

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დიმიტრი სეხნიაშვილი

მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების კვლევა გამოსახულების  
დამუშავების ამოცანებში

სადოქტორო პროგრამა: "ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები"

შიფრი: 0714

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

თბილისი

2022

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ., პროფესორი რ. სვანიძე

რეცენზენტები:

ტ.მ.დ., პროფესორი მერაბ ახოზაძე

შპს „ტელეკომ ინჟინერინგ კომპანის“

დირექტორი ტ.მ.კ. გიორგი კაკუბერი

დაცვა შედგება 2022 წლის ”25” ”მაისს”13:00” საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის  
სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი VIII, აუდიტორია 504

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალურობა.** გამოსახულების ციფრული დამუშავება, ანალიზი, გამოსახულებაში ფიგურების დაფიქსირება და მათი ამოცნობა, წარმოადგენს აკადემიური და სამეცნიერო კვლევების მნიშვნელოვან საგანს.

ეს სამეცნიერო და საინჟინრო მიმართულება მე-20 საუკუნის 50 იანი წლების მეორე ნახევარში წარმოიშვა, როდესაც, მეცნიერთა წინაშე დადგა თანამგზავრებიდან მიღებული გამოსახულებებიდან ხმაურის გაფილტვრის ამოცანა. ეს საკითხი გადაწყდა გამოსახულების ფურიეს გარდასახვაზე დაფუძნებული სიხშირული ფილტრების საშუალებით, რამაც ბიძგი მისცა გამოსახულების დამუშავების (Digital image processing) როგორც დამოუკიდებელი დისციპლინის ჩამოყალიბებას.

ათწლეულების განმავლობაში ამ მიმართულებით უამრავი მასალა და ცოდნა დაგროვდა, რამაც დააჩქარა კომპიუტერული (მანქანური) ხედვის, საქმიანობის სხვადასხვა სფეროებში გამოყენების ზრდა.

ამ ეტაპზე სახეზეა გამოსახულების დამუშავების მრავალი მნიშვნელოვანი ამოცანა, ისეთი სამეცნიერო და საინჟინრო მიმართულებებისათვის როგორცაა: ვიზუალური ინსპექტირება, წარმოების ხარისხის და უსაფრთხოების კონტროლი, ხელნაწერების და ბეჭდური გამოსახულებების დამუშავება, მიკროსკოპული გამოსახულების ანალიზი, აერო-სადაზვერვო გამოსახულებების დამუშავება როგორც არის გეოლოგია, სამხედრო, სასოფლო-სამეურნეო და სხვა. განსაკუთრებული ადგილი ციფრული გამოსახულების დამუშავებამ ჰპოვა სამედიცინო და ბიოლოგიური გამოსახულებების კვლევის მიმართულებით.

გამოსახულების დამუშავების ერთ ერთ ტრადიციულ მიმართულებას თავიდანვე წარმოადგენდა სატელევიზიო/ვიდეო სიგნალების დამუშავება, შემჭიდროვება მათი სატელეკომუნიკაციო ქსელებში

გადაცემის ეფექტურობის ასამაღლებლად. სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების განვითარებამ, საკომუნიკაციო არხების ტევადობების ზრდამ მნიშვნელოვნად შეამცირა ამ მიმართულებით კვლევის პრიორიტეტები, თუმცა მეორეს მხრივ სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების განვითარებამ გამოიწვია ინტერნეტ ტრაფიკების ექსპონენციალური ზრდა, რომლის ყველაზე დიდ წილს სწორედ ვიდეო და მულტიმედია ტრაფიკი წარმოადგენს, ამასთანავე ინტერნეტ-სატელეკომუნიკაციო ქსელზე გამარტივებულმა და გეოგრაფიულად ყოვლისმომცველმა წვდომამ მნიშვნელოვნად გაზარდა არა მარტო სუბიექტური ტიპის მომხმარებლების (IoH – Internet of Humans) ასევე ობიექტების რაოდენობაც (IoT – Internet of Things), რომელთა მნიშვნელოვან ნაწილს წარმოადგენს ვიდეო უსაფრთხოების სისტემებიც (CCTV – Closed Circuit Television). მონაცემთა ტრაფიკის ასეთმა ზრდამ და სხვადასხვა კლასის ინტერნეტ სერვისებზე სპეციფიურმა ტექნიკურმა მოთხოვნებმა (jitter, delay, BER) წარმოქმნა ახალი ტექნოლოგიური მიდგომები როგორც არის მაგალითად, Edge Computing-ი, რომლის მთავარი არსია დეცენტრალიზებული არქიტექტურის საშუალებით, მომხმარებელთან მაქსიმალურად ახლოს მონაცემების დამუშავება, განსაკუთრებით კი მულტიმედია (აუდიო, ვიდეო) რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს გადასაცემ მონაცემთა ტრაფიკს და გააუმჯობესებს ინტერაქტიულობის მაჩვენებლებს. ასეთი ტექნოლოგიების ეფექტურობა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მონაცემთა დამუშავების ალგორითმების ეფექტურობაზე, მათ შორის გამოსახულების/ვიდეო სიგნალების ანალიზის და დამუშავების ალგორითმების წარმადობაზე.

გარდა ამისა, ამ ეტაპზე მე-4 ინდუსტრიული რევოლუციის სამი ძირითადი მიმართულება, როგორც არის რობოტექნიკა და ხელოვნური ინტელექტი და ბიოტექნოლოგიები, წარმოუდგენელია

გამოსახულების დამუშავების ამოცანების გარეშე. განსაკუთრებულად ინტენსიური სამეცნიერო მუშაობა მიმდინარეობს ხელოვნური ინტელექტის-კონვოლუციური ნეირონული ქსელების მიმართულებით, თუმცა, აღსანიშნავია რომ ნებისმიერი ტიპის ნეირონული ქსელის ეფექტურობა დამოკიდებულია მის შესასვლელზე არსებულ გამოსახულების ხარისხზე, ეს ეხება როგორც ღრმა სწავლების (Deep Learning) ის ასევე კლასიკური მანქანური სწავლების (Machine Learning) ალგორითმებს (SVM, LR, K-NN, RN ა.შ). ამგვარად, წინასწარი დამუშავებით მიღებული გამოსახულების ნეირონულ ქსელში ანალიზის საშუალება იძლევა უკეთეს შედეგს.

ჩვენს მიერ ჩამოთვლილი გამოსახულების დამუშავების ამოცანები ძირითადად გამოიყენება ინდუსტრიალური მიმართულებებისათვის სადაც მონაცემთა დამუშავება ტრადიციულად სრულდება მაღალი წარმადობის გამოთვლითი ტექნიკის გამოყენებით რაც თავის მხრივ საჭიროებს მაღალ კაპიტალ დაბანდებას, თუმცა, დღესდღეობით მულტიმედია ინფორმაციის დამუშავებაზე მოთხოვნა უფრო მეტად იზრდება ჩვეულებრივი მომხმარებლის საყოფაცხოვრებო მოწყობილობებისთვისაც (მობილური ტელეფონები, ტელევიზორები, ვირტუალური, დამატებული რეალობები, ტაქტილური (შგრძნებითი) რეალობა და სხვა) და ასევე IoT მოწყობილობებისათვის რომლის გამოთვლითი შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად მცირეა მისი ენერგოეფექტურობის მოთხოვნის გათვალისწინებით და ძირითადად შემოიფარგლება მიკროკონტროლერზე აგებული სისტემით. ამგვარად მნიშვნელოვანია გამოსახულების დამუშავების არა მარტო ხარისხობრივად ასევე ენერგო (გამოთვლითი) ეფექტური მიდგომების შემუშავება და კვლევა.

ყოველივე ზემოთთქმულიდან გამომდინარე ნაშრომის ფარგლებში ჩატარებული მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების კვლევა გამოსახულების დამუშავების სხვადასხვა ამოცანებისათვის, წარმოადგენს

საინტერესო და აქტუალურ მიმართულებას თანამედროვე ციფრული ტექნოლოგიების წინ მდგარი გამოწვევების მიმართულებით.

### **კვლევის მიზანი და ძირითადი ამოცანები**

ნაშრომის კვლევის მიზანს წარმოადგენს, მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების და მათი გამოყენების ეფექტური მიდგომების კვლევა გამოსახულების დამუშავების სფეროში არსებულ სხვადასხვა მიმართულებებში და ამოცანებში როგორც არის: გამოსახულების ფილტრაცია, სეგმენტაცია, კიდეების და კონტურების აღმოჩენა, ნიშანთვისებათა აღმოჩენის და გამოყოფის ამოცანები და სხვა.

გამოსახულების დამუშავების მიმართულებით არსებობს სხვადასხვა მიდგომები და მეთოდოლოგიები, რომლებიც საწყისი გამოსახულების სპეციფიკიდან იძლევიან განსხვავებულ შედეგებს. მათგან, ზოგიერთ მეთოდოლოგიას შეიძლება გააჩნდეს ხარისხობრივად უკეთესი შედეგი, თუმცა მისი შესრულების დრო იყოს უფრო ხანგრძლივი, ვიდრე სხვა, ალტერნატიული მიდგომების გამოყენებისას.

ნაშრომში განხილულია და გაანალიზებულია დამუშავების სხვადასხვა ვარიანტები და შერჩეულია ჩვენი ამოცანების კვლევისათვის მისაღები მეთოდოლოგიები. კვლევის მიზანია აჩვენოს გამოსახულების დამუშავების სხვადასხვა ამოცანებში დომინირებული მეთოდების ალტერნატივად მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების გამოყენების და მიღებული რეზულტატის ეფექტურობა.

**ნაშრომის კვლევის საგანს** წარმოადგენს სისტემური მიდგომის ჩამოყალიბება მათემატიკური მორფოლოგიის წინ მდგარი ამოცანების გადაწყვეტაზე რაც ორიენტირებულია სხვადასხვა ტიპის გამოსახულებების დამუშავების მიმართ.

განვიხილოთ მორფოლოგიური ოპერატორების მათემატიკური თვისებები, რომელთა საშუალებითაც მიიღწევა ალგორითმების

ოპტიმიზაცია-მოდულიზაცია და შედეგად შესაძლებელია გამოსახულების დამუშავების კუთხით სასურველი შედეგის მიღება. რადგან მორფოლოგიური ოპერატორების გამოყენება ძირითადად არ არის შემოფარგლული რომელიმე კონკრეტული მიმართულების გამოსახულებებისათვის და ის წარმატებულად გამოიყენება როგორც სამედიცინო/ბიოლოგიური, ასევე, თავდაცვის ან აეროკოსმოსური გამოსახულებებისათვის, მნიშვნელოვანია მორფოლოგიური ოპერატორების და ალგორითმების თვისებების მკვეთრად გამოყოფა, და ამ ალგორითმების პრაქტიკულ ამოცანებში სწრაფი ინტეგრაციის გზების ჩვენება.

კვლევის შედეგებზე გასვლა მოითხოვს შემდეგი ძირითადი ამოცანების გადაწყვეტას:

1. მორფოლოგიური ოპერატორების თვისებების შესწავლა და პრაქტიკული გამოყენება.
2. გამოსახულებაში არათანაბარი განათებით გამოწვეული გრადიენტული ფონის (ხმაურის) გაფილტვრა.
3. ჰისტოგრამული პროექციის და მორფოლოგიური ოპერატორების კომბინირებით სეგმენტაციის ალგორითმის შემუშავება.
4. სეგმენტირების შედეგად მიღებულ გამოსახულებაში, გამოსაკვლევი საინტერესო ფიგურების სკელეტონიზაცია და გასხვლა მათი ზომაში შემცირების მიზნით.

კვლევის ობიექტია ხელნაწერი და ბეჭდური ტექსტების შემცველი გამოსახულებები, რომელიც თავისი თვისებებიდან გამომდინარე შეიცავს გამოსახულების დამუშავების წინ მდგარ არაერთ ამოცანას, როგორც არის: ხმაურით გამოწვეული პილპილ-მარილის ეფექტი, სიმკვლეით და ნაკეცებით მიღებული არასასურველი ტექსტურის ეფექტი, არათანაბარი განათებით მიღებული გრადიენტული ფონი, ტექსტის დახრილობა და ა.შ. თვალსაჩინოებისათვის ნაშრომში

ნაჩვენებია სხვადასხვა ბეჭდური ტექსტებზე და ქართველ პოეტების ხელნაწერებზე ჩატარებული ექსპერიმენტული შედეგები. მიუხედავად იმისა რომ, ნაშრომში ექსპერიმენტები ჩატარებულია ხელნაწერ და ბეჭდური ტექსტების გამოსახულებების ნიმუშებზე, ხაზგასით შეიძლება აღინიშნოს რომ, გამოყენებული მიდგომები, პრინციპები, ალგორითმები და მიღებული შედეგები ასევე წარმატებით შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს ნებისმიერი სხვა ტიპის გამოსახულებებზე.

**კვლევის მეთოდოლოგია.** სადისერტაციო ნაშრომში დასმული ამოცანების გადაჭრისათვის თეორიული და პრაქტიკული საკითხების დამუშავებისას გამოყენებულ იქნა Python პროგრამულ ენაზე აგებული, გამოსახულების დამუშავების ბიბლიოთეკები, როგორც არის OpenCV და Skimage, ასევე, მასივების დამუშავების ბიბლიოთეკა numpy. ზოგიერთი ამოცანის დამუშავებისას თვალსაჩინოებისათვის გამოყენებული იქნა MATLAB პროგრამული პაკეტი.

ამ მიზნით, გამოსახულების მორფოლოგიურად დამუშავების პრაქტიკულ ამოცანებში შერჩეული იქნა ქართველი პოეტების ხელნაწერების ციფრული გამოსახულებები, ასევე, სხვადასხვა ლიტერატურული წყაროებიდან სკანერის მეშვეობით მიღებული ნაბეჭდი ტექსტის გამოსახულებების ნიმუშები.

კვლევის მეთოდოლოგიისას პრიორიტეტულად იყო აღებული, ღია/უფასო პროგრამული უზრუნველყოფა და პროგრამირების კოდის ღიაობის პრინციპი, რაც საშუალებას მისცემს სხვა მკვლევარებს და ინჟინრებს პრაქტიკულად ნაშრომში კოდის ნიმუშები თავისუფლად გამოიყენონ თავიანთი ამოცანებისათვის.

**მეცნიერული სიახლე.** სადისერტაციო ნაშრომში განხილული საკითხები, გამოირჩევა თემის კომპლექსურობით, მრავალმხრივი კავშირებით სხვადასხვა მათემატიკურ დისციპლინებთან. შესაბამისად, საკვლევი მასალის თეორიული და პრაქტიკული მიდგომების კონსოლიდაციისა და



ალგორითმების ოპტიმიზაციის საფუძველზე, სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული გვაქვს რიგი სიახლეებისა:

- გამოკვლეულია და გამოვლენილია ტექსტური გამოსახულებების ძირითადი პრობლემატიკა და შემუშავებულია ამ პრობლემების გადაწყვეტის სისტემური მიდგომა მორფოლოგიური ალგორითმების გამოყენების საშუალებით
- კვლევის შედეგად შემუშავებული იქნა არათანაბარი განათებით გამოწვეული გრადიენტული ფონის ფილტრაციის ალგორითმი, სადაც მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტების ალგორითმში კლასიკური მორფოლოგიური გახსნა დახურვის ოპერატორი ჩანაცვლდა რეკონსტრუქციულით.
- სინთეზირების გზით შემუშავებული იქნა ბეჭდური და ხელნაწერი სტრიქონების სეგმენტაციის ახალი მეთოდის - ჰისტოგრამული პროექციების და მორფოლოგიური ოპერატორების გამოყენებით.

**პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების გამოყენების სფერო.**

- ნაშრომში წარმოდგენილი გრადიენტული ფონის გაფილტვრის ამოცანა შესაძლებელია პრაქტიკულად გამოყენებული იქნეს, როგორც საარქივო დოკუმენტების გაციფრულების, ასევე, აერო-კოსმოსური გამოსახულებაში არათანაბარი განათებით გამოწვეული პრობლემის აღმოფხვრისათვის.
- ტექსტური გამოსახულებების სეგმენტაციის ალგორითმის გამოყენება მნიშვნელოვანია და პრაქტიკული ღირებულება გააჩნია არქივების, ისტორიული დოკუმენტების, ხელნაწერების გაციფრულების და შემდგომი ანალიზის მიმართულებით. რადგან, სეგმენტაციის შედეგად მიღებული მასალის ინფორმაციულობა ოპტიმიზირებულია, ხოლო მოცულობა მნიშვნელოვნად მცირეა ვიდრე საწყისი დოკუმენტის მოცულობა.
- ნაშრომში გაანალიზებულ მორფოლოგიური სკელეტონიზაციის და გასხვლის ოპერატორებს გააჩნიათ ძალიან მნიშვნელოვანი და

პრაქტიკული გამოყენების არეალი, როგორც არის კარტოგრაფია, ხელნაწერი და ნაბეჭდი ტექსტების ანალიზის და დამუშავებისას, და ხელნაწერის ავტორის იდენტიფიცირების პროცესში.

- ნაშრომში წარმოდგენილი ალგორითმები, და მათი მეშვეობით დამუშავებული გამოსახულებები საბოლოოდ გვაძლევს გამოსახულების ისეთ სახეს რომელიც ოპტიმალურია მანქანური (ML) და ღრმა სწავლების (DL) ალგორითმებით და ნეირონული ქსელების სხვადასხვა არქიტექტურებით შემდგომი დამუშავებისათვის და წარმადობის ოპტიმიზირებისათვის.

ნაშრომში გაანალიზებული მორფოლოგიური ალგორითმები, მათი პრაქტიკული გამოყენების თითოეული შემთხვევა ნაშრომის დანართში წარმოდგენილია პროგრამული კოდის სახით, რაც საშუალებას მისცემს მკვლევარებს და ინჟინრებს პრაქტიკულად და მარტივად გამოიყენონ ნებისმიერი ტიპის გამოსახულების მორფოლოგიური ალგორითმი მათი საჭიროების შესაბამისად.

**სამუშაოს აპრობაცია.** სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული და განხილული იქნა: სტუ-ს ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების დეპარტამენტის პირველ, მეორე და მესამე კოლოქვიუმებზე 2019-2021 წლებში; საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე.

გარდა ამისა, მიღებული შედეგები წარმოდგენილია სამეცნიერო-ტექნიკურ რეფერირებად ჟურნალებში გამოქვეყნებულ ოთხ სტატიაში.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** დისერტაცია შედგება: შესავლის, ცხრა თავის, დასკვნის, გამოყენებული ლიტერატურის სიისგან და დანართებისაგან. დისერტაციის საერთო მოცულობა შეადგენს 156 გვერდს.

## ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

პირველ თავში განხილულია გამოსახულების მიღების წყაროები, ანალოგური და ციფრული გამოსახულებების თავისებურებები, მათი გამოყენების მიმართულებები და სფეროები. ასევე, გაანალიზებულია ციფრული გამოსახულების პიქსელების ფორმირების მეთოდები და თავისებებები.

აღწერილია დისკრეტული გამოსახულების სამი სახეობის: ბინარული, აქტომატული და მრავალარხიანი, ძირითადი თავისებურებები, თითოეულის უპირატესობები და ნაკლოვანებები.

ამავე თავში წარმოდგენილია ციფრული გამოსახულების დამუშავების - როგორც დისციპლინის, წარმოქმნის საწყისები, ამ მიმართულების წინაშე მდგარი ძირითადი ამოცანები და მათი გადაწყვეტის გზები, ასევე ციფრული გამოსახულების ანალიზის სამი დონე:

1. **გამოსახულების ქვედა დონის (შეზღუდული არსის) დამუშავება** - მოიცავს გამოსახულების გარდაქმნისათვის საჭირო პირველად ოპერაციებს, როგორცაა: გამოსახულების ხმაურის შემცირება, კონტრასტის და სიმკვეთრის გაუმჯობესება, გამოსახულების გეომეტრიული მანიპულაციები (გადიდება, შებრუნება, მოჭრა და სხვა).
2. **გამოსახულების ანალიზი** - მოიცავს პროცესებს როგორცაა: სეგმენტაცია, ობიექტების აღწერა და ინდივიდუალური ობიექტის კლასიფიცირება (აღმოჩენა). დამუშავების ამ დონეზე, შესასვლელზე გვაქვს გამოსახულება ხოლო გამოსასვლელზე გამოსახულების ატრიბუტები (საზღვრები, კონტურები, ფორმები, და სხვა)
3. **გამოსახულების არსის აღქმა (სცენათა ანალიზი):** ამოცნობილი ობიექტების ჯგუფებიდან ძირითადი საწყისის (არსის) სურათიდან გამოტანა, მაგალითად: სცენის აღქმა, ავტონომიური ნავიგაცია. კომპიუტერული ხედვის დონეზე შესასვლელზე გვაქვს გამოსახულების ატრიბუტები ხოლო გამოსასვლელზე გამოსახულების არსი.

ასევე ნაშრომში აღწერილია გამოსახულების დამუშავების ოპერაციების ძირითადი სახეობები: წერტილოვანი, ლოკალური, გლობალური, გეომეტრიული და თითოეულ ამ სახეობაში შემავალი ცალკეული ოპერაციები.

ნაჩვენებია მათემატიკური მორფოლოგიის ძირითადი თვისებები როგორც ორგანოზომილებიან ასევე სამგამზომილებიან სიგნალებზე. განხილულია მორფოლოგიური ოპერაციებისათვის საჭირო სტრუქტურული ელემენტების, ფორმირების ძირითადი პრინციპები, თვისებები და მახასიათებლები.

მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების კვლევის და მათი გამოსახულების დამუშავების ამოცანებში გამოყენების პრაქტიკულობის საჩვენებლად შერჩეული იქნა ხელნაწერი და ბეჭდური გამოსახულების დამუშავების რამოდენიმე მიმართულება. ასეთი გამოსახულებები მათი არაერთგვაროვნებიდან გამომდინარე საჭიროებს სპეციალურ მიდგომას. ნაშრომში ჩვენს მიერ განხილული მორფოლოგიური ალგორითმები და ოპერატორები ეფუძნება საბაზისო მორფოლოგიურ ოპერატორებს - ეროზიას და გაფართოებას.

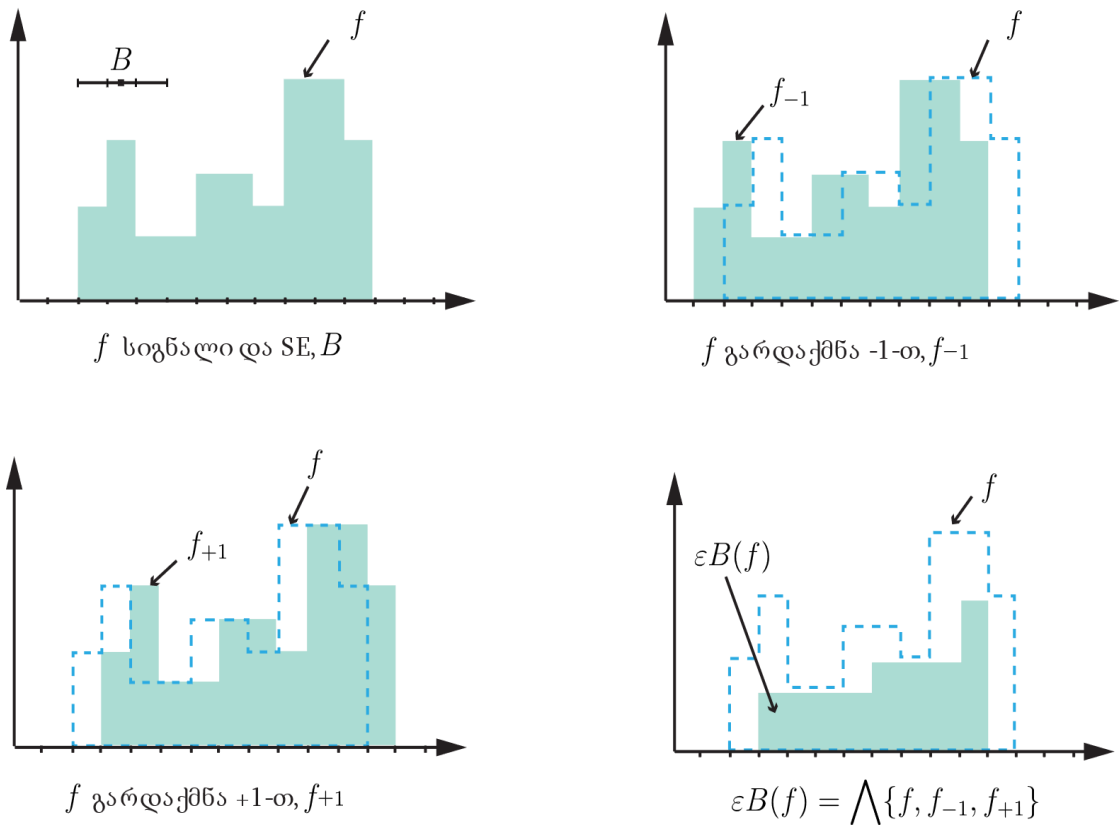
**მეორე თავში** განხილულია მათემატიკური მორფოლოგიის ორი პირველადი ოპერატორის ეროზიის და გაფართოების, მოქმედების პრინციპები და მათი მათემატიკური თვისებები.

X სიმრავლის B სტრუქტურული ელემენტით ეროზია არის, ყველა x წერტილთა ლოკუსი ისე რომ, B სიმრავლე მთლიანად თავსდება X-ში, მაშინ როდესაც B-ს საყრდენი წერტილი განთავსებულია x წერტილზე:

$$\varepsilon B(X) = \{x | B_x \subseteq X\} \quad (1)$$

როგორც ნახ.1-დან ჩანს ეროზია წარმოადგენს, საწყისი გამოსახულების და გამოსახულების სტრუქტურული ელემენტით გარდასახვებით მიღებულ პიქსელთა, წევრობით მინიმუმს.

მორფოლოგიური ეროზიის დროს გამოსახულებაზე არსებული ობიექტები მცირდებათა ზომაში.



**ნახ. 1. გამოსახულების მორფოლოგიური ეროზია, სიმეტრიული  $B$  სტრუქტურული ელემენტით**

ამავე თავში გრძელდება ბაზისური მორფოლოგიური ოპერაციების ანალიზი და განიხილება მორფოლოგიური ეროზიის დუალურ ოპერაცია - მორფოლოგიური გაფართოება.

$X$  სიმრავლის  $B$  სტრუქტურული ელემენტით გაფართოება არის, ყველა  $x$  წერტილთა ლოკუსი ისე რომ,  $B$  სიმრავლე კვეთს  $X$  სიმრავლეს, მაშინ როდესაც  $B$ -ს საყრდენი წერტილი განთავსებულია  $x$ -ზე.

$$\delta_B(X) = \{x | B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (2)$$

გაფართოების ოპერაცია ეროზიისგან განსხვავებით ზომასში ზრდის ანუ აფართოებს გამოსახულებაზე არსებულ ობიექტებს ზომასში, და თუ რამდენად და როგორ გაიზრდება ობიექტი დამოკიდებულია სტრუქტურული ელემენტის ზომასა და ფორმაზე.

ამავე თავში განხილულია მორფოლოგიური ეროზიისა და გაფართოების ძირითადი მათემატიკური თვისებები როგორცაა დუალურობა დისტრიბუტიულობა, კომპოზიციურობა, რომელთა თვისებების

გათვალისწინებაც მნიშვნელოვანია სხვადასხვა ალგორითმების აგების დროს, რადგან მათი საშუალებით შესაძლებელია ოპერაციების ოპტიმიზირება.

მორფოლოგიური საბაზისო ოპერატორები მიუხედავად მათი ფართო გამოყენებისა არ არის საკმარისი ბევრი ამოცანისათვის. თუმცა, მათი ერთმანეთთან სხვადასხვა მიმდევრობით კომბინირებით შესაძლებელია სხვადასხვა პრაქტიკული გამოყენების ალგორითმების და ოპერატორების შექმნა.

**მესამე თავში** წარმოდგენილია მორფოლოგიური ოპერატორების აგების პრინციპები და მათი თვისებები. კერძოდ, ეროზიის შედეგად მიღებული გამოსახულების პირველად გამოსახულებამდე სრულად აღდგენა შეუძლებელია. თუმცა, **მორფოლოგიური გახსნის** ოპერაციის გამოყენების საშუალებით, რაც წარმოადგენს ეროზირებული გამოსახულების შემდგომი გაფართოებით მიღებულ გამოსახულებას, შეგვიძლია მაქსიმალურად მივუახლოვდეთ საწყისი გამოსახულების ფორმებს.

$$\gamma_B(f) = \delta_{\check{B}}[\varepsilon_B(f)] \quad (3)$$

გამოსახულების გახსნის საპირისპირო ოპერაციაა გამოსახულების დახურვა.

$$\phi_B(f) = \varepsilon_{\check{B}}[\delta_B(f)] \quad (4)$$

ნაშრომში მორფოლოგიური ოპერატორების აგებისას გამოყენებულია საბაზისო ოპერაციების სხვადასხვა მიმდევრობით კომბინირების პრინციპი. მიუხედავად იმისა, რომ გამოსახულების დამუშავების მიმართულებით ძირითადად გამოიყენება მორფოლოგიური გახსნისა და დახურვის ოპერატორები, ჩვენს მიერ ასევე განხილულია გაფართოების და ეროზიის ე.წ. რეკონსტრუქციული ალგორითმებიც, რომელთა გამოყენებაც ხშირ შემთხვევებში იძლევა უკეთეს შედეგებს სხვადასხვა პრაქტიკული ამოცანების გადაჭრისას. კერძოდ, რეკონსტრუქციული ალგორითმები საშუალებას იძლევა გამოსახულებიდან იმგვარად ამოვიღოთ არასასურველი რეგიონები, რომ მინიმალურად ვიმოქმედოთ

გამოსახულებაზე არსებულ სხვა სტრუქტურებზე და ფორმებზე, ამასთანავე აღვადგინოთ გამოსახულების ის სტრუქტურები რომლებიც მთლიანად არ იყვნენ გამოსახულებიდან მოშორებული ეროზიის და გაფართოების ოპერატორების მიერ. რეკონსტრუქციული ალგორითმები ამ თვისებებს თავის მხრივ იღებენ გეოდეზიური გაფართოების და ეროზიის გარდაქმნებიდან.

აღსანიშნავია, რომ განსხვავებით სხვა მორფოლოგიური ოპერატორებისგან გეოდეზიური გარდაქმნების დროს ვიყენებთ ორ გამოსახულებას. ერთ-ერთ გამოსახულებაზე ვახდენთ მორფოლოგიურ გარდასახვას, რომელსაც შემდგომ ამოცანიდან გამომდინარე ვათავსებთ მეორე გამოსახულების ზემოდან ან ქვემოდან და ვასრულებთ სასურველ ლოგიკურ ოპერაციას.

ამ გამოსახულებებს ვუწოდებთ  $f$  - მარკერს და  $g$  - მასკის გამოსახულებებს. იმ შემთხვევაში თუ გეოდეზიური ოპერაციების დროს გამოვიყენებთ გაფართოების ან ეროზირების იტერაციულ პროცესს მივიღებთ რეკონსტრუქციულ გარდასახვას.

ციფრული გამოსახულების დამუშავების ერთ-ერთ უპირველეს ამოცანას წრმოადგენს გამოსახულების ფილტრაცია, რომლის დროსაც გამოსახულებიდან ხდება სხვადასხვა წყაროებიდან მიღებული ხმაურის, ან გამოსახულებიდან ჩვენთვის არასასურველი ფიგურების/ობიექტების მოშორება. ამ მიმართულებით საკმაოდ კარგ შედეგს იძლევა მორფოლოგიური ოპერატორებიც, მაგალითად, ტოპ-ჰეტ ოპერატორები რომელიც გარჩეულია მეოთხე თავში.

**მეოთხე თავში** გარჩეულია მორფოლოგიური ტოპ ჰეტების თვისებები, მათი გეოდეზიური ოპერატორებიდან ფორმირების პრინციპები.

მნიშვნელოვანია, რომ მორფოლოგიური ფილტრების შერჩევასას საჭიროა გავითვალისწინოთ იმ სტრუქტურების ფორმები, ზომები და გამოსახულებაში ორიენტაცია, რომელთა გაფილტვრაც გვსურს. ამ პრინციპს ემყარება მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტ ოპერატორებიც, რომელთა გამოყენების დროსაც ვხელმძღვანელობთ გამოსახულებიდან გამოსაყოფი ან

გასაფილტრი სტრუქტურების შესახებ არსებული ინფორმაციით, რაც გვეხმარება შესაბამისი სტრუქტურული ელემენტის შერჩევის პროცესში. არსებობს ორი ტიპის ტოპ-ჰეტი:

თეთრი-ტოპ ჰეტი WTH არის  $f$  გამოსახულებას და მის  $\gamma$  გახსნას შორის არითმეტიკულ სხვაობა, რომელიც გამოსახულებიდან იღებს ყველა ნათელ შტრიხებს და ქვეგრადებს რომლებიც თავსდება შერჩეულ სტრუქტურულ ელემენტში:

$$WHT(f) = f - \gamma(f) \quad (5)$$

ხოლო, შავი ტოპ-ჰეტი BTH კი არის გამოსახულებას და მის დახურვას შორის არითმეტიკული სხვაობა, რომელიც გამოსახულებიდან გამოყოფს მუქ შტრიხებს და ქვეგრადებს რომელიც სტრუქტურულ ელემენტის ზომაზე მცირეა:

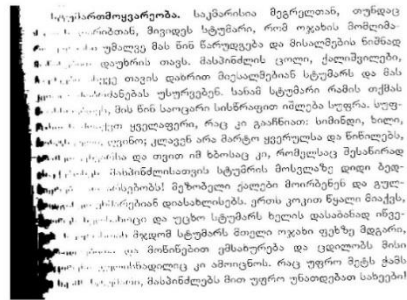
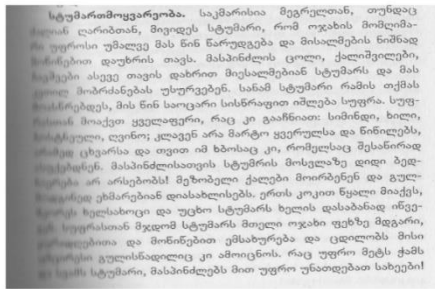
$$BHT(f) = \phi(f) - f \quad (6)$$

**მეხუთე თავში** წარმოდგენილია არათანაბარი განათებით მიღებული გრადიენტული ფონის, მათემატიკური მორფოლოგიის, კერძოდ ტოპჰეტების მოდიფიცირებული ალგორითმით გაფილტვრის მეთოდი. განხილულია მორფოლოგიური ოპერატორების, კერძოდ, ტოპ ჰეტების გამოყენება არათანაბარი განათებით გამოწვეული გრადიენტული ფონის გასაფილტრად. ხელნაწერი და ბეჭდური გამოსახულებების მიღების ერთ ერთ ძირითად წყაროს წარმოადგენს ფოტო-სკანერები რომლის საშუალებით მიღებული გამოსახულებები ხშირ შემთხვევაში დამახინჯებულია არათანაბარი განათებით გამოწვეული გრადიენტული ფონით, აგრეთვე სკანირებისას გამოსახულების არასწორი პოზიციონირების გამო, რასაც პრაქტიკაში ხშირად აქვს ადგილი. გრადიენტული ფონის გამოსახულებიდან მთლიანად მოშორება ან მაქსიმალურად გაფილტვრა აუცილებელია გამოსახულების შემდგომი ანალიზისათვის და გარდაქმნებისათვის. განსაზღვრული ტონალობის დიაპაზონის პიქსელების გასაფილტრად ძირითადად გამოიყენება



ზღვრული ოპერატორები, რომლის ყველაზე ოპტიმალურ ვარიანტს წარმოადგენს ზღვრული ოპერაცია ოცუს ალგორითმით.

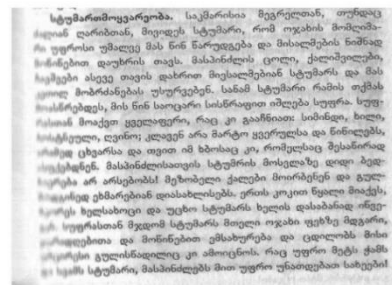
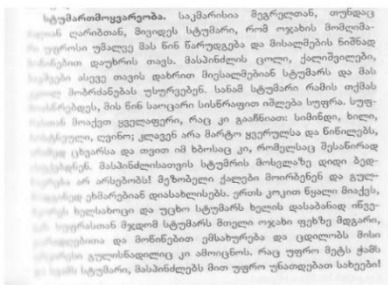
ნახ.2-ზე ჩანს, საწყისი გამოსახულება რომელზეც გვაქვს გრადიენტული ფონი, მას ვამუშავებთ ოცუს ზღვრულის ოპერატორით, თუმცა შედეგი არ არის დამაკმაყოფილებელი რადგანაც, გრადიენტის ფარგლებში მოქცეული ასოები მთლიანად იკარგება და მათი შემდგომი აღდგენა შეუძლებელი ხდება.



ნახ. 2.ა - საწყისი ნაცრისფერი ტონის გამოსახულება არათანაბარი განათებით და გრადიენტული ფონით

ნახ. 2.ბ - გამოსახულების ბინარულად გარდაქმნა ზღვრულის ოპერაციით

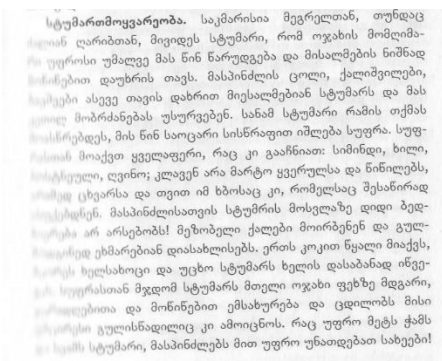
გამომდინარე იმ ფაქტიდან რომ, გრადიენტი მდებარეობს გამოსახულების დაბალ სიხშირულ დიაპაზონში, მის მოშორებლად შემდგომ გამომოვიყენეთ მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტი ოპერაცია, რის საშუალებითაც გრადიენტული ფონი ისე მოშორდა, რომ ნაკლებად ვიმოქმედეთ წინა პლანის პიქსელებზე. ასეთი სახით მიღებულ გამოსახულებაზე (ნახ. 3. ა,ბ) შესაძლებელია შემდგომი მანიპულაციების და ანალიზის ჩატარება.



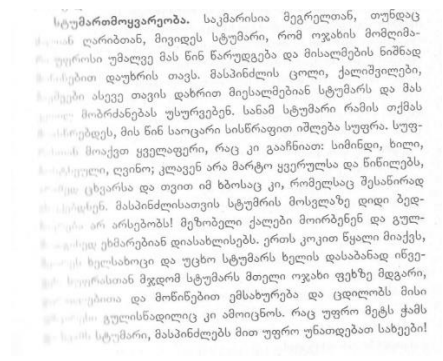
ნახ. 3. ა. საწყისი გამოსახულების გარდაქმნა ტოპ-ჰეტი ოპერაციით

ნახ. 3. ბ. ტოპ-ჰეტით დამუშავებული გამოსახულება მომატებული კონტრასტით

ამგვარად, ტოპ-ჰეტების გამოყენებით შესაძლებელია მივიღოთ თანაბრად განათებული გამოსახულება. თუმცა აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ გამოყენებული სტრუქტურული ელემენტის ზომის ზრდასთან ერთად ჩნდება ე.წ. ბლოკური ეფექტი რაც გამოწვეულია ცრუ კიდეების ეფექტის გაჩენით. ამ პრობლემის გადასაჭრელად ჩვენს მიერ შემოთავაზებული იქნა ალგორითმის მოდიფიცირებული ვერსია სადაც ტოპ-ჰეტების ოპერაციების დროს ვიყენებთ რეკონსტრუქციულ გახსნა - დახურვის ოპერაციებს. შედეგად, მივიღეთ გრადიენტული ფონისგან გაფილტრული გამოსახულება, არასასურველი ბლოკური ეფექტის და ზედმეტად განათების გარეშე (ნახ.4ა,ბ).



**ნახ. 4. ა. ტოპ-ჰეტით მიღებული გამოსახულება. კვადრატული ფორმის 40 პიქსელის სტრუქტურული ელემენტით.**



**ნახ. 4. ბ. მოდიფიცირებული ტოპ ჰეტით მიღებული გამოსახულება, სადაც მორფოლოგიური გახსნა ჩანაცვლებულია, რეკონსტრუქციული გახსნით.**

ტოპ-ჰეტ ალგორითმის მოდიფიცირების საშუალებით მივიღეთ მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებული შედეგი საიდანაც მაქსიმალურად მინიმირიზებული იქნა არასასურველი ეფექტები.

მეექვსე თავში გარჩეულია გამოსახულების სეგმენტაციის მეთოდები, მათ შორის მორფოლოგიური მეთოდებით. განხილულია სეგმენტაციის ერთერთი დამაბრკოლებელი გამოახულების დახრილობის პრობლემა და შემოთავაზებულია ამ პრობლემის აღმოფხვრის მეთოდი. მოყვანილია გამოსახულების დამუშავების ერთ - ერთი ძირითადი ამოცანა -

სეგმენტაცია. შედარებულია სეგმენტაციის ძირითადი მეთოდები, მათი უპირატესობები და გამოყენების სირთულე.

ნაშრომში ასევე გაანალიზებულია გამოსახულების სეგმენტაციის მორფოლოგიური მიდგომები როგორც არის წყალგამყოფი (watershed) სეგმენტაცია და მარკერით მართული სეგმენტაცია, რომელიც რეკონსტრუქციული ოპერაციის მსგავსია. მარკერით მართული სეგმენტაციის საშუალებით შესაძლებელია როგორც მუქი ასევე, ღია ფონის მქონე გამოსახულებაში ობიექტების განცალკევება და ერთმანეთისგან სეგმენტირება, რასაც აქვს პრაქტიკული გამოყენება სხვადასხვა დარგებში როგორც არის ტელემეტრია, მედიცინა, სამრეწველო და ა.შ.

ერთ ერთი მნიშვნელოვანი პრობლემა რითიც ხასიათდება განსაკუთრებით ბეჭდური და ხელნაწერი გამოსახულებები წარმოადგენს, სტრიქონების და ასოების დახრილობა, რაც პოტენციურად ართულებს სეგმენტაციის ამოცანას. ამ პრობლემის გადასაჭრელად ამავე თავში განხილულია სხვადასხვა წყაროებიდან მიღებული გამოსახულებებში დახრილობის კორექტირების ალგორითმი რისი საშუალებითაც ხდება როგორც ბეჭდური ასევე ხელნაწერი გამოსახულებების კორექტირება ჰორიზონტთან მიმართებაში (ნახ. 5.)

მსოფლიოში კორონავირუსით ინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა

მსოფლიოში კორონავირუსით დაინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა, - შესაბამის მონაცემებს

მსოფლიოში კორონავირუსით ინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა

მსოფლიოში კორონავირუსით დაინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა, - შესაბამის მონაცემებს

5. ა) გამოსახულება დახრილი -15 გრადუსით

**Angle: 15.04 degrees**

მსოფლიოში კორონავირუსით ინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა

მსოფლიოში კორონავირუსით დაინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა, - შესაბამის მონაცემებს

5. გ) კორექტირებული გამოსახულება

5. ბ) გამოსახულება დახრილი +30 გრადუსით

**Angle: -30.09 degrees**

მსოფლიოში კორონავირუსით ინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა

მსოფლიოში კორონავირუსით დაინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა, - შესაბამის მონაცემებს

5. დ) კორექტირებული გამოსახულება

5. ე) მარჯვნივ გადახრილი ასოები

5. ზ) კორექტირებული მარცხნივ

5. ვ) მარცხნივ გადახრილი ასოები

5. თ) კორექტირებული მარჯვნივ

ამ მეთოდით დამუშავებული გამოსახულება მზად არის სტრიქონებად და სიტყვებად სეგმენტაციისათვის.

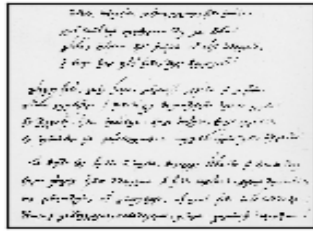
**მეშვიდე** თავში მოცემულია ხელნაწერი და ბეჭდური ტექსტების სტრიქონებად და სიტყვებად სეგმენტაციის მაგალითი რომლის შესასრულებლადაც ჩვენს მიერ შემოთავაზებული და შემუშავებულ იქნა სეგმენტაციის მეთოდი მათემატიკური მორფოლოგიისა და ჰისტოგრამული პროექციების კომბინირების საშუალებით.

წარმოდგენილია ტექსტური გამოსახულებების, როგორც ხელნაწერი ასევე ბეჭდურის, მორფოლოგიური ოპერატორების და ჰისტოგრამული პროექციების საშუალებით ჰორიზონტალური სეგმენტაცია (სტრიქონებად) და ვერტიკალური სეგმენტაცია (სიტყვებად). ჩვენს მიერ შემუშავებულია ალგორითმი რომლის საშუალებით შესრულებული იქნა სეგმენტირების ამოცანა როგორც ხელნაწერ და ბეჭდურ ტექსტებზე.

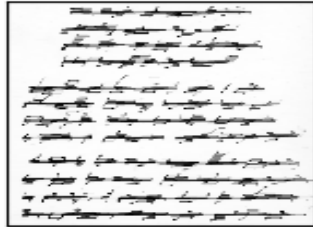
შედეგად, მივიღეთ 70-80% გაუმჯობესებული სიზუსტე სეგმენტირებისას. დამატებითი მაგალითები ნაჩვენებია ნაშრომის დანართში. როგორც ალგორითმიდან ჩანს საწყისი გამოსახულების დამუშავება სრულდება გაუსის ფილტრის ან მორფოლოგიური დათხელება-შესქელების ოპერატორის საშუალებით, რითიც საწყისი გამოსახულებიდან ვაშორებთ მცირე ზომის ხმაურის კომპონენტებს, მიღებულ გამოსახულებაზე ვასრულებთ მორფოლოგიური გარდაქმნის ოპერაციებს და შემდგომ ბინარიზაციას- პიქსელების 1 და 0 მნიშვნელობით წარმოდგენას.

ნახ.6-ზე მოცემულია საწყისი გამოსახულებიდან ბინარიზაციამდე დამუშავების ეტაპები და თითოეულ ეტაპზე მიღებული შედეგების ვიზუალიზაცია.

### საწყისი გამოსახულება



მმ გახსნა



სხვაობა



მეორე დახურვა



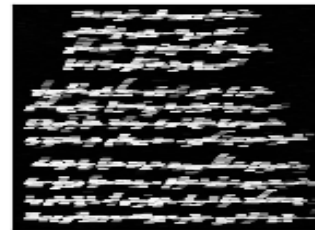
### გაუსის ფილტრი



მმ დახურვა



მმ გრადიენტი



ზღვარი - ოცე



ნახ. 6. საწყისი გამოსახულებიდან ბინარიზაციამდე დამუშავების ეტაპები

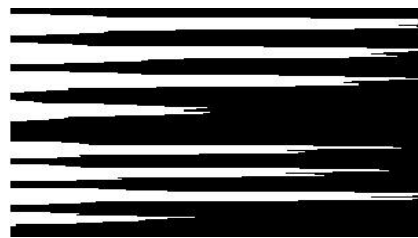
ბინარიზაციის შედეგად მიღებულ გამოსახულებაზე სრულდება ჰისტოგრამის ჰორიზონტალური პროექცია, რომელიც გვამღევს მაქსიმალურ პიკებს სტრიქონების მიმართულებით. თუმცა, ასეთი პროექციები არ არის დისკრეტული და ერთმანეთისგან განცალკევებული, რაც გამოწვეულია ხელნაწერი ტექსტების შემთხვევაში სტრიქონთა შორის ასობის გადაფარვაზე. ამ პრობლემის აღმოსაფხვრელად შევიმუშავეთ ალგორითმი რომელიც ამხოლოებს ცალკეულ სტრიქონებს, თუმცა ამ ოპერაციის შესრულების შედეგად შეძაძლებელია ცალკეული სიმბოლოების ფორმების უმნიშვნელო დამახინჯება (მოჭრა). ჩვენს მიერ შემუშავებულ

ჰისტოგრამის ფილტრაციის ალგორითმში, ფილტრაციის „სიღრმის“ რეგულაცია დამოკიდებულია გამოსახულების თავისებურებაზე და შესაბამისად გამოყენებულ ფილტრაციის კოეფიციენტზე, ამგვარად, კოეფიციენტის სიღრმის მართვა არ არის ავტომატური და წარმოადგენს სუბიექტურ მნიშვნელობას.

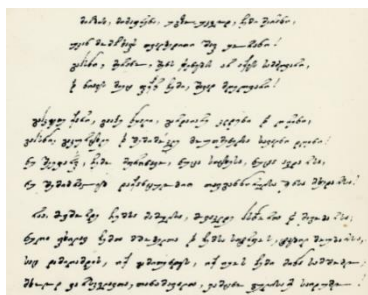
მე-7 ნახაზზე ნაჩვენებია როგორც ბეჭდური ასევე ხელნაწერი ტექსტის ჰისტოგრამული პროექციის ვიზუალიზაცია.

მსოფლიოში კორონავირუსით ინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა

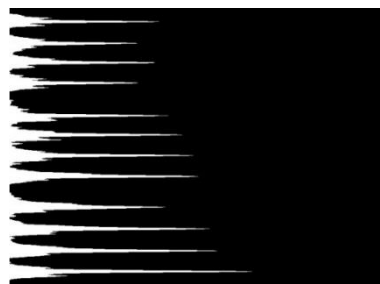
მსოფლიოში კორონავირუსით დაინფიცირებულების საერთო რაოდენობამ 90 მილიონს გადააჭარბა, - შესაბამის მონაცემებს



ნაბეჭდი ტექსტი



Y ჰისტოგრამის პროექცია



ხელნაწერი ტექსტი

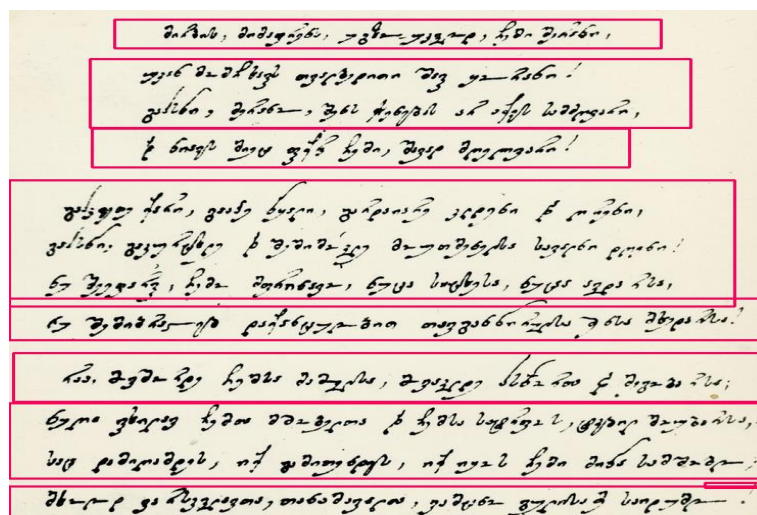
Y ჰისტოგრამის პროექცია

**ნახ. 7. ბეჭდური და ხელნაწერი ტექსტები და მათი შესაბამისი ჰისტოგრამების ჰორიზონტალური პროექცია**

მიღებული ჰისტოგრამების პროექციების შესაბამისად საწყის გამოსახულებაზე ვახდენთ სეგმენტაციას, რის შედეგადაც ვღებულობთ სტრიქონებად სეგმენტირებულ მცირე გამოსახულებებს. ჩვენს მიერ შემუშავებული ალგორითმით მიღებული სეგმენტაციის და გამოსახულების დამუშავების ბიბლიოთეკებში არსებული სტანდარტული ალგორითმის ნაჩვენებია 8 -9 ნახაზებზე.

- 1 მიწას, მიმდევრს, უგზო-უკვლარს, ღმირ შიშინს,
- 2 უნა მამხრებს თვარბერიით შვი ყაზანი!
- 3 ვასნი, ვაზნი, ვის ჩივიან ან აქვს სპილენძი,
- 4 ჭ ნივს შიშ ფრეს ღმირ, შვი მთავარი!
- 5 ვსწავთ ჩანი, ვიანე ხელი, ვაჩიანე კაციანი ჭ თინი,
- 6 ვასნი, ვიუჩხე ჭ შ.შიშვილი მართებრას სავარი რიანი!
- 7 ნე შვიდარს, ღმირ მთიანე, ნეცა სიხესა, ნეცა ავად რა,
- 8 ნე შ.შიშვილი-ცო ჩაჩხეხე-ში თევზანნი-რას ვას შვიდარს!
- 9 რა, ვეშვი ღმირ ვაშვი, ვეშვი სხვა რა ჭ შვიდარს;
- 10 ნეცა ვხივს ღმირ ვაშვი ჭ ღმირ სიხესა, ვეშვი შვიდარს,
- 11 სი რამიანობის, იქ ვიუჩხე, იქ იუან ღმირ ვას სპილენძი;
- 12 შვი-ც ვაშვიდარს, თანაშვილი, ვაშვი ვიუჩხე სიხე-ცო.

ნახაზი 8. ჰიტოგრამული პროექციით მიღებული ხელნაწერი ტექსტის სტრიქონებად სეგმენტაციის მაგალითი



ნახაზი 9. OpenCV და Skimage ბიბლიოთეკებში არსებული სეგმენტაციის ოპერატორებით მიღებული შედეგი

ამგვარად, შემუშავებულ იქნა ტექსტური გამოსახულების სტრიქონების სეგმენტაციის ალგორითმი მორფოლოგიური ოპერატორების და ჰორიზონტალური ჰისტოგრამების კომბინირების საშუალებით, ხოლო, ცალკეულ სიტყვებად სეგმენტაციის ალგორითმი ჰისტოგრამების ვერტიკალური პროექციის მეთოდით. თუმცა, აღსანიშნავია რომ, სეგმენტაციისათვის საჭირო სტრუქტურული ელემენტის და ჰისტოგრამების დისკრეტულად გამოსახვისათვის საჭირო კოეფიციენტი, საჭიროებს ხელით მანიპულაციებს და გამოსახულებაზე მორგებას, გამოსახულებების უნიკალურობიდან გამომდინარე. ამგვარად აღნიშნული კოეფიციენტების ავტომატიზირებისათვის რეკომენდირებულია ამ მიმართულებით დამატებითი კვლევების განხორციელება, შესაბამისი მათემატიკური მოდელის მისაღებად.

სეგმენტირებული ტექსტური გამოსახულების შემდგომი დამუშავების და მისი მოცულობის მეტად მინიმიზირების მიზნით ჩვენს მიერ შერჩეულია მოხვედრა-აცდენის მორფოლოგიური ალგორითმების და მისგან ნაწარმოები სხვა ოპერატორების გამოყენება.

**მერვე თავში** განხილულია მოხვედრა - აცდენის (Hit-Miss) მორფოლოგიური ოპერაციები, ალგორითმის მოქმედების პრინციპი და მაგალითისათვის მოყვანილია ამ მეთოდების საშუალებით გამოსახულების ფილტრაციის მეთოდი. ამ გარდასახვის მთავარ ფუნქციას წარმოადგენს გამოსახულებიდან ყველა იმ პიქსელის გამოყოფა, რომლებიც ემთხვევა გარკვეული ფორმით დაჯგუფებულ პიქსელთა სამეზობლოს. მაგალითისათვის, ასეთი სამეზობლო შეიძლება იყოს წინა პლანის პიქსელები, რომლებიც შემოსაზღვრულია ფონური პიქსელებით. აღსანიშნავია რომ განსხვავებით სხვა მორფოლოგიური ოპერაციებისა ასეთი სახის ოპერაციების დროს ვიყენებთ ე.წ. კომპოზიტურ სტრუქტურულ ელემენტებს. მოხვედრა-აცდენის გარდასახვის ოპერაციას, გამოსახულების დამუშავების მიმართულებით გააჩნია გამოყენების ფართო არეალი, რომელთაგან ერთ-ერთი არის გამოახულებაში ჩვენთვის



საინტერესო გეომეტრიული ფორმის ფიგურების იდენტიფიცირება და გამოყოფა.

ამავე თავში განხილულია Hit-Miss ოპერაციიდან მიღებულ მორფოლოგიური დათხელების ოპერაცია:

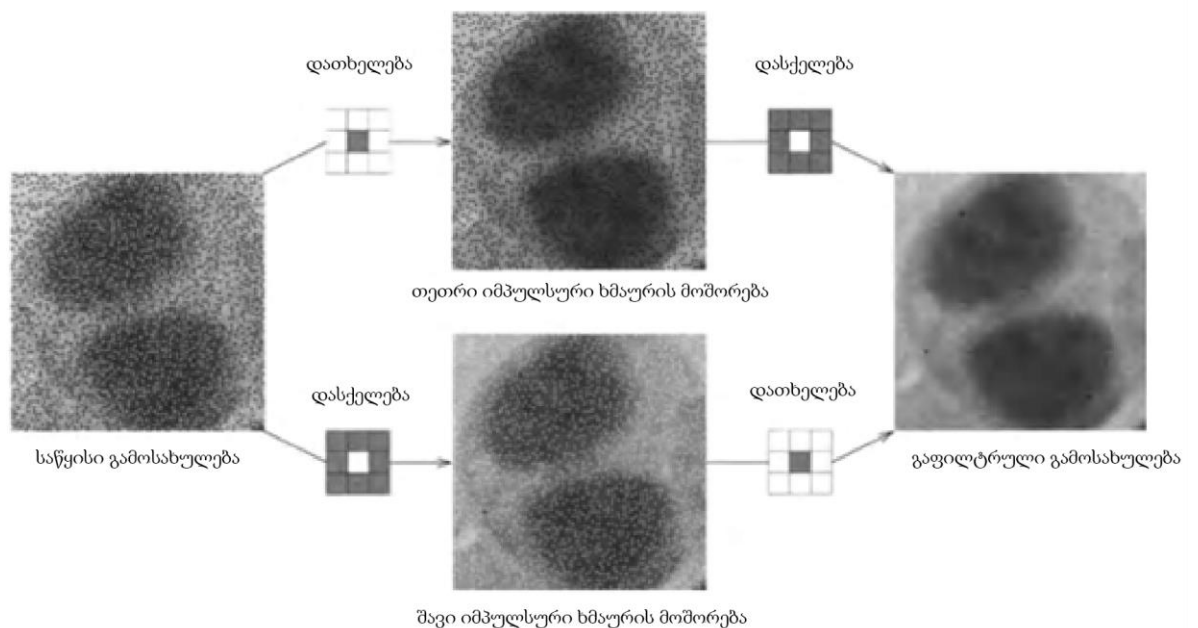
$$f \circ H = THIN_H(f) = f - HMT_H(f) \quad (5)$$

აღწერილია ამ ოპერაციის თვისებები, გამოყენების მეთოდები და თავისებურებები. აგრეთვე მორფოლოგიური შესქელების მეთოდი

$$f \odot H = THICK_H(f) = f + HMT_H(f) \quad (6)$$

რომელიც დათხელების ოპერაციასთან ერთად კომბინირებით იძლევა ძალიან კარგ შედეგს გამოსახულების ხმაურის ფილტრაციისას, მსგავსად გაუსის და მედიანური ფილტრების (ნახ.10).

ნაშრომის ფარგლებში სადემონსტრაციოდ (სურათი 10), დათხელება-დასქელების მორფოლოგიურ ოპერატორები გამოყენებულია პირველადი წყაროს დამუშავებისას და მისგან არასასურველი ე.წ. პილპილ-მარილის (salt and pepper) ის მოსაშორებლად.



ნახ. 10. მორფოლოგიური დათხელება-შესქელების ოპერაციების კომბინირებით მიღებული ფილტრის მაგალითი

ფიგურათა ამოცნობის და ანალიზის ამოცანებში, ფიგურების ნიშანთვისებათა მახასიათებლების (feature) ამოღების მეთოდები ასრულებენ მნიშვნელოვან როლს. კლასიკურ მეთოდს ასეთ ამოცანებში წარმოადგენს - ფიგურების კონტურების დადგენა და ამოღება, გარდა ამისა არსებობს გამოსახულებაში ჩვენთვის საინტერესო ობიექტების დათხელების ოპერაციები რომლის დროსაც ვღებულობთ გამოსახულების ე.წ. სკელეტონებს ან მედიანურ ღერძებს, აღსანიშნავია, რომ ასეთი ოპერაციის შედეგად მნიშვნელოვანად ნარჩუნდება ობიექტის ჰომოტოპია (ფიგურის ფორმების შენარჩუნება).

**მეცხრე თავი** ეძღვნება სეგმენტირებული გამოსახულების შემდგომად მორფოლოგიური სკელეტონიზაციის საშუალებით გამოსახულების ოპტიმიზირების გამოკვლევის ეტაპს, რომელიც თავის მხრივ ემყარება მოხვედრა აცდენის მეთოდებს. როგორც აღვნიშნეთ, სკელეტონიზაციას გააჩნია ფართო პრაქტიკული გამოყენება. რაც შეეხება ტექსტური გამოსახულების დამუშავებას, როგორც ხელნაწერების, ასევე, ნაბეჭდი ტექსტების ამოცნობის მიმართულებით, ტექსტში შემავალი ასოების და სასვენი ნიშნების სკელეტონიზაციით ვღებულობთ ასოების მინიმალური რაოდენობის პიქსელებით აღწერილ გამოსახულებას, რომელსაც გააჩნია მცირე ინფორმაციული მოცულობა. ნაშრომში განვიხილავთ სკელეტონიზაციის ხუთ ძირითად მეთოდს.

1. ე.წ მინდვრის-ხანძარის ან ტალღის გავრცელების.
2. მანძილის ფუნქცია.
3. მაქსიმალური დისკების პრინციპი.
4. მინიმალური მონაკვეთი.
5. მორფოლოგიური გახსნის მეთოდი.

ნაშრომში დეტალურად გარჩეულია სკელეტონიზაციის მორფოლოგიური მიდგომა. სკელეტონიზაციის შედეგად მიღებული სტრუქტურები ხშირ შემთხვევაში შეიცავს მცირე განტოტებებს რომელთა მოშორება, ე.წ გსხვლა (spruning) გვაზძლევს ვიზუალურად უკეთეს შედეგს. გასხვლა არის

გარდასახვის პროცესი რომლის დროსაც იტერაციულად ხდება სკელეტონის დაბოლოების წერტილების მოშორება, იტერაციის ციკლის დასრულებამდე ან იტერაციის სტაბილიზაციის მიღწევამდე.

ამავე თავში აღწერილია სკელეტონების გასხვლის ალგორითმი. ვინაიდან, ბეჭდური ტექსტები გვხვდება სხვადასხვა შრიფტების, ანუ ასო-ნიშანთა მოხაზულობის გრაფიკული გამოსახულების სახით, რომლებიც ერთიანი სტილისტური და კომპოზიციური სისტემის ნაწილს შეადგენენ. შესაბამისად, ერთმანეთისგან განსხვავებული შრიფტების დათხელებისას შესაძლებელია მივიღოთ ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებული სკელეტონები. სტილისტურად რაც უფრო კომპლექსურია და მდიდარი გრაფიკული ფორმებით ესა თუ ის შრიფტი, მისი სკელეტონი შეიცავს მეტ განტოტებებს, შრიფტის ძირითადი სხეულიდან. ეს განტოტებები ამოცნობის ოპერაციის დროს არ წარმოადგენს ინფორმაციულ ღირებულებას, პირიქით ის შეგვიძლია აღვიქვათ როგორც დამუშავების შეგედეგად დარჩენილი არასასურველი არტეფაქტი. ასეთი არასასურველი არტეფაქტის მოსაშორებლად ვიყენებთ მორფოლოგიური გასხვლის ოპერაციას.

ჩვენს მიერ სტრიქონებად და სიტყვებად სემანტირებული პიქსელების დათხელებისას ვღებულობთ გამოსახულების შესაბამის სკელეტონს რომელიც გვადლევს შემდეგ უპირატესობებს:

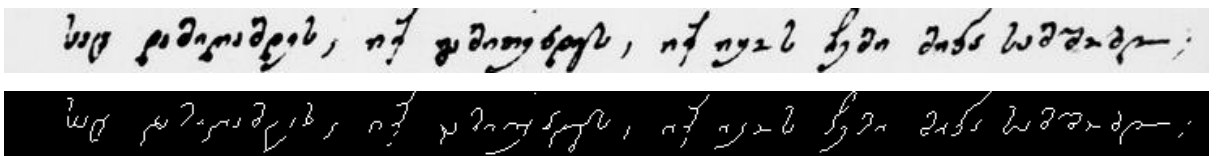
1. დასამუშავებელი მონაცემების რაოდენობის შემცირება;
2. დამუშავების დროს შემცირება;
3. მნიშვნელოვანი მახასიათებლების გამოყოფა როგორც არის, დაბოლოების წერტილები, გადაკვეთის წერტილები, კომპონენტების შეერთებები;
4. ვექტორიზაციის ალგორითმები, რომლებიც გამოიყენება ამოცნობის ამოცანებში შესასვლელზე საჭიროებს სკელეტონიზირებულ გამოსახულებებს;

ტექსტის სკელეტონიზაციის მაგალითი ნაჩვენებია მე- 11 ნახაზზე.

მოსავალი თითქმის გაორმაგდა და 33 ათასი ტონა თხილი დაიკრიფა.  
მოსავალი თითქმის გაორმაგდა და 33 ათასი ტონა თხილი დაიკრიფა.

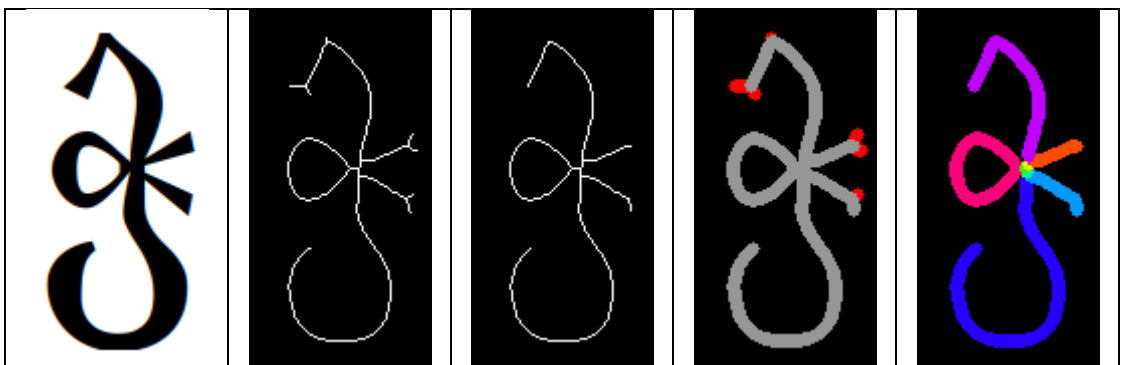
ნახ. 11. ნაბეჭდი ტექსტი და მისი შესაბამისი სკელეტონი

სკელეტონიზაციის შედეგად მიიღება მნიშვნელოვნად შემცირებული გამოსახულება. ხელნაწერ ტექსტში, ნაბეჭდისგან განსხვავებით გვაქვს სიმბოლოთა გრაფიკულად წარმოდგენის განუსაზღვრელი რაოდენობა, რაც დამოკიდებულია ძირითადად ავტორის კალიგრაფიაზე. ხელნაწერი ტექსტის სკელეტონიზირებული მაგალითი ნაჩვენებია 12 ნახაზზე.



ნახ. 12. ხელნაწერი ტექსტი და მისი შესაბამისი სკელეტონი

თვალსაჩინოებისათვის ნახ.13-ზე ნაჩვენებია ცალკეული ასოს სკელეტონიზაციის და გასხვლის ალგორითმი.



ნახ. 13. ხელნაწერი ტექსტი და მისი შესაბამისი სკელეტონი

## დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში სხვადასხვა ტიპის გამოსახულებების ხარისხის ამაღლების მიზნით სისტემური მიდგომის საფუძველზე განხორციელდა მათემატიკური მორფოლოგიის ალგორითმების კვლევა: ტექსტის სტრიქონების სეგმენტაცია, ბეჭდური და ხელნაწერი ტექსტური დოკუმენტების კორექტირება, არათანაბარი განათებით გამოწვეული გამოსახულების გრადიენტული ფონების ლოკალიზაცია და გაფილტვრა, სკელეტონიზაცია (დაჩონჩხვა), დახრილი სტრიქონების და დოკუმენტების ჰორიზონტზე კორექტირება რომლის შედეგადაც ყველა შემთხვევაში მნიშვნელოვნად იქნა გაუმჯობესებული საწყისი გამოსახულების ხარისხი. ამასთან, ყველა შემუშავებული ალგორითმი მარტივია და აგებულია ე.წ. „ღია პრინციპით“, ამარტივებს მათ პრაქტიკაში გამოყენებას.

**ნაშრომის საბოლოო შედეგები შემდეგნაირად არის ჩამოყალიბებული:**

1. შემოთავაზებულია ტექსტის სტრიქონების სეგმენტაციის პრინციპი მორფოლოგიური ოპერატორებისა და ჰისტოგრამების პროექციის კომბინირებული მეთოდის გამოყენებით.
  - შემოთავაზებული ალგორითმის განხორციელების შედეგად გამოსასვლელზე მიღებულია ტექსტურ გამოსახულებაში შემავალი სიტყვების და სტრიქონების სეგმენტები, რომელთა შემდგომი დამუშავება გაცილებით მარტივი და ნაკლები გამოთვლითი რესურსებით არის შესაძლებელი.
  - სეგმენტაციის შედეგად მიღებული სეგმენტების ოპტიმიზირების მიზნით, ვასრულებთ სკელეტონიზაციის ოპერაციას, რის შედეგადაც ვღებულობთ მოცულობაში მნიშვნელოვნად შემცირებულ ჩვენთვის საინტერესო ობიექტებს (ასოებს).
  - ტექსტური გამოსახულების სეგმენტაციის შემუშავებული პრინციპებით შესაძლებელია დოკუმენტების ავტომატურ რეჟიმში სკანირების და კორექტირების ამოცანების განხორციელება, რაც მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს ამჟამად გაციფრულების

პროცესის წინ მდგარი ამოცანების გადაწყვეტას. კერძოდ, შემოთავაზებული ალგორითმების გამოყენება მნიშვნელოვანია არქივების, ისტორიული დოკუმენტების, ხელნაწერების გაციფრულების და ანალიზის დროს. სეგმენტაციის შედეგად მიღებული მასალის ინფორმაციულობა გაცილებით მაღალია, ხოლო მოცულობა გაცილებით მცირეა, ვიდრე საწყისი დოკუმენტის მოცულობა.

2. ნაშრომში სიტყვის ასოების, ნაბეჭდი დასკანერებული ტექსტების დახრილობის კორექტირების მიზნით გამოყენებული იქნა სხვადასხვა სახის ბიბლიოთეკები და პროგრამული პაკეტები (CV2, Skimage, Matlab). შემოთავაზებული მეთოდით წყაროდან მიღებული გამოსახულებაზე გეომეტრიული ოპერაციების საშუალებით ხდება სტრიქონების ფუძეების (baseline) დადგენა და მისი ჰორიზონტალური მიმართულებიდან გადახრილობის კუთხის გამოთვლა, რის შემდეგაც სრულდება საწყისი დონის მიმართულებით კორექცია, რომლის შემდეგაც მიღებულია ჰორიზონტალური მიმართულებით გასწორებული გამოსახულება.
  - შემოთავაზებული ალგორითმი შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს საარქივო დოკუმენტების ავტომატური და ნახევრადავტომატური სკანირების და გაციფროვნების სამუშაოების შესრულების დროს, როდესაც ელექტრონული მოწყობილობიდან მიღებული გადახრილი გამოსახულებები ავტომატურად დაკორექტირდება და შეინახება ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში გასწორებული სახით, რაც ასეთი გამოსახულების შემდგომი დამუშავების პროცესს მნიშვნელოვნად გაამარტივებს.
3. ნაშრომში წარმოდგენილია არათანაბარი განათებით გამოწვეული არასასურველი გრადიენტული ფონის ფილტრაციის პრინციპები, ვინაიდან, ასეთი გრადიენტული ფონის, გამოსახულებიდან მთლიანად მოშორება ან

მაქსიმალურად გაფილტვრა აუცილებელია გამოსახულების შემდგომი ანალიზისათვის და გარდაქმნებისათვის.

ამ მიზნით:

- გამოსახულების არათანაბარი განათებით გამოწვეული გრადიენტული ფონების დონის შესაფასებლად განხორციელდა გაფილტვრის მორფოლოგიური მექანიზმების შედარება პირველადი გამოსახულების ზღურბლის ოპერატორის ბინარიზაციით მიღებული გამოსახულების მორფოლოგიური ალგორითმით დამუშავებულ გამოსახულებასთან.
- გამოყენებული იქნა აგრეთვე მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტი ოპერაცია, რადგანაც ტოპ-ჰეტი ოპერატორი ფართო იზოტროპული სტრუქტურული ელემენტით გამოსახულებაზე მოქმედებს როგორც მაღალსიხშირული ფილტრი.
- ტოპ-ჰეტი ალგორითმი, რომელიც თავის მხრივ ეფუძნება რამოდენიმე პირველად მორფოლოგიურ ოპერაციას, როგორც არის „კლასიკური“ მორფოლოგიური გახსნა და დახურვა. ამ პრინციპების გამოყენების შედეგად დადასტურდა მორფოლოგიური ოპერატორების უპირატესობები.
- ნაშრომში გამოკვლეულია დადასტურებულია, რომ განათების გრადიენტის შესამცირებლად შერჩეული მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტი ოპერაციები მთლიანად ან ნაწილობრივ აშორებს გრადიენტულ ფონს, თუმცა, მიღებულ გრადიენტისგან გაფილტრულ გამოსახულებაში ვღებულობთ ე.წ. ბლოკურ ეფექტს რომელიც დამუშავების სხვა ეტაპზე წარმოგვიდგება ხმაურის სახით.
- ვინაიდან კლასიკური ტოპ ჰეტებს თან ახლავს ბლოკური ეფექტი, ნაშრომში ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია მორფოლოგიური ტოპ-ჰეტის მოდიფიცირებული ალგორითმი, სადაც კლასიკური

მორფოლოგიური ოპერატორები შეცვლილია რეკონსტრუქციულ-გეოდეზიური ოპერატორებით. შედეგად, მიღებულია გამოსახულება სადაც მთლიანად მოშორებულია გრადიენტული ფონი და არ გვაქვს ბლოკური ეფექტი.

აღსანიშნავია, რომ გამოსახულების ტიპის მიხედვით, წინასწარი დაკვირვებით შესაძლებელია ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ალგორითმების დამოუკიდებლად ან ერთმანეთთან კომბინაციით გამოყენება. რაც შემუშავებული ალგორითმების გამოყენების უნივერსალობაზე (ან უნივერსალურ შესაძლებლობაზე) მიუთითებს გამოსახულების დამუშავების პროცესში.

ამრიგად, სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგები მთლიანობაში ხელს შეუწყობს ჩვენს ქვეყანაში არსებულ გამოწვევას - ციფრული ტრანსფორმაციის პროცესის დაჩქარებას.



## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. სეხნიაშვილი დ. ნ., სვანიძე რ. გ. ტექსტის სტრიქონების სეგმენტაცია მორფოლოგიური და ჰისტოგრამების პროექციის კომბინირებული მეთოდის გამოყენებით. საქართველოს საიჟინრო სიახლენი, 2021, №2, გვ. 68-71.
2. სეხნიაშვილი დ. ნ., სვანიძე რ. გ. ბეჭდური და ხელნაწერი ტექსტური დოკუმენტების კორექტირება ტექსტის სტრიქონების, სიტყვების და ასოების სეგმენტაციის მეთოდით. საქართველოს საიჟინრო სიახლენი, 2021, №2, გვ. 72-75.
3. Sekhniashvili D. A Morphology-Based Methods of Correcting Printed and Handwritten Georgian Text Images. GOSPODARKA I INNOWACJE, 2022, №1, Volume: 20, pp. 1-6.
4. სეხნიაშვილი დ. ნ., არათანაბარი განათებით გამოწვეული, გამოსახულების გრადიენტული ფონების ლოკალიზაცია და გაფილტვრა, მათემატიკური მორფოლოგიის გარდაქმნების საშუალებით. საქართველოს საიჟინრო სიახლენი, 2021, №3

## Abstract

Digital image processing, analysis, detection, and recognition of figures in the image is an important subject of academic and scientific research. A lot of works has been conducted about this subject. There are three levels of processing, however our research is focused on one of the most important areas of low-level image processing - mathematical morphology.

Throughout our research we dive into details of the morphological operations, their mathematical features, and methodologies of building more complex algorithms. For practical demonstration of the successful usage of mathematical morphology algorithms into digital image processing we use printed and handwritten text images. We focus on the main objectives of image processing applications, such as filtering, segmentation, detection, etc. One of the obstacles for image processing especially for text images are the noise/background gradient caused by uneven illumination.

Gradient background introduced by uneven illumination complicates the task of such document processing and analysis. We propose mathematical morphology-based algorithms that successfully removes these irregularities by filtering out the image. Our ultimate target is to achieve segmented and minimized text image, for that purpose we need to segment document image into lines and words.

The inclination and slant of characters inside the printed and handwritten texts complicates the task of such document processing and analysis. Research discusses the issues of restoring these irregularities to the normal (horizontal) initial level in printed and handwritten texts.

Segmentation of handwritten lines and words to further identify them is one of the difficult subject due to the heterogeneity of the texts. Under the scope of the research the algorithm for segmentation of printed and handwritten texts obtained by operations of mathematical morphology and a combination of image histograms. The proposed algorithm uses a horizontal projection of the histogram when segmenting the rows, and after a vertical projection of the histograms is performed for each row, allowing the words in the text line to be segmented.