

დავით ნარიმანაშვილი

**გამოსახულებათა კოდინების
კომპინირებული მეთოდებისა და ახალი
სტანდარტის დამუშავება ფრაქტალური
ჟგაზემვის საფუძველზე**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივნისი, 2009 წელი

საავტორო უფლება © წელი, ”დავით ნარიმანაშვილი, 2009 წელი”

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით **დავით ნარიმანაშვილის** მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „**გამოსახულებათა კოდირების კომბინირებული მეთოდებისა და ახალი სტანდარტის დამუშავება ფრაქტალური შეკუმშვის საფუძველზე**” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: 1. ტ.მ.დ., სრული პროფესორი

ნოდარ ხარატიშვილი

2. ტ.მ.დ., სრული პროფესორი

ირინა ჩხეიძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2009 წელი

ავტორი: **დავით ნარიმანაშვილი**
დასახელება: **გამოსახულებათა კოდირების კომბინირებული
მეთოდებისა და ახალი სტანდარტის დამუშავება
ფრაქტალური შეკუმშვის საფუძველზე**
ფაკულტეტი: **ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი**
ხარისხი: **დოქტორი**
სხდომა ჩატარდა: **თარიღი**

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ
ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის
შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების
უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც
მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან
სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი
ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო
უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა
ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

კვლევის აქტუალობა. ინტერნეტის განვითარებამ, ტექნოლოგიურმა პროგრესმა საბოლოოდ მიგვიყვანა ციფრული გამოსახულების ფართო გამოყენებამდე. ამიტომაც ყოველდღიურად იზრდება ინტერესი მონაცემთა შეკუმშვის ალგორითმების გაუმჯობესებაზე გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლების მიზნით. ინფორმაციის შეკუმშვის ტექნოლოგიას შეიძლება ჰქონდეს მრავალი სახის კომერციული გამოყენებაც. ამასთან ერთად ის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სამხედრო მიზნითაც. ამიტომაც თანამედროვე პირობებში უაღრესად აქტუალურია იმ ამოცანათა გადაწყვეტა, რომელიც დაკავშირებულია გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლების კომბინირებული მეთოდების დამუშავებასთან, რომელიც ითვალისწინებს გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის შერწყმას კოდირების სხვა მოწინავე (თანამედროვე) მეთოდებთან.

საღისერტაციო ნაშრომის ძირითადი მიზანია გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლებისათვის ისეთი კომბინირებული მეთოდების დამუშავება, რომლებიც გულისხმობენ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის შერწყმას ეფექტური კოდირების სხვა მეთოდებთან. ამავე დროს წარმოდგენილი სამუშაო უნდა მოიცავდეს გამოსახულებათა ფრაქტლურ შეკუმშვაზე დაფუძნებულ მეთოდიკას, რეკომენდაციებს და საჭირო ალგორითმების პროგრამულ რეალიზაციას JPEG ტიპის ახალი სტანდარტის შესაქმნელად და დასანერგად.

ნაშრომის მიზნიდან გამომდინარე დისერტაციის ძირითადი ამოცანები რომლებიც ექვემდებარებიან კვლევას, შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ შემდეგნაირად:

- ჩატარდეს კვლევა გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის არსის მიხედვით, რომელიც ეფუძნება უბან-უბან განსაზღვრულ იტერაციულ ფუნქციათა სისტემას (PIFS); კუმშვადი ასახვის ძირითადი თეორემის ექსპერიმენტულ ინტერპოლაციას და შემოწმებას; გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულებას განმსაზღვრელ მახასიათებლებზე.
- გამოსახულებათა კოდირების სხვადასხვა ტექნოლოგიების კვლევა მათი ფრაქტალურ შეკუმშვასთან შერწყმის მიზნით. ამ მეთოდებს მიეკუთვნებიან პირამიდული აგებები, დაფუძნებული მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციებზე და ვეივლეტ-გარდაქმნის ტექნოლოგიებზე; გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირებისათვის დროითი ინტერპოლაციის საკითხების განხილვა ინფორმაციის შეკუმშვის განხორციელების შესაძლებლობების მიზნით და წინასწარმეტყველების მეთოდის რეალიზაცია წრფივი და არაწრფივი წინასწარმეტყველების ელემენტით.
- გამოსახულებათა და მათი მიმდევრობის კოდირების ეფექტურობის ამაღლებას ფრაქტალური ალგორითმების შერწყმით ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდების ალგორითმებთან.
- JPEG ჯგუფის სტანდარტის ახალი ვარიანტის შემუშავება, რომელიც დაფუძნებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდზე. ეს ნაწილი ითვალისწინებს არსებული JPEG ჯგუფის სტანდარტების ძირითადი მოთხოვნების და მახასიათებლების ჩამოყალიბებას და ვეივლეტ და ფრაქტალური ალგორითმების ექსპერიმენტულ შედარებას ამ ძირითადი

მახასიათებლების მიხედვით. ხელშეშლათა მიმართ მდგრადი კოდირების გამოყენებას ფრაქტალურად კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის ამაღლების მიზნით. ფერად გამოსახულებათა ფრაქტალურ შეკუმშვაზე აგებული სტანდარტი უნდა შეიცავდეს სამუშაო პროგრამას და მისი შესრულების აღწერას.

- დისერტაციაში ძირითადი დასმული ამოცანების ნუსხის მიხედვით ჩამოყალბებულია დისერტაციის სტრუქტურა. კერძოდ: პირველი თავი შეიცავს კვლევას და შედეგებს, რომლებიც პასუხობენ ნუსხის პირველ პუნქტს, მეორე – ჩამონათვალის მეორეს, მესამე – მესამეს, ხოლო მეოთხე თავი კი ეძღვნება მეოთხე პუნქტს.

დისერტაცია შეიცავს 151 გვერდს.

ძირითადი პრაქტიკული დირექტულება და გამოყენებითი ასპექტი. სადისერტაციო ნაშრომი შეიცავს ყველა საჭირო მონაცემებს, მეთოდიკას და რეკომენდაციებს გამოსახულებათა და მათი მიმდევრობის ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის ამაღლებისათვის მათი შერწყმით სხვა მეთოდებთან.

დისარტაციის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილია შემდეგ დასკვნებში:

1. გარკვეულია, რომ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნივერსალურ მეთოდად შეიძლება ჩაითვალოს კუმშვადი ასახვის სპეციალური მეთოდი დასახელებით იტერაციული ფუნქციათა სისტემა (IFS), რომელიც განიცდის ტრანსფორმირებას უბან-უბან იტერაციულ ფუნქციათა სისტემად (PIFS), როცა ხორციელდება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირება.
2. შემოთავაზებულია გამოსახულებათა კუმშვადი ასახვის ძირითადი თეორემის ექსპრიმენტული ინტერპრეტაცია და დადასტურება მისი სისწორისა პრაქტიკული გამოყენების დროს.
3. გამოკვლეულია გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება კოდირების განმსაზღვრულ ძირითად მახასიათებლებზე,
4. ექსპრიმენტულად დადასტურებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნივერსალური თვისება: აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის დამოუკიდებლობა დეკოდირებისას პირველი იტერაციის შესასრულებლად შერჩეული გამოსახულების სახეზე და მის ზომაზე. უკანასკნელი განაპირობებს შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდას.
5. გამოსახულებათა კოდირების სხვადასხვა ტექნოლოგიების კვლევამ დაამტკიცა, რომ:
 - a. მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციების საფუძველზე შესაძლებელია პირამიდული აგების განხორციელება და კოდირების ეფექტურობის ამაღლების მიზნით მისი ფრაქტალურ კოდირებასთან შერწყმა.
 - b. ვეივლეტ-გარდაქმნების **Mathcad** პაკეტში რეალიზაციაში აჩვენა ვეივლეტ-ტექნოლოგიების გამოყენების მიზანშეწონილობა გამოსახულებათა კოდირებაში და ფილტრაციაში.
 - c. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირებისათვის კადრთაშორისი წინასწარმეტყველებისა და წრფივი ინტერპოლაციის მეთოდების მოდელირება შეიძლება ელემენტარულად განხორციელდეს **Mathcad** პროგრამის გამოყენებით.
 - d. ზემოთ ჩამოთვლილი გამოსახულებათა შეკუმშვის ტექნოლოგიები შეიძლება

მარტივად იქნან რეალიზებული **Mathcad** პროგრამაში და გამოსახულებათა ფრაქტალურ მეთოდებთან კომბინირებაში, რაც განაპირობებს კოდირების ეფექტურობის ამაღლებას.

6. მიღებულია გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის გაზრდა (3-4-ჯერ) ფრაქტალური კოდირების შერწყმით მორფოლოგიურ აგებებთან.
7. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების დროს ფრაქტალური კოდირება განიხილებოდა კადრთაშორის დიკმ-ისთან, წრფივ დროით ინტერპოლაციასთან და ვეივლეტ-პირამიდულ აგებასთან შერწყმით. ამ კომბინირებული მეთოდების ეფექტურობის შედარებამ ცხადყო, რომ ყველაზე მაღალი შეკუმშვის კოეფიციენტი (110-120 ფარგლებში) მიიღება კადრთაშორისი ინტერპოლაციის შერწყმის დროს.
8. გამოსახულებათა და მათი მიმდევრობის ეფექტურობის გამოკვლევამ აჩვენა როგორც ფრაქტალური მეთოდების სხვა შეკუმშვის მეთოდებთან შერწყმის მიზანშეწონილობა, ასევე ფრაქტალური შეკუმშვის ტექნოლოგიებზე აგებული ახალი JPEG-2000 ტიპის სტანდარტის შექმნის შესაძლებლობა.

ჩატარებული სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება ძიგომარეობს იმაში, რომ იგი მოიცავს საჭირო მონაცემებს, მეთოდიკას და რეკომენდაციებს. JPEG-2000 ტიპის ახალი სტანდარტის დასამუშავებლად, რომელიც დაფუძნებული იქნება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების გამოყენებაზე ვეივლეტ-ტექნოლოგიების ნაცვლად. შემოთავაზებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ახალი სტანდარტის პროგრამა და აღწერილია მისი შესრულების მსვლელობა. პროგრამა განკუთვნილია როგორც ნაცრისფერ გრადაციების მქონე, ასევე ფერადი გამოსახულების ფრაქტალური დამუშავებისათვის.

Abstract

Development of Combined Methods of Image Coding and of a New Standard Based on Fractal Compression

Topicality of the research. The expansion of the Internet and the technological progress have led to widespread use of digitized images. Hence the interest to improvements in the algorithms of data compression aimed at increasing the efficiency of image coding grows every day. The technology of data compression may have wide commercial applications. Moreover, the data compression is of importance from the military standpoint. Therefore, it is quite topical to solve the problems associated with improving the efficiency of image coding in regard to the development of combined methods implying the combination of fractal compression of images with other advanced methods of compression.

The prime objective of the presented thesis is the development of such combined methods for improving the efficiency of image coding that imply the combination of fractal compression with other efficient methods of image coding. At the same time, the thesis is bound to contain the methods, the recommendations and the program implementation for elaboration and introduction of a new standard of the JPEG type, based on the application of fractal compression of images.

To accomplish these ends, it was necessary to solve the following problems:

- The investigation of fractal compression of images from the viewpoint of its essence leaning on the partitioned iterated function system (PIFS); the experimental interpretation and testing of the basic theorem of compressing representation; the investigation of the dependence of the efficiency of coding on the determining parameters;
- The investigation of different technologies with the aim of their combining with the fractal compression. Among these are the pyramidal constructions based on the operations of mathematical morphology and the technology of wavelet transformation. For coding a sequence of images, the consideration of the issues of time interpolation with the aim of implementing the data compression, and also the implementation of the method of prediction with the linear and nonlinear prediction components.
- The improvement in the efficiency of coding of images and their sequence based on combining the fractal algorithms with the algorithms of the abovementioned methods.
- The development of a new version of the standard of the JPEG type, which is based on the fractal compression of images. This part involves the formation of basic requirements and characteristics of the JPEG-type standards, the experimental comparison of the algorithms of fractal and wavelet compression of images, and also the application of noise combating coding for improving the reliability of transmission of fractal-coded images. What is more, the new standard is bound to be suited to coding of color images and to contain the operating program for execution of coding.

The thesis is constructed according to the above-listed tasks, namely: Chapter 1 is dedicated to the investigation results concerning the tasks in the first item of the list; Chapter 2 – to the tasks in the second item of the list; Chapter 3 – to the third item of the list; Chapter 4 – to the fourth item of the list.

The basic results of the work under this thesis are reported in the following conclusions:

1. It has been established that the special method of compressing representation called the iterated function system (IFS), which transforms into the partitioned iterated function system (PIFS) when the fractal coding of images is executed, can be considered as a universal method of fractal compression of images.
2. The experimental interpretation and the verification of the basic theorem of compressing representation in the image at its application in practice are presented.
3. The dependence of the efficiency of fractal image coding on the determining characteristics was studied.
4. The universal specific feature of fractal compression of images was justified experimentally. It consists in independence of the quality of image recovery (regeneration) from the type of the selected image at the first iteration of decoding and from the image size.
5. The investigation of different methods of image coding showed that:
 - a) based on the operations of mathematical morphology, it is possible to accomplish pyramidal constructions for their combining with the fractal compression of images with the aim of improving the efficiency of coding;
 - b) the implementation of wavelet transformation in the *MathCad* package confirmed the expediency of using the wavelet technology for coding and filtration of images;
 - c) for coding of a sequence of images, the methods of interframe prediction and linear interpolation can simply be simulated in *MathCad*;
 - d) all abovementioned methods of image compression can be implemented in *MathCad* quite easily; they can be combined with the method of fractal compression, which will provide the improvement in coding efficiency.
6. By combining the fractal coding with morphological constructions and wavelet transformations, a triple-quadruple increase in the efficiency of image coding was achieved.
7. The fractal coding of the sequence of images was considered in combination with interframe pulse-differential modulation, linear time interpolation and wavelet-pyramidal constructions. The comparison of these methods by their efficiency showed that the highest factor of compression (within 110-120) was obtained when the fractal coding was combined with interframe interpolation.
8. The results of investigation of the efficiency of coding of images and their sequences supported not only the expediency of using the combination of fractal compression with other compression methods, but also the possibility of development of a new standard of the type of IPEC-2000 based on the method of fractal compression.

The practical value of the thesis consists in the fact that it contains all essential data, methods and recommendations for development of the new standard of the type of IPEC-2000, which is based on using the fractal coding instead of wavelet technology. The operating program of fractal coding with the description of its implementation is presented. The standard is designed for processing of both semi-tone and color images.

შინაარსი

შესავალი	xv
თავი 1. გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის ზოგადი პრინციპები.....	19
1.1 პირველი თავის კვლევის ამოცანები.....	19
1.2 უბან-უბან განსაზღვრული იტერაციული ფუნქციის სისტემა PIFS, როგორც გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდის IFS-ის მოდიფიკაცია.....	21
1.3 გამოსახულებათა კუმშვადი ასახვის თეორემა.....	25
1.4 კოდირების ეფექტურობისა და აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასების ზოგადი კრიტერიუმები	27
1.5 გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება ფრაქტალური გარდაქმნის განმსაზღვრელ მახასიათებლებზე.....	33
1.5.1 გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების არსი.....	33
1.5.2 კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება დეტერმინირებულ პარამეტრებზე.....	35
1.5.3 გამოსახულებათა ფრაქტალური აგების სტატისტიკური თვისებები.....	42
1.6 გამოსახულებათა ფრაქტალური კუმშვადი ასახვის თეორემის ექვერიმენტული ინტერპოლაცია და რეალიზაცია.....	45
1.7 გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდით კოდირებული გამოსახულების გადაცემის სამედოობა.....	48
1.8 პირველი თავის დასკვნები.....	53
თავი 2. გამოსახულებათა კოდირების სხვადასხვა ტექნოლოგიების კვლევა მათი ფრაქტალურ შეკუმშვასთან კომბინირების მიზნით.....	56
2.1 კვლევის ამოცანები.....	56
2.2 მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციები და მათი შესაძლებლობა პირამიდული აგებისათვის.....	58
2.3 მორფოლოგიური პირამიდული აგებების პრინციპი.....	64
2.4 გამოსახულებათა შეკუმშვის ვეივლეტ გარდაქმნის ტექნოლოგიები.....	73
2.4.1 ვეივლეტ ფუნქციების მიღება.....	73
2.4.2 გამოსახულების ტრანსფორმანტის მიღება.....	77
2.4.3 გამოსახულების ვეივლეტ-გარდაქმნით შეკუმშვის მაგალითი.....	79
2.5 შემთხვევითი შეცდომების მქონე გამოსახულებათა ფილტრაცია ვეივლეტ და მედიანური ფილტრების საშუალებით.....	80
2.6 დიფერენციალურ იმპულსურ-კოდური მოდულაცია წრფივი წინასწარმეტყველებით.....	84
2.7 გამოსახულებათა მიმდევრობის დროითი წრფივი ინტერპოლაცია.....	88
2.8 მეორე თავის დასკვნები.....	91
თავი 3. გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლება ფრაქტალური ალგორითმების შერწყმით სხვა ალგორითმებთან.....	93
3.1 კვლევის ამოცანები.....	93
3.2. გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სხვა მეთოდებთან შერწყმის ოპერატორული აღწერა.....	95
3.3 კოდირების ეფექტურობის გაზრდა ფრაქტალური კოდირების შერწყმით მორ-	

ფოლოგიურ აგებებთან.....	96
3.4 ფრაქტალური ალგორითმის შერწყმა ვეივლეტ-გარდაქმნასთან და პირამიდას- თან.....	99
3.5 ფრაქტალური ალგორითმის შერწყმა დროით ინტერპოლაციასთან.....	102
3.6 ფრაქტალების, ვეივლეტების და კადრთაშორისი დიკმ კომბინირება.....	104
3.6.1 გამოსახულებათა მიმდევრობის სტატიკური მახასიათებლების აგება.....	104
3.6.2 ფრაქტალების, ვეივლეტების და კადრთაშორისი დიკმ კომბინირება.....	112
3.7 მესამე თავის დასკვნები.....	119
თავი 4. გამოსახულებათა შეკუმშვის JPEG სტანდარტის ახალი ვარიანტის შემუშავება.....	120
4.1 კვლევის ამოცანები.....	120
4.2 JPEG-2000 სტანდარტის, როგორც ახალი სტანდარტის შესაქმნელად საბაზო ნიმუშის აღწერა.....	121
4.3 JPEG-2000 სტანდარტის ძირითადი მოთხოვნებისა და მახასიათებლების ჩამო- ყალიბება და ვეივლეტ-ფრაქტალური ალგორითმების შედარებითი ანალიზი...124	
4.4 ხელშეშლათა მიმართ მდგრადი კოდირების (ჰემინგის კოდის) გამოყენება ფრაქ- ტალურად კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის ამაღლების მიზნით.....	126
4.5 JPEG ახალი ტიპის სტანდარტისათვის გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმ- შვის სამუშაო პროგრამის შედგენა და გამოცდა.....	129
4.6 ფერად გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სტანდარტის შემუშავება JPEG სტანდარტების შესაბამისად.....	134
4.7 მეოთხე თავის დასკვნები.....	141
დასკვნა.....	142
გამოყენებული ლიტერატურა.....	145

ცხრილების ნუსხა

1) ცხრილი 1.5.2.1 დომენების საერთო რაოდენობის განსაზღვრის შედეგები.....	36
2) ცხრილი 1.5.3.1 კუმშვადი ასახვის ცდომილების სტატისტიკური მახასიათებლებზე დამოკიდებულების ცხრილი გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „ვარდი“.....	44
3) ცხრილი 1.7.1 დომენების ინდექსის დამახინჯებისას მიღებული შედეგები.....	49
4) ცხრილი 1.7.2 გარდაქმნის ინდექსის დამახინჯებისას მიღებული შედეგები.....	49
5) ცხრილი 2.3.1 ოპერაცია „erosion“-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.....	67
6) ცხრილი 2.3.2 ოპერაცია “dilation”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.....	68
7) ცხრილი 2.3.3 ოპერაცია “closing”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.....	68
8) ცხრილი 2.3.4 ოპერაცია “opening”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.....	68
9) ცხრილი 2.3.5 ალდგენილი გამოსახულებების სიზუსტის მაჩვენებლები და შესაბამისი შეკუმშვის კოეფიციენტები.....	73
10) ცხრილი 2.3.5 ალდგენილი გამოსახულებების სიზუსტის მაჩვენებლები და შესაბამისი შეკუმშვის კოეფიციენტები.....	73
11) ცხრილი 3.3.1 გამოსახულება „ლენა“-ზე ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები.....	97
12) ცხრილი 3.3.2 პირამიდული კოდირების შედეგები ალდგენილი წვეროს ზომის ცვლილებისას.....	98
13) ცხრილი 3.4.1 ფაქტობრივი შეკუმშვის ძირითადი მახასიათებლები გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „სკოლა“.....	100
14) ცხრილი 3.4.1 ფაქტობრივი შეკუმშვის ძირითადი მახასიათებლები გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „სკოლა“.....	101
15) ცხრილი 3.5.1 ფრაქტალური კოდირებისას მიღებული შედეგები.....	103
16) ცხრილი 3.6.1.1 - გამოსახულებათა მიმდევრობა “ლომი”-ს კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 ბ-გამოსახულებათა მიმდევრობა “ბუნებ”-ის კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 გ - გამოსახულებათა მიმდევრობა “ზელოსნები”-ს კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 დ - გამოსახულებათა მიმდევრობა “ქარხნ”-ის კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკური მახასიათებლები.....	110
17) ცხრილი 3.6.2.1 კადრების სხვაობაზე ვეივლეტ გარდაქმნის განხორციელებისას ტრანსფორმაციაში 10% და 1% კოეფიციენტების რაოდენობის შენარჩუნებისას ს.ხ.პ.ფ.-ის შესაბამისი მნიშვნელობები.....	116

ნახაზების ნუსხა

1) ნახ. 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 მარტივი გამოსახულების ფრაქტალური გარდაქმნა.....	22
2) ნახ. 1.2.4 გამოსახულების აფინური გარდაქმნა ნაცრისფერ გრადაციაში.....	24
3) ნახ. 1.3.1 კონფიგურაცია დომენური არების გარკვეული სივრცისათვის.....	25
4) ნახ. 1.3.2 W კუმულაცია ასახვისას მიღებული შედეგი ორი სხვადასხვა საწყისი გმოსახულებასათვის.....	26
5) ნახ. 1.4.4 საწყის და აღდგენილ გამოსახულებების შორის მიღებული ცდომილების სამგანზომილებიანი პისტოგრამა.....	32
5) ნახ. 1.5.2.1 გამოსახულების რანგულ ბლოკებად დაყოფა.....	37
6) ნახ. 1.5.2.2 გამოსახულების რანგულ ბლოკებად დაყოფა.....	37
7) ნახ. 1.5.3.1, 1.5.3.2, 1.5.3.3 1.5.3.4 სტატისტიკური მახასიათებლების დამოკიდებულება დასაშვებ ცდომილებაზე გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „ვარდი“.....	44
8) ნახ. 2.2.1 ორობით გამოსახულებაზე მასტრუქტურიზებელი ელემენტის მორფოლოგიური ოპერაციებით ზემოქმედების მაგალითები.....	61
9) ნახ. 2.2.2 „erosion“, „ditation“, „opening“ და „closing“ ოპერაციების ერთგანზომილებიან სიგნალზე მოქმედების შედეგი.....	63
10) ნახ. 2.3.1 გამოსახულების გარდაქმნა მორფოლოგიური პირამიდის აგების ოპერაციებით. ა – საწყისი გამოსაულებაა, ბ – ინტერპოლირებული გამოსახულება, გ – პირამიდის პირველი დონე, დ – პირამიდის წვერო, ე – პირამიდის პირველი დონის დეციმირებული გამოსახულება.....	72
11) ნახ. 2.5.1 საწყისი გამოსახულება.....	81
12) ნახ. 2.5.2 დასამუშავებელი, ხნაურიანი გამოსახულება.....	81
13) ნახ. 2.5.3 ვეივლეტ-უკუგარდაქმნის შედეგად მიღებული გამოსახულება.....	82
14) ნახ. 2.5.4 გამოსახულება, მიღებული ხმაურის გზით.....	83
15) ნახ. 2.5.5 ხმაურიანი გამოსახულებაზე მედიანური ფილტრის ზემოქმედების შედეგად მიღებული გამოსახულება.....	83
16) ნახაზები 3.4.1, 3.4.2, 3.4.1 ა, 3.4.2 ა ვეივლეტ-ფრაქტალური გარადქმნები.....	101
17) ნახ. 3.5.1 მიღებული და აღსაღენი კადრების თანმიმდევრობა.....	102
18) ნახ. 3.6.1.2 კორელაციის სიდიდეთა მრუდი, გამოსახულებათა მიმდევრობისათვის: „ლომი“, „ბუნება“, „ხელოსნები“, „ქარხანა“.....	108
19) ნახ. 3.6.2.1 ა მიმდევრობის საწყისი კადრი	114
20) ნახ. 3.6.2.1 ბ მიმდევრობის წინა კადრის ფრაქტალურად კოდირებული და აღდგენილი გამოსახულება.....	114
21) ნახ. 3.6.2.1 გ მიმდევრობის M ₂ კადრისა და მისი წინა კადრის ფრაქტალურად კოდირებული და აღდგენილი გამოსახულებების სხვაობა.....	115
22) ნახ. 4.5.1 ა.ბ.გ.დ განსხვავებული კონტურების მქონე საწყისი გამოსახულებები....	130
23) ნახ.4.5.2 ს.ხ.პ.ფ. ფუნქციის შეაუმჯოს კოეფიციენტზე დამოკიდებულების გრაფიკი.....	132
24) ნახ. 4.5.3 ინტერვალის ზედა და ქვედა ზღვრების დამოკიდებულების გრაფიკი.....	134
25) ნახ.4.6.2. ა) ნაცრისფერი გამოსახულება, ბ) კვადროხე, გ) I იტერაცია, დ) VI იტერაცია.....	139

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

IFS – იტერაციულ ფუნქციათა სისტემა

PIFS – უბან-უბან განსაზღვრული იტერაციულ ფუნქციათა სისტემა

PSNR – სიგნალ-ხმაურის პიკური ფარდობა

MRD – გამოსახულებათა მრავალმასშტაბური გაშლა

DWT – დისკრეტული ვეივლეტ გარდაქმნა

JPEG – გაერთიანებულ ფოტოგრაფ-ექსპერტთა ჯგუფი

RBG – წითელი, ლურჯი, მწვანე

სკგ – საშუალო კვადრატული გადახრა

ნსკგ – ნორმირებული საშუალო კვადრატული გადახრა

სხფ – სიგნალ-ხმაურის ფარდობა

სხპფ – სიგნალ-ხმაურის პიკური ფარდობა

დიკმ – დიფერენციალური იმპულსური კოდური მოდულაცია

rms - საშუალო კვადრატული გადახრა

მადლიერება

უპირველესად, უდიდესი მადლიერება მინდა გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელების, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ნოდარ ხარატიშვილისა და ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ირინა ჩხეიძის მიმართ, რომელთა მიერ ჩემი მუშაობის სწორად წარმართვის, მაღალგალიფიციური კონსულტაციებისა და ჩემდამი კეთილგანწყობის გარეშე, წარმოდგენილი ნაშრომი ვერ შეიქმნებოდა.

განსაკუთრებით მინდა აღვნიშნო პროფესორ ირინა ჩხეიძის ღვაწლი, რომლის მაღალპროფესიონალიზმა, მომთხოვნელობამ და პრინციპულობამ მნიშვნელოვნად განსაზღვრა ნაშრომის სახე და შინაარსი.

მადლობა მინდა გადავუხადო ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატს, სტუ-ს ასოცირებულ პროფესორ ვიოლეტა სტეპურმანს, რომელმაც არ დაიშურა კონსულტაციები დისერტაციაზე მუშაობის დროს რიგი ტექნიკური საკითხების გადაწყვეტისათვის.

მადლიერი ვარ ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის, ზურაბ გოგოლაშვილისა, რომლის გამოცდილებამ დასამუშავებელი პრობლემატიკის სფეროში გამიადვილა ცალკეული საკითხების გადაჭრა.

დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატს, სტუ-ს ასისტენტ-პროფესორ ვანო ოთხოზორიას, რომელთანაც თანამშრომლობა მნიშვნელოვანი დახმარება იყო დისერტაციაზე მუშაობის პროცესში.

დიდ მადლობას ვუძღვნი სტუ-ს ინფორმატიკის ფაკულტეტის თანამშრომელს ლალი ტოკაძეს, რომელმაც მნიშვნელოვანი დახმარება გამიწია დისერტაციისათვის საბოლოო სახის მიცემაში.

შესავალი

ციფრული გამოსახულება ინფორმაციული სამყაროს მნიშვნელოვან ნაწილს წარმოადგენს. ინტერნეტის განვითარებამ, ტექნოლოგიურმა პროგრესმა საბოლოოდ მიგვიყვანა ციფრული გამოსახულებების ფართო გამოყენებამდე. ამიტომაც თანდათანობით იზრდება ინტერესი მონაცემთა შეკუმშვის ალგორითმების გაუმჯობესებაზე, მათი ეფექტურობის ზრდაზე. შეკუმშვის ტექნოლოგიას შეიძლება ჰქონდეს მრავალი სახის კომერციული გამოყენება, ამასთან ერთად ის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სამხედრო მიზნით.

საინფორმაციო სიგნალების ციფრული კოდირების ეფექტური მეთოდების გამოკვლევის საკითხები, ასევე გამოსახულებათა კოდირების მეთოდების გამოყენება და თეორიული ასპექტები მოცემულია მთელ რიგ ნაშრომებში. [1,2,3,37,43,53]

გამოსახულებათა შეკუმშვის პრობლემების გადაწყვეტა სტიმულირებს მათემატიკისა და ტექნიკის მრავალი განხრის განვითარებას. თანამედროვე მეცნიერებასა და ტექნიკაში დამუშავებულია და რეალიზებულია გამოსახულებათა კოდირების მრავალი მეთოდი შემოთავაზებულია კოდირების ძირითადი მეთოდების კლასიფიკაციებიც. ბოლო წლების სამუშაოებს შორის შეიძლება დავასახელოთ: [1,2,3,53]. [2]-ში მოცემულია გამოსახულებათა კოდირების ალგორითმების კლასიფიკაცია, რომლის მიხედვით ავტორები გამოყოფენ: იმპულსურ-კოდურ მოდულაციას, კოდირებას წინასწარმეტყველებით, კოდირებას წრფივი გარდაქმნებით, კოდირებას ინტერპოლაციისა და ექსტრაპოლაციის გამოყენებით, სტატისტიკურ კოდირებას და სხვა მეთოდებს, რომლებსაც მიაკუთვნებენ ვექტორულ დაკვანტვას, ფრაქტალურ კოდირებას, კოდირებას ჰიბრიდული გარდაქმნების საფუძველზე, აღსანიშნავია სხვა კლასიფიკაციაც [53], რომლის მიხედვით კოდირების თანამედროვე მეთოდები იყოფა 3 ძირითად ჯგუფად (თაობებად).

I თაობის მეთოდებს მიაკუთვნებენ კოდირებას წინასწარმეტყველებით, დიფერენციალურ იმპულსურ-კოდურ მოდულაციას, კოდირებას წრფივი გარდაქმნებით, „სინტეტიკურად მაღალი“ სისტემით, რომლის დროსაც შეკუმშვის კოუფიციენტები მიიღება 4...10.

II თაობის მეთოდებს მიაკუთვნებენ ჰიბრიდულ კოდირებას წრფივი და არაწრფივი ფილტრაციით, კოდირებას დაფუძნებულს მიმართულების გამოყოფაზე.

ამ მეთოდების ნიშანთვისებაა კოდირებისას ადამიანის ხილვითი თვისებების გათვალისწინება, რაც იძლევა საშუალებას გაიზარდოს შეკუმშვის კოეფიციენტი 10...100-ჯერ.

III თაობის მეთოდებს შეადგენს ტალღური (Wavelet), ფრაქტალური მეთოდები და პირამიდული აგებები, რომლებიც ამჟამად მიჩნეულია როგორც უაღრესად პერპექტიული, მაქსიმალური შეკუმშვის კოეფიციენტის მიღების თვალსაზრისით, აღდგენილი გამოსახულების საკმაოდ მაღალი ზარისხის პირობებში. ეს მეთოდები მოითხოვენ განვითარებას, სრულყოფას და მოსალოდნელია შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდამ მიაღწიოს 1000-ს, თუ განხორციელდება მათი კომბინირება შეკუმშვის სხვა მეთოდებთან.

გამოსახულების ციფრული დამუშავების სფეროში შემუშავებულია ვიდეოსიგნალების შეკუმშვის სტანდარტები, რომლებიც დადგენილია საერთაშორისო ექსპერტთა ჯგუფის მიერ (JPEG, MPEG). ამ სტანდარტებით გათვალისწინებულია დისკრეტული კოსინუსური გარდაქმნის, მოძრაობის გათვალისწინებით კადრებს შორის წინასწარმეტყველების და ენტროპიული კოდირების მეთოდების ერთობლივი გამოყენება. ამავე დროს სტანდარტის შემოღება და დამუშავება არ ამცირებს ახალი შეკუმშვის მეთოდების ძიების და შექმნის აუცილებლობას. იგი უფრო აფართოვებს შეკუმშვის მეთოდების პრაქტიკული გამოყენების სფეროს და უყენებს მათ თავის ზრდად მოთხოვნებს. მომხმარებლის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად 10 წლის წინ შემუშავებულმა JPEG და MPEG სტანდარტებმა განიცადეს განახლება. ამის დასტურია ახალი სტანდარტის JPEG-2000 შემოღება, რომელიც დაფუძნებულია ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენებაზე. ამ კონტექსტში ფრაქტალურმა მეთოდებმა, რომლებიც განიხილავნ გამოსახულებათა ფუნდამენტური სტრუქტურას სრულიად ახალი პოზიციებიდან, შეიძლება მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანონ ახალი სტანდარტების შექმნაში და შეკუმშვის მეთოდების მწარმოებლობის ამაღლებაში.

წარმოდგენილ ნაშრომში წინა პლანზე წამოწეულია ფრაქტალური კოდირება, რომელიც ვექტორული კვანტირების მოდიფიკაციას წარმოადგენს. როგორც იყო აღნიშნული ფრაქტალური და ვეივლეტები წარმოადგენენ მათემატიკის შედარებით ახალ სფეროებს, რომლებმაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს გამოსახულების შეკუმშვისადმი მიძღვნილ გამოკვლევებში.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი მიზანია გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლებისათვის ისეთი კომპინირებული მეთოდების ამუშავება, რომლებიც გულისხმობენ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის შერწყმას ეფექტური კოდირების სხვა მეთოდებთან. ამავე დროს წარმოდგენილი სამუშაო უნდა მოიცავდეს გამოსახულებათა ფრაქტალურ შეკუმშვაზე დაფუძნებულ მეთოდიკას, რეკომენდაციებს და საჭირო ალგორითმების პროგრამულ რეალიზაციას JPEG ტიპის ახალი სტანდარტის შესაქმნელად და დასანერგად.

ნაშრომის მიზნიდან გამომდინარე დისერტაციის ძირითადი ამოცანების ნუსხა შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ შემდეგნაირად:

- გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ექსპერიმენტული კვლევა, რომელიც ითვალისწინებს კოდირების ეფექტურობის და აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასებას;
- გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება განმსაზღვრელ მახასიათებლებზე;
- გამოსახულებათა შეკუმშვის უნივერსალური თავისებურების ექსპერიმენტული შემოწმება: რომლის თანახმადაც დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხი არ არის დამოკიდებული პირველი იტერაციისათვის შერჩეული გამოსახულების სახეობაზე და გარჩევითუნარიანობაზე;
- კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის საკითხების განხილვა;
- მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციების აღწერა, რეალიზაცია **Mathcad** პროგრამის გამოყენებით;
- გამოსახულებათა შეკუმშვის ვეივლეტ ტექნოლოგიების ანალიზი, რომელიც მოიცავს ვეივლეტ ორგანზომილებიანი ფუნქციების შექმნას, გამოსახულებათა აპროქსიმაციას ვეივლეტ ფუნქციების საშუალებით, მრავალმასშტაბურ ვეივლეტ გარდაქმნის ალგორითმის დამუშავებას პირამიდული კოდირების შექმნის მიზნით, შეცდომებიანი გამოსახულების ფილტრაციას ვეივლეტ და სხვა ფილტრების საფუძველზე;
- დინამიკურ გამოსახულებათა დროითი ინტერპოლაციის საკითხების განხილვა ინფორმაციის შეკუმშვის განხორციელების შესაძლებლო-ბების მიზნით;
- წინასწარმეტყველების მეთოდის რეალიზაცია წრიფივი და არაწრიფივი წინასწარმეტყველების ელემენტით;

- გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის შერწყმა მორფოლოგიურ პირამიდასთან და ვეივლეტ-გარდაქმნასთან;
- გამოსახულებათა მიმღევრობის კოდირების შემთხვევაში ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდის შერწყმა, რომელიც ითვალისწინებს როგორც კომბინირებას დროით ინტერპოლაციასთნ, ასევე კადრთა შორისი წინასწარმეტყველების მეთოდთან და ვეივლეტ-გარდაქმნასთან;
- გამოსახულების ფრაქტალურ შეკუმშვაზე დაფუძნებული ახალი სტანდარტის ვარიანტის შექმნა;
- ვაჩვენოთ, თუ როგორ შეიძლება *Mathcad* პროგრამული პაკეტის სპეციალური ფუნქციის გამოყენებით, გადავიტანოთ ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები, რომლებიც მიღებულია დისერტაციაში ნაცრისფერი გრადაციების მქონე გამოსახულებებისათვის, ფერადი გამოსახულების თითოეულ (R), (G) და (B) მდგენელზე და მოვახდინოთ დეკოდირებულ გამოსახულებათა გაერთიანება აღდგენილი ფერადი გამოსახულების მიღების მიზნით;
სადისერტაციო ნაშრომის შემდეგ თავებში განხილულია კვლევის დასახული ამოცანების გადაწყვეტის საკითხები.

თავი 1. გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის ზოგადი პრინციპები

1.1 პირველი თავის კვლევის ამოცანები

შესავალში აღნიშნული იყო, რომ ციფრული გამოსახულება ინფორმაციული სამყაროს უფრო და უფრო მნიშვნელოვან ნაწილს წარმოადგენს. გამოსახულებათა შეკუმშვის პრობლემის გადაწყვეტა უაღრესად აქტუალურია და მეცნიერებათა და ტექნიკის მნიშვნელოვანი მიმართულების განვითარების წინაპირობაა.

გამოსახულება შეიძლება მივიჩნიოთ როგორც მონაცემთა განსაკუთრებული ტიპი. ადამიანის მიერ მისი აღქმის განსხვავებული თვისების გამო ადამიანის მხედველობას გააჩნია არაერთგვაროვანი შეგრძნების უნარი გამოსახულების სტრუქტურის მიმართ: იგი განსაკუთრებით მგრძნობიარეა გამოსახულების კონტურების და ფერთა გადასვლის მიმართ, ვიდრე მცირე ინტენსივობის მცირე შეცვლის მიმართ. ეს თვისება იძლევა საშუალებას შეიქმნას მხოლოდ გამოსახულებაზე ორიენტირებული შეკუმშვის სპეციალური ალგორითმები, რომლებიც უზრუნველყოფენ გამოსახულების შეიკუმშვას მაღალი მაჩვენებლით და ადამიანის მიერ გამოსახულების ხარისხის აღქმის თვალსაზრისით უმნიშვნელო დანაკარგებით. ამ თვალსაზრისით გამოსახულების შეკუმშვის მეთოდების გამოყენება მეტად შედეგიანია და პერსპექტიული [1,2,3,37,43].

მანქანურ გრაფიკაში ფრაქტალური ალგორითმების გამოყენება ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საკითხია, თუმცა ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდების ეფექტურობის არსებითობამ ბიძგი მისცა ჩვეულებრივ დაბალსიჩქარიანი არხებით ვიდეოინფორმაციის გადაცემაში ფრაქტალური შეკუმშვის ალგორითმების გამოყენების იდეას, რომელმაც საბოლოოდ მიგვიყვანა გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების ალგორითმების შექმნამდე.

ფრაქტალური კოდირება (შეკუმშვა) დაფუძნებულია ჰიპოთეზაზე, რომლის თანახმად ნებისმიერ გამოსახულებაში შეიძლება აღმოვაჩინოთ მისი სხვადასხვა ნაწილების ლოკალური თვითმსგავსება [37,40,41,43].

ფრაქტალების შესახებ ლიტერატურის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ სტატიებში, სამეცნიერო კვლევებში და სახელმძღვანელოებში დიდი ყურადღება გამახვილებულია ფრაქტალური გამოსახულებების შექმნაზე და ეს სფერო საკმარისად კარგად არის შესწავლილი. ხოლო მსჯელობა, რომ შეკუმშვის

კონფიდენტი 1000-მდე აღწევს, ძირითადად ეხება ფრაქტალური გამოსახულების შექმნას. რაც შეეხება გამოსახულებათა ფრაქტალურ კოდირებას, ლიტერატურაში ეს საკითხები საკმარისად არ არის ასახული, თუმცა ყველგან არის მინიშნება, რომ ეს სფერო ძალიან საინტერესოა და მისი გამოკვლევა აქტიურად იწყება [37,44,46].

ზემოთქმულიდან გამომდინარე დისერტაციის პირველი თავი შეიცავს კვლევას, რომელიც ეძღვნება: გამოსახულებათა კოდირებისათვის ფრაქტალების გამოყენების განხილვას ერთიანი მათემატიკური პოზიციებიდან. ამან განაპირობა ალგორითმების შემუშავებისათვის იმ მეთოდების გამოყენება, რომელიც დაფუძნებულია იტერაციულ ფუნქციათა სისტემაზე (*IFS*), როცა საკითხი ეხება ორობით გამოსახულებას და მის კერძო სახეს - უბან-უბან იტერაციულ ფუნქციას (*PIFS*), როდესაც მუშავდება ნაცრისფერი გრადაციების მქონე გამოსახულება.

ფრაქტალური ყველა მათემატიკური მეთოდი ეფუძნება გამოსახულებათა კუმშვად ასახვას და მის ლოგიკურ განზოგადებას კოლაჟის თეორემას, რომელიც ილუსტრირდება ექსპერიმენტული დადასტურებით. გამოსახულებათა ფრაქტალური მეთოდების დამუშავება ეფუძნება ფრაქტალურ გარდაქმნებს, რომლის ძირითადი არსი მოცემული იქნება 1.2. პარაგრაფში.

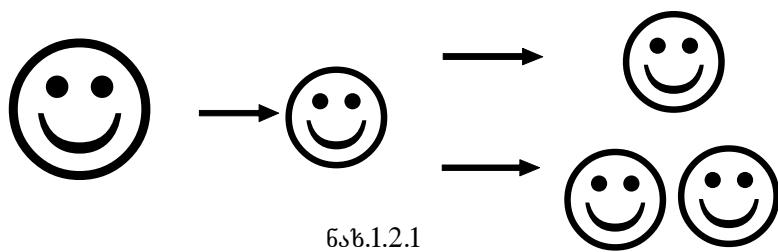
ზემოთქმულიდან გამომდინარე დისერტაციის პირველი თავი მიზნად ისახავს:

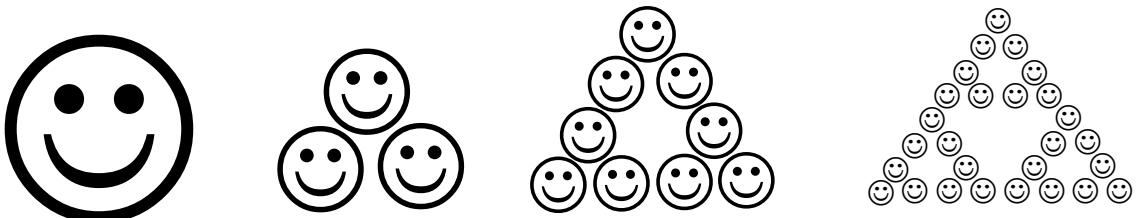
- ჩატარდეს კვლევა გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის არსის მიხედვით, რომელიც ითვალისწინებს ფრაქტალური შეკუმშვის მათემატიკურ პრინციპებს და ეფუძნება იტერაციულ ფუნქციათ სისტემას, (*IFS*) კერძოდ მის სპეციალურ სახეს უბან-უბან განსაზღვრულ იტერაციულ ფუნქციათა სისტემას (*PIFS*);
- კუმშვადი ასახვის ძირითადი (კოლაჟის) თეორემის ექსპერიმენტულ ინტერპრეტაციას და შემოწმებას;
- გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ექსპერიმენტული კვლევის პროცესში კოდირების ეფექტურობის და აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასების შესაძლებლობას;
- გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის განმსაზღვრელ მახასიათებლებზე დამოკიდებულების განსაზღვრას;

- გამოსახულებათა შეკუმშვის უნივერსალური თავისებურების ექსპერიმენტულად შემოწმებას, რომლის თანახმადაც დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხი არ არის დამოკიდებული დეკოდირებისას პირველი იტერაციის შესასრულებლად შერჩეული გამოსახულების სახეზე და გარჩევითუნარიანობაზე;
- კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის საკითხების განხილვას;

1.2 უბან-უბან განსაზღვრული იტერაციული ფუნქციის სისტემა (PIFS), როგორც გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდის (IFS)-ის მოდიფიკაცია

შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდები მიჩნეულია მეტად ეფექტურ მეთოდებად გამოსახულებათა შეკუმშვის მაღალი მაჩვენებლის მიღების თვალსაზრისით [2,37,60]. გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის გარდაქმნის წარმოდგენა შეიძლება განვიხილოთ მარტივ მაგალითზე. დაგუშვათ გვაქვს მარტივი გამოსახულება, რომელიც მოცემულია ნახ. 1.2.1-ზე მარცხნივ. მასზე ვაწარმოებთ გარდაქმნას, რომელიც ითვალისწინებს ამ გამოსახულების დიამეტრის შემცირებას ორჯერ. (ნახ. 1.2.1, ცენტრი) და მიღებული შემცირებული ნახატის სამჯერად კოპირებას. (ნახ. 1.2.1, მარჯვნივ). დაგუშვათ, რომ ამ პროცესს ვიმეორებთ იტერაციულად მრავალჯერ (კერძოდ სამჯერ) ვღებულობთ ნახ. 1.2.2.-ს:





ნახ.1.2.2



ნახ.1.2.3

მარტივი გამოსახულების ფრაქტალური გარდაქმნა

თუ საწყისად ავიღებთ სხვა გამოსახულებას (ძახილის ნიშანს) და მასზე ვაწარმოებთ იგივე გარდაქმნებს (ნახ. 1.2.3), მაშინ იტერაციების რაოდენობის მრავალი განმეორების შედეგად მიღება სურათები, რომლებიც არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. მიღებულ ბოლო გამოსახულებას გააჩნია რიგი საინტერესო თვისება:

1. იგი არ არის დამოკიდებული საწყისი გამოსახულების სახეობაზე, ვინაიდან იტერაციების მრავალი რაოდენობის ჩატარების შემდეგ საწყისი გამოსახულება მცირდება წერტილამდე;
2. მიღებული სურათ-გამოსახულების სახეს განაპირობებს მხოლოდ გარდაქმნის პროცედურის სახეობა;
3. შემდგომი გარდაქმნა მას გარდაქმნის თავის თავში;
4. მიღებული გამოსახულება შეიძლება მოიცავდეს ძალიან მცირე დეტალებს;

მრავალი იტერაციების შედეგად მიღებულ ამ ტიპის გამოსახულებებს ეწოდებათ ატრაქტორი, ხოლო გარდაქმნებს ფრაქტალური.

ბუნებრივია, რომ გარდაქმნის პროცედურები შეიძლება იყოს მრავალი სახის. ერთადერთი შეზღუდვა მდგომარეობს იმაში, რომ საწყისი გამოსახულების წერტილებს შორის გარდაქმნების მიმდევრობის გამოყენების შედეგად, მანძილი ისე

უნდა შემცირდეს, რომ ისინი იქცნენ ერთ წერტილად ანუ როგორც ამბობენ, ადგილი უნდა ჰქონდეს გამოსახულების კრებადობას [37,38,41] ზემოთ აღნიშნული აზრის მიხედვით თუ ეს პირობა არ შესრულდება, მაშინ საბოლოო გამოსახულების სახე დამოკიდებული იქნება საწყისი გამოსახულების სახეობაზე და იგი არ იქნება ატრაქტორი.

მათემატიკური თვალსაზრისით გამოსახულება ნაცრისფერ გრადაციაში შეიძლება განხილულ იქნას, როგორც ერთეულოვან $I^2=I \cdot I$ კვადრატზე განსაზღვრული ფუნქცია, რაც გულისხმობს $f : I^2 \rightarrow \{1, 2, \dots, N\} \subset R$, სადაც N – ნაცრისფერი გრადაციების რაოდენობაა.

ჩვენ შეგვიძლია შემოვიტანოთ $d_2(,)$ მეტრიკა ამ ფუნქციებზე შემდეგი სახით:

$$d_2(f, g) = \left(\int_{I^2} |f(x, y) - g(x, y)|^2 dx dy \right)^{1/2} \quad (1.2.1)$$

განვსაზღვროთ ფუნქციების სივრცე F . ამ შემთხვევაში F სივრცე – სრულია და მასზე ვრცელდება თეორემა კუმშვად ასახვაზე.

როგორც ცნობილია, ციფრული გამოსახულება $n \cdot m$ წარმოადგენს $[f_{i,j}]$, $i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$ მნიშვნელობების მატრიცას, სადაც $f_{i,j}=f(x_i, y_j)$. ამრიგად ეს მატრიცა x_i, y_j ფიქსირებულ წერტილებში აღებული $f(x, y)$ ფუნქციის ფიქსირებული მნიშვნელობების მატრიცაა. ამ შემთხვევაში მეტრიკის გამოსახულება მიიღებს სახეს:

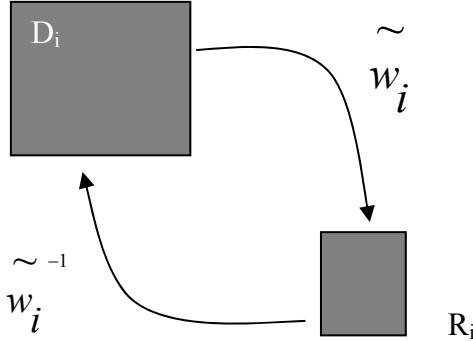
$$d_{rms}(f, g) = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |f(x_i, y_i) - g(x_i, y_i)|^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.2)$$

PIFS შედგება X სრული მეტრული სივრცისაგან, $D_i, i=1, \dots, n$ ქვეარეგების ნაკრებისაგან და $w_i : D_i \xrightarrow{\sim} X, i=1, \dots, n$ კუმშვად ასახვათა ნაკრებისაგან.

დავუშვათ $\tilde{w}_i(x, y)$ – ეს არის აფინური გარდაქმნა, რომელიც თავისთავს გარდაქმნის ერთეულოვან კვადრატში: $I^2 \rightarrow I^2$, 2×2 ზომის A მატრიცისა და 2×1 ზომის b_i ვექტორისათვის.

$$\tilde{w}_i(x, y) = A_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + b_i \quad (1.2.3)$$

დავუშვათ $D_i \subset I^2 - I^2$ ერთეულოვანი კვადრატის გარკვეული ქვეარეა და
 \sim
 R_i კი w_i გარდაქმნის შედეგის მნიშვნელობების არე, რომელიც მოქმედებს D_i
 სიმრავლეში, რაც ნიშნავს, რომ $\tilde{w}_i(D_i) = R_i$ (ნახ.1.2.2.1). აქედან ჩვენ შეიძლება
 \sim
 განვსაზღვროთ ასახვა $w_i : F \rightarrow F$ რომელიც მოქმედებს $f(x,y)$ გამოსახულებაზე



ნახ.1.2.4 გამოსახულების აფინური გარდაქმნა ნაცრისფერ გრადაციაში

$$\tilde{w}_i(f)(x,y) = s_i f(\tilde{w}_i^{-1}(x,y)) + 0_i \text{ სახით.}$$

ნახ. 1.2.4-ზე მოცემული გარდაქმნა ეს არის გამოსახულების აფინური გარდაქმნა ნაცრისფერ გრადაციაში, რომელსაც ჩვენ გამოვიყენებთ გამოსახულების ფრაქტალური კოდირებისას. იმის დასადგენად, რომ ასახვა $w_i : F \rightarrow F$

წარმოადგენს კუმშვად ასახვას საჭიროა შესრულდეს პირობა:

$$d_2(w_i(f), w_i(g)) \leq s d_2(f, g), \quad (1.2.4)$$

სადაც f და g სხვადასხვა ფუნქციებია.

(1.2.4)-ის ჩასმით (1.2.1)-ის გამოსახულებაში მივიღებთ:

$$\begin{aligned} d_2^2(w_i(f), w_i(g)) &= \left(\int_{\omega_i(D_i)} |w_i(f)(x,y) - w_i(g)(x,y)|^2 dx dy \right) = \\ &= |s_i|^2 |\det A_i| \int_{D_i} |f(x,y) - g(x,y)|^2 dx dy \leq |s_i|^2 |\det A_i| d_2^2(f, g) \end{aligned}$$

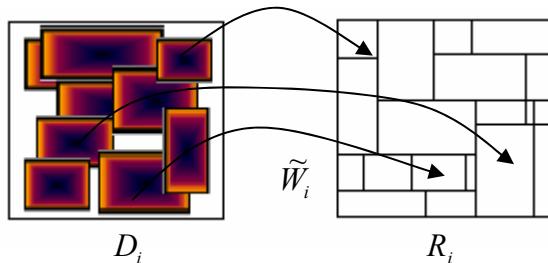
სადაც $A_i - w_i$ გარდაქმნის მატრიცაა, $\det A_i - A_i$ - ის მსაზღვრელი და s_i კუმშვადი ასახვის კოეფიციენტი. იმისათვის, რომ გარდაქმნა წარმოადგენდეს შეკუმშვას, საკმარისია შესრულდეს პირობა

$$|s_i| \sqrt{|\det A_i|} < 1 \quad (1.2.5)$$

შეკუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობა მოდულით უნდა აღემატებოდეს ერთს: $|s_i| > 1$. ამ შემთხვევაში, s_i -ის სივრცული შემდგენი წარმოადგენს შეკუმშვას მნიშვნელოვნად მცირე შეკუმშვის კოეფიციენტით, რათა შესრულდეს (1.2.5) პირობა.

1.3. გამოსახულებათა კუმშვადი ასახვის თეორემა

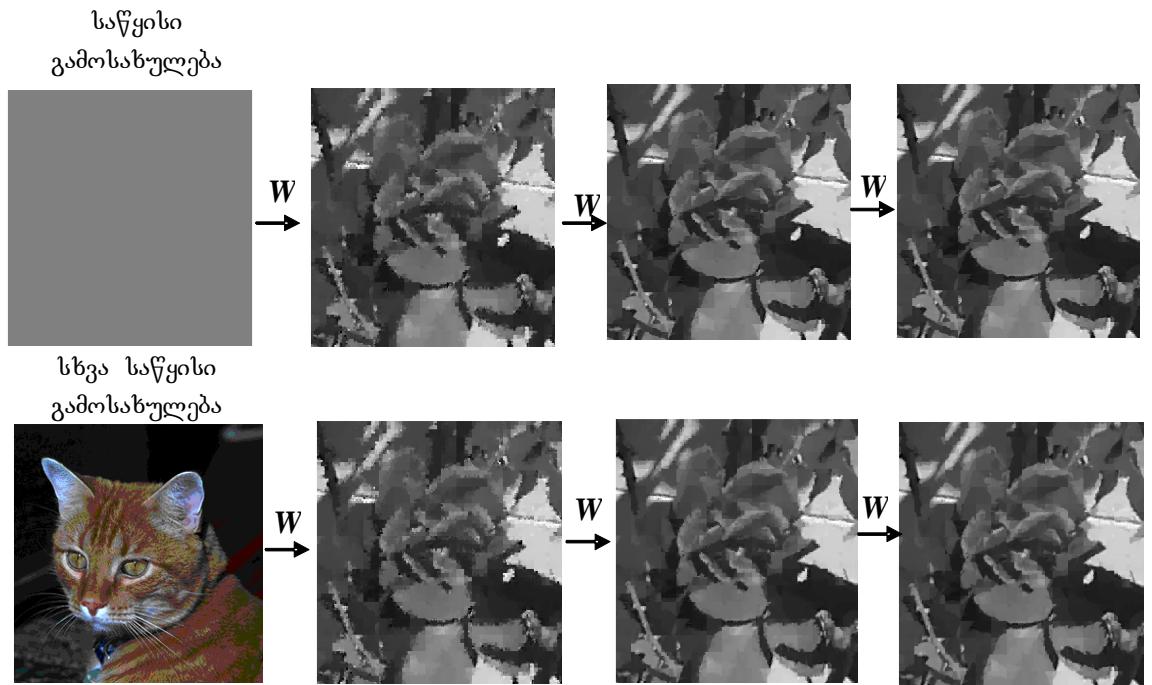
I^2 ერთეულოვანი კვადრატი დავყოთ R_i რანგულ ბლოკებად: $R_i \cap R_j = 0$.



ნახ. 1.3.1 კონფიგურაცია დომენური არეების გარკვეული სივრცისათვის

დავუშვათ, რომ $\tilde{w}_i - PIFS$ სახისაა, $\tilde{w}_i : D_i \rightarrow R_i$. ნახ.1.3.1-ზე მოცემულია \sim კონფიგურაცია დომენური არეების გარკვეული სივრცისათვის. თითოეული w_i - სათვის განვსაზღვროთ შესაბამისი w_i შეკუმშვა F გამოსახულების სივრცეში: $w_i(f)(x, y) = \tilde{w}_i^{-1}(f(w_i(x, y)) + o_i$, s_i -ის ისეთი შერჩევით, რომ w_i წარმოადგენდეს კუმშვას. განვსაზღვროთ $W : F \rightarrow F$ შემდეგი სახით: $W(f)(x, y) = w_i(f)(x, y)$ $(x, y) \in R_i$ -თვის, იმდენად, რამდენადაც, R_i რანგური ბლოკები გადაფარავენ I^2 ერთეულოვან კვადრატს. W განსაზღვრულია ყველა (x, y) -თვის, შესაბამისად $W(f)$ წარმოადგენს გამოსახულებას, რამდენადაც ყოველი w_i ასახვა წარმოადგენს კუმშვად ასახვას, w კი წარმოადგენს F -ზე კუმშვად ასახვას. ამიტომაც კუმშვად ასახვაზე თეორემის თანახმად W -ს გააჩნია ერთადერთი ფიქსირებული $f \in F$ წერტილი, რომელიც აკმაყოფილებს ტოლობას:

$$W(f_w) = f_w.$$



ნახ. 1.3.2 W კუმშვადი ასახვისას მიღებული შედეგი ორი სხვადასხვა საწყისი გამოსახულებასათვის

W კუმშვადი ასახვით ნებისმიერ f_0 გამოსახულებაზე ზემოქმედებით ჩვენ მივიღებთ f_w ფიქსირებულ წერტილს: $W^{0^n}(f_0) \rightarrow f_w, n \rightarrow \infty$, სადაც $W^{0^n}(f_0)$ არის $W(W(\dots W(f_0)))$ n -ჯერ. ნახ.1.3.2-ზე მოცემულია შედეგი მიღებული W კუმშვადი ასახვის გამოყენებით ორი სხვადასხვა საწყისი გამოსახულებისათვის. კუმშვადი ასახვა W , იტერციულად ზემოქმედებდა ორ საწყის გამოსახულებაზე “ნაცრისფერი ფონი” და „კატა“. ამ შემთხვევაში აღდგენის შედეგი ერთი და იგივე გამოსახულებაა. თეორემა კუმშვად ასახვაზე წარმოადგენს ბაზისურ თეორემას ფრაქტალური კოდირების ყველა მეთოდისათვის [37,50].

მოცემულია f გამოსახულება ნაცრისფერი გრადაციით. დავუშვათ, რომ ჩვენ შეგვიძლია ვიპოვოთ ისეთი კუმშვადი ასახვა რომ

$$d_2(f, W(f)) \leq \varepsilon , \quad (1.3.1)$$

$$\text{მაშინ } d_2(f, f_w) \leq \frac{\varepsilon}{1-s} , \quad (1.3.2)$$

სადაც s -ეს არის W გამოსახულების შეკუმშვის კოეფიციენტი, ხოლო f_w მისი უძრავი წერტილი. რაც ნიშნავს, რომ ჩვენ შეგვიძლია ნებისმიერი g

გამოსახულებისათვის იტერაციულად გამოვიყენოთ W გარდაქმნა მივიღოთ f გამოსახულებასთან მიახლოებული გამოსახულება.

$$W^{0^n}(g) \rightarrow f(w) \approx f.$$

$$\begin{aligned} d_2(f, f_w) &= d_2(f, w(f_w)) \leq d_2(f, w(f)) + d_2(w(f), w(f_w)) \leq \\ &\leq d_2(f, w(f)) + s d_2(f, f_w) \end{aligned}$$

აქ f_w – უძრავი წერტილია (აღდგენილი გამოსახულება).

ამასთან $d_2(w(f), w(f_w)) \leq s d_2(f, W(f_w))$. პირობის თანხმად. შეიძლება

მივიჩნიოთ, როგორც g გამოსახულება განსხვავებულია f გამოსახულებისაგან.

$$d_2(f, f_w) - s d_2(f, f_w) \leq d_2(f, w(f))$$

$$d_2(f, f_w)(1-s) \leq \varepsilon$$

$$d_2(f, f_w) \leq \frac{\varepsilon}{1-s}$$

ε - არის დასაშვები ცდომილება, რომელიც შეიძლება დავუშვათ საწყის (დომენსა) და გარდაქმნის შედეგად მიღებულ რანგულ ბლოკს შორის. ე.ი. ცდომილება გვაძლევს წარმოდგენას იმის შესახებ, თუ რამდენად ვპოულობთ რანგული R_i ბლოკთან მიახლოებას დომენური ბლოკის აფინური გარდაქმნის ჩატარების შედეგად.

ამასთან ერთად თეორემა კუმშვად ასახვაზე უზრუნველყოფს ფრაქტალური კოდირების შესაძლებლობას, კოლაჟის თეორემა იძლევა პრაქტიკულ საშუალებას მისი რეალიზაციისათვის. იმის ნაცვლად, რომ ვიფიქროთ იტერაციების უსასრულო რაოდენობაზე, რომელიც მოცემული გამოსახულებისთვის გამოიყენება, ჩვენთვის აუცილებელია ვიპოვოთ მხოლოდ ისეთი W ასახვა, რომელიც ახლოს იქნება სასურველ გამოსახულებასთან.

1.4 კოდირების ეფექტურობის და აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასების ზოგადი კრიტერიუმები

წარმოდგენილი ნაშრომის ძირითად მიზანს შეადგენს, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლება. ამისათვის აუცილებელია განვსაზღვროთ რა იგულისხმება ამ შემთხვევაში ეფექტურობის შეფასებაში. ჩვენ ავირჩიეთ ეფექტურობის შესაფასებლად საზოგადოდ

გამოყენებული კრიტერიუმი, შეკუმშვის კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება ცნობილი გამოსახულებით:

$$K = \frac{B \cdot M \cdot N}{\sum_{i=1}^k B_i \cdot M_i \cdot N_i} , \quad (1.4.1)$$

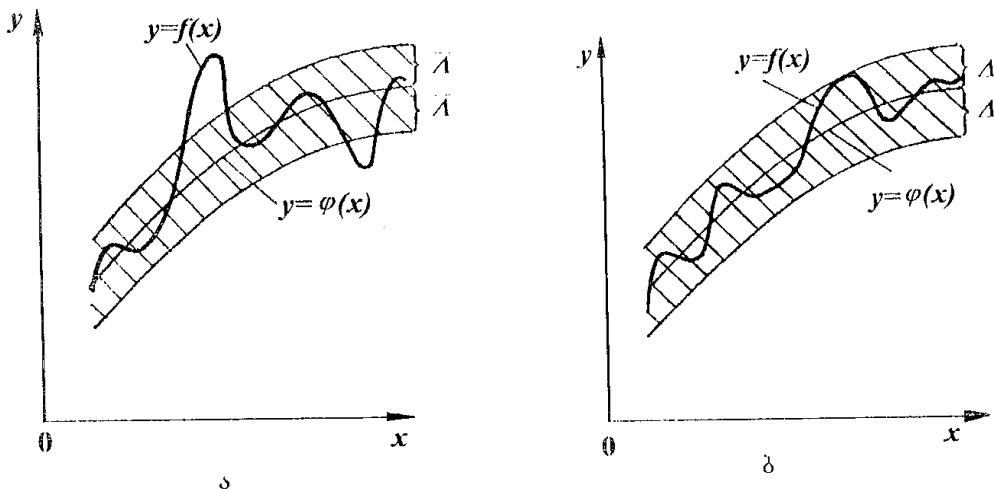
სადაც მრიცხველში მოთავსებულია საწყისი გამოსახულების წარმოსადგენად საჭირო ბიტების რაოდენობა: B – ერთი ელემენტის ინტენსივობის აღწარმოებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობაა (საზოგადოდ იგი შეადგენს 8 ბიტს), M და N საწყისი გამოსახულების სტრიქონების და სვეტების რაოდენობაა, ხოლო მნიშვნელში მოთავსებულია კოდირების შედეგად მიღებული და გადასაცემად განკუთვნილი საჭირო ბიტების რაოდენობა: სადაც k – პირამიდული კოდირების დონეების რაოდენობაა, B_i – ერთი ელემენტის ინტენსივობის აღწარმოებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა. ყოველი დონისათვის იგი შეიძლება ინდივიდუალური იყოს, მაგრამ კავშირგაბმულობის ხაზებში გადაცემისას მათი რაოდებობა იკრიბება. M_i და N_i – პირამიდის დონეების შემადგენელი გამოსახულებების სტრიქონების და სვეტების საერთო რაოდენობაა.

საზოგადოდ, რაც უფრო დიდია შეკუმშვის კოეფიციენტი, მით უფრო ეფექტურია რეალიზებული კოდირება. ხშირად იყენებენ მახასიათებელს, რომელიც ასახავს ორობითი ერთეულების რაოდენობას, რომელიც ესაჭიროება ინფორმაციის ერთი ელემენტის გადაცემას პირამიდული გარდაქმნების შედეგად მიღებული ინფორმაციის წარმოდგენისათვის. აღნიშნული სიდიდე რაოდენობრივად ტოლია წარმოდგენილი გამოსახულების შებრუნებული სიდიდის, რომელიც შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვადგინოთ:

$$r = \frac{T}{H}, \quad (1.4.2)$$

სადაც T – ბიტების რაოდენობაა, რომელიც აუცილებელია ოპტიმალურად კოდირებული ინფორმაციის გადასაცემად კავშირგაბმულობის ხაზებში, ხოლო H – არის სიმბოლოების რაოდენობა, რომელიც საჭიროა საწყისი გამოსახულების წარმოდგენისათვის.

ცხადია, რომ ნებისმიერი ინფორმაციის შეკუმშვა იწვევს აღდგენილ გამოსახულებაში ცდომილების შეტანას. ბუნებაში არსებული ნებისმიერი



ნახ. 1.4.1

გამოსახულება შეიცავს ჭარბ ინფორმაციას, ეფექტური კოდირება საშუალებას გვაძლევს აღნიშნული ჭარბი ინფორმაციის გამოსახულებიდან ჩამოშორების ხარჯზე განვახორციელოთ შეკუმშვა. სიჭარბის შემცირება უშუალოდ დაკავშირებულია აღდგენილი გამოსახულების ხარისხზე. უაზროა შეკუმშვის კოეფიციენტის შეფასება მიღებული ცდომილების გათვალისწინების გარეშე, ვინაიდან ნებისმიერ შეკუმშვის მეთოდს თან სდევს აღდგენილ გამოსახულებაში ცდომილების შეტანა. ეფექტური კოდირების ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ განვსაზღვროთ “საუკეთესო” ვარიანტი შეკუმშვის კოეფიციენტსა და აღდგენილი გამოსახულების სიზუსტის მაჩვენებლებს შორის. ნებისმიერი შეკუმშვა მათემატიკურ ენაზე ნიშნავს საწყისი ინფორმაციის (სიგნალის) მიახლოებით წარმოდგენას, რომელიც ფუნქციონალურ ანალიზში [56,57] ფუნქციების აპროქსიმაციის და ინტერპოლაციის ოპერაციების გამოყენებას.

ფუნქციათა აპროქსიმაციის თეორიაში [33] სიზუსტის შეფასება ხდება წინასწარ შერჩეული კრიტერიუმის მიხედვით. უფრო ხშირად გამოიყენება საშუალო კვადრატული ან თანაბარი მიახლოების კრიტერიუმები. მიახლოების საშუალო-კვადრატული კრიტერიუმი განეკუთვნება მიახლოების გასაშუალოებული ტიპის კრიტერიუმებს.

საშუალო კვადრატულ მიახლოებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\delta(f, \varphi) = \int_a^b |f(x) - \varphi(x)|^2 dx \quad (1.4.3)$$

სადაც $f(x)$ – საწყისი ფუნქციაა, ხოლო $\varphi(x)$ – აღდგენილი ე.ი. მააპროქსიმებელი.

თუ $f(x)$ და $\varphi(x)$ ფუნქციებს შორის მიახლოების კრიტერიუმად გამოვიყენებთ თანაბარი მიახლოების კრიტერიუმს, მაშინ “მანძილი” $f(x)$ და $\varphi(x)$ ფუნქციებს შორის შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$\delta(f, x) = \text{Sup} |f(x) - \varphi(x)| \quad (1.4.4)$$

$$b \leq x \leq a$$

ნახ. 1.4.1 ა და ნახ. 1.4.1 ბ—ზე გრაფიკების სახით წარმოდგენილია მიახლოების ორივე კრიტერიუმის წარმოდგენის მაგალითები. ნახ. 1.4.1 ა — სკგ, ნახ. 1.4.1 ბ — თანაბარი.

მიახლოების თანაბარი კრიტერიუმით ხდება ფუნქციის თითოეულ x წერტილში $f(x)$ და $\varphi(x)$ ფუნქციის მიახლოების შეფასება და ეს კრიტერიუმი უფრო “მკაცრია”, ვიდრე საშუალოკვადრატული მიახლოების კრიტერიუმი. უმთავრესად ეს აუცილებელია ისეთ ამოცანებში, სადაც სასურველია შენარჩუნებული იყოს გამოსაკვლევი სიგნალის სახე.

ცხადია, რომ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასების გასაშუალოებული ტიპის მაჩვენებელებთან ერთად (სკგ, ნსკგ, სხფ და სხპფ,) სასურველია გამოვიყენოთ მიახლოების თანაბარი კრიტერიუმი, რომელიც მოცემულ შემთხვევაში ნიშნავს საწყისსა და აღდგენილ გამოსახულებებს შორის სხვაობის გამოსახულების მიღებას და შეცდომების ინტენსიონათა განაწილების პისტოგრამების მიღებას.

ტექნიკისათვის უფრო გამოსაყენებელია საშუალო კვადრატული გადახრა (სკგ) (ცდომილება) და ნორმირებული საშუალო კვადრატული გადახრა, რომლებიც განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\text{სკგ} = \sqrt{\frac{1}{M * N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - f'(m, n)]^2}, \quad (1.4.5)$$

$$\text{ნსკგ} = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{255} \sum_{n=0}^{255} [f(m, n) - f'(m, n)]^2}{\sum_{m=0}^{255} \sum_{n=0}^{255} [f(m, n)]^2}}, \quad (1.4.6)$$

ტექნიკაში აგრეთვე დიდი გამოყენება აქვს სიზუსტის მაჩვენებლებს, რომელთაც უწოდებენ სიგნალ-ზმაურის ფარდობას და პიკურ სიგნალ-ზმაურის ფარდობას და რომლებიც განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\text{სხვ} = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n)]^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - f'(m, n)]^2} \right\}, \quad (1.4.7)$$

$$\text{სხპ} = -10 \log \left\{ \frac{\frac{1}{256^2} \sum_{m=0}^{255} \sum_{n=0}^{255} [f(m, n) - f'(m, n)]^2}{255^2} \right\}, \quad (1.4.8)$$

სადაც $f(m, n) = (m, n)$ კორდინატებზე საწყისი გამოსახულების ანათვლების ინტენსივობებია, $m = 0 \dots 255$, $n = 0 \dots 255$, $f'(m, n)$ – აღდგენილი გამოსახულების ანათვლების ინტენსივობა იგივე კორდინატებზე, M და N გამოსახულებაში სტრიქონების და სვეტების სრული რაოდენობა. მაქსიმალური გადახრის კრიტერიუმი, ანუ თანაბარი მიახლოების კრიტერიუმი უფრო მკაცრია, იმიტომ რომ მოითხოვს ფუნქციის განსაზღვრას ნებისმიერ წერტილში. აპროქსიმაციის შედეგად მიღებული მააპროქსიმებელი და საწყისი ფუნქციის განსხვავება (ცდომილება) არ უნდა აღემატებოდეს მოცემულ მნიშვნელობას, მაშინ როდესაც სკგ–ის კრიტერიუმის მიხედვით ეს ასე მკაცრად არ არის მოთხოვნილი. აქვე ზაზი უნდა გავუსვათ იმას, რომ თანამედროვე კომპიუტერული შესაძლებლობანი **MathCad** პროგრამის გამოყენებით შესაძლებელს ქმნის არა მხოლოდ ანალიზურად მივიღოთ შედეგები ამ მკაცრი კრიტერიუმებით, რომელსაც ეწოდება თანაბარი მიახლოების შეფასება [30,42], არამედ თვალსაჩინოებისათვის მივიღოთ სხვაობითი გამოსახულება აღდგენილ და საწყის გამოსახულებებს შორის, რომელიც გვიჩვენებს მათ შორის ცდომილებებს გამოსახულებათა ყველა წერტილში. ნახ. 1.4.2–ზე მოყვანილია სხვაობითი გამოსახულება აღდგენილ და საწყის გამოსახულებებს შორის. ამ კრიტერიუმის მიხედვით მიღებული “ცდომილებათა” გამოსახულებები მოყვანილი იქნება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების დროს. გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების შედეგად მიღებული ერთ-ერთი სხვაობითი გამოსახულება, რომელიც შეესაბამება პირობებს, როცა დომენების რაოდენობა სვეტსა და სტრიქონში არის შესაბამისად 16×16 -ზე მოცემულია ნახ.

1.4.3.

აქვე შესაძლებლობა გვეძლევა მივიღოთ “სამგანზომილებიანი” ჰისტოგრამები. ნახ. 1.4.4–ზე წარმოდგენილია საწყის და აღდგენილ გამოსახულე-

ბებს შორის მიღებული ცდომილების სამგანზომილებიანი ჰისტოგრამა. თვალსაჩინოებისათვის გამოყოფილია 50×50 -ზე მასივი, რომელიც შეიცავს კონტურებს და ინტენსივობების მკვეთრ ცვლილებებს.

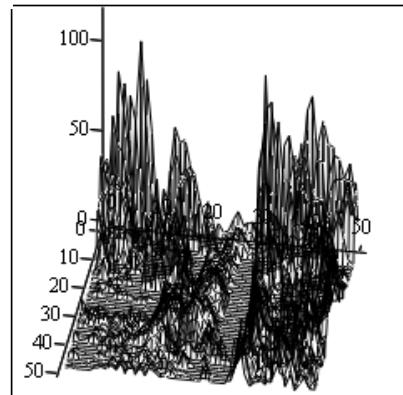


SXVA

ნახ. 1.4.2



ნახ. 1.4.3



L3k

ნახ. 1.4.4 საწყის და ალდგენილ გამოსახულებების შორის მიღებული ცდომილების სამგანზომილებიანი ჰისტოგრამა

ორივე ეს კრიტერიუმი ატარებს ობიექტურ და რაოდენობრივ ხასიათს. ჩვენ ეფექტურობის შესაფასებლად მომავალში გამოვიყენებთ საშუალო შეფასების კრიტერიუმს, ვინაიდან ის უფრო “ეთანხმება” ადამიანის მხედველობის გასაშუალოებულ თვისებას, მაშინ როდესაც თანაბარი მიახლოების კრიტერიუმი გამოიყენება ავარიულ სიტუაციებში. ჩვენ მიზანს აგრეთვე შეადგენს განვსაზღვროთ როგორ დამოკიდებულებაში იმყოფება შეკუმშვის კოეფიციენტი და

მიღებული ცდომილება. კავშირგაბმულობაში უფრო ხშირად გამოიყენება ეფექტურობის შეფასება სხვათ—ით. რაც უფრო მაღალია სხვათ—ის მნიშვნელობა მით უფრო უკეთესია აღდგენილი გამოსახულების ხარისხი.

1.5 გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება ფრაქტალური გარდაქმნის განმსაზღვრელ მახასიათებლებზე

1.5.1. გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების არსი

გამოსახულების ფრაქტალური კოდირებისას ჩვენ ვცდილობთ დავადგინოთ კუმშვადი გარდაქმნის სიმრავლე. გამოსახულებათა კოდირების ნებისმიერი მეთოდი გულისხმობს გამოსახულებაში დომენური და რანგული ბლოკების სისტემის შექმნას. *f* გამოსახულება იყოფა არაგადამფარავ რანგული ბლოკების წინასწარ მოცემულ რაოდენობად და ამავე დროს განისაზღვრება დომენური ბლოკების სიმრავლე. თითოეული რანგული ბლოკისთვის კოდირების ალგორითმი პოულობს დომენების სიმრავლიდან ისეთ დომენს, რომელიც მასზე ჩატარებული აფინური გარდაქმნების შედეგად, გადაიყვანს მას განხილულ რანგულ ბლოკში მათ შორის საუკეთესო მსგავსების თვალსაზრისით. ყველა რანგული ბლოკისათვის ამ პროცედურის ჩატარების შედეგად *f* გამოსახულება აისახება „კოდების“ სტრუქტურად. რანგული ბლოკები შეიძლება იყოს ერთი და იგივე ზომის, თუმცა ხშირად გამოიყენება ადაპტური დაყოფა ბლოკების ცვლადი ზომებით. რანგული ბლოკები წარმოადგენს კვადრონების მეთოდით დაყოფის შედეგს.

დისერტაციაში გამოყენებული ფრაქტალური კოდირების C^{++} პროგრამით რეალიზებული საბაზო ალგორითმი სრულდება შემდეგნაირად.

- *f* გამოსახულება იყოფა არაგადამფარავ R_i რანგულ ბლოკებად. რანგული ბლოკები ამ შემთხვევაში არის მართკუთხედები, თუმცა გამოიყენება სხვა ფორმებიც, მაგალითად სამკუთხედები. R_i დონეები შეიძლება იყოს ტოლი, მაგრამ შეიძლება იყოს განსხვავებულიც, ეს იძლევა გამოსახულების მცირე ზომის რანგულ დონეებად გადაფარვის საშუალებას. დაყოფის სახე—კვადრონების სიღრმე აღწერილ იქნა ფიშერის მიერ; [25,37,69]

- გამოსახულება იფარება დომენური არების (ბლოკების) მიმდევრობით. დომენები შეიძლება იყოს სხვადასხვა სახის, ჩვეულებრივ მათი რაოდენობა განისაზღვრება ასეულობით და ათასობით;
- თითოეული რანგული ბლოკისათვის ვპოულობთ დომენს და შესაბამის გარდაქმას, რომელიც საუკეთესოდ გადაფარავს რანგულ ბლოკს. ჩვეულებრივ ეს არის აფინური გარდაქმნის სახე. ვარეგულირებთ გარდაქმნის ისეთ პარამეტრებს, როგორიც არის კონტრასტი, სიკაშკაშე;
- თუ საკმარისი შესაბამისობა ვერ მივიღეთ, მაშინ რანგული დონეები იყოფა მცირე რანგულ დონეებად. ეს პროცესი მეორდება მანამ, სანამ არ მივიღებთ მისაღებ შესაბამისობას, ან რანგული დონე არ მიაღწიევს წანასწარ განსაზღვრულ ზღვარს;

არსებობს გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების სხვადასხვა რეალიზაციები. როგორც აღვნიშნეთ დაყოფის სქემაში შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მართკუთხედები, ასევე სამკუთხედები. სამკუთხედებად დაყოფა ხასიათდება ნაკლები გამოსახულებითი არტეფიქტებით. შემუშავებულია ასევე არააფინური გარდაქმნის ვარიანტები [60,61,67]. აფინური გარდაქმნის სივრცული მდგრელი ნაცრისფერი გრადაციის გამოსახულებისათვის უზრუნველყოფს სივრცული შეკუმშვის $|\det A_i| < 1$ პირობის შესრულებას.

შემდეგი ბიჯი ითვალისწინებს გამოთვლების დიდ რაოდენობას. R_i ყოველი რანგული დონისათვის ალგორითმი უქებს D_i დომენს, w_i სივრცულ გარდაქმნას, s_i კონტრასტს და Q_i სიკაშკაშეს, ისე რომ $w_i(f)$ ახლოს იყოს f გამოსახულებასთან R_i ბლოკში. ე.ი ჩვენ ვეძებთ ისეთ w_i -ს, რომ $\int_{R_i} |w_i(f)(x, y) - f(x, y)|^2 dx dy$

სიდიდე იყოს უმცირესი. ციფრული გამოსახულებისათვის ეს ინტეგრალი იცვლება პიქსელების მიხედვით ჯამით. თუ w_i სიდიდის საუკეთესო მნიშვნელობის დადგენისას ამ გამოსახულების მნიშვნელობა აღმოჩნდება წინასწარ განსაზღვრული ცდომილებით მეტი, მაშინ დაყოფის ადაპტური სქემა დაყოფას აწარმოებს უფრო მცირე რანგული ბლოკებით, შემდეგ კი უკვე ამ ბლოკებისათვის ხდება ოპტიმალური გარდაქმნის ძიება. ეს პროცესი გაგრძელდება მანამ, სანამ გამოსახულების მიხედვით გამოთვლილი სიდიდე არ გახდება დასაშვებ ცდომილებაზე ნაკლები. გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების ერთ-ერთ

მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ის, რომ დომენური და რანგული ნაწილების რაოდენობა ამცირებს კოდირების პროცესს.

გამოსახულების ფრაქტალური მეთოდით კოდირებული “კოდი” – ეს არის ჩამონათვალი, რომელიც შეადგენს ამომწურავ ინფორმაციას თითოეული რანგული ბლოკის შესახებ. კერძოდ, რანგული ბლოკის მდებარეობა, დომენის ინდექსი, რომელიც მიგვითითებს თუ რომელი დომენი ისახა ამ რანგულ ბლოკში და იმ პარამეტრების ნუსხა, რომლითაც აღიწერება აფინური გარდაქმნის კერძო სახე, რომლითაც განხორციელდა დომენური ბლოკის ასახვა ამ რანგულ ბლოკში. მაშასადამე, შეკუმშვის კოეფიციენტი დამოკიდებულია როგორც რანგული ბლოკების რაოდენობაზე, ასევე თითოეული რანგული ბლოკის შესახებ ინფორმაციის შენახვის ეფექტურობაზე (ოპტიმალურობაზე).

შეკუმშვის კოეფიციენტი დამოკიდებულია რანგული ბლოკების რაოდენობაზე, ასევე თითოეული რანგული ბლოკის შესახებ ინფორმაციის შენახვის ეფექტურობაზე. რანგული ბლოკების დიდი რაოდენობა უზრუნველყოფს გამოსახულების დეკოდირების მაღალ ხარისხს, მაგრამ შეკუმშვის კოეფიციენტის ხარისხის ხარჯზე.

1.5.2. კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება დეტერმინირებულ პარამეტრებზე

გამოსახულების ნებისმიერი შეკუმშვის და კოდირების მიზანს შეადგენს გარდაქმნის შედეგად მივიღოთ ისეთი სტრუქტურები, რომლებიც მოგვცემენ საშუალებას მოვახდინოთ გამოსახულებათა კოდირება ეფექტურად და საუკეთესოდ [61,67,69]. ეს კი ბევრად არის დამოკიდებული გამოყენებულ გარდაქმნის პარამეტრებზე, რომლებიც შეიძლება იყოს დეტერმინირებული (ჩვენს მიერ წინასწარ შერჩეული) და სტატისტიკური – რომლებიც საერთოდ განისაზღვრებიან ნებისმიერი კოდირების მეთოდის გამოყენების დროს.

თითოეული რანგული ბლოკისათვის საჭიროა ისეთი დომენური ბლოკის პოვნა, რომელიც ეფექტურად ასახავს რანგულ ბლოკს, იმისათვის, რომ ასახვა იყოს კუმშვადი, დომენი უნდა იყოს რანგულ ბლოკზე დიდი. შეკუმშვის საუკეთესო მნიშვნელობის მიღება დამოკიდებულია დომენურ და რანგულ ბლოკებს შორის საუკეთესო შესაბამისობის პოვნაზე დამატებითი დაყოფის აუცილებლობის გარეშე.

ძალიან მცირე ზომის ბლოკებად დაყოფას მიგყავართ ბლოკების დიდ რაოდენობამდე, რაც ამცირებს შეკუმშვის კოეფიციენტს.

დომენების სისტემის აღსაწერად საჭირო ალგორითმის შესაბამისი პროგრამა, გამოყენებული დისერტაციაში, იყენებს 5 პარამეტრს. ეს პარამეტრებია: დომენის სვეტი და სტრიქონი, დომენების დონე, პორიზონტალური გადაფარვა და ვერტიკალური გადარვა. ეს პარამეტრები ერთად განსაზღვრავენ დომენების რაოდენობას და მაქსიმალური გადაფარვის დასაშვებ მნიშვნელობას.

ცხრილში 1.5.2.1 მოცემულია ზემოთ განსაზღვრული პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის დომენების რიცხვი.

ცხრილი 1.5.2.1 დომენების საერთო რაოდენობის განსაზღვრის შედეგები

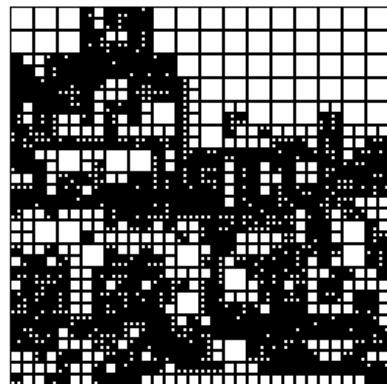
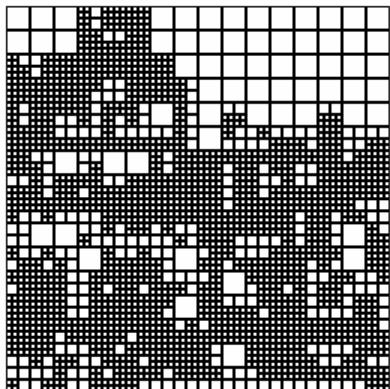
სტრიქონებისა და სვეტების რაოდენობა	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8	8x8
დომენების დონე	1	2	2	3	3	3
პორიზონტალური გადაფარვა	1	1	0,5	0,5	0,25	0,1
ვერტიკალური გადაფარვა	1	1	0,5	0,5	0,25	0,1
დომენების საერთო რაოდენობა	64	320	1186	5155	20187	125707

გამოსახულების რანგულ ბლოკებად დაყოფის ერთერთ მეთოდს წარმოადგენს კვადროზის მეთოდი [71,77]. თავდაპირველად ზდება უხეში დაყოფა. თითოეული რანგული ბლოკისათვის ალგორითმი ცდილობს დაადგინოს დომენი და შესაბამისი კუმშვადი ასახვა, რომელიც საუკეთესოდ გადაფარავს რანგულ ბლოკს. იმისათვის, რომ უზრუნველყოთ შეკუმშვა, ის რანგული ბლოკები, რომლებიც აღმოჩნდება დომენურ ბლოკებს შორის უდიდეს ბლოკზე, იყოფა მცირე რანგულ ბლოკებად. კონტრასტი და სიკაშკაშე გამოითვლება უმცირეს კვადრატთა მეთოდით, რომელიც უზრუნველყოფს მაქსიმალურ შესაბამისობას. შემდეგ, თუ გადაფარვა მოხდა დასაშვები ცდომილების ფარგლებში, ითვლება, რომ რანგული ბლოკი გადაფარულია და ალგორითმი გადადის შემდეგ რანგულ ბლოკზე. თუ გადაფარვა არ მოხდა დასაშვები ცდომილების ფარგლებში, მაშინ ალგორითმი ამოწმებს მიღწეული იყო თუ არა კვადროზის მაქსიმალური სიღრმე. თუ კვადროზის მაქსიმალური სიღრმე არ იყო მიღწეული, მაშინ ალგორითმი ბლოკს ყოფს ოთხ მცირე რანგულ ბლოკად და ოპტიმალური დომენის და გარდაქმნების ძიება იწყება

ისევ თავიდან ახალი რანგული ბლოკებისათვის. პროცესი მთავრდება მაშინ, როცა ყველა რანგული ბლოკი იქნება გადაფარული.

შევნიშნოთ, რომ დასაშვები ცდომილების სიდიდის ზრდა და ასევე კვადრობის სიღრმის გაზრდა იწვევს რანგული ბლოკების რიცხვის ზრდას.

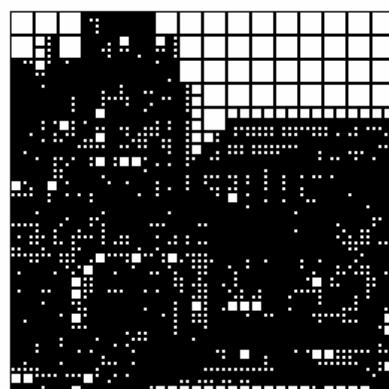
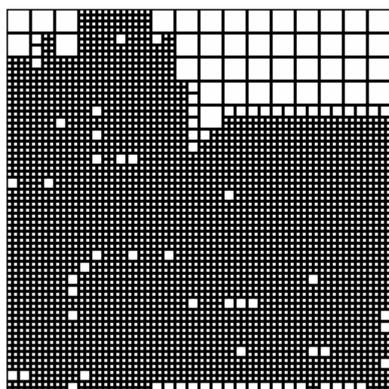
ნახ. 1.5.2.1 და ნახ. 1.5.2.2-ზე მოცემულია გამოსახულების რანგულ ბლოკების დაყოფა კვადრობის მეთოდით კვადრობის სიღრმის და დასაშვები ცდომილების სხვადასხვა მნიშვნელობების შემთხვევაში.



ნახ. 1.5.2.1 გამოსახულების რანგულ ბლოკებად დაყოფა

დასაშვები ცდომილება $0,05$
კვადრობის სიღრმე 6

დასაშვები ცდომილება $0,05$
კვადრობის სიღრმე 7



ნახ. 1.5.2.2 გამოსახულების რანგულ ბლოკებად დაყოფა

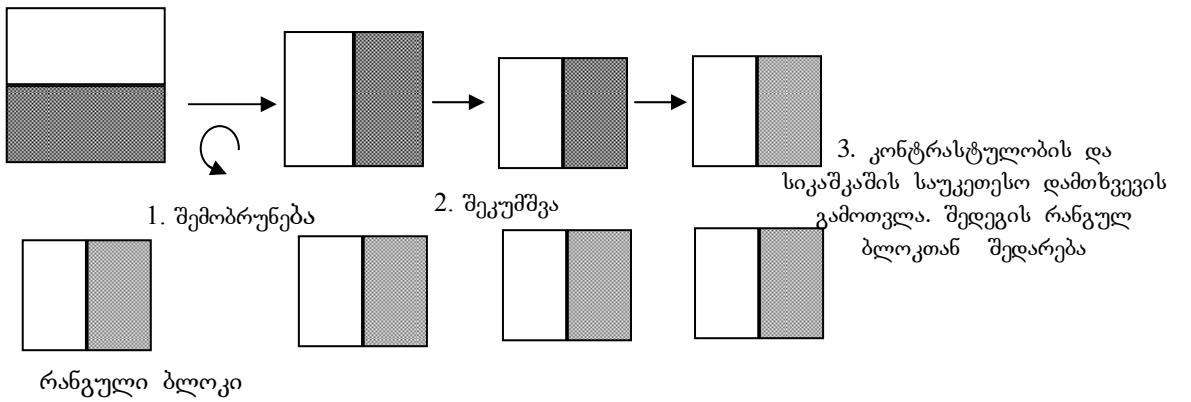
დასაშვები ცდომილება $0,025$
კვადრობის სიღრმე 6

დასაშვები ცდომილება $0,025$
კვადრობის სიღრმე 7

ფრაქტალურ კოდირებაში მთავარია დომენური და რანგული არების შედარება. ყოველი რანგული ბლოკისათვის ალგორითმი ყველა გარდაქმნის ვარიანტს ერთმანეთს ადარებს. ნახ. 1.5.2.3. მოცემულია დომენურსა და რანგულ

გარემოს შორის შესაბამისობის სქემა. პირველ რიგში არჩეული დომენისათვის გამოიყენება რვიდან ერთ-ერთი ბაზური მობრუნება/არეკვლა. შემდეგ მოძრავი დომენური არე იკუმშება იმისათვის, რომ გახდეს რანგული გარემოს შესაბამისი. შევნიშნოთ, რომ რანგული გარემო უნდა იყოს დომენურზე ნაკლები, რათა ჯამური ასახვა იყოს კუმშვადი. საბოლოოდ უმცირეს კვადრატთა მეთოდით გამოითვლება სიკაშკაშის და კონტრასტის ოპტიმალური პარამეტრები.

დომენური ბლოკი



ნახ. 1.5.2.3

ოპტიმალური კონტრასტულობის და სიკაშკაშის დასადგენად აუცილებელია ვიპოვოთ ისეთი s და o , რომ გამოსახულების მნიშვნელობა იყოს მინიმალური.

$$\sum_i \sum_j (sd_{ij} + o - r_{ij})^2 \quad (1.5.2.1)$$

სადაც d_{ij} და r_{ij} დომენური და პიქსელური არეების პიქსელების შესაბამისი მნიშვნელობებია, რომლის ამონახსენსაც წარმოადგენს:

$$\bar{r} = \frac{1}{NM} \sum_i \sum_j r_{ij} \quad \beta = \sum \sum (\mathbf{d}_{ij} - \bar{\mathbf{d}})^2 \quad \bar{d} = \frac{1}{NM} \sum_i \sum_j d_{ij} \quad (1.5.2.2)$$

$$s = \alpha / \beta$$

$$0 = \bar{r} + \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \bar{d}, \quad \text{სადაც } \alpha = \sum \sum (\mathbf{d}_{ij} - \bar{\mathbf{d}})(\mathbf{r}_{ij} - \bar{\mathbf{r}})$$

ფრაქტალური კოდირების ერთ-ერთი უარყოფითი მხარე ეს არის კოდირებისათვის დიდი დროის დახარჯვა. ცნობილია, რომ როცა დომენების რაოდენობა აღემატება 100 000-ს, მაშინ კოდირების პროცესს ორ დღეზე მეტი დრო სჭირდება. ცხრილში 1.5.2.2 მოცემულია კოდირება სამი სხვადასხვა დროითი მნიშვნელობისათვის. კოდირებისას გამოყენებულია გამოსახულება „ვარდი”.

როგორც ცხრილიდან ჩანს დომენების რაოდენობის ზრდასთან ერთად დროითი მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად იზრდება. დომენების რაოდენობის ზრდა აუმჯობესებს შეკუმშვას, რაზეც მიუთითებს რანგული ბლოკების რაოდენობაც.

თუ უარყოფილ იქნება საუკეთესო დომენის პოვნის ოპერაცია, მაშინ დომენებისა და რანგული ბლოკების შედარების პროცესი შეჩერებულია. მესამე მაგალითისთვის ეს ოპერაცია ჩართულია, რაც ასახულია სწორედ საშუალო კვადრატულ მნიშვნელობებში. მეორე და მესამე მაგალითებში ერთი და იგივე პირობებით მიმდინარეობს კოდირება, მაგრამ ზემოთ ნახსენები ოპციის ჩართვის შედეგად მიღებული რანგული ბლოკების რაოდენობაც (916) ერთი და იგივეა, ე.რ. შეკუმშვაშიც უპირატესობა არ გვაქვს. მცირეოდენი განსხვავებაა პიქსელებში საშუალო ცდომილების თვალსაზრისით.

ცხრილი 1.5.2.2

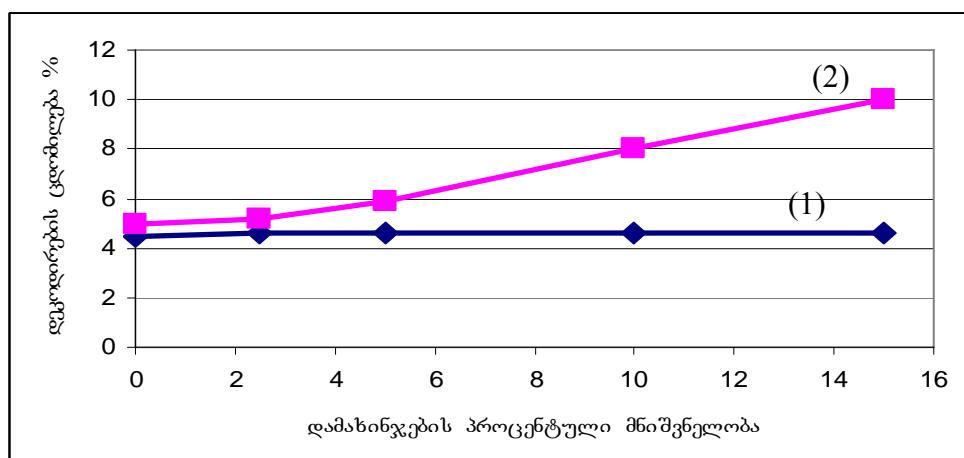
კვადრობის სიღრმე	6	6	6
დასაშვები ცდომილება	0,05	0,05	0,05
დომენების რაოდენობა სტრიქონსა და სკეტში	8×8	8×8	8×8
პორიზონტალური გადაფარვა	1,0	0,5	0,5
კვრტიკალური გადაფარვა	1,0	0,5	0,5
დომენის დონე	2	2	2
დომენების რიცხვი	320	1186	1186
ვიპოვოთ საუკეთესო დომენი?	დიახ	დიახ	არა
რანგული არების საბოლოო რიცხვი	1048	916	916
საშუალო ცდომილება პიქსელებში. (APE) (%)	3,844%	3,839%	2,982%
სხვა	24,17 დბ	24,32 დბ	26,061 დბ
კოდირების საერთო დრო	პენტიუმ-1 200 მგპ	15წთ 59წმ	42წთ 32 წმ
	პენტიუმ-4 2000 მგპ	2წთ 50 წმ	5წთ 8 წმ
			6წთ 55წმ

ფრაქტალური შეკუმშვის ერთ-ერთი უნიკალური თავისებურება ის არის, რომ დეკოდირება არ არის დამოკიდებული გარჩევისუნარიანობაზე. შევნიშნოთ, რომ რანგულ ფაილში ჩვენ არსად არ ვითვალისწინებთ საწყისი გამოსახულების ზომებს. დეკოდირების დროს ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ ნებისმიერი ზომის გამოსახულება, იმისდა მიუხედავად თუ რა ზომის გამოსახულება იყო კოდირებული. ეს თვისება იძლევა საშუალებას მნიშვნელოვნად ავამაღლოთ შეკუმშვის მწარმოებლობა. დავუშვათ, რომ 256×256 ზომის ნაცრისფერი გრადაციის

გამოსახულება კოდირებულ იქნა 4000 რანგული ბლოკის დახმარებით. თუ დავუშვებთ, რომ თითოეული რანგული ბლოკის შესანახად საჭიროა 4 ბაიტი, მაშინ კოდირება მოითხოვს მეხსიერებაში მინიმუმ 16 კბაიტი. თუ საწყისი გამოსახულების კოდირებისათვის დაგვჭირდება $256 \times 256 \times 8$ ბიტების რაოდენობა ≈ 64 კბაიტი. 64 კბტ-იანი გამოსახულებისათვის მივიღებთ შეკუმშვის კოეფიციენტს დაახლოებით 1:4, თუ დავუშვებთ, რომ დეკოდირებისას ამ გამოსახულების ზომა გახდა 1024×1024 , მაშინ მივიღებთ შეკუმშვის კოეფიციენტს 256:1.

რანგული ბლოკების პარამეტრების დისკრეტიზაცია იწვევს გარკვეულ ცდომილებას გამოსახულების დეკოდირებისას. კვადრობები თვითონ შეიცავს საკმარის ინფორმაციას გამოსახულების ამოსაცნობად.

საწყისი მონაცემების ნებისმიერი დამახინჯება, დიდი ალბათობით დეკოდირებულ გამოსახულებაში სერიოზულ ცდომილებებს იწვევს. თუმცა მათი ზომა არც ისე დიდია, ამიტომ ეს მონაცემები შესაძლებელია დაცულ იქნას შესაძლო ცვლილებების ან დამახინჯებისაგან.



ნახ. 15.2.4

ნახ. 15.2.4-ზე მოცემულია დეკოდირებულ გამოსახულებაში მიღებული ცდომილების პროცენტული რაოდენობის დამოკიდებულება გადასაცემი მონაცემების დამახინჯების პროცენტულ რაოდენობაზე. (1) მრუდი შესაბამება გარდაქმნების ინდექსის ცდომილებას, (2) კი დომენების ინდექსების ცდომილებას. ნახ. 15.2.4-დან ჩანს, რომ დეკოდირება უფრო მგრძნობიარეა დომენების ინდექსის დამახინჯების მიმართ, ვიდრე გარდაქმნის ინდექსის მიმართ. შედეგები მიღებულია

გამოსახულება “ლენა”-სათვის. გარდაქმნის ინდექსის დამახინჯების მიმართ უმნიშვნელო მგრძნობიარობა ადასტურებს იმ მტკიცებულებას [37,69], რომ ეს გარდაქმნა შესაძლებელია გამოირიცხოს კოდირების პროცესიდან.

გამოსახულების გარჩევითუნარიანობა განისაზღვრება პიქსელების რაოდენობით სტრიქონებისა და სვეტების მიხედვით, რომელსაც შეიცავს გამოსახულება. გამოსახულებათა შეკუმშვის უნიკალურ თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ დეკოდირება არ არის დამოკიდებული გარჩევითუნარიანობაზე, ვინაიდან რანგულ ფაილში არსად არ არის შეტანილი საწყისი გამოსახულების ზომის შესახებ ინფორმაცია [37]. დეკოდირების პროცესში ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ ნებისმიერი ზომის აღდგენილი გამოსახულება, მიუხედავად კოდირებული გამოსახულების ზომისა. ეს უნიკალური თვისება იძლევა საშუალებას შეკუმშვის მწარმოებლობის უძლიერესი ამაღლების მიღებას. ამის ილუსტრაციისათვის, წარმოვიდგინოთ, რომ გვაქვს ნაცრისფერგრადაციების მქონე გამოსახულება, რომელიც შეიცავს 256×256 პიქსელების რაოდენობას, რომელსაც გააჩნია 256 ინტენსივობის შესაძლო გრადაცია. ეს გამოსახულება კოდირებულია 4000 რანგული ბლოკების მეშვეობით. თუ ჩავთვლით, რომ თითოეული რანგული ბლოკის დამახსოვრებას მოეთხოვება 4 ბაიტი, მაშინ კოდირებისათვის საჭირო იქნება მახსოვრობის 16 კბაიტი. შეკუმშვის კოეფიციენტი იქნება 4-ის ტოლი, ვინაიდან ფრაქტალური შეკუმშვის გარეშე გამოსახულებას დასჭირდებოდა 64 კბაიტი.

განვიხილოთ შემთხვევა, როცა დეკოდირების შედეგად მივიღეთ გამოსახულება, რომლის ზომები გახდა 1024×1024 პიქსელი. ამ შემთხვევაში შეკუმშვის კოეფიციენტი მიიღება 256-ის ტოლად., ვინაიდან ამ ზომის გამოსახულება მოითხოვს $1024 \times 1024 \times 256$ ანუ 1024 კბაიტის მახსოვრობას. ჩვენს მიერ „ლენა“ გამოსახულებაზე ჩატარებულმა ცდებმა დაადასტურა ზემოთ აღწერილი ეს უნიკალური თვისება, იმ შემთხვევაში როცა ავიღეთ გამოსახულება, რომელიც შეიცავდა 512×512 პიქსელებს, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ დისერტაციაში მოყვანილი ექსპერიმენტების შედეგები არ ითვალისწინებდნენ კოდირების ეფექტურობის ამაღლების ასეთ ხელოვნურ ხერხებს.

გარჩევითუნარიანობაზე დამოკიდებულებამ განაპირობა ფრაქტალური შეკუმშვის განხორციელება მორფოლოგიური პირამიდის წვეროსათვის, რაც განხილული იქნება დისერტაციის მესამე თავში.

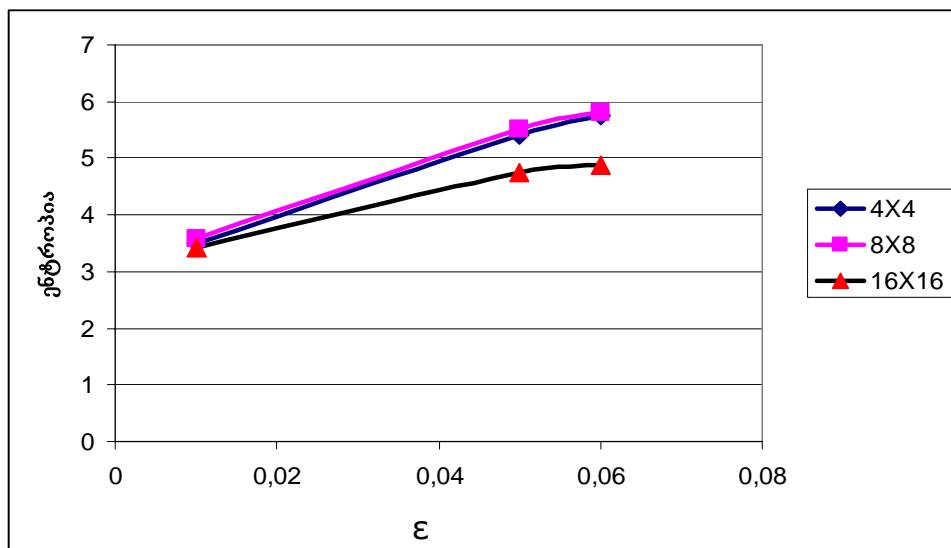
1.5.3 გამოსახულებათა ფრაქტალური აგების სტატისტიკური თვისებები

როგორც ავღნიშნეთ კოდირების ნებისმიერი მეთოდის გამოყენების დროს უნდა დადგინდეს ფრაქტალური ეფექტური კოდირებისას მიღებული გარდაქმნის შედეგის სტატისტიკური მახასიათებლები. სტატისტიკური მახასიათებლების ჩამონათვალში იგულისხმება: მათემატიკური ლოდინი, დისპერსია, ენტროპია, საშუალო გრადიენტი, კორელაციური ფუნქცია და პისტოგრამა.

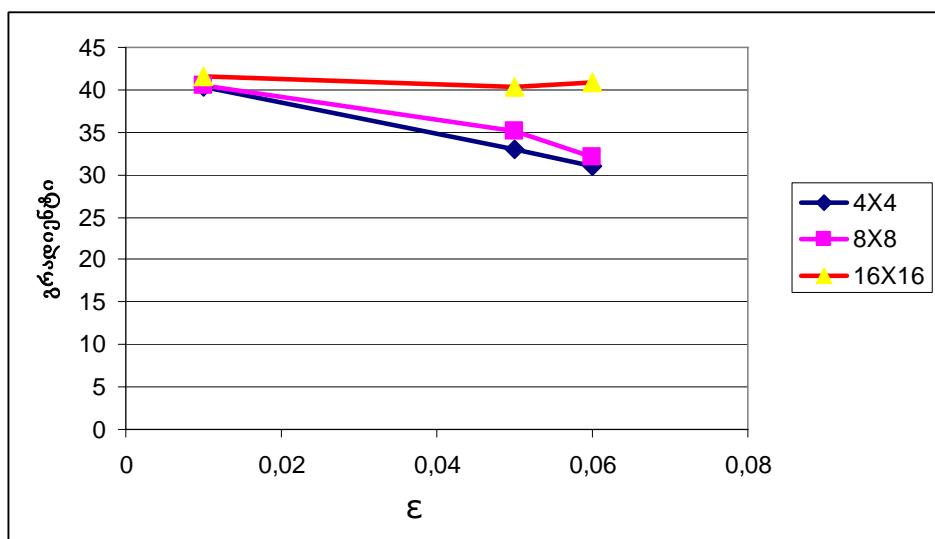
კვლევის ამოცანები, რომელიც საფუძვლად უდევს ფრაქტალური გამოსახულებების სტატისტიკურ ანალიზს შეიძლება შემდეგნაირად ჩამოვაყალიბოთ:

- გამოვიყვლიოთ სხვადასხვა ფრაქტალური გამოსახულებისათვის განსხვავებული დასაშვები ასახვის ცდომილების ე პირობებში სტატისტიკური მახასიათებლების: მათემატიკური ლოდინის, დისპერსიის, ენტროპიის და საშუალო გრადიენტის მნიშვნელობები;
- დავადგინოთ რამდენადაა დამოკიდებული სტატისტიკური მახასითებლების მნიშვნელობები დასაშვებ ცდომილებაზე და რაოდენობაზე;

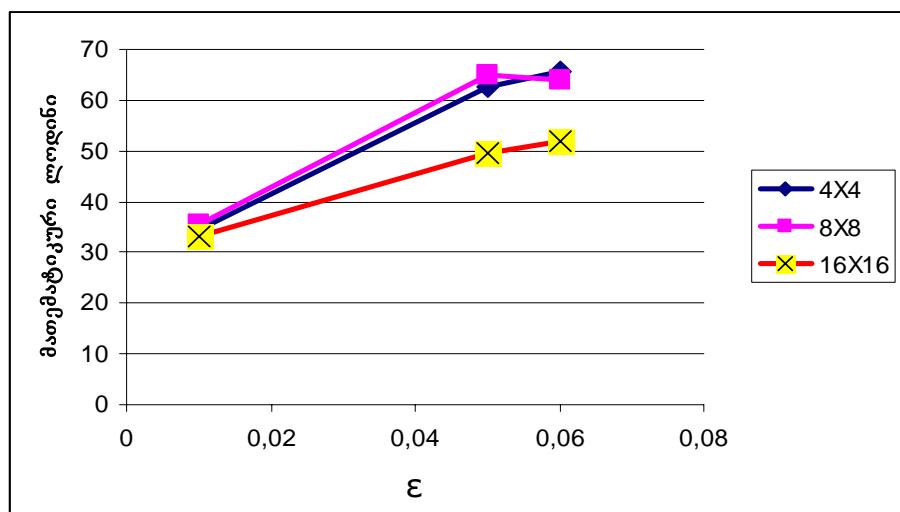
ექსპერიმენტი ჩატარებული იყო ორ გამოსახულებაზე „ლენა“ და „ვარდი“. ექსპერიმენტი გულისხმობდა ფიქსირებულ პირობებში, პროგრამის მიხედვით ფრაქტალური გარდაქმნის შედეგის (კვადრონების) მიღებას, როდესაც სავსებით განისაზღვრება რანგულ და დომენურ ბლოკებს შორის შესაბამისობა და თვით ეს მახასიათებლები. შედეგები ასახულია ცხრილში 1.5.3.1, შესაბამისი გრაფიკები მოცემულია ნახ. 1.5.3.1, 1.5.3.2, 1.5.3.3 1.5.3.4-ზე.



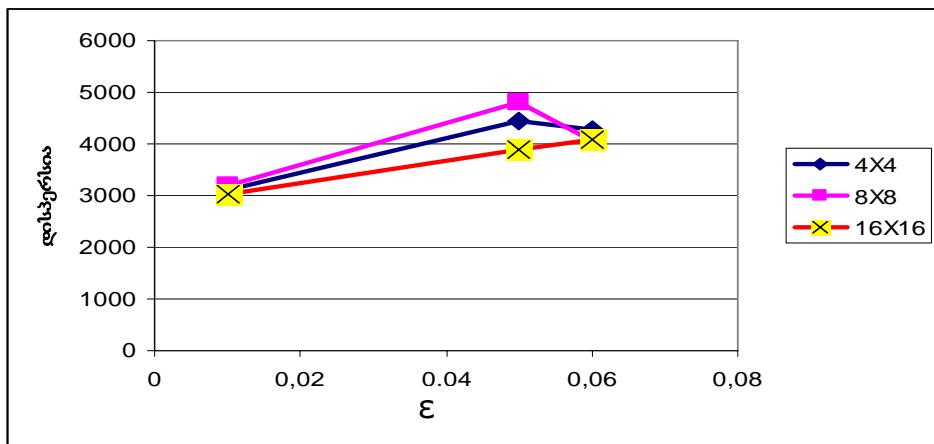
6აზ. 1.5.3.1



6აზ. 1.5.3.2



6აზ. 1.5.3.3



ნახ. 1.5.3.4

სტატისტიკური მახასიათებლების დამოკიდებულება დასაშვებ ცდომილებაზე გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „ვარდი“

ცხრილი 1.5.3.1 კუმშვადი ასახვის ცდომილების სტატისტიკური მახასიათებლებზე დამოკიდებულების ცხრილი გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „ვარდი“

გამოსახულება	დომენის რაოლენდის სტრიქნისა სახე	ε	მათემატიკური ლოდინი	დასკრინა	საშ. კიბურ. გაღიარა	გრადიენტი	ენერეტიკა
ლენა	4x4	0,05	62,52	4450	66,72	33	5,42
	8x8		65,1	4817	69,403	35,202	5,51
	16x16		49,43	3889	62,36	40,28	4,74
	4x4	0,06	65,49	4267	65,319	30,932	5,75
	8x8		63,81	4058	63,701	32,146	5,805
	16x16		51,996	4077	63,853	40,943	4,89
	4x4	0,01	34,41	3104	55,712	40,411	3,506
	8x8		35,64	3201	56,579	40,606	3,571
	16x16		32,992	3021	54,962	41,581	3,417
ვარდი	4x4	0,05	59,522	6392	79,95	52,07	4,146
	8x8		59,67	6439	80,244	52,251	4,139
	16x16		52,25	6009	77,515	56,4	3,746
	4x4	0,01	36,753	4680	68,407	59,446	2,913
	8x8		37,45	4794	69,23	59,27	2,932
	16x16		28,74	2484	49,838	38,281	3,242
	4x4	0,06	51,448	3022	54,977	29,52	5,22
	8x8		52,039	3065	55,36	30,949	5,28
	16x16		44,52	3051	55,236	36,018	4,625

მოცემული ცხრილის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ რაც უფრო ნაკლებია კუმშვადი ასახვის ცდომილება, მით უფრო ნაკლებია მათემატიკური ლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა, მაგრამ უფრო დიდია საშუალო გრადიუნტი. მაგალითად $0,01$ ცდომილების პირობებში მათემატიკური ლოდინი $43,41$ -ის ტოლია, ხოლო, $0,05$ მნიშვნელობისათვის ეს მაჩვენებელი უტოლდება $62,52$ -ს, ე.ი. გაიზარდა საშუალოდ $1,9$ -ჯერ, ასევე $0,06$ ცდომილების პირობებში საშუალო კვადრატული გადახრა $0,01$ -ის შესაბამის მნიშვნელობასთან შედარებით გაიზარდა $1,19$ -ჯერ.

ასევე რაც უფრო მეტია დონეების რაოდენობა, მით უფრო ნაკლებია ენტროპია, 4×4 -ის შემთხვევაში ენტროპიის მნიშვნელობა $5,42$ -ის ტოლია, მაშინ როცა იგივე პირობებში 16×16 ზომისათვის ენტროპიის მნიშვნელობა $4,74$ -ის ტოლი ხდება, მაშასადამე აქიდან ვასკვნით რომ, ენტროპია დამოკიდებულია ცდომილებაზე.

1.6. გამოსახულებათა ფრაქტალური კუმშვადი ასახვის თეორემის ექსპერიმენტული ინტერპრეტაცია და რეალიზაცია

მათემატიკურ დებულებას, რომელიც უნდა შემოწმებულიყო ექსპერიმენტულად ნაცრისფერი გრადაციის გამოსახულებისათვის წარმოადგენს კოლაჟის თეორემა. ჩვენ შევეცადეთ, რომ ექსპერიმენტულად მიგვეღო კოლაჟის თეორემის ექსპერიმენტული დადასტურება. ამ პარაგრაფში ჩვენ შევეცადეთ ესპერიმენტით შეგვემოწმებინა ეს თეორიული შედეგი. მაშასადამე ჩვენ გვინდა ექსპერიმენტულად შევამოწმოთ (1.4.2) გამოსახულება მისი პრაქტიკული რეალიზაციის დროს.

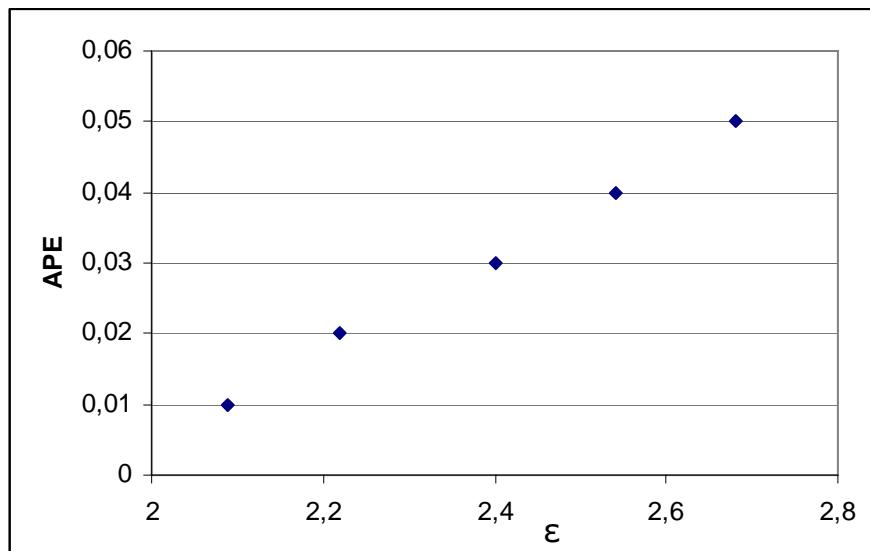
პირველი ექსპერიმენტი ეხებოდა გამოსახულების ფრაქტალურ კოდირებას, ჩატარებულს გამოსახულება „ლენა“-სთვის. გამოვიყენეთ მზა პროგრამა, დაწერილი C^{++} ენაზე, რომლითაც ვსარგებლობდით გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების კვლევის დროს (იხილე მესამე თავი).

დომენების რაოდენობა გამოსახულებათა სტრიქონზე და სვეტის მიხედვით ტოლი იყო 16×16 . ე ცდომილება, რომლის შინარსი ახსნილია 1.4. პარაგრაფში (რასაც ითვალისწინებდა პროგრამა), იცვლებოდა $0,01$ - $0,05$ -მდე.

f საწყის და აღდგენილ (f_w) გამოსახულებას შორის „მანძილად“ (ცდომილებად) გამოვიყენეთ „საშუალო აბსოლუტური ცდომილება“ APE, რომელიც გამოითვლებოდა გამოსახულებისთვის “ვარდი”, შეკუმშვის კოეფიციენტი k ტოლი იყო 6, საიდანაც გამომდინარეობდა, რომ კუმშვადი ასახვის კოეფიციენტი ტოლი იყო 1/6.

$$\text{მიღებული შედეგებია: } APE := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.02 \\ 0.03 \\ 0.04 \\ 0.05 \end{pmatrix} \quad \varepsilon := \begin{pmatrix} 2.08 \\ 2.22 \\ 2.40 \\ 2.54 \\ 2.68 \end{pmatrix}$$

ნახ. 1.6.1-ზე მოცემულია შესაბამისი გრაფიკი, სადაც ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია ექსპერიმენტით მიღებული APE ცდომილება, მოცემული %, ხოლო აბცისთა ღერძზე კი – კუმშვადი ასახვის დროს დასაშვები მნიშვნელობა ε . მიღებული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ε გაზრდა იწვევს აღდგენის ცდომილების გაზრდას, რაც ლოგიკურად სავსებით გასაგებია.



ნახ.1.6.1

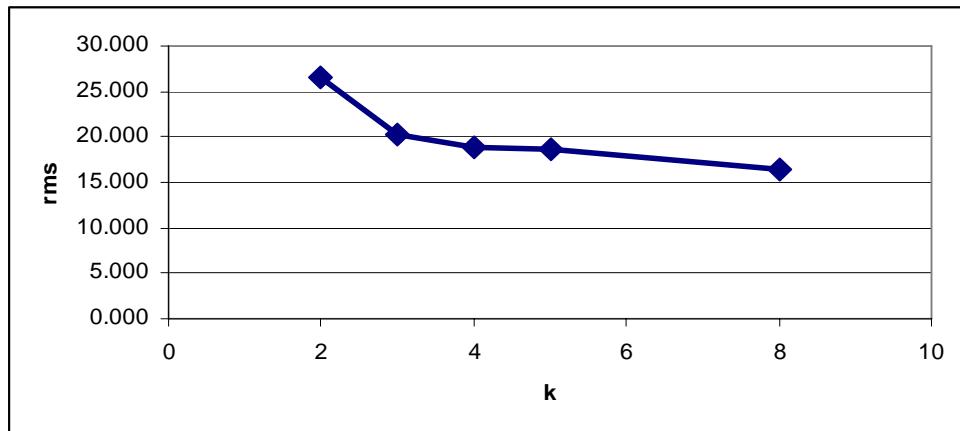
მეორე ტიპის ექსპერიმენტის დროს ჩვენ თავიდანვე ვცვლილით კუმშვადი ასახვის კოეფიციენტს. კერძოდ $s=1/k$, $s= 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/8$. k - შეკუმშვის კოეფიციენტია. ε პირობითად ჩავთვალეთ 1-ის ტოლად, ხოლო აღდგენის ცდომილება განისაზღვრებოდა საშუალო კვადრატული ცდომილებით.

$$rms := \sqrt{\frac{1}{256 \cdot 256} \cdot \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (a_{i,j} - n_{i,j})^2} \quad (1.6.1.)$$

სადაც a -აღდგენილი გამოსახულებაა, ხოლო n -საწყისი გამოსახულება. მიღებული შედეგები ასახულია ცხრილში (1.6.1.) და ნახაზზე (1.6.2.).

ცხრილი 1.6.1

k	ს.ჭ.ც
2	26,577
3	20,209
4	18,890
5	18,656
8	16,340



ნახ.1.6.2

მიღებული შედეგები ისევ ადასტურებს კოლაჟის თეორემის სისწორეს, ვინაიდან რაც უფრო დიდია შეკუმშვის კოეფიციენტი, მით უფრო ნაკლებია საშუალო კვადრატული ცდომილება. უნდა აღინიშნოს, რომ შეკუმშვის კოეფიციენტის ქვეშ იგულისხმება სიდიდე, რომელიც კუმშვადი ასახვის კოეფიციენტის უკუპროპორციულია და არა ის შეკუმშვის კოეფიციენტი, რომელიც განაპირობებს კოდირების ეფექტურობას (იხილე მესამე თავი).

მიღებული შედეგების საფუძველზე შეიძლება დაგასკვნათ:

- 1) პირველი ექსპერიმენტის დროს მიღებული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ რაც უფრო დიდია ϵ , მით უფრო დიდია შესაბამისი APE, რაც კიდევ ერთხელ კოლაჟის თეორემის დადასტურებას წარმოადგენს;
- 2) რაც უფრო დიდია k , მით უფრო მცირეა აღდგენის ცდომილება;
- 3) დასტურდება კოლაჟის თეორემა;

(შედეგები მიღებულია ტესტური გამოსახულებისათვის “ვარდი”)

1.7 გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდით კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობა

გამოსახულებათ ფრაქტალური კოდირების ნებისმიერი მეთოდი გულისხმობს გამოსახულებაში დომენური და რანგული ბლოკების სისტემის შექმნას. *f* გამოსახულება იყოფა არაგადამფარავ რანგული ბლოკებს წინასწარ მოცემულ რაოდენობად და ამავე დროს განისაზღვრება დომენური ბლოკების სიმრავლე, თითოეული რანგული ბლოკისათვის კოდირების ალგორითმი პოულობს დომენების სიმრავლიდან ისეთ დომენს, რომელიც მასზე ჩატარებული აფინური გარდაქმნების შედეგად, გადაიყვანს მას განხილულ რანგულ ბლოკში მათ შორის საუკეთესო მსგავსების თვალსაზრისით. ყველა რანგული ბლოკისათვის ამ პროცედურის ჩატარების შედეგად *f* გამოსახულება აისახება „კოდების“ სტრუქტურად. კოდი – ეს არის ჩამონათვალი, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას თითოეულ რანგულ ბლოკზე, სახელდობრ: რანგული ბლოკის მდებარეობას, მოცემულს იმ დომენის ინდექსით, რომელიც აისახა ამ რანგულ ბლოკში და აფინური გარდაქმნის პარამეტრების მნიშვნელობებს, რომლებიც აღწერენ დომენური ბლოკის რანგულ ბლოკად ასახვას. კოდირებული გამოსახულების კავშირის არხით გადაცემისას ძალიან მნიშვნელოვნია, რომ კოდირებული ინფორმაცია გადაეცეს სწორად, შეცდომების გარეშე. რეალურ კავშირგაბმულობის არხში ყოველთვის არსებობენ შეცდომები, ამა თუ იმ ალბათობით. ნებისმიერი შეცდომა დაამახინჯებს დეკოდირებულ ინფორმაციას და მაშასადამე უარყოფითად იმოქმედებენ გადაცემის პროცესის საიმედოობაზე. ამასთან დაკავშირებით საჭირო იყო კვლევა, რომლის შედეგად გავიგებდით, თუ როგორ დაეცემოდა სიგნალ ხმაურის პიკური მნიშვნელობა სხპფ, როცა ადგილი ექნებოდა შეცდომების გარკვეული პროცენტის ზემოქმედებას გადასაცემ ინფორმაციაზე კოდირებული გამოსახულების შესახებ ექსპერიმენტი გულისხმობდა:

- დომენების ინდექსების განზრახ დამახინჯებას გარკვეული პროცენტით:
5, 15, 20%;

2. დომენის რანგულ ბლოკად გარდაქმნის ინდექსის დამახინჯებას იგივე პროცენტით;
ექსპერიმენტი ჩატარებული იყო გამოსაზულებებზე, რომლებიც
მოყვანილია 1.7.1 და 1.7.2 ცხრილებში.

ცხრილი 1.7.1 დომენების ინდექსის დამახინჯებისას მიღებული შედეგები

სურათი	შეცდომების პროცენტული რაოდენობა	5%	10%	15%	20%
Winter	სხვა	17.929	16.856	16.023	15.348
Rose	სხვა	22.358	21.835	21.530	20.871
Lena	სხვა	21.198	18.308	17.611	16.793
Leaves	სხვა	20.117	18.391	17.1605	16.746

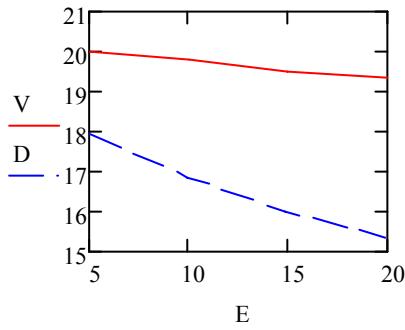
ცხრილი 1.7.2 გარდაქმნის ინდექსის დამახინჯებისას მიღებული შედეგები

სურათი	შეცდომების პროცენტული რაოდენობა	5%	10%	15%	20%
Winter	სხვა	20.010	19.807	19.491	19.343
Rose	სხვა	23.803	23.603	23.314	23.241
Lena	სხვა	24.553	23.776	23.686	23.191
Leaves	სხვა	20.087	19.679	19.615	19.299

ზედა ცხრილი შექსაბამება შედეგებს, მიღებულს დომენების ინდექსის დამახინჯებით, ხოლო მეორე კი როცა მახინჯდებოდა გარდაქმნის ოპერაციის ინდექსი. ცხრილის მიხედვით შედეგებილია გრაფიკი, რომელიც ასახავს სხვა დამოკიდებულებას დამახინჯებაზე როგორც დომენების ინდექსში, ასევე გარდაქმნის ინდექსში.

$$V := \begin{pmatrix} 20.0107 \\ 19.8078 \\ 19.49 \\ 19.343 \end{pmatrix} \quad E := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{pmatrix} \quad D := \begin{pmatrix} 17.929 \\ 16.856 \\ 16.023 \\ 15.348 \end{pmatrix}$$

ეს არის საიმუდოობის ცხრილების შესაბამისი გრაფიკები:



მიღებული გრაფიკის ანალიზის შედეგად შეიძლება დავასკვნათ:

1. სხპფ მნიშვნელობა უფრო მკვეთრად მცირდება დომენის ინდექსის დამახინჯების პროცენტული რაოდენობის გაზრდისას, ვიდრე მაშინ როცა შეცდომების პროცენტული რაოდენობა მოქმედებს გარდაქმნის ინდექსზე;
2. პირველი პუნქტის შესაბამისად პირველ რიგში უნდა დაცული იყოს მონაცემები, რომლებიც დაკავშირებულია დომენის ნომერთან;

მიღებული შედეგები შეიძლება მივიჩნიოთ, როგორც დადასტურება იმისა თუ როგორ შემთხვევაში შესაძლებელია რომ აფინური გარდაქმნები (მობრუნება, არეკვლა) საერთოდ გამოირიცხოს კოდირების პროცესიდან [41,42,43,46].

შემდგომი ექსპერიმენტები შეეხებოდა დომინური ინდექსების დამახინჯების შედეგად მიმღებში მიღებული გამოსახულების ფილტრაციას წრფივი და არაწრფივი სახის ფილტრების გამოყენებით. დისერტაციაში მოყვანილია შედეგები, რომელიც მიეკუთვნება ვეივლეტ-ფილტრების და მედიანური [37] ფილტრების გამოყენების შედეგებს.

მიღებული შედეგები ცხადყოფს, რომ მიუხედავად ვეივლეტ და მედიანური ფილტრების გაფილტვრის უნარისა ამ ფილტრების გამოყენებამ ვერ უზრუნველყო დაზიანებების აღმოფხვრა და შემცირებაც კი. ჩვენის აზრით ეს გამოწვეულია იმით, რომ ფილტრები ახშობენ იმპულსური სახის შემთხვევით ხმაურს (შეცდომებს), ხოლო როცა დამახინჯება არ ატარებს იმპულსურ ხასიათს და ვრცელდება რანგული ბლოკის ზომაზე ფილტრაციის და გასაშუალოების უნარი დაიყვანება ნულამდე, რაც შეეხება ინფორმაციის დაცვას დამახინჯებებისაგან ფრაქტალური კოდირების შემთხვევაში, მიგვაჩნია მიზანშოწონილად დაბრკოლებათა მიმართ მდგრადი კოდირების გამოყენება, კერძოდ კი ჰემინგის კოდის რეალიზაცია **MathCad** პროგრამაში. ამ საკითხს ადგილი დაეთმობა მე-4 თავში, რომელიც

მიძღვნილია JPEG ტიპის ახალი სტანდარტის შექმნას, რომელიც დაფუძნებულია გამოსახულებათა შეგუმშვის ფრაქტალურ მეთოდზე.

ნახ. 1.7.1-ზე მოცემული დეკოდირებული გამოსახულება შეუსაბამება შემთხვევას როცა ფრაქტალურად კოდირებული გადასაცემი ინფორმაციაში დამახინჯდა დომენების ნომერი 10%-ის ოდენტით. ჩვენ ვცალეთ მიღებული დამახინჯებების აღმოხვრა ფილტრაციის განხორციელების მეშვეობით. განვიხილეთ ვეივლეტ ფილტრების, მედიანური ფილტრების და გასაშუალოებითი ფილტრების გამოყენება. ქვემოთ არის მოცემული შედეგები:

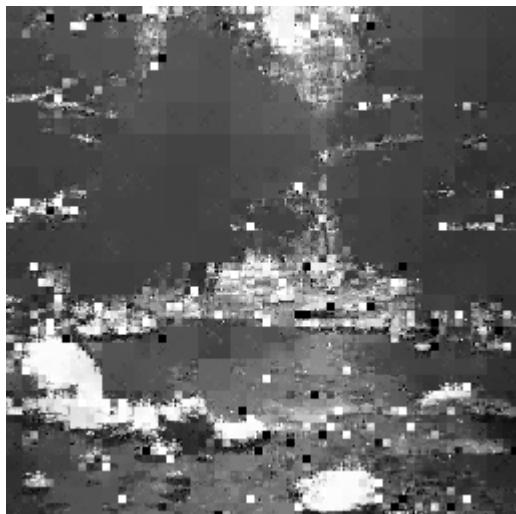
```
M := READ_IMAGE("bridge.bmp")
```

```
i := 0 .. rows(M) - 1
```

```
j := 0 .. cols(M) - 1
```

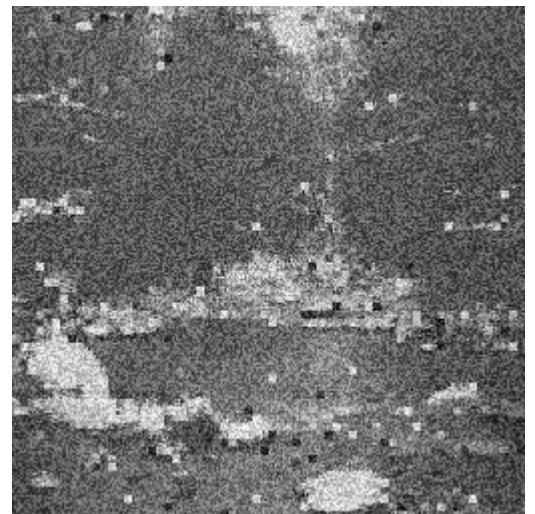
```
noisei,j := 150
```

→
N := M + rnd(noise)



M

ნახ. 1.7.1 ა



scale(N, 0, 255)

ნახ. 1.7.1 ბ

აქ ნაჩვენებია თუ როგორ ხდება ვეივლეტ ფილტრაცია, დამახინჯებული გამოსახულების ფილტრაცია. thresh – ეს არის ის საზღვარი, რომელიც გვიჩვენებს თუ რა მნიშვნელობას უნდა აღემატებოდეს ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, რომ ის არ გაუტოლდეს ნულს:

```
Q := wave2d(N, 7)
```

```
thresh := 40
```

$$\eta(\text{coeff}, \text{thresh}) = \text{sign}(\text{coeff}) \cdot \min(|\text{coeff}| - \text{thresh}, 0)$$

MathCad პროგრამაში ეს ოპერაცია ჩაიწერება ვექტორიზაციის ოპერატორის საშუალებით. ის მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\text{temp} := \overbrace{(2 \cdot \Phi(Q) - 1) \cdot (|Q| - \text{thresh}) \cdot (|Q| > \text{thresh})}^{\rightarrow}$$

Φ არის ერთეულოვანი ნახტომის ფუნქცია. შემდეგში ხდება საწყისი გამოსახულების აღდგენა, რომელიც ხორციელდება *iwave2d(temp, 7)* ფუნქციის საშუალებით: $\text{recons} := \text{iwave2d}(\text{temp}, 7)$

ვევლებ ფილტრაციის შემდეგ მიღებული გამოსახულება მოცემულია ნახ. 1.7.2-ზე:



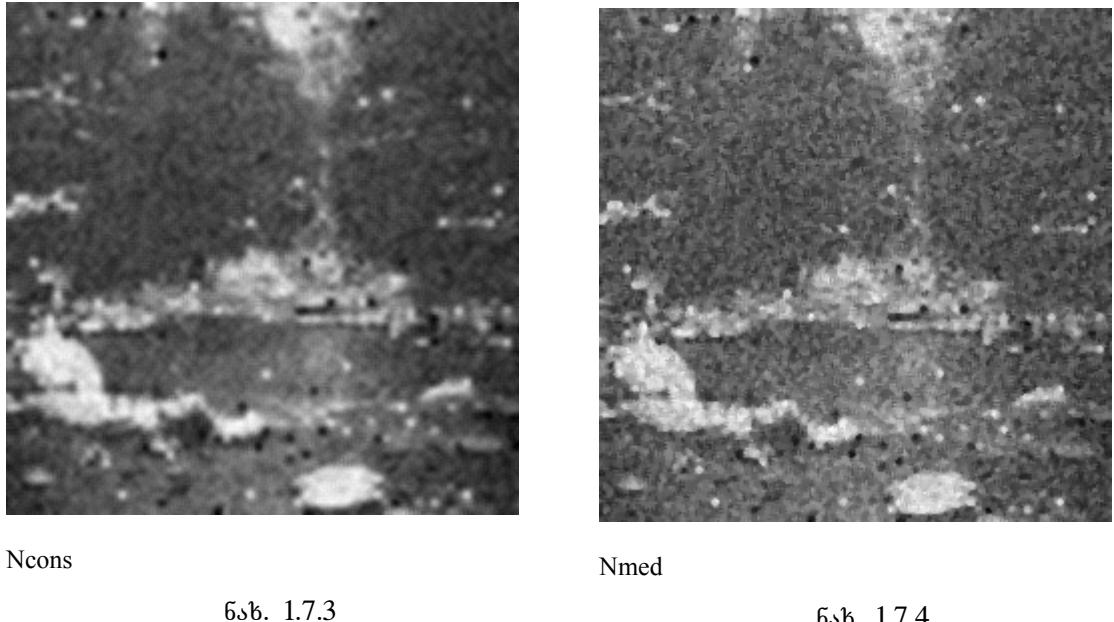
`scale(recons, 0, 255)`

ნახ. 1.7.2

მიღებული გამოსახულება „`recons`“ ცხადყოფს, რომ ვევლებ გაფილტვრა ვერ ფილტრავს იმ დამახინჯებას, რომელიც გამოწვეულია დომენის ნომრის დამახინჯებისას.

შემდეგ ეტაპზე ჩვენ მოვახდინეთ დამახინჯებული გამოსახულების ფილტრაცია „გასაშუალოების“ ფილტრით. შედეგი მოცემულია 1.7.3 ნახაზზე.

`Ncons := scale(orthosmooth5(N), 0, 255)`



ამ შემთხვევაში ჩვენ ვერ მივიღეთ სასურველი შედეგი დამახინჯების აღმოფხვრის თვალსაზრისით. შედარებისთვის ჩვენ მოვახდინეთ ამავე გამოსახულების ფილტრაცია მედიანური ფილტრის საშუალებით.

$N_{\text{med}} := \text{scale}(\text{medfilt}(N), 0, 255)$

მიღებული შედეგების საფუძველზე შეიძლება დაგასკვნათ, რომ დომენების ნომრით შემთხვევითად მიღებული დამახინჯებები არ ექვემდებარებიან ნებისმიერი სახის ფილტრაციას.

1.8 პირველი თავის დასკვნები

1. გარკვეულია, რომ უნივერსალურ ფრაქტალურ მეთოდად შეიძლება ჩაითვალოს კუმშვადი ასახვის სპეციალური მეთოდი იტერაციულ ფუნქციათა სისტემა (*IFS*), რომელიც განიცდის ტრანსფორმირებას უბან-უბან იტერაციულ ფუნქციათა სისტემად (*PIFS*), როცა ხორციელდება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირება.

2. დადგენილია, რომ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის პრობლემაში და შესაბამისად კომპიუტერული ალგორითმის შემუშავების დროს უნდა გამოვყოთ ორი ძირითადი განსხვავებული მიმართულება: ფრაქტალურ

გამოსახულებათა გენერირება (სინთეზი) და გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირება. ფრაქტალურ გამოსახულებათა შექმნისათვის შესაბამისი კომპიუტერული ალგორითმის შედგენის დროს ვისარგებლეთ ფრაქტალების გლობალური მსგავსების თვისებით, მაშინ, როდესაც გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირებისათვის ვიწელმძღვანელეთ ლოკალური მსგავსებით და ასე შევიმუშავეთ შესაბამისი ალგორითმები.

3. გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალურ მეთოდებისაგან ყველაზე უნივერსალურს წარმოადგენს *IFS* მეთოდი, რომელიც გამოიყენება ფრაქტალურ გამოსახულებათა ატრაქტორის გენერირებისათვის და რომლისთვისაც სამართლიანია კოლაჟის თეორემა. *IFS* სისტემის ატრაქტორი (ფრაქტალური გამოსახულება) მიიღება *IFS* მრავალჯერადი იტერაციით, იტერაციების რაოდენობა აღწევს 1000-3000-ს ($>1000-3000$).

IFS მეთოდი განიცდის ტრანსფორმაციას *PIFS* სისტემად, როცა მას იყენებენ გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირებისათვის. ამ შემთხვევაში მრავალრიცხოვანი იტერაციების ნაცვლად, რომელიც სრულდება მოცემული გამოსახულებისათვის, უნდა მოიძებნოს ისეთი ასახვა – ალგორითმი, რომლის ერთჯერადი გამოყენება უზრუნველყოფს სასურველ გამოსახულებასთან მიახლოებული კოპიის მიღებას.

4. მიღებულია გამოსახულების კუმშვადი ასახვის თეორემის ექსპერიმენტული დამტკიცება, რომელიც გულისხმობს ორი მირითადი პარამეტრის ცვლილებას. ეს პარამეტრებია: ასახვის ცდომილებისა (ε) და შეკუმშვის კოეფიციენტი (k). დადგენილია, რომ:

ა) რაც უფრო ნაკლებია გარდაქმნის (ასახვის) ცდომილება, მით უფრო ნაკლებია აღდგნილი გამოსახულების სიზუსტის რიცვითი მაჩვენებელი *APE* (ცდომილების საშუალო მოდული).

ბ) რაც უფრო დიდია ასახვის შეკუმშვის კოეფიციენტი, მით უფრო დიდია აღდგნილი გამოსახულების ცდომილება;

ორივე შედეგი ადასტურებს კოლაჟის თეორემის სამართლიანობას. თეორიულად და ექსპერიმენტულად დასტურდება აგრეთვე ფრაქტალური მეთოდის გამოყენების მიზანშეწონილობა, როგორც ფრაქტალური გამოსახულების სინთეზისათვის, ასევე გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირებისათვის.

5. მიღებულია, რომ გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობა განისაზღვრება შეკუმშვის კოეფიციენტის რაოდენობრივი მაჩვენებლების მიხედვით, დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხის შეფასების აუცილებელი გათვალისწინებით. აღდგენილი გამოსახულების ხარისხი ფასდება სიზუსტის მაჩვენებლებით, რომელიც შეესაბამება ფუნქციათა აპროქსიმაციის თეორიას. ეს მაჩვენებლებია საშუალო კვადრატული გადახრა, საშუალო კვადრატული გადახრის ნორმირებული მნიშვნელობა, გადახრის საშუალო მოდული და აგრეთვე ტექნიკაში გამოყენებული სიგნალ-ხმაურის პიკური ფარდობა.

6. გამოკვლეულია გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება კოდირების განმსაზღვრელ ძირითად მახასიათებლებზე; კერძოდ საწყისი გამოსახულების სახეობაზე, დომენური ბლოკების რაოდენობაზე, დომენური ბლოკების რანგულ ბლოკებთან სიახლოვის დასაშვებ ცდომილებაზე, რანგული ბლოკების რაოდენობაზე, კოდის გადაცემის საიმედოობაზე. ექსპერიმენტულად დადასტურებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნივერსალური თავისებურება: აღდგენილი გამოსახულების ხარისხი არ არის დამოკიდებული დეკოდირებისას პირველი იტერაციის შესასრულებლად შერჩეული გამოსახულების სახეზე და მის ზომაზე (გარჩევითუნარიანობაზე). სასტარტო გამოსახულების გარჩევითუნარიანობაზე დამოუკიდებლობის თვისება გამოყენებულია ფრაქტალური კოდირების მორფოლოგიურ პირამიდულ აგებებთან შერწყმის დროს.

7. ფრაქტალური გარდაქმნის შედეგად მიღებული გამოსახულებების სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრით ნაჩვენებია, რომ რაც უფრო ნაკლებია კუმშვადი ასახვის დასაშვები ცდომილება (ε), გარდაქმნილ დომენურ ბლოკსა და შესაბამის რანგულ ბლოკს შორის, მით უფრო ნაკლებია გამოსახულების პიქსელების მათემატიკური ლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა, მაგრამ უფრო დიდია საშუალო გრადიენტი, ენტროპია კი მცირდება ცდომილების შემცირებასთან ერთად. მაგალითად, 0,01 ცდომილების პირობებში მათემატიკური ლოდინი 43,41-ის ჭოლია, ხოლო 0,05 დროს კი ის უდრის 62,55. ასევე რაც უფრო მეტია დომენების რაოდენობა მით უფრო დიდ მნიშვნელობას ღებულობს ენტროპია.

გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ექსპერიმენტულმა გამოკვლევაზე გვიჩვენა:

- ა) გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობა დამოკიდებულია გამოსახულების სახეობაზე;
- ბ) გამოსახულების აღდგენის სიზუსტის მაჩვენებლები არ არის დამოკიდებული დომენური ბლოკების რაოდენობაზე და მათ ფორმაზე, მაგრამ მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული დომენური ბლოკის რანგული ბლოკის “მსგავსების” დასაშვებ ცდომილებაზე;
- გ) კოდირების ეფექტურობას ძირითადად განაპირობებს რანგული ბლოკების რაოდენობა სხვა განმსაზღვრული პარამეტრების მუდმივობის პირობებში;
- დ) კოდირებული გამოსახულების საიმედოობა, რომელიც მოცემულია დეკოდირების სხაფ-ის დამოკიდებულებით გარდაქმნათა ინდექსების დამახინჯების პროცენტულ რაოდენობაზე, გვიჩვენებს, რომ შეცდომები გარდაქმნათა სახეობაზე თითქმის არ ახდენს გავლენას დეკოდირების ხარისხზე, მაშინ როდესაც ცდომილება დომენის ინდექსში იწვევს დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხის დამახინჯებას;
- ე) შესაძლებელია დეკოდირებული გამოსახულების ზომის გაზრდა (რაც გამოიწვევს შეკუმშვის კოეფიციენტის გადიდებას). ვინაიდან გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნიკალური თვისებაა, რომ დეკოდირება არ არის დამოკიდებული გარჩევისუნარიანობაზე;

თავი 2. გამოსახულებათა კოდირების სხვადასხვა ტექნოლოგიების კვლევა მათი ფრაქტალურ შეკუმშვასთან კომბინირების მიზნით

2.1 კვლევის ამოცანები

გამოსახულებათა შეკუმშვის უახლეს მეთოდებს მიეკუთვნება ფრაქტალური მეთოდები, რომლებიც ამჟამად მიჩნეულია როგორც უაღრესად პერსპექტიული, განვითარებადი და ოპტიმალური მეთოდი შეკუმშვის მაქსიმალური კოეფიციენტის მიღების თვალსაზრისით, აღდგენილი გამოსახულების საკმაოდ მაღალი ხარისხის პირობებში [34,44,37]. გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლების

თვალსაზრისით, საინტერესოა ამ მეთოდების სხვა აღიარებულ ალგორითმებთან კომბინირება და ერთობლივი გამოყენება. გამოსახულებათა კოდირების ცნობილ მეთოდებს მიეკუთვნებიან პირამიდული კოდირების მეთოდები მორფოლოგიური და ვერცხლებული ფუნქციების აგებებით, დისკრეტული, ფურიე და ვეივლებული გარდაქმნები. დიფერენციალური კოდურ იმპულსური მოდულაცია ანუ გარდაქმნა წინასწარმეტყველებით, კადრთაშორისი დროითი ინტერპოლაცია (როცა კოდირებას ექვემდებარება გამოსახულებათა მიმდევრობა). დისერტაციის მეორე თავში ჩვენი მიზანია დავადგინოთ რამდენად შესაძლებელია ყველა ამ ალგორითმების რეალიზაცია **MathCad** პროგრამულ პაკეტში და მათი ურთიერთ შესაბამისობა ერთობლივი გამოყენების თვალსაზრისით. **MathCad** პროგრამა შევარჩიეთ იმის გამო, რომ მასში შედარებით მარტივად ხდება მრავალი სამეცნიერო და ტექნიკური ამოცანების გადაწყვეტა. ამ პროგრამაში შემოთავაზებულია მზა სტანდარტული ფუნქციები, რომლის მეშვეობით შესაძლებელია ფერადი და ნაცრისფერგრადაციების მქონე გამოსახულების კომპიუტერული დამუშავება. ზემოლნიშნულის გათვალისწინებით მეორე თავის კვლევის ამოცანები შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ შემდეგნაირად: აღვწეროთ მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციები და მათი რეალიზაციები **MathCad** პროგრამის გამოყენებით და მათი მეშვეობით მოვახდინოთ მორფოლოგიური პირამიდის აგება; ჩავატაროთ გამოსახულებათა შეკუმშვის ვერცხლების ფუნქციების ანალიზი, რომელიც მოიცავს ვეივლებული ფუნქციების საშუალებით, მრავალმასშტაბურ ვეივლებული ფუნქციების ალგორითმის დამუშავებას პირამიდული კოდირების შექმნის მიზნით შევასრულოთ შეცდომებიანი გამოსახულების ფილტრაცია ვეივლებული და სხვა ფილტრების საფუძველზე, განვიხილოთ დინამიკურ გამოსახულებათა დროითი ინტერპოლაციის საკითხები განხილვა ინფორმაციის შეკუმშვის განხორციელების შესაძლებლობების მიზნით, წინასწარმეტყველების მეთოდის რეალიზაცია წრფივი და არაწრფივი წინასწარმეტყველების ელემენტით.

2.2. მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციები და მათი შესაძლებლობა პირამიდული აგებისათვის

ძირითადი მორფოლოგიური ოპერაციების განსაზღვრისათვის განვიხილოთ ორგანზომილებიანი სივრცე E^2 , რომელიც ნაწილობრივ დაფარულია x სიმრავლით ($x \subseteq E^2$). ვთქვათ $B \subseteq E^2$ რომელიდაც მარტივი ფორმის, მცირე სიდიდის სიმრავლეა. B სიმრავლეს ვუწოდოთ მასტრუქტურიზებელი ელემენტი. დავუშვათ, რომ $x + b = \{x + b \mid x \in X\}$, სადაც x -ით აღნიშნულია X სიმრავლის ელემენტი, ხოლო b -თი – B სიმრავლის ელემენტი. \hat{B} -თი აღვნიშნოთ არეკლილი მასტრუქტურიზებელი ელემენტი, რომელიც შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$\hat{B} = \{-b \mid b \in B\}.$$

მათემატიკური მორფოლოგიით სიმრავლეთა დამუშავების ძირითადი ოპერაციებია: “erosion” \ominus და “dilation” \oplus . X -ისა და B -ს მეშვეობით ეს ოპერაციები ჩვენ შევიძლია განვსაზღვროთ:

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} x + b = \{x + b \mid x \in X, b \in B\}, \quad (2.2.1)$$

$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} x - b = \bigcap_{b \in B} X_{-b}, \quad (2.2.2)$$

ამ განსაზღვრებიდან გამომდინარე, ოპერაცია “dilation” არეკლილი ელემენტის მეშვეობით შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$X \oplus B = \{z \mid (b + z) \cap X \neq \emptyset\}$$

სადაც \emptyset ცარიელი სიმრავლეა, შესაბამისად ოპერაცია “dilation”-ის შედეგ მიიღება არაცარიელი სიმრავლე, რომელიც შედგება X -ისა და არეკლილი მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ერთობლიობისაგან. ანალოგიურად ოპერაცია “erosion”-ის შედეგი წარმოვადგენს ელემენტების ისეთ სიმრავლეს, როგორებსაც შეიცავს მასტრუქტურიზებელი ელემენტი \hat{B} , რომელსაც შეიცავს X სიმრავლე. დანარჩენი ორი ოპერაცია “opening” \circ და “closing” \bullet შეიძლება წარმოდგენილი იყოს “dilation” და “erosion” ოპერაციების მიმდევრობით:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (2.2.3)$$

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B \quad (2.2.4)$$

ოპერაციების მოქმედების თვალსაჩინოებისათვის განვიხილოთ მაგალითი:
ვთქვათ მოცემულია X და B სიმრავლეები:

$$X = \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (2,1), (3,1), (4,1), (5,1)\}; \quad B = \{(0,0), (0,1)\}.$$

განვსაზღვროთ “dilation” იაპერაციის შედეგი: რადგან B ელემენტს გააჩნია ორი მნიშვნელობა კოორდინატებით $(0,0)$ და $(0,1)$, ამიტომ განვსაზღვროთ ორი სიმრავლე $X_{(0,0)}$ და $X_{(0,1)}$ და მათი გაერთიანება: რადგან $X \oplus B = X_{(0,0)} \cup X_{(0,1)}$;
და $X_{(0,0)} \equiv X$;

$$X_{(0,1)} = \{(1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (2,2), (3,2), (4,2), (5,2)\}$$

$$X \oplus B = X_{(0,0)} + X_{(0,1)} =$$

$$= \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2), (4,1), (4,2), (5,1), (5,2)\};$$

X სიმრავლის B მასტრუქტურიზებელი ელემენტით გამოთვლისათვის ოპერაცია “erizion”–ის მეშვეობით, გამოვიყენოთ (2.2.2) გამოსახულება, საიდანაც გამომდინარეობს, რომ აუცილებელია გამოვითვალოთ $X_{-(0,0)}$ და $X_{-(0,1)}$, რადგან $X \ominus B = X_{-(0,0)} \cap X_{-(0,1)}$, $X_{-(0,0)} = X$

$$X_{-(0,1)} = \{(-1,1), (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (2,0), (3,0), (4,0), (5,0)\}$$

$$X \ominus B = X_{-(0,0)} \cap X_{-(0,1)} = \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4)\} \quad (2.2.5)$$

ე.ო. $X \ominus B$ – შეესაბამება იმ ელემენტების კოორდინატებს, რომლებიც საერთოა როგორც X სიმრავლისათვის ასევე $X_{-(0,1)}$ სიმრავლისათვის. მოყვანილი მარტივი მაგალითებით ჩვენ შეგვიძლია დავრწმუნდეთ, რომ ოპერაცია “erosion”–ი ამცირებს X სიმრავლის ელემენტების რაოდენობას, ხოლო ოპერაცია “dilation” – ამცირებს იგივე სიმრავლის ელემენტების რაოდენობას.

ეხლა განვიხილოთ ოპერაცია “opening”–ი იგივე B მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ზემოქმედებისა X სიმრავლეზე. (2.2.3) გამოსახულების თანახმად:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B = (X \ominus B)_{(0,0)} \cup (X \ominus B)_{(0,1)} = (X \ominus B) \oplus B$$

$$(X \ominus B)_{(0,0)} = X \ominus B$$

$$\text{რადგან } X \ominus B = \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4)\}$$

$$(X \ominus B)_{(0,1)} = \{(1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5)\}$$

$$(X \ominus B)_{(0,0)} = \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4)\}$$

$$\begin{aligned} (X \ominus B)_{(0,0)} \cup (X \ominus B)_{(0,1)} &= \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4)\} \cup \{(1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5)\} = \\ &= \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5)\}. \end{aligned}$$

და ბოლოს, განვიხილოთ ოპერაცია “closing”-ი იგივე B მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ზემოქმედებისა X სიმრავლეზე. (1.3.4) გამოსახულების თანახმად:

$$X \oplus B = \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (1,6), (2,1), (2,2), (3,1), (3,2), (4,1), (4,2), (5,1), (5,2)\}$$

$$(X \oplus B)_{(0,0)} = X \oplus B$$

$$\begin{aligned} (X \oplus B)_{-(0,1)} &= \\ &= \{(1,1), (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (2,0), (2,1), (3,0), (3,1), (4,0), (4,1), (5,0), (5,1)\} \\ (X \oplus B) \ominus B &= (X \oplus B)_{(0,0)} \cap (X \oplus B)_{-(0,1)} = \\ &= \{(1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (2,1), (3,1), (4,1), (5,1)\} \end{aligned}$$

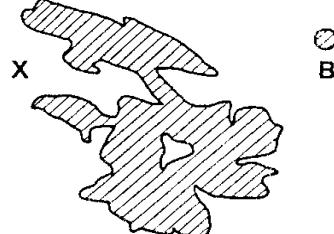
2.2.1 ნახაზზე მოცემულია ორობით გამოსახულებაზე B მასტრუქტურიზებელი ელემენტის მორფოლოგიური ოპერაციებით ზემოქმედების მაგალითები. ნახ.

2.2.1.ა-ზე გამოსახულია საწყისი x სიმრავლე და მასტრუქტურიზებელი B ელემენტი, ნახ. 2.2.1.ბ-ზე – “erosion” ოპერაციით დამუშავების შედეგი, ნახ. 2.2.1.გ-ზე – “dilation” ოპერაციით დამუშავების შედეგი, ნახ. 2.2.1.დ-ზე – “opening” ოპერაციით დამუშავების შედეგი, ხოლო ნახ. 2.2.1.ე-ზე – “closing” ოპერაციით დამუშავების შედეგი.

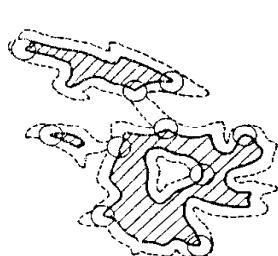
ნახ. 2.2.1-ზე წარმოდგენილია ორობითი სიგნალი, რომლის თეთრი ფონი გამოსახულია 0-ით, ხოლო დაშტრიხული არე 1-ით. დაშტრიხული არე შეესაბამება სიმრავლეების ერთობლიობას, უწყვეტი ხაზი გარდაქმნილი სიმრავლეების საზღვრების მაჩვენებელია, ხოლო წყვეტილი ხაზი – საწყისი გამოსახულების საზღვრების მაჩვენებელი. როგორც ნახაზიდან ჩანს, ოპერაცია “erosion” ამცირებს “კუნძულის” საწყის ზომებს: “ყურეების” მაგივრად წარმოიქმნება “სრუტეები”, ანუ მთლიანი სიმრავლე დაიყოფა ნაწილებად, ხოლო სიმრავლის შიგნით არსებული არე ფართოვდება. ოპერაცია “dilation”-ის შემთხვევაში “ყურეები” იგსება 1-ის ტოლი მნიშვნელობებით, ხოლო სიმრავლის შიგნით არსებული საპირისპირო მნიშვნელობის არე საერთოდ ქრება.

ოპერაცია “opening”-ის გამოყენების შემდეგ, ისევე როგორც წრფივი მაგალითის შემთხვევაში, ვიღებთ ოპერაცია “erosion”-ის გამოყენების შემთხვევაში მიღებული შედეგის მსგავს შედეგს, ანუ “კუნძულის” ვიწრო “გადასასვლელები”

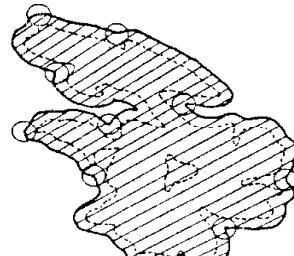
ქრება, მაგრამ ახლადწარმოქმნილი “კუნძულების” ზომები გაზრდილია, ამასთან მათი კიდეები “მომრგვალებულია”. გარდა ამისა დაშტრიხული არეს შიგნით არსებული თეთრი ფონი შენარჩუნებულია თავის საწყის ზომებში, ხოლო “კუნძულის” წაწვეტებული ადგილები დაგლუვებულია. ოპერაცია “closing”-ის გამოყენების შედეგი, კვლავ წრფივი მაგალითის მსგავსად, ოპერაცია “dilation”-ის გამოყენების შემდეგ მიღებული შედეგის მსგავსია, მაგრამ “კუნძულის” ზომების საზღვრები არ იცვლება იმ ადგილებში, სადაც არ შეიმჩნევა ღრმა და ვიწრო “კურეები”, ხოლო ვიწრო “კურეები” ამოვსებულია და გაგლუვებული, ამასთან ოპერაცია “closing”-ი “opening”-ის მსგავსად ვერ ინარჩუნებს “კუნძულის” შიგნით არსებულ განსხვავებულ არეს.



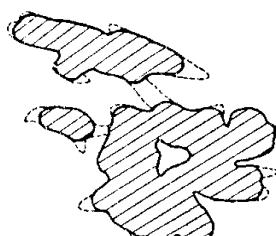
ნახ. 2.2.1 α



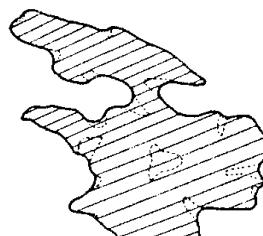
ნახ. 2.2.1 δ



ნახ. 2.2.1 γ



ნახ. 2.2.1 ρ



ნახ. 2.2.1 ζ

ნახ. 2.2.1 ორობით გამოსახულებაზე მასტრუქტურიზებელი ელემენტის მორფოლოგიური ოპერაციებით ზემოქმედების მაგალითები

ორობითი მათემატიკური მორფოლოგიის განზოგადება შესაძლებელია მრავალდონიანი სიგნალებისთვისაც (გამოსახულებისთვისაც).

მასტრუქტურიზებელი ელემენტი B განსაზღვრავს გამოსახულების ნაწილის (ფრაგმენტის) ზომას, რომლის შიგნითაც განისაზღვრება მორფოლოგიური ოპერაციები. მასტრუქტურიზებელი ელემენტი თანმიმდევრულად გადაადგილდება და მოიცავს მთელ გამოსახულებას.

მრავალდონიან გამოსახულებაში გვაქვს $f(x)$ ფუნქცია, რომელიც გამოსახულებაში ანათვლების ინტენსივობათა დონეებს აღწერს, სადაც x გულისხმობს P არეში განთავსებული წერტილების სიმრავლეს, რისთვისაც განისაზღვრება f ფუნქცია. ამ შემთხვევაში ოპერაცია “dilation”-ის შედეგი f ფუნქციისათვის B მასტრუქტურიზებელი ელემენტით შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$(f \oplus B)(x) = \sup_{i \in B} \{f(x-i)\}. \quad (2.2.6)$$

ოპერაცია “erosion” იძლევა ახალ ფუნქციას, რომელიც გამოითვლება შემდეგი გამოსახულების მიხედვით:

$$(f \ominus B)(x) = \inf_{i \in B} \{f(x+i)\} \quad (2.2.7)$$

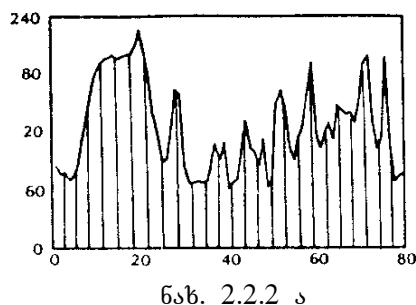
როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მათემატიკური მორფოლოგიის დანარჩენი ორი ოპერაცია “opening” და “closing”, შეიძლება წარმოვადგინოთ “erosion”-ის და “dilation”-ის თანმიმდევრული გამოყენებით.

$$f \circ B = (f \ominus B) \oplus B \quad (2.2.8)$$

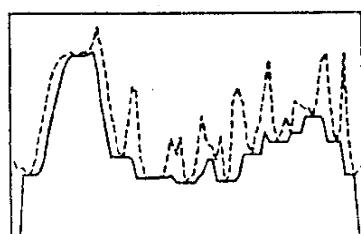
$$f \bullet B = (f \oplus B) \ominus B \quad (2.2.9)$$

2.2.2 ნახაზზე მოცემულია “erosion”, “dilation”, “opening” და “closing” ოპერაციების მოქმედებების შედეგები ერთგანზომოლებიან სიგნალზე. სიგნალი მოიცავს 80 ანათვალს მაქსიმალური ამჰლიტუდით 235. საწყისი სიგნალი დამუშავებულია მასტრუქტურიზებელი ელემენტით, რომლის კოორდინატებია $B=(-2,-1,0,1,2)$. ნახ. 2.2.2 ა შეესაბამება საწყის სიგნალს, ნახ. 2.2.2 ბ – “erosion”-ით დამუშავებულ სიგნალს, ნახ. 2.2.2 გ – “dilation”-ით დამუშავებულ სიგნალს, ნახ. 2.2.2 დ – “opening”-ით დამუშავებულ სიგნალს, ხოლო ნახ 2.2.2 ე – “closing”-ით დამუშავებულ გამოსახულებას. დაშტრიხული არეთი მონიშნულია საწყისი სიგნალის სიდიდეების მნიშვნელობები. გაფილტრული სიგნალების

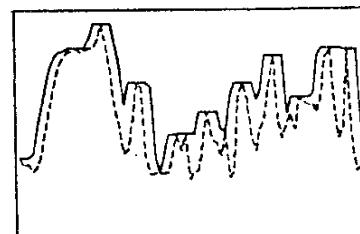
ნახაზებზე წყვეტილი ხაზებით გამოსახულია საწყისი სიგნალის მნიშვნელობები, ხოლო უწყვეტი ხაზით – მიღებული სიგნალების მნიშვნელობები. 2.2.2-დან ჩანს, რომ ოპერაცია “erosion” შლის წვეროებს და ამცირებს სიგნალის ამპლიტუდის მნიშვნელობებს, ხოლო ოპერაცია “dilation”-პირიქით, ინარჩუნებს სიგნალის პიკურ მნიშვნელობებს და ავსებს ჩაღრმავებულ ადგილებს. ოპერაცია “opening”-ის მოქმედების შედეგი დაახლოებით ჰგავს ოპერაცია “erosion”-ის მოქმედების შედეგს, ოღონდ იმ განსხვავებით, რომ სიგნალის ამპლიტუდა შედარებით ნაკლებად მცირდება და სიგნალი იღებს უფრო გაგლუვებულ ფორმას მისი წვეროების მოშორების გზით. რაც შეეხება ოპერაცია “closing”-ს, ამ შემთხვევაშიც, ისევე როგორც ოპერაციების “erosion” და “opening” შემთხვევაში, “closing” ოპერაციის განხორციელებით მიღებული შედეგი მსგავსია “dilation” ოპერაციისა, ოღონდ იმ განსხვავებით, რომ “closing” ოპერაციის შედეგი უფრო მეტად იმეორებს საწყისი სიგნალის კონტურებს, კერძოდ; იმეორებს მიღებული სიგნალის პიკურ მნიშვნელობებს, მაგრამ ღრმულები ამოვსებულია.



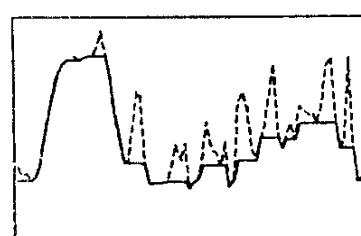
ნახ. 2.2.2 δ



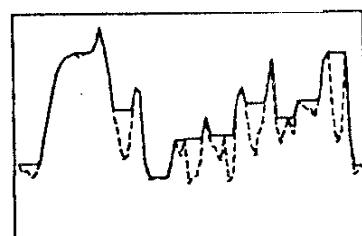
ნახ. 2.2.2 δ



ნახ. 2.2.2 δ



ნახ. 2.2.2 δ



ნახ. 2.2.2 δ

ნახ. 2.2.2 „erosion“, „dilation“, „opening“ და „closing“ ოპერაციების ერთგანზომილებიან სიგნალზე მოქმედების შედეგი

მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციები შეიძლება განვიხილოთ როგორც არაწრფივი ოპერაციები, შესაბამისად, ისინი გამოიყენება დამხმარე პირამიდის დონეების ასაგებად – როგორც არაწრფივი ფილტრაცია, რომელიც “აგლუვებს” გაფილტრულ გამოსახულებას, რაც გულისხმობს იმ დეტალებისა და ობიექტების ნაწილობრივ ან მთლიანად გაქრობას (ჩახშობას), რომლებიც ზომით უფრო მცირეა, ვიდრე მასტრუქტურიზებელი ელემენტი. მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ფორმა, ზომა და სახე განსაზღვრავენ ასეთი “გაგლუვების” ხარისხს. ამასთან დაკარგული დეტალების შესახებ ინფორმაციას შეიცავს სხვაობითი გამოსახულება, რომლის მიხედვითაც განისაზღვრება მორფოლოგიური პირამიდის ძირითადი დონეები.

2.3. მორფოლოგიური პირამიდის აგების პრინციპები

ცნობილია [2], რომ არაორთოგონალური პირამიდული აგებები ითვალისწინებენ დამატებითი (დამხმარე) პირამიდის შემოტანას, რომელიც აიგება გამოსახულების (G_0) -ის დაბალსიხშირული გაფილტრით, რის შედეგადაც მიიღება პირამიდის 4-ჯერ შემცირებული გამოსახულება, ვიდრე (G_0) პირველი დონეა. ლაპლასის პირამიდის შემთხვევაში [2], დამხმარე პირამიდას წარმოადგენს გაუსის პირამიდა. გაუსის ფილტრის წონით კოეფიციენტები $W(m,n) = W(m)*W(n)$ იღებენ შემდეგ მნიშვნელობებს: $W(-2) = W(2) = 0.05$, $W(-1) = W(1) = 0.25$, $W(0) = 0.4$; $n = -2, -1, 0, 1, 2$. ამ პირამიდის დონეები წარმოიქმნება რეკურსტული ალგორითმის მიხედვით:

$$G_{k+1}(i,j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m) \cdot w(n) \cdot G_k(2 \cdot i + m, 2 \cdot j + n) \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (2.3.1)$$

სადაც k აღნიშნავს პირამიდის დონის ნომერს, ხოლო N პირამიდის წვეროს ნომერს. $i = j = 0, 1, \dots, M-1$, სადაც i არის G_{k+1} გამოსახულების სტრიქონის ნომერი, ხოლო j – იგივე გამოსახულებაში სვეტის ნომერი. ამრიგად, დამხმარე პირამიდის k დონეზე გვექნება $(M \cdot 2^{-k})^2$ ანათვალი (პიქსელი), ამიტომ სამდონიანი პირამიდის შემთხვევაში პირამიდის წვეროში ანათვლების რაოდენობა $(M \cdot 2^{-3}) = 32 \times 32$ -ის ტოლი იქნება ხოლო ყოველი k დონისთვის მისი მნიშვნელობაა – $2^{8-k} - 1$, ე.ო. $0 \leq i \leq 2^{8-k} - 1$, $0 \leq j \leq 2^{8-k} - 1$. გამოსახულება

G_{k+1} გამოიყენება G_k გამოსახულების ე.ი. წინა დონის ანათვლების წინასწარმეტყველებისთვის.

კოდირებას ექვემდებარება ერთიდაიგივე კოორდინატების მქონე ანათვლების წინასწარმეტყველების შეცდომა. იმის გამო, რომ პირამიდის მეზობელ დონეებს გააჩნია სხვადასხვა ზომა, ე.ი. ანათვლების სხვადასხვა რაოდენობა, საჭირო ხდება ინტერპოლაციის გამოყენება. ამის შედეგად გამოსახულებაში ანათვლების რაოდენობა G_{k+1} დონეზე იზრდება 2-ჯერ როგორც სტრიქონების მიხედვით, ასევე სტრიქონების (სვეტების) მიხედვით (სულ 4-ჯერ). გაუსის პირამიდის შემთხვევაში ინტერპოლაციის ალგორითმს ექნება შემდეგი სახე:

$$IG_{k+1}(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m) \cdot w(n) \cdot G_{k+1}\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right) \quad (2.3.2)$$

ამასთან ინტერპოლაცია ხორციელდება არგუმენტების მთელი $\frac{i-m}{2}$ და $\frac{j-n}{2}$

მნიშვნელობებისათვის. ამის შემდეგ გამოითვლება წინასწარმეტყველების შეცდომა ანუ სხვაობითი გამოსახულება:

$$I_k = G_k - IG_{k+1}, \quad (2.3.3)$$

სადაც $0 \leq k \leq N-1$.

გამოსახულებები L_0, L_1, \dots, L_{N-1} სიხშირული სპექტრებით წარმოქმნიან ლაპლასის პირამიდას. ეს მაღალსიხშირული გამოსახულებები შეიძლება იყოს ოპტიმალურად გადაკვანტული გაცილებით მცირე ბიტების რაოდენობით, ამასთან რაც უფრო დაბალია დონე – მით უფრო უხეშად. ამ ოპერაციების შესრულების შედეგად მიიღება შეკუმშვა, საწყისი გამოსახულების აღდგენა ხორციელდება იგივე ოპერაციების უკუთანმიმდევრობითი შესრულებით. შესაძლებელია ამასთან სრულიად აღვადგინოთ საწყისი გამოსახულება, რადგანაც პირამიდული გამოსახულება უკუმშექცევადია:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_k = I_k + IG_{k+1} \\ IG_{k+1}(i, j) = 4 \cdot \left[\sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m) \cdot w(n) \cdot G_{k+1}\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right) \right] \\ G_{N-1} = L_{N-1} \end{array} \right. , \quad (2.3.4)$$

ბოლო ეტაპზე ჩვენ გვექნება: $G_0 = L_0 + IG_1$, სადაც G_0 საწყისი გამოსახულებაა.

მორფოლოგიური პირამიდა აიგება ლაპლასის სტრუქტურული სქემის მიხედვით, იმ განსხვავებით, რომ დამხმარე პირამიდის დონეები ფორმირდება არაწრფივი სახის ფილტრის გამოყენებით, რომლის ოპერაციებიც აღიწერება მათემატიკური მორფოლოგიის საფუძველზე და არა (2.3.1) გამოსახულების მიხედვით.

კავშირის არხებში გადაიცემა პირამიდის წვერო, რომელიც 3 დონიან პირამიდის შემთხვევაში შეიცავს 32×32 ანათვლებს ნაცვლად 256×256 ზომის საწყისი გამოსახულების და პირამიდის დონეები I_k , რომლებიც გაცილებით ნაკლებად მგრძნობიარეა გადაკვანტვის მიერ წარმოქმნილი ხმაურის მიმართ, რომელიც ხორციელდება ინფორმაციის შეკუმშვისათვის ოპტიმალური კოდრების განსახორციელებლად.

მორფოლოგიური პირამიდა აიგება ლაპლასის პირამიდის მსგავსად [8]. ძირითადი პირამიდის აგებას წინ უსწრებს დამხმარე პირამიდის აგება. ლაპლასის პირამიდის შემთხვევაში ეს იყო გაუსის პირამიდა (წრფივი ფილტრით) [11]. მოცემულ შემთხვევაში მორფოლოგიური დამხმარე პირამიდა მიიღება არაწრფივი ფილტრაციისა და დეციმაციის მეშვეობით. მაგალითისათვის განვიხილოთ ოპერაცია “opening”. დამხმარე პირამიდის დონეები აღვნიშნოთ I_1, \dots, I_N – ით; I_0 შეესაბამება საწყის გამოსახულებას.

$$I_{k+1} = \text{MReduce}[I_k], \quad k = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$I_{k+1,I} = \text{Expand}[I_{k+1}]$$

M მორფოლოგიური ოპერაციის სიმბოლოა, ხოლო $I_{k+1,I}$ – ინტერპოლაციის შედეგი, რომელიც აუცილებელია სხვაობითი გამოსახულების (L_k) მისაღებად:

$$L_k = I_{k+1} - I_{k+1,I}$$

$$I_{k+1} = \text{Dowsample}[I_k \circ B].$$

Dowsample აღნიშნავს გამოსახულების ანათვლების დეციმაციას 2–ის ტოლი კოეფიციენტით ორივე საკოორდინატო ღერძისათვის.

L_k – თი აღნიშნულია ძირითადი პირამიდის დონეები. პირამიდის დონეების აგების ალგორითმი შეიძლება შემდეგნაირად ჩაიწეროს:

$$I_{k+1} = \text{owsample}[I_k \circ B];$$

$$I_{k+1,I} = \text{expand}[I_{k+1}];$$

$$L_k = I_k - I_{k+1,I} ;$$

$k + 1$, While $k < N$;

$$I_k = L_k .$$

ამასთან $I_k \circ B = (I_k \ominus B) \oplus B$.

$J(x, y)$ -ით აღვნიშნოთ ფუნქცია, რომელიც აღწერს გამოსახულების

ანათვლების ინტენსივობებს ပარეში.

$$P = \{(x, y) / J(x, y) \neq -\infty\}, \quad (2.3.5)$$

$$I_k = \{J(x, y) / (x, y) \in P\}. \quad (2.3.6)$$

მასტრუქტურიზებელ ელემენტად ავიღოთ კვადრატული ფორმის 3×3 ზომის ფილტრი. ამ შემთხვევაში “erosion”-ის ოპერაცია მასტრუქტურიზებელი ელემენტით აღიწერება შემდეგი ფორმულით:

$$ErodedJ(x, y) = \inf \{J(x+i, y+j) / (i, j) \in B\},$$

$$OpenedJ(x, y) = \sup \{ErodedJ(x-i, y-j) / (i, j) \in B\}.$$

როგორც ზევით აღვნიშნეთ, მორფოლოგიური პირამიდა აიგება ლაპლასის პირამიდის მსგავსად, ოდონდ იმ განსხვავებით, რომ მასში გამოიყენება მათემატიკური მორფოლოგიის ერთ-ერთი ოპერაცია (ფილტრი).

ცდები ტარდებოდა სატესტო გამოსახულებისათვის “ლენა”, რომელიც გამოირჩევა მაღალი დეტალურობით და კონტრასტულობით, ამასთან აღნიშნულ გამოსახულებაზე ჩატარებულია მრავალი სხვა ექსპერიმენტი და შესაბამისად ჩვენ საშუალება გვეძლევა შევადაროთ ჩვენს მიერ მიღებული შედეგები აქამდე არსებულ შედეგებთან.

ცხრილი 2.3.1 ოპერაცია „erosion“-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები

	მათემატიკური ლოდინი	დისპერსია	ენტროპია
საწყისი გამოსახულება	99.028	2792	7.604
დამს. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული	82.443	2887	7.449
დამს. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული, დეციმირებული	81.884	2920	7.479
დამს. პირამ. პირველი დონის ინტერპოლირებული	82.396	2751	7.475
პირამიდის პირველი დონე	16.632	523.5	5.639
დამს. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული	64.208	2664	7.085
დამს. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული, დეციმირებული	64.352	2665	7.17

დამხ. პირამ. მეორე დონის ინტერპოლირებული	65.229	2421	7.232
პირამიდის მეორე დონე	16.655	605.4	5.744

ცხრილი 2.3.2 ოპერაცია “dilation”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.

	მათემატიკური ლოდინი	დისპერსია	ენტროპია
საწყისი გამოსახულება	99.028	2792	7.604
დამხ. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული	115.339	2618	7.505
დამხ. პირამ. პირველი დონის გაფილტრუ- ლი, დეციმირებული	114.541	2698	7.532
დამხ. პირამ. პირველი დონის ინტერპოლირებული	115.197	244	7.529
პირამიდის პირველი დონე	-16.169	595.3	5.824
დამხ. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული	133.371	2532	7.343
დამხ. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული, დეციმირებული	131.556	2759	7.379
დამხ. პირამ. მეორე დონის ინტერპოლირებული	133.014	2269	7.458
პირამიდის მეორე დონე	-18.472	745.03	5.987

ცხრილი 2.3.3 ოპერაცია “closing”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.

	მათემატიკური ლოდინი	დისპერსია	ენტროპია
საწყისი გამოსახულება	99.028	2792	7.604
დამხ. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული	103.047	2712	7.462
დამხ. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული, დეციმირებული	102.994	2712	7.504
დამხ. პირამ. პირველი დონის ინტერპოლირებული	103.6	2713	7.501
პირამიდის პირველი დონე	-4.571	319.2	5.398
დამხ. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული	136.956	2494	7.288
დამხ. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული, დეციმირებული	134.974	2744	7.323
დამხ. პირამ. მეორე დონის ინტერპოლირებული	136.474	2266	7.422
პირამიდის მეორე დონე	-47.01	1544	6.792

ცხრილი 2.3.4 ოპერაცია “opening”-ის მეშვეობით აგებული პირამიდის დონეების სტატისტიკური მახასიათებლები.

	მათემატიკური ლოდინი	დისპერსია	ენტროპია
საწყისი გამოსახულება	99.028	2792	7.604
დამხ. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული	92.561	2872	7.5

დამს. პირამ. პირველი დონის გაფილტრული, დეციმირებული	91.828	2927	7.532
დამს. პირამ. პირველი დონის ინტერპოლირებული	92.387	2741	7.529
პირამიდის პირველი დონე	6.641	324.4	5.34
დამს. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული	88.044	2887	7.327
დამს. პირამ. მეორე დონის გაფილტრული, დეციმირებული	86.791	2955	7.372
დამს. პირამ. მეორე დონის ინტერპოლირებული	87.864	2635	7.433
პირამიდის მეორე დონე	6.411	484.3	6.325

როგორც მიღებული მნიშვნელობებიდან ჩანს, კოდირებისათვის ყველაზე საუკეთესო სტატისტიკური მახასიათებლები და შესაბამისად ყველაზე მცირე ენტროპია გააჩნია “opening” ფილტრით გაფილტრულ, პირველი დონის “სხვაობით” გამოსახულებას, რომელიც ტოლია 5.39-ის, ამიტომ შემდგომში ჩვენ ცდებს ჩავატარებთ ძირითადად აღნიშნული ფილტრის გამოყენებით.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, პირამიდის დონეების აგება ხორციელდება რეკურნტული ალგორითმით და დაფუძნებულია ფილტრაციის, დეციმაციის და ინტერპოლაციის ოპერაციებზე.

გაფილტვრა, ე.ი. ოპერაციის სახე, რომლის საფუძველზეც ხორციელდება პირამიდის დონის ფორმირება, შეიძლება იყოს წრფივი და არაწრფივი სახის [8,14]. პირამიდული გარდაქმნების შედეგად საწყისი გამოსახულება წარმოდგება გამოსახულებათა მიმდევრობით (წყობით), რომელიც ხასიათდება შემცირებული “გარჩევითი” უნარით (პირამიდის დონის ნომრის ზრდასთან ერთად) და თითოეულ საკორდინატო ღერძზე ელემენტების რაოდენობის ორჯერ შემცირებით. საბოლოოდ პირამიდის ყოველი დონე (დაბალსიხშირული წვეროს გარდა) წარმოადგენს მაღალსიხშირულ გამოსახულებას. პირამიდის ნომრის ზრდასთან ერთად ყოველი შემდგომი დონისათვის ამ გამოსახულების ზომა მცირდება 4-ჯერ.

იმის გამო, რომ თვალი სუსტად აღიქვავს გამოსახულების მაღალსიხშირულ მდგენელებს, ეს ინფორმაცია შეიძლება უფრო მცირე რაოდენობის ბიტებით დავაკოდიროთ, ვიდრე საწყისი გამოსახულება იყო წარმოდგენილი. დაბალსიხშირული გამოსახულება, რომელიც განლაგებულია პირამიდის წვეროში და ინფორმაციის ძირითადი მატარებელია, გაცილებით მცირე ანათვლებს შეიცავს,

ვიდრე საწყისი გამოსახულება. ზემოაღწერილ მოქმედებათა შედეგად ხორციელდება შეკუმშვა.

გარჩევითი უნარიანობის შემცირება ხორციელდება დეციმაციით, მომდევნო დონეზე მიღებული ანათვლების რაოდენობა დამოკიდებულია დეციმაციის კოეფიციენტზე და როგორც უკვე აღვნიშნეთ, შემდგომი დონის გამოსახულება მცირდება 4-ჯერ, თუ დეციმაციის კოეფიციენტი უდრის 2-ს.

საინტერესოა პირამიდის დონების აგება დეციმაციის სხვა კოეფიციენტით, კერძოდ, როცა დეციმაციის კოეფიციენტი 3-ის ტოლია. 3-ჯერ დეციმაცია გამოიყენებოდა სხვა მიზნებისთვის [3] და ჩვენ ვცადეთ გამოგვეყენებინა ასეთი დეციმაცია და ავაგეთ მორფოლოგიური პირამიდა, რომელსაც ჩვენ ვუწოდეთ მოდიფიცირებული. დეტერმინირებული მახასიათებლების განსაზღვრის დროს უპირატესობა მიენიჭა მასტრუქტურიზებელ ელემენტს, რომელსაც ჰქონდა კვადრატიული ფორმა ზომით 3×3 . სწორედ ამიტომ ჩვენ შევეცადეთ ისეთი მოდიფიცირებული პირამიდის შექმნა, რომლის მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ზომა “შესაბამებოდა” დეციმაციის დროს “დარჩენილი” ელემენტების რაოდენობას.

3-ის ტოლი კოეფიციენტით დეციმაციის დროს საწყისი გამოსახულების ზომა მცირდება 3-ჯერ ორივე საკოორდინატო ღერძის მიმართულებით. შესაბამისად საწყისი გამოსახულების ზომა საერთო ჯამში შემცირდება 9-ჯერ და მივიღებთ ელემენტების რაოდენობას ზომით – 85×85 .

თავდაპირველად ხორციელდება საწყისი გამოსახულებისათვის ურთი სტრიქონისა და ერთი სვეტის დამატება, რადგან მორფოლოგიური ფილტრით გაფილტვრის შემთხვევაში გამოსახულების ზომები მცირდება. გამოსახულების ზომის შემცირება დამოკიდებულია მასტრუქტურიზებელი ფილტრის ზომაზე. ჩვენს შემთხვევაში, როგორც უკვე იყო აღნიშნული, მასტრუქტურიზებელი ელემენტის ზომაა 3×3 -ზე.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მორფოლოგიური პირამიდის ოპერაცია “opening”-ი შეიძლება განვახორციელოთ “erosion” და “dilation” ოპერაციების თანმიმდევრული შესრულებით. (მინიმუმით ხორციელდება “erosion” ოპერაცია, ხოლო მაქსიმუმით – “dilation” ოპერაცია). სტრიქონებისა და სვეტების დამატება აუცილებელია “dilacion” ოპერაციის შესრულების წინაც. ყოველივე ამ ოპერაციების შესრულების შედეგ ჩვენ მივიღეთ გაფილტრული გამოსახულება.

მოდიფიცირებულ პირამიდულ აგებაში შემდეგ ოპერაციას წარმოადგენს დეციმაციის ოპერაცია 3-ის ტოლი კოეფიციენტით, რომლის განხორციელების ფორმულაც მოყვანილია ქვემოთ (2.3.7).

$$m := 0..84 \quad n := 0..84$$

$$\text{LENAD}_{m,n} := \text{LENA}_{3 \cdot m, 3 \cdot n} \quad (2.3.7)$$

სადაც LENA საწყისი გამოსახულებაა ზომით 256×256 , ხოლო დეციმირებული გამოსახულების ზომაა 85×85 .

სხვაობითი გამოსახულების მისაღებად, როგორც უკვე იყო აღნიშნული, აუცილებელია განხორციელდეს ინტერპოლაციის ოპერაცია. შემდეგში ხორციელდება წრფივი ინტერპოლაცია.

$$m := 0..252 \quad n := 0..252$$

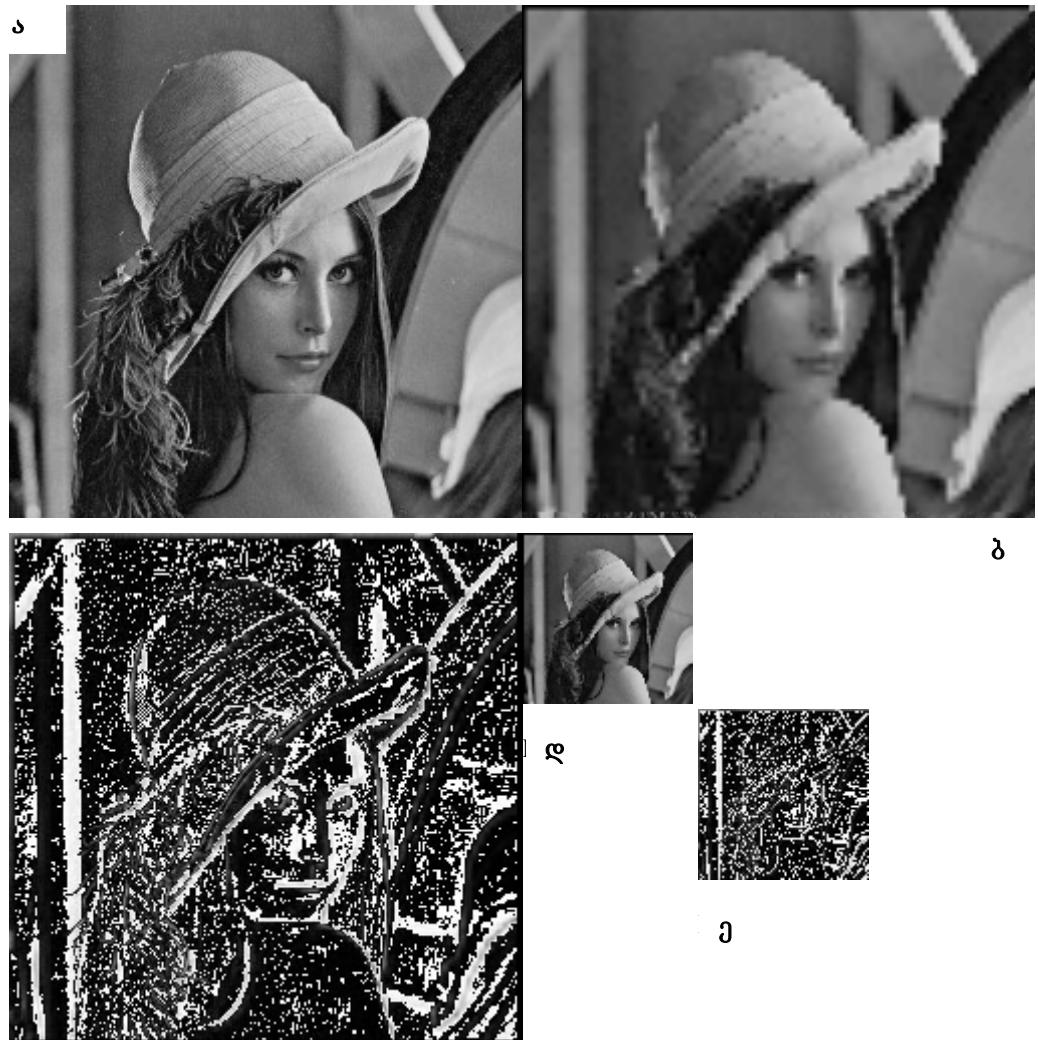
$$\text{LENAL}_{m,n} := \frac{1}{9} \cdot \sum_{c=0}^2 \sum_{v=0}^2 \text{LENAD}_{\text{floor}\left(\frac{m+c}{3}\right), \text{floor}\left(\frac{n+v}{3}\right)}, \quad (2.3.8)$$

სადაც I ინტერპოლირებული გამოსახულებაა, ხოლო LENA როგორც წინა შემთხვევაში დეციმირებული გამოსახულებაა.

მოდიფიცირებული პირამიდის შემთხვევაში ჩვენ ვაგებდით მხოლოდ ორ დონიან პირამიდას, რადგან 3-ის ტოლი კოეფიციენტით დეციმაციის დროს პირამიდის შემდგომი დონის გამოსახულების ზომა მნიშვნელოვნად მცირდება, (როგორც ზევით იყო აღნიშნული 9-ჯერ), რის გამოც ინტერპოლაციის ოპერაციას ინტერპოლირებულ გამოსახულებაში შეაქვს უფრო მეტი შეცდომები, ვიდრე 2-ის ტოლი დეციმაციის შემთხვევაში.

გარდა ამისა სატატისტიკური მახასიათებლების ცვლილება ხდება იმდაგვარად, რომ შემდგომი დონის აგების განხორციელებას აზრი ეკარგება, რაც ნაჩვენები იქნება 2.4 პარაგრაფში. მოდიფიცირებული მორფოლოგიური პირამიდის დონეები ნაჩვენებია ნახ. 2.3.1-ზე. აღსანიშნავია ისიც, რომ ოპტიმალური დაქვანტვის გამოყენების დროს ხდებოდა აგრეთვე მაღალსიხშირული (სხვაობითი) გამოსახულების დეციმაციაც, რამაც მოგვცა საშუალება გაგვეზარდა შეკუმშვის კოეფიციენტი 2,645-დან 7,257-მდე. ორივე შემთხვევაში მაღალსიხშირული გამოსახულების ოპტიმალური დაქვანტვა ხდებოდა 2 ბიტად, ხოლო თუ განვახორციელებთ წვეროს 8 ბიტიდან 6 ბიტამდე თანაბარ გადაქვანტვას, რაც

პრაქტიკულად ხორციელდებოდა, მაშინ შეკუმშვის კოეფიციენტი კიდევ უფრო გაიზრდება და გახდება 9,071-ის ტოლი.



გ

ნახ. 2.3.1 გამოსახულების გარდაქმნა მორფოლოგიური პირამიდის აგების ოპერაციებით. ა – საწყისი გამოსახულებაა, ბ – ინტერპოლირებული გამოსახულება, გ – პირამიდის პირველი დონე, დ – პირამიდის წვერო, ე – პირამიდის პირველი დონის დეციმირებული გამოსახულება.

ცხრილ 2.3.5-ში მოყვანილია ტრადიციული და მოდიფიცირებული ალგორითმებით აგებული პირამიდების შედეგად მიღებული ალდგენილი გამოსახულებების სიზუსტის მაჩვენებლები და შესაბამისი შეკუმშვის კოეფიციენტები.

ცხრილი 2.3.5 ალდგენილი გამოსახულებების სიზუსტის მაჩვენებლები და შესაბამისი შეკუმშვის კოეფიციენტები

	სკგ	ნსკგ	სხპფ	სხპფ	შეკ-კოეფ.
ტრადიციული	12.598	0.112	18.997	26.158	2.645
მოდიფირებული	20.16	0.18	14.913	22.075	9.071

როგორც მოყვანილი ცხრილიდან ჩანს, შეკუმშვის კოეფიციენტის დაახლოებით 3,5 ჯერ გაზრდის შემთხვევაში სხპფ მცირდება მხოლოდ 4 დბ-ით, შესაბამისად დასტურდება ზემოთ მოყვანილი მოსაზრება, მასტრუქტურიზებელი ელემენტისა და დეციმაციის კოეფიციენტის “შესაბამისობით” მიგვეღწია გარკვეული პოზიტიური შედეგებისთვის. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე შემდგომში კვლევებს განვახორციელებთ მოდიფირებული პირამიდის გამოყენებით.

2.4 გამოსახულებათა შეკუმშვის ვეივლებზე გარდაქმნის ტექნოლოგიები

2.4.1 ვეივლებზე ფუნქციების მიღება

ვეივლებზე გარდაქმნა წარმოადგენს ახალ მეთოდს, რომელიც ემსახურება საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტას უაღრესად ეფექტური შედეგებით [34,37,44]. $f(t)$ სიგნალის ვეივლებზე გარდაქმნა გულისხმობს ვეივლებზე ფუნქციების წრფივ კომბინაციას შესაბამისი კოეფიციენტებით. ვეივლებზე ფუნქციები სინუსოიდური ტიპის ფუნქციებისაგან განსხვავებით განისაზღვრებიან გარკვეული დროის განმავლობაში. სიგნალის ვეივლებზე ფუნქციებად დაშლის დროს სარგებლობენ სწრაფი ალგორითმით. ეს ალგორითმები კარგად გამოყენებადია, განსაკუთრებით, როცა საქმე ეხება მონაცემთა შეკუმშვას და ზმაურის (შემთხვევითი ცდომილებების) აღმოფხვრას. სასარგებლო სიგნალისათვის ვეივლებზე ანალიზს აქვს ფართო გამოყენება, განსაკუთრებით ისეთ სფეროებში, სადაც ხდება სიგნალებისა და გამოსახულებების დამუშავება: (სამუდიცინო ამოცანებში, ინფორმაციის შეკუმშვაში, სახეთა ამოცნობაში, ინფორმაციის გადაცემაში და სხვა.)

ჩვენ გამოვიყენებთ ორგანზომილებიან გეივლეტ ფუნქციებს, იმიტომ რომ ჩვენი მიზანია გამოვიყენოთ ვეივლეტ-გარდაქმნა გამოსახულებათა ოპტიმალური წარმოდგენისათვის. ვინაიდან ორგანზომილებიანი (2D) ვეივლეტი იქმნება ერთგანზომილებიანი (1D) ვეივლეტების ნამრავლით, ამიტომ გვერდს ვერ ავუვლით ერთგანზომილებიანი გეივლეტ-ფუნქციების შექმნის განსაზღვრას. უნდა აღვნიშნოთ, რომ **MathCad** პაკეტში ეს ფუნქციები მოცემულია და მათი შექმნა არ წარმოადგენს სიძლიერეს:

$$\text{wavelet}(x,j,k,n,f) \quad \text{father}(x,[j,k],s) \quad \text{mother}(x,[j,k],s)$$

სადაც x არის ის კოორდინატი, სადაც უნდა განისაზღვროს ვეივლეტი; j არის დადებითი მუდმივა; k არის მუდმივა (გადატანის კოეფიციენტი), რომელიც განსაზღვრავს ვეივლეტ-პოზიციას; n არის მუდმივა.

ცნობილია, რომ ვეივლეტ გარდაქმნაში შეიძლება მონაწილეობდეს ბევრი სხვადასხვა ორთოგონალური და არაორთოგონალური ფუნქციები [13], ყველაზე დიდი გამოყენება აქვთ ჰარის, დობეშის და სხვა ფუნქციების [45, 48]. ქვემოთ არის მოყვანილი მაგალითი, რომელიც ეხება *father* და *mother* ფუნქციების შექმნას დობეშის ფუნქციების საფუძვლზე. თუ ვეივლეტ ფუნქციის არგუმენტი ნულის ტოლია ($n=0$), ვღებულობთ *father* ვეივლეტს, ხოლო როცა $n=1$, მაშინ *mother* ვეივლეტს. რაც შეეხება ჰარის ფუნქციების შექმნას, საილუსტრაციოდ განვიხილოთ მაგალითი, რომელიც ეხება (2D) განზომილებაში მიღებულ ფუნქციებს.

ორგანზომილებიან (2D) ვეივლეტ ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე:

$$\text{wavelet2d}(x,y,j,kx,ky,m,n,f) = 2^{-j} \cdot W_m(2^{-j}x - kx) \cdot W_n(2^{-j}y - ky)$$

სადაც $W_n(x)$ არის (1D) ვეივლეტ ფუნქცია, n ფუნქციის ნომერია, f არის ფუნქციის დასახელება, j არის ვეივლეტ გარდაქმნის (მასშტაბირების) დონის ნომერი.

მაგალითი:

$$j := 0 \quad M_{D_{k,1}} := \text{mother2d}(x_k, y_l, j, kx, ky, "d2", "D")$$

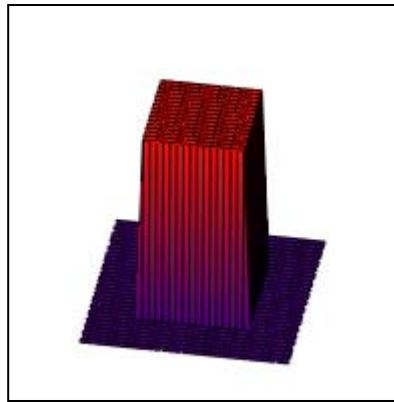
$$y_l := \frac{1}{16} - 0.5 \quad M_{H_{k,1}} := \text{mother2d}(x_k, y_l, j, kx, ky, "d2", "H")$$

$$kx := 0 \quad M_{V_{k,1}} := \text{mother2d}(x_k, y_l, j, kx, ky, "d2", "V")$$

$$ky := 0 \quad F_{k,1} := \text{father2d}(x_k, y_l, j, kx, ky, "d2")$$

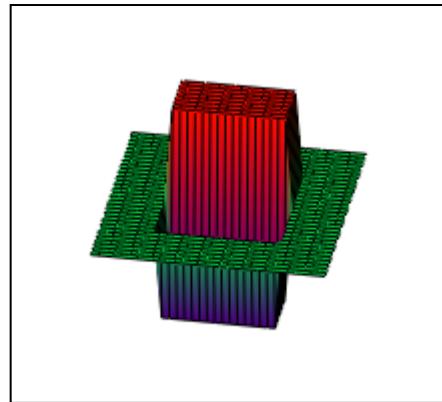
$$l := 0..N - 1 \quad N := 32 \quad k := 0..N - 1 \quad x_k := \frac{k}{16} - 0.5$$

father ვეივლეტი



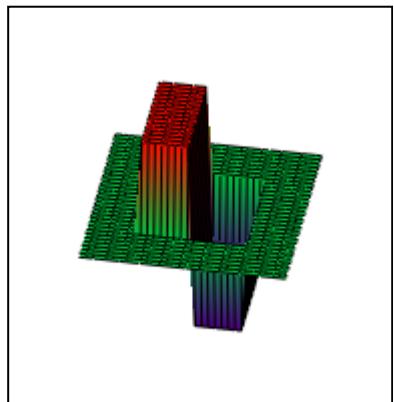
F

პორიზონტალური mother ვეივლეტი



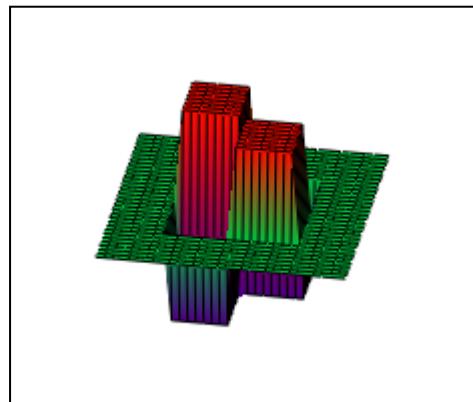
M_H

ვერტიკალური mother ვეივლეტი



M_V

დიაგონალური father ვეივლეტი

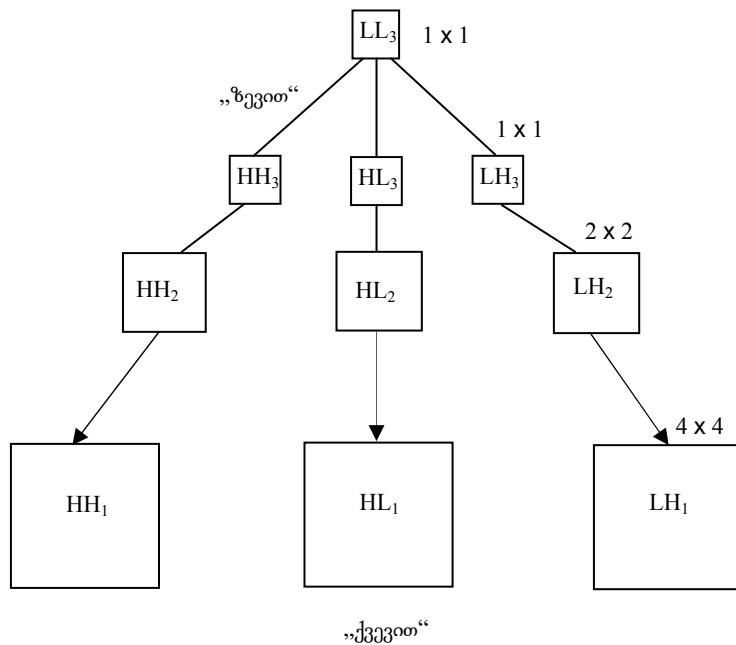
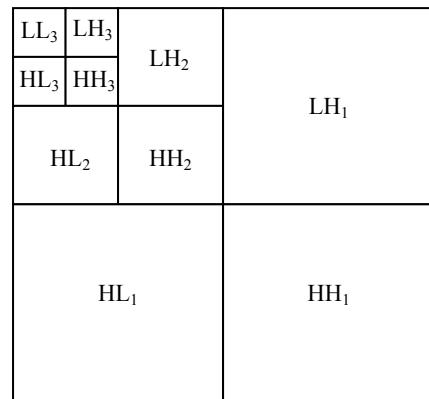


M_D

მოყვანილი სურათები ასახავენ ჰარის ფუნქციებს ორგანზომილებიან არეში.

Father ვეივლეტი წარმოადგენს დადებით ფუნქციას, ხოლო M_H არის ფუნქცია, რომელიც პორიზონტალური (x) ღერძის მიმართ ღებულობს როგორც დადებით, ასევე უარყოფით მნიშვნელობებს. M_V არის ფუნქცია, რომელიც (y) ღერძის მიმართ იცვლის ნიშანს. M_D არის ფუნქცია, რომელიც შეიცავს მაღალ სიხშირეს დიაგონალის მიმართ.

ორგანზომილებიანი ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენებით მოღებული პირამიდული აგების სქემა, რომელიც ასახავს ვეივლეტ-გარდაქმნას როგორც მის მაღალ სიხშირულ (H) და დაბალსიხშირულ (L) ფილტრებში გატარების მიმდევრობას. LH - ავლნიშნავ მაღალსიხშირულ ვერტიკალურ ფილტრაციას, ხოლო HL კი დაბალსიხშირულ ვერტიკალურ ფილტრაციას. LL_3 – ნიშნავს ორივე მიმართულებით დაბალსიხშირულ სამჯერ განხორციელებულ ფილტრაციას. შემდეგ ნახაზებზე მოცემულია ამ პროცესის პირამიდული წარმოდგენა.



2.4.2 გამოსახულების ტრანსფორმაციის მიღება

გარდაქმნის კოეფიციენტების გამოსახულება (ტრანსფორმაცია) მიღება იმ ფუნქციების მეშვეობით, რომლებიც მიეკუთვნება ბიოროტოგონალ ვეივლეტ ფუნქციებს.

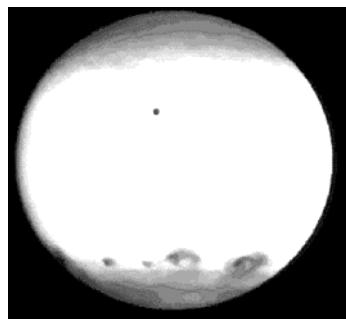
`wave2d(M, j) iwave2d(M, j) wavescale(M, j, Min, Max)`

iwave – ნიშნავს შებრუნებულ ოპერაციას ან აღდგენის ფუნქციას.

`wave2d(M, j)`

`M=READRGB("jupiter2.gif")`

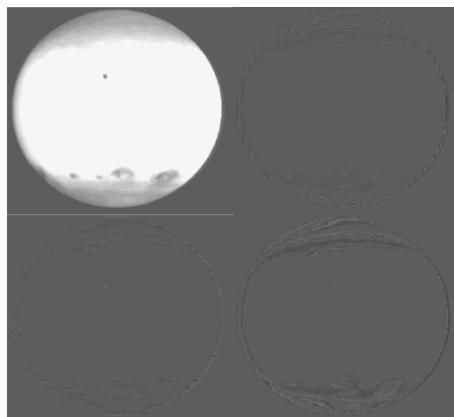
ნახ. 2.4.2.1-ზე მოცემულია საწყისი გამოსახულება.



`M`

ნახ. 2.4.2.1

როდესაც პირამიდის დონეების რაოდენობა უდრის 1, ვღებულობთ სურათს:



`level:= 1`

`N := wave2d (M , level)`

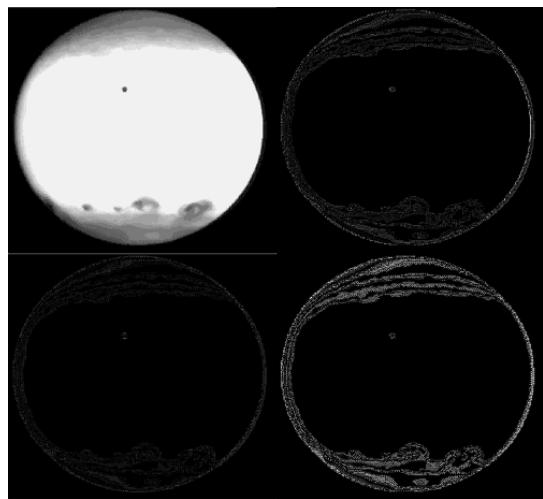
`scale(N,0,255)`

ნახ. 2.4.2.2

თუ გამოვიყენებთ *wavescale* ფუნქციას მივიღებთ იგივე სურათს, რომელშიც მკვეთრად იქნება გამოსახული ყველა არე: LL_1 , LH_1 , HL_1 , HH_1 .

wavescale(M, j, m, n)

indep := wavescale ($\overrightarrow{|N|}$, level, 0, 255)



scale(indep,0,255)

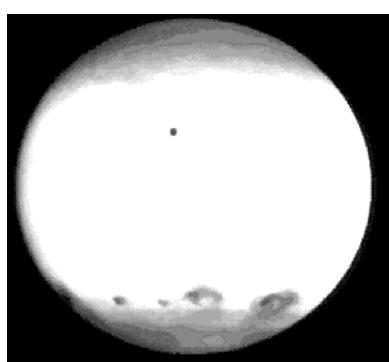
ნახ. 2.4.2.3

გამოსახულების აღდგენა ზორციელდება *iwave2d* ფუნქციით. მიღებული შედეგი მოცემულია ქვედა ნახაზზე:

iwave2d(M, j)

Rec := *iwave2d* (N ,level)

Rabs := $\overline{\overrightarrow{|Rec|}}$



Rabs

ნახ. 2.4.2.4

2.4.3 გამოსახულების ვეივლეტ-გარდაქმნით შეკუმშვის მაგალითი

მოვიყვანოთ მაგალითი გამოსახულების შეკუმშვაზე ვეივლეტ-გარდაქმნის საფუძველზე, რომელიც ხორციელდება *MathCad* პაკეტში *DWT* ფუნქციის საფუძველზე.

```
L := READBMP("lena.bmp")
```



საწყისი გამოსახულება

L

```
N := rows(L)
N1 := floor(0.1 · N2)
N2 := floor(0.01 · N2)
filter := symmlet(12)
J := 4
```

გამოსახულების DWT გამოთვლა:

```
W_L := dwt(L, J, filter)
```

ვეივლეტ კოეფიციენტების კლასიფიკაცია ზომის მიხედვით:

```
W_s := wavesort(W_L)
```

გამოსახულების რეკონსტრუქცია ვეივლეტ მეთოდით:

```
W'_1 := shrink(W_s, N1, W_L)
```

```
L1 := idwt(W'_1, J, filter)
```

გამოსახულების რეკონსტრუქცია მხოლოდ ყველაზე გრძელი ვეივლეტ კოეფიციენტის 1%-ის გამოყენებით:

$$W'{}_2 := \text{shrink}(W_s, N_2, W_L) \quad L_2 := \text{idwt}(W'{}_2, J, \text{filter})$$

აპროქსიმაცია კოეფიციენტების 10%-ით აპრომიქსაცია კოეფიციენტების 1%-ით



$\text{scale}(L_1)$

გამოსახულების
რეპროდუქცია არის
ბრწყინვალე მხოლოდ
10%-ით

$\text{scale}(L_2)$

კოეფიციენტის 1%-ით, გამოსახულების
ხარისხი შემცირებულია, მაგრამ
ფოტოგრაფია კვლავაც იცნობა
(გარჩევადია)

2.5 შემთხვევითი შეცდომების მქონე გამოსახულებათა ფილტრაცია კეივლებზე და მედიანური ფილტრების საშუალებით

$M := \text{READ_IMAGE} ("bridge.bmp") \xrightarrow{\hspace{1cm}} N := M + \text{rnd}(\text{noise})$

$i := 0 .. \text{rows}(M) - 1$

$j := 0 .. \text{cols}(M) - 1$

$\text{noise}_{i,j} := 150$

ნახაზებზე 2.5.1 და 2.5.2 მოცემულია საწყისი M და ხმაურიანი N გამოსახულება.



M

ნახ. 2.5.1 საწყისი გამოსახულება



scale(N, 0, 255)

ნახ. 2.5.2 დასამუშავებელი, ხმაურიანი გამოსახულება

ამ პარაგრაფში განვიხილავთ ვეივლეტ-გარდაქმნის უნარს ჩაახშოს ის შემთხვევითი შეცდომები (ხმაური), რომელიც დადებულია საწყის გამოსახულებაზე. აქ განხილული იქნება სიმეტრიული ანუ არაორთოგონალური ვეივლეტ-ფუნქციები. ხმაური განაწილებულია თანაბარი განაწილების კანონით. „ხმაური“-ს ზედღება გამოსახულება „bridge“-ზე ხორციელდება შემდეგი ოპერატორებით: ხმაური ალმოფხვრა (ფილტრაცია) ამ შემთხვევაში ხდება Donoho და Johnstone-ის მეთოდით, რომელიც ითვალისწინებს ვეივლეტ-ტრანსფორმანტაში ზღურბლის „Soft-thresholding“ შემოღებას და ტრანსფორმანტაში კოეფიციენტების განულებას, რომლებიც აკმაყოფილებენ გარკვეულ პირობას. პირველ ეტაპზე ხორციელდება გამოსახულების ტრანსფორმანტის მიღება (2.5.1).

$$Q := \text{wave2d}(N, 7) \quad (2.5.1)$$

მეორე ეტაპზე დგინდება რამდენი კოეფიციენტი იქნება შენარჩუნებული ზღურბლის შემოღებით:

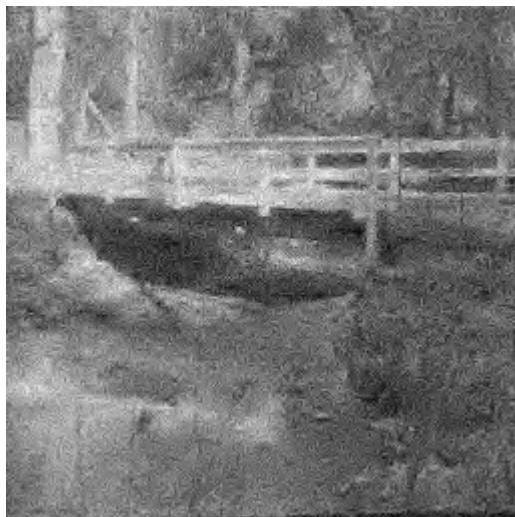
$$\text{thresh} := 40 \quad (2.5.2)$$

თუ კოეფიციენტის მნიშვნელობა ნაკლებია ამ ზღურბლზე, იგი გაუტოლდება ნულს. თუ კოეფიციენტი მეტია ამ ზღურბლზე, იგი უნდა გამოაკლდეს ამ ზღურბლის მნიშვნელობას. *MathCad* პროგრამაში ეს ოპერაცია სრულდება ვექტორიზაციის საშუალებით და გამოისახება შემდეგი გამოსახულებით:

$$temp := \overrightarrow{(2 \cdot \Phi(Q) - 1) \cdot (|Q| - thresh) \cdot (|Q| > thresh)} \quad (2.5.3)$$

ვეივლეტ-უკუგარდაქმნის შედეგად ვღებულობთ საბოლოო გამოსახულებას „recons“, რომელიც ნაჩვენებია (2.5.4) ფორმულის გამოყენების შედეგად:

$$\text{recons} := \text{iwave2d} (\text{temp}, 7) \quad (2.5.4)$$



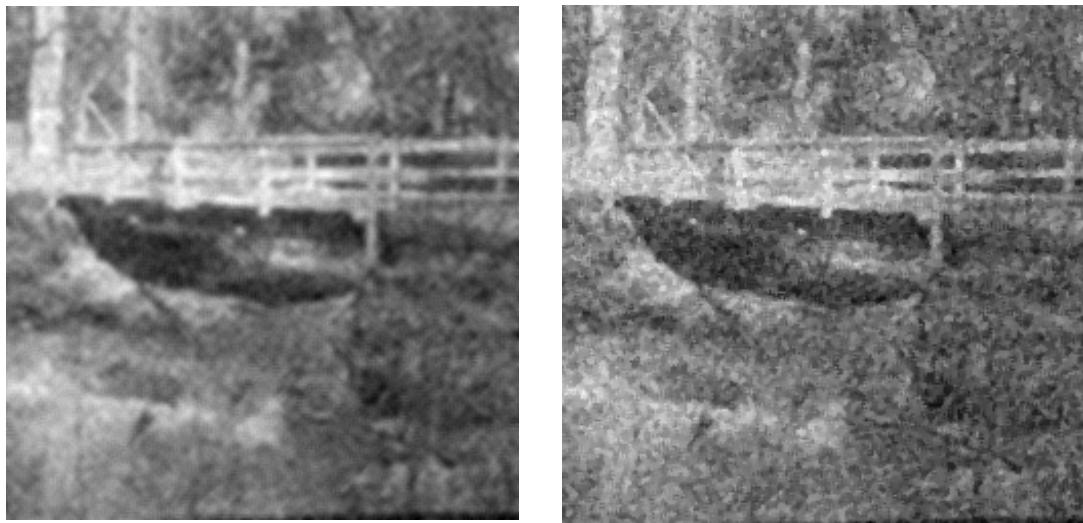
`scale(recons, 0, 255)`

ნახ. 2.5.3 ვეივლეტ-უკუგარდაქმნის შედეგად
მიღებული გამოსახულება

მიღებული შედეგი ცხადყოფს, რომ განხილული მეთოდი ანხორციელებს „ხმაურის“ ფილტრაციას და აუმჯობესებს „ხმაურიან“ გამოსახულებას.

2.5.4 ნახაზზე მოცემულია გამოსახულება, რომელიც მიღებულია, როდესაც „ხმაურის“ ფილტრაცია ხდებოდა ფილტრით, რომელიც ხორციელდებოდა სხვა გასაშუალოების ფილტრის მიხედვით.

$$\text{Ncons} := \text{scale} (\text{orthosmooth5} (\text{N}), 0, 255) \quad (2.5.5)$$



Ncons

ნახ. 2.5.4 გამოსახულება, მიღებული
ხმაურის გზით, გაფილტვრით

Nmed

ნახ. 2.5.5 ხმაურიან გამოსახულებაზე
მედიანური ფილტრით ზემოქმედების
შედეგად მიღებული გამოსახულება

ნახ. 2.5.3 და ნახ. 2.5.4-ზე მოცემული გამოსახულებების შედარება გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა: ვეივლეტ-სიმეტრიული გარდაქმნა გაცილებით კარგად ინარჩუნებს გამოსახულების კონტურებს ვიდრე სხვა წრფივი სახის ფილტრაცია. ცნობილია, რომ კონტურების შენარჩუნების მხრივ არაწრფივი ფილტრაცია, მაგ. მორფოლოგიური ან მედიანური უფრო კარგ შედეგებს იძლევა. შემდეგ ეტაპზე ჩვენ ვიმოქმედეთ ხმაურიან გამოსახულებაზე მედიანური ფილტრით.

$$\text{Nmed} := \text{scale}(\text{medfilt}(N), 0, 255) \quad (2.5.6)$$

ამ შემთხვევაში ნახ. 2.5.3-ის და ნახ. 2.5.5-ის შედარება ცხადყოფს, რომ ამ განსაკუთრებულ შემთხვევაში ვეივლეტ-სიმეტრიული ფილტრი, რომელიც შეიცავს 7 კოეფიციენტს, იძლევა უფრო კარგ შედეგს ვიდრე მედიანური ფილტრი, მიუხედავად იმისა, რომ ზოგად შემთხვევაში მედიანური ფილტრაცია გამოირჩევა უფრო კარგი შედეგებით კონტურების შენარჩუნების მხრივ, ვიდრე სხვა წრფივი სახის ფილტრები, რომელსაც მიეკითვნება ვეივლეტ ფილტრი.

თავი 2.6 დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაცია

წრფივი წინასწარმეტყველებით

დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური (დიკ) მოდულაცია მიეკუთვნება უწყვეტი სიგნალების ციფრული კოდირების მეთოდების იმ ჯგუფს, რომელსაც საფუძვლად უდევს სიგნალის წინასწარმეტყველების პროცესი. დიკ მოდულაციის დროს ხდება არა სიგნალის მიმდინარე მნიშვნელობის გადაცემა, არამედ გადაიცემა ნაწინასწარმეტყველევ მნიშვნელობათა შორის სხვაობის კოდირებული მნიშვნელობა, რომელიც გამოითვლება ადრე გადაცემული სიგნალების ერთობლიობის მიხედვით. სხვანაირად, არხში გადაიცემა ე. წ. სხვაობითი სიგნალი, ანუ წინასწარმეტყველების შეცდომის სიგნალი.

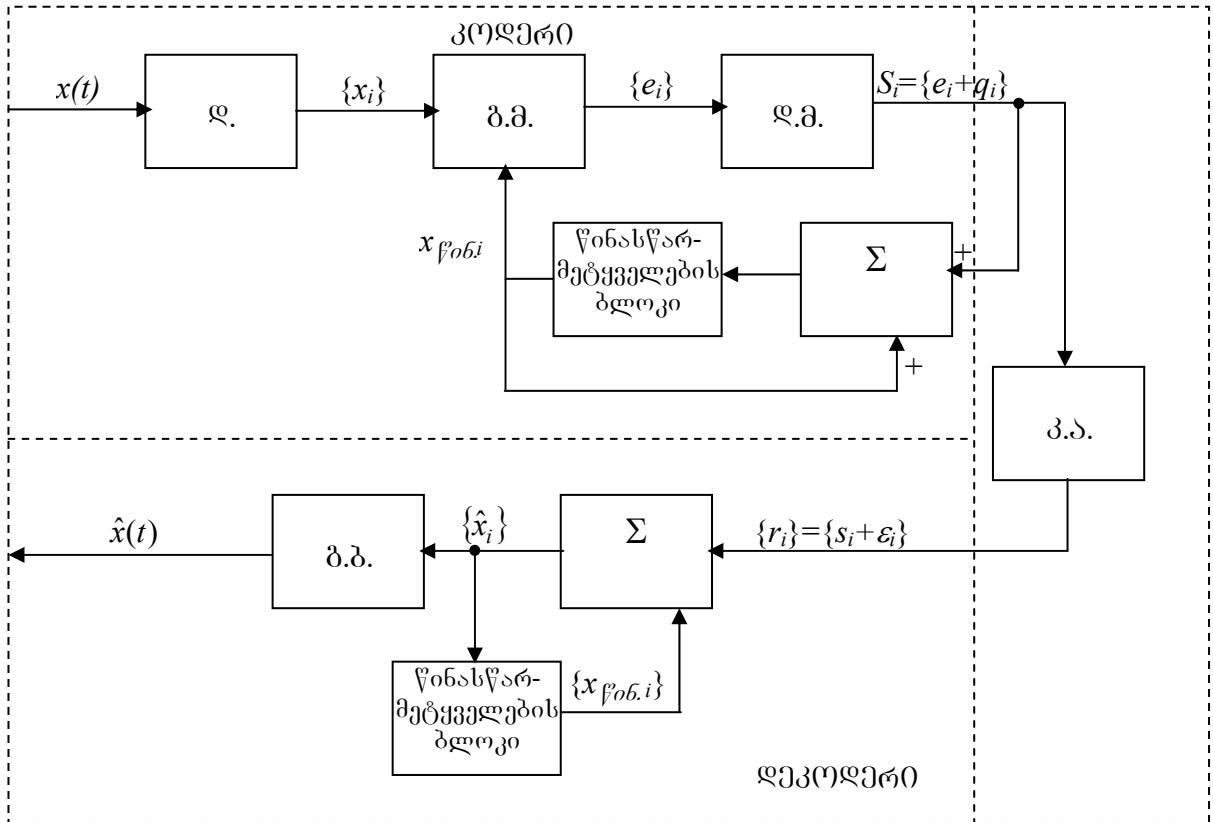
გამოსახულებათა სიგნალების ციფრული კოდირების პროცესი დიკ მოდულაციის საფუძველზე შედგება მთელი რიგი ეტაპებისგან, რომელიც მოიცავს უწყვეტი სიგნალების დისკრეტიზაციას, წინასწარმეტყველების შეცდომის სიგნალის ფორმირებას და დაკვანტვას, დაკვანტული სხვაობითი სიგნალის ციფრულ კოდირებას და სხვა. ყველა ამ ეტაპის პარამეტრების ოპტიმალური შერჩევა, თითოეული ეტაპის მიერ შეტანილი შეცდომის მინიმაციის მიზნით, მთლიანობაში განსაზღვრავს გამოსახულებათა დამუშავების სისტემაში დიკ მოდულაციის სიზუსტის მახასიათებლებსაც. ამ მახასიათებლების პარამეტრებზე არსებით გავლენას ახდენს კოდირებული სიგალების სტატისტიკა, აგრეთვე სიგნალების მიმღების მახასიათებლები.

სიგნალების ნაწინასწარმეტყველევი მნიშვნელობები შეიძლება ადრე გადაცემული ანათვლების წრფივი, ან არაწრფივი ფუნქცია იყოს. შესაბამისად დიკ მოდულაციაც არსებობს წრფივი და არაწრფივი წინასწარმეტყველებით. დღეისათვის ფართოდაა გავრცელებული დიკ მოდულაცია წრფივი წინასწარმეტყველებით, როდესაც ნაწინასწარმეტყველევი სიგნალი $x_{\text{წ}}^{n,i}$ განისაზღვრება მოსალოდნელი სიგნალების აწონილი ჯამით:

$$x_{\text{წ}}^{n,i} = a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \dots + a_{M_0} x_{i-M_0} = \sum_{j=1}^{M_0} a_j x_{i-j} \quad (2.6.1)$$

სადაც a_j – მოლოდინის კოეფიციენტია, M_0 კი იმ სიგნალების წინასწარი ათვლის რიცხვია, რომლებიც მონაწილეობენ $x_{\text{წ}}^{n,i}$ -ს ფორმირებაში. ეს რიცხვი ამავე დროს

განსაზღვრავს მოლოდინის რიგს, როდესაც $M_0=1$, გვაქვს I რიგის წინასწარმეტყველება, თუ $M_0=2$ – მეორე რიგის და ა.შ. ციფრული სიგნალების დაკ მოდულაციით დამუშავების სტრუქტურული სქემა წარმოდგენილია შემდეგ სქემაზე:



დაკ მოდულატორის კოდეკის სტრუქტურული სქემა

შესასვლელი $x(t)$ სიგნალის დისკრეტიზაცია ხდება f -დ სიხშირით, რომელიც განისაზღვრება გატარების ზოლის სიგნალის და ამ სიგნალის სპექტრის თვისებების მიხედვით. შედეგად მიღება ანათვლების $\{x_i\}$ თანამიმდევრობა ერთდროულად წინასწარმეტყველების ბლოკში განისაზღვრება x_{win} -ი მნიშვნელობები, რომლებიც გამოკლების ბლოკში (გმ) გამოაკლდებიდან x_i მნიშვნელობებს. ამრიგად ფორმირდება სხვაობითი სიგნალების მიმდევრობა, ანუ წინასწარმეტყველების შეცდომის სიგნალები:

$$e_i = x_i - x_{\text{err},i} \quad (2.6.2)$$

დაკვანტვის შეცდომის ნულთან ტოლობის პირობებში გვაქვს:

$$e_i = x_i - \sum_{j=1}^{M_0} a_j x_{i-j}. \quad (2.6.3)$$

დაკვანტავი მოწყობილობა (დ.3), თითოეულ e_i სიდიდეს ამრგვალებს დაკვანტვის უახლოეს დონემდე. ამასთან სხვაობა ეი-სა და ამ დონეს შორის ატარებს q_i დაკვანტვის შეცდომის სახელწოდებას. ამრიგად დაკვანტვას გამოსასვლელზე ფორმირდება სიგნალი:

$$s_i = e_i + q_i. \quad (2.6.4)$$

ამის შემდეგ s_i სიგნალი განიცდის კოდირებას და დაკვანტვის N დონისათვის გადაეცემა ორობითი ერთეულის კოდური კომბინაციებით რომლის სიგრძე განსაზღვრულია ფორმულით:

$$n = [\log_2 N] + 1, \quad (2.6.5)$$

სადაც $[\log_2 N]$ არის გამოსახულების მთელი ნაწილი. ამ კოდური კომბინაციების მიხედვით, დამუშავების სისტემაში ხელშეშლების არარსებობის შემთხვევაში დიკ მოდულაციის სისტემის მიმღებ მხარეს აღდგება დაკვანტვის დონები, ხოლო შემდეგ კი საწყისი სიგნალი, რომელიც არხში ხმაურის არარსებობის შემთხვევაში გადაცემული სიგნალებისაგან განსხვავდება დაკვანტვის q_i შეცდომის მნიშვნელობით.

MathCad პაკეტის მეშვეობით ჩვენ მივიღეთ წინასწარმეტყველებებით სიგნალის მნიშვნელობის მიღება მომავალ მომენტებისათვის.

განვიხილოთ მაგალითი:

X სიგნალისათვის, რომელიც მოიცავს $n=101$ ანათვალს და წარმოადგენს ჰარმონიულ სიგნალს და მასზედ დადებულ ხმაურს $\text{rnd}(4)$.

$$\text{n} := 0 .. 100 \quad X_n := \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{12}\right) + \text{rnd}(.4) - .2$$

MathCad პროგრამაში მოცემულია წინასწარმეტყველების მიღების ფუნქცია, რომელიც ანხორციელებს წინასწარმეტყველებას ვეივლეტ-ვოლკერის მეთოდის გამოყენებით:

$$M := 20 \quad m := 0 .. M - 1 \quad \text{sample } m := X_m$$

$$N := 6$$

$c := \text{yulew}(\text{sample}, N)$

სადაც sample არის ვექტორი, რომელიც შეიცავს M ანათვალს, რომლის მეშვეობით ხდება X ფუნქციის მნიშვნელობების განსაზღვრა N მომავალ მომენტებისათვის, $N - \text{უწოდებელ}$ წინასწარმეტყველების რიგს.

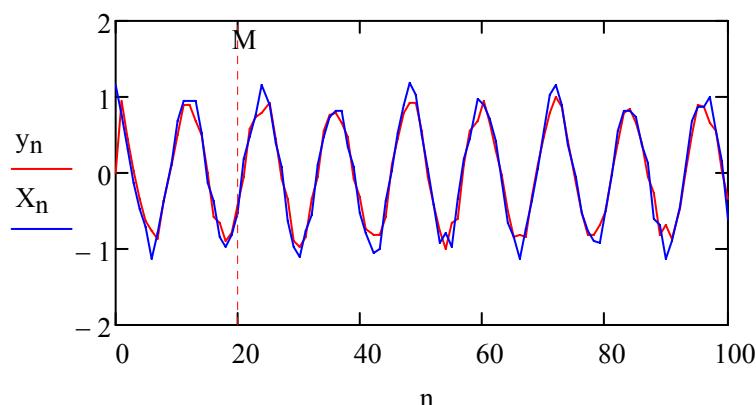
$$c = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.925 \\ 0.249 \\ -0.092 \\ 0.475 \\ -0.158 \\ 0.114 \end{pmatrix}$$

c – წარმოადგენს მომავალი მომენტებისათვის მიღებულ კოეფიციენტებს.

აღვნიშნოთ y_n -ის მნიშვნელობები, რომლებიც მიღება
წინასწარმეტყველების შედეგად.

$$k := 1..N \quad y_0 := 0 \quad y_n := -\left(\sum_k \text{if}(n - k \geq 0, c_k \cdot X_{n-k}, 0) \right)$$

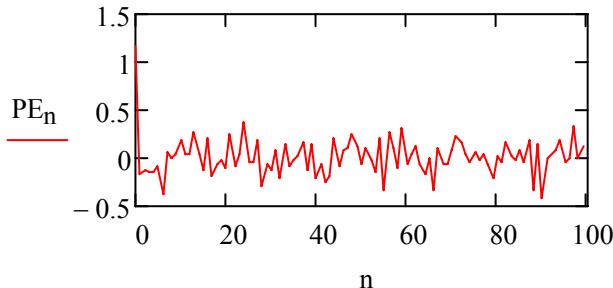
შემდეგ ნახაზზე შედარებისათვის აგებულია X' სიგნალი, რომლის მნიშვნელობების საფუძველზე მივიღეთ c_0, c_1, \dots, c_6 , კოეფიციენტები და შესაბამისად y_n ნაწინასწარმეტყველები მნიშვნელობები. გრაფიკიდან ვხედავთ, რომ მიღებულია კარგი შესაბამისობა x და y შორის.



ჩვენ აღვნიშნეთ, რომ დიკტ-ის შემთხვევაში კავშირის არჩეში გადაიცემა ნაწინასწარმეტყველები შეცდომა. შემდეგ გრაფიკზე მოცემულია ამ შეცდომების

დამოკიდებულება ანათვლების რაოდენობაზე, რომელიც მოღებულია
 $response(x, c, 100)$ ფუნქციის საფუძველზე.

$$PE := response(X, c, 100)$$



2.7 გამოსახულებათა მიმდევრობის დროითი წრფივი ინტერპოლაცია

გამოსახულებათა მიმდევრობებში კოდირების ინტერპოლაციის პრობლემა წარმოიქმნება იმ შემთხვევაში, თუ სიგნალის ციფრულ არხებში გადაცემის სიჩქარის შესამცირებლად გადამცემ მხარეში ხორციელდება გარკვეული რაოდენობის კადრების გამოტოვება გამოსახულებათა მიმდევრობიდან. ამ შემთხვევაში ინტერპოლაციის მიზანს შეადგენს გამოტოვებული კადრების აღდგენა მოცემულ დროის ინტერვალში მიღებული კადრების მეშვეობით. დასახული ამოცანის გადაწყვეტის მიღვნილია მრავალი ნამუშევარი [20,22,23]. მაგალითად [22]-ე ნამუშევარში შემოთავაზებულია უბრალო გამეორება უახლოეს მიმღებში მიღებული კადრისა, ნაცვლად გამოტოვებული კადრებისა. მაგრამ, რადგანაც სიკაშაშის დროითი ცვლილება ხშირად გამოწვეულია მოძრავი ობიექტების მიერ, კადრების უბრალო გამეორების მეთოდი იწვევს მოძრავი ობიექტების წყვეტად გადაადგილებას. კიდევ ერთ მიღვომას ამ ამოცანის გადაწყვეტისა წარმოადგენს კადრებს შორის დროითი ფილტრაციით წრფივი ინტერპოლაციის მეთოდი [20], რომელიც დაიყვანება წონით გასაშუალოებაზე.

სივრცით-დროითი ინტერპოლაცია შეიძლება იყენებდეს ინტერპოლაციის არაწრფივ მეთოდებს, რომელიც ხორციელდება ვოლტერის სამგანზომილებიანი ფილტრის მეშვეობით [27]. შადაც ნაჩვენებია, რომ აღნიშნული კადრთაშორისი

ინტერპოლაციის მეთოდი ზრდის კოდირების ეფექტურობას, როცა ადილი აქვს ობიექტების ნელ გადაადგილებას. მაგრამ გამოყენებული კვადრატული ფილტრი მოითხოვს რთული გამოთვლების ძალიან დიდ რაოდენობას (4 კოეფიციენტს წრფივ ნაწილში და ათ კოეფიციენტს არაწრფივ ნაწილიში), შესაბამისად მისი გამოყენება შეიძლება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ინტერპოლაცია წარმოადგენს ერთადერთ ოპერაციას სივრცით-დროითი ადაპტური ინტერპოლაციის ამოცანებში, ხოლო გამოსახულების მიმდევრობის კოდირების დროს, როცა კადრთაშორისი ინტერპოლაცია პირამიდული მორფოლოგიური კოდირების ეფექტურობის ამაღლების დამათებითი საშუალებაა, ჩვენ ვთვლით, რომ შეიძლება შემოვიფარგლოთ წრფივი ინტერპოლაციით, რადგან მისი ტექნიკური შესრულების სიმარტივე (გამოთვლებისათვის ნაკლები დროითი დანახარჯი) თამაშობს პირველხარისხოვან როლს, მითუმეტეს, რომ წრფივ მეთოდებთან შედარებით პიკური სიგნალ-ხმაურის ფარდობა (სხვა) იზრდება არაუმეტეს 1 დბ-ით (უმეტეს შემთხვევებში რამდენიმე მეათედი დბ-ით) მაშინ, როდესაც კადრთაშორისი ინტერპოლაცია წარმოადგენს კომბინირებული მეთოდის ერთ-ერთ ოპერაციას.

ცხადია, რომ კადრთაშორისი წრფივი ინტერპოლაციის მეთოდი შეიძლება გაუმჯობესდეს, თუ შესაძლებელი გახდება ინტერპოლაცია შეუსაბამდეს კადრში მოძრაობას. მისათვის შეიძლება გამოვიყენოთ ადაპტურ-წრფივი მეთოდი [64], რომელსაც მივუსადაგებთ ჩვენს ამოცანას. შემდეგ ნახაზზე მოცემულია იმ ელემენტების სქემატური განლაგება, რომლებიც გამოიყენებიან ადაპტურ-წრფივი ინტერპოლაციის დროს.

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & J \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & X & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} A' & B' & C' \\ D' & E' & F' \\ G' & H' & J' \end{pmatrix}$$

სურ. 2.7.1

წრფივი ინტერპოლაციის გამოყენებისას გამოტოვებულ კადრებში ელემენტის აღსადგენად (ინტერპოლაციისათვის), ელემენტი $I(x, y)$ (სადაც I - ინტენსივობაა (x, y) კოორდინატების მქონე ელემენტისა), გამოიყენება E

პოზიციის მქონე ელემენტის ინტენსივიბა $(k-1)$ კადრში და შესაბამისად E (იმავე) პოზიციაზე მდებარე ელემენტის ინტენსივობა $(k+1)$ კადრში. ეს იძლევა კარგ შედეგს, თუ E ელემენტი არ გადაადგილდა $(k-1)$ კადრიდან $(k+1)$ -ში კადრის ცვლილების განმავლობაში იმ შემთხვევაში, თუ დავუშვებთ, რომ მისი ინტენსივობის ცვლილება გამოწვეულია მხოლოდ გადაადგილებით. თუ ადგილი აქვს ელემენტის გადაადგილებას, მაშინ მიზანშეწონილია (k) კადრში ელემენტის ინტენსივობა აღვადგინოთ იმ ელემენტის ინტენსივობით $(k+1)$, რომელიც $(k-1)$ კადრის ელემენტთან უფრო კორელიზებულია. მეტად კორელიზებული ელემენტის ძებნა ხორციელდება გარკვეულ არეში ინტენსივობების სხვაობის განსაზღვრით, ნახ. 2.7.1-ზე წარმოდგენილი არე შეიცავს 9 ელემენტს ფორმით 3×3 . აღდგენაში მონაწილეობს ის ელემენტი, რომლის სხვაობაც მოცემულ ელემენტთან $(k-1)$ კადრში უმცირესია. ატჰად სისტემა იძლევა საშუალებას ძებნის არის ფართი იცვლებოდეს 3×3 , 5×5 და 7×7 ელემენტებით.

ძებნის ალგორითმს გააჩნია შემდეგი სახე: ვთქვათ მიმღებში მიღებულია მორფოლოგიური პირამიდული აგების შედეგად $(k-1)$ და $(k+1)$ კადრები და უნდა მოხდეს (k) -ური კადრის აღდგენა. დავუშვათ, რომ $(k-1)$ – წარმოადგენს $B1$ გამოსახულებას, $(k+1)$ – $B2$ გამოსახულებას, ხოლო მათი სხვაობა წარმოადგენს M გამოსახულებას.

$$M = B2 - B1 \quad (2.7.1)$$

წრფივი ინტერპოლაციის გამოყენებისას, წრფივი ინტერპოლაციის შედეგად მიღებული იჯ კოორდინატების მქონე ელემენტი აღვნიშნოთ $I_{i,j}$ –ით, მაშინ:

$$I_{i,j} = \frac{B2_{i,j} - B1_{i,j}}{2} = \frac{B1_{i,j} + M_{i,j} + B1_{i,j}}{2} = B1_{i,j} + \frac{M_{i,j}}{2} \quad (2.7.2)$$

ეს სამართლიანია იმ შემთხვევაში, როცა $B2_{i,j} - B1_{i,j}$ ნაკლებია ჩვენს მიერ აღებულ ზღურბლზე, თუ (2.7.1) სხვაობა აღემატება ამ ზღურბლს, მაშინ აღდგენაში მონაწილეობა უნდა მიიღოს წინასწარ მოცემულ არეში იმ მეზობელმა ელემენტმა, რომლის სხვაობა $B1_{i,j}$ –სა და მას შორის მინიმალურია, აღვნიშნოთ იგი $\hat{M}_{i,j} = \min(c)$, c –თი აღვნიშნოთ ბლოკი, რომელიც შეიცავს 3×3 , 5×5 და 7×7 ელემენტს. ამ შემთხვევაში (1.8.3.2) გამოსახულებაში $M_{i,j}$ –ს ნაცვლად უნდა

ჩავსვათ. ეს შეიძლება **MathCad** სისტემის გამოყენებით დაიწეროს შემდეგნაირად, თუ ამ ზერხით აღდგენილ გამოსახულებას აღვნიშნავთ KI –თ:

$$KI = if(\hat{M}_{i,j} < \delta, \frac{B1_{i,j} + B2_{i,j}}{2}, B1_{i,j} + \frac{\hat{M}_{i,j}}{2}) \quad (2.7.3)$$

(2.7.3) გამოსახულებაში δ – არის წინასწარ აღებული ზღურბლი, რომელიც შეიძლება იღებდეს შემდეგ მნიშვნელობებს $\delta = 2, 4, 6, 8$
ექსპერიმენტები ტარდებოდა 4 მიმდევრობაზე. მიღებული შედეგები მოყვანილია 3.4 პარაგრაფში.

2.8 მეორე თავის დასკვნები

გამოსახულებათა შეკუმშვის ზემოთ განხილული ტექნოლოგიების ანალიზმა მათი ფრაქტალებთან ერთობლივი გამოყენებისა და კოდირებისეფექტურობის ამაღლების მიზნით გვიჩვენა:

1. მათემატიკური მორფოლოგის ოპერაციების საფუძველზე შესაძლებელია პირამიდული აგების განხორციელება, ამასთან მათემატიკური მორფოლოგის ოპერაციებს შორის საუკეთესო შედეგს იძლევა “opening” ოპერაცია;
2. დადასტურებულია, რომ პირამიდის ფორმირება, სადაც არაწრფივ ფილტრაციას ასრულებს მორფოლოგიური და მედიანური ფილტრები, შეიძლება განხორციელდეს ჩაკეტილი სახის სტრუქტურული სქემის საფუძველზე, რომელიც გამოიყენება არაორთოგონალური ტიპის პირამიდულ აგებებში. მორფოლოგიური პირამიდის აგება განხორციელებულია “opening” ოპერაციის გამოყენებით 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 , 7×7 ზომის, კვადრატული, ჯვარისებრი და რომბისებრი ფორმის მასტრუქტურიზებელი ელემენტებით, რომელთაგან უკეთესი სტატისტიკური მახასიათებლები მიიღება კვადრატული ფორმის 3×3 ზომის მასტრუქტურიზებელი ელემენტით;
3. გაანალიზებულია ვეივლეტ-გარდაქმნები გამოსახულებათა შეკუმშვის მიზნით და რეალიზაბულია ამ ფუნქციების შექმნა და ვეივლეტ ფუნქციების საფუძველზე სამდონიანი პირამიდის აგება **MathCad** პროგრამაში მოცემული მზა ფუნქციების მეშვეობით;

4. განხორციელებულია ტესტური გამოსახულებების შეკუმშვის პროცესი ტრანსფორმანტაში 10% და 1% კოეფიციენტების შენარჩუნებით. აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის პირობებში სხვა;

5. არაწრფივი ფილტრები, უკეთესად ახშობენ გამოსახულებაზე დადგებულ ხმაურს ვიდრე წრფივი, ასე მაგალითად $P=0,15$ ალბათობისათვის სხვა მორფოლოგიური ფილტრით გაფილტვრის შემთხვევაში ტოლი იყო 23.77დბ-ის, მედიანური ფილტრით გაფილტვრის შემთხვევაში – 23.313 დბ-ის, ხოლო წრფივი სახის ფილტრის, გაუსის ფილტრით გაფილტვრის შემთხვევაში – 17,612 დბ-ის. ალსანიშნავია ისიც, რომ ხმაურის ალბათობის მნიშვნელოვნად გაზრდის შემთხვევაში მორფოლოგიური ფილტრის ხმაურჩამხშობი თვისებები უმნიშვნელოდ იცვლება, $P=0,15$ -ის დროს სხვა =23.77 დბ-დან $P=0,4$ -ის დროს სხვა =22.817 დბ-ძღე, იმ დროს როცა მედიანური ფილტრის შემთხვევაში ხმაურის დადგბის ალბათობების ცვლილების იგივე შუალედში სხვა იცვლება 23.313 დბ-დან – 12.489 დბ-ძღე;

6. რეალიზებულია *Mathcad* პროგრამაში კადრთაშორისი დიფერენციალური-იმპულსური კოდური მოდულაცია წრფივი წინასწარმეტყველის ელემენტის გამოყენებით და აგრეთვე არაწრფივი (მორფოლოგიური) ტიპის ელემენტით. ნაჩვენებია, რომ მოდიფიცირებული მორფოლოგიური პირამიდა შეიძლება გამოყენებული იქნეს კადრთაშორისი დიფერენციალურ იმპულსურ კოდური მოდულაციის (დიპ) შექმნის დროს წიმასწარმეტყველების მნიშვნელობის მიღებისას და მიჩნეულ იყოს, როგორც გამოსახულებათა ეფექტური კოდირების ერთერთი მეთოდის, დიკმ-ის შემდგომი განვითარება – დიკმ არაწრფივი წინასწარმეტყველებით. რაც შეეხება ხმაურიანი გამოსახულების ვეივლეტ-ფილტრაციას, უნდა აღინიშნოს რომ როდესაც გამოიყენება ვეივლეტ სიმეტრიული ფუნქცია იმპულსური სახის ნორმალურად განაწილებული ხმაურის პირობებში. ვეივლეტ-გაფილტვრა უფრო კარგ შედეგს იძლევა, ვიდრე მედიანური ფილტრაცია;

7. ინტერპოლაციის სხვასხვა ალგორითმის გამოკვლევამ გვიჩვენა, რომ ორგანზომილებიანი ინტერპოლაციის (სივრცითი) შემთხვევაში ჩვენი ამოცანებისათვის, როდესაც ინტერპოლაციის ალგორითმი გამოიყენება პირამიდის მომდევნო დონისათვის, უფრო კარგი შედეგი მოღებული იყო წრფივი ინტერპოლაციის ალგორითმის გამოყენების დროს სპლაინურთან შედარებით,

რიცხვითი მაჩვენებლები მოყვანილი იქნება პარაგრაფში 3.5. რაც შეეხება დროით ინტერპოლაციას, რომელსაც გამოვიყენეთ კადრთაშორისი ინტერპოლაციისათვის (გამოტოვებული კადრების აღსაღებად), უკთესი შედეგები მიიღება იმ შემთხვევაში, როდესაც ინტერპოლაციაში მონაწილეობენ ერთნაირი კოორდინატების მქონე ანათვლები k და $k+1$ კადრების შესაბამისად. შემოთავაზებულია წრფივი დროითი ინტერპოლაციის მოდიფიცირებული ალგორითმი, რომლის დროსაც ინტერპოლაცია შეუსაბამდება კადრში მოძრაობას;

8. გამოსახულებათა კოდირების ზემოთ მოყვანილი ტექნოლოგიები შეიძლება მარტივად რეალიზებული იქნან *Mathcad* პროგრამაში და მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნან გამოსახულებათა ფრაქტალურ მეთოდებთან კომბინირების შემთხვევაში;

თავი 3. გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლება ფრაქტალური ალგორითმების შერწყმით სხვა ალგორითმებთან

3.1 კვლევის ამოცანები

სადისერტაციო სამუშაოს ერთ-ერთი ძირითადი მიზანია გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის ამაღლება კომბინირებული მეთოდების გამოყენებით. ამ სფეროში არსებული ლიტერატურის ანალიზიც ადასტურებს კომბინირებული მეთოდების გამოყენების მიზანშეწონილობას [1,2,3] მნიშვნელოვანი ყურადღებაა გადატანილი ჰაბრიდულ გარდაქმნებზე, როდესაც გამოსახულება იყოფა ვერტიკალურ ზოლებად, რომლთა მიმართ სრულდება კოსინუს გარდაქმნა, ზოლო შემდგომ ხდება მიღებული კოეფიციენტების კოდირება წინასწარმეტყველების მეთოდის გამოყენებით [13,20,22]. ჰაბრიდული გარდაქმნა ზორციელდება მოძრავი გამოსახულებების კოდირების დროს, როცა ორგანზომილებიანი კოსინუს გარდაქმნა ერწყმის კადრთაშორის წინასწარმეტყველებას. ნაყოფიერ შედეგს იძლევა პირამიდული კოდირების შერწყმა კადრთა-შორის ინტერპოლაციასთან [14,79]

შეიძლება დავასახელოთ ისეთი ავტორების ნამუშევრები როგორებიც არიან დევისი [9,42,58] და ჰებერტი [82] ავტორები ხაზს უსვამენ იმას, რომ ვინაიდან თვითმსგავსება წებისმიერ მასშტაბში - არის ფრაქტალების განმსაზღვრელი

თვისება, ხოლო გეივლეტ გარდაქმნას გააჩნია უნარი გამოყოს ინფორმაცია, რომელიც დამოკიდებულია მასშტაბურობაზე (გარჩევითუნარიანობაზე). ამიტომ ვევლეტ გარდაქმნა შეიძლება მივიჩნიოთ, როგორც ფრაქტალების ანალიზის ბუნებრივი ინსტრუმენტი [13,28], რის საფუძველზეც ავტორებმა ვეივლეტ-ფრაქტალურ კოდირებას უწოდეს შერეული კოდირება. ცნობილია [14,72], რომ კოდირების ეფექტურობა იზრდება არანაკლებ 10-15-ჯერ, თუ გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების კვლევის დროს ხდება მოდიფი-ცირებული მორფოლოგიური აგებების შერწყმა კადრთა შორის ინტერპოლაციასთან.

მესამე თავი ეძღვნება კოდირების კომბინირებული მეთოდების გამოყენებას კოდირების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით. კერძოდ ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდის შერწყმას კოდირების დიფერენციალურ იმპულსურ-კოდურ მოდულაციასთან ანუ კადრთაშორის წინასწარმეტყველების მეთოდთან და ინტერპოლაციასთან. ამის გამო მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ ჩაგვეტარებინა კვლევა, იმის თაობაზე, თუ რამდენი კადრის გამოტოვება შეიძლებოდა და აგრეთვე რა ტიპის ალბათობის განაწილებას ექვემდებარებოდა კადრთა სხვაობა. საქმე იმაშია, რომ დიკ მოდულაციის გამოყენებას აზრი აქვს მაშინ, როდესაც განაწილება მიეკუთვნება ლაპლასის განაწილების კანონს [8,24], ხოლო კადრთაშორისი ინტერპოლაციის გამოყენების დროს იმ კადრების ამოგდება შეიძლება, რომლებს შორისაც არსებობს კორელაციური კავშირი [20,22]. დისერტაციის მესამე თავი ძირითადად შეიცავს შედეგებს, რომლებიც ეხებოდა კადრთამიმდევრობის 1-2, 1-3, 1-4 ... 1-13 კადრებს შორის კორელაციის გამოთვლას. კადრთაშორისი დიკმ-ის გამოყენების მიზანშეწონილობის გასარკვევად ჩავატარეთ ექსპერიმენტი, რომელიც ემსახურებოდა მომდევნო კადრსა და ფრაქტალური შეკუმშვის შემდეგ დეკოდირებული გამოსახულების სხვაობის ჰისტოგრამის აგებას. ამ კვლევის შედეგები მოცემულია პარაგრაფში, რომელსაც ვუწოდეთ გამოსახულებათა მიმდევრობის ზოგიერთი სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრა, სადაც დადგენილია, რომ სწორედ ალბათობის განაწილების კანონის სახე და კორელაციის კოეფიციენტის რიცხობრივი მნიშვნელობის მიხედვით შეიძლება შეფასდეს კადრთაშორისი დიკმ-ისა და ინტერპოლაციის მეთოდების გამოყენების მიზანშეწონილობა და მათი გამოსახულებათა შეკუმშვის სხვა მეთოდებთან კომბინირების ეფექტურობა.

3.2 გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სხვა მეთოდებთან

შერწყმის ოპერატორული აღწერა

განვიხილოთ კომბინირებული კოდირებისადმი ოპერატორული მიდგომა ვეივლეტ-ფრაქტალური კოდირების მაგალითზე. სხვადასხვა მეთოდების შერწყმის დროს შეიცვლება მხოლოდ გარდაქმნის აღნიშვნა. დავუშვათ მოცემულია გამოსახულება $F \in J^N$, სადაც J^N აღნიშნავს ციფრულ გამოსახულებათა სივრცეს, რომლის ზომაა $N \times N$ და ყოველ პიქსელს გააჩნია ნაცრისფერი გრადაციის რომელიმე მნიშვნელობა. ავღნიშნოთ $W(F)$ -ით F გამოსახულების ვეივლეტ-გარდაქმნის ოპერატორი. თუ ფრაქტალურ გარდაქმნას აღვნიშნავთ G ოპერატორით, მაშინ ეს გარდაქმნა შეიძლება შემდეგი სახით ჩავწეროთ:

$$G(W(F)) \quad (3.2.1)$$

$$\tilde{F} = W^{-1}(I - G)^{-1}(H) \quad (3.2.2)$$

დასმული ამოცანის აუცილებელი მოთხოვნაა $\|G\| < 1$, ვინაიდან იგი უნდა აკმაყოფილებდეს ფრაქტალური შეკუმშვის პირობას [37,38,43].

კოდირების კომბინირებული ალგორითმი სიტყვიერად შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ შემდეგნაირად:

1. მოცემული F გამოსახულებისათვის ვაწარმოებთ ვეივლეტ-გარდაქმნას $F \rightarrow W(F)$. ვახდენთ გარდაქმნის შედეგად მიიღებულ ვეივლეტ-კოეფიციენტის დახარისხებას: ვტოვებთ მხოლოდ კოეფიციენტებს, რომლებიც აკმაყოფილებენ გარკვეულ პირობას. კერძოდ, კოეფიციენტის მნიშვნელობა უნდა აღემატებოდებს წინასწარ დაფიქსირებულ ზღვარს, წინაარმდეგ შემთხვევაში ეს კოეფიციენტი უტოლდება ფრაქტალური შეკუმშვის ოპერაციას;

2. ვახდენთ ფრაქტალურ შეკუმშვას გამოსახულებისათვის, რომელიც წარმოადგენს დარჩენილ ვეივლეტ-კოეფიციენტების ერთობლიობას. ეს ოპერაცია აღნიშნულია $G(W(F))$;

3. 3.2.2 ფორმულის მიხედვით ვახდენთ F გამოსახულების დეკოდირებას ;

გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის *PIFS* მეთოდის გათვალისწინებით გამოსახულებათა აღდგენა-დეკოდირება ხდება იტერაციული პროცესის განხორციელებით, რომელიც ითვალისწინებს ნებისმიერი გამოსახულებას, კერძოდ წინასწარ

აღებული ზომის ნაცრისფერ გამოსახულებას, რომელსაც $Y^{(o)}$ აღვნიშნავთ. შემდეგ ვიყენებთ G ოპერატორს, რომელიც ითვალისწინებს დომენების მიღებულ ოპერაციებს, რომელიც სრულდება იმისათვის, რომ იტერაცული პროცესის მეშვეობით მივიღოთ ვეივლეტ-კოეფიციენტების გამოსახულებები:

$$Y^{(n)} = G(Y^{(n-1)}) + H \quad (3.2.3)$$

შემდეგ ეტაპზე ვაწარმოებთ ვეივლეტ-შებრუნებულ გარდაქმნას $Y^{(n)}$ -ზე, რაც გვაძლევს საშუალებას აღვადგინოთ საწყისი გამოსახულება:

$$\tilde{F} = W(Y^n) \quad (3.2.4)$$

ცხადია, რომ \tilde{F} და F გამოსახულებები იქნებიან ერთმანეთისგან განსხვავებული, ვინაიდან ჩვენ მოვახდინეთ ფრაქტალური და ვეივლეტ-შეკუმშვა.

ფრაქტალური შეკუმშვის ალგორითმის გამოყენება ვეივლეტ-გარდაქმნილ არებზე და არა საწყისი გამოსახულებისათვის ანზორციელებს დამახინჯების აღმოფხვრას დეკოდირებული გამოსახულებისაგან. ეს იძლევა საშუალებას გავზარდოთ ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობა ფარდობით 65:1, გამოსახულებისათვის „ლენა“ ზომით 512×512 .

არსებობს ამოცანის გადაჭრის მეორე გზა: კერ ჩავატაროთ ვეივლეტ-გარდაქმნა, ხოლო შემდეგ მოვახდინოთ ფრაქტალური შეკუმშვა აღდგენილი გამოსახულებისათვის. ეს მეთოდი მნიშვნელოვნად ამცირებს მთლიანი კოდირების სიჩქარეს. აღნიშნული შერეული მეთოდების რეალიზაცია განხორციელებულია პროგრამით, რომელიც დაწერილია C++ პროგრამულ ენაზე.

3.3 კოდირების ეფექტურობის გაზრდა ფრაქტალური კოდირების შერწყმით მორფოლოგიურ აგებებთან

კოდირების ეფექტურობის გაზრდისათვის გამოვიყენეთ გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების კომბინირება გამოსახულებათა მორფოლოგიურ აგებებთან.

ექსპერიმენტები, რომლებიც ეხება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების შერწყმას მორფოლოგიურ აგებებთან, შესდგება ორი ნაწილისაგან:

- პირველი მდგომარეობს იმაში, რომ ფრაქტალური კოდირების წინ საწყისი გამოსახულება ექვემდებარებოდა წინასწარ გაფილტვრას მორფოლოგიური ფილტრით. როგორც ცნობილია [12,29], მორფოლოგიური ფილტრაცია

მიეკუთვნება გარდაქმნას არაწრფივი ოპერაციებს. ჩვენს შემთხვევაში ვიყენებდით ოპერაციას „opening“ (გახსნა) კვადრატული ფორმის სტრუქტურული ელემენტით, რომელიც შეიცავდა 3×3 პიქსელს. ცნობილია, რომ მორფოლოგიური ფილტრით დამუშავებული გამოსახულება არ შეიცავს დეტალებს, რომლის ზომაც მცირეა სტრუქტურული ელემენტის ზომაზე. ამის გამო საინტერესოა ვაჩვენოთ, თუ როგორ იძოქედებს ასეთი წინასწარი დამუშავება ფრაქტალურ კოდირებაზე.

ექსპერიმენტი ჩავატარეთ გამოსახულებისათვის „ლენა“. მიღებული შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 3.3.1. ვადარებდით საწყის და აღდგენილ გამოსახულებას. მიღებული შედეგების ანალიზი ცხადყოფს, რომ გამოსახულებათა წინასწარი ფილტრაცია ჩატარებული მორფოლოგიური ოპერაციით აუმჯობესებს მიღებულ შედეგებს: კერძოდ გამოსახულების წინასწარი გაფილტვრა მორფოლოგიური ფილტრით ზრდის შეკუმშვის კოეფიციენტს და ამავე დროს აუმჯობესებს ს.ხ.პ.ფ. ≈ 1.2 დბ-ით.

ცხრილი 3.3.1 გამოსახულება „ლენა“-ზე ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები

გამოსახულების ზომა ლომეტრის რაოდგენია სტრიქონისა და სკეტჩი დომენების დონი	ასახვის დასაშვები ცვლილება.	კიბოვოთ საუკეთესო დომენი?	კადრის სიღრმე კვადრონის სიღრმე	დომენით რიცხვი	რანგული ბლოკების საქრთო რაოდგენია	საშუალო ცვლილება პიქსელებში. (APE) (%)	ს.ხ.პ.ფ. (dB)	გა		
256x256	16x16	2	0,0500	დიახ	6	1280	1582	2,5023	27,0922	10,36
	16x16	2	0,0400	დიახ	6	1280	1765	2,3727	27,3465	9,28
	16x16	2	0,0250	დიახ	6	1280	2293	2,1024	27,8538	7,15

მიღებულმა შედეგმა გვიჩვენა, რომ უფრო ეფექტურია გამოსახულების ფრაქტალური აგების კომბინირება წინასწარ გაფილტრულ მორფოლოგიურ ფილტრთან, რადგანაც $\text{შპ}=10,4$, გამოსახულების აღდგენის სიზუსტის მახასიათებელი ფასდება 27,1 დბ-ის ტოლი ს.ხ.პ.ფ. კოეფიციენტით.

ამრიგად, გამოსაკვლევი გამოსახულების წინასწარი ფილტრაცია მორფოლოგიური ფილტრით ზრდის შეკუმშვის კოეფიციენტს და ერთდროულად აუმჯობესებს აღდგენილი გამოსახულების სიზუსტის მახასიათებლებს. შესაბამისად, ეფექტურობის ამაღლების მიზნით მიზანშეწონილია წინასწარ განხორციელდეს

მორფოლოგიური ფილტრაცია, რამდენადაც არაწრფივი ტიპის ეს ოპერაცია გამოსახულებაში განაცალკევებს ძირითადისაგან მცირე დეტალებს და ამასთან ერთად არ კუმშავს კონტურს.

ექსპერიმენტების მეორე ნაწილი ეხებოდა პირამიდის აგებას [24], რომელიც დაფუძნებულია მორფოლოგიური ოპერაციების გამოყენებაზე. ამ შემთხვევაში ფრაქტალური კოდირება ხორციელდება პირამიდის წვეროზე [14,27], რომელიც შეიცავდა 64×64 პიქსელს. ცხადია, რომ ამ შემთხვევაში ფრაქტალური მეთოდით დამუშავებული გამოსახულების კოდი, რომელიც გადაცემულ უნდა იქნეს ხაზში, მოითხოვს 16-ჯერ ნაკლებ ინფორმაციის რაოდენობას. გარდა ამისა დისერტაციის III თავში (პარაგრაფი 3.4.4), ჩვენ აღვნიშნეთ, რომ ფრაქტალური კოდირების შედეგების დამოუკიდებლობამ დეკოდირებული გამოსახულების ზომაზე, შესაძლებელი გახადა ფრაქტალური კოდირების განხორციელება ორდონიანი მორფოლოგიური პირამიდის წვეროზე (64×64 პიქსელით) და დეკოდირება სასტარტო გამოსახულებაზე (ზომით 256×256 პიქსელი).

ამრიგად „უმტკივნეულოდ“ დეკოდირების დროს ფრაქტალური მეთოდით დამუშავებული და აღდგენილი წვეროს ზომა გავზარდეთ 4×4 -ჯერ და შემდგომ კი მისთვის ჩავატარეთ ყველა ის ოპერაცია, რომელიც აუცილებელია პირამიდული კოდირების დროს. შედეგები მოცემულია ცხრილში 3.3.2.

ცხრილი 3.3.2 პირამიდული კოდირების შედეგები აღდგენილი წვეროს ზომისცვლილებისას

გამოსახულების ზომა	დომენების რაოდენობა სტრიქონსა და სეტში	დომენების დონე	ასახვის დასაშვები ცოდნებისას.	ვიპოვოთ საუკეთესო დომენი?	ტეალიზის სიღრმე	დომენთა რიცხვი	რაზეული ბლოკების საჭრო რაოდენობა	საშუალო ცლომილება აიქსელებები, (APE) (%)	ს.ხ.პ.ფ. (dB)	ცვლილები
64×64	8×8	2	0,0250	დიახ	6	320	1912	2,2841	27,32	2,14
									25,97	34.24

მიღებული შედეგების ანალიზი ცხადყოფს, რომ კოდირების უფერტურობა (შეკუმშვის კოეფიციენტი) ამაღლდა 16-ჯერ, გამოსახულების ს.ხ.პ.ფ.-ის შემცირებით $27,32 - 25,97 = 1,35$ დბ-ით.

3.4. ფრაქტალური ალგორითმის შერწყმა ვეივლეტ-გარდაქმნასთან და პირამდასთან

ციფრული გამოსახულებები თანამედროვე ინფორმაციული სამყაროს მნიშვნელოვანი შემადგენელი ნაწილია. გამოსახულებათა ეფექტური კოდირების პრობლემის გადაჭრა უაღრესად აქტუალური ამოცანაა, რომელიც სტიმულს ანიჭებს მეცნიერებისა და ტექნიკის მრავალი დარგის შემდგომ განვითარებას.

როგორც ცნობილია, ეფექტური კოდირება გულისხმობს შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდას დეკოდირებული გამოსახულების მისაღები ზარისხის შენარჩუნების პირობებში. გამოსახულებათა შეკუმშვის თანამედროვე მეთოდების [1,2,3] ანალიზი გვიჩვენებს, რომ შეკუმშვის ალგორითმებს შორის ყველაზე საინტერესოა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდებისა და ვეივლეტ-გარდაქმნების გამოკვლევა.

კოდირების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით შევეხოთ გამოსახულებათა ორეტაპიან შეკუმშვის პრობლემას და ორეტაპიანი კოდირებისათვის ჩავატაროთ გამოსახულების ვეივლეტ-ფრაქტალური და ფრაქტალურ-ვეივლეტურ კოდირებათა შერწყმის ექსპერიმენტული კვლევა. ექსპერიმენტული კვლევები შეიძლება განვიხილოთ როგორც დადასტურება თეორიული შედეგებისა, რომელიც ესება ფრაქტალურ და ვეივლეტურ კოდირებათა ეფექტურ შერწყმას.

შეკუმშვის ალგორითმების შეთავსების დროს შეკუმშვის კოეფიციენტი განისაზღვრება როგორც ცალკეულ გარდაქმნათა კოეფიციენტების ნამრავლი. შესაბამისად, ორეტაპიანი შეკუმშვის შედეგად შეკუმშვის კოეფიციენტის საბოლოო მნიშვნელობა გამო თვლება შემდეგი სახით:

$$K_{\text{სა}} = K_{\text{ფრ.}} \cdot K_{\text{ვეი.}}$$

ვეივლეტ-გარდაქმნა რეალიზებული იყო **MathCad** პროგრამული პაკეტის საშუალებით, ხოლო ფრაქტალური კოდირება განხორციელდა C⁺⁺ პროგრამულ ენაზე.

არსებობს პრინციპული განსხვავება იმაში, თუ როგორ შეიძლება ფრაქტალური და ვეივლეტური ალგორითმებისათვის ვმართოთ გამოსახულებათა ზარისხისა და შეკუმშვის კოეფიციენტის თანაფარდობა. ფრაქტალური მეთოდები იყენებენ კვადრო-ნის სქემებს, რომლებიც იმართება გარკვეული დასაშვები ცდომილებით. რაც უფრო მცირეა დასაშვები ცდომილება, მით უკეთესია

დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხი, მაგრამ ცდომილების შემცირებასთან ერთად იზრდება რანგული ბლოკების რიცხვი და შესაბამისად უარესდება შეკუმშვის უფერტურობის მაჩვენებლები. ამრიგად, მომხმარებელი წინასწარ განსაზღვრავს გამოსახულების ხარისხს და შემდეგ ანხორციელებს შეკუმშვას. ვერცხლები მეთოდები მომხმარებლს საშუალებას აძლევენ მართონ შეკუმშვის პროცესი დატოვებული კოეფიციენტებით და იძულებულია დაცმაყოფილდეს აღდგენილი გამოსახულების ხარისხით.

ნაშრომში მოყვანილია შედეგები, რომელიც მიღებულია გამოსახულებისათვის „ლენა“ (ნახ. 3.4.1), სადაც მცირე დეტალების რიცხვი დიდია, და გამოსახულებისათვის „სკოლა“, სადაც მცირე დეტალების რაოდენობა ნაკლებია. ვერცხლები-გარდაქმნები განხორციელდა ერთდონიანი პირამიდების აგების გამოყენებით [1] და ზღვრული პრინციპის მიხედვით შერჩეული 10%-იანი გარდაქმნის კოეფიციენტით.

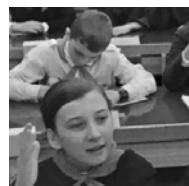
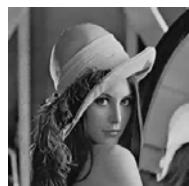
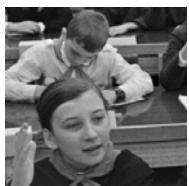
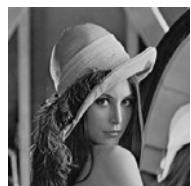
ფრაქტორული შეკუმშვის ძირითადი მახასიათებლები, მოყვანილია 3.4.1 და 3.4.2 ცხრილებში, ხოლო 3.4.1 ა და 3.4.2 ა ნახაზებზე წარმოდგენილია ვერცხლებული ფრაქტალური გარადქმნები.

ცხრილი 3.4.1 ფაქტორივი შეკუმშვის ძირითადი მახასიათებლები გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „სკოლა“

ერთოდონიანი ვერცხლებული ფრაქტალური გარდაქმნა + ფრაქტალური შეკუმშვა								
გამოსახულების დასახელება	დონეების რიცხვი სტრიქონებსა და სკეტებში	დომენების რიცხვი	რანგული ბლოკების რიცხვი	სიგნალ-ზმარის ფარდობა (დბ)	სიგნალ-ზმარის პიკური ფარდობა (დბ)	KC _f	KC _w	KC
ლენა	16 × 16	1280	4882	19.27	26.48	3.4	2.5	8.5
	8 × 8	320	5524	19.08	26.28	3	2.5	7.5
სკოლა	16 × 16	1280	3952	23.09	30.3	4	2.5	10
	8 × 8	320	5467	22.62	29.83	3	2.5	7.5

ცხრილი 3.4.2 ფაქტობრივი შეკუმშვის ძირითადი მახასიათებლები გამოსახულებისათვის „ლენა“ და „სკოლა“

ფრაქტალური შეკუმშვა ერთოდონიან ვეივლეტ-პირამიდაზე								
გამოსახუ- ლების დასახელე- ბა	დონეების რიცხვი სტრიქონებსა და სვეტებში	დომე- ნბის რიცხვი	რანგული ბლოკების რიცხვი	სიგნალ- წმაურის ფარდობა (დბ)	სიგნალ- წმაურის პიგური ფარდობა (დბ)	KC _f	KC _w	KC
ლენა	16 × 16	1280	4936	16.8	24.03	3.3	2.5	8.3
	8 × 8	320	5665	18.87	26.07	3	2.5	7.5
სკოლა	16 × 16	1280	4411	22.29	29.5	3.7	2.5	9
	8 × 8	320	5467	20.93	28.14	3	2.5	7.5



ნახ. 3.4.1

ნახ. 3.4.2

ნახ. 3.4.1 ა

ვეივლეტ-ფრაქტალური გარადქმნები

ნახ. 3.4.2 ა

უნდა აღვნიშნოთ, რომ KC_w აღებულია 2.5-ის ტოლად. ამასთან გავითვალისწინოთ, რომ ვეივლეტ-ტრანსფორმანტის კოეფიციენტის მნიშვნელობის გარდა გადაცემას ექვემდებარება ამ კოეფიციენტის მდებარეობის შესახებ ინფორმაციის გადაცემა, რაზედაც იხარჯება 4 ბიტი, მაგრამ თუ გადაცემას დავაკავშირებთ ტრანსფორმაციის ზედა მარცხნივ მყოფ კოეფიციენტებთან, მაშინ შეკუმშვა გაიზრდება ოთხჯერ, აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის დამაკმაყოფილებელი მაჩვენებლის პირობებში.

ცხრილში მოყვანილი შედეგების საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. კოდირების ეფექტი დამოკიდებულია გამოსახულების სახეობაზე: რაც უფრო მცირეა მკვეთრი გადასვლები, მით უკეთესია კოდირების შედეგები;
2. ორეტაპიანი კოდირება ფასდება ეფექტური კოდირების კოეფიციენტით: გამოსახულება „ლენასათვის“ K=K_f • K_w=8,5; აღდგენის ხარისხი ს.ხ.პ.ფ =26,48 (დბ). გამოსახულება „სკოლა“-სათვის K=10; ს.ხ.პ.ფ=30,3 (დბ);

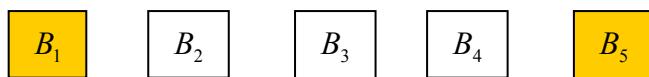
3. კოდირების პირველ ეტაპზე ვეივლეტ-გარდაქმნის რეალიზაცია შემდგომი ფრაქტალური შეკუმშვით უზრუნველყოფს უკეთეს შედეგებს როგორც ვიზუალურად, ასევე ს.ხ.პ.ფ (დბ) შეფასებით;

3.5 ფრაქტალური ალგორითმის შერწყმა დროით ინტერპოლაციასთან

იმისათვის, რომ გავზარდოთ ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობა, შესაძლებელია განვახორციელოთ ფრაქტალური კოდირების შერწყმა კადრთაშორის ინტერპოლაციასთან. შერწყმა ხორციელდება შემდეგი თანმიმდევრობით: ჯერ ხორციელდება ფრაქტალური კოდირება, შემდეგ ხდება რამოდენიმე კადრის გამოტოვება. ჩვენს შემთხვევაში სამი კადრის. მიმღებ მხარეში გადაიცემა 1,5... გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების შედეგები, ვინაიდან ვახორციელებთ სამი კადრის გამოტოვებას, ამ შემთხვევაში გადაცემას ექვემდებარებიან 1,5,9,13... კადრები. ყველა გადასაცემ კადრზე ხდება ფრაქტალური კოდირების განხორციელება.

მიმღებში ხდება გამოტოვებული კადრების აღდგენა წრფივი დროითი ინტერპოლაციის მეშვეობით [71].

ჩვენს შემთხვევაში, ანუ როდესაც ხდება ყოველი მეოთხე კადრის კავშირგაბმულობის ხაზებში გადაცემა, გამოტოვებული კადრების ინტერპოლაცია ხორციელდება წონითი კოეფიციენტების მიხედვით. ნახ. 3.5.1-ზე წარმოდგენილია მიმღებში მიღებული და აღსადგენი კადრების თანმიმდევრობა:



ნახ. 3.5.1 მიღებული და აღსადგენი კადრების თანმიმდევრობა

3.5.1 ნახაზზე გამუქებულად არის გამოყოფილი კადრები, რომლებიც გადაიცემა კავშირგაბმულობის არხებში. წონითი კოეფიციენტის სიდიდე განისაზღვრება აღსადგენი კადრის რიგითობის სიახლოვით აღდგენაში მონაწილე კადრთან [20,21]. ნახაზზე მოყვანილი მიმდევრობის მონაკვეთის B_2 კადრისათვის, B_1 კადრი მონაწილეობას მიიღებს $\frac{3}{4}$ წონითი კოეფიციენტით, ხოლო B_5 კადრი $-\frac{1}{4}$ -ის ტოლი წონითი კოეფიციენტით: B_3 კადრისათვის – ორივე B_1 და B_5 კადრები მონაწილეობენ

$\frac{1}{2}$ -ის ტოლი წონითი კოეფიციენტით, ხოლო B_4 კადრისათვის B_1 კადრი მონაწილეობას მიიღებს $\frac{1}{4}$ წონითი კოეფიციენტით, ხოლო B_5 კადრი $-\frac{3}{4}$ -ის ტოლი წონითი კოეფიციენტით. შესაბამისად, ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ დამოკიდებულებები:

$$B_{2(i,j)} = \frac{3}{4} B_{1(i,j)} + \frac{1}{4} B_{5(i,j)} \quad (3.5.1)$$

$$B_{3(i,j)} = \frac{1}{2} B_{1(i,j)} + \frac{1}{2} B_{5(i,j)} \quad (3.5.2)$$

$$B_{4(i,j)} = \frac{1}{4} B_{1(i,j)} + \frac{3}{4} B_{5(i,j)} \quad (3.5.3)$$

გამოკვლევები ჩავატარეთ 3 სხვადასხვა მიმდევრობისათვის, რომელიც შედგება 13 კადრისაგან: “ლომი”, “ბუნება”, “ზელოსნები” (ნახ. 3.5.2). სამივე მიმდევრობა შეიცავს სხვადასხვა რაოდენობის დეტალებს, კონტურებს და მოძრავ ფრაგმენტებს. მიღებული შედეგების ანალიზის შედეგად გადაწყვეტილ იქნა ფრაქტალური კოდირება ჩაგვეტარებინა 1, 5, 9 კადრებისათვის.



ნახ. 3.5.2

ცხრილი 3.5.1 ფრაქტალური კოდირებისას მიღებული შედეგები

გამოსახულება	კადრის ნომერი	ს.ს.პ.ფ.
ბუნება	1	22,758
	2	20,653
	3	19,563
	4	18,44
ლომი	1	29,312
	2	28,049
	3	27,108
	4	25,754
ზელოსნები	1	26,149
	2	25,048
	3	23,478
	4	21,560

მიღებული შედგებიდან ჩანს, რომ აღდგენილი გამოსახულების სიზუსტის მაჩვენებელი ს.ხ.პ.ფ დამოკიდებულია საწყისი გამოსახულების სახეობაზე: იქ სადაც მეტია დეტალების და კონტურების რაოდენობა ს.ხ.პ.ფ-ის მაჩვენებელი უფრო დაბალია, მაგ.: გამოსახულება “ბუნება”-სათვის ს.ხ.პ.ფ-ს მნიშვნელობა მეორე კადრისათვის 20,653-ის ტოლია, ხოლო გამოსახულება “ლომი”-სათვის შესაბამისად 28,049-ის. შეკუმშვის კოეფიციენტი დაახლოებით 100-ის ტოლია, იმიტომ რომ პირველი კადრისთვის k მიახლოებით უდრის 25-ს, იმ პირობებში, როცა ჩვენ გამოვტოვთ 4 კადრი.

ამრიგად, ექსპერიმენტის შედეგად დადასტურდა, გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობა კოდირების ფრაქტალური და კადრთაშორისი წრფივი ინტერპოლაციის მეთოდების შერწყმის შემთხვევაში, რის შედეგაც მივიღეთ შეკუმშვის კოეფიციენტის გაუმჯობესება 5-10-ჯერ რაც მიუთითებს ფრაქტალური კოდირების კადრთაშორის ინტერპოლაციის მეთოდთან შერწყმის შედეგად კოდირების ეფექტურობის ზრდაზე.

3.6 ფრაქტალების, ვეივლეტების და კადრთაშორისი დიკმ კომბინირება

3.6.1. გამოსახულებათა მიმდევრობის სტატისტიკური მახასიათებლების აგება

გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების ეფექტურობის ამაღლება მოსალოდნელია იმ შემთხვევაში, როდესაც ამ მიმდევრობის სტატისტიკური მახასიათებლები აკმაყოფილებენ გარკვეულ პირობას [2,8]. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების ეფექტურობის შესწავლის მიზნით განვიხილოთ ინფორმაციის შეკუმშვის ისეთი მეთოდები რომლებიც სამართლიანია მხოლოდ მიმდევრობისათვის. ასეთ მეთოდებს მიეკუთვნება კოდირება კადრებსშორისი წინასწარმეტყველებით და კადრთაშორისი ინტერპოლაციით. ამ მეთოდების ზოგადი თვისებების ანალიზი მოცემული იყო მეორე თავში. იქ განხილული იყო წინასწარმეტყველების არსი წრფივი წინასწარმეტყველების ელემენტით, მაგრამ წინასწარმეტყველების როლი შეიძლება შეასრულოს არაწრფივმა ელემენტების

აგებამაც. არაწრფივ ელემენტად შეიძლება გამოვიყენოთ წინა კადრის ფრაქტალური შეკუმშვის დეკოდირებული გამოსახულებაც. დროითი დიფერენციალური იმპულსური კოდური მოდულაცია და სხვა სახის გარდაქმნა განხორციელდება ამ წინასწარმეტყველების შეცდომაზე [20,22]. ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ კადრთაშორისი დიკმ-ის გამოყენება შესაძლებელია მაშინ, თუ კადრებს შორის სხვაობითი გამოსახულების ინტენსივობის განაწილების ჰისტოგრამა იღებს ლაპლასის განაწილების სახეს. სწორედ ამ საკითხის გარკვევას ეძღვნება ჩატარებული ექსპერიმენტი. ჩვენ განვიხილეთ ორი მიმდევრობა: „ბუნება“ და „ხელოსნება“. მოვახდინეთ პირველი კადრის ფრაქტალური კოდირება, შემდეგ მისი აღდგენა, რის შედეგად განხორციელდა მე-2 კადრისათვის ნაწინასწარმეტყველი გამოსახულების აგება. შემდეგ ეტაპზე ეს სეგმენტი გამოვაკელით მეორე კადრის გამოსახულებას და მივიღეთ წინასწარმეტყველების შეცდომა. ამ სხვაობით გამოსახულებისათვის ავაგეთ ჰისტოგრამა და მისი შესაბამისი გრაფიკი, რაც ქვემოთაა მოცემული.

მიღებული შედეგები ცხადყოფს, რომ წინასწარმეტყველების შეცდომა, რომელიც ექვემდებარება გადაცემას მართლაც აღიწერება ლაპლასის განაწილებით. ექსპერიმენტი განმეორდა სხვა ნომრების კადრებისთვისაც და მიმდევრობა „ბუნებისთვის“. ექსპერიმენტმა დაადასტურა კადრთაშორისი დიკმ-ის გამოყენების სამართლიანობა. გარდა ამისა, ამ ექსპერიმენტმა დაამტკიცა რომ ფრაქტალური კოდირების გამოყენებით ნაწინასწარმეტყველები გამოსახულების მიღება შეიძლება მივიჩნიოთ, როგორც დიკმ-ის შემდგომი განვითარება – **დიკმ სისტემა არაწრფივი (ფრაქტალური) წინასწარმეტყველებით**, რაც არ იყო აქამდე ცნობილი.

შემდეგი ცდა ეხებოდა კადრთაშორის ინტერპოლაციის გამოყენებას და გამოსახულებათა მიმდევრობაში კადრებს შორის სტატისტიკური ურთიერთდა-მოკიდებულების განსაზღვრას. კადრებს შორის ურთიერთკავშირის ერთერთი ძირითადი მახასიათებელია კორელაციის კოეფიციენტი. ცდები ტარდებოდა ოთხი სხვადასხვა სახის მიმდევრობებზე: „ლომი“, „ბუნება“, „ხელოსნები“ და „ქარხანა“. კორელაცია გამოითვლებოდა 1-2, 1-3, 1-41-13 კადრებს შორის. ექსპერიმენტის შედეგები მოყვანილია მიმდევრობა „ბუნებისათვის“ [14,72].

მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე, ჩვენ გადავწყვიტეთ დროითი ინტერპოლაციის გამოყენებით ეფექტური კოდირება განგვეხორციელებინა ყოველი

მეოთხე კადრისთვის (1,5,9...), რაღაც ოთხივე მიმდევრობისათვის პირველსა და მეხუთე კადრებს შორის კორელაციის სიდიდე არ არის უფრო მცირე ვიდრე 0,6.

ჩვენ არ გვაქვს მოყვანილი სხვა სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრის შედეგები, ვინაიდან მხოლოდ ზემოთ მოყვანილი მახასიათებლები განაპირობებენ კადრთაშორისი დიკტ-ისა და წრფივი ინტერპოლაციის გამოყენების სამართლიანობას.

გამოსახულებათა „ლომი“-ს მიმდევრობისთვის ჩავატარეთ ცდები, რომელიც ეხებოდა კოდირებას კადრთაშორისი ინტერპოლაციის, ფრაქტალებისა და ვეივლეტ პირამიდის შერწყმით. როგორც ცნობილია [8,38], პირამიდის აგება ხორციელდება გაფილტვრის, დეციმაციისა და ინტერპოლაციის თანმიმდევრობითი განხორციელებით. იმისათვის, რომ განხორციელდეს შეკუმშვის კოეფიციენტის მიღება, აუცილებელია, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მოვახდინოთ გამოსახულების პირამიდული აგება ოპტიმალური დაკვანტვით ან კოსინუს-გარდაქმნების გამოყენებით.

იმისათვის, რომ კიდევ უფრო გავზარდოთ ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობა, შესაძლებელია განვახორციელოთ ფრაქტალების და კოდირების შერწყმა კადრთაშორის ინტერპოლაციასთან. შერწყმა ხორციელდება შემდეგი თანმიმდევრობით: ჯერ აიგება სამდონიანი ვეივლეტ პირამიდა პირველი გამოსახულებისათვის, რომლის შედეგად მიიღება გამოსახულება, რომლის ყველა არე LL , LH , HL და HH შეიცავს 64×64 პიქსელს. ვახდენთ LL წვეროს შეკუმშვას და შემდეგ აღდგენას ფრაქტალურ გარდაქმნს მიმღების მსარეს. ფრაქტალების უნიკალური თვისების (გარჩევითუნარიანობაზე დამოუკიდებლობა) საფუძველზე ვახდენთ ფრაქტალურ დეკოდირებას ზომით 256×256 , რომელსაც ვუმატებთ ოპტიმალურად დაკვნტულ LH , HL უბნების აღდგენილ ინტენსიონებს. შემდეგ ხდება რამოდენიმე კადრის გამოტოვება, ჩვენს შემთხვევაში სამი კადრის გამოტოვება, მიმღებ მსარეს გადაიცემა 1, 5, 9... გამოსახულებების აღმწერი ოპერაციები, ე. ი. გადაცემას ექვემდებარებიან 1, 5, 9, 13... კადრები. ყველა გადასაცემ კადრზე ხდება ფრაქტალური ვეივლეტ კოდირების განხორციელება.

მიმღებში ხდება გამოტოვებული კადრების აღდგენა წრფივი დროითი ინტერპოლაციის მეშვეობით. კადრების დასახელება იყო: $B_1, B_2, B_3 \dots B_{N-1}$, მიმღებ მსარეში ყოველი ყოველი მე-5 კადრის გადაცემის შემთხვევაში მიღებოდა $B_1, B_5 \dots$

კადრი. გამოტოვებული $B_2, B_3, B_4 \dots$, კადრების აღსადგენად, როგორც ზემოთ აღვწერეთ ვიყენებდით წრფივ ინტერპოლაციას.

შეკუმშვის შედეგად წვეროს ტრანსფორმაციაში თუ შევინარჩუნებთ 10%-ანი კოეფიციენტების რაოდენობას, მაშინ მივიღებთ დამატებით 2,5-ჯერ შეკუმშვას. ამ დროს ს.ს.პ.ჟ ფარდობა შემცირდება ყველა აღდგენილი კადრისათვის $\approx 5\text{-}6\text{dB}$ -ით. ცდების შედეგები მეტყველებენ იმაზე, რომ დროითი წრფივი ინტერპოლაცია იძლევა საშუალებას მკვეთრად ავამაღლოთ კომბინირებული მეთოდების ეფექტურობა.

ცდები ტარდებოდა 4 სხვადასხვა მიმდევრობის გამოსახულებებზე: “ლომი”, “ბუნება”, “ხელოსნები” და “ქრხანა”.



LOMI1



LOMI1

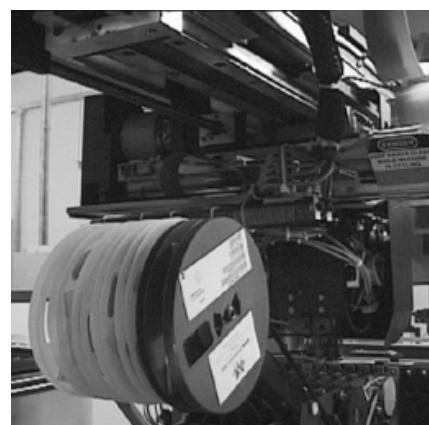
ნახ. 3.6.1.1 ა

ნახ. 3.6.1.1 ბ



LOMI1

ნახ. 3.6.1.1 გ



LOMI1

ნახ. 3.6.1.1 დ

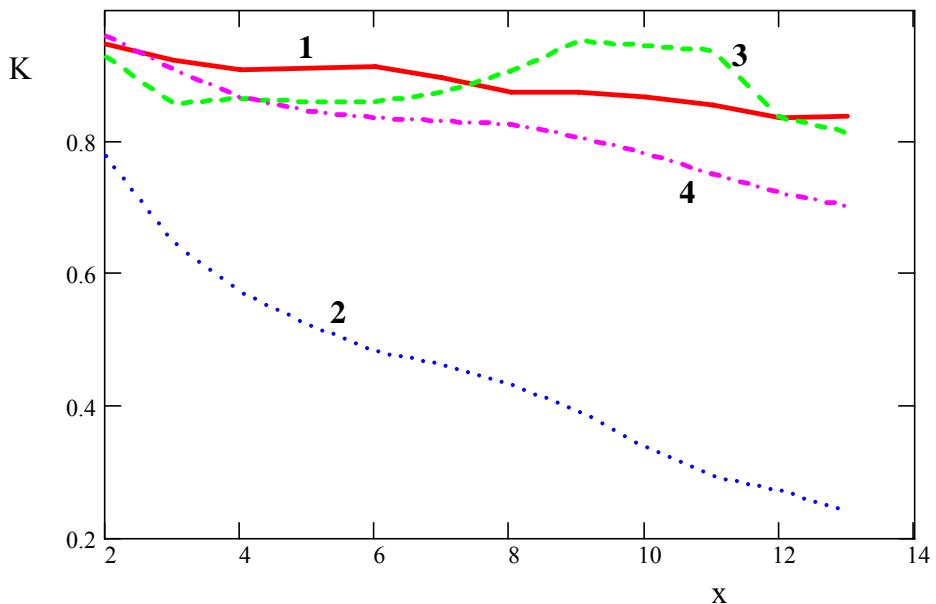
ნახ. 3.6.1.1

განსაზღვრას ექვემდებარებოდა შემდეგი სტატისტიკური მახასიათებლები: მათემატიკური ლოდინი (სიკაშვაშის საშუალო ინტენსივობა), დისპერსია, საშუალო კვადრატული გადახრა, ენტროპია, საშუალო გრადიენტი (მკვეთრ ცვლილებათა, ანუ კონტურების რაოდენობა), ანათვლების ინტენსივობათა განაწილების ჰისტოგრამები და კორელაციური ფუნქციები. იმის გამო, თითქმის ყველა სტატისტიკური მახასიათებელი საყოველთაოდ ცნობილია, ჩვენ წარმოვალებით მხოლოდ საშუალო გრადიენტის ამსახველ ფორმულას:

$$q = \frac{1}{M * N} \cdot \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \max \{|I(x, y) - I(x-1, y)|, |I(x, y) - I(x, y-1)|\} \quad (3.6.1.1)$$

სადაც $I(x, y)$ -ით არის აღნიშნული (x, y) კოორდინატების მქონე ანათვლების ინტენსივობა, ხოლო M და N გამოსახულებაში ანათვალთა რაოდენობა ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებით.

კადრებს შორის ურთიერთდამოკიდებულების ერთერთი ძირითადი მახასიათებელია კორელაცია. სურ. 3.6.1.2-ზე მოყვანილია გამოსახულებათა მიმდევრობებში, კადრებს შორის კორელაცია. კორელაცია გამოითვლებოდა 1-2, 1-3, 1-4, . . . 1-13 კადრებს შორის.



ნახ. 3.6.1.2 კორელაციის სიდიდეთა მრუდი, გამოსახულებათა მიმდევრობისათვის:
„ლომი“, „ბუნება“, „ხელოსნები“, „ქარხანა“

ნახ. 3.6.1.2-ზე მრუდი (1) შეესაბამება გამოსახულებათა მიმდევრობის „ლომი“ მომდევნო 12 კადრის კორელაციის სიდიდეს, თავისივე პირველ კადრთან მიმართებაში, მრუდი (2) – გამოსახულებათა მიმდევრობის - „ბუნება“ მომდევნო

12 კადრის კორელაციის სიდიდეს პირველ კადრთან შედარებით, მრუდი (3) – შეესაბამება გამოსახულებათა მიმდევრობის - “ზელოსნები” მომდევნო 12 კადრის კორელაციის სიდიდეს პირველ კადრთან შედარებით, ხოლო მრუდი (4) – გამოსახულებათა მიმდევრობის - “ქარხანა” მომდევნო 12 კადრის კორელაციის სიდიდეს პირველ კადრთან შედარებით.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, პირველი, მესამე და მეოთხე გამოსახულებათა მიმდევრობებისათვის პირველსა და მეცამეტე კადრებს შორის კორელაცია მნიშვნელოვნად არ მცირდება, კერძოდ: მიმდევრობისათვის “ლომი” იგი მცირდება 0.948–დან 0.839–მდე. მიმდევრობისთვის “ზელოსნები” – 0.929–დან 0.815–მდე, ამასთან აღსანიშნავია ისიც, რომ ამ მიმდევრობისათვის კორელაციის სიდიდე იზრდება მეხუთე კადრიდან მერვე კადრამდე 0.861–დან 0.952, ანუ პირველსა და მერვე კადრს შორის კორელაცია უფრო დიდია, ვიდრე პირველსა და მეორე კადრებს შორის, ხოლო მეცხრე კადრიდან კორელაცია კვლავ მცირდება, რაც გამოწვეულია მოცემულ მიმდევრობაში მოძრაობათა გამეორებით. მიმდევრობისათვის “ქარხანა” – კორელაცია მცირდება 0.961–დან 0.702–მდე. ხოლო გამოსახულებათა მიმდევრობა “ბუნება”–სთვის კორელაცია მცირდება 0.779–დან 0.241–მდე, რაც გამოწვეულია კადრში არა მარტო კონკრეტული ობიექტის მოძრაობით, არამედ მთლიანი კადრის გადაადგილებით. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე, ჩვენ გადავწყვიტეთ ეფექტური კოდირება დიგმ–ისა და დროითი ინტერპოლაციის გამოყენებით, განგვეხორციელებინა ყოველი მეოთხე კადრის გამოყენებით (1,5,9 ...), რადგან მოყვანილი ოთხივე მიმდევრობისათვის პირველსა და მეხუთე კადრებს შორის კორელაციის სიდიდე არ არის 0.3-ზე უფრო მცირე.

დიკმ–ის განსახორციელებლად გავითვალისწინეთ მეზობელ კადრებს შორის სხვაობის სტატისტიკური მახასიათებლები, რომელთა სიდიდები ჩვენ გამოვთვალეთ 5 კადრიანი მიმდევრობისთვის. ცხრილ 3.6.1.1 ა,ბ,გ,დ–ში მოყვანილია მიღებული კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკური მახასიათებლები.

ცხრილი 3.6.1.1 ა

სხვაობითი	2-1	3-2	4-3	5-4
მათ. ლოდ.	0.247	0.389	-0.412	0.389
დისპერსია	119.4	103.7	50.8	103.7
საშ. კვ. გად.	10.9	10.2	7.1	10.2
ენტროპია	4.076	4.052	4.033	4.052
საშ. გრად.	5.225	5.123	4.328	5.123

ცხრილი 3.6.1.1 ბ

სხვაობითი	2-1	3-2	4-3	5-4
მათ. ლოდ.	1.272	0.677	4.98	-4.302
დისპერსია	1206	1145	1105	1085
საშ. კვ. გად.	34.7	33.8	33.2	32.93
ენტროპია	6.782	6.706	6.689	6.67
საშ. გრად.	20.764	20.8	20.539	20.142

ცხრილი 3.6.1.1 გ

სხვაობითი	2-1	3-2	4-3	5-4
მათ. ლოდ.	-0.68	-1.193	0.397	0.943
დისპერსია	212.7	402.9	311.4	244.7
საშ. კვ. გად.	14.6	20.0	17.6	12.6
ენტროპია	4.227	4.399	4.284	4.046
საშ. გრად.	5.220	5.682	5.704	5.326

ცხრილი 3.6.1.1 დ

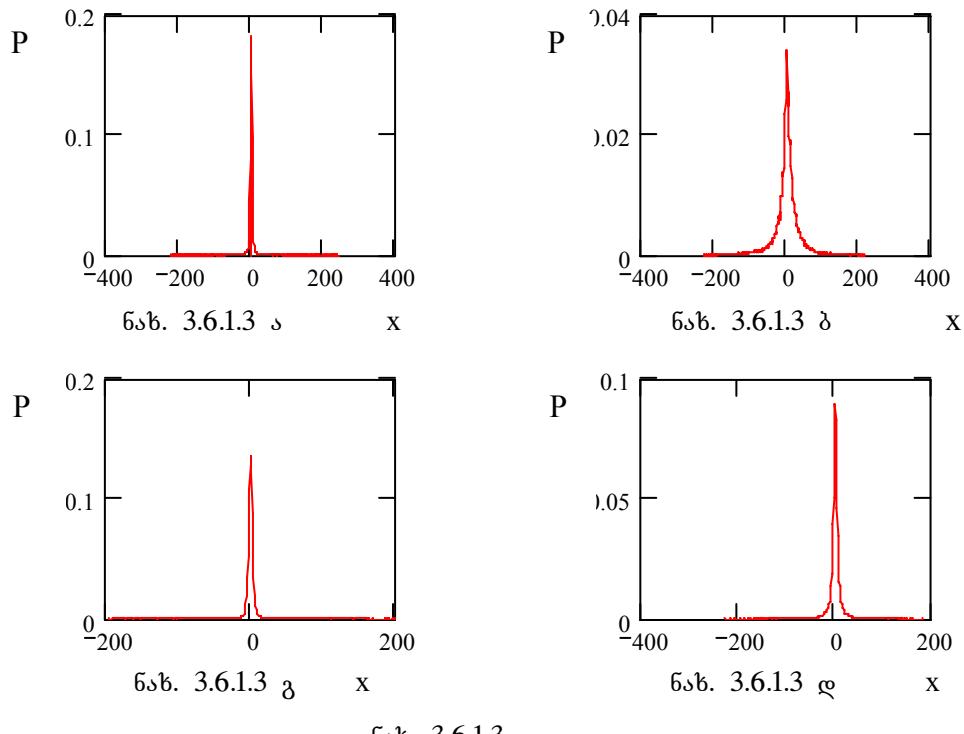
სხვაიბოთი	2-1	3-2	4-3	5-4
მათ. ლოდ.	0.612	0.509	-2.431	2.8
დისპერსია	268.4	188.7	124.2	63.8
საშ. კვ. გად.	16.4	13.7	11.9	8.1
ენტროპია	5.229	5.051	4.9	4.5
საშ. გრად.	12.09	10.4	9.1	7.3

ცხრილი 3.6.1.1ა - გამოსახულებათა მიმდევრობა “ლომი” – ს კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 ბ – გამოსახულებათა მიმდევრობა “ბუნება” – ის კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 გ – გამოსახულებათა მიმდევრობა “ზელოსნები” – ს კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკურ მახასიათებლები. 3.6.1.1 დ – გამოსახულებათა მიმდევრობა “ქარხნ” – ის კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების სტატისტიკური მახასიათებლები.

როგორც მოყვანილი ცხრილებიდან ჩანს, ყველა გამოსახულებისათვის მათემატიკური ლოდინი მცირეა და იცვლება – 4.3-დან 5 მდე, ხოლო ენტროპია არ აღემატება 6.8-ს.

მიღებულია აგრეთვე კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების ანათვალთა ინტენსივობების განაწილების ჰისტოგრამები, რომლებიც მოყვანილია ნახ.

3.6.1.3-ზე.



ნახ. 3.6.1.3

ნახ. 3.6.1.3 ა წარმოადგენს გამოსახულებათა კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების მეორე და პირველ კადრებს შორის მიღებული გამოსახულების ანათვალთა ინტენსივობების განაწილების ჰისტოგრამას მიმდევრობისთვის “ლომი”. ნახ. 3.6.1.3 ბ-ზე მოცემულია გამოსახულებათა კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების, მეორე და პირველ კადრებს შორის მიღებული გამოსახულების ანათვალთა ინტენსივობების განაწილების ჰისტოგრამა მიმდევრობისთვის “ბუნება”. ნახ. 3.6.1.3 გ და ნახ. 3.6.1.3 დ-ზე მოცემულია იგივე შინაარსის ჰისტოგრამები გამოსახულებებისათვის „ხელოსნები“ და „ბუნება“. ამასთან ცნობილია, რომ კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულების ანათვალთა ინტენსივობების განაწილების ჰისტოგრამა როცა ლაპლასის განაწილების სახეს,

მაშინ კადრთაშორისი დიკმ—ის გამოყენება მიზანშეწონილია ყველა გამოსახულებისთვის.

ჰისტოგრამები მოყვანილია მხოლოდ ერთი მიმდევრობისათვის, რადგან დანარჩენ შემთხვევაშიც აღნიშნული ჰისტოგრამები მნიშვნელოვნად არ განსხვავდებიან მოყვანილი ჰისტოგრამებისგან.

როგორც მოყვანილი ნახაზებიდან ჩანს, კადრთაშორისი სხვაობითი გამოსახულებების ანათვალთა ინტენსივობების განაწილებების ჰისტოგრამები იღებენ ლაპლასის განაწილების სახეს, მაგრამ განსხვავდებიან ნულოვანი მნიშვნელობების მოსვლის ალბათობებით. კერძოდ: გამოსახულებათა მიმდევრობა “ლომი” — სათვის 0–ნი მნიშვნელობების მქონე ინტენსივობების მოსვლის ალბათობა, მეორე და პირველ კადრებს შორის მიღებული გამოსახულებისათვის ტოლია = 0.197 გამოსახულებათა მიმდევრობა “ბუნება” — ში ნულოვანი მნიშვნელობების მქონე ინტენსივობების მოსვლის ალბათობა, მეორე და პირველ კადრებს შორის მიღებული გამოსახულებებისათვის ტოლია 0.038-ის. იგივე ალბათობები გამოთვლილი გამოსახულებებისათვის „ხელოსნები“ და „ლომი“ შესაბამისად შეადგენს 0,151 და 0,092-ს.

3.6.2 ფრაქტალების, ვეივლეტების და კადრთაშორისი დიკმ კომბინირება

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ სიგნალების წინასწარმეტყველების ელემენტი შეიძლება შეიქმნას როგორც წრფივი, ასევე არაწრფივი სახის ფუნქციით და განვიხილეთ მისი მორფოლოგიური აგების შემთხვევა. ამ პარაგრაფში განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც წინასწარმეტყველების ელემენტად გამოყენებული იქნება გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების მიერ შექმნილი გამოსახულება. ამავე დროს ჩვენს მიერ განხილული იყო ფრაქტალური კოდირების მეთოდის შერწყმა ვეივლეტ-გარდაქმნასთან. ნაჩვენები იყო, რომ ამ მეთოდის გამოყენება ეფექტურია მაშინ, როდესაც პირველად ხდება ვეივლეტ-გარდასახვა, ხოლო შემდგომ ფრაქტალური კოდირება. ეს ადვილად აიხსნება იმით, რომ ვეივლეტ-გარდაქმნა ანხორციელებს გამოსახულების ფილტრაციას და ამით იგი ხელს უწყობს ფრაქტალების ეფექტურობის ამაღლებას. როდესაც

კომპიუტერული მეთოდის შექმნაში მონაწილეობს კადრთაშორისი დიკ მოდულაცია და წინასწარმეტყველების როლს ასრულებს ფრაქტალებით დამუშავებული გამოსახულება, მაშინ ბუნებრივი იქნება ამ გამოსახულების გაასაცემი სხვაობა დავამუშავით ვეივლეტ-გარდაქმნით. ქსპერიმენტები ჩატარდა გამოსახულებათა მიმდევრობისათვის „ხელოსანი“, „ბუნება“. ქვემოთ მოყვანილია შედეგები, რომელიც მიღებულია გამოსახულებისათვის „ხელოსნები“. ექსპერიმენტის ჩატარების მიმდევრობა შემდეგია: პირველ ეტაპზე ჩვენ ვაყალიბებთ ფრაქტალურ კოდირებას საწყის გამოსახულებაზე ჩვენს მიერ არჩეული პარამეტრებით და ვლებულობთ რანგული ბლოკების რაოდენობას, რომელიც განაპირობებს შეკუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობას. მეორე ეტაპზე ვახორციელებთ დეკოდირებას. დეკოდირებული გამოსახულება **Photoshop** პროგრამის გამოყენებით გარდაიქმნება **.bmp** ფორმატში. მოცემულ გამოსახულებაში და გადაყვანილი იქნება **Matcad** პროგრამაში. ამ პროგრამაში მიიღება გამოსახულების შემდგომი კადრის და ფრაქტალურად დამუშავებული გამოსახულების სხვაობა (რაც გათვალისწინებულია დიკ მოდულაციით). მიღებული სხვაობითი გამოსახულება ექვემდებარება ვეივლეტ-გარდაქმნას შეკუმშვით. ჩვენს შემთხვევაში ვეივლეტ-ტრანსფორმანტაში შენარჩუნებული იქნება $2^{8 \times 2^8}$ პიქსელების 10%. ეს ინფორმაცია გადაიცემა არხში ან დამახსოვრებული იქნება მიმღებში, სადაც მას გაუკეთდება ვეივლეტ-შებრუნებული ოპერაცია ანუ სხვაობითი გამოსახულების აღდგენა. ამ ოპერაციის შედეგად აღდგენილი სხვაობითი გამოსახულება აჯამდება ფრაქტალურად დეკოდირებულ გამოსახულებასთან. ეს იქნება მეორე კადრის აღდგენილი მნიშვნელობა, რომელიც წარმოადგენს ნაწინასწარმეტყველებ ელემენტს შემდგომი ანუ მესამე კადრისათვის. ეს პროცედურა ჩატარდა კადრთა მიმდევრობისათვის, რომელთა რაოდენობა შეადგნდა 5 კადრს. გამოსახულებათა მიმდევრობისათვის „ხელოსნები“ დამუშავების შედეგები მოცემულია ცხრილში 3.6.2.1.

უნდა ავლიშნოთ, რომ ჩვენ აგრეთვე ჩავატარეთ ცდა, რომელიც ეხებოდა დეკოდირებული გამოსახულებისა და საწყისი გამოსახულების სხვაობისათვის ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენებას (განსხვავებით ამ გარდაქმნას გამოსახულებათა თანმიმდევრობისათვის). ეს გარდაქმნა დაფუძნებული იყო ვეივლეტ სიმეტრიული ფილტრის გამოყენებაზე, როდესაც აღდგენილ სხვაობით გამოსახულებას ვუმატებდით ფრაქტალურად კოდირებულ გამოსახულებას, ვლებულობდით

აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას, რომელიც რიცხობრივად შეესაბამებოდა სხაფ კოეფიციენტის გაზრდას ≈5 ლბ-ით. ამასთან ვიზუალურად სრულიად შეუმჩნეველი ხდებოდა ორიგინალურ და აღდგენილ გამოსახულებებს შორის განსხვავება. ამ ექსპერიმენტის შედეგი გვიჩვენებს, რომ ფრაქტალური მეთოდის გამოყენების შედეგად აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის გასაუმჯობესებლად შეიძლება რეკომენდირებული იქნას ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენება.

ქვემოთ მოცემული გვაქვს **Mathcad** პროგრამაში განხორციელებული მოძღვნო კადრის (*M2*) და წინა კადრის ფრაქტალურად კოდირებული და აღდგენილი *M* გამოსახულების სხვაობითი *MD* გამოსახულების მიღება.

```
M:=READBMP('D:\kadrebi\KADR3frf')
```

```
M2 := READBMR("D:\kadrebi\KADR4")
```



M2

ნახ. 3.6.2.1 ა მიმღევრობის საწყისი კადრი



M

ნახ. 3.6.2.1 ბ მიმღევრობის წინა კადრის ფრაქტალურად კოდირებული და აღდგენილი გამოსახულება



MD

ნახ. 3.6.2.1 გ მიმდევრობის M_2 კადრისა და
მისი წინა კადრის ფრაქტალურად
კოდირებული და აღდგენილი
გამოსახულებების სხვაობა

```
wavesort(W) := | q ← 0
                  for r ∈ 0..rows(W) - 1
                      for c ∈ 0..cols(W) - 1
                          WSq, 0 ← |Wr, c|
                          WSq, 1 ← r
                          WSq, 2 ← c
                          q ← q + 1
                  WS ← reverse(csort(WS, 0))
                  submatrix(WS, 0, rows(WS) - 1, 1, 2)
```

$\underline{L} := MD$

```
shrink(WS, n, W) := | Mrows(W)-1, cols(W)-1 ← 0
                      q ← 0
                      while q < n
                          | M(WSq, 0), (WSq, 1) ← W(WSq, 0), (WSq, 1)
                          | q ← q + 1
                      M
```

$\underline{J} := 4$

$$\text{scale}(M) := \begin{cases} \text{myMax} \leftarrow \max(M) \\ \text{myMin} \leftarrow \min(M) \\ \frac{M - \text{myMin}}{\text{myMax} - \text{myMin}} \cdot 255 \end{cases}$$

filter := symmlet(12) $N := \text{rows}(L)$

$$N_2 := \text{floor}\left(0.01 \cdot N^2\right)$$

$$W_s := \text{wavesort}(W_L)$$

$$W'_1 := \text{shrink}(W_s, N_1, W_L)$$

$$L_1 := \text{idwt}(W'_1, J, \text{filter})$$

$$W'_2 := \text{shrink}(W_s, N_2, W_L)$$

$$L_2 := \text{idwt}(W'_2, J, \text{filter})$$



$$W_L := \text{dwt}(L, J, \text{filter})$$

L

განვითარებული 3.6.2.2

$$N_1 := \text{floor}\left(0.1 \cdot N^2\right)$$

ცხრილი 3.6.2.1 კადრების სხვაობაზე ვეივლეტ გარდაქმნის განხორციელებისას ტრანსფორმაციაში 10% და 1% კოეფიციენტების რაოდენობის შენარჩუნებისას ს.ხ.პ.ფ.-ის შესაბამისი მნიშვნელობები

კადრების ნომერი	ტრანსფორმანტაში კოეფიციენტების რაოდენობა 1%	ტრანსფორმანტაში კოეფიციენტების რაოდენობა 10%
2-1	სხვფ=23.466	სხვფ =24.955
3-1	სხვფ=21.567	სხვფ =22.729
4-3	სხვფ =22.459	სხვფ =24.203
5-4	სხვფ =23.135	სხვფ =24.68

კოეფიციენტის 10%-ით შენარჩუნების დროს მივიღებთ:
MDECOD := $L_1 + M$



L_1

გახ. 3.6.2.3

MSCAL := scale(MDECOD)



MDECOD

გახ. 3.6.2.4

$A_{\text{max}} := \max(\text{MDECOD})$

immse(M, MDECOD) = 374.226

$$\text{PSNR1} := 10 \cdot \log \left(\frac{A^2}{\text{immse}(M, \text{MDECOD})} \right)$$

A1 := 255

PSNR1 = 22.459



MDECOD

ნახ. 3.6.2.5

$$A_{\text{max}} := \max(MDECOD2)$$

$$\text{immse}(M, MDECOD2) = 280.603$$

$$\text{PSNR2} := 10 \cdot \log \left(\frac{A^2}{\text{immse}(M, MDECOD2)} \right)$$

$$A = 271.76$$

$$\text{PSNR2} = 24.203$$

ზემოთ აღწერილი სამი მეთოდის კომბინირებით მიღებული შედეგის შეკუმშვის კოეფიციენტი გამოითვლება ცალკეული ოპერაციის დროს მიღებული შეკუმშვის კოეფიციენტების გამრავლებით.

$$C = K_{\beta^\alpha} \cdot K_{\beta^\alpha \beta^\beta} \cdot K_{\beta^\beta \beta^\beta}$$

$$K_{\beta^\alpha \beta^\beta} > 2$$

$$K_{\beta^\beta \beta^\beta} > 2,5$$

$$K_{\beta^\alpha} > 8$$

3.7 მესამე თავის დასკვნები

1. მოცემულია გამოსახულებათა კოდირების ფრაქტალური ალგორითმების სხვა ალგორითმებთან ვეივლეტ-გარდაქმნის შერწყმის ოპერატორული აღწერა, რომელმაც თეორიულად დაადასტრა კოდირების კომბინირებული მეთოდების გამოყენების სამართლიანობა და ეფექტურობა.

2. კოდირების ეფექტურობის გაზრდა შესაძლებელია ფრაქტალური კოდირების შერწყმით მორფოლოგიურ აგებებთან. გამოსახულების წინასწარი გაფილტვრა მორფოლოგიური ფილტრით ზრდის შეკუმშვის კოეფიციენტს და ამავე დროს აუმჯობესებს **სხ პვ≈1,2db-ით.** ფრაქტალური კოდირების შედეგების დამოუკიდებლობამ დეკოდირებული გამოსახულების ზომაზე შესაძლებელი გახადა ფრაქტალური კოდირების განხორციელება ორდონიანი მორფოლოგიური პირამიდის წვეროზე (64×64 პიქსელით) და დეკოდირება სასტარტო გამოსახულებაზე, 256×256 პიქსელების ზომით. ამან განაპირობა შეკუმშვის კოეფიციენტის ამაღლება $\approx34,24$ -მდე, აღდგენილი გამოსახულების **სხ პვ-ს 1,35-ით** შემცირებისას.

3. ფრაქტალური ალგორითმების შერწყმა ვეივლეტ-გარდაქმნასთან ითვალისწინებს ვეივლეტ-ფრაქტალურ და ფრაქტალურ-ვეივლეტ მეთოდების კომბინირებას. ვეივლეტ გარდაქმნის რეალიზაციამ კოდირების პირველ ეტაპზე, ხოლო შემდგომ ეტაპზე ფრაქტალური შეკუმშვის გამოყენებამ აჩვენა უფრო კარგი შედეგები ვიდრე საპირისპირომ: **სხ პვ-ის მნიშვნელობა გაიზარდა 2,5 dB-ით.**

4. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების შემთხვევაში ფრაქტალური ალგორითმის შერწყმამ წრფივ დროით ინტერპოლაციასთან მკეთრად აამაღლა კოდირების ეფექტურობა საშუალოდ $5\text{-}10$ -ჯერ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის $1\text{-}2$ dB-ით შემცირების პირობებში. შეკუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია გამოსახულებაში მყოფი მოძრავი ელემენტების რაოდენობაზე და მათი ცვლილების სიჩქარეზე კადრების მიხედვით. კოდირების ეფექტურობა გაიზრდება კიდევ $2,5\text{-}3$ -ჯერ, თუ ყოველ გადასაცემ კადრის კოდირებას წინასწარ წარმოვადგენთ ვეივლეტ-სამდონიანი პირამიდით.

5. ნაჩვენებია, რომ ფრაქტალების, ვეივლეტის და კადრთაშორისი დიკმ-ის კომბინირება გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების დროს ურთიერთთავსებადია, ზრდის შეკუმშვის კოეფიციენტს დაახლოებით $90\text{-}95$ -ის ტოლი მნიშვნელობამდე **სხ პვ 27,5-28 dB** ხარისხის აღდგენის პირობებში.

6. გამოსახულებათა და მათი მიმღევრობის კოდირების კომბინირებული მეთოდების ეფექტურობის შედარებამ აჩვენა, რომ ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი (110-120 ფარგლებში) მიიღება დროით ინტერპოლაციის შეკუმშვის მეთოდის გამოყენების დროს.

თავი 4. გამოსახულებათა შეკუმშვის JPEG სტანდარტის ახალი ვარიანტის შემუშავება

4.1 კვლევის ამოცანები

გამოსახულების ციფრული დამუშავების სფეროში ფართოდ გამოიყენება ვიდეოსიგნალების შეკუმშვის სტანდარტები, რომლებიც დადგენილია საერთაშორისო ექსპერტთა ჯგუფის მიერ (JPEG, MPEG). 1990-2000 წლებში ამ სტანდარტებით გათვალისწინებულია დისკრეტული კოსინუსური გარდაქმნის, კადრებს შორის წინასწარმეტყველების და ენტროპიული კოდირების მეთოდების ერთობლივი გამოყენება სიგნალების დასამუშავებლად. დღეისათვის დამუშავებულია გამოსახულების ციფრული კოდირების მრავალი ეფექტური მეთოდი [2,8,11,28,71]. ინფორმაციის შეკუმშვის ალგორითმების მნიშვნელოვანი როლი თანამედროვე ტექნიკაში ადასტურებს იმას, რომ მომხმარებლის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად 10 წლის წინ შემუშავებული JPEG და MPEG სტანდარტები უნდა განახლდეს. ამ თვალსაზრისით ერთ-ერთი საუკეთესოა შედარებით ახალი სტანდარტი JPEG-2000, რომელიც დაფუძნებულია ვეივლეტ-ფუნქციების გამოყენებაზე. ამ კონტექსტში ფრაქტალურმა მეთოდებმა, რომლებიც განიხილავენ გამოსახულებათა ფუნდამენტური სტრუქტურის მოდელირებას სრულიად ახალი პოზიციებიდან, შეიძლება მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანოს ახალი სტანდარტების შექმნაში და შეკუმშვის მეთოდების მწარმოებლობის ამაღლებაში.

გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების C^{++} ენაზე შედგენილი პროგრამის გამოყენებით დეტალურმა გამოკვლევამ გვიჩვენა, რომ სასარგებლო იქნება JPEG-2000 სტანდარტის განხორციელებისას, ვეივლეტ ტექნოლოგია შეცვლილი იქნას გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდით. ამიტომ

ჩვენ დავისახეთ მიზნად JPEG ჯგუფის სტანდარტის ახალი ვარიანტის შესამუშავებლად ჩავატაროთ შემდეგი სამუშაოები:

- JPEG-2000 სტანდარტის, როგორც ახალი სტანდარტის შესაქმნელად საბაზო ნიმუშის აღწერა;
- არსებული JPEG ჯგუფის სტანდარტების ძირითადი მოთხოვნების და მახსიათებლების ჩამოყალიბება და ვეივლეტ და ფრაქტალური ალგორითმების შედარებითი ანალიზი;
- ხელშემლათა მიმართ მდგრადი კოდირების გამოყენება ფრაქტალურად კოდირებული გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის ამაღლების მიზნით;
- JPEG ახალი ტიპის სტანდარტისათვის გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სამუშაო პროგრამის შედგენა;
- ფერად გამოსახულებათა ფრაქტალურ შეკუმშვაზე აგებული სტანდარტის შემუშავება;

4.2 JPEG 2000 სტანდარტის, როგორც ახალი სტანდარტის შესაქმნელად საბაზო ნიმუშის აღწერა

JPEG-2000 წარმოადგენს გამოსახულების შეკუმშვის საერთაშორისო სტანდარტს, რომელიც დამუშავდა Joint Photographic ექსპერტთა ჯგუფის კომიტეტის მიერ 2000 წელს, 1991 წელს დამუშავებული JPEG სტანდარტის გაუმჯობესების მიზნით [71]. JPEG-2000 წარმოადგენს გრაფიკულ ფორმატს, რომელიც დისკრეტული კოსინუს-გარდაქმნის ნაცვლად იყენებს ვეივლეტ-გარდაქმნას, რომელიც ეფუძნება სიგნალის წარმოდგენას გარკვეული ბაზური ფუნქციების სუპერპოზიციის სახით.

JPEG-2000 სტანდარტის გამოყენებით შეკუმშული გამოსახულება გამოირჩევა მეტი სიგლუვითა და სიმკვრივით. ამასთან ეს სტანდარტი დაზღვეულია მისი წინამორბედი სტანდარტის ძირითადი ნაკლოვანებისაგან, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ ფორმატი ვეივლეტების გამოყენების წყალობით არ შეიცავს ცნობილ „ცხაურას“ 8 პიქსელიანი ბლოკებიდან. ახალ ფორმატში, ისევე როგორც მის წინამორბედში უზრუნველყოფილია ე. წ. „პროგრესული შეკუმშვა“, რომელიც საშუალებას იძლევა ჩატვირთვის ზომის შესაბამისად ვიზილოთ ჯერ

გამოსახულების დაბალი ხარისხის ვერსია, ხოლო შემდეგ გაუმჯობესებული ხარისხის გამოსახულება.

JPEG-2000 სტანდარტის გააჩნია რიგი უპირატესობით წინამორბედ სტანდარტთან შედარებით, რომელთაგან უმთავრესია:

1. შეკუმშვის მაღალი ხარისხი: კერძოდ თუ არტეფექტები (artefect) უმნიშვნელოა, JPEG-2000-ს აქვს შეკუმშვის საშუალოდ 20%-ით უფრო მეტი შეკუმშვის ხარისხი, ვიდრე ჩვეულებრივ JPEG-ს. შეკუმშვის მაღალი ხარისხი მიიღწევა დისკრეტული ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენებით და ენტროპიული კოდირების მეტი სირთულით.
2. გამოსახულების ფრაგმენტების მასშტაბირების შესაძლებლობა: JPEG-2000 უზრუნველყოფს გამოსახულების სხვადასხვა კომპონენტების უნაწიბურო შეკუმშვას. ამასთან ბლოკებად დაყოფის წყალობით შესაძლებელია სხვადასხვა გადაწყვეტის გამოსახულებები მოვათავსოთ ერთ კოდურ ნაკადში.
3. პროგრესული დეკოდირება და სიგნალ/ხმაურის თანაფარდობის მასშტაბის ცვლილების შესაძლებლობა. JPEG-2000 უზრუნველყოფს კოდური პაკეტის ეფექტურ ორგანიზაციას, რომელიც საშუალებას იძლევა დავათვალიეროთ ფაილები დაბალი გარჩევისუნარიანობით და დაბალი ხარისხით.
4. შეკუმშვის შესაძლებლობა, როგორც დანაკარგებით ასევე დანაკარგების გარეშე. უდანაკარგო შეკუმშვა ხორციელდება მთელრიცხვა ვეივლეტ-გარდაქმნის გამოყენების შედეგად.
5. მდგრადობა შეცდომების მიმართ: JPEG-2000 მდგრადია ბიტური შეცდომების მიმართ, რომელიც შემოაქვს კავშირის არხებს. იგი მიიღწევა რესინქრონიზაციის მარკერების ჩადგმით, მონაცემთა კოდირებით მცირე დამოუკიდებელ ბლოკებად და თითოეული ბლოკის შიგნით შეცდომის აღმოჩენისა და ლოკალიზაციის მექანიზმის უზრუნველყოფით.

JPEG-2000 სტანდარტის გამოყენების ძირითადი სფეროები:

- მულტიმედიური მოწყობილობები (ციფრული კამერები, ციფრული ფაქსები, პრინტერები, სკანერები, მობილური კავშირგაბმულობის საშუალებები და სხვა) ;

- მომხმარებელ/სერვერული ურთიერთობები (გამოსახულებათა მონაცემების ბაზები, ინტერნეტი, ვიდეოსერვერები და სხვა) ;
- სენსორული მოწყობილობები, ციფრული მოწყობილობები/არქივი ;
- სამედიცინო გამოსახულებები ;
- სამსედრო (თანამგზავრული გამოსახულებები, მოძრაობათა აღმოჩენა, განაწილებული ქსელები და საცავები) ;
- ვიდეომასალის შენახვა.

JPEG-2000-ის მსგავსება შეკუმშვის სხვა ფორმატებთან:

JPEG-2000 სტანდარტს აქვს ბევრი მსგავსება ICER შეკუმშვის ფორმატთან, რომელიც გამოიყენება NASA-ს მიერ: აღნიშნული ფორმატი დამუშავდა ღია კოსმოსში მომუშავე მოწყობილობებში გამოსახულებათა შეკუმშვის მიზნით.

ICER სტანდარტი, ისევე როგორც JPEG-2000 დაფუძნებულია ვეოვლებზე და უზრუნველყოფს:

- პროგრესულ შეკუმშვას;
- შეკუმშვას დანაკარგების გარეშე;
- შეკუმშვას დანაკარგებით;
- იმ შეცდომათა კორექციას, რომლებიც ამცირებენ კოსმოსურ არხში მონაცემთა გადაცემის ეფექტს;

მნიშვნელოვანია აგრეთვე JPEG-2000 და ICER სტანდარტების ფუნქციური შესაძლებლობების თანხვდენა, რაც გამოიხატება შემდეგში:

- ორივე სტანდარტი უზრუნველყოფს გამოსახულების ბლოკებად დაყოფას შეკუმშვის ეფექტურობის ამაღლებისა და კავშირის არხის ეკონომიურად გამოყენების მიზნით;
- შეკუმშვის ორივე სტანდარტი იძლევა შეკუმშვის ხარისხის ცვლილების შესაძლებლობას გამოსახულების ზომებისაგან (ბაიტებისაგან) დამოკიდებულებით.
- JPEG-2000 იყენებს არითმეტიკას მცოცავი მძიმით, ხოლო ICER სტანდარტი იყენებს მხოლოდ მთელრიცხვა არითმეტიკას.
- JPEG-2000 და ICER იყენებენ ფერთა სხვადასხვა სივრცეს.

- ICER უკეთესად კუმშავს მონოქრომატულ გამოსახულებებს, ხოლო JPEG-2000 - ფერად გამოსახულებებს

4.3 JPEG-2000 სტანდარტების ძირითადი

მოთხოვნებისა და მახასიათებლების ჩამოყალიბება და ვეივლეტ-ფრაქტალური ალგორითმების შედარებითი ანალიზი

გამოსახულებათა შეკუმშვისათვის თანამედროვე და პერსპექტიულ მეთოდებს მიეკუთვნება გამოსახულების შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდი, რომელიც გამოსახულებას განიხილავს, როგორც ურთიერთდამოკიდებულებას მის ცალკეულ ფრაგმენტებს შორის [37,38,41].

ჩვენი მიზანია ჩატარდეს შედარებითი ანალიზი ვეივლეტ-გარდაქმნისა და გამოსახულების ფრაქტალურ შეკუმშვას შორის მათი მწარმოებლობის თვალსაზრისით. აგრეთვე ფრაქტალური ტექნოლოგიის გამოყენება შეკუმშვის ახალი სტანდარტის შესამუშავებლად, რომელიც JPEG 2000 სტანდარტის მსგავსია და ეფუძნება გამოსახულების დამუშავების ფრაქტალურ მეთოდს.

ფრაქტალური კოდირების მეთოდები და ვეივლეტ-გარდაქმნები მოცემულ გამოსახულებაში სტრუქტურის გასარკვევად იყენებენ ორ სხვადასხვა მიდგომას. ვეივლეტ-შეკუმშვა გარდაქმნის მეთოდების კლასს მიეკუთვნება, მაშინ როდესაც ფრაქტალური მეთოდები შენახული ინფორმაციის მოცულობის შემცირების მიზნით იყენებენ თვითმსგავსებას ნებისმიერი მასშტაბით [37,83]. მწარმოებლურობა ფასდება სამი პარამეტრით. ესენია შეკუმშვის კოეფიციენტი, გამოსახულების ხარისხი და დამუშავების დრო. ხარისხის შეფასება ხდება სიგნალ-ხმაურის პიკური ფარდობით. შეკუმშვის კოეფიციენტი გამოითვლება საწყისი გამოსახულების წარმოდგენისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობის შეფარდებით ბიტების იმ რაოდენობასთან, რომელიც გარდაქმნის შედეგის დამახსოვრებისთვისაა საჭირო [38,43].

ექსპერიმენტი ჩატარდა სხვადასხვა გამოსახულებისათვის. ნაშრომში მოყვანილია შედეგები ორი გამოსახულებისათვის: ესაა ტესტური გამოსახულებები „ლენა“ და „ზამთარი-1“, რომელთაგან მეორე გამოსახულება შეიცავს მაღალი

სიხშირის დეტალურ ინფორმაციას. პროგრამული უზრუნველყოფის დამუშავების საფუძველს წარმოადგენს ობიექტ-ორიენტირებული ბიბლიოთეკა C^{++} კლასიდან.

ნახ. 4.3.1-ზე მოცემულია საწყისი გამოსახულებები „ლენა“ და „ზამთარი“, ხოლო 4.3.2 ნახაზზე მოცემულია დამოკიდებულება სხპვ-ს დამოკიდებულება შეკუმშვის კოეფიციენტზე. (•) ტიპის მრუდი ფრაქტალური შეკუმშვის შედეგებია, ხოლო „(x)“ ტიპის მრუდი ვეივლეტ-გარდაქმნისა. გამოსახულებისათვის „ლენა“. 4.3.2 ბ-ნახაზზე მოყვანილია შედეგები „ზამთარი-1“ გამოსახულებისათვის.

სხპვ (დბ)

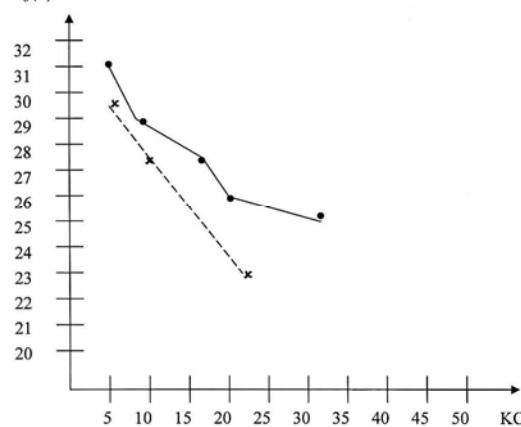


ნახ. 4.3.1 ა



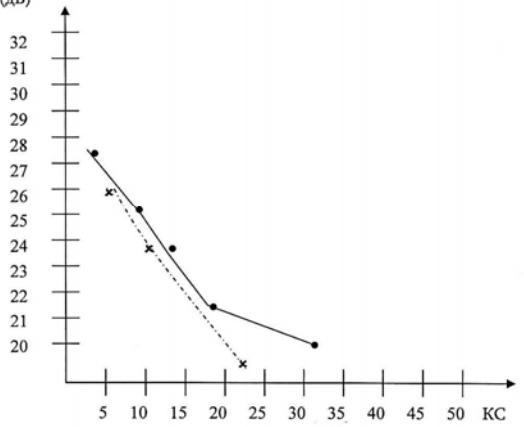
ნახ. 4.3.1 ბ

ПОСIII (дБ)



ნახ. 4.3.2 ა „ლენა“

ПОСIII (дБ)



ნახ. 4.3.2 ბ „ზამთარი“

შედეგების შედარება ადასტურებს ფრაქტალური შეკუმშვის დიდ ეფექტურობას: შეკუმშვის კოეფიციენტისა და გამოსახულების ხარისხის გარდა არსებობს მესამე პარამეტრიც – კოდირების სიჩქარე. ექსპერიმენტმა გვიჩვენა, რომ ვეივლეტ-გარდაქმნები ამ შემთხვევაში ნაკლებად მომვებიანია, მაგრამ ფრაქტალურ ალგორითმებს აქვთ კოდირების დაწეარების შესაძლებლობა პარალელური დამუშავების ხარჯზე, აგრეთვე თვითორგანიზებადი ნეირონული ქსელების გამოყენების საშუალება, რომელიც ახასიათებს პროგრამით გათვალისწინებული პროცესების თავისებურებებს [1,44]. უნდა აღვნიშნოთ, რომ დიდი მოცულობის გამოსახულებისთვის ზომით 512×512 პიქსელი, შეკუმშვის კოეფიციენტი ფრაქტალური შეკუმშვისას იზრდება თითქმის 4-ჯერ.

ფრაქტალური მეთოდის ზემოთმოყვანილი შედარება ვეივლეტ გარდაქმნასთან მიუთითებს ფრაქტალური მეთოდის უპირატესობაზე. ამრიგად შეიძლება ჩავთვალოთ მიზანშეწონილად „JPEG-2000“ ტიპის ახალი სტანდარტის დასამუშავებლად საფუძვლად ავილოთ გამოსახულების ფრაქტალური შეკუმშვა ვეივლეტ-გარადაქმნის ნაცვლად.

4.4 ხელშეშლათა მიმართ მდგრადი კოდირების (პემინგის კოდის)

გამოყენება ფრაქტალურად კოდირებული

გამოსახულების გადაცემის საიმედოობის ამაღლების მიზნით

სიგნალების გადაცემის ხარისხის მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით ფართოდ გამოიყენება შეცდომების აღმოჩენისა და შესწორების მეთოდები, რომლებიც ემყარებიან გადასაცემ შეტყობინებაში დამატებითი (ჭარბი) ინფორმაციის ხელოვნურად შეტანას. ტექნიკაში ამჟამად ფართოდაა გავრცელებული ხელშეშლების მიმართ მდგრადი კოდირების მეთოდები [20,22].

მაკორექტირებული კოდი – ეს არის კოდი, რომელიც ემსახურება იმ შეცდომების აღმოჩენას და აღმოფხვრას, რომლებიც წარმოიშვებიან ინფორმაციის გადაცემის პროცესში ხელშეშლების შედეგად. როგორც აღვნიშნეთ, ამ მიზნით გადამცემ სასარგებლო ინფორმაციას მიზანდასახულად უმატებენ სპეციალურად

შერჩეულ ჭარბ ინფორმაციას, რომლის მიმღებზე ამოკითხვის შედეგად შესაძლებელი ხდება შეცდომათა შესწორება.

მაკორექტირებელი კოდებიდან ერთ-ერთი ყველაზე ცნობილი და პრაქტიკაში გავრცელებულია ჰემინგის კოდი.

ჰემინგის კოდში მნიშვნელოვანია d კოდური მანძილის ცნება (მანძილი ორ კოდს შორის), რომელიც უდრის განსხვავებული თანრიგების რიცხვს. შეცდომის გასწორების შესაძლებლობა დაკავშირებულია მინიმალურ d_0 კოდურ მანძილთან. შესწორება ხდება იმ შეცდომების, რომლებიც ჯერადია $q = ent(d_0 - 1) / 2$ რიცხვისა და აღმოჩენა ხდება იმ შეცდომებისა, რომელთა ჯერადობა $d_0 - 1$, სადაც ent მიანიშნებს გამოსახულების მთელ ნაწილზე.

ჰემინგის კოდი $d_0 = 2$ მინიმალური კოდური მანძილით აღმოჩენს ყველა ცალკეულ შეცდომას. კოდი მინიმალური მანძილით $d_0 = 3$ უზრუნველყოფს ყველა ცალკეული და ორჯერად შეცდომების აღმოჩენას.

გადასაცემ ინფორმაციაზე შეცდომების ზედღება ხდება შემთხვევითი რიცხვების გენერატორის $rnd(x)$ ფუნქციის საშუალებით და რადგანაც ჩვენ ვმუშაობთ ორობით მონაცემებში, ამ ფუნქციამ შეიძლება მოგვცეს რიცხვები 0,0001-დან 0,9999-მდე.

ქვემოთ მოყვანილია პროგრამის ამონაბეჭდი, რომელიც შესრულებულია **MathCad** გარემოში, სადაც დეტალურად, კომენტარების სახით აღწერილია ექსპერიმენტის ეტაპები.

მიღებული შედეგები საშუალებას იძლევა:

- ა) აგაგოთ ნებისმიერი თანრიგიანობის ჰემინგის კოდი $d_0 > 2$ მინიმალური მანძილით (კოდური კომბინაციების უფრო მეტი სიგრძე არა რეკომენდებული პროგრამული დამუშავების ხანგრძლივობის გაზრდის გამო);
- ბ) მოვახდინოთ შეცდომების ზედღება და კორექტირება გადასაცემ კოდზე ($P < 0,01 \div 0,001$);
- გ) მოვახდინოთ მიღებული კოდის ხარისხის შეფასება მის ლურჯობაზე შემოწმებისა და კორექტირების შედეგ, შეცდომის აღმოჩენის შემთხვევაში ალგორითმის პრაქტიკული რეალიზაციის მაგალითის მიზნით გამოკვლეული იქნა ჰემინგის ჩამოკვეთილი (9;5) კოდი, სადაც კოდური სიტყვის თანრიგია 9

($n = 9$); ინფორმაციული ნაწილი 5 თანრიგი ($k = 5$), მამოწმებელი თანრიგები $r = 4$.

პროგრამა რეალიზდება შემდეგი თანმიმდევრობით:

- 1) ვპოულობთ კოდის მაქსიმალურ $n1$ სიგრძეს, ხოლო შემდეგ ვიღჩევთ ჩამოჭრილი კოდის სიგრძეს ($n = 9$) და კოდური კომბინაციების რიცხვს $N1$ -ს.
- 2) შემოგვყავს გამოსახულება „*Lena.bmp*“ ზომით 256×256 და ვპოულობთ მის პისტორამას.
- 3) ვაგებთ ორჯერადი კოდის მატრიცას *numb*-ბიტების რიცხვით და კომბინაციების *full* რიცხვით ფუნქციისათვის *KODN* (*FULL; NUMB*). საინფორმაციო კოდი შედგება 5 სვეტისაგან და 32 სტრიქონისაგან (კოდური კომბინაციების რიცხვი).
- 4) მამოწმებელი კოდების მატრიცა შედგება 4 სვეტისაგან და 9 სტრიქონებისაგან (კოდის სიგრძე).
- 5) განვსაზღვრავთ დამატებითი ბიტების პოზიციას ჰემინგის (9;5) კოდში ტრანსპონირების ფუნქციის მეშვეობით.
- 6) ვაზდენთ გამოკვლევას: თუ შემოკლებული კოდის მაქსიმალური პოზიცია უკანასკნელი მამოწმებელი ბიტის პოზიციაზე ნაკლებია, მაშინ საქმე გვაქვს შეცდომასთან (ERROR).
- 7) ვაგებთ ჰემინგის კოდს ისე, რომ მამოწმებელი კოდების პოზიცია იყოს 7 და ვადგენთ ამ კოდების მატრიცის ტრანსპონირებას.
- 8) ვაგებთ ცხრილს, რომელიც გვიჩვენებს აგების წრფივ კომბინაციას: ა) დამატებითი თანრიგები კოდის აგების დროს და ბ) მაკონტროლებელი – შემოწმების დროს. მაგალითად: გერტიკალში თანრიგის ნომერია $r01$, პორიზონტალში თანრიგების ნომერები, რომლებიც მონაწილეობენ დამატებითი თანრიგის, ე.ო. $r01 = r3 + r5 + r7 + r9$ და საკონტროლო თანრიგის, ე.ო. $r01'' = r3'' + r5'' + r7'' + r9''$ ფორმირებაში. ამ ცხრილის მიხედვით ვაგებთ ჰემინგის კოდს მამოწმებელი თანრიგებით, სადაც 10 სვეტი და 256 სტრიქონია.
- 9) ჰემინგის კოდის სრული აგების შემდეგ მატრიცაში ცალკე გამოვყოფთ დამატებით თანრიგებს.

- 10) შემოვიტანოთ ხმაური $P = 0,01$ ალბათობით და მოვახდინოთ მისი ზედდება აგებულ კომბინაციაზე.
- 11) გარდაგემნათ ჰემინგის კოდი, რისთვისაც ავაგოთ დამატებითი თანრიგები ხმაურის ზედდების შემდეგ ლუწობაზე შემოწმების გათვალისწინებით და მატრიცაში ცალკე გამოვყოთ დამატებითი თანრიგები კოდის რეკომენდაციის შემდეგ
- 12) ავაგოთ ცხრილი, რომლის დახმარებით განვსაზღვრავთ მატრიცის იმ სტრიქონებს, რომლებიც დამახინჯდნენ და ვახდენთ მათ ტრანსპონირებას.
- 13) განვსაზღვროთ მცდარი თანრიგების რაოდენობა $10 \cdot n$ -ბით სისტემაში $0 \leq cols(KON1) - 1$ -მდე და მოვახდინოთ ამ თანრიგების კორექტირება მონაცემების მიმღებ მხარეს მე-11 პუნქტში მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე.
- ზემოთ ჩამოთვლილი პუნქტების მიხედვით ***MathCad*** პაკეტში განხორციელებული იყო ჰემინგის კოდის შექმნა რომლის მინიმალური კოდური შუალედი $d=3$ -ს.

4.5. JPEG ტიპის ახალი სტანდარტისათვის გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სამუშაო პროგრამის შედგენა და გამოცდა

უკანასკნელ პერიოდში ინტერნეტის ქსელისა და სხვა მულტიმედიური საშუალებების სწრაფმა განვითარებამ განასაკუთრებით გაზარდა ინტერესი ინფორმაციის შეკუმშვის მიმართ. ამჟამად ფართოდ გამოიყენება შეკუმშვის სტანდარტული მეთოდები, რომელთა შორის შეიძლება დავასახელოთ JPEG ჯგუფის მიერ შექმნილი სტანდარტი, რომელიც ისევე როგორც გამოსახულების შეკუმშვის სხვა მეთოდები ვითარდება მისი სრულყოფის მიმართულებით. მაგალითად JPEG სტანდარტი, რომელიც ემყარება შეკუმშვის დისკრეტო-კოსინუსურ მეთოდს, და როგორც აღვნიშნეთ, ეს სტანდარტი განვითარდა JPEG 2000 სახით, რომელსაც საფუძვლად უდევს ვეივლეტ-გარდაქმნები [37,71].

ნებისმიერი ახალი სტანდარტი უნდა აკმაყოფილებდეს გარკვეულ მოთხოვნებს. [71] ლიტერატურაში ჩამოყალიბებულია ის მოთხოვნები, რომლებიც წაეყენება ყველა სტანდარტს, რომელიც ემსახურება გამოსახულებათა შეკუმშვას.

ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მოთხოვნას შეადგენს შეკუმშვის შედეგად აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის დამოკიდებულება შეკუმშვის კოეფიციენტის ცვლილებაზე ფართო დიაპაზონში. ქვემოთ აღწერილი სამუშაო ეძღვნება სწორედ ამ საკითხის გადაწყვეტას ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე.

შემოთავაზებული სტანდარტი ეფუძნება გამოსახულების ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდს და პროგრამულ რეალიზაციას. ექსპერიმენტი ჩატარდა სხვადასხვა სახის 10 გამოსახულებაზე, რომლებსაც გააჩნიათ განსხვავებული კონტურების რაოდენობა და სიუჟეტის მნიშვნელობა. 4 გამოსახულება მოყვანილია ნახ. 4.5.1 ა, ბ, გ, დ.



ნახ. 4.5.1 ა, ბ, გ, დ განსხვავებული კონტურების მქონე საწყისი გამოსახულებები

თითოეულ მათგანზე ჩატარდა ფრაქტალური კოდირება და დეკოდირება რომელიც შედგენილია C++ ენაზე. დეკოდირებული გამოსახულების ხარისხი ფასდებოდა საყოველთაოდ მიღებული პარამეტრით სიგნალ ხმაურის პიკური მნიშვნელობით (სხვ).

$$PSNR := 10 \cdot \log \frac{A^2}{immse^2} \quad (4.5.1)$$

სადაც immse-არის საშუალო კვადრატული ცდომილება, ხოლო A არის სიგნალის მაქსიმალური მნიშვნელობა.

ექსპერიმენტის მსვლელობა და ალგორითმის შესრულება შემოთავაზებული ფრაქტალური კოდირების პროგრამის მიხედვით შემდეგია:

შეკუმშვის შემდეგ გამოსახულების აღდგენის პროცესში, მაქსიმალური სასარგებლო ინფორმაციის და შეცდომების მინიმუმამდე შემცირების მიზნით, გადავწყვიტეთ კოდირების პარამეტრების შეცვლა შესაბამის პროგრამაში. დავიწყეთ დომენების სვეტებისა და მწკრივების რაოდენობის შეცვლა. პარამეტრების შეცვლას ვაწარმოებდით შემდეგი გზით: შევდივართ ფოლდერში Fw_code, ხოლო შემდეგ

ბრძანებაში Exe. Exe-დან ვხსნით პროგრამის გაფართოების ფაილს Img32.exe. Img სისტემაში შესვლისას File დირექტორიაში Open Encode Window ოფციაზე დაწკაპუნებით გავხსნათ კოდირების ფანჯარას, რაც გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ ჩვენთვის სასურველი სურათი (გამოსახულება), რომელიც აუცილებლად უნდა იყოს Bmp (bitmap) ფორმატში, ჩვენ შემთხვევაში ზომით 256×256 . გახსნის შემდეგ ეპრანზე ფანჯრის მარცხენა ზედა კუთხეში გამოტანილი Setup Image Encoding (სურათის კოდირების პარამეტრების დაყენება) ფუნქციაში შესვლით გვეძლევა საშუალება შევცვალოთ პარამეტრები ჩვენს შემთხვევაში, Domain Rows და Domain cols პარამეტრები.

თავად კოდირების პროცესი სრულდება შემდეგი თანმიმდევრობით. ჩამოვშლით ფუნქციას Run და შევდივართ ბრძანებაში Gray Image (რუხი სურათი). შემდეგ იგივე Run დან ვაძლევთ ფუნქციას Encode Image (სურათის კოდირება). პროგრამა გამოგვიტანს საკონტაქტო ფანჯარას, სადაც მითითებული იქნება დომენების Domain რაოდენობა და Ok ღილაკზე დაწკაპუნებით პროცესი იწყება. პროცესის დასრულების შემდეგ გამოვა ფანჯარა Encoding Data (კოდირების მონაცემები) სადაც მითითებულია კოდირების შედეგად მიღებული მონაცემები, მათ შორის ჩვენთვის საყურადღებო და მნიშვნელოვანი Rectangles (რანგული ბლოკების რაოდენობა), რომელიც იცვლება საწყის ეტაპზე Domain cols და Domain rows ცვლილების შესაბამისად. შედეგად მიღებულ რანგულ გამოსახულებას ვინახავთ ცნობილი გზით File (ფაილი) save as (შენახვა) და ვუთითებთ ჩვენთვის საჭირო დირექტორიას. შემდეგ შევდივართ ისევ File-ში და ვაძლევთ Open Range File (გახსენი რანგული ფაილი) და ვხსნით წინა ოპერაციით შენახულ ფაილს. ვხსნით ისევ Run და ვაძლევთ ბრძანებას Gray Image და გასრულებთ იტერაციულ პროცესს, ხოლო შემდეგ Run და Iterative Decoding (კოდირების იტერაცია) ფუნქციების გამოყენებით გამოგვაქვს ფანჯარა Iterations (იტერაციები), რომლის შემდეგ ბრძანება Ok მოგვცემს იტერაციების შესაბამის რაოდენობას.

ამ პროცესის დასრულების შემდეგ ვხსნით ფუნქციას File და ვაძლევთ ბრძანებას Open Subtraction Window, რომელიც გახსნის იმ ფანჯარას, რომელშიც Run image subtraction ბრძანება გვაძლევს საბოლოო მონაცემების ფანჯარას,

კერძოდ მონაცემებს Average Pixel Error (ფიქსელის საშუალო შეცდომა) და PSNR (სხვა).

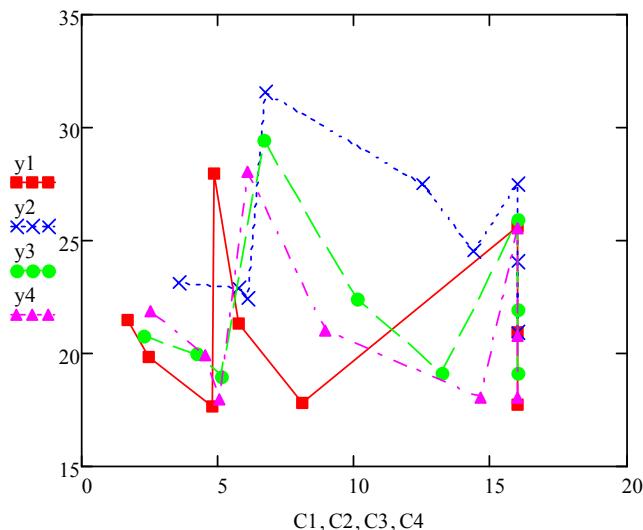
ა, ბ, გ, დ გამოსახულებებზე ჩატარებული ცდების საფუძველზე შევჩერდით ოპტიმალურ ვარიანტზე 16×16 , ანუ Domain Rows:=16 და Domain Cols:=16.

სხვა-ს დამოკიდებულება შეკუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობაზე მიიღებოდა 9 შემთხვევისათვის. ამ პარამეტრების ცვლილება მოითხოვდა რანგული ბლოკების სხვადასხვა რაოდნობას. რანგული ბლოკების რაოდენობა განაპირობებდა შეკუმშვის კოეფიციენტის ცვლილებას. შეკუმშვის კოეფიციენტი განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$C := \frac{2^8 \cdot 2^8}{\text{rang} \cdot 4} \quad (4.5.2)$$

ამ გამოსახულების მრიცხველი შეიცავს საწყისი გამოსახულების პიქსელების რაოდენობის ზომას რომელიც ჩვენ შემთხვევაში ტოლი იყო 256×256 . უნდა აღინიშნოს, რომ საწყისი გამოსახულების ზომის გადიდება განაპირობებდა შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდას, rang ეს არის რანგული ბლოკების რაოდენობა.

ექსერიმენტის შედეგად მიღებული სხვა ფუნქციის დამოკიდებულება შეკუმშვის კოეფიციენტზე ასახულია ნახ. 4.5.2-ზე მოცემული გრაფიკის სახით:



ნახ.4.5.2 ს.ხ.3.ფ. ფუნქციის შეკუმშვის კოეფიციენტზე
დამოკიდებულების გრაფიკი

y1 შეესაბამება გამოსახულებას „Leaves”, y2 შეესაბამება გამოსახულებას „Lena”, y3 გამოსახულებას „Berries”, ხოლო y4 გამოსახულებას „Winter”. ეს შედეგები მიღებულია **Mathcad** პროგრამული პაკეტის გამოყენებით.

ექსპერიმენტის მეორე ეტაპზე ჩვენ გვაინტერესებდა ექსპერიმენტული მონაცემების სტატიკური ანალიზის გამოყენებით [83], გაგვეგო ექსპერიმენტში განხილული ათი გამოსახულებისათვის მიღებული საშუალო მნიშვნელობა (მათემატიკური ლოდინის შეფასება), მისი საშუალო კვადრატული გადახრის შეფასება და ინტერვალური ცვლილება სანდო ალბათობის ცვლილების მიხედვით. სანდო ალბათობა იცვლებოდა 0.9-დან 0.99-მდე ინტერვალში. ჩვენ გამოვიყენეთ სტიუდენტის განაწილება ზემოთ მოცემული პარამეტრების განსასაზღვრავად, ვინაიდან გამოსახულებათა რაოდენობა იყო ათის ტოლი [83].

ექსპერიმენტი სრულდებოდა **Mathcad** პროგრამაში ქვემოთ მოცემული ალგორითმებით.

X შეესაბამება სხვა მნიშვნელობებს ათი სხვადასხვა გამოსახულებისთვის, როცა პარამეტრების მნიშვნელობები იყო საუკეთესო:

$$X := (30.6196 \ 32.7697 \ 31.9146 \ 25.9431 \ 31.9146 \ 31.5668 \ 27.9494 \ 29.4216 \ 28.0385)$$

$$n := \text{length}(X) \quad n = 10$$

n-არის გამოსახულებათა რაოდენობა. P-სანდო ალბათობაა, მოცემული პროცენტული. $\alpha := 0.1$

$$\text{სანდო ალბათობა} \quad 1 - \alpha = 90\%$$

$$P := 1 - \alpha$$

საშუალო კვადრატული გადახრის წერტილოვანი შეფასება:

$$\hat{s} := \sqrt{\frac{n}{n-1} \cdot \text{var}(X)}$$

ინტერვალის ზედა U და L ქვედა ზღვრები განვსაზღვრეთ სტიუარტის განაწილების კვანტილის ფუნქციის მიხედვით:

$$\text{mean}(X) = 29.709$$

$$\text{საშუალო მნიშვნელობა}$$

$$n - 1 = 9$$

$$t_{l0} := \text{qt}\left(1 - \frac{\alpha}{2}, df\right) \quad t_{l0} = 1.833$$

ინტერვალის ზედა ზღვარი

$$U := \text{mean}(X) + t_{1-\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad U = 30.944 \quad L = 28.473$$

ინტერვალის ქვედა ზღვრი

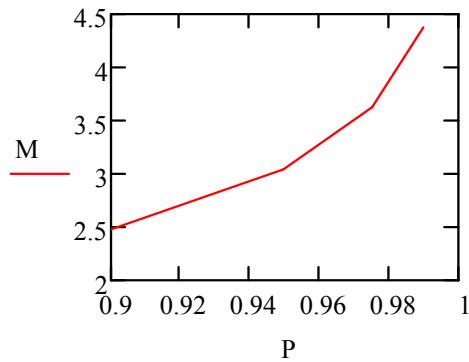
$$L := \text{mean}(X) - t_{1-\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$P := \begin{pmatrix} 0.99 \\ 0.975 \\ 0.95 \\ 0.90 \end{pmatrix}$$

$$M := \begin{pmatrix} 4.380 \\ 3.618 \\ 3.049 \\ 2.471 \end{pmatrix}$$

ინტერვალი აღინიშვება

$$M := U - L$$



ნახ. 4.5.3 ინტერვალის ზედა და
ქვედა ზღვრების
დამოკიდებულების გრაფიკი

ზემოთ მიღებული შედეგები გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასების რაოდენობრივი მაჩვენებელი სხვა შემცირდა შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდისას(2-16).
2. სტატისტიკური დამუშავების შედეგად გამოთვლილი სხვა მაჩვენებელის ინტერვალური შეფასების $U-L$ სიგანე გაიზარდა სანდო ალბათობის P -ს გაზრდისას.

4.6. ფერად გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის სტანდარტის შემუშავება JPEG სტანდარტების შესაბამისად

მოცემული პარაგრაფი ეძღვნება გამოსახულებათა შეკუმშვის ახალი სტანდარტის შემუშავების საკითხებს და მის პროგრამულ რეალიზაციას.

შემოთავაზებული სტანდარტი ეფუძნება გამოსახულებათა შეკუმშვის ფრაქტალური მეთოდის გამოყენებას. იგი აკმაყოფილებს ყველა მოთხოვნას, რომელიც წაყენებულია გამოსახულებათა შეკუმშვის JPEG-2000 სტანდარტის მიმართ და წარმოადგენს ამ სტანდარტის შემდგომ განვითარებას.

JPEG სტანდარტი ითვალისწინებს მთელი რიგი მოთხოვნების დაკმაყოფილებას, რომელთაც მიეკუთვნება:

1. შეკუმშვისა და აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის ურთიერთდამოკიდებულების პარამეტრების შერჩევის შესაძლებლობას მათი შეცვლის ფართო დიაპაზონში.
2. გამოსახულების დამუშავების პროცედურის უნივერსალობა, რაც გულისხმობს იმას, რომ იგი არ უნდა იყოს დამოკიდებული გამოსახულების ზომაზე, ფერადობის გამაზე, სიუჟეტის სირთულეზე, სტატისტიკურ მახასიათებლებზე და სხვა.
3. გამოთვლების სირთულე უნდა იყოს დასაშვები (მისაღები).
4. გამოსახულება უნდა დამუშავდეს მარცხნიდან მარჯვნივ და ზემოდან ქვემოთ.
5. კოდერზე მიწოდების წინ, ყოველი ელემენტის წარმოდგენის თანრიგების რაოდენობა უნდა იყოს ერთიდაიგივე n ბიტის ტოლი.
6. ყოველი ელემენტის (ფიქსელის) ინტენსივობის სიდიდე მოცემული უნდა იყოს მთელი დადებითი რიცხვის სახით შუალედში ($0,2^{n-1} \leq n \leq 8$).

სტანდარტი, რომელიც წარმოდგენილია ამ თავში აკმაყოფილებს ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ მოთხოვნებს და რეალიზებულია პროგრამულ გარემოში C⁺⁺. ეს პროგრამა მოცემულია IMG სისტემის სახით და ანორციელებს გამოსახულებათა შეკუმშვას ნაცრისფერი გრადაციების მქონე გამოსახულებებისათვის ფრაქტალური კვადრო-ზის დაყოფის მეთოდის გამოყენებით. მასში გათვალისწინებულია გამოსახულების დამახსოვრება, კოდირებული გამოსახულების აღდგენა (დეკოდირება) და საწყის და აღდგენილ გამოსახულებათა შორის სხვაობითი სურათის მიღება.

გამოსახულება მოცემული უნდა იყოს BMP ფორმატში. პროგრამას შეუძლია გამოიყენოს ფერადი გამოსახულებები, მაგრამ პროგრამაში

გათვალისწინებულია კოდირების წინ ფერადი გამოსახულება გარდაიქმნა ნაცრისფერი გრადაციების მქონე გამოსახულებაში.

შეკუმშვის კოეფიციენტი გამოითვლება შემდეგი გამოსახულების მიხედვით:

$$C_{\beta_j} = \frac{256 \cdot 256 \cdot 8 \text{ ბიტი}}{N_{rb} \cdot 4 \cdot 8 \text{ ბიტი}}$$

სადაც N რანგული ბლოკების რაოდენობაა; მნიშვნელი 4 – ეს არის 3,5-4 ბაიტი (4×8 ბიტი), რომელიც აუცილებელია თითოეულ რანგულ ბლოკზე ინფორმაციის შესანახად: 256×256 – არის გამოსახულების ზომა, მრიცხველში 8 არის პიქელის ინტენსივობის აღსაწერად საჭირო ბიტების რაოდენობა.

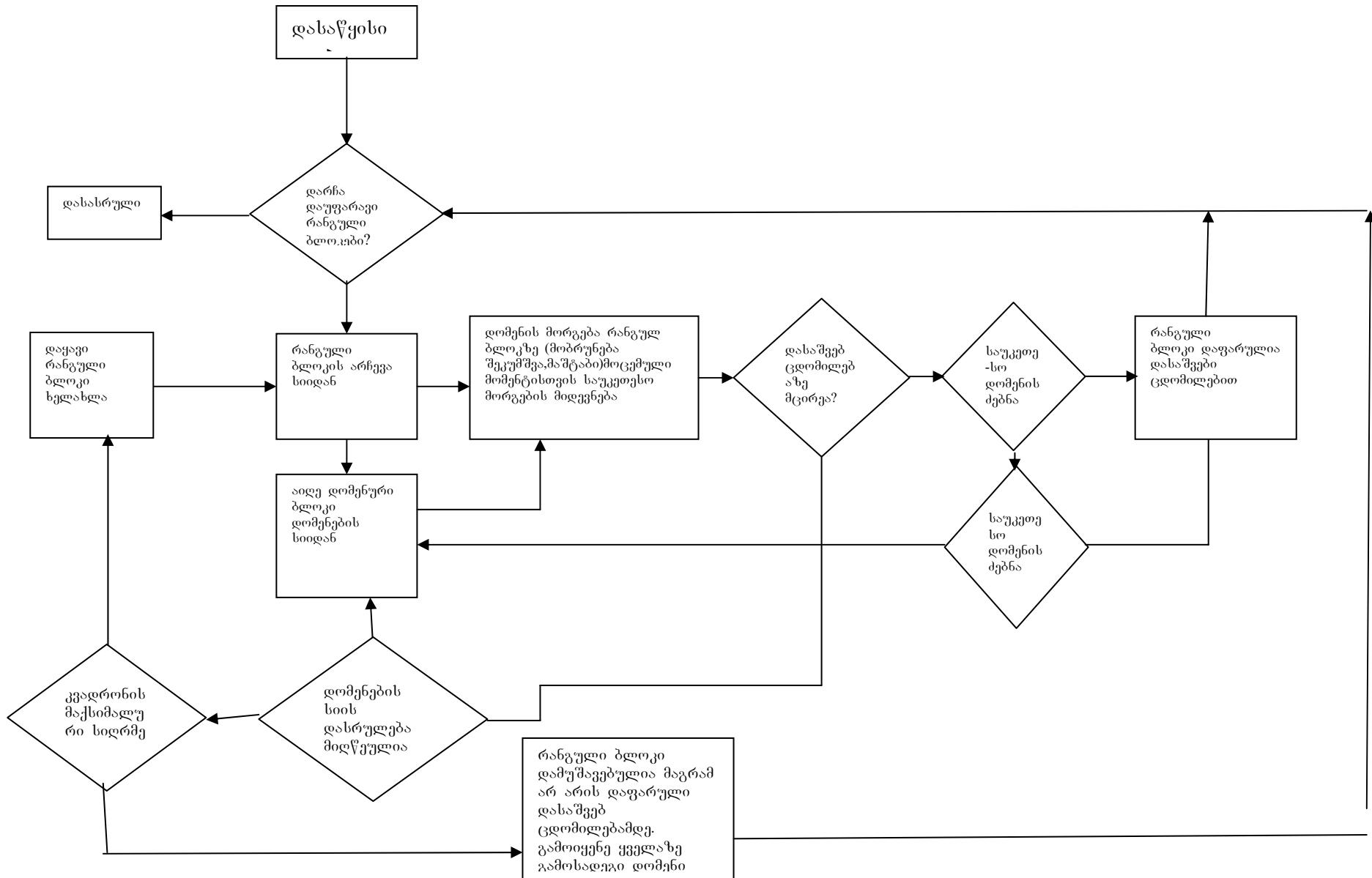
ამ ფორმულებში N სტრიქონია, N სვეტი. ეს არის შესაბამისად სტრიქონებისა და სვეტების რაოდენობა გამოსახულებაში, 255 – ნაცრისფერი გრადაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა.

გამოსახულების ფრაქტალური კოდირების ბაზური ალგორითმი სრულდება შემდეგნაირად:

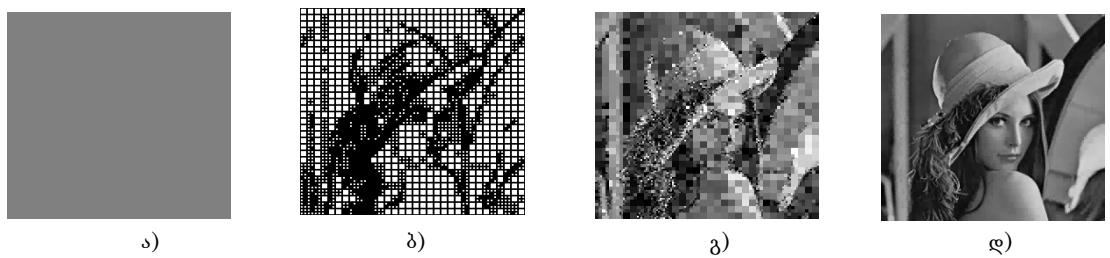
1. f გამოსახულება დავყოთ არაგადაფარულ ბლოკებად. რანგული ბლოკები მართკუთხა ფორმისაა. R ბლოკები შეიძლება იყოს თანაბარი, თუმცა ხშირად იყენებენ ცვლადი ზომის ბლოკებს ადაპტური დაყოფით. ასეთი დაყოფა საშუალებას იძლევა მჭიდროდ შევავსოთ მცირე ზომის ბლოკებით გამოსახულების ნაწილები, რომლებიც მცირე დეტალებს შეიცავენ. ადაპტური დაყოფის სქემის ერთ-ერთი გავრცელებული ტიპია კვადრო-ხის მეთოდი, რომელიც აღწერილია ფიშერის მიერ.
2. გამოსახულებას ვფარავთ დომენური ბლოკების თანმიმდევრობით, დასაშვებია ურთიერთგადამფარავი დაფარვაც. დომენებს შეიძლება ჰქონდეთ განსხვავებული ზომები და მათი რაოდენობა რამოდენიმე ასეული ან ათასეულია.
3. თითოეული რანგული ბლოკისათვის ვპოულობთ დომენს და შესაბამისად გარდაქმნას, რომელიც ყველაზე საუკეთესოდ გადაფარავს რანგულ ბლოკს. ჩვეულებრივ ეს აფინური გარდასახვაა რომელიც ბლოკ-სქემაზეა მოცემული. საუკეთესო შესატყვისობის მისაღებად ვახდენთ გარდაქმნის პარამეტრების აწყობას, მაგალითად კონტრასტულობის და სიკაშკაშის.
4. თუ ვერ მივიღეთ საკმარისად ზუსტი შესაბამისობა, მაშინ რანგული ბლოკებს ვყოფთ უფრო მცირე რანგულ ბლოკებად. ეს პროცესი გაგრძელდება მანამდე,

სანამ არ მივაღწევთ მისაღებ შესატყვისობას, ან სანამ რანგული ბლოკები არ მიაღწევენ რომელიღაც წინასწარ განსაზღვრულ ზღვარს.

ნახაზზე მოცემულია ფრაქტალური კოდირების ბლოკ-სქემა, რომელიც რეალიზდება დამუშავებული პროგრამის შესაბამისად. უნდა აღნიშნოთ, რომ იგი შეიცავს საუკეთესო დომენის ძებნის ოფციას.თუ შერჩეულია ეს ოფცია, მაშინ ძებნა გაგრძელდება იმ შემთხვევაშიც კი როდესაც შესატყვისობა დომენურ და რანგულ არეაბს შორის იმყოფება დასაშვებ საზღვრებში. ამ ოფციის შერჩევის გარეშე კოდირება მიმდინარეობს უფრო სწრაფად, დეპოდირებული გამოსახულების ხარისხის უმნიშვნელო დანაკარგებით.



იმისათვის, რომ რეალიზებულ იქნას დეკოდირების იტერაციული სქემა შემოთავაზებული პროგრამის მიხედვით, საჭიროა განისაზღვროს გამოსახულებათა ორი მასივი: Old image და New image. ამ მასივების დამახსოვრება ხდება ცალცალკე. დეკოდირების პროცესი მიმდინარეობს ავტომატურად, წინასწარ არ განსაზღვრული იტერაციების რაოდენობა. უნდა აღინიშნოს, რომ ალდგენისათვის, საწყის გამოსახულებად შეიძლება ავირჩიოთ ნებისმიერი გამოსახულება. ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია ნაცრისფერი გამოსახულება ზომით 256×256 .



ნახ.4.6.2.

ა) ნაცრისფერი გამოსახულება, ბ) კვადრონები, გ) I იტერაცია, დ) VI იტერაცია.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდზე დაფუძნებული სტანდარტის შემდგომი გაუმჯობესება დაკავშირებულია კოდირების სიჩქარის ამაღლებასთან, რომლის განხორციელება შეიძლება ორი მიმართულებით:

- I. მოხდეს დომენების ისეთი კლასიფიკაცია, რომელიც დააჩქარებს კოდირებას იმ დონეების რაოდენობის შემცირების ხარჯზე, რომელთა შორის მიმდინარეობს საუკეთესო ძიება.
- II. გამოთვლების რაოდენობის შემცირებით დომენული დარანგული არების შედარების დროს, რომლის რეალიზება შეიძლება ბლოკების დამახსიათებელი თავისებურებების გამოყოფით.
- III. უსწრაფესი მეთოდები წარმოადგენენ ამ ორი ძირითადი სტანდარტის შერწყმას და გამოყენებას დომენური ბლოკების კლასიფიკირებისათვის.

რაც შეეხება სტანდარტის გამოყენებას ფერადი გამოსახულების დასამუშავებლად, უნდა აღი ნიშნოს, რომ ამასთან დაკავშირებით ჩატარდა კვლევა, რომელმაც ამ საკითხს გასცა დამაჯერებელი პასუხი.

როგორც ცნობილია კომპიუტერული წარმოდგენა გამოსახულების ფერს აღწერს, როგორც სამი წითელი (Red), მწვანე (Green) და ცისფერი (Blue) ფერების

კომბინაციას და შესაბამისად ფერადი გამოსახულების პიქსელების ფერი განისაზღვრება RBG-ს სამი მნიშვნელობით. ფრაქტალური კოდირების ალგორითმი, რომელითაც ვსარგებლობდით გამოსახულებისათვის ნაცრისფერი გრადაციით [37,83], გამოყენებული იყო ფერადი გამოსახულების თითოეული კომპონენტისათვის. სრული ფერადი გამოსახულების დაშლა RBG-ს მდგრელებად **Mathcad** პროგრამულ გარემოში ხორციელდება უბრალოდ ჩაშენებული Red RBG ფუნქციის გამოყენებით. უნდა აღინიშნოს, რომ ფერადი გამოსახულების დამუშავება ამ ფუნქციის გამოყენებით შეიძლება მოხდეს როგორც თითოეული ფერისათვის 256×256 პიქსელით, ასევე ერთდროულად ყველა ფერისათვის, ე.ი. შედგელობაში გვაქვს ფერადი გამოსახულების მატრიცა.

ექსპერიმენტმა აჩვენა, რომ უპირატესობა უნდა მიენიჭოს მეორე ვარიანტს. თუ ვისარგებლებთ ადამიანის მიერ ფერის აღქმის თვისებებით, რომლის თანახმადაც RBG-ის მნიშვნელობები გარდაიქმნება YIQ მნიშვნელობებში, სადაც Y –შესაბამება სიკაშკაშეს (Luminance), I-ფერს (hue), Q- გაჯერებას (satuzation), მაშინ მივიღებთ შეკუმშვის მაღალ დონეს, რადგანაც ძირითადი მდგრელი გამოსახულების ხარისხისათვის იქნება Y მდგრელი.

გამარტივებული გადასვლები RBG ფერადი სივრციდან YIQ სივრცეში ხორციელდება გადასვლის მატრიცის საშუალებით, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & -0,312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

სადაც ტოლობის მარცხენა მხარეში გვაქვს გარდაქმნილი ვექტორი, ხოლო $(RGB)^T$ - საწყისი ვექტორია, რომელიც გარდაქმნის მატრიცაზე მრავლდება. ინვერსიულ გარდასახვას აქვს სახე:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,273 & -0,647 \\ 1,000 & -1,104 & 1,701 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}$$

როგორც ექსპერიმენტი ადასტურებს ძირითადი მდგრელი, რომელიც განსაზღვრავს ხარისხს, არის Y მდგრელი, ხოლო I და Q მდგრელები ექვემდებარებიან „დიდ“ შეკუმშვას.

4.7 მეოთხე თავის დასკვნები

მე-4 თავში მიღებული შედეგები იძლევა საშუალებას გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის გამოკვლევაზ გვიჩვენა, რომ ფრაქტალური შეკუმშვის ტექნოლოგია შეიძლება წარმატებულად გამოყენებული იქნას ახალი სტანდარტის შექმნის დროს, რომელიც შეიძლება განვიხილოთ როგორც JPEG-2000 სტანდარტის შემდგომი განვითარება.
2. ჩატარებულია ვეივლეტ და ფრაქტალური ალგორითმების შედარებითი ანალიზი, რომელმაც აჩვენა ფრაქტალური შეკუმშვის მეთოდის უპირატესობა ვეივლეტ-გარდაქმნის მეთოდთან შედარებით, ამრიგად შეიძლება ჩავთვალოთ მიზანშეწონილად ახალი სტანდარტის შემუშავება, რომლიც საფუძვლად დაედება გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვა ვეივლეტ გარდაქმნის ნაცვლად.
3. ფრაქტალურად კოდირებულიგამოსახულების გადასაცემი ინფორმაციის საიმედოობის გამოკვლევის შედეგებმა ცხადყო, რომ პირველ რიგში დაცული უნდა იყოს მონაცემები დაკავშირებული დომენური ბლოკის ნომერთან. ამისათვის მიზანშეწონილად ჩავთვალოთ ხელშეშლათა მიმართ მდგრადი კოდირების გამოყენება, ჰემინგის კოდის რეალიზაციით **Mathcad** პროგრამაში.
4. მოცემულია ფრაქტალური კოდირების სისიტემის ბლოკ-სქემა და კოდირების სიჩქარის ამაღლების საშუალებები. შემოთავაზებულია შემუშავებულ სტანდარტში გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის პროგრამა, შესრულებული **C⁺⁺** ენაზე და აღწერილია პროგრამის სარგებლობის მსვლელობა. მოცემულია მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების სტატისტიკური დამუშავების მარტივი რეალიზაცია **Mathcad** პროგრამაში მოცემული ალგორითმების მიხედვით.
5. შემოთავაზებული პროგრამა გამოდგება როგორც ნაცრისფერ გრადაციების მქონე, ასევე ფერადი გამოსახულების კოდირებისათვის, ვინაიდან პროგრამა ანხორციელებს კოდირებას ფერადი გამოსახულების ფერთა ძირითადი **RGB** კომპონენტებისათვის, ხოლო **Mathcad** პაკეტში ფერებად გაშლა და სინთეზი ხდება საკმაოდ მარტივად, უკვე არსებული ფუნქციების გამოყენების საფუძველზე.

დასკვნა

1. გარკვეულია, რომ გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნივერსალურ მეთოდად შეიძლება ჩაითვალოს კუმშვადი ასახვის სპეციალური მეთოდი დასახელებით იტერაციული ფუნქციათა სისტემა (IFS), რომელიც განიცდის ტრანსფორმირებას უბან-უბან იტერაციულ ფუნქციათა სისტემად (PIFS), როცა ხორციელდება გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირება.
2. მოცემულია გამოსახულებათა კუმშვადი ასახვის ძირითადი თეორემის ექსპერიმენტული ინტერპრეტაცია და დასტურება მისი სისწორე პრაქტიკული გამოყენების დროს.
3. გამოკვლეულია გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ეფექტურობის დამოკიდებულება კოდირების განმსაზღვრელ ძირითად მახასიათებლებზე, მათ შორის კოდირებული გამოსახულების კავშირის არხში გადაცემის საიმედოობაზე. ექსპერიმენტმა აჩვენა, რომ ცდომილება დომენის ინდექსში იწვევს დეკოდირებული გამოსახულების ისეთ დამახინჯებას, რომელიც არ ექვემდებარება ნებისმიერი სახის ფილტრაციას და ამიტომ დამახინჯების თავიდან ასაცილებლად უნდა გამოყენებულ იქნას ხელშეშლათა მიმართ მდგრადი კოდირება (ჰემინგის კოდი).
4. ექსპერიმენტულად დადასტურებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის უნივერსალური თვისება: აღდგენილი გამოსახულების ზარისხის დამოუკიდებლობა დეკოდირებისას პირველი იტერაციის შესასრულებლად შერჩეული გამოსახულების სახეზე და მის ზომაზე. უკანასკნელი განაპირობებს შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდას.
5. გამოსახულებათა კოდირების სხვადასხვა ტექნოლოგიების კვლევამ დაამტკიცა, რომ:
 - a. მათემატიკური მორფოლოგიის ოპერაციების საფუძველზე შესაძლებელია პირამიდული აგების განხორციელება. უკეთესი შედეგი მიიღება „opening“ ოპერაციის გამოყენებით კვადრატული ფორმის 3×3 ზომის მასტრუქტურიზებელი ელემენტით. პირამიდის სტატისტიკური თვისებების კვლევამ ცხადყო გამოსახულებათა შეკუმშვის

- მორფოლოგიური პირამიდული აგების ფრაქტალურ კოდირებასთან შერწყმის შესაძლებლობა კოდირების ეფექტურობის ამაღლებისათვის.
- ბ. ვეივლეტ-გარდაქმნების ***Mathcad*** პაკეტში გამოსახულებათა შეკუმშვის და ფილტრაციის პროცესის რეალიზაციაში აჩვენა ვეივლეტ-ტექნილოგიების გამოყენების მიზანშეწონილობა გამოსახულებათა კოდირებაში და ფილტრაციაში.
- გ. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნას დროითი წინასწარმეტყველების მეთოდი და კადრთაშორისი წრფივი ინტერპოლაცია.
- დ. ზემოთ ჩამოთვლილი გამოსახულებათა შეკუმშვის ტექნილოგიები შეიძლება მარტივად იქნეს მოდულირებული ***Mathcad*** პროგრამაში და გამოყენებულ იქნას გამოსახულებათა ფრაქტალურ მეთოდებთან კომბინირებაში.
6. გამოსახულებათა კოდირების ეფექტურობის გაზრდა შესაძლებელია ფრაქტალური კოდირების შერწყმით: ა) მორფოლოგიურ აგებებთან, როდესაც შეკუმშვის კოეფიციენტი იზრდება 3-4-ჯერ და უახლოვდება 30-ს აღდგენილი გამოსახულების სხავ-ს შემცირების 1,4dB პირობებში. ეს შედეგი მიიღება მაშინ, როცა ფრაქტალური კოდირება ზორციელდება მორფოლოგიური პირამიდის წვეროზე ზომით 64×64 პიქსელით. ბ) ვეივლეტ-გარდაქმნის ფრაქტალებთან და ფრაქტალური კოდირების ვეივლეტთან მეთოდების კომბინირებამ აჩვენა, რომ ვეივლეტ-გარდაქმნის რეალიზაციაში კოდირების პირველ ეტაპზე განაპირობა უფრო კარგი შედეგების მიღება, ვიდრე საპირისპირომ: სხავ-ის მნიშვნელობა გაიზარდა 2,5 dB-ით შეკუმშვის კოეფიციენტის დაახლოებით ერთნაირი მნიშვნელობის პირობებში.
7. გამოსახულებათა მიმდევრობის კოდირების დროს ფრაქტალური კოდირება განისილებოდა კადრთაშორის დიკმ-ისთან, წრფივ ინტერპოლაციასთან და ვეივლეტ-პირამიდულ აგებასთან შერწყმით. ამ კომბინირებული მეთოდების ეფექტურობის შედარებამ ცხადყო, რომ ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი (110-120 ფარგლებში) მიიღება ინტერპოლაციის შეკუმშვის მეთოდთან შეთავსების დროს.
8. გამოსახულებათა და მათი მიმდევრობის ეფექტურობის გამოკვლევამ გვიჩვენა როგორც ფრაქტალური მეთოდების სხვა შეკუმშვის მეთოდებთან შერწყმის

გამართლებული გამოყენება, ასევე ფრაქტალური შეკუმშვის ტექნოლოგიებზე აგებული ახალი JPEG სტანდარტის შექმნის შესაძლებლობა.

9. ნაშრომი მოიცავს საჭირო მონაცემებს, მეთოდიკას და რეკომენდაციებს. JPEG-2000 ტიპის ახალი სტანდარტის შესაქმნელად. სტანდარტი დაფუძნებული იქნება გამოსახულებათა ფრაქტალურ კოდირებაზე ვეივლეტ-ტექნოლოგიების ნაცვლად.
10. შემოთავაზებულია გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების ახალი სტანდარტის პროგრამა და აღწერილია მისი შესრულების მსვლელობა. პროგრამა განკუთვნილია როგორც ნაცრისფერ გრადაციების მქონე ასევე ფერადი გამოსახულების ფრაქტალური კოდირებისათვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Б.Я. Лихтциндер, М.А. Кузякин, А.В. Росляков, С.М. Фомичов. Интелектуальные сети связи. Эко-Трендз, Москва, 2000, стр 205.
2. Ю.Б. Зубарев, В.П. Дворкович, и др. Мультимедия-проблемы и перспективы внедрения. *Цифровая обработка телевизионных и компьютерных сигналов* М., 2001, №1, 2-12 с.
3. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. Под редакцией Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича. Москва 1997. 255 с.
4. Wang Dewin, Veronique Hease-Coast. Adaptive segmentation of texture using mathematical morphology. *INSA, Laboratorie d'Automatique, Equope, Transe 1991*, 12.
5. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. Vol. 4, No. 3, September, pp 197-214, 1993.
6. *IEEE Trans. On Image Processing*, November 1994.
7. *Pattern Recognition*, Vol 28, No. 11, pp1783-1792, 1995.
8. Н. Г. Харатишвили, И.М. Чхеидзе, Д. Ронсен, Ф. И. Индзия, Пирамильное кодирование изображений, Москва, Радио и связь, 1996, 192 с.
9. Davis, G. 1998. „A Wavelet-Based Analysis of Fractal Image Compression“, *IEEE Trans. on Image Proc.*, Vol. 7, No. 2:141-154.
10. M. Zho, J. De Lameillieure and R. Schafer, Heinrich-Hertz-Institut, Germany. A Coding Performance at a Fade. *PSC'97 Picture Coding Symposium. ITG Conference*, September 10-12, 1997 Berlin: pp. 227-233.
11. Обработка изображений и цифровая фильтрация. Под ред. Т. Хуанга – М.: Мир – 1979, 221с.
12. P. Maragos. R.W. Schafer. Morphological systems for multidimensional signal processing. *IEEE, Trans. Communication*, Vol. 78, №4, 1990, pp.690-710.
13. Kharatishvili N., J. Ronson, Chkheidze I., Abzianidze N. V. Diynova. Orthogonal and Non-Orthogonal Methods of Pyramid Coding of TV Signals in Satellite Communications. *RUSSAT'93*, St. Petersburg, Russia, April, 1993, pp. 234-239.
14. И.М. Чхеидзе. Эффективное кодирование ТВ изображений на основе пирамидальных построений. Диссертация на соискание ученной степени доктора технических наук. Тбилиси, 1993.

15. Пиленчук Н.И., Яковлев В.П. Адаптивная импульсно-кодовая модуляция. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.
16. Habibi A. Hybrid Coding of Pictoral Data./ *IEEE Trans. Communications.*, v. COM-22, №5, May 1974.
17. Roese J.A. Hybrid Transform/ Predictive Image Coding./ Charter 5 of Image Transmission Techniques. W.K. Pratt ed., Academic Press, N.Y., 1979.
18. Clarke R.J. Hybrid Intraframe Coding of Image Date./ *IEEE Proc.*, v.131 part F, №1, Feb. 1984.
19. Netravali A.N., Haskell B.G. Digital Pictures: Representation and Compression./ Plenum Press N.Y. 1991.
20. Харатишвили Н.Г. Цифровое кодирование с предсказанием непрерывных сигналов. – М.: Радио и связь, - 1986, - 140 с.
21. Нетравали А.Н. Лимо Дж.О. Кодирование изображений: Обзор *ТИИЭР*, - 1980,, -Т.68,ИЗ.-С.76-124.
22. Мусман Х. Кодирование изображений с предсказанием. Методы передачи изображений Пер. с анг. Под. Ред. У.К. Праттаю – Радио и связь, 1983, с 68-103.
23. Методы передачи изображений. Сокращение избыточности Под. Ред. У.К.Прэтта. – М.: Радио и связь, -1983, -264с.
24. Burt P.J., Adelson E.H. The Laplacian pyramid ab a compact image code. *IEEE Trans. Commun.*, Apr. 1983, -v. COM-31, -p.532-540.
25. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. Под редакцией Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича. М.:Международный центр научной и технической информации. 1997. 214 с.
26. Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. Методы сжатия данных. Алгоритмы сжатия изображений. М.:ISBN.2002. 97 с.
27. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature./W.H.Freeman, NY, 1983
28. Н.Г. Харатишвили, И.М. Чхеидзе, З.Дж. Гогилашвили. Цифровое кодирование последовательности изображений с межкадровым нелинейным предсказанием. *Georgian engineering news*, 2003, №2, 75-79
29. Марагос, Р.У. Шафер. Морфологические системы для многомерной обработки сигналов. *ТИИЭР*. т.78. №4. 1990. с.109–131.
30. Прэт У. Цифровая обработка изображений. – Москва: Мир, 1982.

31. M.F. Barnsley, *Fractals Everywhere*. London: Academic Press Inc., 1988.
32. A.E. Jacquin, “Fractal image coding based on a theory of iterated contractive image transformations,” in Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing ’90, vol. 1360, pp. 227-239 1990.
33. G.E. Qien, Z. Baharav, S. Lepsqy, E. Karnin. A new improved collage theorem with applications to multiresolution fractal image coding. In Proc. ICASSP, 1994.
34. Saupe, D., Hamzaoui, R., Hartenstein, H., Fractal image compression - An introductory overview, in: Fractal Models for Image Synthesis, Compression and Analysis, D. Saupe, J. Hart (eds.), SIGGRAPH'96 Course Notes, ACM, New Orleans, Louisiana, Aug. 1996.
35. Яншин В., Калинин Г. Обработка изображений на языке Си для IBM PC: Алгоритмы и программы. - Москва: Мир, 1994.
36. Корриган Дж. Компьютерная графика: Секреты и решения: Пер. С англ. - М.: Энтроп, 1995.
37. С.Уельстид, Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действий. М.:Изд-во Триумф, 2003 -320 с.
38. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Москва: Постмаркет, 2000. – 352 с.
39. James Gleick, *Chaos: Making a New Science*, Viking, New York, 1987.
40. Алимов И.А. Принцип сжатых отображений (Методы прикладного анализа). М.:Знание, 1983. 64 с.
41. Бондаренко В.А., Дольников В.Л. Фрактальное сжатие изображений по Барнсли-Слоану .. Автоматика и телемеханика. 1994 №5. С.12-20.
42. Davis, G. 1996. „Implicit Image Models in Fractal Image Compression“, Proc. of SPIE Conf. on Wavelet Applications in Signal and Image Processing IV, Denver
43. Шабаршин А.А. Метод фрактального сжатия изображений .. *Научные школы УПИ-УГТУ* 1997. №1. с.70-82.

44. Шабаршин А.А. Трехмерное фрактальное сжатие видеинформации .
Научные школы УПИ-УГТУ 1997. №1. с.83-89.
45. Dubridge F. Fast image coding by a hierarchical fractal construction. preprint, 1994, 254
46. Fisher Y. Fractal image compression. *SIGGRAPH'92 Course Notes.* 1992. Vol.12.P.7.1-7.19.
47. Peitgen H.O., Jurgens H., Saupe D. Chaos and Fractals. Berlin: Springer-Verlag, 1992, 570
48. The Science of Fractal images/ Ed/H/O/Peitgen, D.Saupe. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
49. Ватолин Д. Применение фракталов в машинной графике. *Computerworld-Россия.-1995.-N15.-c.11.*
50. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ.-М.: Мир,1991.-254с.
 (Jens Feder, Plenum Press, NewYork, 1988)
51. Application of fractals and chaos. 1993, Springer-Verlag, Berlin.
52. Орищенко В.И. и др.Сжатие данных в системах сбора и передачи информации. М. Радио и связь, 1985 – 184 с.
53. Борисов В.И. Павлов Р.В, Тодлстых Н.Н. «*Системы передачи телевидения реального времени по лазерным каналам связи*». Труды Воронежского НИИ связи, 2006 г.
54. Сундучков А. Синтез изображений на основе фракталов.
55. В. Дьяконов, Mathcad 2001, учебный курс. – СПБ.:Питер, 2001. – 624 с.
56. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. Изд-во «Наука». Москва.1976.320 с.
57. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд-во «Наука». Москва.1979.
58. Davis, G. 1995. „Adaptive self-quantization of wavelet subtrees: A wavelet-based theory of fractal image compression“, Proc. of SPIE Conf. on Wavelet Applications in Signal and Image Processing III, San Diego
59. Barnsley M., Sloan A. Method and Appatarus for Processing Digital Data./US Patent #5065447
60. Barnsley M., Hurd L.P. Fractal Image Compression./A.K Ltd. Wellesly Massachusetts, 1993, 344

61. Monroe D.M., Dudbrige F. Fractal Block Coding of Images./ *Electronics letters*, v.28, №11, 1992
62. Mandelbrot B. Les Objets Fractals: Form, Hasard et Dimension Flammarion./Paris, 1975, 455
63. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature./W.H.Freeman, NY, 1983
64. Barnsley M. Fractals Everywhere./Academic Press Boston, San Diego 1993, 188
65. Федер Е. Фракталы.-М.:Мир,1991, 347
66. Barnsley M. F., Sloan A.D. A Better Way to Compress Images./ *BYTE*, v. 13, 1988, 300
67. Ансон Л., Барнсли М. Фрактальное сжатие изображений./ *Mir ПК*, №4 1992, 120
68. Anson L.F. Fractal Image Compression./ *BYTE*, v. 18, №11, 1993, 210
69. ხარატიშვილი ნ, ჩხეიძე ი, ნარიმანაშვილი დ. ფრაქტალური შეკუმშვის სტანდარტის შემუშავება JPEG სტანდარტის შესაბამისად. შრომები მართვის ავტომატიზირებული სისტემები, N 1(6) თბილისი, 2009. გვ. 120
70. ხარატიშვილი ნ, ჩხეიძე ი, ნარიმანაშვილი დ. გამოსახულებათა ფრაქტალური კოდირების შერწყმა შეკუმშვის სხვა ალგორითმებთან. შრომები მართვის ავტომატიზირებული სისტემები, N 1(6) თბილისი, 2009. გვ. 124
71. JPEG 2000, From Wikipedia, the free encyclopedia
<http://en.wikipedia.org/wika/jpeg-2000>
72. გოგილაშვილი ჭ. არაწრფივი ფილტრაციით გამოსახულებათა პირამიდული კოდირება. ავტორევერატი ტექნიკურ მეცნიერებათა კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 2003. გვ 19.
73. Харатишвили Н.Г., Чхеидзе И.М., Степерман В.Г., Отхозория В.К. Фрактальное сжатие в сочетании с нелинейной морфологической фильтрацией в кодировании изображений и их последовательностей «GEORGIAN ENGINEERING NEWS», N1, 2006 с.198-203
74. Отхозория В.К. Токадзе Л.Ш. Синтез изображений на основе фрактального построения. *Georgian Engineering news* N4, 2005 с. 113-117
75. Харатишвили Н.Г., Чхеидзе И.М., Отхозория В.К. Фрактальное кодирование изображений. saqarTvelos ganaTlebis mecnierbaTa akademiis Jurnal „moambis“ damateba Sromebi, 6. Tbilisi, 2005. gv.7-11

76. ოთხობორია ვ.კ. ფრაქტალური გამოსხულებების სინთეზი MathCad-ის გარემოში პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი ინტელექტი, № 1(21). თბილისი 2005. გვ.47-50
77. ოთხობორია ვ. ავტორეფერატი ტექნიკურ მეცნიერებათა კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 2003. გვ
78. ხარაშვილი ნ.გ., ჭეიძე ი.მ., იტხოვია ვ.კ. ფრაქტალური გამოსხულებების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალ „მოამბის“ დამატება შრომები, 6. თბილისი, 2005. გვ. 7-11
79. ნ.გ ხარაშვილი, ი.მ ჭეიძე, ვ.ჯ. გოგიაშვილი, ვ.გ. სტეპერმან, ნ. აბზანიძე. მორფოლოგიური განათლების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალ „მოამბის“ დამატება შრომები, 6. თბილისი, 2005. გვ. 7-11
80. ნ.გ ხარაშვილი, ი.მ ჭეიძე, ვ.ჯ. გოგიაშვილი. ციფრული გამოსხულების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალ „მოამბის“ დამატება შრომები, 6. თბილისი, 2005. გვ. 7-11
81. ჭეიძე ი.მ., სტეპერმან ვ.გ., ნარიმანაშვილი დ.ნ. წარმატებული ფრაქტალური გამოსხულების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალ „მოამბის“ დამატება შრომები, 6. თბილისი, 2005. გვ. 7-11
82. ხარაშვილი ნ.გ., ჭეიძე ი.მ., ნარიმანაშვილი დ.ნ. ON ONE CONCEPT OF PRODUCTION RULE SYSTEMS. Georgian Engineering news N1, 2009, c. 68-69
84. Hebert, D., and E. Soundararajan. 1998. „Fast Fractal Image Compression with Triangulation Wavelets“, Proc. of SPIE Conf. on Wavelet Applications in Signal and Image Processing VI, San Diego.
85. ა. გუგუშვილი, რ. ხურობე, თ. იმედაძე და სხვები, მართვის თეორია, სინერგეტიკა; ნაწილი III; „ტექნიკური უნივერსიტეტი“ თბილისი 2000, 862 გვ.
86. თ. ობგაძე, მათემატიკური მოდელირების არსი, III ნაწილი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი 2008, 130 გვ.
87. დ. ნარიმანაშვილი – ახალი JPEG სტანდარტში გამოსახულებათა ფრაქტალური შეკუმშვის პროგრამის გამოყენება, საქართველოს განათლების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალ „მოამბის“ დამატება, 1(13), 2009, თბილისი, გვ. 281-285

