aggravated by the fact that many construction projects are often carried out on the basis of insufficient, and in some cases incorrect, engineering-geological investigations. These circumstances substantially increase the risk of slope instability, landslide reactivation, and damage to infrastructure.

The engineering-geological hazards present within the capital city require systematic monitoring, regular calculation of slope stability coefficients, precise determination of soil physical-mechanical parameters (c , φ , γ , E , ν , k), and the mandatory integration of engineering-geological data into the planning and implementation of construction projects. Only under such an approach will it be possible to minimize geological risks in Tbilisi and ensure sustainable urban development.

Within the framework of the study, three landslide sites were selected on the right bank of the Mtkvari River in Tbilisi. These sites differ in terms of their geological and geomorphological conditions, as well as the nature and scale of the associated hazard. Two of them pose a direct threat to nearby residential buildings and infrastructure, while the third site — the landslide area of the Ukankhevi River — although developed in an uninhabited area, represents a potential hazard due to the possible blockage of the ravine and subsequent water impoundment.

A detailed assessment of engineering-geological conditions was carried out at the selected landslide sites. During the research, the geological structure of the slopes,

geomorphological characteristics, hydrogeological conditions, morphology of the landslide bodies, and the natural and anthropogenic factors contributing to their development were analyzed. At the sites where sampling was possible, laboratory investigations were conducted to determine the physical and mechanical properties of the soils and rocks.

A significant part of the research was devoted to slope stability calculations. Stability analysis was performed for different calculation scenarios: the natural condition of the slope, the condition after excavation at the slope toe, and the condition after the development of the landslide process. Comparison of the obtained results showed that, in certain cases, the strength parameters determined in the laboratory do not fully reflect the actual condition of the weathered and fractured rock mass under natural conditions. This circumstance necessitated the use of the back-analysis method, on the basis of which more reliable design parameters were determined.

Drone photogrammetry was also used within the framework of the study. The materials obtained through this method were used to refine the morphological characteristics, geometric parameters, and spatial structure of the landslide bodies. For the Ukankhevi River landslide site, comparison of digital elevation models (DEM) generated at different periods did not indicate any large-scale displacement of the landslide body. Minor changes were recorded only in separate local areas, which may be explained by permissible error or by local inaccuracies in photogrammetric modelling.

Thus, the dissertation presents the results of engineering-geological investigations, slope stability calculations, the application of the back-analysis method, and drone photogrammetry for three selected landslide sites on the right bank of the Mtkvari River in Tbilisi. The obtained data make it possible to assess the main factors triggering landslide processes, determine slope stability coefficients under different conditions, and improve the methodological basis for assessing urban slopes with similar engineering-geological conditions.