

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნიკა ტყეშელაშვილი

მიწის რესურსების სივრცითი და რაოდენობრივი შეფასება დისტანციური  
ზონდირებისა და მანქანური სწავლების გამოყენებით

სადოქტორო პროგრამა: საინჟინრო გეოდეზია

შიფრი: 0719.1.2

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

აკტორეფერატი

თბილისი

2025

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტი  
საინჟინრო გეოდეზიისა და გეოინფორმატიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ასოცირებული პროფესორი თამარ პაპაჩაშვილი

რეკენზენტები: *ასოცირებული პროფესორი ო. თავდიშვილი*  
*აკადემიური დოქტორი დ. სვანაძე*

დაცვა შედგება *2025* წლის *28 იანვარს, 13:00* საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური  
ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი *III*, აუდიტორია *239*  
მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას N77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

დ. თევზაძე

## შესავალი

მიწა, როგორც ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ბუნებრივი რესურსი, ადამიანთა საზოგადოების არსებობისა და განვითარებისათვის შეუცვლელ ატრიბუტს წარმოადგენს. მსოფლიო მოსახლეობის ზრდის, მიმდინარე ტექნოლოგიური პროგრესისა და სწრაფად ცვალებადი გარემოს პირობებში კაცობრიობის მოთხოვნები მიწის რესურსებზე ყოველწლიურად იზრდება. მზარდი მოთხოვნის პარალელურად იმატებს მათი დეგრადაციის, ხარისხობრივი და რაოდენობრივი პარამეტრების გაუარესების რისკი.

მიწის რესურსები ფართო ცნებაა და FAO-ს (გაეროს სურსათისა და სოფლის მეურნეობის ორგანიზაცია) განმარტებით ნიადაგურ საფართან და დედამიწის ზედაპირის ტოპოგრაფიასთან ერთად აერთიანებს კლიმატურ და ჰიდროლოგიურ პარამეტრებს, აგრეთვე ფლორისტულ და ფაუნისტურ თანასაზოგადოებებს.

**კვლევის აქტუალობა.** დღეისათვის სხვადასხვა ლოკალურ დონეზე ინფორმაცია მიწის რესურსების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი პარამეტრების, მათი სივრცე-დროითი ცვალებადობისა და გამოყენების მაჩვენებლების შესახებ არ არის ადეკვატურად აღწერილი და ამისათვის აუცილებელი მეთოდოლოგიური საფუძვლები ჯერ კიდევ ჩამოყალიბების აქტიურ პროცესშია. გამომდინარე აქედან, მიწის რესურსების შესწავლა-შეფასება და თანამედროვე მიდგომებზე დაფუძნებული მეთოდოლოგიის შემუშავება, რესურსების რაციონალური გამოყენება და დაცვა მნიშვნელოვან სამეცნიერო და კონსტრუქციულ საკითხს წარმოადგენს.

მიწის რესურსების შემადგენელი კომპონენტები არსებობენ, არა დამოუკიდებლად, არამედ კომპლექსურ და მჭიდრო ურთიერთკავშირში, როგორც ლანდშაფტური გარსის ნაწილი, ანთროპოგენური ფაქტორების გათვალისწინებით, ამიტომ ცალკეული კომპონენტის შეცვლას გააჩნია პოტენციური ჯაჭვური პრინციპით გამოიწვიოს სხვა მდგენელების ცვლილება. გამომდინარე აქედან, მიწის რესურსების კვლევისას აუცილებელია ერთიანი და კომპლექსური მიდგომა, რათა ჯეროვნად მოხდეს კონკრეტული პროცესისა თუ მოვლენის შეფასება.

უკანასკნელ პერიოდში ხელოვნური ინტელექტის (AI), მანქანური და ღრმა სწავლების მეთოდების გამოყენება გეოსივრცული პრობლემების გადაჭრის პროცესში განსაკუთრებულ აქტუალურობას იძენს. მანქანური და ღრმა სწავლების ალგორითმების ინტეგრაცია გეოინფორმაციულ სისტემებთან (GIS) და დისტანციური ზონდირების (RS) პროდუქტებთან შესაძლებლობას იძლევა, პრაქტიკულად, დროითი და სივრცითი შეზღუდვის გარეშე მოხდეს დედამიწის ზედაპირის, მისი ცალკეული გარსების კვლევა, რაც მძლავრ ტექნოლოგიურ საფუძველს ქმნის მიწის რესურსების სივრცე-დროითი და რაოდენობრივი პარამეტრების შეფასებისათვის. ამ ტექნოლოგიური მიღწევების ქართულ სინამდვილეში აპრობაცია და დანერგვა მნიშვნელოვანია როგორც პრაქტიკული ისე სამეცნიერო თვალსაზრისით.

ცაგერის მუნიციპალიტეტი, რომელიც საკვლევ ტერიტორიას წარმოადგენს, კავკასიონის სამხრეთ განშტოებებს შორის, ქვეყნის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში მდებარეობს. საქართველოს ისეთი მთიანი და მცირემიწიანი რეგიონებისათვის, როგორც რაჭა-ლეჩხუმი და ქვემო სვანეთია, იმის გათვალისწინებით, რომ მათ ეკონომიკურ სტრუქტურაში სოფლის მეურნეობას დღემდე წამყვანი ადგილი უკავია, სასიცოცხლო მნიშვნელობის პრობლემას წარმოადგენს მიწის რესურსებზე და მის ცალკეულ მდგენელებზე მონაცემების სიმწირე, რაც აფერხებს ასეთი ტერიტორიების მდგრად ეკონომიკურ განვითარებას, აგრარული პირობების გაუმჯობესებას, რაციონალური ბუნებათსარგებლობის დაგეგმვას და ბუნებრივ-ანთროპოგენური ფაქტორებით გამოწვეული მიწის დეგრადაციის პროცესების მიტიგაციას.

**კვლევის მიზნები და ძირითადი ამოცანები.** წინამდებარე კვლევის მიზანია ცაგერის მუნიციპალიტეტის მაგალითზე, რომელიც რთული რელიეფური და ლანდშაფტური პირობებით ხასიათდება, მანქანური და ღრმა სწავლების ალგორითმების გამოცდა მიწის რესურსების შეფასებისათვის, დისტანციური ზონდირების მასალებისა და სხვადასხვა მოდელების ინტეგრაციით GIS გარემოში. ამ მიზნის მისაღწევად გამოყოფილია შემდეგი კონკრეტული ამოცანები:

ცაგერის მუნიციპალიტეტისა და მიმდებარე ტერიტორიების თანამგზავრული გამოსახულებებიდან მიწის საფარის კლასიფიკაცია მრავალფეროვან ლანდშაფტურ და

რთული რელიეფის პირობებში და ამ მიზნის განსახორციელებლად შერჩეული მანქანური სწავლების სამი მოდელის - შემთხვევითი ტყის, საყრდენი ვექტორების მანქანისა და ხელოვნური ნეირონული ქსელის გამოცდა და ურთიერთშედარება. ცაგერის მუნიციპალიტეტისათვის პირველად მიწის საფარის თემატური რუკების მომზადება და არსებული მდგომარეობის ანალიზი. ასევე, საშუალო სივრცული გარჩევადობის Sentinel-2-სა და მაღალი სივრცული გარჩევადობის PlanetScope-ის თანამგზავრული გამოსახულებების სპექტრული არხების სინთეზით მიწის საფარის კლასიფიკაციის სიზუსტის გაზრდა.

საკვლევ ტერიტორიაზე ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მოდელირება და რისკის ზონების განსაზღვრა ემპირიული მოდელის - RUSLE-ს ინტეგრაციით შემთხვევითი ტყის ალგორითმთან. საკვლე ექსპედიციებისა და სხვადასხვა კვლევითი ცენტრების ღია მონაცემთა ბაზებიდან მიღებული ციფრული მონაცემების დამუშავებით ცაგერის მუნიციპალიტეტის მიწის რესურსების ძირითადი მდგენელების სივრცითი და რაოდენობრივი მახასიათებლების, წყლისმიერი ეროზიის ზოგადი სივრცე-დროითი თავისებურებების და პროცესის განვითარებისათვის ხელშემწყობი ფაქტორების გაანალიზება და მიტიგაციის გზების შემუშავება, აგრეთვე მოდელ RUSLE-ს გამოყენებით ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის პროგნოზირებული მაჩვენებლების სიზუსტის გაზრდის შეფასება მანქანური სწავლების ალგორითმებთან ინტეგრაციის გზით.

უპილოტო საფრენი აპარატებისა და ხელოვნური ინტელექტის გამოცდა საქართველოს პირობებში ორთოფოტოებზე დაფუძნებული საკადასტრო რუკების შესადგენად, რაც ცალკეული პარსელების ბუნებრივი თუ ხელოვნური, ფიქსირებული საზღვრების ავტომატურად დადგენას გაცილებით მოქნილს გახდის და გაამარტივებს საკადასტრო სამუშაოების წარმოებას სხვადასხვა ეტაპზე (მიწათსარგებლობის ფაქტის დადგენა ვიზუალური ნიშნებით, ნაკვეთის საზღვრების წინასწარი აღმოჩენა და ა.შ.).

**სამეცნიერო სიახლე და პრაქტიკული მნიშვნელობა.** სადისერტაციო ნაშრომი მიწის რესურსების კომპლექსური შეფასების, მიწის საფარის ავტომატური რუკათმედგენის, უპილოტო საფრენი აპარატებისა და დედამიწის სადამკვირვებლო თანამგზავრული

სისტემებით მოპოვებული გამოსახულებების, აგრეთვე მანქანური სწავლების ალგორითმების გეოსივრცული პრობლემების გადაჭრისათვის გამოყენების და ნიადაგის ეროზიის პროგნოზულ მოდელებთან ინტეგრაციის ერთ-ერთი პირველი მცდელობაა ქართულ რეალობაში. საერთაშორისო სამეცნიერო წრეებში აღნიშნული მეთოდების გამოყენება დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერებების მიმართულებით უახლეს ტენდენციას წარმოადგენს და განსაკუთრებულ აქტუალობას მხოლოდ ბოლო დეკადის განმავლობაში იძენს, რაც განპირობებულია დროის აღნიშნულ პერიოდში კომპიუტერული ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარებით და ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და გაუმჯობესებისათვის აუცილებელი ტექნიკური ბაზის ხელმისაწვდომობის გაზრდით.

განხორციელებული კვლევების სამეცნიერო სიახლეებიდან და კონსტრუქციული მნიშვნელობიდან შეიძლება აღინიშნოს შემდეგი:

- საქართველოს ერთ-ერთი ტიპური მთიანი მუნიციპალიტეტის ფარგლებში კომპლექსური მიწის საფარის კლასიფიკაცია და რუკათშედგენა მანქანური სწავლების ცალკეული ალგორითმების ინტეგრაციით დისტანციური ზონდირების მასალებთან და გეოინფორმაციულ სისტემებთან.
- მიწის საფარის კლასიფიკაციის პროცესში სხვადასხვა ალგორითმების უპირატესობებისა და ხარვეზების გამოვლენა, მათი სიზუსტისა და წარმადობის გამოცდა მიწის საფარის ცალკეული ტიპების აღმოჩენისათვის.
- ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მეთოდოლოგიით უპილოტო საფრენი აპარატებით მოპოვებული ძალიან მაღალი სივრცული რეზოლუციის აეროფოტოსურათებიდან შენობებისა და ხილული საკადასტრო საზღვრების ამოცნობისა და აციფვრის ავტომატიზაცია.
- ემპირიული მოდელის - RUSLE-ს და შემთხვევითი ტყის ალგორითმის ინტეგრაცია, ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის რისკის მოდელირების შედეგების სიზუსტის გაზრდისათვის.
- საკვლევ ტერიტორიაზე ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მაჩვენებლების განსაზღვრა.

- ეროზიის მაღალი რისკის ზონაში მოქცეული არელების იდენტიფიკაცია და ტრიგერ ფაქტორების დადგენა. რეკომენდაციების შემუშავება პროცესის შემარბილებელი ღონისძიებების გატარებისათვის, ასეთის საჭიროების შემთხვევაში.

- განხორციელებული თემატური კვლევების საფუძველზე დისტანციური ზონდირების სხვადასხვა მეთოდებით მოპოვებული მასალების და მანქანურ სწავლებაზე დაფუძნებული გეოსივრცული მოდელირების შესაძლებლობების გამოვლენა მიწის რესურსებთან დაკავშირებული პროცესების კომპლექსური შეფასებისათვის.

**გამოყენების სფერო.** სადისერტაციო ნაშრომში განხილული კვლევის მეთოდები და მიღებული შედეგები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა გეოსივრცული ამოცანების გადაწყვეტის პროცესში, აგრეთვე მიწის რესურსების კვლევისა და მართვის მიზნებისათვის.

ნაშრომის ცალკეული ნაწილები გამოყენებადია უმაღლეს სასწავლებლებში დისტანციური ზონდირების, გეოინფორმაციული სისტემებისა და მიწის რესურსების მართვის შესაბამისი მოდულების როგორც თეორიული საკითხების, ისე პრაქტიკული ასპექტების სწავლებისათვის.

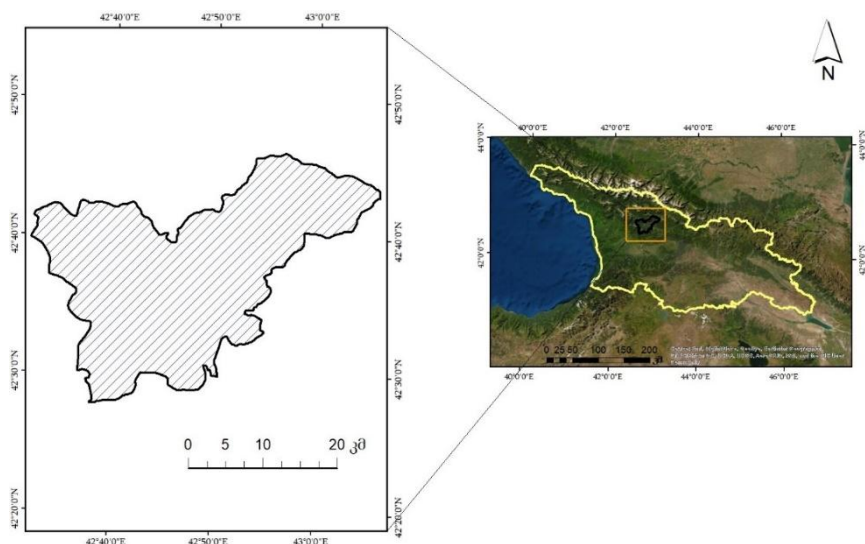
**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** ნაშრომი შედგება შესავლის, 5 თავის, 13 ქვეთავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნაწილებისაგან; წარმოდგენილია 124 ნაბეჭდ გვერდზე, მათ შორის 14 ცხრილი, 51 ფიგურა, 65 დასახელების ლიტერატურა.

## 1. სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა

ლიტერატურის მიმოხილვის ნაწილი მოიცავს დისტანციური ზონდირების მასალებიდან მიწის საფარის კლასიფიკაციასთან, მიწის დეგრადაციის პროცესებსა და მის მოდელირებასთან, მიწის საკადასტრო სამუშაოებში ახლო მანძილის დისტანციური ზონდირებისა და ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასთან დაკავშირებული საერთაშორისო ლიტერატურის განხილვას, დღეისათვის საკითხის შესწავლილობის მდგომარეობის, არსებული სიცარიელებისა და გავრცელებული მიდგომების ანალიზს.

## 2. კვლევის მეთოდები

საკვლევ ტერიტორიას წარმოადგენს ცაგერის მუნიციპალიტეტი, რომელიც რაჭა-ლეჩხუმისა და ქვემო სვანეთის რეგიონში, კავკასიონის მთავარი წყალგამყოფი ქედის სამხრეთ განშტოებებს შორის მდებარეობს. მუნიციპალიტეტის ფართობი მცირედ აღემატება 755 კმ<sup>2</sup>-ს, რაც ქვეყნის მთელი ტერიტორიის, დაახლოებით, 1%-ს შეადგენს.



ფიგურა 1. ცაგერის მუნიციპალიტეტის მდებარეობა



საკვლევი ობიექტის კომპლექსურობიდან გამომდინარე კვლევის პროცესში გამოყენებულია მრავალფეროვანი დარგთაშორისი კვლევის მეთოდები, კომპიუტერული და დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერებების სფეროდან, რაც მათ შორის, ვლინდება სივრცული და სტატისტიკური მონაცემების მოპოვების, სისტემატიზაციისა და ანალიზისათვის კომპიუტერული სისტემების, სხვადასხვა პროგრამირების ენებისა და პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებების გამოყენებით. კვლევის ძირითადი ხაზი დაფუძნებულია გეოსივრცული მოდელირების პროცესზე, განსხვავებული მოდელებისა და მონაცემების გამოყენებით, ვინაიდან ნაშრომში განხილული მოვლენებისა და პროცესების უმეტესობის რეალურ პირობებში შესწავლა მეტად რთული და ძვირადღირებული ამოცანაა, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში შეუძლებელიც კი. ნაშრომის ერთ-ერთ მიზანს წარმოადგენს, სწორედ, გეოსივრცული მოდელირების, როგორც მეთოდის, შესაძლებლობებისა და უპირატესობების გამოვლენა დასმული პრობლემების გადაჭრისათვის. გარდა ამისა, ნაშრომში გამოყენებული მონაცემების უმეტესობა მოპოვებულია დისტანციური ზონდირების სხვადასხვა მეთოდების, თანამგზავრული სისტემებისა და უპილოტო საფრენი აპარატების მეშვეობით, რომელთა დამუშავებისათვის სინთეზურად ვიყენებდით ფოტოგრამმეტრიული, გეოსაინფორმაციო, კარტოგრაფიული, მათემატიკური, სტატისტიკური და გეომორფოლოგიური კვლევის მეთოდებს. მონაცემთა შეგორვების და ზოგიერთ შემთხვევაში მიღებული შედეგების რეალურ პირობებში გადამოწმებისათვის საკვლევ ტერიტორიაზე 2023-2024 წლებში მოეწყო 3 საველე ექსპედიცია.

კვლევის პროცესში ჯამში გამოყენებულია 5 მანქანური და ღრმა სწავლების, ხოლო 1 ემპირიული მოდელი. მიწის საფარის კლასიფიკაციისათვის გამოიყენებოდა ხელოვნური ნეირონული ქსელი (ANN), საყრდენი ვექტორების მანქანა (SVM) და შემთხვევითი ტყე (RF). Mask R-CNN და U-Net ღრმა სწავლების მოდელები გამოყენებულია შენობებისა და საკადასტრო საზღვრების ავტომატური დეშიფრირებისათვის, ხოლო ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მოდელირებისათვის - მოდელი RUSLE და შემთხვევითი ტყის ალგორითმი.

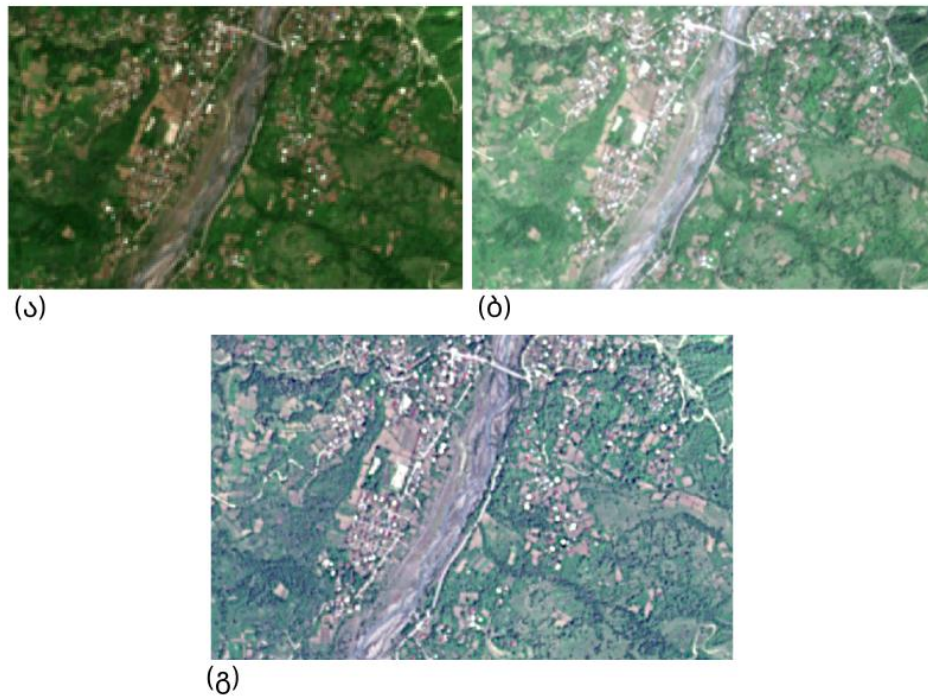
### 3. ცაგერის მუნიციპალიტეტის მიწის საფარის კლასიფიკაცია

საკვლევი ტერიტორიის ფარგლებში მიწის საფარის კლასიფიკაციისათვის გამოყენებულია Sentinel-2 და PlanetScope თანამგზავრული გამოსახულებები.

Sentinel-2-ს გააჩნია მაღალი სპექტრული ხარისხი, თუმცა საშუალო და დაბალი სივრცული გარჩევადობა, არხების მიხედვით, რაც არ იძლევა შესაძლებლობას შედარებით მსხვილმასშტაბიანი ანალიზის წარმოებისათვის.

ზოგადი ფიზიკურ-გეოგრაფიული მახასიათებლებისა და დღეისათვის ფაქტობრივად არსებული მიწათსარგებლობის ფორმებიდან გამომდინარე, საკვლევ ტერიტორიაზე წარმოდგენილი ობიექტები (შენობა-ნაგებობები, სასოფლო-სამეურნეო მიწის ნაკვეთები და სხვ.) ხასიათდება მცირე გეომეტრიით, ამიტომ საშუალო და დაბალი გარჩევადობის გამოსახულებების კლასიფიკაციით მათი აღმოჩენა გართულებულია და რიგ შემთხვევებში შეუძლებელიც. გამომდინარე აღნიშნულიდან, Sentinel-2-ის სივრცული გარჩევადობის გაზრდის მიზნით კვლევაში გამოყენებულია PlanetScope თანამგზავრული გამოსახულება. სპექტრული არხების კომბინაცია განხორციელდა ვარიაციული (P + XS) შერწყმის ტექნიკის გამოყენებით.

შედეგად, Sentinel-2-ის თითოეული არხის შერწყმა მოხდა PlanetScope-ის მსგავსი მახასიათებლების მქონე სპექტრული არხების საფუძველზე. შესაბამისად, 10 მეტრიანი S-2-ის არხები 2; 3; 4; 8 გაერთიანდა PS-ის 1; 2; 3 და მე-4 არხებთან, მოცემული თანმიმდევრობის მიხედვით. S-2-ის 20 მეტრიანი არხი (8A) გაერთიანდა, ასევე, PS-ის მე-4 არხთან. ხოლო, S-2-ის სპექტრული არხები 5; 6; 7; 11; 12 გაერთიანდა PS-ის სინთეზირებულ არხთან (S). შერწყმის შედეგად მიღებული გამოსახულების სივრცული და სპექტრული მაჩვენებლები შეფასდა RMSE და ERGAS ხარისხის საზომი ინდიკატორების გამოყენებით.



ფიგურა 2. (ა) Sentinel-2; (ბ) PlanetScope; (გ) კომბინირებული გამოსახულება. ბუნებრივი ფერების კომპოზიტები. (სოფ. ორბელის ტერიტორია)

საკვლევ ტერიტორიაზე მიწის საფარის კლასიფიკაციისათვის, როგორც აღინიშნა, შეირჩა მანქანური სწავლების სამი მოდელი - ხელოვნური ნეირონული ქსელი, საყრდენი ვექტორების მანქანა და შემთხვევითი ტყე. კლასიფიკაცია განხორციელდა R პროგრამული ენის გამოყენებით (RStudio პლატფორმაზე, ვერსია 2022.07.2), სადაც მოდელირების პარამეტრების რეგულირებისათვის ძირითადად ვეყრდნობოდით Caret-ის ბიბლიოთეკის ფუნქციებს.

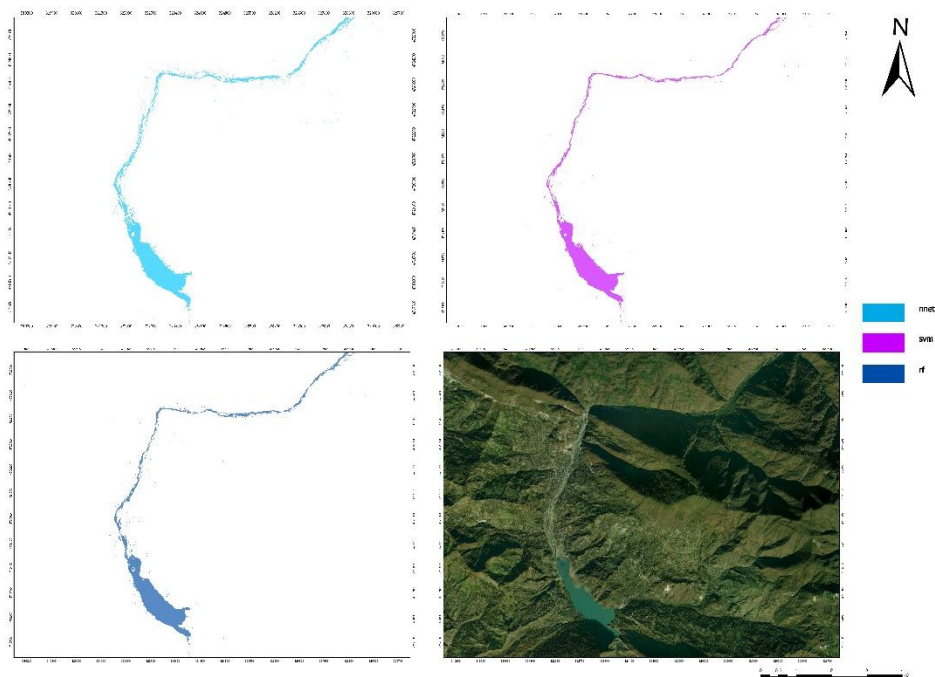
კლასიფიკაციის სქემა განისაზღვრა ევროპის გარემოს სააგენტოს პროგრამით - CORINE შემუშავებული მიწის საფარის კატეგორიების ადაპტაციით ცაგერის მუნიციპალიტეტისათვის. საერთო ჯამში გამოიყო მიწის საფარის 7 კლასი (ცხრილი 1).

ცხრილი 1. მიწის საფარის კლასიფიკაციის სქემა

განსაზღვრული კლასი	დასახელება CORINE სისტემაში	აღწერა
აგრარული დანიშნულების მიწები	Heterogeneous agricultural areas	ერთწლიანი და მრავალწლიანი კულტურებისათვის გამოყენებული მიწის ნაკვეთები, შერეული ბუნებრივ მცენარეულობასთან.
ნაგებობები	Discontinuous urban fabric	ურბანული კონსტრუქციები (შენობები, გზები და სხვ.), რომლებიც განცალკევებულია მცენარეულობით ან ღია სივრცით და არ ქმნის ერთიან ზედაპირს.
წიწვოვანი ტყე	Coniferous forest	მცენარეული ფორმაცია, რომელშიც დომინირებს წიწვოვანი სახეობები და ვარჯის პროექციული დაფარულობა აღემატება 30%-ს.
ფოთლოვანი ტყე	Broad-leaved forest	მცენარეული ფორმაცია, რომელშიც დომინირებს ფართოფოთლოვანი სახეობები და ვარჯის პროექციული დაფარულობა აღემატება 30%-ს.
მდელო	Natural grassland	მდელოები ბუნებრივი მდგომარეობით ან ზომიერი ანთროპოგენური დატვირთვით. შეიძლება მოიცავდეს გამიშვებული გრუნტის ელემენტებსაც.
გრუნტი	Bare rock	ტერიტორიები მცენარეული საფარის გარეშე, ან ბუნებრივად მწირი მცენარეულობით, სადაც ზედაპირის 90% უჭირავს ქანებს.
წყლის ობიექტები	Inland waters	მტკნარი წყლის ტბები, ტბორები, წყალსაცავები, მდინარეები და არხები.

საკვლევ ტერიტორიაზე სანიმუშო მონაცემების შეგროვება განხორციელდა ArcGIS Pro 3.0-სა და QGIS ვერსია - 3.24.1-ის გამოყენებით. შვიდივე გამოყოფილი კლასისათვის მომზადდა 700 ნიმუში. შეგროვებული პოლიგონების საფუძველზე შეიქმნა რასტრული ფენა 3მ რეზოლუციით, კომბინირებული თანამგზავრული გამოსახულების სივრცული გარჩევადობიდან გამომდინარე, რომლის შემდგომი კონვერტაციის საფუძველზე მივიღეთ წერტილების ფენა გამოსახულებიდან სპექტრული სიდიდეების ამოსაღებად. აღნიშნული პროცედურების შედეგად მივიღეთ 110 765 სანიმუშო პიქსელი, საიდანაც 70% გამოვიყენეთ მოდელების გაწვრთნისათვის, ხოლო 30% ვალიდაციისათვის. საწვრთნელი მონაცემების ნაკრები შემდგომ ეტაპზე გამოყენებულ იქნა მანქანური სწავლების მოდელების პარამეტრების რეგულირებისათვის, ჯვარედინი შემოწმებისა და ქსელში ძიების გზით. ძიების პროცესში ოპტიმალური ან საუკეთესო პარამეტრის კონკრეტული მოდელისათვის განსაზღვრის შემდეგ მოხდა მათი გამოყენება სრული საწვრთნელი მონაცემებისათვის.

მოდელირების საერთო შედეგებიდან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ საკვლევ ტერიტორიაზე მიწის საფარის კლასიფიკაციისათვის გამოცდილმა სამივე მოდელმა, ცალკეული კლასები განსაზღვრა განსხვავებული სიზუსტით. გამოყოფილი კლასებიდან ყველა მოდელმა უფრო ზუსტად ამოიცნო ფართოფოთლოვანი და წიწვოვანი ტყეები, ასევე წყლის ობიექტები (ფიგურა 3), ხოლო ყველაზე მეტად გართულდა ურბანული არეალების დემიფრირება.



ფიგურა 3. მდ. ლაჯანურა და ლაჯანურის წყალსაცავი. ზედა მარცხენა სურათზე ხელოვნური ნეირონული ქსელი, მარჯვენა - საყრდენი ვექტორების მანქანა; ქვედა მარცხენა სურათზე - შემთხვევითი ტყე, მარჯვენა - Spot 6-ის თანამგზავრული გამოსახულება (2.5მ).

ხარისხობრივად ხელოვნური ნეირონული ქსელის მიერ კლასიფიცირებული მიწის საფარის რუკა, საერთო ჯამში, აღემატება საყრდენი ვექტორების მანქანისა და შემთხვევითი ტყის ალგორითმებით მიღებულ გამოსახულებებს.

#### 4. მიწის დეგრადაციის შეფასება ნიადაგის ეროზიის მოდელირებით

ცაგერის მუნიციპალიტეტში ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მოდელირებისა და რისკის შეფასების პირველ ეტაპზე გამოვიყენეთ ემპირიული მოდელი RUSLE.

მოდელი შედგება 5 პარამეტრისაგან: 1. R - ატმოსფერული ნალექების ეროზიული პოტენციალის ფაქტორი; 2. K - ნიადაგის ეროზიულობის ფაქტორი; 3. LS - ტოპოგრაფიული ფაქტორი; 4. C - მცენარეული საფარის გავლენის ფაქტორი; 5. P - დამცავი ღონისძიებების ფაქტორი.

მოდელირების, მონაცემთა დამუშავება-ანალიზისა და შედეგების ვიზუალიზაციისათვის გამოყენებულია გეოსაინფორმაციო სისტემები, რის საფუძველზეც საჭირო პარამეტრებისა და ფაქტორების თავმოყრა მოხდა ერთიან ციფრულ სივრცეში. ხოლო, მეორე მხრივ, დისტანციური ზონდირების სხვადასხვა მეთოდებით მიღებული მასალები წარმოადგენს მოდელირების მონაცემთა მთავარ წყაროს, რომლებზე დაყრდნობითაც მოხდა RUSLE-ს ფაქტორების პირდაპირი ან ირიბი გზით შეფასება და განსაზღვრა. აღნიშნული მოიაზრებს საკვლევი არეალის საზღვრებში მთელი რიგი ფიზიკურ-გეოგრაფიული და ანთროპოგენური პროცესებისა და მოვლენების ანალიზს, შესაბამისი თემატური, ციფრული რუკების მომზადებას, ეროზიის რისკის მოდელირებას და ცხელი წერტილების განსაზღვრას.

RUSLE-ში გათვალისწინებული ხუთივე ფაქტორის მოდელირების შემდგომ მოხდა თემატური რასტრული გამოსახულებების გაერთიანება, რის შედეგადაც მივიღეთ ცაგერის მუნიციპალიტეტში ნიადაგის დანაკარგის საშუალო წლიური მაჩვენებლები (ტ/ჰა წელიწადში).

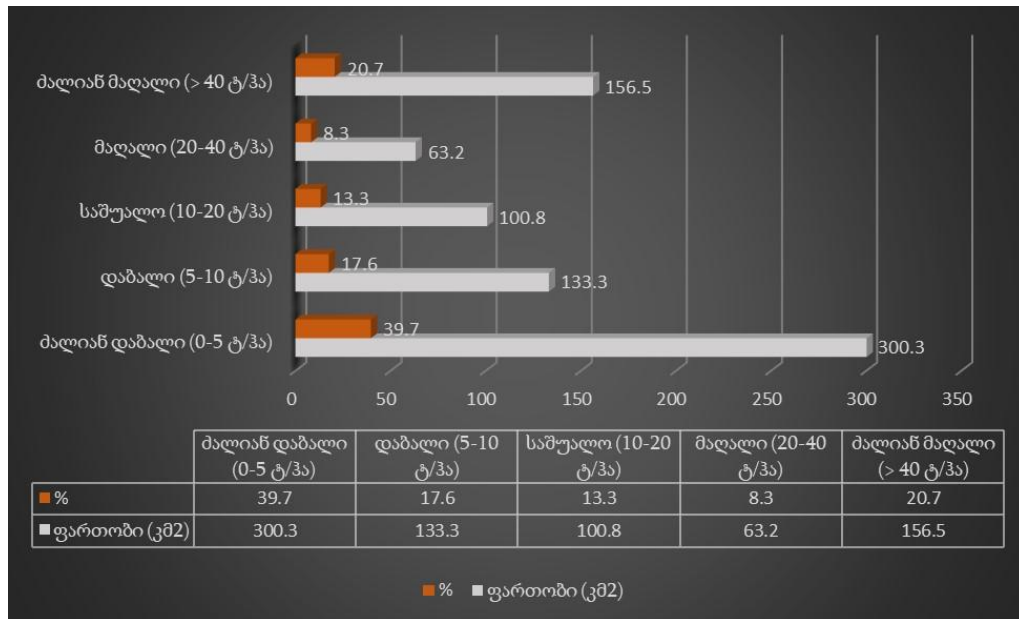
ეროზიის განვითარებასა და მიმდინარეობაზე გავლენას ახდენს რიგი ფაქტორები, რომლებიც მოდელ RUSLE-ში არ არის გათვალისწინებული. ასეთი ფაქტორებიდან შეიძლება გამოიყოს ფერდობების ექსპოზიცია, მდინარეთა ქსელის სიხშირე, დაშორება გზიდან და მდინარიდან, ადგილის ლითოლოგიური მახასიათებლები და ა.შ.

ამ პარამეტრების მოდელირების პროცესში შემოტანისა და საკვლევ ტერიტორიაზე ნიადაგის საშუალოწლიური დანაკარგის პროგნოზირების სიზუსტის გაზრდის მიზნით დამატებით განხორციელდა შემთხვევითი ტყის ალგორითმის ადაპტაცია.

შემთხვევითი ტყის ალგორითმისათვის საწვრთნელ მონაცემებს წარმოადგენს ნიადაგის ეროზიის RUSLE მოდელირებით მიღებული არეალების და მაღალი გარჩევადობის თანამგზავრული გამოსახულებების ანალიზისა და საველე

სამუშაოების შედეგად შეგროვებული ეროზიის გამოვლინების წერტილოვანი მონაცემები. სულ შეგროვდა 250 მონაცემი, რომელთა 70% გამოვიყენეთ მოდელის გასაწვრთნელად, ხოლო 30% დასატესტად.

RUSLE და შემთხვევითი ტყის მოდელებით მიღებული ეროზიის მაჩვენებლები დაიყო 5 კლასად ე.წ. „ბუნებრივი წყვეტის“ კლასიფიკაციის გამოყენებით.

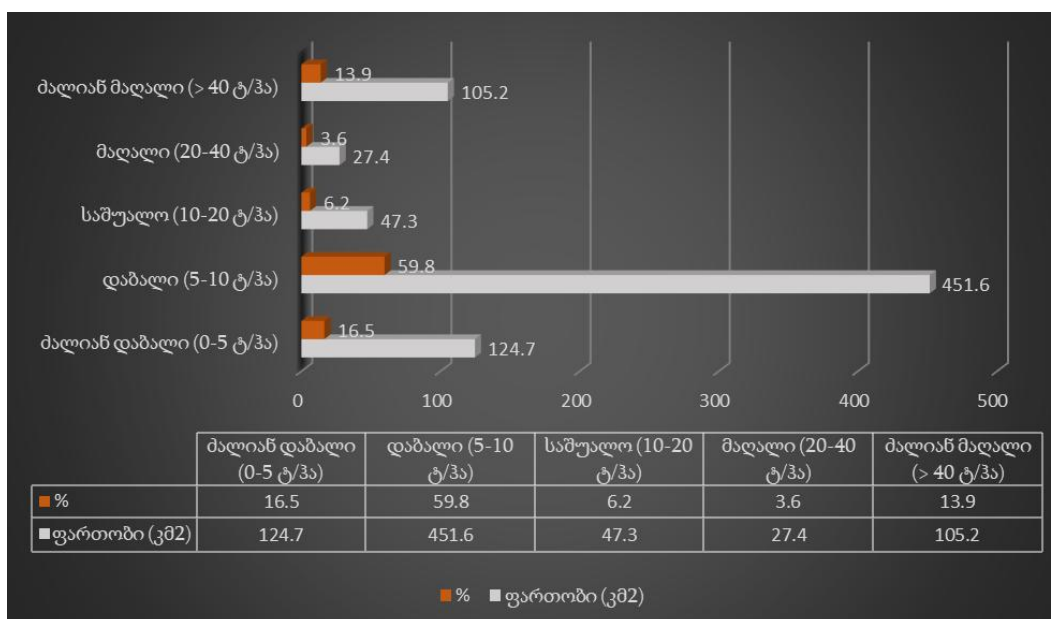


ფიგურა 4. ნიადაგის დანაკარგისა და ეროზიის განვითარების რისკის განაწილება ფართობის მიხედვით (RUSLE)

მოდელ RUSLE-ს მონაცემების მიხედვით (ფიგურა ) საკვლევი ტერიტორიის 39.7% ხვდება ეროზიის მალიან დაბალი რისკის ზონაში. ეროზიის მალიან მაღალი მაჩვენებელი მივიღეთ ტერიტორიის 20.7%-ისათვის, რომელიც ძირითადად დაკავშირებულია ლეჩხუმისა და ხვამლის ქედების, აგრეთვე ასხის კარსტული მასივის მაღალი ჰიფსომეტრიისა და დახრილობის ფერდობებთან. ეს ტერიტორიები ან სრულიად მოკლებულია ნიადაგურ და მცენარეულ საფარს, ან პრიმიტიული ნიადაგებითა და მწირი ვეგეტაციური საფარითაა წარმოდგენილი.

შემთხვევითი ტყის მოდელირებით RUSLE-თან შედარებით რამდენადმე განსხვავებული შედეგები მივიღეთ. ამ მოდელს მრავალფეროვანი მონაცემების გათვალისწინებით შეუძლია გააანალიზოს რთული არაწრფივი ურთიერთკავშირი ნიადაგის ეროზიის განვითარებასა და მის მაპროგნოზირებელ ფაქტორებს შორის. საპირისპიროდ, RUSLE წარმოადგენს რა ემპირიულ მოდელს, ეროზიის

პროგნოზირებისას მის მდგენელ ფაქტორებს შორის ურთიერთდამოკიდებულებას აფასებს როგორც წრფივ კავშირს, რამაც კომპლექსურ ფიზიკურ-გეოგრაფიულ პირობებში შეიძლება ზედმეტად გამარტივებულ და განზოგადებულ შედეგებამდე მიგვიყვანოს. თუმცა, ამ ნიშნით, მისი სიმარტივე და პრაქტიკულობა დადებით მხარედაც შეიძლება ჩაითვალოს, თუ მოდელირება ხორციელდება ნაკლებად კომპლექსურ პირობებში.



ფიგურა 5. ნიადაგის დანაკარგისა და ეროზიის განვითარების რისკის განაწილება ფართობის მიხედვით (RF)

ფიგურა 5-დან ჩანს, რომ შემთხვევითი ტყის მოდელირებით მიღებული მონაცემების მიხედვით საკვლევი ტერიტორიის 16.5%-ზე ნიადაგის დანაკარგი და ეროზიის განვითარების რისკი ძალიან დაბალია, ხოლო 13.9%-ზე ძალიან მაღალი.

საერთო ჯამში კვლევის შედეგები აჩვენებს, რომ RUSLE-სა და შემთხვევითი ტყის მოდელისათვის მიღებული ეროზიის კლასების ხვედრითი წილი განსხვავებულია საკვლევი ტერიტორიის ფარგლებში. RUSLE-ს მიხედვით, ჯამურად, ცაგერის მუნიციპალიტეტის 42.3% ხვდება ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის საშუალო, მაღალი ან ძალიან მაღალი რისკის ზონაში. იგივე კლასები შემთხვევითი ტყის ალგორითმმა განსაზღვრა ტერიტორიის 23.7%-ზე. შედეგების სივრცული ანალიზი და სავსე



ექსპედიციებისას მიღებული მონაცემების შეჯერება აჩვენებს, რომ RUSLE-ს მიერ რიგ შემთხვევებში გადაჭარბებითაა განსაზღვრული საშუალო, მაღალი და ძალიან მაღალი ეროზიის განვითარების რისკი ფართოფოთლოვანი და შერეული ტყით დაფარულ მაღალი გრადიენტის ფერდობებზე, რაც შემთხვევითი ტყის მოდელის შემთხვევაში ძირითადად დაკომპენსირებულია მოდელირების პროცესში შემოტანილი დამატებითი ცვლადების საშუალებით და შესაბამისი ტერიტორიები უმეტესად მოქცეულია დაბალი (5-10 ტ/ჰა) რისკის ზონაში. გარდა ამ შემთხვევისა, გამოვლენილი ეროზიის საშუალო და მაღალი მაჩვენებლების კონცენტრაცია ძირითადად ემთხვევა მუნიციპალიტეტში სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების და დასახლებების მიმდებარედ არსებული მეორადი მდელოების გავრცელების არეალებს, რომლებიც ინტენსიურად გამოიყენება მსხვილფეხა რქოსანი პირუტყვის საძოვრებად.

შედეგების ინტერპრეტირებისას გასათვალისწინებელია, რომ როგორც RUSLE-ით, ისე შემთხვევითი ტყის მიდელით მიღებული ეროზიის მონაცემები არ აჩვენებს არსებულ ნიადაგის დანაკარგებს, არამედ ეროზიის განვითარების პოტენციალს კონკრეტულ არეალზე პროცესის მაპროვოცირებელი ფაქტორების თანხვედრის პირობებიდან გამომდინარე.

განხორციელებული კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები ქმნის წარმოდგენას საკვლევი ტერიტორიის ფარგლებში მიწის დეგრადაციის პროცესის მსვლელობისა და მისი გამომწვევი ფაქტორების ურთიერთთკავშირის შესახებ, რაც თავის მხრივ, წარმოადგენს ეროზიის საწინააღმდეგო ღონისძიებათა შემუშავების და გატარების, ბუნებრივი რესურსების რაციონალურად გამოყენებისა და დაცვის ინფორმაციულ საფუძველს.

## **5. ხილული საკადასტრო საზღვრებისა და შენობების ავტომატური ამოცნობა უპილოტო საფრენი აპარატებითა და ღრმა სწავლების მოდელებით**

ცაგერის მუნიციპალიტეტის სასოფლო დასახლებებისა და საკუთრივ ქალაქ ცაგერის განაშენიანების თავისებურებები, ტოპოგრაფიული მახასიათებლები, აგრეთვე

ურბანული და რურარული გარემოს მიქსი ხელსაყრელია უპილოტო საფრენი აპარატების გამოყენებით ძალიან მაღალი გარჩევადობის ორთოფოტოგეგმების მომზადებისა და ღრმა სწავლების მოდელების გამოყენებით ობიექტების ავტომატური ამოცნობის ეფექტურობის შესაფასებლად საქართველოს პირობებში მიწის ადმინისტრირების ავტომატიზაციისათვის.

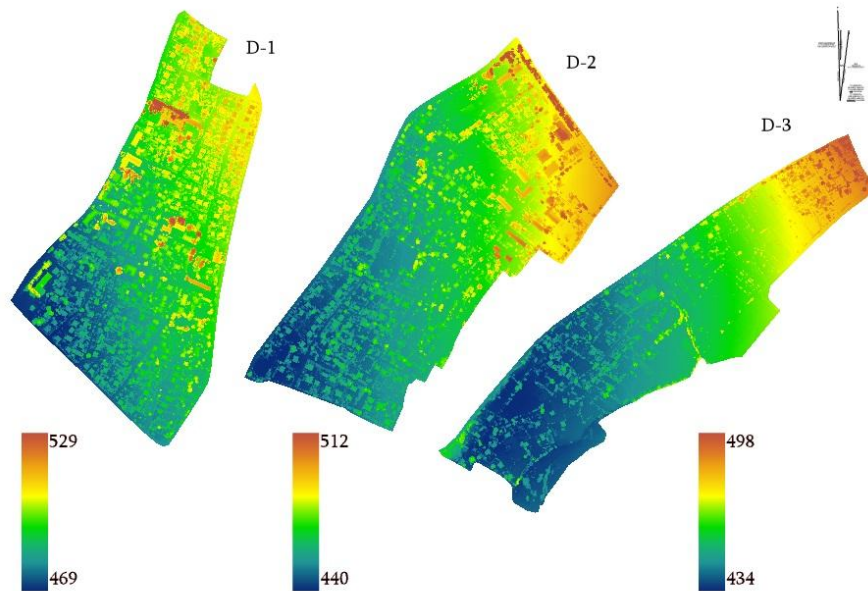
შენობების ავტომატური ამოცნობისა და დიგიტალიზაციისათვის გამოყენებული აეროფოტოსურათები მოპოვებულია 2024 წლის ივნისში ჩატარებული საველე ექსპედიციის ფარგლებში ქალაქ ცაგერსა და მიმდებარე სოფელ ჭალისთავში, DJI Mavic 3 უპილოტო საფრენი აპარატით განხორციელებული ფრენების შედეგად.

აეროგადაღებების ფარგლებში, რომელიც ქალაქ ცაგერსა და სოფ. ჭალისთავში სამ სხვადასხვა არეალზე განხორციელდა, ჯამში დაიფარა 128 ჰექტარი ტერიტორია.

სულ შეგროვდა 1600 აეროფოტოსურათი, რომელთა ფოტოგრამმეტრიული დამუშავების, ორთოფოტო და ციფრული სასიმალო მოდელების გენერაციისათვის გამოვიყენეთ Agisoft Metashape Professional 1.8 პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალება.

აეროფოტოსურათების დამუშავების შედეგად თითოეული ფრენის არეალისათვის მივიღეთ ძალიან მაღალი გარჩევადობის (პიქსელის ზომა - 3 სმ) ორთომოზაიკები და ციფრული სასიმალო მოდელები (ფიგურა 6).





ფიგურა 6. ორთოფოტოგეგმები და ციფრული სასიმალო მოდელები ქ. ცაგერისა და სოფ. ჭალისთავის ტერიტორიისთვის

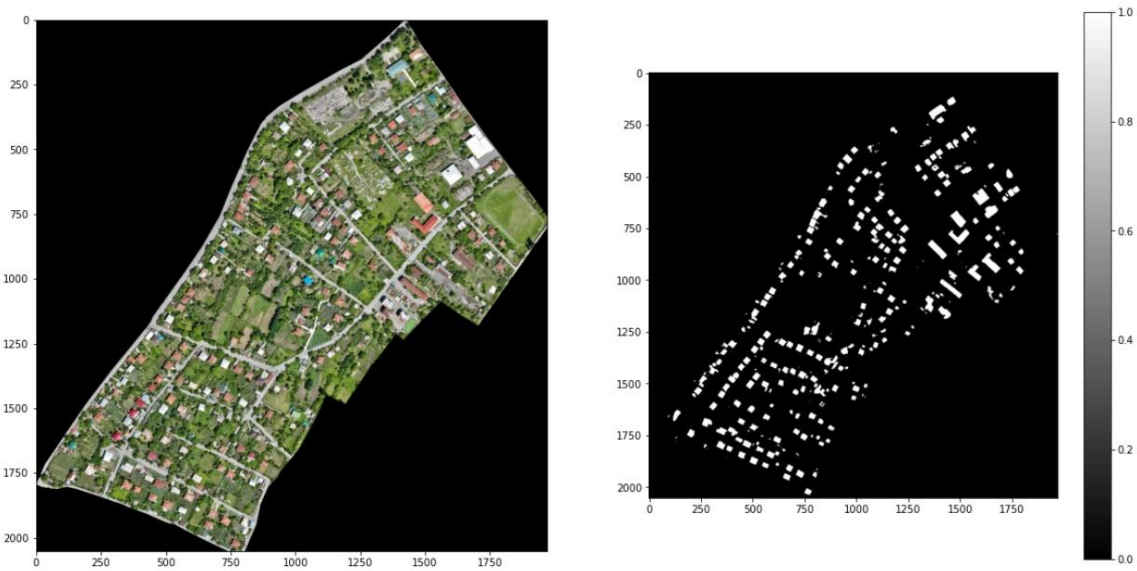
გამოსახულებებიდან შენობების ავტომატური ამოცნობისა და დიგიტალიზაციისათვის შეირჩა Mask R-CNN ღრმა სწავლების მოდელი.

მოდელის გასაწვრთნელად გამოვიყენეთ Zone-1 ორთომოზაიკიდან ხელით აციფრული შენობების მოხაზულობები, საიდანაც აციფრა 330 შენობა-ნაგებობა. გარდა ამისა, Zone-1 და Zone-3, არსებული შენობა-ნაგებობებით, წარმოადგენს საწვრთნელ და ვალიდაციის მონაცემებს 70% / 30% თანაფარდობით, ხოლო Zone-2 გამოყენებულია როგორც სატესტო არეალი გაწვრთნილი მოდელის შესაფასებლად.

გამოსახულებებიდან შენობების ავტომატური ამოღება დაკავშირებულია რიგ სირთულეებთან, რომელთაგან აღსანიშნავია საკვლევ ტერიტორიაზე წარმოდგენილი შენობების კომპლექსური ფორმა, ზომა, ტექსტურა, ფერი და სახურავის მასალა, აგრეთვე ისეთი ობიექტების არსებობა, როგორცაა ხეები და ჩრდილები აეროფოტოსურათებზე. მოდელის წარმადობის გასაზრდელად და არასწორად პროგნოზირებული შენობების რაოდენობის შესამცირებლად ორთოფოტოებთან, რომლებიც 3 სპექტრული არხისაგან (RGB) შედგება, განხორციელდა ციფრული სასიმალო მოდელების კომბინირება. შედეგად მივიღეთ 4 არხიანი (RGBD) გამოსახულებები, რომლებიც მოდელს აწვდის არამხოლოდ სპექტრულ, არამედ

ტოპოგრაფიულ ინფორმაციასაც, რაც მნიშვნელოვანი მდგენელია ცვალებადი რელიეფის პირობებში.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, სატესტო მონაცემს წარმოადგენდა Zone-2 ორთომოზაიკა, რომელიც მოდელს არასდროს „უნახავს“. გამოსახულება ჯამში მოიცავს 450-ზე მეტ განსხვავებული ზომის, ფორმის, შეფერილობისა თუ დანიშნულების შენობა-ნაგებობას. ფიგურა 7-ზე ნაჩვენებია Zone-2 ორთომოზაიკა, მოდელის მიერ აღმოჩენილი შენობების რასტრულ გამოსახულებასთან ერთად.

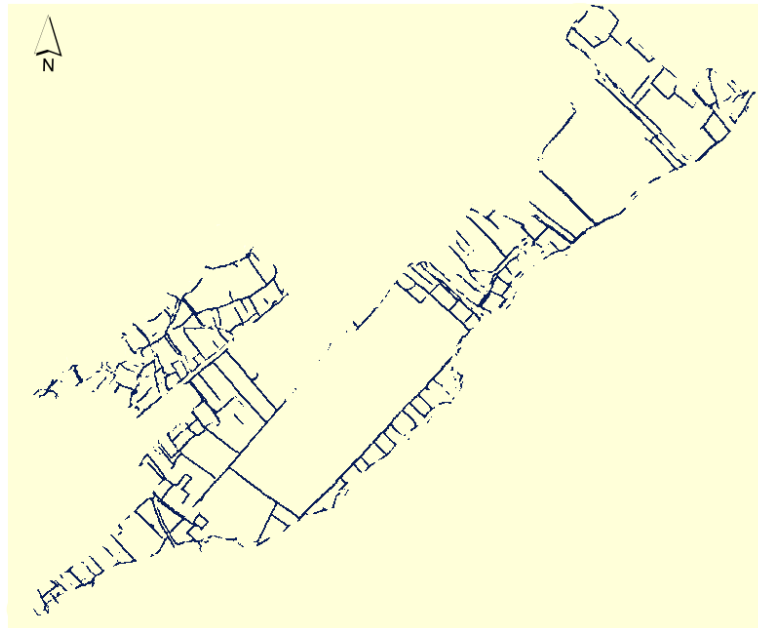


ფიგურა 7. სატესტო ორთომოზაიკა და Mask R-CNN მოდელის პროგნოზირების შედეგები ცაგერის მუნიციპალიტეტში, ღრმა სწავლების მეთოდით, საკადასტრო საზღვრების ავტომატური დეშიფრირებისათვის ორთოფოტოგეგმების მოსამზადებლად შეირჩა 4 სოფლის ტერიტორია: წიფერჩი, ქვედა ცაგერი, ლეშკედა და ხოჯი. შესაბამისი ტერიტორიების შერჩევა განხორციელდა აქ წარმოდგენილი ხილული საზღვრების შედარებით დიდი რაოდენობიდან გამომდინარე, რაც აუცილებელი პირობაა კვლევის მიზნების განსახორციელებლად. საკვლევი ტერიტორია, მათ შორის სასოფლო-სამეურნეო სავარგულები, ხშირად დაფარულია მცენარეული საფარით, რაც დამაბრკოლებელი გარემოებაა ნაკვეთების საზღვრების გარჩევისათვის. ფრენები განხორციელდა 2023 წლის მაისში. მიღებული აეროფოტოსურათების გამოყენებით ჩამოთვლილი ოთხი სოფლის, ჯამურად 195 ჰექტარი ტერიტორიისათვის მომზადდა ძალიან მაღალი გარჩევადობის (პიქსელის ზომა - 5 სმ) ორთომოზაიკები.

საზღვრების ამოცნობისათვის შეირჩა U-Net დრმა სწავლების მოდელი. მისი სპეციფიკაციები განსაკუთრებით ხელსაყრელია კვლევის მიზნებისათვის, რადგან მოდელს გააჩნია შესაძლებლობა გააანალიზოს გამოსახულების როგორც ლოკალური, ისე გლობალური მახასიათებლები სხვადასხვა მასშტაბით. მაქსიმალური გაერთიანებისა და ნახტომი კავშირების კომბინაცია მოდელს აძლევს ნაკვეთების საზღვრის დეტალების აღდგენის საშუალებას ფართო სივრცული კონტექსტის აღქმასთან ერთად, რაც გადამწყვეტია კომპლექსური გამოსახულებებიდან საზღვრების სეგმენტაციისათვის.

მოდელის ასაწყობად, გასაწვრთნელად და სიზუსტის შესაფასებლად გამოვიყენეთ Python 3 პროგრამული ენის PyTorch მანქანური სწავლების ბიბლიოთეკა. გაწვრთნა განხორციელდა ტრანსფერული სწავლების მეთოდით, BSDS500 მონაცემთა ნაკრებისა და ბენჩმარკის გამოყენებით.

U-Net მოდელი გაწვრთნის შემდეგ დაიტესტა სოფ. ქვედა ცაგერის ორთომოზაიკაზე, რომლისთვისაც განხორციელდა ნაკვეთის საზღვრების ამსახველი ბინარული რასტრის გენერაცია (ფიგურა 8).



ფიგურა 8. U-Net მოდელის პროგნოზირებული ნაკვეთების ხილული საზღვრები (სოფ. ქვედა ცაგერი)

აღწერილი მეთოდის და მიღებული შედეგების გამოყენებისას საჭიროა რამდენიმე ფაქტორის გათვალისწინება. პირველ რიგში, ყველა საკადასტრო საზღვარი არ არის ხილული ან ფიზიკური ობიექტებით ფიქსირებული, ამიტომ მნიშვნელოვანია ტერიტორიის წინასწარი შეფასება, რათა გაირკვეს რამდენად შესაფერისია ამ მეთოდის გამოყენება კონკრეტულ არეალზე. ჩვენს მიერ მიღებული მოდელი გამოიცადა ამ მიზნისათვის საკმაოდ რთულ პირობებში. საქართველოს სხვა რეგიონებისათვის, განსაკუთრებით ეს ეხება მთათაშორისი ბარის ტერიტორიებს, მოდელის წარმადობა თეორიულად უნდა იყოს კიდევ უფრო მაღალი, რაც სამომავლო კვლევების საგანია. უნდა აღინიშნოს, რომ მიღებული მონაცემები თავისთავად არ წარმადგენს საბოლოო საკადასტრო საზღვრებს, არამედ პირველად მონაცემს, რომელიც იძლევა საბაზისო წყაროს შესაბამისი ანალიზის საფუძველზე საკადასტრო რუკების შესადგენად.

## დასკვნა

მიწის რესურსების შეფასება სტრატეგიული, მდგრად განვითარებაზე ორიენტირებული სივრცითი დაგეგმარების საფუძველია. დისტანციური ზონდირების ძირითადი როლი კი ამ პროცესში ინფორმაციის მოპოვებაა მიწის ფიზიკური მახასიათებლების შესახებ, რომლებიც დაკავშირებულია ცალკეული მიწის საფარის კატეგორიათა განაწილების სივრცე-დროით თავისებურებებთან, მიწის ადმინისტრირების სისტემათა ფუნქციონირებასთან, მიწის დეგრადაციისა და ურბანიზაციის მასშტაბთან და სხვა. ამ ინფორმაციის დამუშავება და სამეცნიერო თუ პრაქტიკული მიზნებისათვის გამოყენება შესაძლებელი ხდება კომპიუტერულ სისტემებზე დაფუძნებული ავტომატური რუკათშედგენისა და ანალიზის საშუალებით.

სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში ჩატარებული კვლევების შედეგად, მიწის რესურსების სხვადასხვა კომპონენტების და მათთან დაკავშირებული პროცესებისა და მოვლენების შესაფასებლად გამოიცადა დისტანციური ზონდირების, მანქანური

სწავლებისა და გეოინფორმაციული სისტემების ინტეგრირებულად გამოყენების შესაძლებლობები.

- საკვლევი ტერიტორიისათვის მომზადდა გეოგრაფიული გარსის არაერთი კომპონენტის ციფრული თემატური რუკები და გაანალიზდა მათი ურთიერთკავშირის თავისებურებები, ამ კავშირებით განპირობებული მოვლენების გავლენა მიწის რესურსების მახასიათებლებსა და მათ მდგომარეობაზე.

- ცაგერის მუნიციპალიტეტში პირველად განხორციელდა მიწის საფარის კლასიფიკაცია მანქანური სწავლების 3 მოდელის და 2 მულტისპექტრული თანამგზავრული გამოსახულების კომბინირებული გამოყენებით.

- შეფასდა მანქანური სწავლების მოდელების პარამეტრიზაციის ოპტიმალური გზები, დადებითი და უარყოფითი ასპექტები. საერთო ჯამში, მიწის საფარის კლასიფიკაციისათვის ყველაზე მაღალი წარმადობა აჩვენა ხელოვნური ნეირონული ქსელის ალგორითმმა.

- მომზადდა საკლასიფიკაციო სქემით განსაზღვრული მიწის საფარის შვიდი კატეგორიის ციფრული რუკები, რაც თავის მხრივ, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მიწის მართვის სხვადასხვა მიზნებისათვის.

- მუნიციპალიტეტის ტერიტორიაზე მიწის დეგრადაციის პროცესი შეფასდა ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მოდელირებით და განისაზღვრა ეროზიით დაზიანებული და რისკის ქვეშ მყოფი არეალები.

- ამ მიზნისთვის გამოყენებული ემპირიული მოდელის - RUSLE-ს მიერ პროგნოზირებული შედეგების გაუმჯობესებისათვის განხორციელდა შემთხვევითი ტყის მოდელის ადაპტაცია, რითაც მოდელირების პროცესში შემოვიტანეთ ნიადაგის ეროზიაზე გავლენის მქონე ისეთი გეოგრაფიული ფაქტორები, რომლებიც RUSLE-ში არ არის გათვალისწინებული.

- მანქანური სწავლების ალგორითმისა და დამატებითი ცვლადების ეფექტურობა დადასტურდა გამოვლენილი ეროზიის არეალების საველე პირობებში ვიზუალური შეფასებითაც. მიღებული შედეგების მიხედვით მუნიციპალიტეტის ტერიტორიის 23.7% ხვდება ეროზიის განვითარების საშუალო, მაღალი ან ძალიან მაღალი რისკის

ზონაში, რაც სივრცულად ძირითადად დაკავშირებულია ანთროპოგენური ზემოქმედებით დატვირთულ არეალებთან, როგორცაა ფერდობებზე განვითარებული სასოფლო-სამეურნეო სავარგულები და სამოვრები.

- მოდელირების შედეგების მიხედვით საკვლევ ტერიტორიაზე ნიადაგის წყლისმიერი ეროზიის მსვლელობაზე მოქმედი ორი უმთავრესი ფაქტორია რელიეფი და მცენარეული საფარის გავრცელების პირობები. სამომავლოდ ნიადაგის ეროზიის განვითარების მიტიგაციისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს მუნიციპალიტეტის ტერიტორიის დიდ ნაწილზე წარმოდგენილი მაღალპროდუქტიული ტყეების რაციონალურად გამოყენებასა და შენარჩუნებას, რაც გათვალისწინებული უნდა იყოს ნებისმიერი ინფრასტრუქტურული პროექტის განხორციელებისას. აღნიშნული კარგად ჩანს RUSLE-სა და შემთხვევითი ტყის გამოყენებით მოდელირებული ეროზიის განვითარების რისკის შედეგების შედარებისას, როცა ერთ შემთხვევაში, საკვლევ ტერიტორიის ზოგიერთ არეალზე მცენარეულობის ფაქტორით არ არის დაკომპენსირებული რელიეფის და ნალექების ეროზიული პოტენციალი, ხოლო მეორე შემთხვევაში ნაჩვენებია მწვანე საფარის როლი ეროზიის შეკავებაში. ამ თვალსაზრისით, სასურველია არსებული ხელუხლებელი ტყეების ბაზაზე მოხდეს დაცული ტერიტორიების განვითარება, მით უფრო, რომ დღეისათვის მუნიციპალიტეტში არ არის შექმნილი არცერთი კატეგორიის დაცული ტერიტორია.

- მიწის ადმინისტრირების მიზნებისათვის, დისტანციური ზონიდრებისა და ღრმა სწავლების მოდელების შესაფასებლად, განხორციელდა აეროგადაღებები უპილოტო საფრენი აპარატის გამოყენებით.

- ჯამურად, 6 დასახლებული პუნქტის საზღვრებში დაიფარა 323 ჰექტარი ტერიტორია და მომზადდა ძალიან მაღალი სივრცული გარჩევადობის ორთოფოტოგეგმები და ციფრული სასიმალო მოდელები, რომელთა ბაზაზეც გამოიცადა ღრმა სწავლების ორი მოდელი შენობებისა და ნაკვეთების ხილული საზღვრების ავტომატური აციფრისათვის, შემდგომში მათი გამოყენებით საკადასტრო რუკების შედგენისა და განახლების პროცესის დასაჩქრებლად და ხარჯების შესამცირებლად.



- ჩვენ მიერ გაწვრთნილმა Mask R-CNN მოდელმა აჩვენა 92%-იანი სიზუსტე ორთომოზაიკებისა და ციფრული სასიმალო მოდელების კომბინირებულ გამოსახულებებზე შენობების ამოცნობისათვის. ნაკვეთების ხილული საზღვრების ავტომატური დემიფრირებისათვის გამოიყენა მოდიფიცირებული U-Net ღრმა სწავლების მოდელი. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ ამ მეთოდების გამოყენება ეფექტურია საკადასტრო რუკათშედგენის პროცესში სივრცული ჩარჩოს მოსამზადებლად.

რა თქმა უნდა, სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობის ფარგლებში ჩატარებულ კვლევებს გააჩნია გარკვეული შეზღუდვები, რაც უპირველესად დაკავშირებულია გამოყენებული მასალების ხარისხთან, ზოგიერთ შემთხვევაში კი დანაკლისთან. აგრეთვე, მონაცემთა დამუშავების და მოდელირების პროცესში არსებობდა ლიმიტაციები, რაც განხილულია შესაბამის თავებსა და ქვეთავებში. მიუხედავად ამისა, კვლევის თითოეულ ეტაპზე ნათლად გამოიკვეთა გეოსივრცული მოდელირებისა და დისტანციური ზონდირების მეთოდების ეფექტურობა ლანდშაფტურ გარსში მიმდინარე პროცესებისა და მოვლენების შესწავლა-შეფასებისათვის. ნაშრომში გაანალიზებული საკითხები, გამოყენებული მეთოდოლოგია და მიღებული შედეგები ღირებულია როგორც სამეცნიერო, ისე პრაქტიკული თვალსაზრისით და ქმნის საქართველოში ამ მიმართულებით შემდგომი კვლევების განვითარების საფუძველს.

## **აპრობაცია**

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი საკითხები და კვლევის შედეგები განხილულ იქნა საინჟინრო გეოდეზიისა და გეოინფორმატიკის დეპარტამენტის კოლოქვიუმებზე, აგრეთვე სამეცნიერო-პრაქტიკულ ღონისძიებებზე - კონფერენციებსა და თემატურ სემინარებზე.

## პუბლიკაციები

ტყემელაშვილი, ნ. მიწის საფარის კლასიფიკაცია ცაგერის მუნიციპალიტეტში დისტანციური ზონდირებისა და მანქანური სწავლების გამოყენებით. დოქტორანტთა ეროვნული სამეცნიერო კონფერენციის მასალები. თბილისი, აღმოსავლეთ ევროპის უნივერსიტეტი, 2023, გვ. 233-252. [https://eeu.edu.ge/wp-content/uploads/2024/08/დოქტორანტთა-კრებული\\_Final-1.pdf](https://eeu.edu.ge/wp-content/uploads/2024/08/დოქტორანტთა-კრებული_Final-1.pdf)

Tkeshelashvili, N. (2024). Empirical and Machine Learning Models for Soil Erosion Risk Assessment: A Case Study of Tsageri Municipality Georgia. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 28 (11), 148-162 pp. <https://doi.org/https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i11843>

ტყემელაშვილი, ნ. (2024). უპილოტო საფრენი აპარატები და ხელოვნური ინტელექტი ძალიან მაღალი რეზოლუციის რუკათმედგენისა და ობიექტების ავტომატური ამოცნობისათვის. *Georgian Scientist*, 6 (4), 97-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.04.10>

ტყემელაშვილი, ნ. (2024). სივრცული საფუძვლის მომზადების ავტომატიზაცია საკადასტრო რუკათმედგენისათვის დრონებისა და ღრმა სწავლების გამოყენებით. *Junior Researchers*, 2 (2), 98-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.52340/jr.2024.02.02.10>

## Abstract

### **Spatial and Quantitative Assessment of Land Resources Using Remote Sensing and Machine Learning**

Land resources form the fundamental basis for the socio-economic development of the country. Contemporary global ecological and economic challenges emphasize the necessity for sustainable and efficient management of land resources across the world. Evaluating land resources within a unified framework and analyzing their quantitative and qualitative attributes are essential prerequisites for formulating sustainable development strategies, optimizing land use and ensuring the rational utilization of resources.

This thesis discusses the possibilities of geospatial modeling, remote sensing, machine and deep learning techniques in the process of land resources assessment, to obtain cost-effective and as accurate results as possible. This is particularly significant for regions where the absence of comprehensive spatial data still remains a challenge.

The research area, Tsageri municipality in Georgia, with its complex physical-geographical conditions provides an optimal setting for achieving the study objectives. Furthermore, the methodology validated under these conditions is scalable and has the potential for broader application across much of the country's territory.

The aim of the conducted research was, on the one hand, to examine certain components of land resources in Tsageri municipality after a 40-year hiatus, and on the other hand, to test various software analysis methods to determine their capabilities and effectiveness for addressing practical tasks in the future.

Diverse remote sensing datasets were processed using geoinformation systems and range of algorithms, enabling the modeling of specific land resources components with six different models or a combination of them.

Digital land cover maps were prepared for the study area in accordance with the international classification standards. Machine learning models were tested and their performance was evaluated for predicting certain land cover categories. For classification, we used the products of two Earth observation missions (Sentinel-2, PlanetScope) in synthesis.

In Tsageri municipality, after the Soviet era, land degradation was assessed for the first time through modeling of soil water erosion, and for the first time in Georgia, empirical and machine learning models were used in an integrated manner for this purpose. Thematic digital maps were produced, the erosion risk zones were determined and by spatial analysis of their distribution, natural and anthropogenic factors contributing to the process were identified.

As part of the dissertation, several field expeditions were carried out in the study area to prepare very high spatial resolution optical images of the land surface and terrain models, using close-range remote sensing methodologies. Orthomosaics and digital elevation models were generated through the photogrammetric processing of aerial photographs obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV). Based on these materials, two deep learning models were built and tested to establish the spatial framework for cadastral mapping by automatically extracting building footprints and the visible boundaries of individual land parcels from the UAV imagery.

It should be noted, that a significant portion of the methods presented in this paper have been applied for the first time in Georgia to address geospatial issues.