

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გივი სანიკიძე

ენერგობიექტების მოხმარების ხარისხის მართვა და საიმედოობის
საკითხების გამოკვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა “ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თებერვალი, 2017 წელი

საავტორო უფლება © 2017 წელი, გივი სანიკიძე

თბილისი

2017 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გივი სანიკიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ენერგობიექტების მოხმარების ხარისხის მართვა და საიმედოობის საკითხების გამოკვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თებერვალი 2017 წელი

ხელმძღვანელი:

პროფესორი დიმიტრი ნამგალაძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016

ავტორი: სანიკიძე გივი

თემის დასახელება: ენერგობიექტების მოხმარების ხარისხის მართვა და საიმედოობის საკითხების გამოკვლევა

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

აკადემიური ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თებერვალი, 2017

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი 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 დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ბუნებრივი გაზი ფართოდ იპყრობს საერთაშორისო ენერგეტიკულ ბაზარს, თუმცა მისი ტრანსპორტირების, შენახვისა და მოხმარების თავისებურებების გამო, მნიშვნელოვან პრობლემად წარმოჩინდება მოხმარებელთა საიმედო გაზომომარაგება. ცხადია, რომ განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს გაზის განაწილების არსებული ინფრასტრუქტურის აღდგენა-განახლებას, რაც მეტად მნიშვნელოვანი და აქტუალურია. სარეაბილიტაციო სამუშაოების დაგეგმვა და განხორციელება უნდა მოხდეს ქსელის მდგომარეობის სწორი შეფასების, პრობლემური მონაკვეთების იდენტიფიცირების, რისკების ზუსტი შეფასების და მოხმარების დინამიკის გათვალისწინებით.

პრობლემის გადაწყვეტა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საქართველოსათვის, რომელიც განიცდის საკუთარი სათბობ-ენერგეტიკული რესურსების დეფიციტს. სადისერტაციო ნაშრომში პრობლემის კვლევა ატარებს სისტემურ ხასიათს და მასში პრაქტიკულად მთელი სისრულით ასახულია ყველა ის ფაქტორი, რომლებიც მოქმედებს ბუნებრივი გაზის სექტორის სტრუქტურის ფორმირებაზე. მიღებული საპროგნოზო პარამეტრები და მეთოდები განსაზღვრულია პროგნოზირების თანამედროვე აპრობირებული მეთოდების კომპლექსურად გამოყენებით. შერჩეულია მეთოდების ისეთი ალგორითმები, რომელიც მაქსიმალური სიზუსტით ასახავს ადეკვატურ მდგომარეობას.

საკითხის თანამედროვე მოთხოვნების დონეზე დამუშავების მიზნით შესწავლილია გაზის სექტორის გამოცდილება. მის საფუძველზე დასმულია ბუნებრივი გაზის სექტორის პრობლემები და მათი სისტემური გადაჭრის კომპლექსური პროგრამა.

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ოთხი ძირითადი თავის (შესაბამისი ქვეთავებით), დასკვნისა, ნახაზებისა და ცხრილების ნუსხის და გამოყენებელი ლიტერატურისაგან. ნაშრომი მოიცავს გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების მახასიათებლების დადგენას, გაზგამანაწილებელი ქსელის კომპლექსური ალბათური მახასიათებლების დადგენას, გაზომომარაგების უთანობრო მოხმარების პროგნოზირებას და ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში მომსახურების ხარისხის და რისკის ანალიზს.

დასახული პროგრამის შესაბამისად, კვლევის საწყის ეტაპზე ჩატარებულია მსოფლიო ბუნებრივი გაზის სექტორის მდგომარეობის ანალიზი. მოძიებულია 2000-2014 წლამდე პერიოდში სტატისტიკური მონაცემები და შესრულებულია მათი სისტემატიზაცია.

გაზგამანაწილებელ ქსელებზე ავარიები ხასიათდება მასშტაბურობითა და გარემოსა და ადამიანებზე უარყოფითი ზემოქმედების ფორმების მრავალფეროვნებით. გაზსადენების უსაფრთხო ექსპლუატაციის

უზრუნველყოფა გაზგამანაწილებელი ქსელების ექსპლუატაციისას ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან და აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს, რომლის გადაჭრაც უმთავრესად შესაძლებელია სარემონტო-აღდგენითი სამუშაოების დროულად ჩატარების ხარჯზე. დაზიანებებისა და ავარიების გამაფრთხილებელი ადეკვატური ზომების მისაღებად აუცილებელია მათი გამოვლენის რისკის რაოდენობრივი შეფასების სამეცნიერო-მეთოდური ბაზის ქონა. ამ პრობლემის გადასაწყვეტად მნიშვნელოვანია, რომ გარემოსა და ადამიანების დაცვა ინტეგრირებულ იქნეს ინჟინრული გადაწყვეტილებების მიღების პროცესში, რომლებიც ეკონომიკური დასაბუთების საფუძველზე მინიმუმირებას გაუკეთებს ნეგატიური ზეგავლენების შედეგებს ყველაზე რაციონალური გზებით. აღნიშნულის გათვალისწინებით შემუშავებულია გაზმომარაგების ობიექტების რისკ-ფაქტორი და თვისობრივი მოდელის შეფასება. საშიშროებების იდენტიფიკაცია, რისკის შესამცირებელი რეკომენდაციების შემუშავება, რისკის ანალიზის ჩატარების მოდიფიცირებული მეთოდები და რისკის მაჩვენებლები. ჩვენს მიერ შემუშავებულ იქნა კონკრეტული ამოცანების გადაწყვეტა, მათ შორის გაზსადენის საფრთხის ანალიზის თვისობრივი მეთოდი, კერძოდ “მტყუნების და ხდომილებების ხეს” მეთოდები; გაზმომარაგების ობიექტის საფრთხის პრევენციის მიზნით გადაწყვეტილებების მიღების პროცესის დანერგვა და ოპტიმიზაცია სოციალურ-ეკოლოგიური ფაქტორების გათვალისწინებით.

მიღებული შედეგების, დასკვნებისა და რეკომენდაციების უტყუარობა და დასაბუთება უზრუნველყოფილია მათემატიკური, ეკონომიკური და სხვა გამოკვლევების თანამედროვე მეთოდებისა და ხერხების, და აპრობირებული მეთოდური და პროგრამულ-ტექნიკური საშუალებების გამოყენებით, აგრეთვე დამუშავებული მეთოდური აპარატის შესაბამისად ჩატარებული გაანგარიშების შედეგების შედარებით რეალურად მომხდარი ავარიების მონაცემებთან.

განსაზღვრულია საიმედოობის მახასიათებლები საქართველოს სათბობ-ენერგეტიკულ სისტემაში, სემეკისათვის და სხვა ორგანიზაციებისათვის საინფორმაციო ბაზის შესაქმნელად.

კვლევების შედეგების პრაქტიკაში დანერგვა საშუალებას იძლევა შემუშავებული იქნეს მეცნიერულად დასაბუთებული გეგმა სხვადასხვა ორგანიზაციებისათვის. კერძოდ, მას შემდეგ რაც ნაშრომში მოყვანილი მეთოდური მიდგომების გამოყენებით მოხდება ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების და განაწილების ლიცენზიატის ქსელში მტყუნების საფრთხეების განსაზღვრა და შემდგომში უკვე სოციალური რისკების რაოდენობრივი მაჩვენებლების შეფასება, საწარმოს ექნება საშუალება მოახდინოს ქსელის უზნების პრიორიტეტიზაცია რისკის დონეების გათვალისწინებით და შეიმუშაოს შესაბამისი როგორც მოკლე, ასევე საშუალო და გრძელვადიანი საინვესტიციო გეგმა, მათი პრევენციისა და მინიმუმისა

მიზნით. თავის მხრივ, გონივრული საინვესტიციო გეგმა გაზსადენის ქსელის უსაფრთხოების მაღალი დონისა და ავარიების სიხშირის შემცირების ხარჯზე დაკარგული ბუნებრივი აირისა და მომხმარებლისათვის მიუწოდებელი მომსახურების მოცულობის შემცირების წინაპირობას წარმოადგენს. საყურადღებოა, რომ ქსელში ავარიების ინტენსივობა და შედეგად წარმოქმნილი ბუნებრივი აირის დანაკარგი პირდაპირ გავლენას ახდენს კომპანიის ფინანსურ მდგომარეობაზე. დანაკარგების მაღალი დონე საფრთხეს უქმნის ტრანსპორტირების და განაწილების ოპერატორების საიმედო და უწყვეტ ფუნქციონირებას.

Resume

Natural gas is widely attracting the international energy market, but one of the major problems is reliable gas supply to consumers, because of its transportation, storage and consumption peculiarities. It is obvious, that special attention should be drawn to renovation of the existing gas distribution infrastructure, which is most important. Planning and implementation of network rehabilitation works should be based on assessment of network conditions, precise risk assessment, identification of problematic areas and consumption dynamic.

Solving the problem is especially important for Georgia, which is experiencing shortage of its own fuel resources. Dissertation work includes comprehensive research of the problem and describes all of the factors in detail, that affect formation of natural gas sector. Methods and final projections are obtained using modern forecasting techniques. Selected methods and techniques ensure reflection of sector conditions with maximum precision. The thesis covers the following topics: determination of natural gas distribution network probability distribution characteristics, determination of natural gas distribution network complex probabilistic characteristics, natural gas consumption forecasts and service quality and risk assessment in gas distribution networks.

To be in accordance with modern requirements, there has been analyzed accumulated experience in the natural gas sector, based on which has been formed the natural gas sector problems and their systematic solving complex program.

The paper consists of an introduction, four basic chapters, conclusion, list of graphs and tables and references.

At the initial stage of the research, there has been conducted analysis of the world natural gas sector and related data from 2000 till 2014 were collected and systematized.

Network failures are characterized by the coverage of large scale and variety of negative impacts on people and environment. the most important challenge for natural gas network operators is to ensure the safe and reliable operation of gas

distribution networks. The above-mentioned problem can be solved mainly by conducting rehabilitation works in timely manner. It is essential to have scientific-methodical quantitative risk assessment tool in order to create a early warning mechanism in case of failures. To solve the problem it is important to integrate issue of citizens and environment protection in engineering decision-making process, which will minimize negative impact in most effective ways, based on economic justifications. Gas supply units risk-factor and qualitative model evaluation, hazard identification, risk reduction recommendation, modified methods of risk analysis and risk parameters has been developed. Also, we have developed a solution for some specific problems, including pipeline risk analysis qualitative method – “failure and probability tree” method; Decision making process of risk prevention for gas supply units, taking into account a social-ecological factors.

As a result of using mathematical, economic, proven programming tools and other modern methods and techniques, the reliability of final results, conclusions and recommendations have been confirmed. Also, comparison between obtained results and the actual failure statistics shows the credibility of research outcomes.

The research defines Georgian fuel system reliability parameters for development of information base for GNERC and other entities.

In addition, implementation of research results in practice gives an opportunity to develop scientifically valid plan for various entities. Once, risk of failures and quantitative figures for social risks are evaluated for utility’s gas distribution and transportation networks using proposed methodical approaches, company will have an opportunity to prioritize network areas based on corresponding risk levels and develop appropriate short term, as well as medium and long term investment plans for further prevention and minimization of identified risks. For its part, reasonable investment plans serve as a base for reduction in volumes of natural gas losses and undelivered services as a result of significant decrease in failure frequency rates. Also, reasonable investment plan results in increase of safety level of gas distribution as well as transportation networks. It is worth mentioning, that failure rates and consequent losses in natural gas networks directly affect company’s financial position. High level of network losses endangers the reliable operation of natural gas distribution and transportation network operators.

სარჩევი

ცხრილების ნუსხა	10
ნახაზების ნუსხა	12
შესავალი	18
თავი 1. საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის მიმოხილვა და მოხმარების პროგნოზირების და დაზიანების შესახებ ლიტერატურული წყაროების ანალიზი	28
1.1. საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის მიმოხილვა.	28
1.2. ანალიზი და ლიტერატურის წყაროები მაგისტრალური გაზსადენების ავარიებისა და რისკების შესახებ.	39
1.3. გაზგამანაწილებელი ქსელის მტყუნებებისა და აღდგენების ალბათური მახასიათებლების მეთოდოლოგია.	47
თავი 2. გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების მახასიათებლების დადგენა.	53
2.1. გაზგამანაწილებელი ქსელის დროში მტყუნების საფრთხეების ანალიზი.	53
2.2. გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების ნარევის დადგენა.	56
თავი 3. გაზგამანაწილებელი ქსელის კომპლექსური ალბათური მახასიათებლების დადგენა.	64
3.1. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა.	64
3.2. სამი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა (I ვარიანტი).	72
3.3. სამი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა (II ვარიანტი).	77
თავი 4. გაზმომარაგების უთანობრო მოხმარების პროგნოზირების დადგენა..	83
4.1. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” 2013 წლის საათური მოხმარება, ფურიეს მწკრივების საშუალებით.	83

4.2. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” 2013 წლის საათური მოხმარების კორელაციური ანალიზი, ფურიეს მწკრივების საშუალებით.....	107
4.3. გაზგამანაწილებელ ქსელში დინამიკური პროცესები და წნევის უთანაბრო რეჟიმები.....	118
4.4. მარეგულირებელ ნაგებობებში წნევის დინამიკის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა ემპირიული მონაცემების მიხედვით	122
თავი 5. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში მომსახურების ხარისხი, რისკის ანალიზი.....	127
5.1. რისკის მაჩვენებლების დადგენა ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელებში.....	127
5.2. გაზგამანაწილებელი ქსელები, მოდელირება.....	143
თავი 6. მომსახურების ხარისხის მართვის და საიმედოობის საკითხების გამოკვლევის შედეგების გამოყენება გაზის ტრანსპორტირებისა და განაწილების სექტორში მოქმედი საწარმოების ფინანსური სტაბილურობის ანალიზისას	153
დასკვნები.....	162
ლიტერატურა.....	165

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების განზოგადოებული მონაცემები	34
ცხრილი 2. რუსეთის მაგისტრალური გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2011-2014 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილების (ავარია/(წელი • 1000 კმ)..	37
ცხრილი 3. დიამეტრული კოეფიციენტის მნიშვნელობები.....	40
ცხრილი 4. დეფექტური ხვრეტის პარამეტრები.....	41
ცხრილი 5. გაზსადენის ავარიის გაგლეჯისას გაზის აალების ალბათობა	42
ცხრილი 6. ერლანგის განაწილების A_k კოეფიციენტის და მათემატიკური მოლოდინის საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება k პარამეტრზე	48
ცხრილი 7. სრული ამონაკრების სტატისტიკური მონაცემები	56
ცხრილი 8. პირველი ჯგუფის სტატისტიკური მონაცემები	57
ცხრილი 9. მეორე ჯგუფის სტატისტიკური მონაცემები.....	57
ცხრილი 10. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის და ჰისტოგრამის მონაცემები	58
ცხრილი 11. ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები I ჯგუფებისათვის	62
ცხრილი 12. აღდგენის დროების სტატისტიკური მონაცემები I ჯგუფისათვის	62
ცხრილი 13. ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის.....	64
ცხრილი 14. აღდგენის დროების სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის.....	64
ცხრილი 15. ნამუშევრის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	66
ცხრილი 16. ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები I ჯგუფებისათვის	68
ცხრილი 17. ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის	68
ცხრილი 18. ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები III ჯგუფებისათვის	68
ცხრილი 19. ნამუშევრის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამის და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის მონაცემები	71

ცხრილი 20. ჰისტოგრამის და განაწილების სიმკვრივეების ნარევის $\mathbf{M}(t)$ ფუნქციების მნიშვნელობები	76
ცხრილი 21. რუნგეს სქემა ფურიეს მწკრივის კოეფიციენტების დასადგენად..	90
ცხრილი 22. რუნგეს სქემა ჯამების და სხვაობების მნიშვნელობებისათვის ..	90
ცხრილი 23. 12 წერტილიანი რუნგეს სქემა	93
ცხრილი 24. კორელაციის კოეფიციენტის ინტერპრეტაცია	102
ცხრილი 25. მოხმარების დღე-ღამური ავტოკორელაციის კოეფიციენტი	103
ცხრილი 26. მოხმარების დღე-ღამური ურთიერთკორელაციის \mathbf{K}_{xy} კოეფიციენტის მნიშვნელობები	103
ცხრილი 27. გაზის მოხმარების უთანაბრობის კოეფიციენტი	105
ცხრილი 28. 2013 წლის საათური უთანაბრობის კოეფიციენტის დინამიკა, თვის ერთ-ერთი მახასიათებელი დღისათვის (15 რიცხვი)	107
ცხრილი 29. ბუნებრივი გაზის \mathbf{R} უთანაბრობის კოეფიციენტი სხვადასხვა მახვილი ქალაქისათვის (1. მოსკოვი; 2. კიევი; 3. თბილისი 2009 წ; 4. თბილისი – 2013 წ)	107
ცხრილი 30. ბუნებრივი გაზის წნევის ცვლილების ტიპები	112
ცხრილი 31. გაზგამანაწილებელ ქსელში ბუნებრივი გაზის წნევის ცვლილების მახასიათებლები	113
ცხრილი 32. საკვანძო წერტილების მნიშვნელობები ლაგრანჟის პოლინომის კოეფიციენტის დასადგენად	116
ცხრილი 33. ადამიანზე და გარემოზე ზემოქმედების კრიტერიუმები	127
ცხრილი 34. ადამიანზე და გარემოზე ზემოქმედების კრიტერიუმები (იტალიის მაგალითი)	128
ცხრილი 35. ინციდენტების გადანაწილება სისტემაში.....	129
ცხრილი 36. კუთრი ავარიების რაოდენობა, ბუნებრივი გაზის შემთხვევაში	130
ცხრილი 37. ინციდენტების პროცენტული რაოდენობა.....	131
ცხრილი 38. საშიში ინციდენტების სტატისტიკა აშშ-ში 1986-2001 წწ	131
ცხრილი 39. საშიში ინციდენტების სტატისტიკა აშშ-ში 2002-2012 წწ	131

ცხრილი 40. CO ₂ -ის გაფრქვევის მიზეზები	132
ცხრილი 41. ინციდენტების რაოდენობის მიზეზები	134
ცხრილი 42. პირველადი მტყუნებების სიხშირეების სხვადასხვა პერიოდები	136
ცხრილი 43. გაჟონვების სრული რღვევის, ბზარის და ხვრეტის შემთხვევაში	136
ცხრილი 44. გაგლეჯის აალების ალბათობა.....	137
ცხრილი 45. სიხშირეების მნიშვნელობები.....	137
ცხრილი 46. ზარალის ზღურბლი	138
ცხრილი 47. საშიშროების ალბათობები	142
ცხრილი 48. შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისი“ 2013, 2014 და 2015 წლის ტექნიკური მონაცემები	152

ნახაზების ნუსხა

- ნახ. 1. ძირითადი მონაცემები: ტრანსპორტირებული და მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ჯაჭვის სქემა 25
- ნახ. 2. რეგულირებული და დერეგულირებული სეგმენტი..... 27
- ნახ. 3. ბუნებრივი გაზის ბაზრის სტრუქტურა, ძირითადი კომერციული და ფიზიკური ნაკადები..... 27
- ნახ. 4. ბუნებრივი გაზის იმპორტის, ტრანზიტისა და მოხმარების 2014 წლის სტატისტიკა..... 28
- ნახ. 5. უმსხვილესი საცალო მიწოდებლის მიერ მიწოდებული გაზის წილი მთლიან საცალო მიწოდებაში (თბოელექტროსადგურების გამოკლებით)..... 29
- ნახ. 6. ტრანსპორტირების სისტემიდან საქართველოში გაცემული ბუნებრივი გაზის ოდენობა თვეების მიხედვით (ათასი მ³)..... 30
- ნახ. 7. ა. საყოფაცხოვრებო სექტორის მოხმარების სეზონურობა რეგიონებსა და თბილისში; ბ. მოხმარების სეზონურობა საყოფაცხოვრებო და არასაყოფაცხოვრებო სექტორებში..... 31
- ნახ. 8. საყოფაცხოვრებო მოხმარება ერთ აბონენტზე (მ³)..... 31
- ნახ. 9. საყოფაცხოვრებო სექტორისათვის დერეგულირებული და ნაწილობრივ დერეგულირებული ტარიფით მიწოდებული ბუნებრივი გაზის მოცულობა (ათასი მ³)..... 32
- ნახ. 10. სხვადასხვა ტიპის პირდაპირი და საცალო მომხმარებლების მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის წილი მთლიან მოხმარებაში (2014 წელი).... 32
- ნახ. 11. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელი ქსელის სიგრძე და დანაკარგი 2014 წელს 33
- ნახ. 12. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში დანაკარგები ლიცენზიატების მიხედვით 2014 წელს 34
- ნახ. 13. მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების განზოგადებული მონაცემები 35

ნახ. 14. მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების საშუალო მონაცემები	36
ნახ. 15. რუსეთის მაგისტრალური გაზსადენების მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი · 1000 კმ) დიამეტრის მიხედვით.....	36
ნახ. 16. მტყუნების საფრთხე ყველა მიზეზების მიხედვით ჯამურად.....	37
ნახ. 17. ავარიის განვითარების შესაძლო წარმოქმნის სცენარები	40
ნახ. 18. ა) სხვადასხვა ექსპონენციალური სიმკვრივის განაწილების ფუნქციები; ბ) ალბათობის წრფივი განაწილების სიმკვრივის ფუნქციის ნორმირების სქემა; გ) წრფივი განაწილების მტყუნების საფრთხეს ფუნქციები, ხ-პარამეტრის ცვლილებისას; დ) ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის განაწილების ფუნქციები; ე) რელეის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები, სხვადასხვა პარამეტრებით; ვ) ალბათობის ერლანგის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები: 1. $k = 1$; 2. $k = 2$; 3. $k = 3$; 4. $k = 4$; 5. $k = 5$; 6. $k = 6$; ზ) მათემატიკური მოლოდინის და საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება k პარამეტრზე.....	44
ნახ. 19. მტყუნების საფრთხეს ტიპური ფუნქცია. ა. ზოგადი სქემა; 2. კონკრეტული მაგალითი	50
ნახ. 20. შემთხვევითი სიდიდის ალბათობის განაწილების მრუდები	52
ნახ. 21. ა. ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები და ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ -ს ფუნქცია: $\lambda_1 = 0,001$; $\lambda_2 = 0,002$; $\lambda_3 = 0,003$; $p_1 = 0,5$; $p_2 = 0,3$; $p_3 = 0,2$; ბ. ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები და ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ -ს ფუნქცია: $\mu_1 = 3054$; $\mu_2 = 5122$; $\sigma_1 = 1333$; $\sigma_2 = 154$; $w_1 = 0,49$; $w_2 = 0,49$	55
ნახ. 22. სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა	56
ნახ. 23. პირველი (ა) და მეორე (ბ) ჯგუფის ამონაკრების ჰისტოგრამა.....	57
ნახ. 24. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქცია და ჰისტოგრამა.....	59

ნახ. 25. ა) ნამუშავრების და აღდგენის დროები t და τ , ფაზურ სივრცეში; ბ) ფაზურ სივრცეში ნამუშავრების და აღდგენის დროების (t და τ) დაჯგუფება	60
ნახ. 26. ნამუშევარის (ა) და აღდგენის (ბ) ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია I ჯგუფისათვის	63
ნახ. 27. ნამუშევარის (ა) და აღდგენის (ბ) ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია II ჯგუფისათვის	63
ნახ. 28. ნამუშევრის დროის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია სრული ამონაკრებისათვის	65
ნახ. 29. ა) ნამუშავრების და აღდგენის დროები t და τ ფაზურ სივრცეში; ბ) ფაზურ სივრცეში ნამუშავრების და აღდგენის დროების (t და τ) დაჯგუფება	67
ნახ. 30. ნამუშევარის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია I (ა),II (ბ) და III(გ) ჯგუფისათვის	69
ნახ. 31. მტყუნების საფრთხეების დინამიკა დროში	70
ნახ. 32. მტყუნების საფრთხეების დროში დინამიკის ინტერპრეტაციის სქემა..	70
ნახ. 33. ნამუშევრის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია	71
ნახ. 34. ა) ფაზური სივრცის ილუსტრაცია; ბ) ფაზური სივრცის ინტერპრეტაცია.....	72
ნახ. 35. სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა	73
ნახ. 36. ა. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების დადგენა; ბ. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია	74
ნახ. 37. ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქციის ზედდება	74
ნახ. 38. ა. რელეის განაწილება; ბ. წრფივი განაწილება (შესაბამისი წილები და ახალი ფუნქციები)	76

ნახ. 39. ა. ექსპონენციალური განაწილება; ბ. ნორმალური განაწილება (შესაბამისი წილები და ახალი ფუნქციები)	76
ნახ. 40. ჰისტოგრამა და განაწილების სიმკვრივეების ნარევის $G(t)$ ფუნქცია ...	77
ნახ. 41. ქ. თბილისის მაღალი და საშუალო წნევის გაზსადენის სქემა.....	78
ნახ. 42. გაზის მიხმარების პროცესის ძირითადი შემადგენლები: ა) პროგნოზირებადი პოლინომიალური; ბ) არაპროგნოზირებადი სტოქასტიკური; გ,დ,ე) პროგნოზირებადი პოლიჰარმონიული (ღერძები პირობითია)	80
ნახ. 43. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის (სრული ანსამბლი); ბ) 2013 წლის იანვრის თვისათვის მოხმარების ნორმირებული მწკრივი	80
ნახ. 44. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11- 5 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26- 1 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარებაა).....	81
ნახ. 45. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად.....	81
ნახ. 46. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარებაა)	82
ნახ. 47. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად.....	82
ნახ. 48. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარებაა).....	83
ნახ. 49. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად.....	83

ნახ. 50. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარება)	84
ნახ. 51. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად.....	84
ნახ. 52. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის ოთხი ტიპიური თვისათვის – იანვარი, ოქტომბერი, აპრილი, ივლისი) ...	85
ნახ. 53. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 (1. ემპირიული. 2. თეორიული): ა) იანვარი; ბ) აპრილი; გ) ივლისი; დ) ოქტომბერი	93
ნახ. 54. ა) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღელამური ავტოკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. იანვარი, 2. აპრილი, 3. ივლისი, 4. ოქტომბერი); ბ) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღელამური ურთიერთკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. იანვარი-აპრილი; 2. იანვარი-ივლისი; 3. იანვარი-ოქტომბერი); გ) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღელამური ურთიერთკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. აპრილი-ივლისი; 2. აპრილი-ოქტომბერი; 3. ივლისი - ოქტომბერი)	103
ნახ. 55. 2013 წლის უთანაბრობის კოეფიციენტის დინამიკა, თვის ერთ-ერთი მახასიათებელი დღისათვის (15 რიცხვი): 1. იანვარი; 2. აპრილი; 3. ივლისი; 4. ოქტომბერი.....	105
ნახ. 56. ბუნებრივი გაზის R უთანაბრობის კოეფიციენტი სხვადასხვა მახვილი ქალაქისათვის (1. მოსკოვი; 2. კიევი; 3. კიშინოვი; 4. თბილისი 2009 წ; 5. თბილისი – 2013 წ)	108
ნახ. 57. ფარდობითი ცდომილება ემპირიულ და ანალიზურ მწკრივებს შორის: 1. იანვარი; 2. აპრილი; 3. ივლისი; 4. ოქტომბერი	108
ნახ. 58. გაზმომარაგების საშუალო დღე-ღამური გრაფიკი, საყოფაცხოვრებო დატვირთვით: 1. გრაფიკი აგებული (1) ფორმულით; 2. გრაფიკი აგებული შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” მონაცემებით	110
ნახ. 59. საწარმოებების საშუალო დღელამური გაზმომარაგების გრაფიკი: 1. მკვეთრი ცვლადი დატვირთვა; 2. უცვლელი დატვირთვა	111

ნახ. 60. წნევის დინამიკა ქ. თბილისის მარეგულირებელ ნაგებობებში 2013 წლის (სრული ანსამბლი): 1. ნავთლუდის გაზმარეგულირებელი სადგური (გლდანი და გაჩიანი იგივეა); 2. გაზმარეგულირებელი სადგური №1; 3. გაზმარეგულირებელი სადგური №3; 4. გაზმარეგულირებელი სადგური №4; 5. გაზმარეგულირებელი სადგური წყნეთის შესასვლელში. ა) 2013 წლის (სრული ანსამბლი); ბ) 2014 წლის ნახევარი წლისათვის (სრული ანსამბლი); გ) 2013 წლის და 2014 წლის პირველი ნახევარი წლის (იანვარი-ივნისი).. 114

ნახ. 61. ქ. თბილისის ყველა გაზგამანაწილებელი სადგურის წნევის სრული ანსამბლი 114

ნახ. 62. ა) ნავთლუდის გაზმარეგულირებელი სადგურის წნევის დინამიკა 2013 წლის 400 საათისათვის: 1. ემპირიული მონაცემები; 2. ტრენდის დადგენა ლაგრანჟის პოლინომების საშუალებით; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” წნევის დინამიკა ნავთლუდის მარეგულირებელ ნაგებობაში 2013 წლის და 2014 წლის პირველი ნახევარი წლის (იანვარი-ივნისი) სათების მიხედვით: 1. ემპირიული მონაცემები; 2. ტრენდი 116

ნახ. 63. სხვაობა Δp (ატ) ემპირიულ მონაცემებს და ტრენდებს შორი 117

ნახ. 64. ჰისტოგრამა და ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის კანონის აპროქსიმაცია 117

ნახ. 65. 1. ინტუიციური რისკი $-R_1$; 2. პრევენციული რისკი $-R_2$; 3. შემარბილებელი რისკი $-R_3$. $R_1 > R_2 > R_3$ 121

ნახ. 66. რისკის ანალიზის მეთოდების კლასიფიკაცია 123

ნახ. 67. რისკის რაოდენობრივი ანალიზის პროცედურა 124

ნახ. 68. ა) ინდივიდუალური რისკი; ბ) სიხშირის და წელიწადში ინციდენტების საშიშროების დამოკიდებულება (სოციალური რისკის მგალითები): 1. საზღვაო ოპერაციები; 2. სანაპირო ოპერაციები; 3. ობიექტების ჯამური რისკი 126

ნახ. 69. კრიტერიუმები (F,N) (Farrokh Nadim, 2010): 1. ჰოლანდია; 2. ჰონგკონგი; 3. დიდი ბრიტანეთი 129

ნახ. 70. ბუნებრივი გაზის სხვადასხვა გზებით ტრანსპორტირების ეკონომიკური ვარიანტები; 1. საზღვაო გაზსადენი; 2. სახმელეთო

გაზსადენი; 3. გათხევებული ბუნებრივი გაზის (LNG) ტრანსპორტირება საზღვაო ხომალდებით	132
ნახ. 71. გაზსადენის ხეს ხდომილების სქემა	135
ნახ. 72. ა),ბ) აფეთქების რადიუსების გაანგარიშება; გ),დ) ჭავჭავი აალებადობის რადიუსის გაანგარიშება.....	138
ნახ. 73. მიწისქვეშა მილსადენის გაჟონვა, კვადრანტების მიმართულებით გაფრქვევის გამარტივება.....	140

შესავალი

საქართველოს ეკონომიკის განვითარებისა და პროგრესულ საერთაშორისო პოლიტიკურ და გლობალურ ეკონომიკურ სტრუქტურებთან ინტეგრაციის დღევანდელ ეტაპზე განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს ენერგეტიკული უსაფრთხოებისა და მოსახლეობისა და ეკონომიკის მზარდი მოთხოვნის ხელმისაწვდომი რესურსებით უზრუნველყოფა. ბოლო წლების ინტენსიური აღდგენითი და სამშენებლო სამუშაოებისა და დარგის საწარმოთა რესტრუქტურის ხარჯზე, აგრეთვე ტრანზიტული მაგისტრალური მილსადენების ამოქმედების შედეგად, მნიშვნელოვანწილად უკვე გარკვეულად გადაწყვეტილია ენერგეტიკული უსაფრთხოების პრობლემა. მიუხედავად აღნიშნულისა, დღევანდელ ეტაპზე, ძვირადღირებული იმპორტული სათბობის მოწოდება-მოხმარების რაციონალური დაგეგმვისა და ადგილობრივი რესურსებით მათი მაქსიმალური ჩანაცვლების, ენერგეტიკული ბაზრის შემდგომი ლიბერალიზაციისა და რეგიონულ სისტემებში ინტეგრაციის პროცესების დაჩქარების გარეშე სერიოზული საფრთხის ქვეშ დგება ქვეყნის განვითარება ზოგადად. შესაბამისად, ქვეყნის ენერგეტიკის სხვადასხვა მიმართულების, მათ შორის გაზის სექტორის განვითარების სტრატეგიული მიმართულებების განსაზღვრა მოსახლეობისა და მეურნეობის სხვადასხვა დარგის მზარდი მოთხოვნის კონკურენტულ ფასიანი და ხარისხიანი სათბობი რესურსებით დაკმაყოფილების მიზნით, სადღეისო აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

ბუნებრივი გაზის სექტორის უსაფრთხოება, საპროგნოზო მეთოდების და პარამეტრების მეცნიერულ დონეზე შემუშავება თანამედროვე პირობებში მეტად აქტუალურია ნებისმიერი ქვეყნისათვის. ამ პრობლემის გადაწყვეტა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საქართველოსათვის, რომელიც განიცდის საკუთარი სათბობ-ენერგეტიკული რესურსების

დეფიციტს. სადისერტაციო ნაშრომში პრობლემის კვლევა ატარებს სისტემურ ხასიათს და მასში პრაქტიკულად მთელი სისრულით ასახულია ყველა ის ფაქტორი, რომლებიც მოქმედებს გაზგამანაწილებელი მეურნეობის სტრუქტურის მნიშვნელობების ფორმირებაზე. მიღებული საპროგნოზო პარამეტრები და მეთოდები განსაზღვრულია პროგნოზირების თანამედროვე აპრობირებული მეთოდების კომპლექსურად გამოყენებით. შერჩეულია მეთოდიკის ისეთი ალგორითმი, რომელიც მაქსიმალური სიზუსტით ასახავს საქართველოში ენერგეტიკის დაბალანსებულ განვითარებას.

დასახული პროგრამის შესაბამისად, კვლევის საწყის ეტაპზე ჩატარებულია ბუნებრივი გაზის გაზგამანაწილებელი მეურნეობების მდგომარეობის ანალიზი. მოძიებულია 2013-2015 წლამდე პერიოდში სტატისტიკური მონაცემები და შესრულებულია მათი სისტემატიზაცია.

გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის ავარიული მტყუნებები, რომლებსაც თან სდევს დიდი დანახარჯები აღდგენაზე, ზიანს აყენებს მომხმარებლებს. ამასთან დაკავშირებით გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობა, გადაიქცა ობიექტების ერთ-ერთ ტექნიკურ მახასიათებლად.

მიუხედავად იმისა, რომ დღეისათვის არსებობს მრავალი კვლევა რომელიც შეეხება გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობას, აგრეთვე არსებობს საკმაოდ ბევრი საცნობარო და ინფორმაციული წყარო, აღნიშნული საკითხები არ არის მწყობრად გადაწყვეტილი.

გაზის სექტორის ძირითადი ტექნოლოგიური ჯაჭვი შემდეგნაირია: მოპოვება, წარმოება, ტრანსპორტირება, განაწილება, მიწოდება, ხოლო საერთაშორისი ასპექტი შემდეგნაირია: გლობალური ბაზარი - ეროვნული ბაზარი - ეროვნული რეგულირება. ჯაჭვის მიზანია: საბადოდან

მომხმარებლამდე შეიკრას მთლიანობაში საწარმო-გასაღების ჯაჭვი. თითოეულ ეტაპზე, საერთაშორისო ენერგეტიკული ბაზრების გეოპოლიტიკური ლანდშაფტი გამუდმებით იცვლება. განსაკუთრებული მნიშვნელობა გააჩნია რესურსების მართვას და მიწოდების უწყვეტობას.

გაზიფიკაციის დონით საქართველო იყო ერთ-ერთი მოწინავე ქვეყანა დსთ-ში ბუნებრივი გაზის 43%-იანი და თხევადი გაზის 56%-იანი მოხმარებით, ხოლო წლიურმა პიკურმა ხარჯებმა 90-იანი წლებისათვის შეადგინეს, შესაბამისად, 6 მლრდ. მ³-ზე და 220 ათას ტონაზე მეტი. ახალი საუკუნის დასაწყისისათვის ბუნებრივი გაზით გაზიფიცირებული იყო 50-მდე ქალაქი და 700 სოფელი.

თანამედროვე გაზგამანაწილებელი სისტემები თავისი განვითარების მოცემულ ეტაპზე უნდა პასუხობდეს იმ მოთხოვნებს, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ: გამანაწილებელი ქსელების ენერგოეფექტურობის მაქსიმალური დონე; გარანტირებული უსაფრთხოება, ექსპლუატაციის მოხერხებულობა და სიმარტივე; მომხმარებლების გაზმომარაგების საიმედოობა (უმტყუნობა, ხანგამძლეობა, რემონტვარგისიანობა), მომხმარებლების გაზმომარაგების უწყვეტობა; ტექნიკური მომსახურების, რემონტისა და ავარიულ-აღდგენითი სამუშაოების პირობების შესრულება; გაზმომარაგების რეჟიმების რეგულირება და დაცვა რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მაჩვენებლების მიხედვით; გაზმომარაგების სისტემის ტექნიკური მდგომარეობის პროგნოზირება და დიაგნოსტიკა; გაზის მოხმარების რეჟიმების პროგნოზირება; სისტემის მშენებლობასა და ექსპლუატაციაზე მინიმალური მატერიალური და ფინანსური დანახარჯები.

ამგვარად, გაზმომარაგება ხასიათდება ზრდის უფრო მაღალი ტემპით, სხვა ენერგომატარებლებთან შედარებით. ბუნებრივი გაზი არის კლასიკური საწვავის საუკეთესო სახეობა, ამიტომ მისი გამოყენება მეტად მიზანშეწონილია ტექნიკურად და ეკონომიკურად. საწვავის სხვა სახეებთან

შედარებით ბუნებრივ გაზს გააჩნია შემდეგი უპირატესობები: წვის თბოუნარიანობის მაღალი მაჩვენებელი; სრული წვა; დაბალი თვითღირებულება; შორეულ მანძილებზე მილსადენებით ტრანსპორტირების შესაძლებლობა; წვის პროცესის ავტომატიზაციის შესაძლებლობა და სასარგებლო მოქმედების მაღალი კოეფიციენტების მიღწევა.

დღეისათვის საქართველო მხოლოდ მცირე რაოდენობით იღებს ბუნებრივ გაზს რუსეთიდან. ბუნებრივი გაზი ძირითადად შემოდის აზერბაიჯანიდან. ასევე, ქვეყანაში რჩება კონტრაქტით გათვალისწინებული და ოფციური გაზი სამხრეთის მარშრუტის გაზსადენიდან.

ყველა ზემოჩამოთვლილი მოთხოვნა მაქსიმალურად უნდა იქნეს გამოყენებული გაზგამანაწილებელი სისტემების პროექტირების დროს, ხოლო მითითებული მოთხოვნების შესრულების ხარისხი უნდა ფასდებოდეს ისეთი მაჩვენებლებით, როგორებიცაა – ენერგოეფექტურობის დონე, საიმედოობა, უსაფრთხოება, ტექნოლოგიურობა და ეკონომიურობა.

დისერტაციის თავების მსვლელობა ორგანულად მიყვება ნაშრომს. თვითეული შემდგომი თავი ჰარმონიულად გამოდის წინა თავის შედეგებიდან. კერძოდ შესავლისა და მიმოხილვის შემდეგ, პირველ თავში ნაჩვენებია გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების მახასიათებლების დადგენა, ხოლო მეორე თავში გაზგამანაწილებელი ქსელის კომპლექსური ალბათური მახასიათებლების დადგენა. მესამე თავში მოყვანილია გაზმომარაგების უთანობრო მოხმარების პროგნოზირების დადგენა. საბოლოოდ, მეოთხე თავში განიხილება ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში მომსახურების ხარისხი და რისკის ანალიზი.

თავი 1. საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის და ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა

1.1. საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის მიმოხილვა

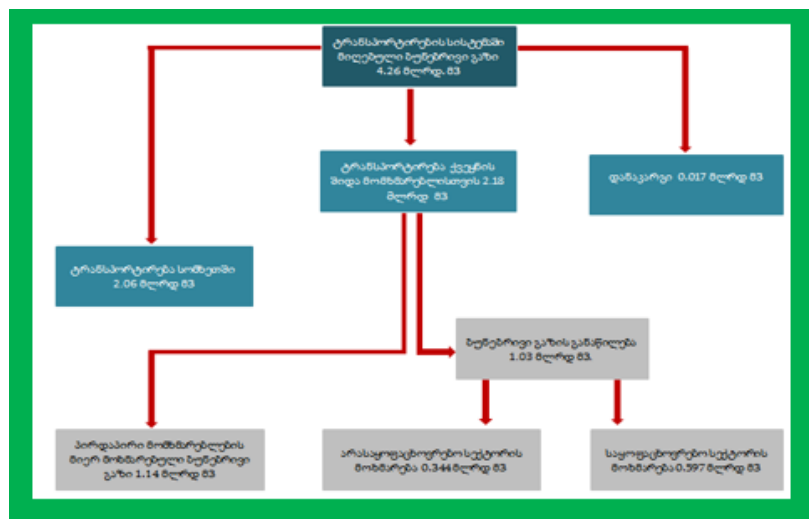
2014 წელი ხასიათდებოდა ბუნებრივ გაზზე გაზრდილი მოთხოვნით, რომელიც წინა წელთან შედარებით 15%-ით გაიზარდა და ძირითადად ავტოგაზგასამართი სადგურების მიერ ბუნებრივი გაზის მოხმარების ზრდით იყო განპირობებული. მათ მოიხმარეს დაახლოებით 80 მლნ. მ³-ით მეტი ბუნებრივი გაზი წინა წელთან შედარებით. 2013 წელთან შედარებით 2014 წელს 70 მლნ. მ³-ით გაიზარდა თბოელექტროსადგურების მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ოდენობა.

ქვეყნის მასშტაბით კვლავ აქტიურად მიმდინარეობდა გაზიფიკაციის სამუშაოები, ხოლო გამანაწილებელ ქსელზე ახალი მომხმარებლების მიერთება განსაკუთრებით დაჩქარდა საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის (სემეკი) მიერ ახალი მომხმარებლების გამანაწილებელ ქსელზე მიერთების წესებისა და პროცედურების გამარტივების შემდეგ. 2014 წლის ბოლოს ქვეყნის გაზიფიკაციის დონემ – 73%, ხოლო საყოფაცხოვრებო სექტორის მიერ ბუნებრივი გაზის მოხმარებამ 597 მლნ. მ³ შეადგინა, რაც 4%-ით მეტია წინა წლის ანალოგიურ მაჩვენებელთან შედარებით. საქართველოს მასშტაბით, ერთი საყოფაცხოვრებო მომხმარებლის (გაზიფიცირებული შინამეურნეობის) საშუალო წლიურმა მოხმარებამ 697 მ³ ბუნებრივი გაზი შეადგინა.

ნახ. 1-ზე ნაჩვენებია ძირითადი მონაცემები: ტრანსპორტირებული და მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ჯაჭვის სქემა.

საქართველოს ბუნებრივი გაზის ბაზარი წარმოადგენს პირდაპირი კონტრაქტების ბაზარს. მიმწოდებლებს შორის ფორმდება როგორც მოკლევადიანი, ისევე გრძელვადიანი კონტრაქტები. ბუნებრივი გაზის ბაზარზე დომინირებული პოზიცია უჭირავთ სოკარის შვილობილ კომპანიებს,

რომლებიც მონაწილეობენ როგორც საბითუმო, ისე საცალო ბაზარზე და იმპორტირებული გაზით ამარაგებენ როგორც მიმწოდებლებს, ისე საბოლოო მომხმარებლებს. ბუნებრივი გაზის ბაზარი, საბითუმო დონიდან მომხმარებლამდე, ორ ერთმანეთისაგან განსხვავებულ სეგმენტს მოიცავს. მოსახლეობა და თბოელექტროსადგურები, სხვა მომხმარებლებისაგან განსხვავებით, შედარებით იაფ გაზს მოიხმარენ. შესაბამისად, მომხმარებელთა ეს ორი ჯგუფი ე.წ. სოციალურ სეგმენტს წარმოადგენს. რაც შეეხება დანარჩენ მომხმარებლებს, ისინი პირდაპირი კონტრაქტების გზით სხვადასხვა კომერციულ ფასად შეიძენენ ბუნებრივ გაზს და, შესაბამისად, წარმოადგენენ არასაყოფაცხოვრებო სეგმენტს.



ნახ. 1. ძირითადი მონაცემები: ტრანსპორტირებული და მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ჯაჭვის სქემა

საქართველოს ბუნებრივი გაზის ბაზრის არსებული სტრუქტურა და ორგანიზება დიდწილად განპირობებულია სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან მიღებული შედარებით იაფი ბუნებრივი გაზისა და იმპორტირებული კომერციული გაზის მოცულობების თანაფარდობით. სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან მიღებული ბუნებრივი გაზის

რაოდენობა არასაკმარისია ბუნებრივი გაზის ქვეყნის ჯამური მოხმარების დასაკმაყოფილებლად. ამიტომ მთავრობის მიერ განსაზღვრულია ბუნებრივი გაზის მომხმარებელთა ის კატეგორია, რომელთათვისაც ხელმისაწვდომია სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან და ჩრდილოეთ-სამხრეთ კავკასიის მაგისტრალური გაზსადენიდან მიღებული ბუნებრივი გაზი. შესაბამისად, ქვეყნის ბუნებრივი გაზის ბაზარი იყოფა რეგულირებულ და დერეგულირებულ სეგმენტებად. ბუნებრივი გაზის საცალო ფასი, გარდა საყოფაცხოვრებო მომხმარებლების რეგულირებადი ნაწილისა, დერეგულირებულია და ასეთ მომხმარებლებს ბუნებრივი გაზი მიეწოდებათ სამომხმარებლო ტარიფის დადგენის გარეშე. დერეგულირებულია აგრეთვე ბუნებრივი გაზის საბითუმო ფასი, თუ არ ჩავთვლით თბოელექტროსადგურებისათვის მისაწოდებელ ბუნებრივი გაზის ფასს, რომელიც გრძელვადიან პერიოდზეა ხელშეკრულებით ფიქსირებული აშშ დოლარში. ლარის დევალვაცია აშშ დოლართან მიმართებაში მნიშვნელოვან გამოწვევად იქცა ბუნებრივი გაზის სექტორის ძირითადი სუბიექტებისათვის, რამდენადაც საქართველო თითქმის სრულად დამოკიდებულია იმპორტირებულ რესურსზე და, შესაბამისად, გარკვეული მიმწოდებლების მიერ ბუნებრივ გაზზე ფასები გაიზარდა ეროვნულ ვალუტაში.

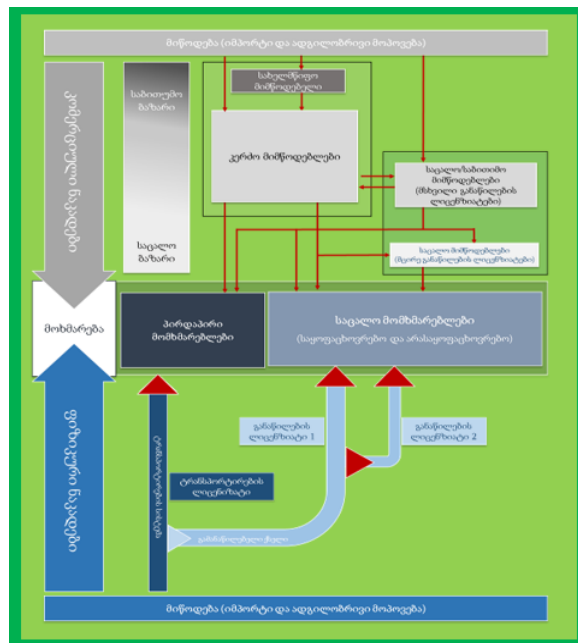
ნახ. 2 ასახავს რეგულირებულ და დერეგულირებულ სეგმენტებს, მომხმარებლის ტიპის მიხედვით.

სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან მიღებული დამატებითი და ოფციური გაზი, ასევე სომხეთში ტრანზიტის საფასურად მიღებული ბუნებრივი გაზი შპს „საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაციის“ მიერ შპს „სოკარ გაზ ექსპორტ-იმპორტის“ მეშვეობით მიეწოდება ბუნებრივი გაზის რეგულირებულ სეგმენტს და ბუნებრივი გაზის საბითუმო და საცალო მოვაჭრეებს, რომლებიც, თავის მხრივ, ამ გაზს აწვდიან განაწილების ლიცენზიატებს, რომლებიც ამავდროულად წარმოადგენენ მიმწოდებლებს

საყოფაცხოვრებო სექტორისათვის. ბუნებრივი გაზის სექტორის ორგანიზება და ბაზრის არსებული სტრუქტურა აღწერილია ნახ. 3-ზე.

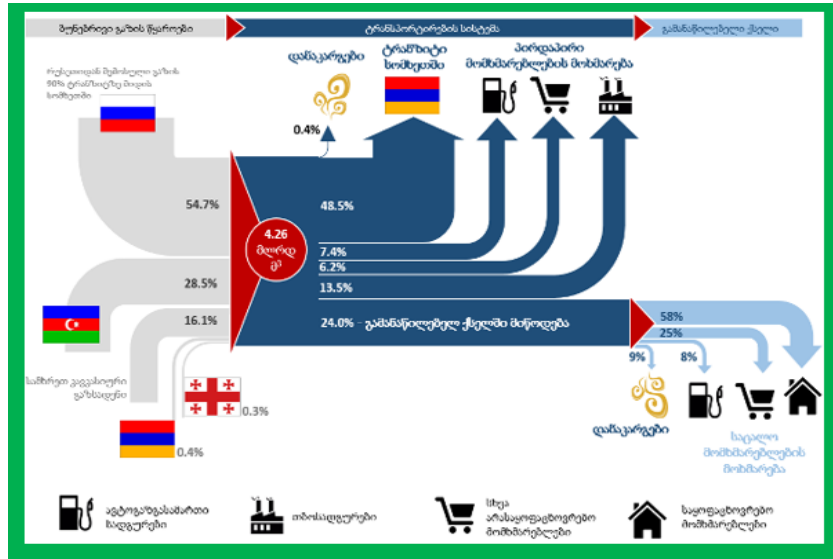


ნახ. 2. რეგულირებული და დერეგულირებული სეგმენტი



ნახ. 3. ბუნებრივი გაზის ბაზრის სტრუქტურა, ძირითადი კომერციული და ფიზიკური ნაკადები

ნახ. 4-ზე ილუსტრირებულია ბუნებრივი გაზის მიწოდების წყაროები ქვეყნების მიხედვით, ტრანზიტისა და მოხმარების სტრუქტურა.



ნახ. 4. ბუნებრივი გაზის იმპორტის, ტრანზიტისა და მოხმარების 2014 წლის სტატისტიკა

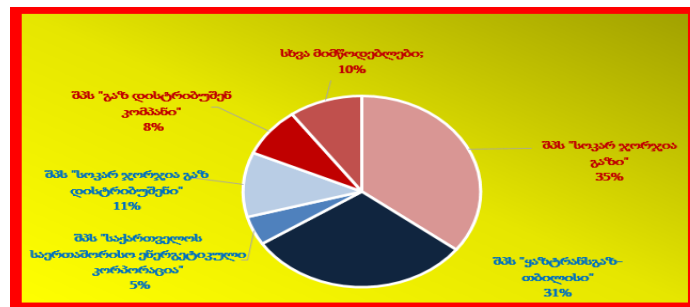
2014 წელს საქართველოს ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების სისტემაში შემოვიდა 4.26 მილიარდი მ³ ბუნებრივი გაზი, რომლის 48.4% მოდის სომხეთში ტრანზიტზე. საქართველოში მოპოვებული გაზის მოცულობა 2014 წელს წინა წელთან შედარებით გაიზარდა 94%-ით და შეადგინა 10,231,710 მ³, რაც ტრანსპორტირების სისტემაში მიღებული გაზის 0.2%-ს, ხოლო საქართველოში მოხმარებული ბუნებრივი გაზის 0.5%-ს შეადგენს. ადგილობრივი მიწოდების ზრდა გამოიწვია „ფრონტერა რისორსიზ კორპორეიშენის“ მიერ საქართველოში ბუნებრივი გაზის მოპოვების დაწყებამ.

საქართველოსთვის ბუნებრივი გაზის მთავარი მომწოდებელი აზერბაიჯანის რესპუბლიკაა. აზერბაიჯანის სახელმწიფო ნავთობკომპანია „სოკარის“ მიერ მოწოდებული ბუნებრივი გაზის წილმა მთლიან მიწოდებაში 55.6% შეადგინა. 2014 წელს ჩრდილოეთ-სამხრეთის გაზსადენით (ტრანზიტი სომხეთში) და სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან მიღებული გაზით ქვეყნის მთლიანი მოთხოვნის 43.8% დაკმაყოფილდა. რევერსული ნაკადების

საშუალებით ხორციელდება სომხეთიდან გაზის იმპორტი, თუმცა მისი წილი უმნიშვნელოა.

სომხეთში ბუნებრივი გაზის ტრანზიტსა და ტრანზიტის საფასურად მიღებული ბუნებრივი გაზის რეალიზაციას ახორციელებს ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების ლიცენზიატი, რომელიც ტრანზიტის საფასურად მიღებულ გაზს შემდგომ აწვდის საბითუმო ბაზარს. სამხრეთკავკასიური მილსადენიდან ბუნებრივი გაზის მიმღებს წარმოადგენს სს „საქართველოს ნავთობისა და გაზისა კორპორაცია“. საქართველოში ბუნებრივი გაზის იმპორტს ახორციელებენ შპს „სოკარ ჯორჯია გაზი“ (აზერბაიჯანიდან) და შპს „საქართველოს საერთაშორისო ენერჯეტიკული კორპორაცია“.

2014 წელს ბუნებრივი გაზის საბითუმო მიწოდების საქმიანობა განახორციელა 9 კომპანიამ. საბოლოო მომხმარებლისთვის ბუნებრივი გაზის მიწოდებას ახორციელებს 37 მიმწოდებელი, რომელთაგან 31 ამავედროულად წარმოადგენს ბუნებრივი გაზის განაწილების ლიცენზიატს. განაწილების ლიცენზიატების გარდა სხვა მიმწოდებლები ბუნებრივი გაზის მიწოდებას ახორციელებენ პირდაპირ მომხმარებლებზეც, რომელთა შორის უდიდეს მომხმარებლებს წარმოადგენენ თბოელექტროსადგურები (ნახ. 5).



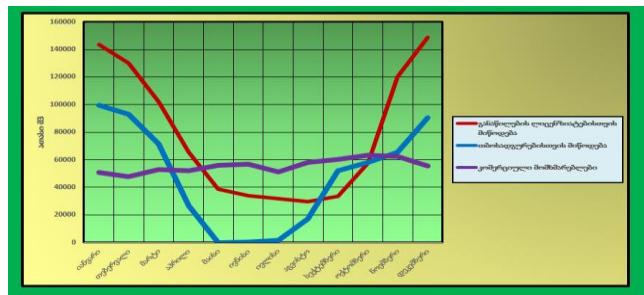
ნახ. 5. უმსხვილესი საცალო მიმწოდებლის მიერ მიწოდებული გაზის წილი მთლიან საცალო მიწოდებაში (თბოელექტროსადგურების გამოკლებით)

ბაზარზე კონკურენციის დონის შესაფასებლად ხშირად გამოიყენება ჰერფინდალ-ჰირშმანის ინდექსი (HHI). HHI ინდექსი ბაზარზე კომპანიების

წილების გაანგარიშების საფუძველზე აფასებს საბაზრო კონცენტრაციას. HHI ინდექსი საქართველოში ბუნებრივი გაზის საცალო მიმწოდებლებს შორის (თბოელექტროსადგურებისთვის მიწოდების გამოკლებით) შეადგენს 2400-ს, რაც ბაზრის ზომიერ კონცენტრაციაზე მიანიშნებს, თუმცა აღნიშნული მაჩვენებელი ახლოსაა ბაზარზე მაღალი კონცენტრაციის ნიშნულთან (>2500).

2014 წელს ჯამში საქართველოს მიეწოდა 2.19 მლრდ მ³ ბუნებრივი გაზი, რაც 15%-ით (287 მლნ მ³-ით) აღემატება 2013 წლის ანალოგიურ მაჩვენებელს. ბუნებრივი გაზის მოხმარებამ, გამანაწილებელ ქსელში არსებული დანაკარგების გამოკლებით, 2014 წელს 2.08 მლრდ მ³ შეადგინა.

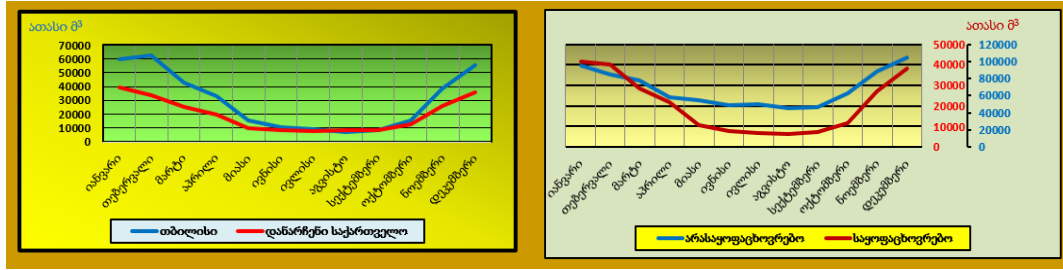
წინა წლების მსგავსად, საქართველოში ბუნებრივი გაზის მოხმარება ხასიათდება მკვეთრად გამოხატული სეზონურობით. ზამთრის პერიოდში (სექტემბერი-თებერვალი) საქართველო მოიხმარს თითქმის 2.3-ჯერ მეტ ბუნებრივ გაზს, ვიდრე ზაფხულის პერიოდში (მარტი-აგვისტო). სეზონურობა უფრო მკაფიოდაა გამოხატული საყოფაცხოვრებო სექტორისა და თბოელექტროსადგურების მოხმარებაში (ნახ. 6 და 7).



ნახ. 6. ტრანსპორტირების სისტემიდან საქართველოში გაცემული ბუნებრივი გაზის ოდენობა თვეების მიხედვით (ათასი მ³)

გამანაწილებელ ქსელში მოხმარების სეზონურობა შეინიშნება როგორც საყოფაცხოვრებო, ისე არასაყოფაცხოვრებო მოხმარებაში, ვინაიდან გამანაწილებელი ქსელის მეშვეობით ბუნებრივ გაზს იღებენ ძირითადად მცირე და საშუალო საწარმოები. ბუნებრივი გაზის საყოფაცხოვრებო სექტორის

მოხმარების სეზონურობა უფრო თვალსაჩინოა თბილისში, ვიდრე სხვა რეგიონებში. ამის მიზეზი, სავარაუდოდ, დედაქალაქში ბუნებრივი გაზის გათბობის მიზნით გამოყენებაა, რეგიონებისაგან განსხვავებით, სადაც შემა კვლავ რჩება გათბობის ძირითად საშუალებად.

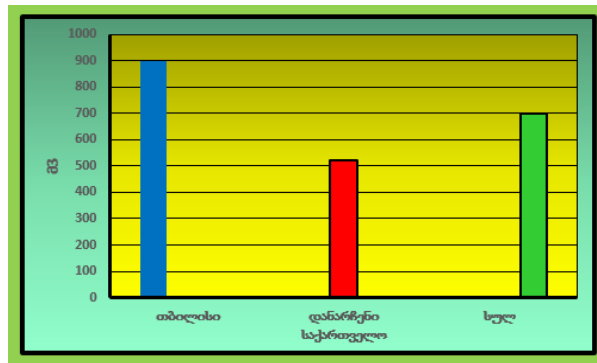


ა

ბ

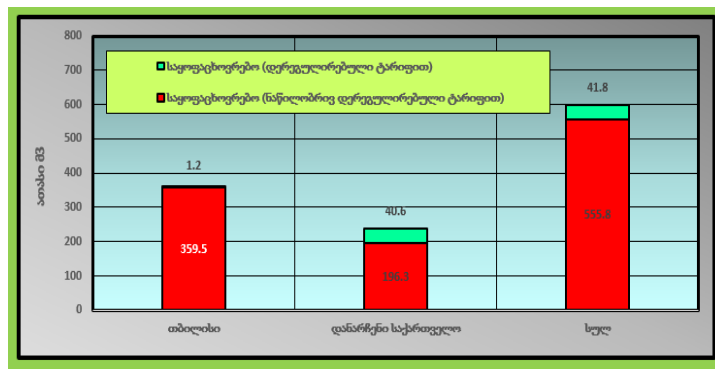
ნახ. 7. ა. საყოფაცხოვრებო სექტორის მოხმარების სეზონურობა თბილისა და რეგიონებში; ბ. მოხმარების სეზონურობა არასაყოფაცხოვრებო და საყოფაცხოვრებო სექტორებში.

საყოფაცხოვრებო სექტორის მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ოდენობა მთლიანად ქვეყნის მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის ოდენობის 29%-ს, ხოლო საცალო მოხმარების 63%-ს შეადგენს. საყოფაცხოვრებო სექტორის მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის 60%-ს მოიხმარენ ქ. თბილისის მცხოვრებლები. აქ ასევე საგრძნობლად მეტია ერთ საყოფაცხოვრებო აბონენტზე მოხმარებული ბუნებრივი გაზის მოცულობაც (ნახ. 8).

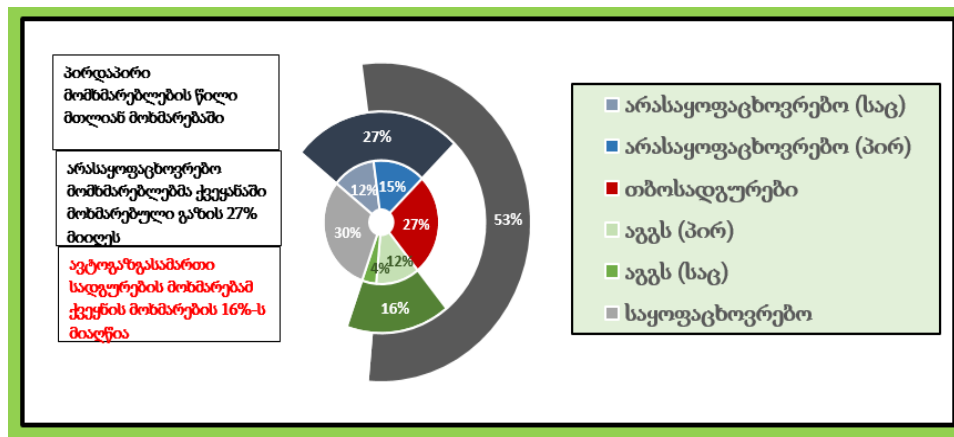


ნახ. 8. საყოფაცხოვრებო მოხმარება ერთ აბონენტზე (მ³)

„ბუნებრივი გაზის მიწოდების საქმიანობის დერეგულირებისა და ნაწილობრივი დერეგულირების შესახებ“ საქართველოს ენერგეტიკის მინისტრის 2007 წლის 25 სექტემბრის №69 ბრძანების თანახმად, ბუნებრივი გაზის მიწოდების საქმიანობა დერეგულირებულადაა გამოცხადებული 2007 წლის 1 სექტემბრის შემდეგ. ნახ. 9 ასახავს საყოფაცხოვრებო სექტორის მიერ დერეგულირებული ფასითა და ნაწილობრივ დერეგულირებული ტარიფით მოხმარებული გაზის მოცულობებს.



ნახ. 9. საყოფაცხოვრებო სექტორისათვის დერეგულირებული და ნაწილობრივ დერეგულირებული ტარიფით მიწოდებული ბუნებრივი გაზის მოცულობა (ათასი მ³)



პირდაპირი მომხმარებლების წილი მთლიან მოხმარებაში

არასაყოფაცხოვრებო მომხმარებლებმა ქვეყანაში მოხმარებული გაზის 27% მიიღეს

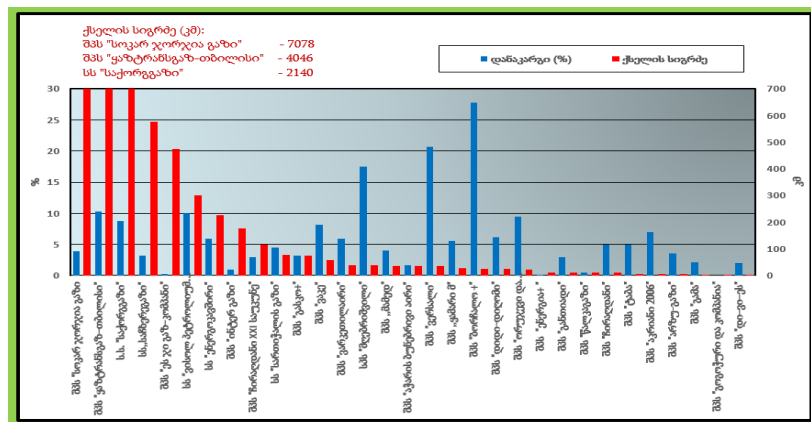
ავტოგაზიფიკაციის სადგურების მოხმარებამ ქვეყნის მოხმარების 16%-ს მიადგინა

ნახ. 10. სხვადასხვა ტიპის პირდაპირი და საცალო მომხმარებლების მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის წილი მთლიან მოხმარებაში (2014 წელი)

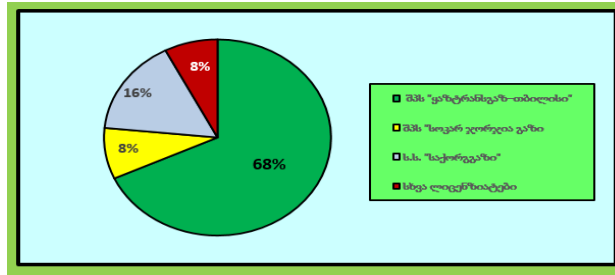
სხვადასხვა ტიპის პირდაპირი და საცალო მომხმარებლების მიერ მოხმარებული ბუნებრივი გაზის წილი მთლიან მოხმარებაში ასახულია ნახ. 10-ზე.

ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში მაღალი დანაკარგების არსებობა წარმოადგენს სექტორის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას. 2014 წელს ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში დანაკარგმა შეადგინა 8.6%. ნახ. 11-ზე ასახულია კონკრეტული ლიცენზიატების გამანაწილებელ ქსელში არსებული დანაკარგები და ამ ლიცენზიატების მფლობელობაში არსებული გამანაწილებელი ქსელის სიგრძე. ნახაზიდან ჩანს, რომ პროცენტულად შედარებით მაღალი დანაკარგები ძირითადად გააჩნიათ მცირე ლიცენზიატებს (მცირე გამანაწილებელი ქსელით). გამონაკლისია შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისი“, რომელიც წარმოადგენს საქართველოში უმსხვილეს ლიცენზიატს, რომლის დანაკარგების მოცულობამ საანგარიშო პერიოდში შეადგინა 60.7 მლნ. მ³ ბუნებრივი გაზი (მის გამანაწილებელ ქსელში მიღებული გაზის 10.3%).

მიუხედავად იმისა, რომ პროცენტული დანაკარგი გაზგამანაწილებელ ქსელში 15%-ს აჭარბებს სამი განაწილების ლიცენზიატისათვის, ამ ლიცენზიატების სიდიდიდან გამომდინარე, გამანაწილებელ ქსელში მთლიანად დაკარგული ბუნებრივი გაზის 92% მოდის 3 მსხვილ განაწილების ლიცენზიატზე (ნახ.12).



ნახ. 11. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელი ქსელის სიგრძე და დანაკარგი 2014 წელს



ნახ. 12. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში დანაკარგები ლიცენზიატების მიხედვით 2014 წელს

1.2. ანალიზი და ლიტერატურის წყაროები მაგისტრალური გაზსადენების ავარიებისა და რისკების შესახებ

ამჟამად, ყოფილი საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე გადის დაახლოებით 234 ათასი კილომეტრი სიგრძის მაგისტრალური გაზსადენი, რომელთა 60% 1020 მმ-ის დიამეტრზე მეტია. ცხრილში 1 მოყვანილია მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების განზოგადოებული მონაცემები.

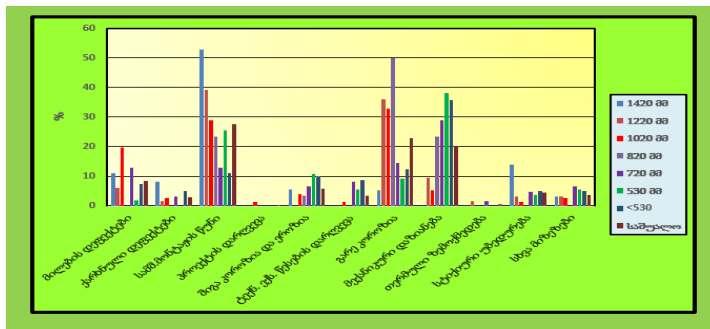
ცხრილი 1

მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების განზოგადოებული მონაცემები

წარმოქმნის მიზეზები, %	1420 მმ	1220 მმ	1020 მმ	820 მმ	530 მმ	< 530 მმ	საშუალო
მილწვის დეფექტები	11,1	6,2	19,7	0	1,8	7,4	8,4
ქარხნული დეფექტები	8,3	1,6	2,6	0	0	4,9	2,9
სამშენებლო მონტაჟის წუნი	52,8	39,1	29,0	23,3	25,4	11,1	27,7
პროექტის დარღვევა	0	0	1,3	0	0	0	0,2
შიგა კოროზია და ეროზია	5,5	0	4,0	3,4	10,9	9,9	5,7
ტექნიკური ექსპლუატაციის წესები დარღვევა	0	0	1,3	0	5,5	8,7	3,4
გაეე კოროზია	5,3	35,9	32,9	50,0	9,1	12,4	22,9
მექანიკური დაზიანება	0	9,4	5,3	23,3	38,2	35,8	20,1
თერმული ზემოქმედება	0	1,6	0	0	0	0	0,5
სტიქიური უბედურება	13,9	3,1	1,3	0	3,6	4,9	4,5
სხვა მიზეზები	3,1	3,1	2,6	0	5,5	4,9	3,7

ნახ. 13 და 14-ზე მოყვანილია ცხრილი 1-ის შესაბამისი მონაცემები.

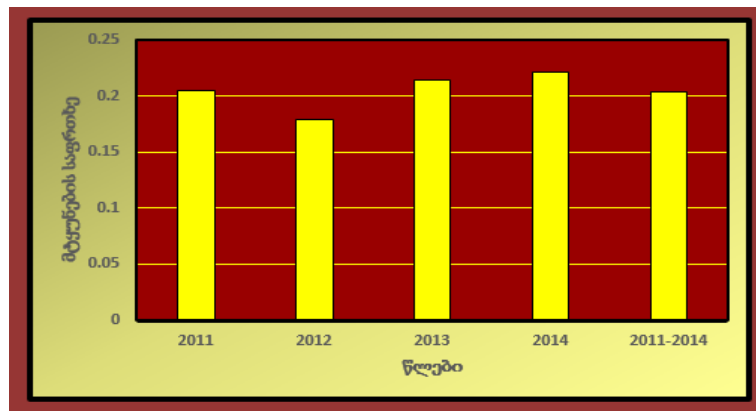
რადგანაც მოყვანილი სტატისტიკური მონაცემები აღებულია ბოლო 20 წლის მონაცემების მიხედვით, ამიტომ შესაძლოა მტყუნების საფრთხეს დასკვნების მიღება. ცნობილია, რომ სხვადასხვა ქვეყნების გაზსადენების ავარიულობა შემცირდა 6-ჯერ, 70-იან წლებთან შედარებით. მაგალითად აშშ-ს გაზსადენებისათვის, ეს მახასიათებელი მდგრადია ბოლო 20 წლის განმავლობაში. მსგავსია აშშ-ს და კანადის გაზსადენების ავარიულობა. დიდი ბრიტანეთის გაზსადენები 1,5-2-ჯერ საიმედოა, ვიდრე ევროპული კონტინენტალურის. ევროპული და ჩრდილო ამერიკული კონტინენტალური გაზსადენების ავარიულობა შეადგენს 0,1-0,2 ავარიას წელიწადში 1000 კილომეტრისათვის. ამჟამად რუსეთის ავარიულობის მახასიათებლები უახლოვდება აშშ-ს და ევროპას: 0,27 ავარია/(წელი·1000 კმ). ავარიულობის ძირითადი ფაქტორებია გარე ზემოქმედება და დეგერმეტიზაცია (მათ შორის დეფექტის გახსნა) [1].



ნახ. 13. მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნების განზოგადებული მონაცემები

რუსეთის მაგისტრალური გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2011-2014 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი·1000 კმ))

ავარიის მიზეზები	2011	2012	2013	2014	2011-2014
საქარხნო დეფექტები	0,019	0,036	0,029	0,029	0,028
სამშენებლო და სამონტაჟო წუნი	0,052	0,057	0,021	0,057	0,047
გარე და შიგა კოროზია	0,046	0,036	0,079	0,043	0,055
მექანიკური ზემოქმედება	0,048	0,043	0,085	0,071	0,062
სხვა მიზეზები	0,019	0,007	0	0,021	0,012



ნახ. 16. მტყუნების საფრთხე ყველა მიზეზების მიხედვით ჯამურად

გაზსადენების ალბათურ ავარიების ძირითადი სცენარები დაკავშირებულია მილსადენის სრულ კვეთზე გაგლეჯასა და გაზის გამოფრქვევასთან ატმოსფეროში კრიტიკულ რეჟიმში (ბგერის სიჩქარით) გაზსადენის ორივე ბოლოში (ნაკადის ქვევით და ზევით). გაზის აალების ალბათობა და გაგლეჯის სიგრძე დაკავშირებულია მილსადენის ტექნოლოგიურ პარამეტრებთან (მილსადენის ენერგეტიკული პოტენციალი) და გრუნტის მახასიათებელთან (სიმკვრივე, ქვების ჩანართები).

დიდი დიამეტრის მილსადენებისათვის (1200÷1400 მმ) დამახასიათებელია გაგლეჯები (50÷70 მ და უფრო მეტი) და გაზის აალების მაღალი ალბათობა (0,6÷0,7). გაზის წვა შესაძლოა მოხდეს ორ ძირითად

რეჟიმში: ორი დამოუკიდებელი (სუსტად ურთიერთქმედი) წვის ჭავლები ორიენტაციით გაზსადენის ღერძის ახლოს, რაც ძირითადად დამახასიათებელია დიდი დიამეტრის მილსადენებისათვის („ჭავლური“ წვის რეჟიმი).

მეორე შემთხვევაში გვაქვს გაზის ხარჯი ცეცხლოვან სვეტში, რომელიც ახლოსაა ვერტიკალურ ორიენტაციასთან (წვა „ქვაბულში“), რაც დამახასიათებელია შედარებით მცირე დიამეტრის გაზსადენებისათვის. ავარიისას გაჟონილი ბუნებრივი გაზის რაოდენობა, დამოკიდებულია გაზსადენის დიამეტრზე, მუშა წნევაზე, გაგლეჯის ადგილმდებარეობაზე, გაგლეჯის იდენტიფიკაციის დროზე, წრფივი არმატურის ამუშავების საიმედოობასა და განლაგებაზე. სტატისტიკის მიხედვით, ავარიის საშუალო დანაკარგი იცვლება $2,5 \pm 3,0$ მლნ. მ³ დიაპაზონში [2].

განვიხილოთ ავარიული სიტუაციების სცენარები. გაზსადენებზე ავარიების წარმოქმნის მიზეზების ანალიზი, გვამღევს ავარიული სიტუაციების განვითარების შესაძლო სცენარების წარმოჩენის შესაძლებლობას.

სცენარების ჯგუფი №1: მაგისტრალური გაზსადენის ნაწილობრივი/სრული რღვევა \Rightarrow გაზის გამოდინება \Rightarrow გაზისა და ჰაერის ნარევის ღრუბლის წარმოქმნა \Rightarrow ღრუბლის გავრცელება \Rightarrow წყაროს ანთება \Rightarrow გაზისა და ჰაერის ნარევის ღრუბლის აფეთქება \Rightarrow ადამიანების, ნაგებობების და მოწყობილობის ბარული დაზიანება (პირველადი და მეორე დარტმის ტალღები) \Rightarrow ღრუბლის პროდუქტების წვის წარმოქმნა და გავრცელება, გარემოს დაბინძურება [3,4].

სცენარების ჯგუფი №2: მაგისტრალური გაზსადენის ნაწილობრივი/სრული რღვევა \Rightarrow გაზის გამოდინება + წყაროს ანთება \Rightarrow ჩირაღდანის წვის ფორმირება \Rightarrow ადამიანების, ნაგებობების და

მოწყობილობის თერმული დაზიანება \Rightarrow ღრუბლის პროდუქტების წვის წარმოქმნა და გავრცელება, გარემოს დაბინძურება.

სცენარების ჯგუფი №3: მაგისტრალური გაზსადენის ნაწილობრივი/სრული რღვევა \Rightarrow გაზის გამოდინება (ანთების გარეშე) გარემოს დაბინძურება \Rightarrow გარემოს დაბინძურება [5-8].

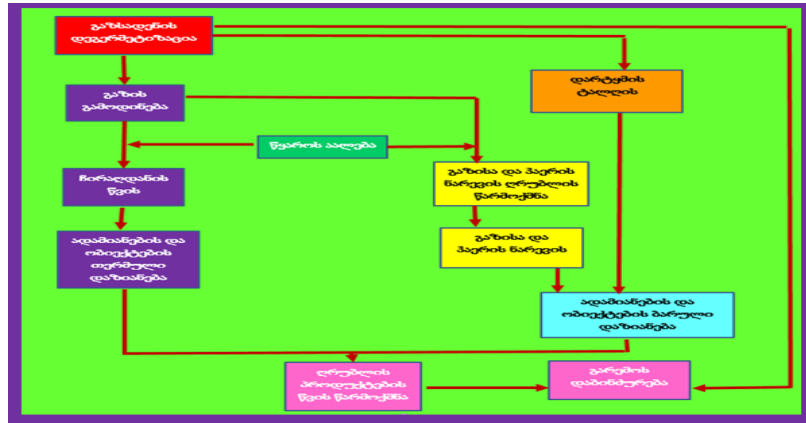
მაგისტრალური გაზსადენის ხაზოვანი ნაწილის ავარიის განვითარების შესაძლო წარმოქმნის სცენარები, მოყვანილია ნახ. 17-ზე.

განვიხილოთ მაგისტრალური გაზსადენის ავარიის წარმოქმნის ალბათობის დადგენა. გაზსადენებიდან ბუნებრივი გაზის არაკონტროლირებადი გამოფრქვევის სიხშირე დამოკიდებულია მილსადენის სრული სიგრძის მიხედვით საშიშროების სხვადასხვა ხარისხის განსხვავებული ტიპის დეფექტების განაწილებაზე [9-14].

იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ავარიის ლოკალური სიხშირე, აუცილებელია ტრასის თითოეული კილომეტრის, მილსადენის ხდომილების მტყუნების ჯამური გავლენის ფაქტორების კოეფიციენტის განსაზღვრა. ეს სიდიდე გამოვლინდება ავარიების სტატისტიკური ანალიზის მიხედვით და გაანგარიშდება მილსადენის დეგერმეტიზაციის ლოკალური სიხშირეს λ_{L} . მილსადენის დეგერმეტიზაციის საშუალო სტატისტიკური სიხშირე განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით [15,16,17,18,19]:

$$\bar{\lambda} = \lambda_{\text{AV}} \mathbf{k}_D \mathbf{k}_{\text{REG}}, \quad (1)$$

სადაც, \mathbf{k}_D არის დიამეტრული კოეფიციენტი; \mathbf{k}_{REG} - რეგიონალური კოეფიციენტი ($\mathbf{k}_{\text{REG}} = 3,38$ ვოლგოგრადის ოლქი, ცხრილი 3); λ_{AV} - სტატისტიკური მონაცემების მიხედვით მაგისტრალური გაზსადენებისათვის 2004-2009 წწ-ში ($\lambda_{\text{AV}} = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/(კმ·წელი)).



ნახ. 17. ავარიის განვითარების შესაძლო წარმოქმნის სცენარები

ცხრილი 3

დიამეტრული კოეფიციენტის მნიშვნელობები

D , მმ	1420	1220	1020	820	720	530	<530
k_D	0,35	0,85	1,6	1,25	1,4	1,2	1,1

გავლენის ფაქტორები ერთიანდება შემდეგ ჯგუფებში: 1. გარე ანტროპოგენური მექანიკური ზემოქმედება; 2. მიწისქვეშა კოროზია; 3. ატმოსფერული კოროზია; 4. გარე კოროზია; 5. მიწების და მოწყობილობის წარმოების ხარისხი; 6. სამშენებლო-სამონტაჟო ხარისხი; 7. გამოცდების ხარისხი და ვადები; 8. კონსტრუქციულ-ტექნოლოგიური ფაქტორები; 9. გარემოს ზემოქმედება; 10. ექსპლუატაციური ფაქტორები.

თითოეული უბნის აღნიშნული ჯგუფის ფაქტორების გავლენა ფასდება 10 ბალიანი შკალით. რისკის განზოგადებული მახასიათებელი - გავლენის კოეფიციენტი k_{Gav} , ასახავს მილსადენის საიმედოობის “ბალურ შეფასებას“, თითოეული შეწონილი კოეფიციენტის აჯამებით.

უბანზე ავარიის სიხშირე განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\lambda_n = \lambda_{AV} k_{REG} k_D \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} p_i q_{ij} B_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} p_i q_{ij} \overline{B}_{ij}} = \overline{\lambda} k_{Gav} \quad (2)$$

სადაც λ_n არის მაგისტრალური გაზსადენის ავარიის საშუალო მტყუნების საფრთხე, $1/(\text{კმ}\cdot\text{წელი})$; \mathbf{B}_{ij} ფაქტორის ბალური შეფასება; $\mathbf{P}_j - j$ - ჯგუფის ნომერი; $\mathbf{q}_{ij} - j$ - გავლენის ფაქტორის ნომერი, i - ჯგუფის ნომერში; \mathbf{I} - გავლენის ფაქტორების ჯგუფების საერთო რიცხვია; $\overline{\mathbf{B}_{ij}}$ - გავლენის ij ფაქტორის საშუალოსტატისტიკური მნიშვნელობის ბალური შეფასება.

გაზსადენების ავარიებზე, ყველაზე მეტი ზარალი ხდება ლითონის მილის დეფექტების ან შედუღების ნაკერების ზონაში. გაზსადენიდან ავარიული გაჟონვების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დეფექტური ხვრეტის დამახასიათებელი ზომა L_p ექვემდებარება ვაიბულის კანონს. გაჟონვის დამოკიდებულება სამი დამახასიათებელი ზომებით და შესაბამისი ექვივალენტური S_{eff} ფართობით, ნაჩვენებია ცხრილში 4.

გაზსადენის ავარიის გაგლეჯისას გაზის აალების ალბათობა დაკავშირებულია ტექნოლოგიურ პარამეტრებთან (მათ შორის ენერგეტიკულ პოტენციალთან და ტროტილის ექვივალენტის მასასთან), რაც მოყვანილია ცხრილში 5.

ცხრილი 4

დეფექტური ხვრეტის პარამეტრები

დეფექტური ხვრეტის პარამეტრები	სვიშები	ზზარი	გილიოტინური გაგლეჯა
L_p / D	0,3	0,75	1,5
S_{eff} / S_0	0,0117	0,0732	0,2813
გაგლეჯების წილი	0,55	0,35	0,1

გაზსადენის ავარიის გაგლეჯისას გაზის აალების ალბათობა

D_G , მმ	მუშა წნევა p , ატ	დამახასიათებელი ზომა L_p	გაზის აალების ალბათობა	ავარიის ენერგეტიკული პოტენციალი	ტროტილის ექვივალენტის მასა
1400	75	70 ÷ 100	0,7	2416	740
	50			1519	466
1200	50	45 ÷ 50	0,6	502	154
	30			276	85
1000	50	45 ÷ 50	0,5	387	119
	30			213	65
700	50	15 ÷ 20	0,5	76	23
	30			42	13
500	30	10 ÷ 12	0,3	13	4
	10			3	1
300	30	6 ÷ 8	0,05	3,1	0,94
	10			0,8	0,24
100	30	4 ÷ 6	0,05	0,3	0,08
	10			0,1	0,02

დასკვნა: ავარიისას გაზსადენის გაგლეჯის ძირითადი მიზეზები და ფაქტორებია ექსპლუატაციის საწყისი დეფექტების ზრდა, რომლებიც არ გამოვლინდნენ ექსპლუატაციაში შესვლისას (სამშენებლო-სამონტაჟო მუშაობები, მილების ქარხნული წუნი); კოროზიული დეფექტების განვითარება (ატმოსფერული და გრუნტის კოროზია, სტრეს-კოროზია); გაზსადენის ტანის მექანიკური ზემოქმედება; უხარისხო დიაგნოსტიკური და სარემონტო სამუშაოები. ავარიული სიტუაციის განვითარების რისკის შემცირებისათვის საჭიროა პრევენციული ზომების კომპლექსის ჩატარება.

1.3. გაზგამანაწილებელი ქსელის მტყუნებებისა და აღდგენების ალბათური მახასიათებლების მეთოდოლოგია

განვიხილოთ ნატურული მონაცემების არსებული მეთოდოლოგია, კერძოდ, დამუშავების მიზნით, განვიხილოთ ნატურული მონაცემების ამონაკრების (სტატისტიკური მწკრივების) ინტერვალის “ოპტიმალური” რაოდენობის განსაზღვრის ფორმულები.

მრავალ წყაროებში, ხშირად მოყვანილია სტარჯესის ევრისტიკული ფორმულა, კერძოდ ინტერვალების „ოპტიმალური“ რაოდენობის განსაზღვრის ფორმულა [20]:

$$k = \log_2 n + 1 = 3,31 \lg n + 1 . \quad (3)$$

[21]-ში, ინტერვალების „ოპტიმალური“ რაოდენობის განსაზღვრა რეკომენდირებულია ბრუქსის და კარაუზერის ფორმულით:

$$k = 5 \lg n . \quad (4)$$

[22]-ში რეკომენდირებულია შემდეგი თანაფარდობა:

$$k \approx \sqrt{n} . \quad (5)$$

და სხვა ნაშრომები [23-25].

განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების დადგენა.

განვიხილოთ ექსპონენციალური განაწილება. უწყვეტ T ექსპონენციალურ განაწილებას, პარამეტრით $\lambda > 0$, აქვს ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია [31]:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0. \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (6)$$

ალბათობის განაწილების სიმკვრივის და განაწილების ფუნქციები ტოლია:

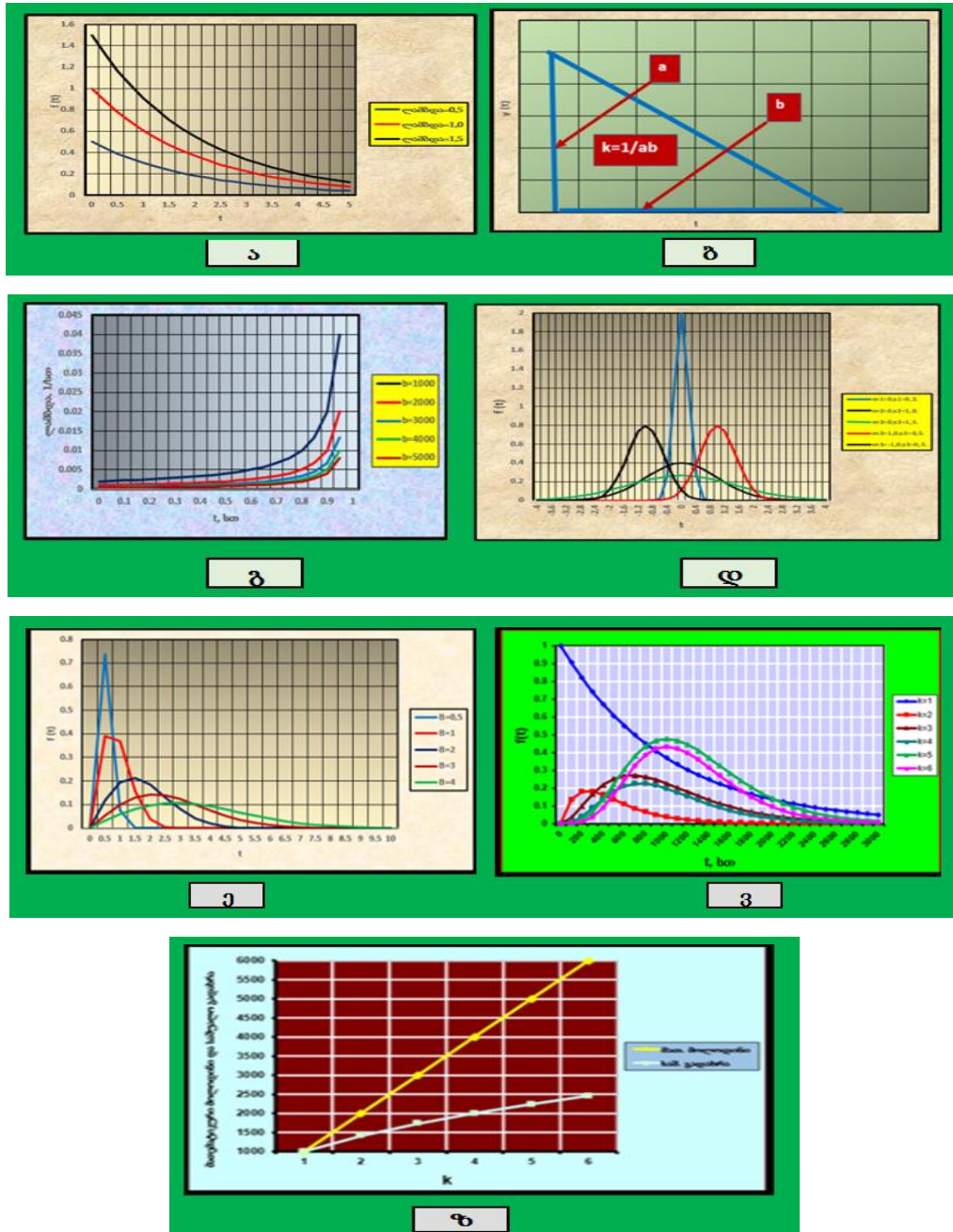
$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & t \geq 0. \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (7)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} . \quad (8)$$

მათემატიკური მოლოდინი და საშუალოკვადრატული გადახრა ტოლია:

$$\mu = \frac{1}{\lambda}; \quad \sigma = \frac{1}{\lambda^2} . \quad (9)$$

ნახ. 18ა-ზე ნაჩვენებია სხვადასხვა ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები.



ნახ. 18. ა) სხვადასხვა ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები; ბ) ალბათობის წრფივი განაწილების სიმკვრივის ფუნქციის ნორმირების სქემა; გ) წრფივი განაწილების მტყუნების საფრთხეს ფუნქციები, b -პარამეტრის ცვლილებისას; დ) ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები; ე) რელეის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები, სხვადასხვა პარამეტრებით; ვ) ალბათობის ერლანგის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები: 1. $k=1$; 2. $k=2$; 3. $k=3$; 4. $k=4$; 5. $k=5$; 6. $k=6$; ზ) მათემატიკური მოლოდინის და საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება k პარამე

განვიხილოთ წრფივი განაწილება. ალბათობის წრფივი განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია ტოლია (ნახ. 18ბ):

$$\begin{cases} f(t) = ka\left(1 - \frac{t}{b}\right); \\ a \leq t \leq b. \end{cases} \quad (10)$$

სადაც ნორმირების კოეფიციენტი ტოლია: $k = \frac{1}{ab}$ (ცხადია, რომ სამკუთხედის ფართობია $\frac{ab}{2}$). ამიტომ საბოლოოდ, გვექნება:

$$f(t) = ka\left(1 - \frac{t}{b}\right) = \frac{2}{b}\left(1 - \frac{t}{b}\right). \quad (11)$$

განვსაზღვროთ მათემატიკური მოლოდინი და საშუალოკვადრატული გადახრა:

$$\mu = \int_0^b tf(t)dt = \int_0^b \frac{2t}{b}\left(1 - \frac{t}{b}\right)dt = \frac{2}{b}\left[\frac{t^2}{2}\right]_0^b - \frac{2}{b^2}\left[\frac{t^3}{3}\right]_0^b = \frac{b}{3} = 0,3333b. \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \int_0^b \frac{2t^2}{b}\left(1 - \frac{t}{b}\right)dt = \frac{2}{b}\left[\frac{t^3}{3}\right]_0^b - \frac{2}{b^2}\left[\frac{t^4}{4}\right]_0^b = \frac{b^2}{6}. \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{b}{\sqrt{6}} = 0,421b. \quad (14)$$

მტყუნების საფრთხე ტოლია:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}; \quad (15)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = \int_0^t \frac{2}{b}\left(1 - \frac{t}{b}\right)dt = \frac{2}{b}\int_0^t dt - \frac{2}{b^2}\int_0^t tdt = \frac{t}{b}\left(2 - \frac{t}{b}\right); \quad (16)$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{2}{b}\left(1 - \frac{t}{b}\right)}{1 - \frac{t}{b}\left(2 - \frac{t}{b}\right)}. \quad (17)$$

ნახ. 18გ-ზე ნაჩვენებია მტყუნების საფრთხეს ფუნქციები, b -პარამეტრის ცვლილებისას.

გადავიდეთ ნორმალურ განაწილებაზე. უწყვეტ ნორმალური განაწილებას, პარამეტრებით მათემატიკური მოლოდინით μ და σ

საშუალოკვადრატულით. ამ შემთხვევაში, ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია ტოლია [32]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (18)$$

ნახ. 18დ-ზე ნაჩვენებია ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები.

განვიხილოთ რელეის განაწილება. ალბათობის რელეის განაწილების სიმკვრივეს ფუნქცია ტოლია [33]:

$$f(t, B) = \frac{t}{B^2} e^{-\frac{t^2}{2B^2}}, \quad t \geq 0; \quad B > 0, \quad (19)$$

სადაც B არის მასშტაბის პარამეტრი.

შესაბამისი განაწილების ფუნქცია ტოლია:

$$P(T \leq t) = \int_0^t f(x) dx = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2B^2}\right), \quad t \geq 0. \quad (20)$$

მათემატიკური მოლოდინი ტოლია:

$$\mu = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty \left(\frac{t}{B}\right)^2 \exp\left(-\frac{t^2}{2B^2}\right) dt = B \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1,253B, \quad (21)$$

ხოლო საშუალო კვადრატი ტოლია:

$$\bar{t}^2 = \int_0^\infty \xi^2 f(\xi) d\xi = \int_0^\infty \left(\frac{\xi^3}{B^2}\right) \exp\left(-\frac{\xi^2}{2B^2}\right) d\xi = 2B^2 \quad (22)$$

ამიტომ დისპერსია (საშუალოკვადრატული გადახრის კვადრატი) უდრის:

$$\begin{cases} \sigma^2 = \bar{t}^2 - (\bar{t})^2 = 2B^2 - \frac{\pi B^2}{2} = B^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right); \\ \sigma = 0,6557B. \end{cases} \quad (23)$$

ნახ. 21ე-ზე ნაჩვენებია რელეის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები, სხვადასხვა პარამეტრებით.

გადავიდეთ ერლანგის განაწილებაზე. ალბათობის ერლანგის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია ტოლია [25]:

$$f_k(t) = \frac{v (vt)^{k-1} e^{-vt}}{(k-1)!}, \quad (24)$$

სადაც $v = k\lambda$. ამიტომ გვექნება:

$$f_k(t) = \frac{k\lambda(k\lambda t)^{k-1} e^{-k\lambda t}}{(k-1)!} = \frac{k^k \lambda^{k-1}}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-k\lambda t}. \quad (25)$$

აღვნიშნოთ

$$A_k = \frac{k^k \lambda^{k-1}}{(k-1)!}, \quad (26)$$

მაშინ საბოლოოდ გვექნება:

$$f_k[t] = \frac{k^k \lambda^{k-1}}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-k\lambda t} = A_k t^{k-1} e^{-k\lambda t}; \quad (27)$$

$$f_k(t) = A_k t^{k-1} e^{-k\lambda t}. \quad (28)$$

მაგალითისათვის განვიხილოთ განაწილება, როდესაც $\lambda = 0,001$ სთ⁻¹,

ხოლო k იცვლება 1-დან 6-მდე:

$$\begin{cases} f_1(t) = A_1 e^{-\lambda t}; \\ f_2(t) = A_2 t e^{-2\lambda t}; \\ f_3(t) = A_3 t^2 e^{-3\lambda t}; \\ f_4(t) = A_4 t^3 e^{-4\lambda t}; \\ f_5(t) = A_5 t^4 e^{-5\lambda t}; \\ f_6(t) = A_6 t^5 e^{-6\lambda t}. \end{cases} \quad (29)$$

ნახ. 18ვ,ზ-ზე ნაჩვენებია ალბათობის ერლანგის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები, როდესაც k იცვლება 1-დან 6-მდე:

ერლანგის განაწილების მათემატიკური მოლოდინი ტოლია $m = \frac{k}{\lambda}$,

ხოლო საშუალო კვადრატული გადახრა უდრის $\sigma = \frac{\sqrt{k}}{\lambda}$. ცხრილში 6

ნაჩვენებია ამ პარამეტრების დამოკიდებულება k პარამეტრზე.

ერლანგის განაწილების A_k კოეფიციენტის და მათემატიკური მოლოდინის საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება k პარამეტრზე

k	A_k	$m = \frac{k}{\lambda}$	$\sigma = \frac{\sqrt{k}}{\lambda}$
1	1	1000	1000
2	0,002	2000	1414,2
3	$4,5 \cdot 10^{-6}$	3000	1732,1
4	$1,07 \cdot 10^{-8}$	4000	2000
5	$2,6 \cdot 10^{-11}$	5000	2236,1
6	$6,48 \cdot 10^{-14}$	6000	2449,5

ნახ. 18ზ-ზე ნაჩვენებია მათემატიკური მოლოდინის საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება k პარამეტრზე.

თავი 2. გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების მახასიათებლების დადგენა

2.1. გაზგამანაწილებელი ქსელის დროში მტყუნების საფრთხეების ანალიზი

გაზგამანაწილებელი ქსელის ექსპლუატაციის მართვას განსაზღვრავს უმტყუნობა და ხანგრძლივობა. უმტყუნობა არის გაზსადენის პროდუქტის საანგარიშო პარამეტრებით (წნევა, ხარჯი, თვისება და ა.შ.) უწყვეტი მოწოდების თვისება და უნარჩუნებს ჰერმეტიულობას მოცემული დროის ინტერვალში[26,27,28,29,30]. ხანგრძლივობის ინტერვალი წარმოადგენს გაზსადენის მიერ ფუნქციის შესრულებას, შესაძლო გამორთვებით რემონტების ჩატარებისას, ზღვრული მდგომარეობისას. უმტყუნობის რაოდენობრივი მახასიათებლები ეფუძნებიან უმტყუნო მუშაობის ალბათობის განაწილების ფუნქციას, რაც გვიჩვენებს რომ $[0, t]$ ინტერვალში გაზსადენის მტყუნების ალბათობა არ მოხდება და მას გააჩნია ნამუშევარი X :

$$F(t) = P(X > t). \quad (30)$$

მტყუნების საფრთხე წარმოადგენს მეტად მნიშვნელოვან მახასიათებელს . ეს არის გაზგამანაწილებელი ქსელის ობიექტების (სახაზო ნაწილი, არმატურის დეტალები და ა.შ.) მტყუნებების რაოდენობა დროის ერთეულში შეფარდებული მუშა მდგომარეობაში მყოფი ობიექტების რაოდენობასთან. სხვაგვარად მტყუნების საფრთხე არის დროის ერთეულში მტყუნებების რაოდენობის შეფარდება კვანძების რაოდენობასთან:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t N} = \frac{n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (31)$$

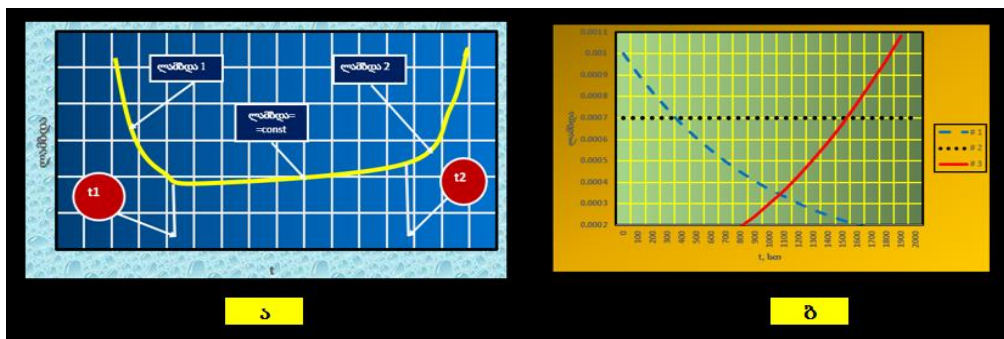
სადაც N არის ყველა კვანძის რაოდენობა; $n(t)$ - მტყუნების რაოდენობა ინტერვალში $t - (\Delta t / 2)$ -დან $t + (\Delta t / 2)$ -მდე; Δt - დროის ინტერვალი; \bar{N} - მუშა მდგომარეობაში მყოფი კვანძების რაოდენობა Δt ინტერვალში;

$$\bar{N} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}; \quad N_i - \text{უმტყუნო მდგომარეობაში მყოფი კვანძები } \Delta t$$

ინტერვალის დასაწყისში; N_{i+1} - უმტყუნო მდგომარეობაში მყოფი კვანძები Δt

ინტერვალის ბოლოში; $f(t)$ - ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია; $P(t)$ - უმტყუნობის ალბათობის განაწილების ფუნქცია.

გაზგამანაწილებელი ქსელის ექსპლუატაციის კლასიკური სქემის თანახმად გვაქვს უმტყუნობის ანალიზის საშუალება [34], რომელიც შეიცავს სამ ძირითად ეტაპს: მისახმარისი პერიოდი (ამ დროს ვლინდება ქარხნული და მონტაჟის დეფექტები), ნორმალური მუშაობის პერიოდი (შემთხვევითი ზემოქმედებები) და დაღლილობა (ცვეთა) (ნახ. 19).



ნახ. 19. მტყუნების საფრთხეს ტიპური ფუნქცია. ა. ზოგადი სქემა; ბ. კონკრეტული მაგალითი

დროის ინტერვალში $(t_1 - t_0)$ გვაქვს ე.წ. მისახმარისი პერიოდი, ანუ ადრეული მტყუნების პერიოდი. მისახმარისი დროისათვის მიიღება შემცირების ინტენსივობის საფრთხე, რომელიც მიიღება ადრეული მტყუნებების პერიოდში, რომელიც განპირობებულია კოსტრუქციული ან საწარმოო დეფექტებით, აგრეთვე მოწყობილობის მონტაჟით.

მტყუნების საფრთხეს $(t_2 - t_1)$ პერიოდს უწოდებენ ნორმალური მუშაობის პერიოდს. ეს პერიოდი იწყება მისახმარისი პერიოდის ბოლოდან დაღლილობის დასაწყისამდე. იმის გამო, რომ გაზგამანაწილებელ ქსელს გააჩნია დიდი რაოდენობის მქონე კვანძები, ამიტომ ცალკეულად ისინი დამოუკიდებელნი არიან. ამიტომ ა. ხინჩინის და ბ. გრიგოლიონის თეორემის თანახმად [35], თუ არსებობს გეგმიური რემონტები, მტყუნების

ჯამური ნაკადი ისწრაფვის სტაციონარულსკენ: $P(t) = e^{-\lambda t}$. ასეთი გამარტივებული პროცედურა მიიღება გაზსადენების მტყუნებების მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების შედეგად მიღებული კორექტული შედეგების, რენოვაციის, სიმძლავრის და მატერიალურ-ტექნიკური საავარიო სამსახურების სამუშაოების პროგნოზირებისათვის.

დადლილობისას იწყება პერიოდი, როდესაც კვანძმა ამოწურა რესურსი, რის გამოც მკვეთრად იზრდება მტყუნების რაოდენობა.

ამგვარად, სტატისტიკური დამუშავების შედეგად, შესაძლებელია მივიღოთ საჭირო მოცულობების პროგნოზირება კორექტული შედეგების შესაბამისად.

საიმედოობის თეორიაში, შემთხვევითი სიდიდე, როგორც წესი, თავს იჩენს ობიექტის დროის მტყუნების გამოჩენისას. ამ შემთხვევაში, $f(t)$ - ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია, წარმოადგენს კვანძების მუშაობის ვადების სრული გაბნევის მახასიათებლებს (ნახ. 20). კვანძების მუშაუნარიანობის დაკარგვის პროცესის კანონს სწორედ ასეთი ფუნქციის სახე გააჩნია.

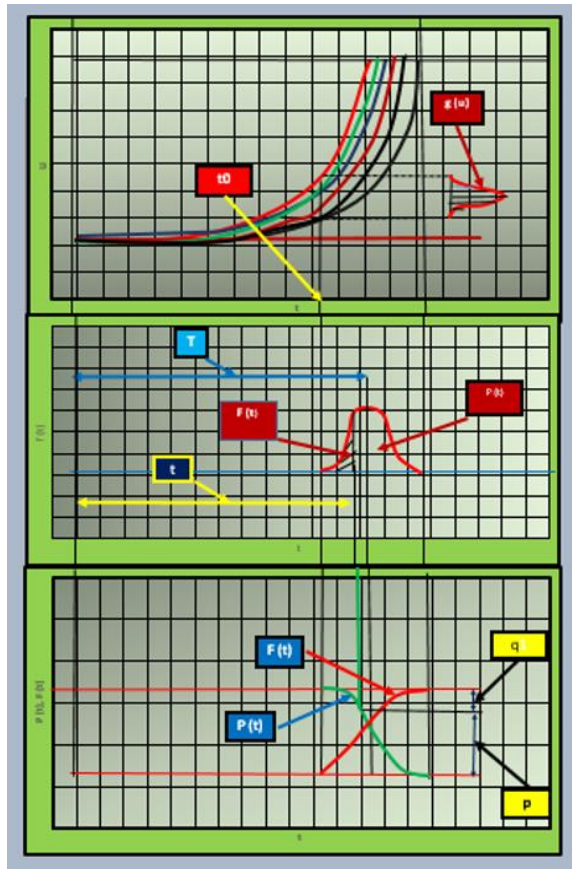
განაწილების მრუდი $f(t)$ გვამღვეს კვანძის საშუალო დროის \bar{T} -ს გაანგარიშების შესაძლებლობას (მათემატიკური მოლოდინი - $M[t]$, დისპერსია D და ა.შ.).

2.2. გაზგამანაწილებელი ქსელის ალბათობის განაწილების ნარევის დადგენა

იმ შემთხვევაში, როდესაც ამონაკრების განაწილების ფუნქციის „ფორმა“ არ აღიწერება რომელიმე ერთი განაწილებით, მაშინ შესაძლოა ალბათობის განაწილების ნარევის გამოყენება.

ხშირად, ნამუშევარის აღწერა შესაძლოა სხვაგვარი სახით, რისთვისაც გამოიყენება ე.წ. განაწილების ნარევი.

ვთქვათ, გვაქვს n შემთხვევითი სიდიდეები $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$; k -ური შემთხვევითი სიდიდე მიიღება ალბათობით w_k , სადაც $\sum_{k=1}^n w_k = 1$, ისე რომ $\bar{F}_k(t) = G(\xi_k > t)$.



ნახ. 20. შემთხვევითი სიდიდის ალბათობის განაწილების მრუდები

ხშირად, $\bar{F}_k(t) = G(\xi_k > t)$ -ფუნქციის ნაცვლად გამოიყენება $\bar{F}_k(t) = M(\xi_k > t)$ -ს ფუნქცია. შემთხვევითი სიდიდეების $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ ნარევის განაწილება ტოლია:

თუ ვიხილავთ ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევს x სიმრავლისათვის, მაშინ ნარევის k -ს სიმკვრივის განაწილება შემდეგია:

$$\begin{cases} \mathbf{G}(t) = \sum_{j=1}^k \mathbf{w}_j \mathbf{p}_j(t). \\ \sum_{j=1}^k \mathbf{w}_j = \mathbf{1}. \quad \mathbf{w}_j \geq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (32)$$

სადაც $\mathbf{p}_j(\mathbf{x})$ არის დამაჯერებლობის ფუნქციის j -ური კომპონენტის ნარევი; \mathbf{p}_j - აპრიორული ალბათობა. დამაჯერებლობის კონკრეტული ფუნქცია \mathbf{w}_j , შეიძლება გარკვეული სიზუსტით გაუტოლდეს ამონაკრების ცალკეულ წილს:

$$\begin{cases} \mathbf{w}_1 = N_1 / N; \\ \mathbf{w}_2 = N_2 / N; \\ \mathbf{w}_3 = N_3 / N; \\ \dots \end{cases} \quad (33)$$

განვიხილოთ შემთხვევა. ვთვათ გარკვეული ელემენტი კეთდება \mathbf{n} სხვადასხვა საწარმოებში. ცნობილია, რომ \mathbf{k} -ურ საწარმოში გაკეთებული ელემენტის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობას გააჩნია ექსპონენციალური კანონი, პარამეტრით λ_k , ე.ი. $\mathbf{p}_k(t) = \lambda_k e^{-\lambda_k t}$.

სხვადასხვა საწარმოებიდან შემოსული ელემენტები შემოდინ დასასაწყობებლად (ქსელში) და იქ ხდება მათი შერევა (მაგალითად გაზგამანწილებელ ქსელში – ვთქვათ ურდულები, ფასონური არმატურა ან გაზგამანწილებელი პუნქტების ელემენტები). ქსელში \mathbf{k} -ურ საწარმოდან შემოსული პროდუქციის წილი აღვნიშნოთ \mathbf{w}_k . მაშინ ელემენტის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{w}_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \mathbf{w}_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} + \mathbf{w}_3 \lambda_3 e^{-\lambda_3 t} + \dots = \sum_{j=1}^k \mathbf{w}_j \lambda_j e^{-\lambda_j t}. \quad (34)$$

ვთქვათ გვაქვს სამი ფუნქციის ნარევი პატრამეტრებით: $\lambda_1 = 0,001; \lambda_2 = 0,002; \lambda_3 = 0,003; \mathbf{w}_1 = 0,5; \mathbf{w}_2 = 0,3; \mathbf{w}_3 = 0,2$. მაშინ ამ შემთხვევაში გვექნება:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(t) &= \mathbf{w}_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \mathbf{w}_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} + \mathbf{w}_3 \lambda_3 e^{-\lambda_3 t} = \\ &= 0,5 \cdot 0,001 e^{-0,001t} + 0,3 \cdot 0,002 e^{-0,002t} + 0,2 \cdot 0,003 e^{-0,003t} \end{aligned} \quad (35)$$

ხშირად გამოიყენება ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქცია:

$$G(t) = \frac{w_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{w_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} + \frac{w_3}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} \dots = \sum_{j=1}^k \frac{w_j}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (36)$$

ნახ. 21ა-ზე მაგალისათვის, ნაჩვენებია ცალკეული ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები (სამი ფუნქცია) და ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია.

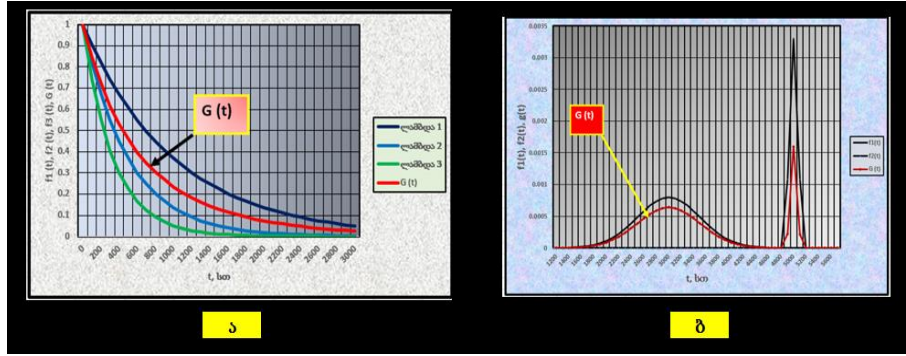
ასევე, მაგალითისათვის განვიხილოთ ნორმალური კანონის ნარევი, კერძო ორი შემთხვევისათვის, $\mu_1 = 3054$; $\mu_2 = 5122$; $\sigma_1 = 1333$; $\sigma_2 = 154$; $w_1 = 0,49$; $w_2 = 0,49$. ამიტომ, ალბათობის განაწილების სიმკვრივეების ფუნქციები ტოლი იქნება:

$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} = 0,000299 e^{-\frac{(t-3054)^2}{355378}}; \\ f_2(t) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} = 0,002591 e^{-\frac{(t-5122)^2}{47432}}. \end{cases} \quad (37)$$

ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ -ს ფუნქცია ტოლია:

$$\begin{aligned} G(t) &= w_1 f_1(t) + w_2 f_2(t) = \frac{w_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{w_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} = \\ &= 0,00014651 e^{-\frac{(t-3054)^2}{355378}} + 0,00132141 e^{-\frac{(t-5122)^2}{47432}}. \end{aligned} \quad (38)$$

ნახ. 21ბ-ზე ნაჩვენებია ცალკეული ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები (ორი ფუნქცია) და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია.



ნახ. 21. ა. ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები და ალბათობის ექსპონენციალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია: $\lambda_1 = 0,001$; $\lambda_2 = 0,002$; $\lambda_3 = 0,003$; $p_1 = 0,5$; $p_2 = 0,3$; $p_3 = 0,2$;
 ბ. ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები და ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია: $\mu_1 = 3054$; $\mu_2 = 5122$; $\sigma_1 = 1333$; $\sigma_2 = 154$;
 $w_1 = 0,49$; $w_2 = 0,49$

განვიხილოთ მტყუნებისა (ამ აღდგენების) სრული ამონაკრები. აქ მიღებულია, რომ სრული ამონაკრები წარმოადგენს ელემენტის ნამუშევარის (მტყუნების დრო) მონაცემებს გარკვეული დროის პერიოდის განმავლობაში. შესაძლოა, რომ ამონაკრებში იყოს იგივე, მაგრამ სხვადასხვა ქარხნული წარმოების ელემენტები (მაგალითად, ფლანცები).

ცხრილში 7 და ნახ. 22-ზე ნაჩვენებია სტატისტიკური მონაცემები და ჰისტოგრამის სახე. აშკარად ჩანს ორი ჯგუფის ტენდენცია I და II ჯგუფი.

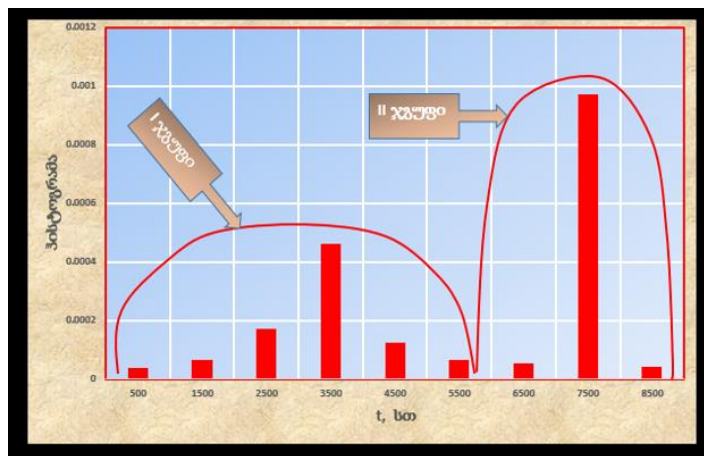
ამიტომ დავამუშავოთ სტატისტიკური ჯგუფები. ორივე ჯგუფისათვის განაწილების კანონი ნორმალურია და მათი მათემატიკური მოლოდინები და საშუალოგადახრებები შესაბამისად ტოლია: $\mu_1 = 3521$; $\sigma_1 = 704$;
 $\mu_2 = 7454$; $\sigma_2 = 352$. ამიტომ გვექნება:

$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_1 - t)^2}{2\sigma_1^2}\right]; \\ f_2(t) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_2 - t)^2}{2\sigma_2^2}\right]. \end{cases} \quad (39)$$

სრული ამონაკრების სტატისტიკური მონაცემები

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა
0-1000	500	6	$3,7 \cdot 10^{-5}$
1000-2000	1500	111	$6,8 \cdot 10^{-5}$
2000-3000	2500	28	$1,74 \cdot 10^{-4}$
3000-4000	3500	75	$4,64 \cdot 10^{-4}$
4000-5000	4500	20	$1,2 \cdot 10^{-4}$
5000-6000	5500	11	$6,8 \cdot 10^{-5}$
6000-7000	6500	9	$5,5 \cdot 10^{-5}$
7000-8000	7500	158	$9,7 \cdot 10^{-5}$
8000-9000	8500	7	$4,3 \cdot 10^{-5}$

ცხრილებში 8 და 9, და ნახ. 23 და 24-ზე ნაჩვენებია ლოკალური ჰისტოგრამები და შესაბამისი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები.



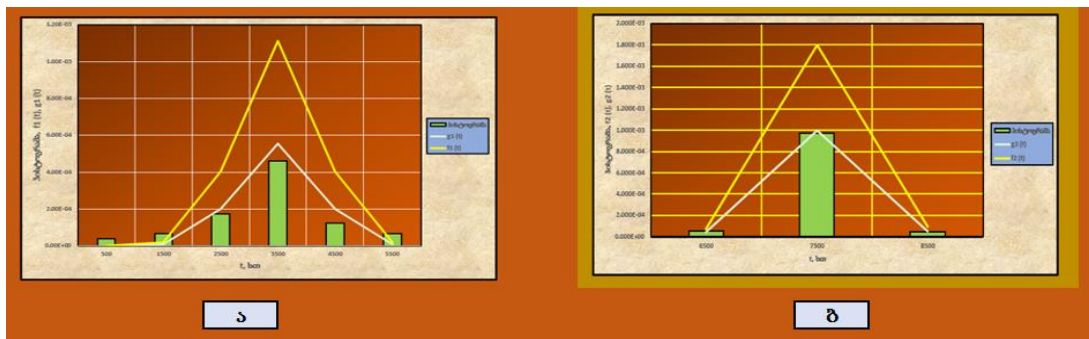
ნახ. 22. სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა

პირველი ჯგუფის სტატისტიკური მონაცემები

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	ჰისტოგრამა	$g_1(t)$	$f_1(t)$
0-1000	500	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$
1000-2000	1500	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$9,38 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
2000-3000	2500	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3000-4000	3500	$4,62 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$
4000-5000	4500	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
5000-6000	5500	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$9,38 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$

მეორე ჯგუფის სტატისტიკური მონაცემები

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	ჰისტოგრამა	$g_2(t)$	$f_2(t)$
6000-7000	6500	$5,538 \cdot 10^{-5}$	0,00004	0,000072
7000-8000	7500	$9,723 \cdot 10^{-4}$	0,000999698	0,001799457
8000-9000	8500	$4,308 \cdot 10^{-5}$	0,000005	0,00009



ნახ. 23. პირველი (ა) და მეორე (ბ) ჯგუფის ამონაკრების ჰისტოგრამა

რადგანაც, ნახ. 23 (ა და ბ)-ზე აშკარად ჩანს, რომ $f_1(t)$ და $f_2(t)$ -სათვის, ჰისტოგრამები, მნიშვნელოვნად განსხვავებულია, ამიტომ გამოვიყენოთ სიმკვრივის ნარევის ფუნქციები. გამოვიყენოთ ჯგუფების წილების დადგენა.

გვაქვს მონაცემთა სრული ამონაკრები $N = 325$, თუ ჯგუფებისათვის $N_1 = 151$ და $N_2 = 174$ ამიტომ შესაბამისი წილები გვექნება:

$$w_1 = \frac{N_1}{N} = 0,46 \text{ და } w_2 = \frac{N_2}{N} = 0,54 \text{ (ცხადია რომ } w_1 + w_2 = 1 \text{)}. \text{ შესაბამისად}$$

გვექნება:

$$\begin{cases} g_1(t) = w_1 f_1(t); \\ g_2(t) = w_2 f_2(t). \end{cases} \quad (40)$$

საბოლოოდ, სრული ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია ტოლი იქნება:

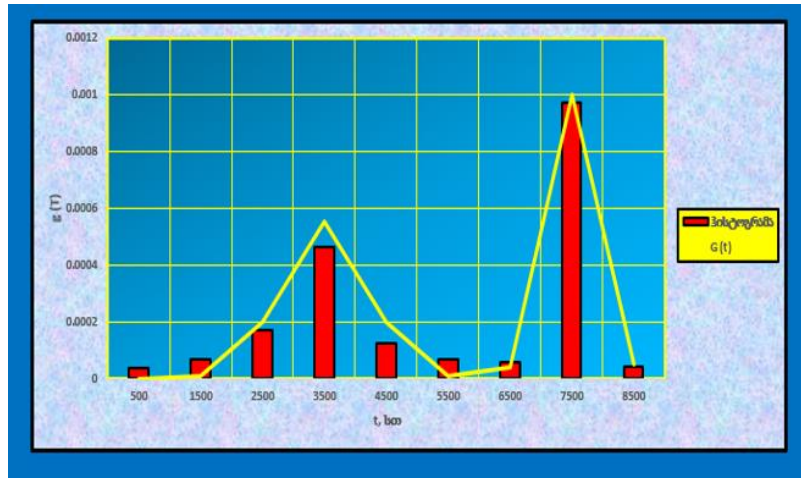
$$G(t) = w_1 f_1(t) + w_2 f_2(t) = \frac{w_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_1 - t)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{w_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_2 - t)^2}{2\sigma_2^2}\right]. \quad (41)$$

ცხრილში 10 და ნახ. 24-ზე, ნაჩვენებია ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქცია და ჰისტოგრამა.

ცხრილი 10

ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის და ჰისტოგრამის მონაცემები

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	ჰისტოგრამა	G(t)
0-1000	500	$3,6921 \cdot 10^{-5}$	$5,7057 \cdot 10^{-5}$
1000-2000	1500	$6,7692 \cdot 10^{-5}$	$9,3777 \cdot 10^{-6}$
2000-3000	2500	$17,2308 \cdot 10^{-5}$	$20,0249 \cdot 10^{-5}$
3000-4000	3500	$46,1538 \cdot 10^{-5}$	$55,5556 \cdot 10^{-5}$
4000-5000	4500	$12,3077 \cdot 10^{-5}$	$20,0249 \cdot 10^{-5}$
5000-6000	5500	$6,7692 \cdot 10^{-5}$	$9,3777 \cdot 10^{-6}$
6000-7000	6500	$5,5384 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$
7000-8000	7500	$97,2308 \cdot 10^{-5}$	$99,9698 \cdot 10^{-6}$
8000-9000	8500	$4,3077 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$

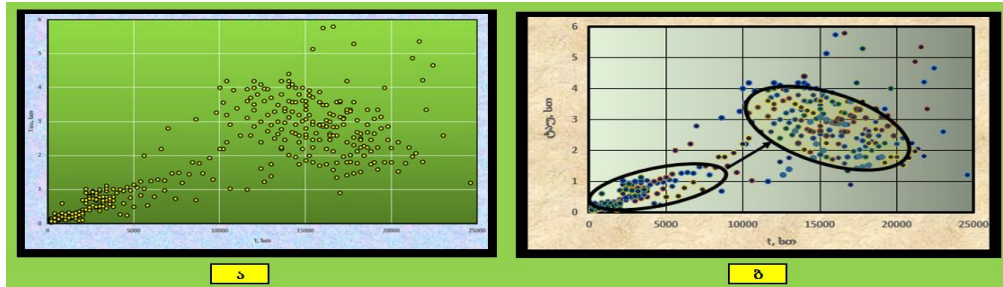


ნახ. 24. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქცია და ჰისტოგრამა

თავი 3. გაზგამანაწილებელი ქსელის კომპლექსური ალბათური მახასიათებლების დადგენა

3.1. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა

განვიხილოთ დინამიკური სისტემის მტყუნების (ნამუშავრების) და აღდგენის დროების პროცესი, t და τ კოორდინატულ, ფაზურ სივრცეში (ნახ. 25).



ნახ. 25. ა) ნამუშავრების და აღდგენის დროები t და τ , ფაზურ სივრცეში; ბ) ფაზურ სივრცეში ნამუშავრების და აღდგენის დროების (t და τ) დაჯგუფება

დღეისათვის, თბილისში არსებობს სამი გაზგამანაწილებელი სადგური (ნავთლული, ღრმდელე და გლდანის). გარდა ამისა მომავალში აშენდება ახალი გაზგამანაწილებელი სადგური (ავჭალა). შპს „ყაზტრანს-თბილისის გაზის“ გაზგამანაწილებელ ქსელს გააჩნია 468 ცალი გაზგამანაწილებელი პუნქტი. განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი პუნქტების მოწყობილობის უწყესივრობები და მათი გამოვლენის და აღმოფხვრის ხერხები, ყველაზე დამახასიათებელი უწყესივრობებია გაზის გაჟონვა, რის გამოც გამოვლენილია გაზის გაჟონვის ხრახნული და ფლანცური შეერთებების დიდი რაოდენობა. ამ დროს ფლანცური შეერთებების შუასაღებებისათვის გამოიყენება პარონიტის, კლინგერიტის ან ზეთოვან-ნავთობის გამძლე რეზინი. გარდა ამისა, შესაძლო მოხდეს როტაციული მრიცხველების უწყესივრობები, რაც ასევე იწვევს გაზის გაჟონვას და ამის მიზეზები შემდეგია: ზეთის დანაკლისი კბილაბიანი ბორბლების კოლოფში, შემკვრელი ქანჩის გაუმართავი შუასაღებებისას, დიფერენციალური მანომეტრის საცობების და მინის მილაკების დაზიანება,

მრიცხველის ფლანცები და ა.შ.. შესაძლოა მოხდეს სხვადასხვა მექანიკური მინარევებისაგან დანაგვიანება, როტორსა და კოლოფის კედლებს შორის, რის გამოც როტორი ან არ ბრუნავს, ან ქმნის დაშვებულზე მეტ დაწნევის ვარდნილს. გაზის ფილტრების უწყისვრობები: აქაც გვაქვს გაზის გაჟონვა, რის გამოც ხდება ფილტრების დანაგვიანება და იქმნება დიდი წნევის ვარდნილი, გაზის ნაკადის წინააღმდეგობისას. ხშირად ხდება ურდულების დაზიანება: კორპუსზე და დისკებზე შემჭიდროვებების ამუშავება; შპინდელის დისკის მოწყვეტა და გამრუდება; ქვნივარის დაზიანება; ურდულის ჩობალის დაზიანება, რაც იწვევს გაზის გაჟონვას; ჩობალის ბუქსის ბზარის წარმოქმნა და ა.შ. დამცავ-ჩამკეტის ურდულის დაზიანება: სარქველის დანაგვიანება ან უნაგირის დეფექტი; ჭოკის ან სარქველის ბერკეტის დაზიანება; სარქველის მემბრანის გაგლეჯა; სარქველის არასწორი აწყობა; მოწყობილობის ვიბრაციის გამო სარქველის სპონტანური დახურვა და ა.შ. რეგულატორის დაზიენებები: მემბრანის მთლიანობის დარღვევა; მემბრანის დაზიანება ზამბარის ჩასვლისას; სარქველის შემჭიდროვებების დარღვევა; სარქველის უნაგირის დეფექტის არსებობა და ა.შ. ყველა ამ აღნიშნული მიზეზებისას, შესაძლოა მოხდეს გგმ-ის დაზიანება.

განვიხილოთ დაზიანებებისა და აღდგენების გარკვეული სრული ამონაკრები. აქაც მიღებულია, რომ სრული ამონაკრები წარმოადგენს ელემენტის ნამუშევარის (მტყუნების დრო) მონაცემებს, გარკვეული დროის პერიოდის განმავლობაში და შესაძლოა, რომ ამონაკრებში იყოს ერთი და იგივე, მაგრამ სხვადასხვა ქარხნული წარმოების ელემენტები [36-38]. ფაზურ სივრცეში, გაზგამანაწილებელი პუნქტების ამონაკრების ვიზუალიზაციის შედეგად, ვცადოთ მონაცემების გარკვეული დაჯგუფება (ნახ. 29ბ). მოვახდინოთ ჯგუფების შესაბამისად სტატისტიკური დამუშავება და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების აპროქსიმაცია. ამკარად ჩანს

ორი ჯგუფის ტენდენცია I და II ჯგუფი. ამონაკრების სრული რაოდენობა ტოლია: $N = 324$.

I ჯგუფებისათვის ნამუშევარის აპროქსიმაცია აღიწერება ექსპონენციალური, ხოლო ალდგენის დრო - ნორმალური კანონით. ამონაკრების პარამეტრები შემდეგია: ამონაკრების რაოდენობა $N_1 = 117$; მტყუნების საფრთხე $\lambda = 0,000286$ სთ⁻¹; შესაბამისად მათემატიკური მოლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა $m = 3,52$ სთ და $\sigma = 1,15$ სთ.

$$\begin{cases} f_1(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \\ f_2(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu - \tau)^2}{2\sigma^2}\right]. \end{cases} \quad (42)$$

ცხრილებში 11 და 12 და ნახ. 26-ზე ნაჩვენებია სტატისტიკური მონაცემები და ჰისტოგრამის სახე.

ცხრილი 11

ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები I ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_2(t)$
0-1000	500	30	0,000256	0,000248
1000-2000	1500	22	0,000188	0,000185
2000-3000	2500	18	0,000154	0,000140
3000-4000	3500	13	0,000111	0,000105
4000-5000	4500	8	0,000068	0,000079
5000-6000	5500	11	0,000094	0,000059
6000-7000	6500	7	0,000006	0,000045
7000-8000	7500	8	0,000001	0

$N = 117$

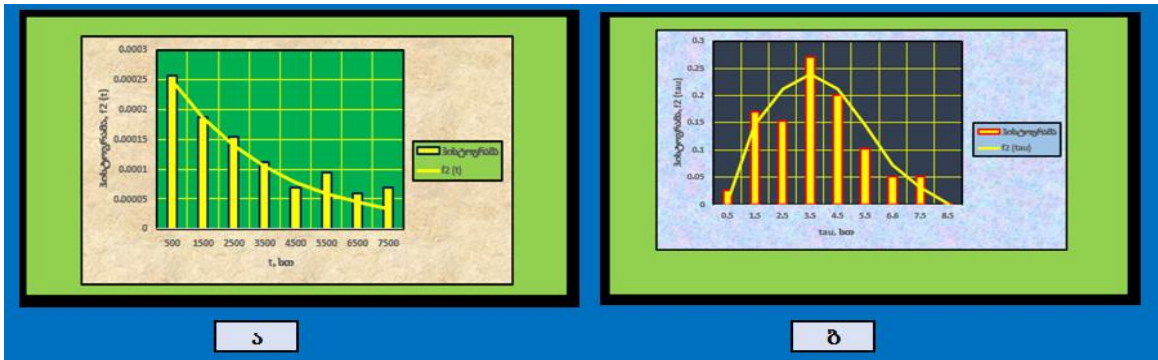
ცხრილი 12

ალდგენის დროების სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_2(\tau)$
0-1	0,5	3	0,0256	0,0027
1-2	1,5	20	0,1709	0,1452
2-3	2,5	18	0,1538	0,2113
3-4	3,5	31	0,2650	0,2394
4-5	4,5	21	0,1795	0,2113
5-6	5,5	12	0,1026	0,1452
5-7	6,5	6	0,0513	0,0720
7-8	7,5	5	0,0002	0,0011
8-9	8,5	1	0,0001	0,0008

$N = 117$

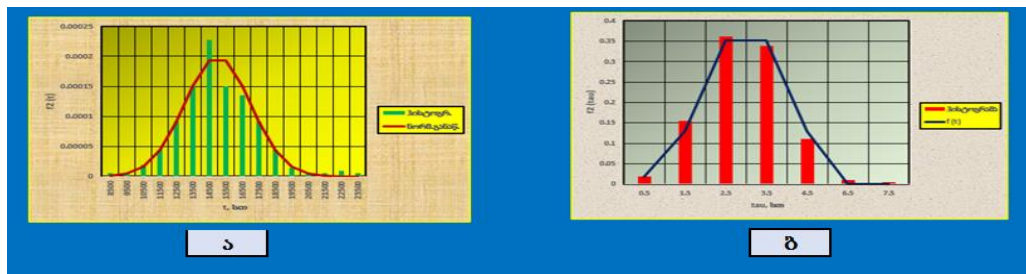
II ჯგუფებისათვის ნამუშევარის და აღდგენის დროის აპროქსიმაცია აღიწერება ნორმალური კანონით. ამონაკრების პარამეტრები შემდეგია: ამონაკრების რაოდენობა $N_1 = 207$; მტყუნების საფრთხე და აღდგენის დროები შესაბამისად გვექნება: მათემატიკური მოლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა - $\mu_1 = 4377,2$ სთ; $\sigma_1 = 1456$ სთ; $\mu_2 = 3,07$ სთ; $\sigma_2 = 1,07$ სთ.



ნახ. 26. ნამუშევარის (ა) და აღდგენის (ბ) ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია I ჯგუფისათვის

$$\begin{cases} f_1'(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_1 - t)^2}{2\sigma_1^2}\right]; \\ f_2'(\tau) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu_2 - \tau)^2}{2\sigma_2^2}\right]. \end{cases} \quad (43)$$

ნახ. 27 (ა და ბ)-ზე და ცხრილებში 13 და 14 ნაჩვენებია სტატისტიკური მონაცემები და ჰისტოგრამის სახე.



ნახ. 27. ნამუშევარის (ა) და აღდგენის (ბ) ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია II ჯგუფისათვის

ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	$f_2(t)$	ჰისტოგრამა
8000-9000	8500	1	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
9000-10000	9500	1	$4,55 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
10000-11000	10500	4	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$
11000-12000	11500	9	$4,31 \cdot 10^{-5}$	$4,35 \cdot 10^{-5}$
12000-13000	12500	19	$9,31 \cdot 10^{-5}$	$9,18 \cdot 10^{-5}$
13000-14000	13500	31	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
14000-15000	14500	47	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$
15000-16000	15500	31	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
16000-17000	16500	28	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
17000-18000	17500	19	$9,13 \cdot 10^{-4}$	$9,18 \cdot 10^{-5}$
18000-19000	18500	9	$4,31 \cdot 10^{-5}$	$4,35 \cdot 10^{-5}$
19000-20000	19500	3	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$
20000-21000	20500	1	$4,55 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
21000-22000	21500	1	$4,55 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
22000-23000	22500	2	$1,76 \cdot 10^{-6}$	$9,66 \cdot 10^{-6}$
23000-24000	23500	1	$4,55 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$

$$N_2 = 207$$

აღდგენის დროების სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_2(\tau)$
0-1	0,5	4	0,0193	0,0175
1-2	1,5	32	0,1546	0,1296
2-3	2,5	75	0,3623	0,3522
3-4	3,5	70	0,3382	0,3522
4-5	4,5	23	0,1111	0,1296
5-6	5,5	2	0,0097	0,0009
6-7	6,5	1	0,0048	0,0002

$$N_2 = 207$$

ვთქვათ გვაქვს ნამუშევარის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ორი ფუნქცია: ექსპონენციალური და ნორმალური.

$$\begin{cases} f_1(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \\ f_1'(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}; \end{cases} \quad (44)$$

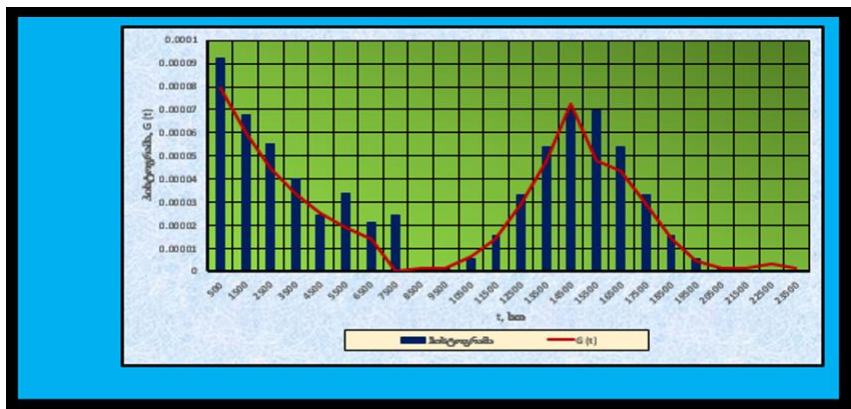
ამონაკრების შესაბამისად ვეძებთ პარამეტრებს (ექსპონენციალური განაწილების მტყუნების საფრთხე, ნორმალური განაწილების მათემატიკურ მოლოდინს და საშუალოკვადრატულ გადახრას), მტყუნებების სრულ რაოდენობას და შესაბამისი წილების რაოდენობებს. გვექნება [39-42]:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{N_1}{N} = 0,36; \\ w_2 = \frac{N_2}{N} = 0,64. \end{cases} \quad (45)$$

ამგვარად, საბოლოოდ გვექნება:

$$G(t) = w_1 \lambda e^{-\lambda t} + w_2 \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} = 0,000010296 e^{-0,00028t} + 0,222075714 e^{-\frac{(t-3,53)^2}{2,645}} \quad (46)$$

ცხრილში 15 და ნახ. 28-ზე ნაჩვენებია აღდგენის დროის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია სრული ამონაკრებისათვის. ვიზუალიზაციის შედეგად ვცადოთ მონაცემების გარკვეული დაჯგუფება.



ნახ. 28. ნამუშევარის დროის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია სრული ამონაკრებისათვის

ნამუშევარის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

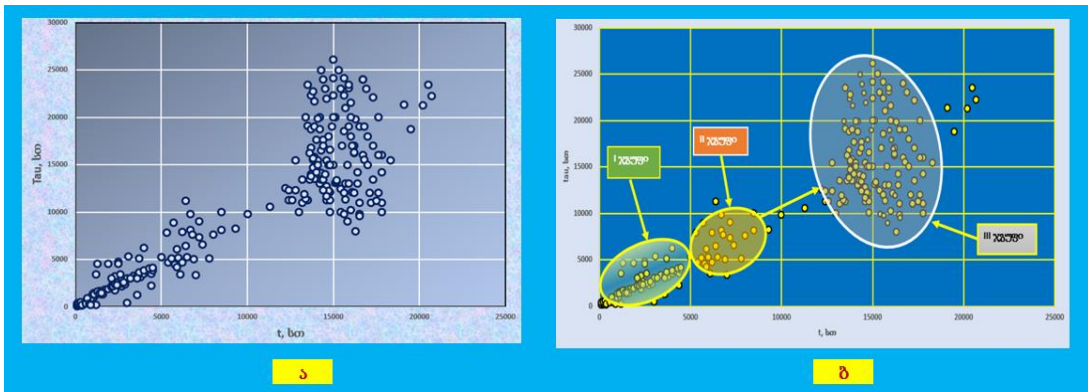
ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_2(\tau)$
0-1000	500	30	$9,231 \cdot 10^{-5}$	$7,932 \cdot 10^{-5}$
1000-2000	1500	22	$6,769 \cdot 10^{-5}$	$5,959 \cdot 10^{-5}$
2000-3000	2500	18	$5,538 \cdot 10^{-5}$	$4,477 \cdot 10^{-5}$
3000-4000	3500	13	$4 \cdot 10^{-5}$	$3,363 \cdot 10^{-5}$
4000-5000	4500	8	$2,462 \cdot 10^{-5}$	$2,527 \cdot 10^{-5}$
5000-6000	5500	11	$3,385 \cdot 10^{-5}$	$1,898 \cdot 10^{-5}$
6000-7000	6500	7	$2,154 \cdot 10^{-5}$	$1,426 \cdot 10^{-5}$
7000-8000	7500	8	$2,462 \cdot 10^{-5}$	0
8000-9000	8500	1	$3,653 \cdot 10^{-7}$	$1,546 \cdot 10^{-6}$
9000-10000	9500	1	$3,653 \cdot 10^{-7}$	$1,676 \cdot 10^{-6}$
10000-11000	10500	4	$5,715 \cdot 10^{-6}$	$6,183 \cdot 10^{-6}$
11000-12000	11500	9	$1,553 \cdot 10^{-5}$	$1,391 \cdot 10^{-5}$
12000-13000	12500	19	$3,289 \cdot 10^{-5}$	$1,391 \cdot 10^{-5}$
13000-14000	13500	31	$5,422 \cdot 10^{-5}$	$4,92 \cdot 10^{-5}$
14000-15000	14500	47	$6,96 \cdot 10^{-5}$	$7,265 \cdot 10^{-5}$
15000-16000	15500	31	$5,422 \cdot 10^{-5}$	$4,792 \cdot 10^{-5}$
16000-17000	16500	28	$5,302 \cdot 10^{-5}$	$4,328 \cdot 10^{-5}$
17000-18000	17500	19	$1,553 \cdot 10^{-5}$	$2,937 \cdot 10^{-5}$
18000-19000	18500	9	$1,553 \cdot 10^{-5}$	$1,391 \cdot 10^{-5}$
19000-20000	19500	3	$5,715 \cdot 10^{-6}$	$4,638 \cdot 10^{-6}$
20000-21000	20500	1	$3,653 \cdot 10^{-7}$	$1,545 \cdot 10^{-6}$
21000-22000	21500	1	$3,653 \cdot 10^{-7}$	$1,545 \cdot 10^{-6}$
22000-23000	22500	2	$7,433 \cdot 10^{-6}$	$3,092 \cdot 10^{-6}$
23000-24000	23500	1	$3,653 \cdot 10^{-7}$	$1,545 \cdot 10^{-6}$

$N = 324$; $w_1 = 0,36$; $w_2 = 0,64$

3.2. სამი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა (I ვარიანტი)

განვიხილოთ ქსელის ელემენტების (ფლანცების) მტყუნებისა და აღდგენების სრული ამონაკრები (ნახ. 29). აქაც მიღებულია, რომ სრული ამონაკრები წარმოადგენს ელემენტის ნამუშევარის (მტყუნების დრო) მონაცემებს გარკვეული დროის პერიოდის განმავლობაში და შესაძლოა, რომ ამონაკრებში იყოს ერთი და იგივე, მაგრამ სხვადასხვა ქარხნული წარმოების ელემენტები [43-51].

მოვახდინოთ ჯგუფების შესაბამისად სტატისტიკური დამუშავება და მოვახდინოთ ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების აპროქსიმაცია. აშკარად ჩანს სამი ჯგუფის ტენდენცია - I, II და III ჯგუფი. ამონაკრების სრული რაოდენობა ტოლია: $N = 229$. ჯგუფების რაოდენობები შემდეგია: $n_1 = 65$; $n_2 = 24$; $n_3 = 140$. შესაბამისად, მიღებული წილები ტოლი იქნება: $w_1 = 0,28$; $w_2 = 0,11$; $w_3 = 0,61$.



ნახ. 29. ა) ნამუშევრების და აღდგენის დროები t და τ ფაზურ სივრცეში; ბ) ფაზურ სივრცეში ნამუშევრების და აღდგენის დროების (t და τ) დაჯგუფება

ნამუშევარის შემთხვევაში გვექნება: I ჯგუფებისათვის - ექსპონენციალური კანონი (მტყუნების საფრთხე $\lambda_1 = 0,0011$ სთ⁻¹); II ჯგუფებისათვის - ექსპონენციალური კანონი (მტყუნების საფრთხე $\lambda_2 = 0,0022$ სთ⁻¹); III ჯგუფებისათვის - ნორმალური კანონი

(მათემატიკური მოლოდინი $\mu = 1523$ სთ; საშუალოკვადრატული გადახრა $\sigma = 1412$ სთ). აღნიშნული მონაცემები მოყვანილია ცხრილებში 16-18 და ნახ. 30-ზე.

ცხრილი 16

ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები I ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_1(t)$
0-1500	750	1	$32,82 \cdot 10^{-5}$	$0,000315$
1500-3000	2250	13	$20,51 \cdot 10^{-5}$	$7,03 \cdot 10^{-5}$
3000-4500	3750	40	$7,18 \cdot 10^{-5}$	$1,568 \cdot 10^{-5}$
4500-6000	5250	53	$3,07 \cdot 10^{-5}$	$3,498 \cdot 10^{-6}$
6000-7500	6750	28	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$7,806 \cdot 10^{-7}$
7500-9000	9750	4	$0,82 \cdot 10^{-5}$	$1,741 \cdot 10^{-7}$
9000-10500		1	$0,33 \cdot 10^{-5}$	$3,884 \cdot 10^{-8}$

$N_1 = 140$

ცხრილი 17

ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები II ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_2(\tau)$
3000-45000	3750	11	0,00003056	0,0002765
45000-6000	5250	5	0,0001389	0,0000138
6000-7500	6750	4	0,0001111	0,000007
75000-9000	8250	2	0,0000556	0
9000-1050	9750	1	0,0000278	0
10500-12000	11250	1	0,0000278	0

$N_2 = 24$

ცხრილი 18

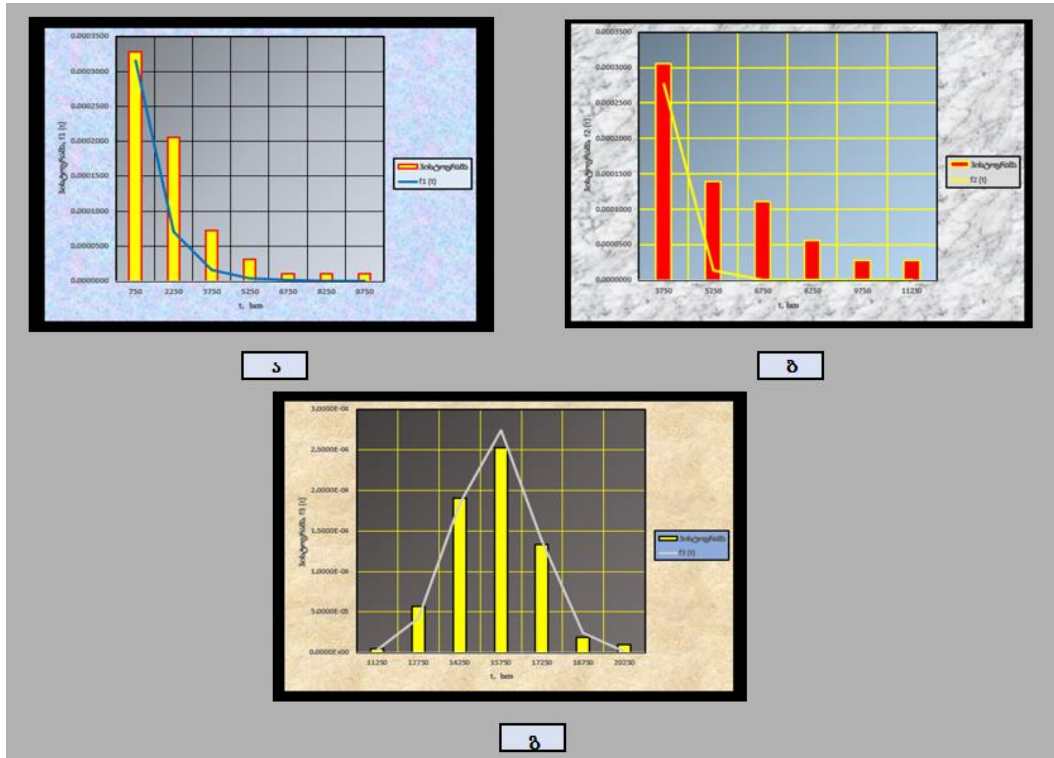
ნამუშევარის სტატისტიკური მონაცემები III ჯგუფებისათვის

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n_i	ჰისტოგრამა	$f_3(\theta)$
10500-12000	11250	1	$4,762 \cdot 10^{-6}$	$3,247 \cdot 10^{-6}$
12000-13500	12750	13	$5,714 \cdot 10^{-5}$	$4,189 \cdot 10^{-5}$
13500-15000	14250	40	$1,905 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$
15000-16500	15750	53	$2,524 \cdot 10^{-4}$	$2,738 \cdot 10^{-4}$
16500-18000	17250	28	$1,333 \cdot 10^{-4}$	$1,388 \cdot 10^{-4}$
18000-19500	18750	4	$5,714 \cdot 10^{-5}$	$2,389 \cdot 10^{-5}$
19500-21000	20250	1	$9,524 \cdot 10^{-6}$	$1,399 \cdot 10^{-6}$

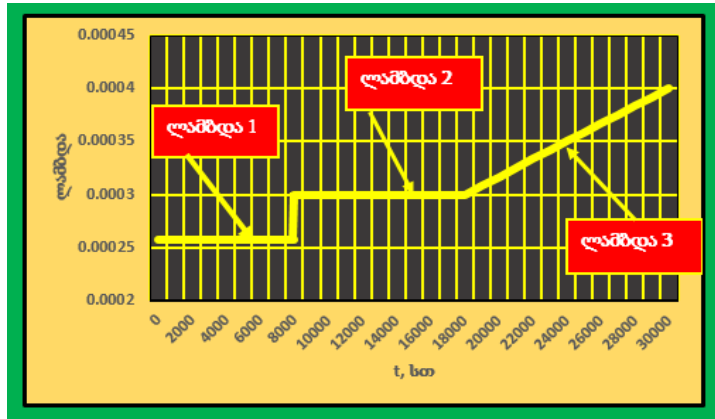
$N_3 = 140$

აღნიშნული პროცესის სრული ანალიზისათვის, განვიხილოთ მტყუნების საფრთხეების დინამიკა დროში (ნახ. 31).

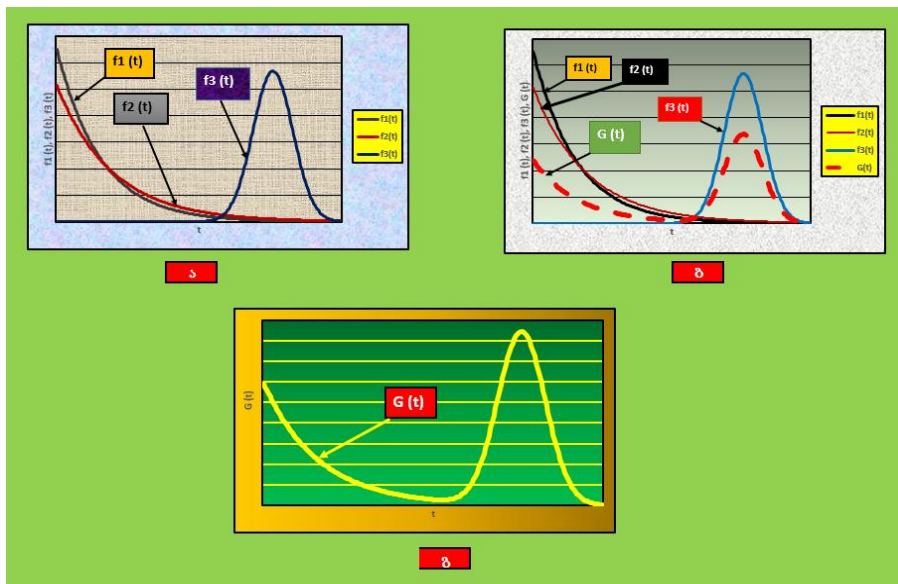
ამგვარად, აღნიშნულ სქემაზე, ორი დროის მონაკვეთისათვის გვაქვს ორი მუდმივი მტყუნების საფრთხე (λ_1 და λ_2) და გვექნება ექსპონენციალური კანონები. მესამე ინტერვალში მტყუნების საფრთხე ზრდადია და შეესაბამება ნორმალურ კანონს. მიღებული ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები მოყვანილია ნახ. 31ა,ბ,გ-ზე (ფუნქციები $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$). აქვე, ნახ. 31-ზე მოყვანილია უბნების გრაფიკების მოკვეთა შესაბამისი წილების გათვალისწინებით. საბოლოოდ ნახ. 32-ზე მოყვანილია სრული პროცესის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის $G(t)$ ფუნქცია.



ნახ. 30. ნამუშევარის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია I (ა), II (ბ) და III(გ) ჯგუფისათვის

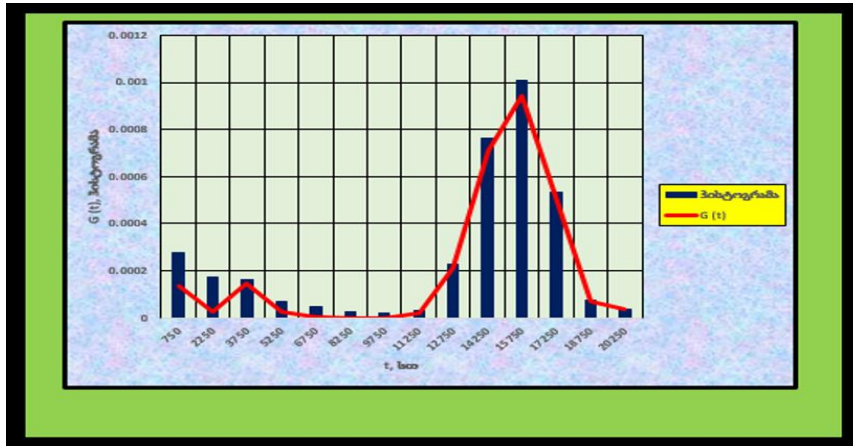


ნახ. 31. მტყუნების საფრთხეების დინამიკა დროში



ნახ. 32. მტყუნების საფრთხეების დროში დინამიკის ინტერპრეტაციის სქემა

საბოლოოდ მივიღეთ სრული პროცესის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქცია $G(t)$, აღნიშნული რეალური შემთხვევისათვის (ნახ. 33 და ცხრილი 19).



ნახ. 33. ნამუშევრის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $G(t)$ ფუნქცია

ცხრილი 19

ნამუშევრის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამის და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის მონაცემები

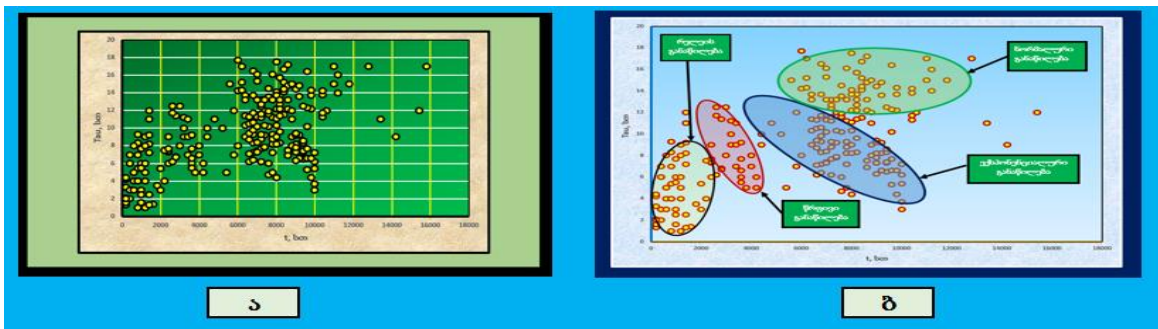
t , სთ	ჰისტოგრამა	$G(t)$
750	0,000276	0,000137
2250	0,000172	0,000023
3750	0,000161	0,000143
5250	0,000072	0,000023
6750	0,000045	0,000001
8250	0,000027	0
9750	0,000018	0
11250	0,000028	0,000018
12750	0,000228	0,000213
1425	0,000761	0,000710
15750	0,001008	0,000941
17250	0,000533	0,000497
18750	0,000076	0,000071
20250	0,000038	0,000036

$w_1 = 0,28; w_2 = 0,11; w_3 = 0,61$

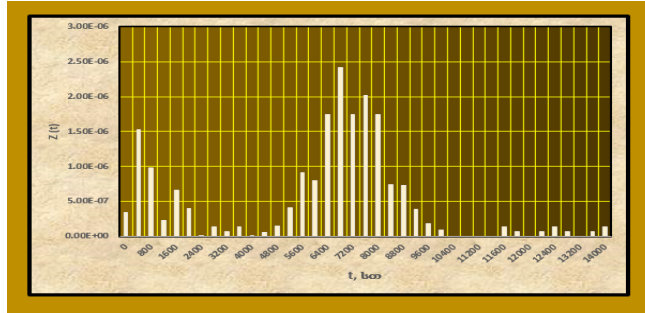
3.3. ოთხი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციის დადგენა (II ვარიანტი)

განვიხილოთ გაზმარეგულირებელი პუნქტების მტყუნებების და აღდგენების სტატისტიკური ამონაკრები. მონაცემების დასამუშავებლად, ხელსაყრელია ჩატარდეს ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მეთოდი, კერძოდ ფაზური სივრცის მეთოდი. ამ მეთოდის მიხედვით, თითოეულ ხდომილებას შეესაბამება კონკრეტული წერტილი კოორდინატებით t და τ (ნამუშევარის და აღდგენის დრო). მიღებული სურათის ინტერპრეტაცია ნაჩვენებია ნახ. 34 (ა და ბ)-ზე.

ნახ. 34-ზე აშკარად ნაჩვენებია ფაზური სივრცის გარკვეული ჯგუფები, რომლებიც ვიზუალურადაც კი ერთნაირ თვისებრივ ჯგუფებს წარმოადგენენ (ილუსტრაციისათვის ჯგუფები გამოყოფილნი არიან ელიფსებური საზღვრებით). ამონაკრების ოთხი ჯგუფი გვაძლევს შემდეგ ალბათობის განაწილებებს: რელეის განაწილება, წრფივი განაწილება, ექსპონენციალური განაწილება და ნორმალური განაწილება



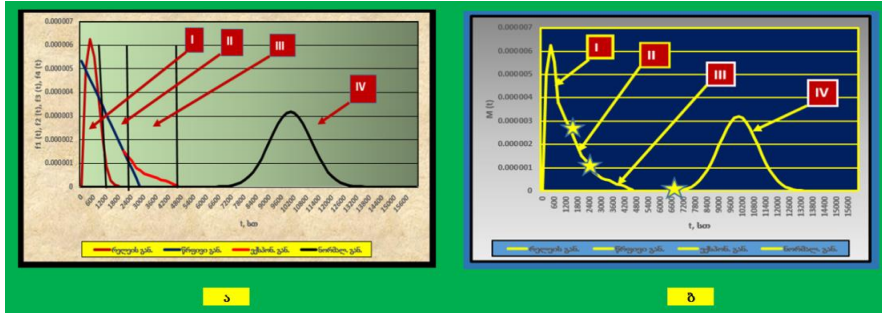
ნახ. 34. ა) ფაზური სივრცის ილუსტრაცია; ბ) ფაზური სივრცის ინტერპრეტაცია ვიზუალიზაციის შემდეგ, თითოეული ჯგუფებისათვის განვიხილოთ ნამუშევარის სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა (ნახ. 35).



ნახ. 35. სრული ამონაკრების ჰისტოგრამა

ჩავთვალოთ, რომ თითოეული ჯგუფისათვის, ფაზური სივრცის წერტილების შესაბამისად გვექნება $N_1 = 38$; $N_2 = 20$; $N_3 = 22$; $N_4 = 172$. ცხადია, რომ სრული ამონაკრებისათვის გვექნება: $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = 252$ თითოეული ჯგუფისათვის. ჩავატაროთ სტატისტიკური დამუშავება, კერძოდ დავადგინოთ თუ რისი ტოლია ალბათობის განაწილების სიმკვრივის აპროქსიმაციის ფუნქციები. აღმოჩნდა, რომ გვექნება: I ჯგუფი - რელეის განაწილება; II ჯგუფი - წრფივი განაწილება; III ჯგუფი - ექსპონენციალური განაწილება; IV ჯგუფი - ნორმალური განაწილება (ნახ. 36) და შესაბამისად სივრცე იყოფა შესაბამის საზღვრებად.

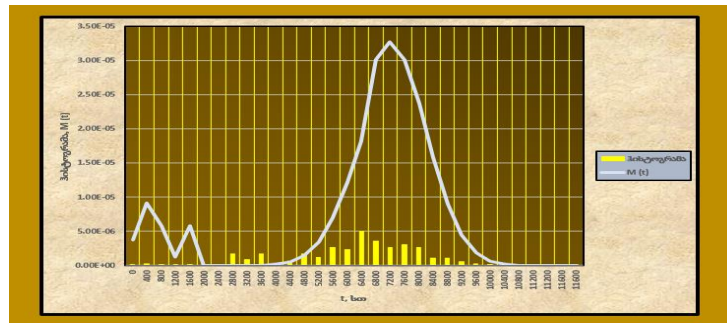
შესაბამისად ამ განაწილების პარამეტრები შემდეგია: რელეის განაწილება: $\mu = 512$ სთ; $B = 409$; $\sigma = 264$ სთ; წრფივი განაწილება - $\mu = B\sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1,253B = 512$ სთ; $\sigma = B\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} = 0,6557 B = 264$ სთ; ექსპონენციალური განაწილება; $\lambda = 0,00072$ სთ⁻¹; ნორმალური განაწილება: $\mu = 10017$ სთ; $\sigma = 1019$ სთ.



ნახ. 36. ა. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების დადგენა; ბ. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $M(t)$ ფუნქცია

ნახ. 39ბ-ზე ნაჩვენებია ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების „დაჭრა“ ცალკეული მონაკვეთებისათვის და მათი „შეწებება“. საბოლოოდ მიიღება საერთო ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია.

მოვახდინოთ მიღებული ჰისტოგრამის და საერთო ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციის (ნახ. 37) ზედდება, გვექნება შემდეგი სურათი.



ნახ. 37. ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის $M(t)$ ფუნქციის ზედდება

ცხადია, რომ მიღებული შედეგი, გვიჩვენებს უარყოფით დასკვნას. ამიტომ, განვიხილოთ ადრე განხილული სიმკვრივეთა ნარევის მეთოდი. ამ შემთხვევაში, ჯგუფების შესაბამისი წილები ტოლია:

$$w_1 = 0,151; w_2 = 0,079; w_3 = 0,087; w_4 = 0,683.$$

ცხადია, რომ გვექნება:

$$w = w_1 + w_2 + w_3 = 1.$$

ამგვარად, თუ ცნობილია განხილული ფუნქციები $f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)$ და შესაბამისი წილები w_1, w_2, w_3, w_4 , მაშინ გვექნება ახალი ფუნქციები $g_1(t), g_2(t), g_3(t), g_4(t)$:

$$\begin{cases} g_1(t) = w_1 f_1(t); \\ g_2(t) = w_2 f_2(t); \\ g_3(t) = w_3 f_3(t); \\ g_4(t) = w_4 f_4(t). \end{cases} \quad (47)$$

საბოლოოდ, ჯამური საერთო ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია $M(t)$, რომელიც წარმოადგენს განაწილების სიმკვრივეების ნარევს.

$$M(t) = w_1 f_1(t) + w_2 f_2(t) + w_3 f_3(t) + w_4 f_4(t). \quad (48)$$

რადგანაც განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები ტოლია

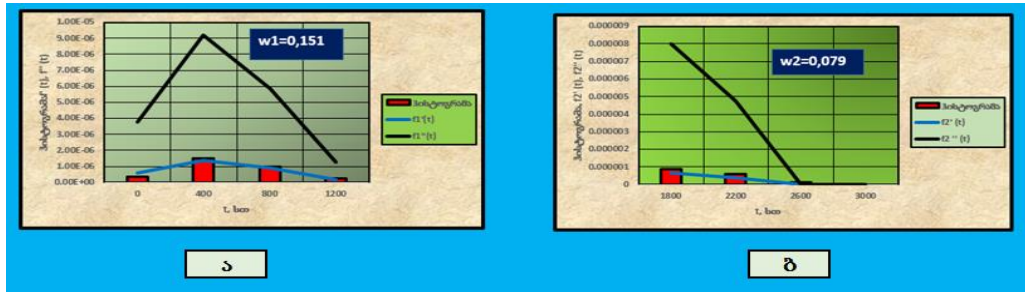
$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{t}{B^2} e^{-\frac{t^2}{2B^2}} \\ f_2(t) = \frac{2}{b} \left(1 - \frac{t}{b}\right); \\ f_3(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \\ f_4(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \end{cases} \quad (49)$$

ამიტომ საბოლოოდ გვექნება:

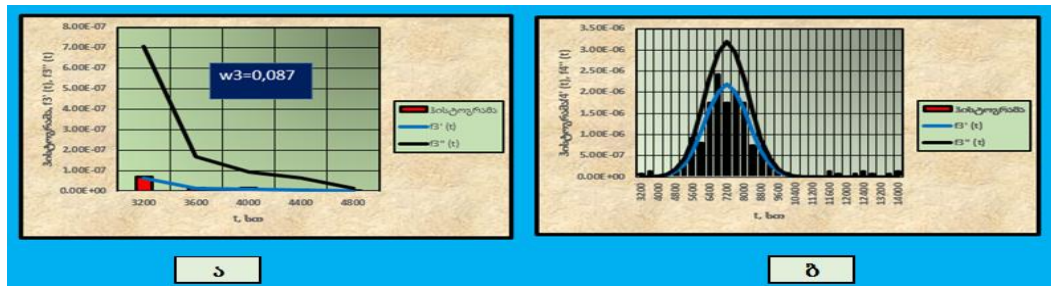
$$M(t) = w_1 \frac{t}{B^2} e^{-\frac{t^2}{2B^2}} + w_2 \frac{2}{b} \left(1 - \frac{t}{b}\right) + w_3 \lambda e^{-\lambda t} + w_4 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (50)$$

ნახ. 38 და 39-ზე ნაჩვენებია ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები $f_i(t)$, შესაბამისი წილები w_i და ახალი ფუნქციები $g_i(t)$.

ცხრილში 20 ნაჩვენებია გაანგარიშების შედეგად მიღებული ჰისტოგრამის და $M(t)$ განაწილების სიმკვრივეების ნარევის მნიშვნელობები. ანალოგიურად, ნახ. 40-ზე შესაბამისად ნაჩვენებია ჰისტოგრამის და განაწილების სიმკვრივეების ნარევის $M(t)$ ფუნქცია.



ნახ. 38. ა. რელის განაწილება; ბ. წრფივი განაწილება (შესაბამისი წილები და ახალი ფუნქციები)



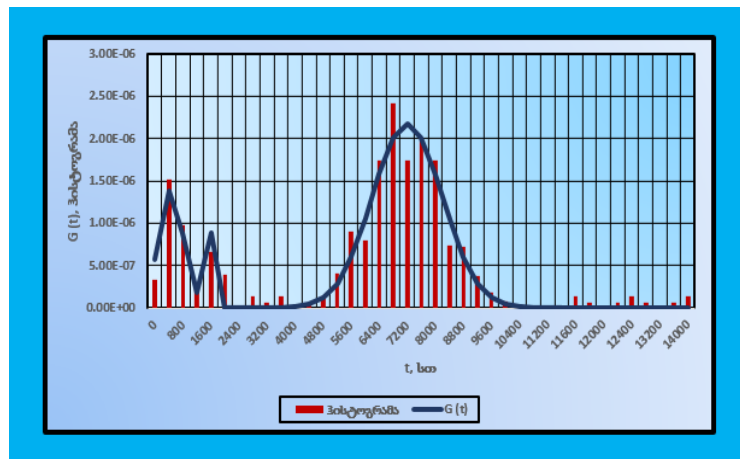
ნახ. 39. ა. ექსპონენციალური განაწილება; ბ. ნორმალური განაწილება (შესაბამისი წილები და ახალი ფუნქციები)

ცხრილი 20

ჰისტოგრამის და განაწილების სიმკვრივეების ნარევის $M(t)$ ფუნქციის მნიშვნელობები

ინტერვალი, სთ	ინტერვალის ცენტრი t_1 სთ	ჰისტოგრამა	$M(t)$
0-400	200	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
400-800	600	$6,06 \cdot 10^{-6}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$
800-1200	1000	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,42 \cdot 10^{-6}$
1200-1600	1400	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$2,66 \cdot 10^{-6}$
1600-2000	1800	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$
2000-2400	2200	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$
2400-2800	2600	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
2800-3200	3000	$3,21 \cdot 10^{-7}$	0
3200-3600	3400	$2,61 \cdot 10^{-7}$	0
3600-4000	3800	$3,12 \cdot 10^{-7}$	0
4000-4400	4200	$3,64 \cdot 10^{-7}$	0
4400-4800	4600	$2,36 \cdot 10^{-7}$	0
4800-5200	5000	$4,29 \cdot 10^{-7}$	0

5200-5600	5400	$1,31 \cdot 10^{-7}$	0
5600-6000	5800	$2,45 \cdot 10^{-7}$	0
6000-6400	6200	$0,41 \cdot 10^{-7}$	0
6400-6800	6600	$2,87 \cdot 10^{-7}$	0
6800-7200	7000	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
7200-7600	7400	$2,59 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
7600-8000	7800	$3,69 \cdot 10^{-7}$	$2,83 \cdot 10^{-7}$
8000-8400	8200	$9,48 \cdot 10^{-7}$	$6,31 \cdot 10^{-7}$
8400-8800	8600	$9,58 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$
8800-9200	9000	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$
9200-9600	9400	$2,67 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
9600-10000	9800	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^{-6}$
10000-10400	10200	$2,19 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^{-6}$
10400-10800	10600	$2,67 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
10800-11200	11000	$2,13 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$
11200-11600	11400	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$
11600-12000	11800	$4,42 \cdot 10^{-7}$	$6,31 \cdot 10^{-7}$
12000-12400	12200	$3,41 \cdot 10^{-7}$	$2,83 \cdot 10^{-7}$
12400-12800	12600	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
12800-13200	13000	$4,61 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
13200-13600	13400	$1,15 \cdot 10^{-8}$	0
13600-14000	13800	$1,04 \cdot 10^{-8}$	0



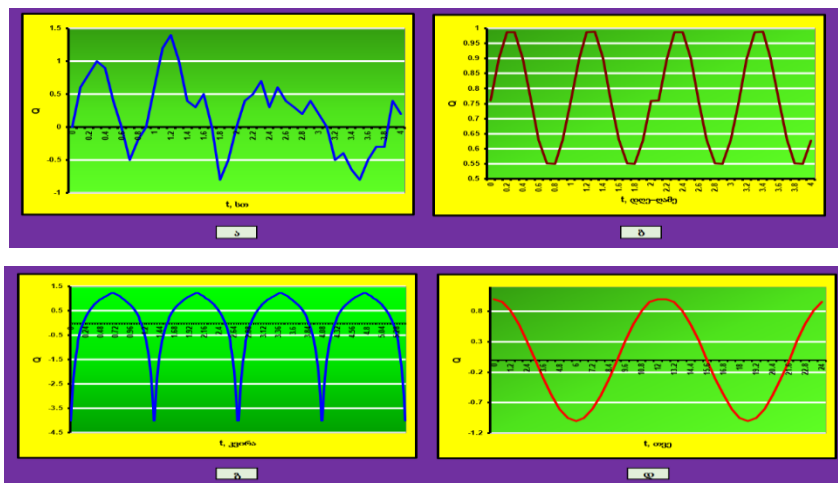
ნახ. 40. პისტოგრამა და განაწილების სიმკვრივეების ნარევის $M(t)$ ფუნქცია

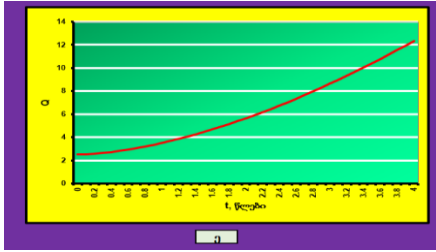
- მაღალი წნევის გაზსადენი – 214.263 კმ
- საშ. წნევის გაზსადენი – 737.075 კმ
- დაბ. წნევის გაზსადენი – 3,006.727 კმ

მომხმარებლების ძირითად რაოდენობას (მათ შორის საყოფაცხოვრებო მომხმარებლებს) გაზი მიეწოდებათ დაბალი წნევით, რასთან დაკავშირებითაც საშაულო წნევის გაზგამანაწილებელ ქსელზე მოწყობილია გაზმარეგულირებელი პუნქტები, საერთო რაოდენობით 1143 ერთეული.

დროის მოცემულ მომენტში, გაზის ქსელის ქვესისტემა, ხასიათდება ორი ძირითადი ცვლადი სიდიდით (გაზის ხარჯი და წნევა) და სხვა პარამეტრებით. ამ შემთხვევაში ნაკადის გადანაწილება, დროის მოცემულ მომენტში, განსაზღვრავს ქსელის სტრუქტურას და მათი ქვესისტემების ცვლადი სიდიდეების მიმდინარე პარამეტრებს.

განვიხილოთ პირველი დონე: ქსელის განვითარების მართვა, რაც მდგომარეობს სტრუქტურის მიზანმიმართული განვითარების და ქსელის პარამეტრების ცვლილებაში, რაც განვითარების პირობებში რეკონსტრუქციის და დაგეგმარების ამოცანების ამოხსნაზე გადის (ნახ. 42)

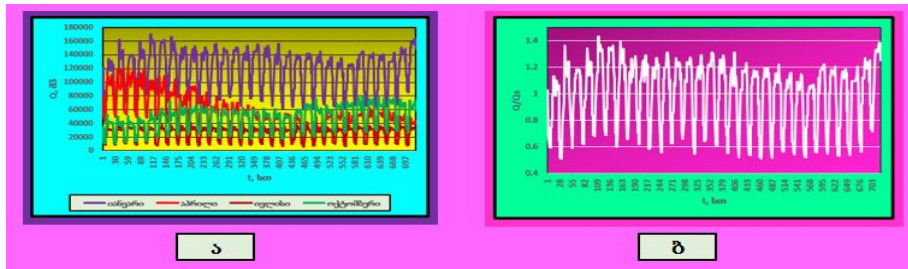




ნახ. 42. გაზის მიხმარების პროცესის ძირითადი შემადგენლები: ა) პროგნოზირებადი პოლინომიალური; ბ) არაპროგნოზირებადი სტოქასტიკური; გ,დ,ე) პროგნოზირებადი პოლიჰარმონიული (ღერძები პირობითია)

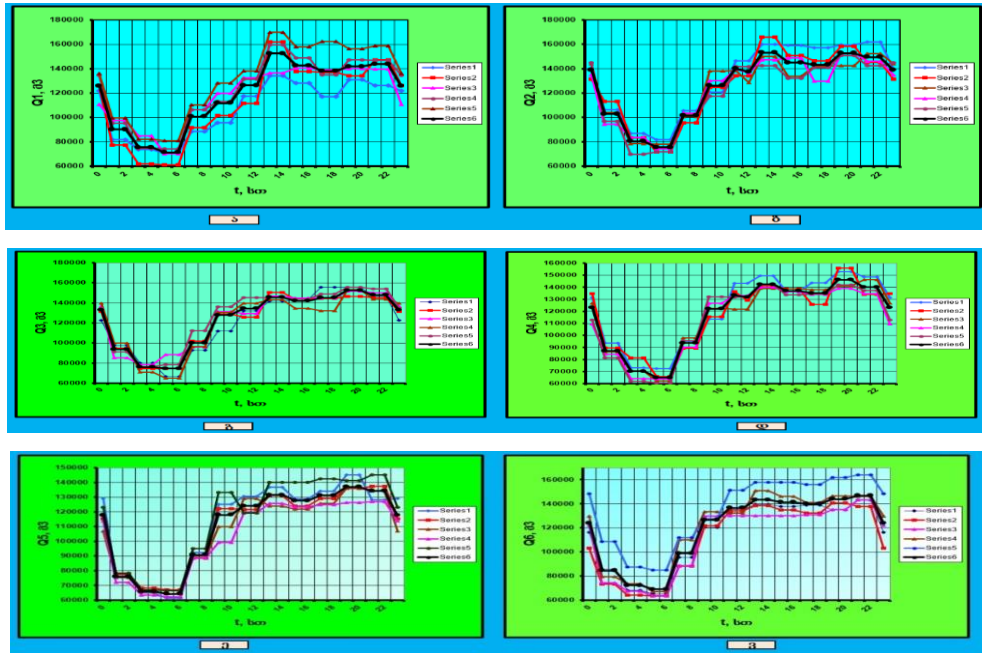
მეორე დონე: გაზის ტრანსპორტირების და განაწილების რეჟიმების დაგეგმვა, რაც საჭიროა მიზანმიმართული პროგნოზირებადი პოლიჰარმონიული ტრენდების განსაზღვრის, არსებული ქსელის სრუქტურის და პარამეტრების ცვლილების მიზნით (ნახ. 42 გ,დ,ე). მესამე დონე: ნაკადის გადანაწილების ოპერატიული მართვა, რომელიც უზრუნველყოფს გაზის მიხმარების პროცესის არაპროგნოზირებადი ხმაურის შემადგენლის სიდიდის კომპენსაციას (ნახ. 42ბ).

განვიხილოთ შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის, კერძოდ, ოთხი ტიპური თვისათვის – იანვარი, აპრილი, ივლისი, ოქტომბერი). ნახ. 43ა-ზე ნაჩვენებია მოხმარების დინამიკის სრული ანსამბლი.



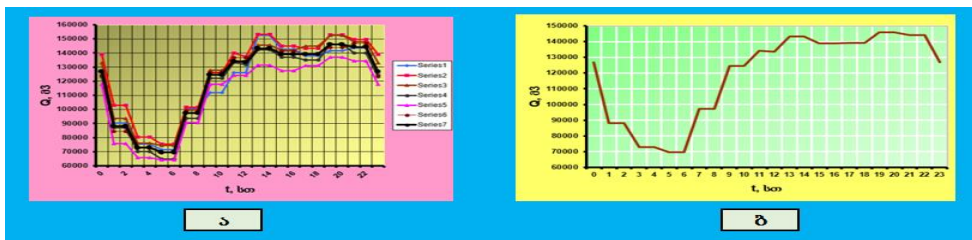
ნახ. 43. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის (სრული ანსამბლი); ბ) 2013 წლის იანვრის თვისათვის მოხმარების ნორმირებული მწკრივი

ნახ. 43ბ-ზე ნაჩვენებია 2013 წლის იანვრის თვისათვის მოხმერების ნორმირებული მწკრივი. ნახ. 44-ზე ნაჩვენებია შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის.



ნახ. 44. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარება)

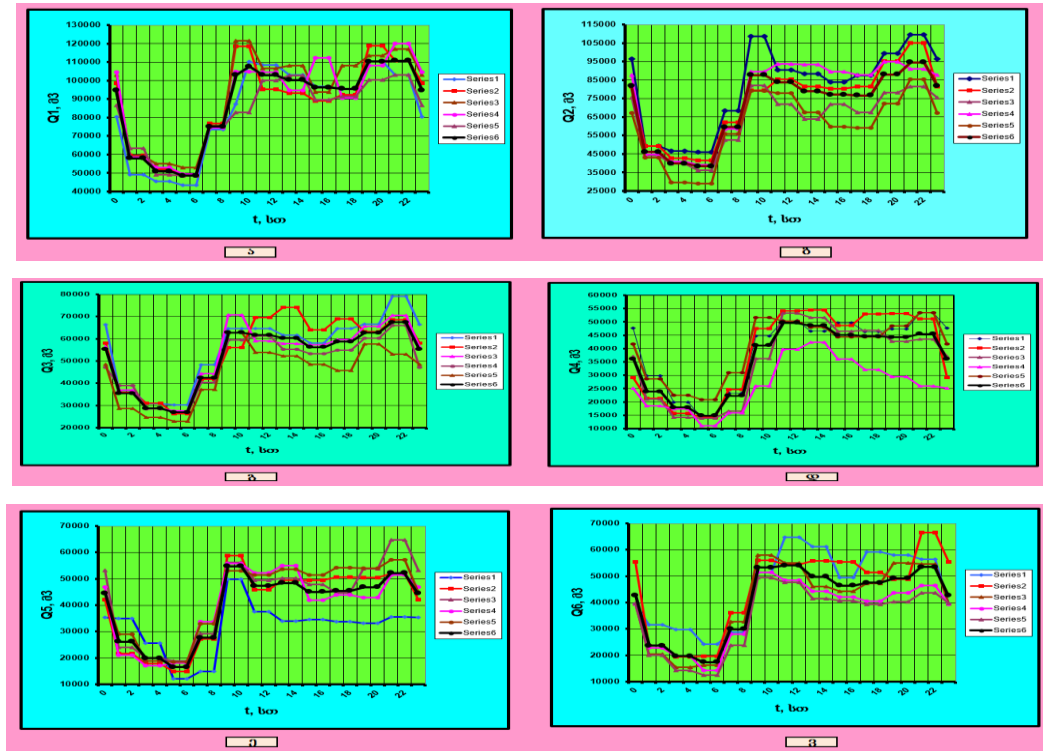
ნახ. 45ა-ზე ნაჩვენებია შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის, ნახ. 44-ის შესაბამისად



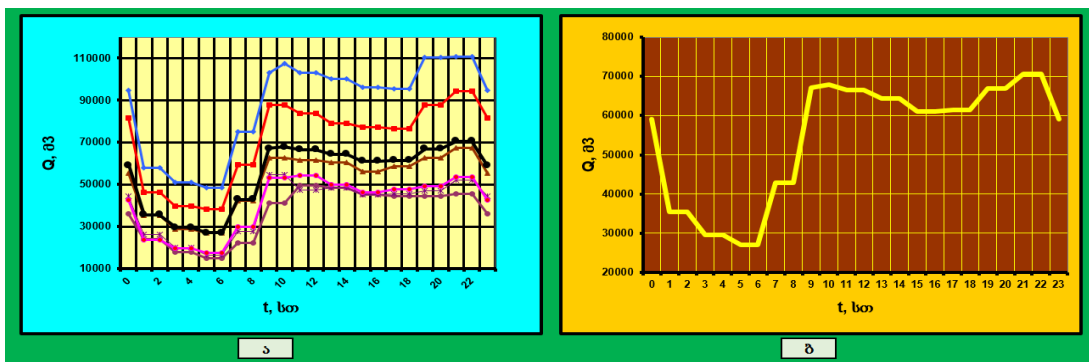
ნახ. 45. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად

ნახ. 45ბ-ზე ნაჩვენებია შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის იანვრისთვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად.

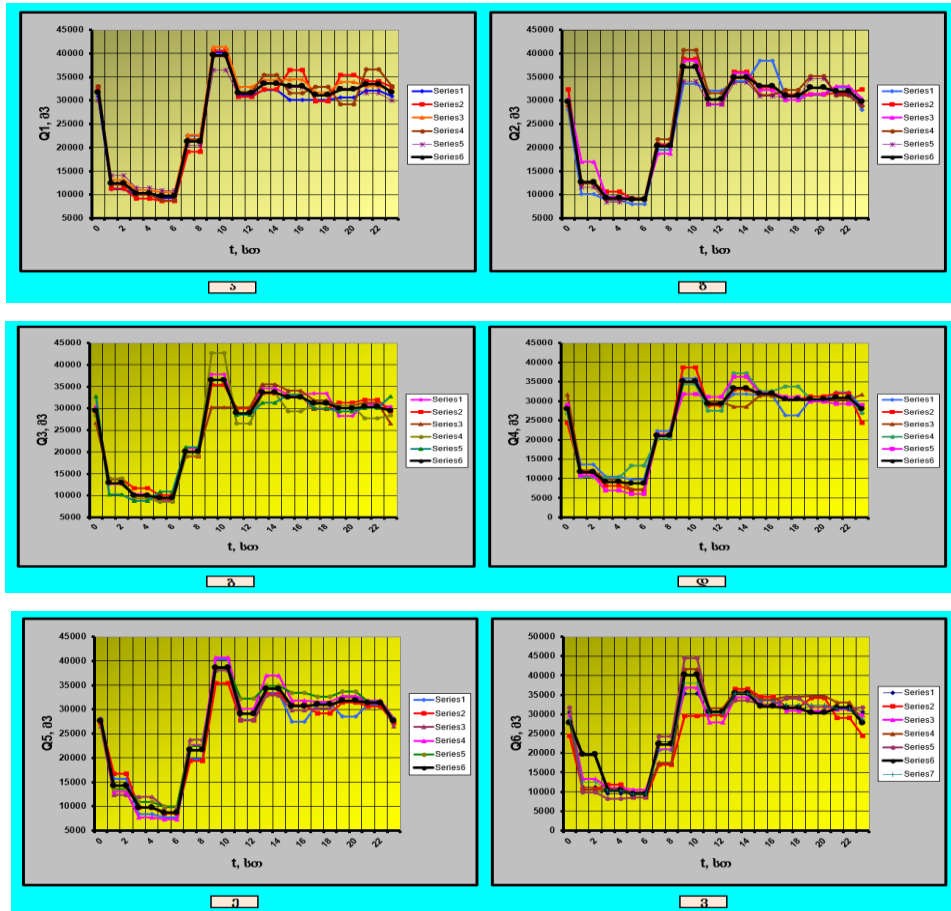
დანარჩენი, სამი თვისათვის (აპრილი, ივლისი და ოქტომბერი), ანალოგიურად მიიღება საათური მოხმარების გრაფიკები (ნახ. 46-51).



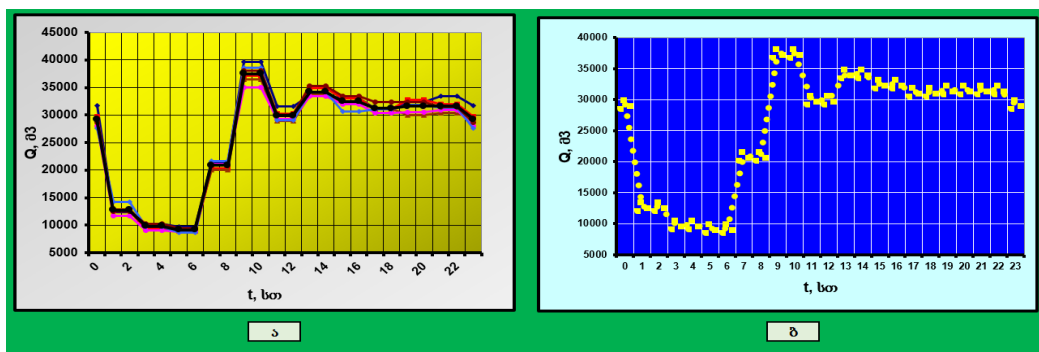
ნახ. 46. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარება)



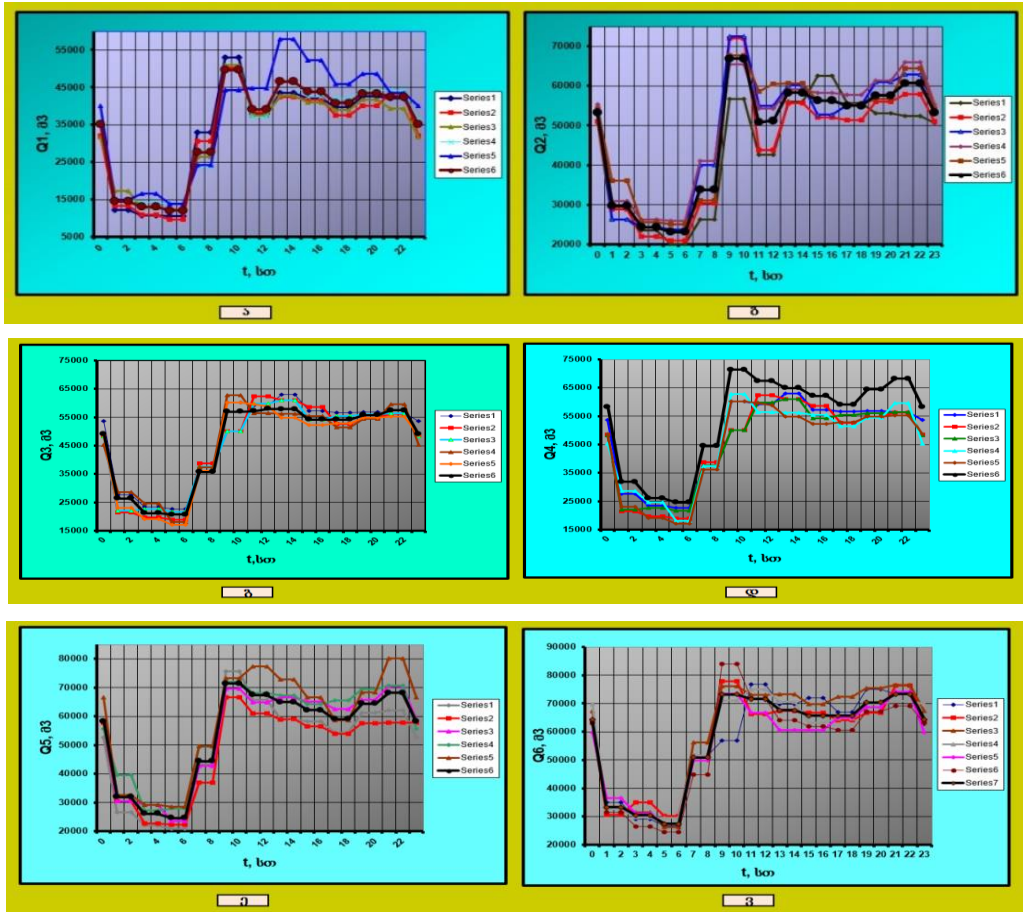
ნახ. 47. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის აპრილის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად



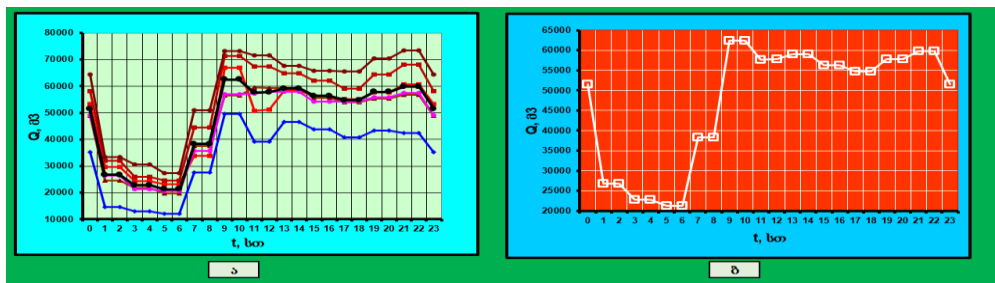
ნახ. 48. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრუდი - საშუალო მოხმარება)



ნახ. 49. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ივლისის თვისათვის კრებსითი გრაფიკის შესაბამისად



ნახ. 50. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის: ა. 1-5 დღე; ბ. 6-10 დღე; გ. 11-15 დღე; დ. 16-20 დღე; ე. 21-25 დღე; ვ. 26-31 დღე (მე-6 მრული - საშუალო მოხმარება)



ნახ. 51. ა) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლის ოქტომბრის თვისათვის კრებულთი გრაფიკის შესაბამისად

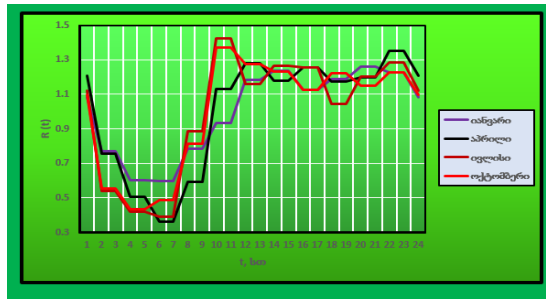
ნახ. 52-ზე ნაჩვენებია შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის ოთხი ტიპური თვისათვის - იანვარი, ოქტომბერი, აპრილი, ივლისი).

განვიხილოთ მოხმარების პროცესის გაშლა ჰარმონიკების მიხედვით, ანუ ჰარმონიული ანალიზი. ჩავთვალოთ, რომ დამოუკიდებელი ცვლადი

შემდეგია: $x = \omega t = \frac{2\pi t}{T}$, მაშინ გვექნება ფუნქცია:

$$f(x) = a_0 + (a_1 \cos x + b_1 \sin x) + (a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x) + (a_3 \cos 3x + b_3 \sin 3x) + \dots =$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (51)$$



ნახ. 52. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის ოთხი ტიპური თვისათვის – იანვარი, ოქტომბერი, აპრილი, ივლისი)

x -ის ფუნქციას გააჩნია პერიოდი 2π , რომელიც განიშლება კოსინუსების და სინუსების არგუმენტის (x) ჯერად მნიშვნელობებად.

განვიხილოთ მიღებული ფუნქციის გაშლა ფურიეს მწკრივად. ხშირად ამ შემთხვევაში უშუალოდ შესაძლებელია ეილერ-ფურიეს ფორმულებით მწკრივის კოეფიციენტების გამოყენება:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \\ a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nxdx; \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nxdx. \end{cases} \quad (52)$$

ამ ფორმულების შესაბამისად მიახლოებით უნდა განისაზღვროს გაშლის ფურიე-კოეფიციენტები. როგორც წესი, პრაქტიკულად, ვიყენებთ მწკრივის პირველ რამდენიმე წევრს. შემდგომში, ფურიეს მწკვირის კოეფიციენტები მცირდება მაღალი რიგის ჰარმონიკების გავლენით.

განვიხილოთ რუნგეს მეთოდი, რისთვისაც ცხრილიდან (ან გრაფიკიდან) განვიხილება x არგუმენტის თანაბარი მონაკვეთების შესაბამისი y ორდინატები. გამოთვლების გამარტივებისათვის განვიხილოთ 12 ორდინატების სქემა.

$$\text{ჩავთვალოთ, რომ } T = 24, \text{ ხოლო } x = \frac{2\pi t}{T} = \frac{2\pi t}{24} = \frac{\pi t}{12}.$$

ვთქვათ გვაქვს მონაკვეთი $0 \div 2\pi$, რომელიც დაყავით ტოლ ნაწილებად და ცნობილია მათი შესაბამისი ორდინატები:

$y_0, y_1, y_2, \dots, y_{k-1}, y_k = y_0$ და მათი შესაბამისი დაყოფის წერტილები $0, \frac{2\pi}{k}, 2\frac{2\pi}{k}, \dots, (k-1)\frac{2\pi}{k}, 2\pi$. მაშინ ტრაპეციების შესაბამისად გვექნება

(ცხადია, რომ მიახლოებითი მეთოდით):

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi}{k} \left[\frac{1}{2} y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{k-1} + \frac{1}{2} y_k \right]. \quad (53)$$

ფუნქციის პერიოდულობის გამო $y_k = y_0$, ამიტომ მივიღებთ:

$$k a_0 = y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{k-1}. \quad (54)$$

ანალოგიურად, ფორმულის ტრაპეციის გამოყენებით სხვა ინტეგრალებისათვის მივიღებთ:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \frac{2\pi}{k} \left[y_0 + y_1 \cos m \frac{2\pi}{k} + y_2 \cos m \frac{4\pi}{k} + \dots + y_{i-1} \cos m \frac{2(k-1)\pi}{k} \right]. \quad (55)$$

ან სხვანაირად გვექნება:

$$\frac{k}{2} a_m = y_0 + y_1 \cos m \frac{2\pi}{k} + y_2 \cos m \frac{4\pi}{k} + \dots + y_{i-1} \cos m \frac{2(k-1)\pi}{k}. \quad (56)$$

ანალოგიურად მივიღებთ:

$$\frac{k}{2}b_m = y_0 + y_1 \sin m \frac{2\pi}{k} + y_2 \sin m \frac{4\pi}{k} + \dots + y_{i-1} \sin m \frac{2(k-1)\pi}{k}. \quad (57)$$

ჩავთვალოთ, რომ $k=12$ და გამოვიყენოთ 12 ორდინატების მნიშვნელობები - $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{11}$, რომლებსაც შეესაბამება 12 ორდინატის თანაბარი არგუმენტის მნიშვნელობა. $0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}, \frac{5\pi}{6}, \pi, \frac{7\pi}{6}, \frac{4\pi}{3}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{3}, \frac{11\pi}{6}$.

საბოლოოდ მივიღებთ:

$$12a_0 = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11}; \quad (58)$$

$$6a_m = y_0 + y_1 \cos m \frac{\pi}{6} + y_2 \cos m \frac{\pi}{3} + y_3 \cos m \frac{\pi}{2} + y_4 \cos m \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos m \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos m \pi + y_7 \cos m \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos m \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos m \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos m \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos m \frac{11\pi}{6} \quad (59)$$

$$6b_m = y_0 + y_1 \sin m \frac{\pi}{6} + y_2 \sin m \frac{\pi}{3} + y_3 \sin m \frac{\pi}{2} + y_4 \sin m \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin m \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin m \pi + y_7 \sin m \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin m \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin m \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin m \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin m \frac{11\pi}{6} \quad ; \quad (60)$$

$$6a_m = y_0 + y_1 \cos m \frac{\pi}{6} + y_2 \cos m \frac{\pi}{3} + y_3 \cos m \frac{\pi}{2} + y_4 \cos m \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos m \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos m \pi + y_7 \cos m \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos m \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos m \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos m \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos m \frac{11\pi}{6} \quad ; \quad (61)$$

$$6b_m = y_0 + y_1 \sin m \frac{\pi}{6} + y_2 \sin m \frac{\pi}{3} + y_3 \sin m \frac{\pi}{2} + y_4 \sin m \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin m \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin m \pi + y_7 \sin m \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin m \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin m \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin m \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin m \frac{11\pi}{6} \quad ; \quad (62)$$

ამგვარად გვქვია:

$$6a_1 = y_0 + y_1 \cos \frac{\pi}{6} + y_2 \cos \frac{\pi}{3} + y_3 \cos \frac{\pi}{2} + y_4 \cos \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos \pi + y_7 \cos \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos \frac{11\pi}{6} \quad ; \quad (63)$$

$$6a_2 = y_0 + y_1 \cos 2 \frac{\pi}{6} + y_2 \cos 2 \frac{\pi}{3} + y_3 \cos 2 \frac{\pi}{2} + y_4 \cos 2 \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos 2 \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos 2\pi + y_7 \cos \frac{7\pi}{3} + y_8 \cos \frac{8\pi}{3} + y_9 \cos 2 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos 2 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos 2 \frac{11\pi}{6} \quad ; \quad (64)$$

$$6a_3 = y_0 + y_1 \cos 3 \frac{\pi}{6} + y_2 \cos 3 \frac{\pi}{3} + y_3 \cos 3 \frac{\pi}{2} + y_4 \cos 3 \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos 3 \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos 3\pi + y_7 \cos 3 \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos 3 \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos 3 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos 3 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos 3 \frac{11\pi}{6} ; \quad (65)$$

$$6a_4 = y_0 + y_1 \cos 4 \frac{\pi}{6} + y_2 \cos 4 \frac{\pi}{3} + y_3 \cos 4 \frac{\pi}{2} + y_4 \cos 4 \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos 4 \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos 4\pi + y_7 \cos 4 \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos 4 \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos 4 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos 4 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos 4 \frac{11\pi}{6} ; \quad (66)$$

$$6a_5 = y_0 + y_1 \cos 5 \frac{\pi}{6} + y_2 \cos 5 \frac{\pi}{3} + y_3 \cos 5 \frac{\pi}{2} + y_4 \cos 5 \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos 5 \frac{5\pi}{6} + y_6 \cos 5\pi + y_7 \cos 5 \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos 5 \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos 5 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos 5 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos 5 \frac{11\pi}{6} . \quad (67)$$

$$6b_1 = y_0 + y_1 \sin \frac{\pi}{6} + y_2 \sin \frac{\pi}{3} + y_3 \sin \frac{\pi}{2} + y_4 \sin \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin \pi + y_7 \sin \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin \frac{11\pi}{6} ; \quad (68)$$

$$6b_2 = y_0 + y_1 \sin 2 \frac{\pi}{6} + y_2 \sin 2 \frac{\pi}{3} + y_3 \sin 2 \frac{\pi}{2} + y_4 \sin 2 \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin 2 \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin 2\pi + y_7 \sin 2 \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin 2 \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin 2 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin 2 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin 2 \frac{11\pi}{6} \quad (69)$$

$$6b_3 = y_0 + y_1 \sin 3 \frac{\pi}{6} + y_2 \sin 3 \frac{\pi}{3} + y_3 \sin 3 \frac{\pi}{2} + y_4 \sin 3 \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin 3 \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin 3\pi + y_7 \sin 3 \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin 3 \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin 3 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin 3 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin 3 \frac{11\pi}{6} ; \quad (70)$$

$$6b_4 = y_0 + y_1 \sin 4 \frac{\pi}{6} + y_2 \sin 4 \frac{\pi}{3} + y_3 \sin 4 \frac{\pi}{2} + y_4 \sin 4 \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin 4 \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin 4\pi + y_7 \sin 4 \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin 4 \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin 4 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin 4 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin 4 \frac{11\pi}{6} ; \quad (71)$$

$$6b_5 = y_0 + y_1 \sin 5 \frac{\pi}{6} + y_2 \sin 5 \frac{\pi}{3} + y_3 \sin 5 \frac{\pi}{2} + y_4 \sin 5 \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin 5 \frac{5\pi}{6} + y_6 \sin 5\pi + y_7 \sin 5 \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin 5 \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin 5 \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin 5 \frac{5\pi}{6} + y_{11} \sin 5 \frac{11\pi}{6} . \quad (72)$$

გავამარტივოთ. მაშინ გვექნება:

$$6a_1 = y_0 + y_1 \cos \frac{\pi}{6} + y_2 \cos \frac{\pi}{3} + y_3 \cos \frac{\pi}{2} + y_4 \cos \frac{2\pi}{3} + y_5 \cos \frac{5\pi}{6} +$$

$$+ y_6 \cos \pi + y_7 \cos \frac{7\pi}{6} + y_8 \cos \frac{4\pi}{3} + y_9 \cos \frac{3\pi}{2} + y_{10} \cos \frac{5\pi}{6} + y_{11} \cos \frac{11\pi}{6} ; \quad (73)$$

$$6a_2 = y_0 + y_1 \cos \frac{\pi}{3} + y_2 \cos \frac{2\pi}{3} + y_3 \cos \pi + y_4 \cos \frac{4\pi}{3} + y_5 \cos \frac{5\pi}{3} +$$

$$+ y_6 \cos 2\pi + y_7 \cos \frac{7\pi}{3} + y_8 \cos \frac{8\pi}{3} + y_9 \cos 3\pi + y_{10} \cos \frac{5\pi}{3} + y_{11} \cos \frac{11\pi}{3} ; \quad (74)$$

$$6a_3 = y_0 + y_1 \cos \frac{\pi}{2} + y_2 \cos \pi + y_3 \cos \frac{3\pi}{2} + y_4 \cos 2\pi + y_5 \cos \frac{5\pi}{2} +$$

$$+ y_6 \cos 3\pi + y_7 \cos \frac{7\pi}{2} + y_8 \cos 4\pi + y_9 \cos \frac{9\pi}{2} + y_{10} \cos \frac{5\pi}{2} + y_{11} \cos \frac{11\pi}{2} ; \quad (75)$$

$$6a_4 = y_0 + y_1 \cos \frac{2\pi}{3} + y_2 \cos \frac{4\pi}{3} + y_3 \cos 2\pi + y_4 \cos \frac{8\pi}{3} + y_5 \cos \frac{10\pi}{3} +$$

$$+ y_6 \cos 4\pi + y_7 \cos \frac{14\pi}{3} + y_8 \cos \frac{16\pi}{3} + y_9 \cos 6\pi + y_{10} \cos \frac{10\pi}{3} + y_{11} \cos \frac{22\pi}{3} ; \quad (76)$$

$$6a_5 = y_0 + y_1 \cos \frac{5\pi}{6} + y_2 \cos \frac{5\pi}{3} + y_3 \cos \frac{5\pi}{2} + y_4 \cos \frac{10\pi}{3} + y_5 \cos \frac{25\pi}{6} +$$

$$+ y_6 \cos 5\pi + y_7 \cos \frac{35\pi}{6} + y_8 \cos \frac{20\pi}{3} + y_9 \cos \frac{15\pi}{2} + y_{10} \cos \frac{25\pi}{3} + y_{11} \cos \frac{55\pi}{6} ; \quad (77)$$

$$6b_1 = y_0 + y_1 \sin \frac{\pi}{6} + y_2 \sin \frac{\pi}{3} + y_3 \sin \frac{\pi}{2} + y_4 \sin \frac{2\pi}{3} + y_5 \sin \frac{5\pi}{6} +$$

$$+ y_6 \sin \pi + y_7 \sin \frac{7\pi}{6} + y_8 \sin \frac{4\pi}{3} + y_9 \sin \frac{3\pi}{2} + y_{10} \sin \frac{5\pi}{3} + y_{11} \sin \frac{11\pi}{6} ; \quad (78)$$

$$6b_2 = y_0 + y_1 \sin \frac{\pi}{3} + y_2 \sin \frac{2\pi}{3} + y_3 \sin \pi + y_4 \sin \frac{4\pi}{3} + y_5 \sin \frac{5\pi}{3} +$$

$$+ y_6 \sin 2\pi + y_7 \sin \frac{7\pi}{3} + y_8 \sin \frac{8\pi}{3} + y_9 \sin 3\pi + y_{10} \sin \frac{5\pi}{3} + y_{11} \sin \frac{11\pi}{3} ; \quad (79)$$

$$6b_3 = y_0 + y_1 \sin \frac{\pi}{2} + y_2 \sin \pi + y_3 \sin \frac{3\pi}{2} + y_4 \sin 2\pi + y_5 \sin \frac{5\pi}{2} +$$

$$+ y_6 \sin 3\pi + y_7 \sin \frac{7\pi}{2} + y_8 \sin 4\pi + y_9 \sin \frac{9\pi}{2} + y_{10} \sin \frac{5\pi}{2} + y_{11} \sin \frac{11\pi}{2} ; \quad (80)$$

$$6b_4 = y_0 + y_1 \sin \frac{2\pi}{3} + y_2 \sin \frac{4\pi}{3} + y_3 \sin 2\pi + y_4 \sin \frac{8\pi}{3} + y_5 \sin \frac{10\pi}{3} +$$

$$+ y_6 \sin 4\pi + y_7 \sin \frac{14\pi}{3} + y_8 \sin \frac{16\pi}{3} + y_9 \sin 6\pi + y_{10} \sin \frac{10\pi}{3} + y_{11} \sin \frac{22\pi}{3} ; \quad (81)$$

$$6b_5 = y_0 + y_1 \sin \frac{5\pi}{6} + y_2 \sin \frac{5\pi}{3} + y_3 \sin \frac{5\pi}{2} + y_4 \sin \frac{10\pi}{3} + y_5 \sin \frac{25\pi}{6} +$$

$$+ y_6 \sin 5\pi + y_7 \sin \frac{35\pi}{6} + y_8 \sin \frac{20\pi}{3} + y_9 \sin \frac{15\pi}{2} + y_{10} \sin \frac{25\pi}{3} + y_{11} \sin \frac{55\pi}{6} \quad (82)$$

იმისათვის, რომ გავამარტივოთ და მინიმუმზე დავიყვანოთ გამოთვლები, გამოვიყენოთ რუნგეს მიერ შემოთავაზებული სქემა (ცხრილი 21).

ცხრილი 21

რუნგეს სქემა ფურიეს მწკრივის კოეფიციენტების დასადგენად

ორდინატები	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
	y_{11}	y_{11}	y_0	y_8	y_7		
ჯამი	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
სხვაობა		v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	

მიღებული ჯამების და სხვაობების მნიშვნელობები, კვლავ იკრიბება და გამოაკლდება (ცხრილი 22):

ცხრილი 22

რუნგეს სქემა ჯამების და სხვაობების მნიშვნელობებისათვის

ჯამი	u_0	u_1	u_2	u_3
u_6	u_5	u_4		
ჯამი	s_0	s_1	s_2	s_3
სხვაობა	d_0	d_1	d_2	
სხვაობა	v_1	v_2	v_3	
v_5	v_4			
ჯამი	σ_1	σ_2	σ_3	
სახვაობა	δ_1	δ_2		

ამგვარად, s, d, σ, δ სიდიდეების საშუალებით, შესაძლებელია განისაზღვროს ფურიეს-კოეფიციენტები:

$$\left\{ \begin{array}{l} 12a_0 = s_0 + s_1 + s_2 + s_3; \\ 6a_1 = d_0 + 0,866d_1 + 0,5d_2; \\ 6a_2 = (s_0 - s_3) + 0,5(s_1 - s_2); \\ \quad 6a_3d_0 - d_2; \\ 6b_1 = 0,5\sigma_1 + 0,866\sigma_2 + \sigma_3; \\ \quad 6b_2 = 0,866(\delta_1 - \delta_2); \\ \quad 6b_3 = \sigma_1 - \sigma_3; \\ \dots\dots\dots \end{array} \right. \quad (83)$$

თუ ფუნქცია $f(t)$ მოცემულია ინტერვალზე $[0 < t < T]$ გარკვეული ჰარმონიული ფუნქციების (სინუსები და კოსინუსები) პერიოდებით $T, T/2, T/3, \dots$, მაშინ შეიძლება წარმოვიდგინოთ ამ ფუნქციების სუპერპოზიცია:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos \frac{2\pi t}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \frac{2\pi t}{T}. \quad (84)$$

რეალურად, გამოთვლილ მწკრივში შედის ჯამის წევრების სასრული რაოდენობა - გაშლის პარამეტრი k , რომელიც შემოსაზღვრულია მაქსიმალური მნიშვნელობით $k < K_{max}$. აღნიშნულ წარმოდგენილ მწკრივში გვაქვს მით უფრო სიზუსტე, რაც უფრო გრძელია მწკრივი. თუმცა, თუ გვაქვს ზუსტი მწკრივის წევრების სასრული რაოდენობა, მაშინ ჯერადი სიზშირეების (შებრუნებული პერიოდებით) მქონე საწყისი ფუნქცია - მხოლოდ ჰარმონიული ფუნქციების ჯამია.

ვთქვათ, გვაქვს პერიოდი $T = 24$, ე.ი. ვიხილავთ საათურ მოხმარებას. მაშინ $x = \frac{2\pi t}{T} = \frac{2\pi t}{24} = \frac{\pi t}{12}$. ჩავთვალოთ, რომ ფურიეს მწკრივის გაშლისას,

საკმარისია ხუთი ჰარმონიკა:

$$\begin{aligned} f(x) = & a_0 + a_1 \cos \frac{\pi t}{12} + a_2 \cos 2 \frac{\pi t}{12} + a_3 \cos 3 \frac{\pi t}{12} + a_4 \cos 4 \frac{\pi t}{12} + a_5 \cos 5 \frac{\pi t}{12} + \\ & + b_1 \sin \frac{\pi t}{12} + b_2 \sin 2 \frac{\pi t}{12} + b_3 \sin 3 \frac{\pi t}{12} + b_4 \sin 4 \frac{\pi t}{12} + b_5 \sin 5 \frac{\pi t}{12} \end{aligned} \quad (85)$$

მაშინ ფურიეს კოეფიციენტების გაანგარიშება, გვექნება:

1. იანვრის მოხმარების განტოლება:

$$\begin{aligned}
 f(x) = & 106938,4 - 22534,0 \cos \frac{\pi t}{12} + 12937,98 \cos 2 \frac{\pi t}{12} + 508,64 \cos 4 \frac{\pi t}{12} + \\
 & + 2817,58 \cos 5 \frac{\pi t}{12} + 27635,61 \sin \frac{\pi t}{12} + 15437,88 \sin 2 \frac{\pi t}{12} + 64666,0 \sin 3 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 7687,57 \sin 4 \frac{\pi t}{12} + 46009,0 \sin 5 \frac{\pi t}{12}
 \end{aligned} \quad (86)$$

2. აპრილის მოხმარების განტოლება:

$$\begin{aligned}
 f(x) = & 54396,42 - 3948,27 \cos \frac{\pi t}{12} - 5590,35 \cos 2 \frac{\pi t}{12} - 5982,25 \cos 4 \frac{\pi t}{12} + \\
 & + 2817,58 \cos 5 \frac{\pi t}{12} + 5416,64 \sin \frac{\pi t}{12} - 3952,85 \sin 2 \frac{\pi t}{12} + 19854,16 \sin 3 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 13763,3 \sin 4 \frac{\pi t}{12} + 15878,48 \sin 5 \frac{\pi t}{12}
 \end{aligned} \quad (87)$$

3. ივლისის მოხმარების განტოლება:

$$\begin{aligned}
 f(x) = & 25575,58 - 3577,31 \cos \frac{\pi t}{12} + 6545,333 \cos 2 \frac{\pi t}{12} - 3068,0 \cos 4 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 495,21 \cos 5 \frac{\pi t}{12} + 1254,015 \sin \frac{\pi t}{12} - 1751,81 \sin 2 \frac{\pi t}{12} + 10710,7 \sin 3 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 6575,34 \sin 4 \frac{\pi t}{12} + 7948,04 \sin 5 \frac{\pi t}{12}
 \end{aligned} \quad (88)$$

4. ოქტომბრის მოხმარების განტოლება:

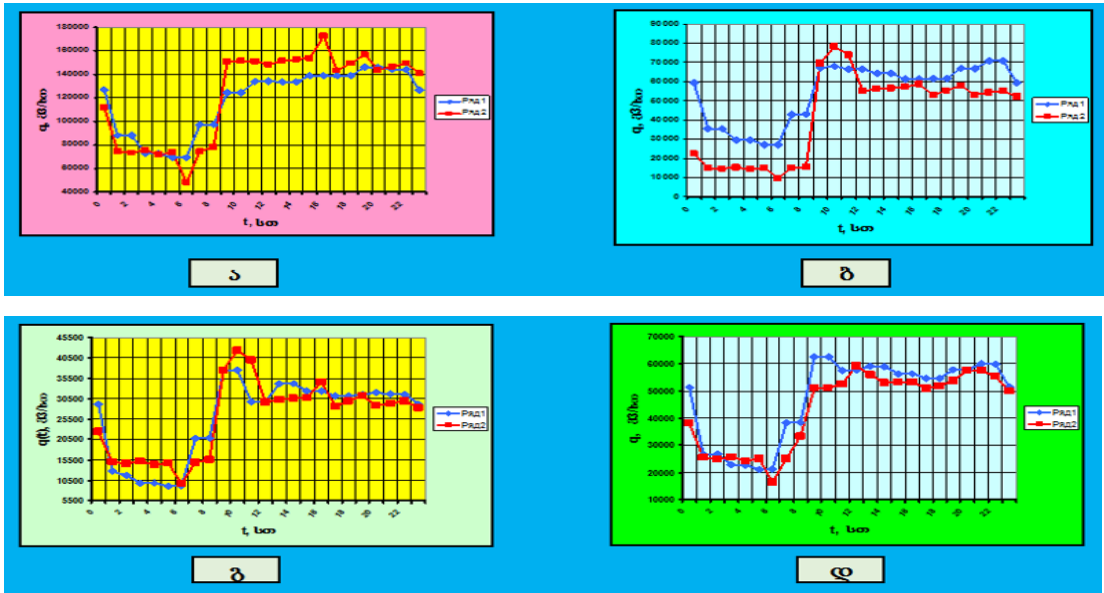
$$\begin{aligned}
 f(x) = & 47204,75 - 5097,97 \cos \frac{\pi t}{12} + 12226,62 \cos 2 \frac{\pi t}{12} - 5053,75 \cos 4 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 3783,41 \cos 5 \frac{\pi t}{12} + 4054,04 \sin \frac{\pi t}{12} - 3291,78 \sin 2 \frac{\pi t}{12} + 17792,27 \sin 3 \frac{\pi t}{12} - \\
 & - 11950,7 \sin 4 \frac{\pi t}{12} + 14044,42 \sin 5 \frac{\pi t}{12}
 \end{aligned} \quad (89)$$

ნახ. 53-ზე ნაჩვენებია აღნიშნული მოხმარების ემპირიული და აპროქსიმაციის ოთხი გრაფიკი.

საშუალო ფარდობითი ცდომილება ემპირიულსა და აპროქსიმაციის ფურციეს მჭკრივებს შორის 5,47%-ის ტოლია. რიცხვითი გაანგარიშებისას, ჩვენს მიერ, შექმნილია მარტივი პროგრამა Excel-ში.

ვთქვათ, ვიხილავთ 24 ორდინატების სქემას. ჩავთვალოთ, რომ გრაფიკიდან მოხსნილია 24 ორდინატი: $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{22}, y_{23}$, რომლებსაც

შეესაბამება არგუმენტის შემდეგი მნიშვნელობები: $0, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \dots, \frac{23\pi}{12}$, ანუ რაც იგივეა $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, \dots, 345^{\circ}$. ამ შემთხვევაში, საჭიროა შემდეგი ორდინატების ფურცის კოეფიციენტების შესაბამისი გამრავლება ყველა მამრავლებზე: $\pm 1, \pm \sin 30^{\circ}, \pm \sin 45^{\circ}, \pm 60^{\circ}, \pm 75^{\circ}$.



ნახ. 53. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” საათური მოხმარება 2013 წლისათვის (1. ემპირიული. 2. თეორიული): ა) იანვარი; ბ) აპრილი; გ) ივლისი; დ) ოქტომბერი

საბოლოოდ, გვექნება შემდეგი სქემა (ცხრილი 23).

ცხრილი 23

12 წერტილიანი რუნგეს სქემა

ცხრილი 23ა

12	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}
ორდინატები													
6 ორდინატები	y_{23}	y_{22}	y_{21}	y_{20}	y_{19}	y_{18}							
5 ორდინატები	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{14}	y_{13}								

ცხრილი 23ბ

ჯამი	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
	u_{12}	u_{11}	u_{10}	u_9	u_8	u_7	
ჯამი	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
სხვაობა	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	

ცხრილი 23გ

სხვაობა	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
	v_{11}	v_{10}	v_9	v_{10}	v_{11}	
ჯამი	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
სხვაობა	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	

ცხრილი 23დ

ჯამი	p_0	p_1	p_2	p_3
	p_6	p_5	p_4	
ჯამი	k_0	k_1	k_2	k_3
სხვაობა	l_0	l_1	l_2	

ცხრილი 23ე

სხვაობა	s_1	s_2	s_3
	s_5	s_4	
ჯამი	m_1	m_2	m_3
სხვაობა	n_1	n_2	

ამგვარად q და r სიდიდეების შეკრება და გამოკლება უკვე აღარ არის.

საბოლოოდ, სიდიდეების k, l, m, n, q და r საშუალებით, ფურიეს კოეფიციენტები გამოისახება შემდეგნაირად:

$$\left\{ \begin{array}{l}
24a_0 = k_0 + k_1 + k_2 + k_3; \\
12a_1 = [q_0 + 0,5q_4 + 0,6124(q_1 + q_2)] + [0,866q_2 + 0,7071q_3 + 0,3536(q_1 - q_5)]; \\
12a_2 = l_0 + 0,866l_1 + 0,5l_2; \\
12a_3 = (q_0 - q_4) + 0,7071(q_1 - q_3 - q_5); \\
12a_4 = (k_0 - k_3) + 0,5(k_0 - k_3); \\
12a_5 = [q_0 + 0,5q_4 + 0,6124(q_1 + q_5)] - [0,866q_2 + 0,7071q_3 + 0,3536(q_1 - q_5)]; \\
12a_6 = l_0 - l_2; \\
12b_1 = [0,5r_2 + r_6 + 0,6124(r_1 + r_5)] + [0,7071r_3 + 0,866r_4 - 0,3536(r_1 - r_5)]; \\
12b_2 = 0,5m_1 + 0,866m_2 + m_3; \\
12b_3 = (r_2 - r_6) + 0,7071(r_1 + r_3 - r_5); \\
12b_4 = 0,866(n_1 - n_2); \\
12b_5 = [0,5r_2 + r_6 + 0,6124(r_1 + r_5)] + [0,7071r_3 + 0,866r_4 - 0,3536(r_1 - r_5)]; \\
12b_6 = m_1 - m_6; \\
\text{.....}
\end{array} \right. \quad (90)$$

და ა.შ.

დანარჩენი გაანგარიშება ანალოგიურია. 24 ორდინატების სქემის რეალიზაციისას, მიიღება 5,31% (12-იანი სქემისათვის გვაქვს 5,47%). ამგვარად პრაქტიკული გაანგარიშებისას, საკმარისია 12 ორდინატების სქემის რეალიზაცია.

აღნიშნული მეთოდის შესაბამისად, შემდგომი ანალიზისათვის, განვიხილოთ ფუნქცია:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (91)$$

პერიოდისათვის $2T$, რომელიც იკრიბება მოცემული $f(x)$ ფუნქციისათვის. ამგვარად ეს მწკრივი იკრიბება თუ გარკვეულ წერტილში x_0 -ის ფუნქციის $(a_n \cos nx + b_n \sin nx)(n = 1, 2, \dots)$ პერიოდულობის გამო, ყოველთვის იქნება კრებადი ყველა წერტილში $x_0 + \frac{2\pi}{\omega} m$ (m - ნებისმიერი მთელი რიცხვია), და მისი ჯამი $S(x)$ იქნება პერიოდული ფუნქცია: თუ $S_n(x)$ -ის n -ის ნაწილობრივი ჯამი იქნება: $S_n(x_0 + T) = S_n\left(x_0 + \frac{2\pi}{\omega}\right) = S_n(x_0)$, სადაც $\frac{2\pi}{T}$,

ხოლო $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n(x_0 + T) = \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n(x_0)$, ე.ი. $S(x_0 + T) = S(x_0)$. ამიტომ, ფუნქცია შეიძლება მოხდეს $f(x)$ ფუნქციის გაშლა პერიოდული ფუნქციებით.

ვთქვათ, გვაქვს პერიოდული ფუნქცია $f(x)$ პერიოდით 2π , ისე რომ იგი წარმოდგენილია ტრიგონომეტრიული მწკრივით და იკიბრება ინტერვალში $(-\pi, \pi)$, მაშინ გვაქვს ამ მწკრივის ჯამი:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx). \quad (92)$$

ჩავთვალოთ, რომ ტოლობის მარცხენა მხარის ინტეგრალი ტოლია ამ მწკრივების წევრების ინტეგრალების ჯამის. ეს მოხდება მაშინ, როდესაც კოეფიციენტებიდან შედგენილი რიცხვითი მწკრივი, აბსოლუტურად იკრიბება, ე.ი. იკრიბება დადებითი რიცხვითი მწკრივი.

$$\left| \frac{a_0}{2} \right| + |a_1| + |b_1| + |a_2| + |b_2| + \dots + |a_n| + |b_n| + \dots \quad (93)$$

მოვახდინოთ მაჟორული მწკრივის წევრ-წევრა ინტეგრება $(-\pi, \pi)$ ინტერვალში. შედეგად გვექნება:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_{-\pi}^{\pi} a_n \cos nx dx + \int_{-\pi}^{\pi} b_n \sin nx dx \right). \quad (94)$$

გამოვიანგარიშოთ ცალკე ცალკე ინტეგრალი, გვექნება:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} dx = \pi a_0, \quad (95)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} a_n \cos nx dx = a_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx dx = \frac{a_n \sin nx}{n} \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0; \quad (96)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} b_n \sin nx dx = b_n \int_{-\pi}^{\pi} \sin nx dx = -\frac{a_n \cos nx}{n} \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0; \quad (97)$$

ამგვარად

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \pi a_0, \text{ საიდანაც}$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx. \quad (98)$$

განვსაზღვროთ ფურიეს კოეფიციენტები. თუ ფუნქცია $f(x)$ აქვს პერიოდი 2π , გააჩნია უწყვეტი s რიგის წარმოებული $f^{(s)}(x)$ და აკმაყოფილებს უტოლობას ნამდვილ ღერძზე:

$$|f^{(s)}(x)| \leq M_s, \quad (99)$$

მაშინ $f(x)$ ფუნქციის ფურიეს კოეფიციენტები აკმაყოფილებს შემდეგ უტოლობას:

$$\begin{cases} |a_k| \leq \frac{2M_s}{k^s}; \\ |b_k| \leq \frac{2M_s}{k^s}. \quad (k = 1, 2, \dots) \end{cases}. \quad (100)$$

დავამტკიცოთ ეს დებულებები. ნაწილობითი ინტეგრებით და გავითვალისწინოთ, რომ $f(-\pi) = f(\pi)$, გვექნება:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx dx = \frac{1}{\pi} \left[f(x) \frac{\sin kx}{k} \Big|_{-\pi}^{\pi} - \int_{-\pi}^{\pi} f'(x) \frac{\sin kx}{k} dx \right] = \\ &= -\frac{1}{\pi k} \int_{-\pi}^{\pi} f'(x) \sin kx dx \end{aligned} \quad (101)$$

ამიტომ

$$|a_k| \leq \frac{1}{\pi k} \int_{-\pi}^{\pi} M_1 \cdot 1 \cdot dx = \frac{2M_1}{k}. \quad (102)$$

თანმიმდევრობით ვაინტეგრით მარჯვენა ნაწილი, (98), გავითვალისწინოთ, რომ $f', \dots, f^{(s)}$ უწყვეტებია და იყენებენ ერთიდაიგივე მნიშვნელობებს წერტილებში $t = -\pi$ და $t = \pi$, აგრეთვე მივიღებთ შეფასებას (99), და მივიღებთ შეფასებას (101). მეორე შეფასება (102) მიიღება ანალოგიურად.

თუ ფურიეს კოეფიციენტები $f(x)$ -თვის გვაქვს:

$$\{|a_k|, |b_k|\} \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| f\left(t + \frac{\pi}{k}\right) - f(t) \right| dt \cdot \quad (103)$$

დავამტკიცოთ, გვექნება:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos kt dt \cdot \quad (104)$$

შევიტანოთ ახალი ცვლადი $t = u + \frac{\pi}{k}$ და გავითვალისწინოთ, რომ

$f(x)$ პერიოდულია, ამიტომ გვექნება

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi + \frac{\pi}{k}}^{\pi + \frac{\pi}{k}} f\left(u + \frac{\pi}{k}\right) \cos\left(ku + \pi\right) du = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f\left(u + \frac{\pi}{k}\right) \cos kudu \cdot \quad (105)$$

შევკრიბოთ (54) და (55), მივიღებთ:

$$a_k = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[f\left(u + \frac{\pi}{k}\right) - f(u) \right] \cos kudu \cdot \quad (106)$$

საიდანაც

$$|a_k| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| f\left(u + \frac{\pi}{k}\right) - f(u) \right| du \cdot \quad (107)$$

ანალოგიურად მივიღებთ დამტკიცებას b_k -თვის.

ამგვარად, თუ ფუნქცია $f(x)$ პერიოდულია და უწყვეტია, მაშინ ფურიეს კოეფიციენტები მიისწრაფიან ნულისაკენ: $a_k \rightarrow 0, b_k \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$.

$$|a_k| \leq \frac{2M_s}{k^s}, \quad |b_k| \leq \frac{2M_s}{k^s} \quad (k = 1, 2, \dots)$$

4.2. შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” 2013 წლის საათური მოხმარების კორელაციური ანალიზი ფურიეს მწკრივების საშუალებით

მწკრივის ჯამი, კვლევის სტატისტიკური მეთოდებისას, წარმოდგენილია რამდენიმე კომპონენტის მიხედვით, რომლებიც ასახევენ კანონზომიერებას და შემთხვევით განვითარებას: $f(t) = X(t) + Y(T) + Z(t)$,

სადაც $X(t)$ არის ტრენდი (ხანგრძლივი ტენდენცია); $Y(T)$ - სეზონური კომპონენტი; $Z(t)$ - ნარჩენი კომპონენტი.

ტრენდი წარმოადგენს მახასიათებლის მდგრად ცვლილებას ხანგრძლივი დროის განმავლობაში. როგორც წესი, იგი გამოისახება ანალიზური ფუნქციით, რომელიც გამოიყენება საპროგნოზო შეფასებების ფორმირებისათვის.

სეზონური კომპონენტი ახასიათებს მდგრად რხევას სრული პერიოდის შიგნით (წლიური, თვიური, დღე-ღამური, სათური და ა.შ.). მდგრადი რხევა დღე-ღამის განმავლობაში, შეიძლება განიხილოს როგორც ციკლური და აისახება სეზონური კომპონენტით.

ნარჩენი კომპონენტი წარმოადგენს სხვაობას ფაქტიურსა და საანგარიშო მნიშვნელობას შორის. თუ აგებულია ადექვატური (კარგი) მოდელი, მაშინ პროგნოზი $E(t)$, ახლოსაა θ -თან, რომელიც წარმოადგენს ნორმალური კანონით განაწილებული, შემთხვევით, დამოუკიდებელ სიდიდეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში შესაძლებელია მივიღოთ უარყოფითი შემდეგი მოდელი.

დროითი მწკრივების სტატისტიკური ანალიზის ძირითადი მიზანია შეისწავლოს კანონზომიერების და შემთხვევითობის თანაფარდობა, მათი რაოდენობრივი ზომის შეფასება და ზომა. კანონზომიერებები ხსნიან მახასიათებლის წარსულ დინამიკას და მომავალში მათი მნიშვნელობების პროგნოზირება. შემთხვევითობების გათვალისწინება გვამღებს კანონზომიერების განვითარების გადახრის ალბათობას და შესაძლო სიდიდის განსაზღვრის საშუალებას.

სტატისტიკური ანალიზის შესრულება ხდება შემდეგი თანაფარდობით: 1. ამოცანის დასმა და საწყისი ინფორმაციის შერჩევა; 2. საწყისი დროითი მწკრივების წინასწარი ანალიზი და მოდელის პროგნოზირება; 3. მოდელის პარამეტრების რიცხვითი შეფასება; 4.

მოდელის თვისობრივი განსაზღვრა (ადექვატობა და სიზუსტე); 5. წერტილოვანი და ინტერვალური პროგნოზის მიღება; 6. მიღებული პროგნოზის არსებითი კომენტარი.

პირველ ეტაპზე უნდა ფორმულირდეს კვლევის პროცესის არსებითი (ლოგიკური) მიზანი და უნდა მოხდეს გონივრული პერიოდის პროგნოზი. აგრეთვე, უნდა განისაზღვროს სტაბილურობა და სტატისტიკური რხევის გადახრები. ასეთი გადახრები როგორც წესი, არ უნდა აღემატებოდეს ამონაკრები მოცულობის ერთ მესამედს.

საპროგნოზო სიდიდის აგებულ ინტერვალში მოხვედრილი სიდიდის პროგნოზის დამაჯერებელ ალბათობას ახასიათებს გარკვეული ნდობა და შესაძლო უნდა იყოს კომპანიისათვის. აგრეთვე, მიღებული საპროგნოზო შეფასებები უნდა იყოს გონივრული და არა საწინააღმდეგო.

აღნიშნული ანალიზისათვის, მისაღებია კორელაციური ანალიზის განხილვა.

ავტოკორელაციური ფუნქცია წარმოადგენს სხვადასხვა მწკრივების მჭიდრო კავშირის კანონზომიერებას. ავტოკორელაციის ანალიზი, როგორც წესი, ხდება გრაფიკულად. ავტოკორელაციური კოეფიციენტი შემდეგია:

$$r_t = \frac{(N-L) \sum_{i=1}^{N-L} x_i x_{i+L} - \sum_{i=1}^{N-L} x_i \sum_{i=1}^{N-L} x_{i+L}}{\sqrt{\left[(N-L) \sum_{i=1}^{N-L} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-L} x_i \right)^2 \right] \left[(N-L) \sum_{i=1}^{N-L} x_{i+L}^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-L} x_{i+L} \right)^2 \right]}} ; \quad (108)$$

$$t = \overline{1, N}, L = 0, 1, 2, \dots$$

განვიხილოთ ურთიერთკორელაციის კოეფიციენტები ბუნებრივი გაზის თვიურ მოხმარებას შორის. კორელაციის კოეფიციენტები ორ x_n და y_n მწკრივს შორის განისაზღვრება ცნობილი ფორმულით [52-55]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} , \quad (109)$$

სადაც \bar{x} და \bar{y} წარმოადგენს მათ მათემატიკურ მოლოდინებს.

სხვაგვარად შესაძლებია ჩაიწეროს:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} x_t x_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} x_t \sum_{t=k+1}^n \frac{x_t}{n-k}}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^{n-k} x_t^2 - \frac{\left(\sum_{t=1}^{n-k} x_t \right)^2}{n-k} \right] \left[\sum_{t=k+1}^n x_t^2 - \frac{\left(\sum_{t=k+1}^n x_t \right)^2}{n-k} \right]}} \quad (110)$$

$$Q(t) = 4,1 - 1,15 \cos \frac{2\pi t}{24} + 0,06 \cos 2 \frac{2\pi t}{24} + 0,07 \cos 3 \frac{2\pi t}{24} - 0,07 \cos 4 \frac{2\pi t}{24} - \\ - 0,07 \cos 4 \frac{2\pi t}{24} + 0,19 \cos 5 \frac{2\pi t}{24} - 2,05 \sin \frac{2\pi t}{24} - 1,79 \sin 2 \frac{2\pi t}{24} - 0,03 \sin 3 \frac{2\pi t}{24} + \\ + 0,08 \sin 4 \frac{2\pi t}{24} + 0,03 \sin 5 \frac{2\pi t}{24} \quad (111)$$

$$Q(t) = a_0 + a_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + a_2 \sin 2 \frac{2\pi t}{T} + a_3 \sin 3 \frac{2\pi t}{T} + a_4 \sin 4 \frac{2\pi t}{T} + a_5 \sin 5 \frac{2\pi t}{T} + \\ + b_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + b_2 \cos 2 \frac{2\pi t}{T} + b_3 \cos 3 \frac{2\pi t}{T} + b_4 \cos 4 \frac{2\pi t}{T} + b_5 \cos 5 \frac{2\pi t}{T} \quad (112)$$

ვთქვათ გვაქვს ინტერვალი 0-დან 24 სთ-მდე (ე.ი. პერიოდი $T = 24$ სთ). მაშინ:

$$Q(t) = a_0 + a_1 \sin \frac{2\pi t}{24} + a_2 \sin 2 \frac{2\pi t}{24} + a_3 \sin 3 \frac{2\pi t}{24} + a_4 \sin 4 \frac{2\pi t}{24} + a_5 \sin 5 \frac{2\pi t}{24} + \\ + b_1 \cos \frac{2\pi t}{24} + b_2 \cos 2 \frac{2\pi t}{24} + b_3 \cos 3 \frac{2\pi t}{24} + b_4 \cos 4 \frac{2\pi t}{24} + b_5 \cos 5 \frac{2\pi t}{24} \quad (113)$$

გავყოთ ინტერვალი 0-დან 24 სთ-მდე ტოლ k ნაწილად და წარმოვიდგინოთ დანაყოფები აბსცისთა ღერძზე $0, \frac{T}{k}, 2 \frac{T}{k}, \dots, (k-1) \frac{T}{k}, T$ და ცნობილი ორდინატები $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_{k-1}, Q_k = Q_0$. მაშინ ტრაპეციების ფორმულით (ცხადია მიახლოებით) მივიღებთ:

$$a_0 = \frac{1}{T} \frac{T}{k} \left(\frac{1}{2} Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{k-1} + \frac{1}{2} Q_k \right). \quad (114)$$

აღნიშნული პერიოდული ფუნქციის გამო $Q_k = Q_0$ და a_0 -თვის შეიძლება ჩაიწეროს: $ka_0 = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{k-1}$

ანალოგიურად, სხვა ინტეგრალებისათვის მივიღებთ ტრაპეციის ფორმულას:

$$a_m = \frac{2}{T} \left(Q_0 + Q_1 \cos m \frac{T}{k} + Q_2 \cos m \frac{2T}{k} + \dots + Q_{k-1} \cos m \frac{(k-1)T}{k} \right) \quad (115)$$

ანდა

$$\frac{k}{2} a_m = Q_0 + Q_1 \cos m \frac{T}{k} + Q_2 \cos m \frac{2T}{k} + \dots + Q_{k-1} \cos m \frac{(k-1)T}{k} \quad (116)$$

ანალოგიურად მივიღებთ:

$$\frac{k}{2} b_m = Q_0 + Q_1 \sin m \frac{T}{k} + Q_2 \sin m \frac{2T}{k} + \dots + Q_{k-1} \sin m \frac{(k-1)T}{k} \quad (117)$$

ჩავთვალოთ, რომ $k = 12$ და გამოვდივართ 12 ორდინატიდან $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_{11}$.

კორელაცია ალბათობის თეორიის ერთ ერთი ძირითადი ცნებაა. იგი გვიჩვენებს ორ ან რამდენიმე შემთხვევითი სიდიდის კავშირის ზომას. კორელაციის კოეფიციენტი იღებს მნიშვნელობებს “-1”-დან “+1”-მდე. რაც მეტია კორელაციის კოეფიციენტი, მით ძლიერია კავშირი სიდიდეებს შორის. კორელაცია შეიძლება იყოს დადებითი და უარყოფითი (ცხრილი 24, ნახ. 54) [56].

ცხრილი 24

კორელაციის კოეფიციენტის ინტერპრეტაცია

კორელაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობები	ინტერპრეტაცია
$0 < K \leq 0,2$	მეტად სუსტი კორელაცია
$0,2 < K \leq 0,5$	სუსტი კორელაცია
$0,5 < K \leq 0,7$	საშუალო კორელაცია
$0,7 < K \leq 0,9$	ძლიერი კორელაცია
$0,9 < K \leq 1$	მეტად ძლიერი კორელაცია

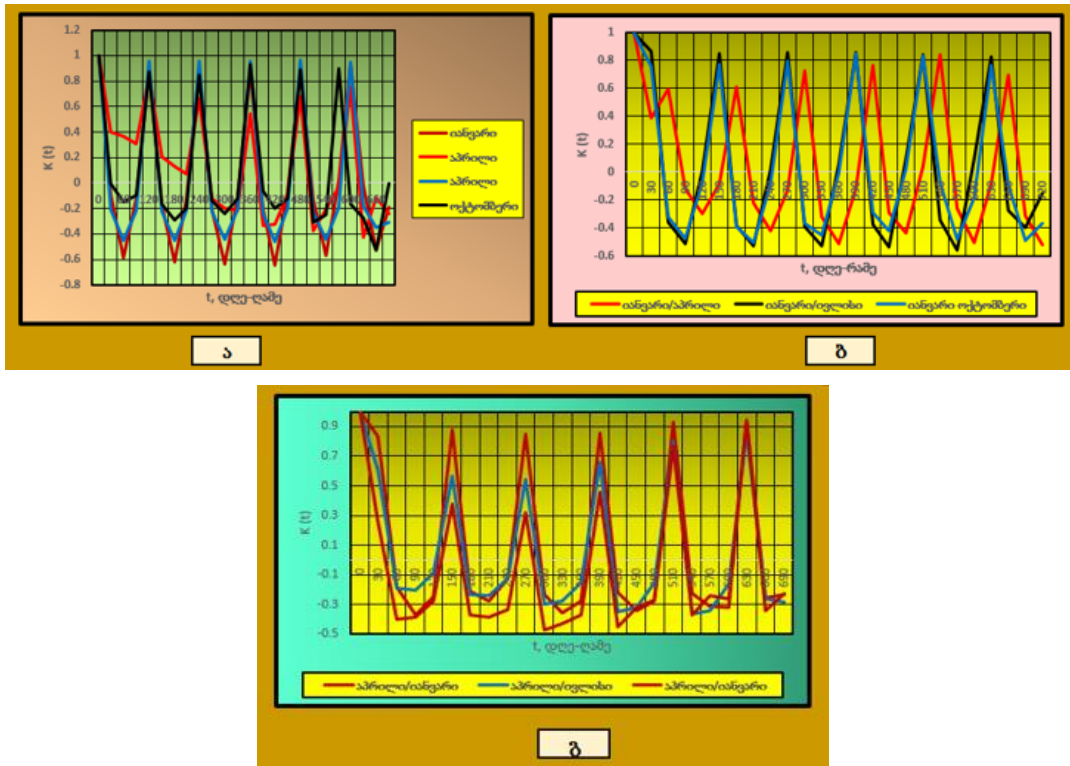
ცხრილებში 25 და 26 მოყვანილია ავტოკორელაციის და მოხმარების დღე-ღამური ურთიერთკორელაციის K_{xy} კოეფიციენტის მნიშვნელობები.

მოხმარების დღე-ღამური ავტოკორელაციის კოეფიციენტი

	იანვარი	აპრილი	ივლისი	ოქტომბერი
K_{xx}	0,6172	0,1274	0,4478	0,2904

მოხმარების დღე-ღამური ურთიერთკორელაციის K_{xy} კოეფიციენტის მნიშვნელობები

	იანვარი	აპრილი	ივლისი	ოქტომბერი
იანვარი		0.5958	0.8645	0.7578
აპრილი	0.5958		0.6068	0.2591
ივლისი	0.8645	0.6068		0.8340
ოქტომბერი	0.7578	0.2591	0.8340	



ნახ. 54. ა) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღეღამური ავტოკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. იანვარი, 2. აპრილი, 3. ივლისი, 4. ოქტომბერი); ბ) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღეღამური ურთიერთკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. იანვარი-აპრილი; 2. იანვარი-ივლისი; 3. იანვარი-ოქტომბერი); გ) ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღეღამური ურთიერთკორელაციის ფუნქციები (2013 წელი, 1. აპრილი-ივლისი; 2. აპრილი-ოქტომბერი; 3. ივლისი - ოქტომბერი)

განვიხილოთ კორელაციის კოეფიციენტის თვისებები. თუ გვაქვს შემთხვევითი სიდიდეები x და y , მაშინ:

1. $|K| \leq 1$.

2. თუ $|K(x,y)| = 1$, მაშინ x და y შემთხვევით სიდიდეებს შორის, გვაქვს წრფივი კავშირი: $c_1x + c_2y + c_3 = 0$, სადაც c_1, c_2, c_3 - კონსტანტებია, თანაც $c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 0$.

3. თუ x და y შემთხვევითი სიდიდეები დამოუკიდებლებია, მაშინ $K(x,y) = 0$.

4. თუ ხდება x და y შემთხვევითი სიდიდეების გარდაქმნა, მაშინ კორელაციის კოეფიციენტის მოდული არ იცვლება: $|K(x,y) = K(\xi,\eta)|$, სადაც $\xi = c_1x + b_1$; $\eta = c_2y + b_2$.

5. კორელაციის კოეფიციენტი სიმეტრიულია, ე.ი. ხდება x და y სიდიდეების ურთიერთშეცვლა.

6. კორელაციის კოეფიციენტი წარმოადგენს უგანზომილებო სიდიდეს. კორელაციის კოეფიციენტის შეცდომის σ_K ნდობის ინტერვალის

აგება ხდება შემდეგი ფორმულით: $\sigma_K = \frac{\sqrt{1-K^2}}{\sqrt{n-2}}$ [57].

შემდეგ, კორელაციის კოეფიციენტის შეცდომა მრავლდება t პარამეტრზე, რომელიც დამოკიდებულია დამაჯერებელ P ალბათობაზე (ალბათობისათვის 95%, $t = 2$), რომ განისაზღვროს ზღვრული შეცდომა. ბოლოს აიგება დამაჯერებლობის ინტერვალი $r \pm \sigma_r$ და შემოწმება ხდება თუ არის ნულოვანი მნიშვნელობა ამ ინტერვალში.

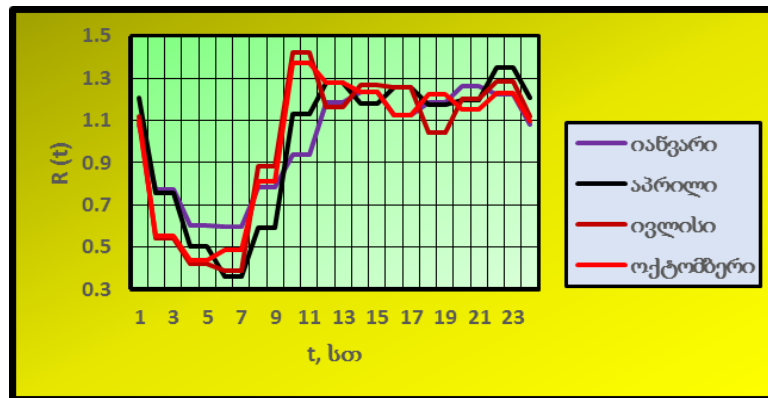
მსხვილი ქალაქები ხასიათდება ბუნებრივი გაზის მოხმარების უთანაბრობით წელიწადის დროების (ზამთარი, ზაფხული), თვეების, კვირების, დღე-ღამეებისა და საათების მიხედვითაც. განსაკუთრებით დიდია გაზის სეზონური მოხმარების უთანაბრობა, რომელიც

დაკავშირებულია გათბობის სეზონთან. ცხრილში 27 და ნახ. 55-ზე ნაჩვენებია მსხვილი ქალაქების გაზის მოხმარების გრაფიკები იმ შემთხვევისათვის, როდესაც თვიური უთანაბრობის კოეფიციენტი იცვლება შემდეგნაირად:

ცხრილი 27

გაზის მოხმარების უთანაბრობის კოეფიციენტი

თვეები	უთანაბრობის კოეფიციენტი, K		
	მოსკოვი	კიევი	თბილისი (2009 წ)
I	1,22	1,29	2,05
II	1,31	1,28	1,90
III	1,21	1,18	1,63
IV	0,99	0,97	0,92
V	0,75	0,82	0,59
VI	0,70	0,76	0,40
VII	0,69	0,74	0,36
VIII	0,74	0,77	0,33
IX	0,82	0,79	0,39
X	1,0	0,95	0,59
XI	1,22	1,15	1,15



ნახ. 55. შპს "ყაზტრანსგაზ-თბილისის" 2013 წლის უთანაბრობის კოეფიციენტის დინამიკა, თვის ერთ-ერთი მახასიათებელი დღისათვის (15 რიცხვი): 1. იანვარი; 2. აპრილი; 3. ივლისი; 4. ოქტომბერი

გრაფიკის მიხედვით ჩანს, რომ უთანაბრობის კოეფიციენტის დიაპაზონი გაცილებით დიდია თბილისისათვის, ვიდრე მოსკოვისა და კიევისათვის. ამ გარემოების გამო მოსკოვისა და კიევის უთანაბრობის

კოეფიციენტის დიაპაზონი გამოწვეულია მათი შედარებით მაღალი საწარმოო პოტენციალით.

მოსახლეობისათვის გარდა წელიწადის მიხედვით გაზის მოხმარების უთანაბრობისა, შეიმჩნევა კვირის დღეების უთანაბრობაც. ორშაბათიდან ხუთშაბათამდე მოხმარება თანაბარია, ხოლო პარასკევიდან გაზის მოხმარება იზრდება და მაქსიმუმს აღწევს შაბათობით. ზაფხულის თვეებში, კვირაობით, კვირის განმავლობაში გვაქვს უმცირესი გაზის ხარჯი, ხოლო ზამთარში – კვირის პირველი ოთხი დღის შესაბამისად. სადღესასწაულო დღეებში შეიმჩნევა მაქსიმალური გაზის ხარჯი (მაგალითად 31 დეკემბარი).

სეზონური მოხმარების უთანაბრობის გრაფიკს უწოდებენ უთანაბრობის მოხმარებას **R**, რომელიც მიიღება თვიური გაზის ხარჯის შეფარდებით საშუალოთვიური გაზის ხარჯთან (სიმძლავრის მახასიათებელი). **R**-ის მაქსიმალური უთანაბრობის კოეფიციენტის დიაპაზონი **1,2 ÷ 1,3**-ია.

დღეღამური უთანაბრობის კოეფიციენტი დაახლოებით (**1,2 ÷ 1,25**)-ის ტოლია. ცხრილში 28 მოყვანილია 2013 წლის საათური უთანაბრობის კოეფიციენტის დინამიკა თვის ერთ-ერთი მახასიათებელი დღისათვის (15 რიცხვი).

ცხრილში 29 და ნახ. 56-ზე კი ნაჩვენებია ბუნებრივი გაზის **R** უთანაბრობის კოეფიციენტი სხვადასხვა მსხვილი ქალაქისათვის (1. მოსკოვი; 2. კიევი; 3. თბილისი 2009 წ; 4. თბილისი - 2013 წ).

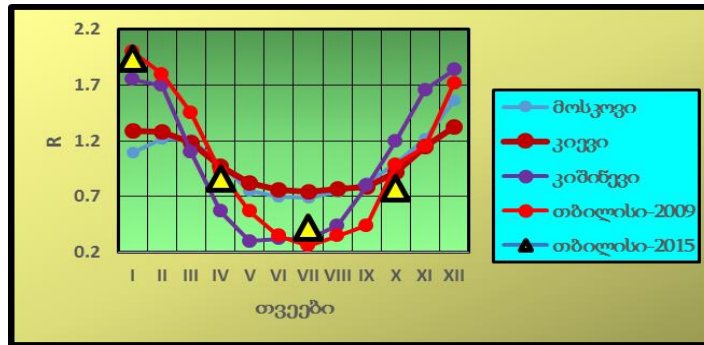
2013 წლის საათური უთანაბრობის კოეფიციენტის დინამიკა თვის ერთ-ერთი მახასიათებელი დღისათვის (15 რიცხვი)

	იანვარი	აპრილი	ივლისი	ოქტომბერი
1	1.0715	1.0877	1.1323	1.0857
2	0.7507	0.6536	0.4835	0.5642
3	0.7507	0.6536	0.483	0.5642
4	0.6185	0.5426	0.3787	0.4839
5	0.6185	0.5426	0.3787	0.4839
6	0.5897	0.4982	0.3541	0.4499
7	0.5897	0.4982	0.3542	0.4499
8	0.8228	0.7871	0.8052	0.8117
9	0.8228	0.7871	0.8052	0.8118
10	1.0288	1.2344	1.4493	1.3091
11	1.0288	1.2484	1.4493	1.3091
12	1.1167	1.2244	1.1553	1.2137
13	1.1109	1.2244	1.15535	1.2173
14	1.2203	1.1843	1.3243	1.2478
15	1.2203	1.1843	1.3242	1.2478
16	1.1737	1.1226	1.2584	1.1891
17	1.1737	1.1226	1.2585	1.1891
18	1.1697	1.1291	1.2090	1.1576
19	1.1697	1.1291	1.2091	1.1576
20	1.2282	1.2300	1.2268	1.2212
21	1.2284	1.2296	1.2268	1.2212
22	1.2121	1.2994	1.2223	1.2641
23	1.2121	1.2994	1.2229	1.2641
24	1.0715	1.0877	1.1324	1.0860

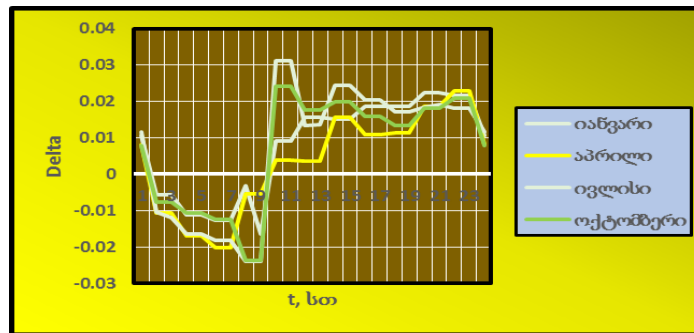
ბუნებრივი გაზის **R** უთანაბრობის კოეფიციენტი სხვადასხვა მსხვილი ქალაქისათვის (1. მოსკოვი; 2. კიევი; 3. თბილისი 2009 წ.; 4. თბილისი – 2013 წ.)

	მოსკოვი	კიევი	კიშინოვი	თბილისი	
				2009	2013
I	1.22	1.29	1,75	2.05	1.9388
II	1.31	1.28	1,7	1.9	
III	1.21	1.18	1,1	1.63	
IV	0.99	0.97	0,57	0.92	0.8601
V	0.75	0.82	0,3	0.59	
VI	0.7	0.76	0,32	0.4	
VII	0.69	0.74	0,32	0.36	0.4224
VIII	0.74	0.77	0,44	0.35	
IX	0.82	0.79	0,8	0.39	
X	1	0.95	1,2	0.59	0.4224
XI	1.22	1.15	1,66	1.15	
XII	1.36	1.33	1,84	1.72	

ნახ. 57-ზე ნაჩვენებია ფარდობითი ცდომილება ემპირიულ და ანალიზურ მწკრივებს შორის: 1. იანვარი; 2. აპრილი; 3. ივლისი; 4. ოქტომბერი



ნახ. 56. ბუნებრივი გაზის R უთანაბრობის კოეფიციენტი სხვადასხვა მსხვილი ქალაქისათვის (1. მოსკოვი; 2. კიევი; 3. კიშინოვი; 4. თბილისი 2009 წ; 5. თბილისი – 2013 წ).



ნახ. 57. ფარდობითი ცდომილება ემპირიულ და ანალიზურ მწკრივებს შორის: 1. იანვარი; 2. აპრილი; 3. ივლისი; 4. ოქტომბერი

მაქსიმალური ცდომილება ოთხივე მწკრივისათვის (იანვარი, აპრილი, ივლისი, ოქტომბერი) ტოლია 0.03%-ის.

4.3. გაზგამანაწილებელ ქსელში დინამიკური პროცესები და წნევის უთანაბრობის რეჟიმები

განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის ქსელში წნევის რეჟიმების განმსაზღვრელი ძირითადი ფაქტორები და პარამეტრები.

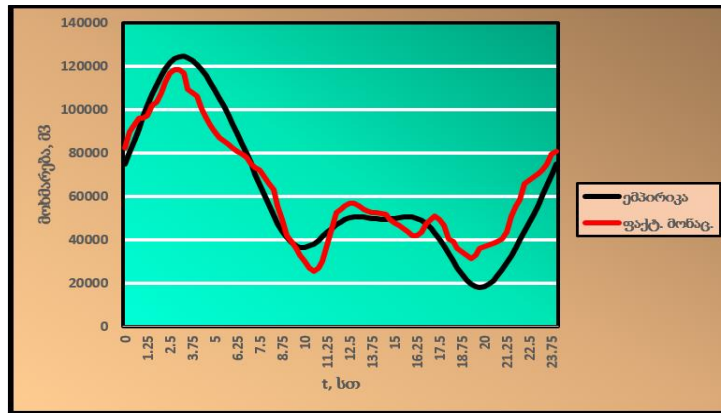
გაზგამანაწილებელი სისტემები მუშაობენ უწყვეტად წლიურად, თუმცა ბუნებრივი გაზის მოხმარება ხდება ცვლადი რეჟიმებით. ბუნებრივი გაზის უთანაბრო მაქსიმალური მოხმარება ხასიათდება მცირე საყოფაცხოვრო მომხმარებლებისათვის. როგორც წესი, გაზის ხარჯის საყოფაცხოვრო რხევა, გარკვეულ სტოქასტიკურ კანონზომიერებს წარმოადგენს.

განვიხილოთ ქალაქებში და დასახლებულ პუნქტებში კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ბუნებრივი გაზის ხარჯის რხევის სიხშირეების ანალიზი, დაწყებული დღელამურიდან წელიწადის სხვადასხვა დროში: წელი, თვე, კვირა, დღე. მსგავსი საათობრივი რხევები ადასტურებენ სრული განმეორებადობის დღელამური გრაფიკების არარსებობას ერთსა და იმავე კვირის სხვადასხვა ჩვეულებრივი დღეებისათვის და მნიშვნელოვანია გაზომვარაგების უთანობრობის სეზონური ხასიათი, ან წინა სადღესასწაულო დღეების ფაქტორი. მოხმარების ჩვეულებრივი დღელამური გრაფიკი ხასიათდება დილის და საღამოს პიკებით, თანაც ღამე ბუნებრივი გაზის მოხმარება ათჯერ და მეტჯერ მცირდება. გაზის ხარჯის უთანაბრობას განაპირობებს დიდი რაოდენობით ფაქტორები, რომელთა შორის უმნიშვნელოვანესია შემდეგი: კლიმატური პირობები, მოსახლეობის ცხოვრების წესი, საწარმოების და დაწესებულების მუშაობის პერიოდი, მომხმარებლების სხვადასხვა კატეგორიების გაზიფიკაციის ხარისხი და ა.შ [59,60].

ბუნებრივი გაზის მოხმარების უთანაბრობა განსაზღვრავს ქალაქის ქსელების წნევის რეჟიმებს. გაზომვარაგების დღე-ღამის სხვადასხვა პერიოდებისათვის, განსხვავებით საშუალო დღელამური სიდიდისაგან, იქმნება პერმანენტული პერიოდული გადახრები, რაც იწვევს გაზის მოწყობილობის და ავტომატური რეგულირების ხელსაწყოების მუშაობის რეჟიმების ცვლილებას. კომუნალური და საყოფაცხოვრებო მომხმარებლების გაზომვარაგების საშუალო დღელამური ხასიათი საკმაოდ

დეტერმინისტულია და იგი წარმოადგენს როგორც უწყვეტ პერიოდულ ფუნქციას პეროდით 24 სთ და წარმოადგენს ფურიეს მწკრივს (ნახ. 58). ნატურული მონაცემების შესაბამისად ქ. თბილისის გაზგამანაწილებელი ქსელისათვის მიღებულია ფურიეს მწკრივების რიცხვითი კოეფიციენტების მნიშვნელობები, საშუალო დღეღამური გაზომომარაგებისათვის:

$$\begin{aligned}
 Q(t) = & 30520,4 - 8560,6 \cos \frac{2\pi}{24} + 446,6 \cos 2 \frac{2\pi}{24} + 521,1 \cos 3 \frac{2\pi}{24} - 533,4 \cos 4 \frac{2\pi}{24} - \\
 & - 547,8 \cos 4 \frac{2\pi}{24} + 1414,4 \cos 5 \frac{2\pi}{24} - 15260,2 \sin \frac{2\pi}{24} - 13324,8 \sin 2 \frac{2\pi}{24} - 223,3 \sin 3 \frac{2\pi}{24} + \\
 & + 595,5 \sin 4 \frac{2\pi}{24} + 247,1 \sin 5 \frac{2\pi}{24}
 \end{aligned} \tag{118}$$



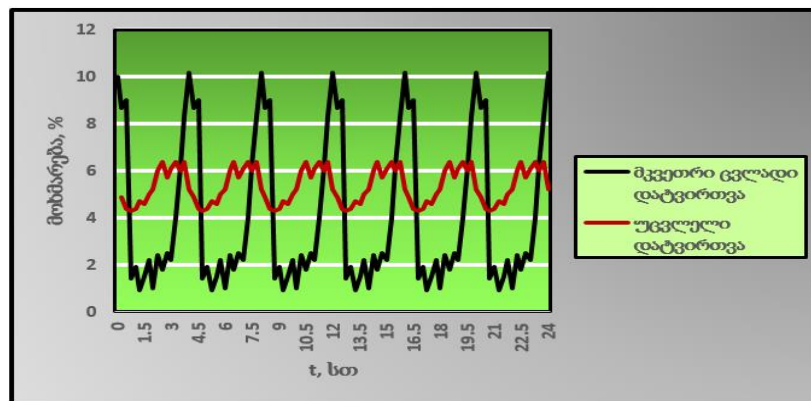
ნახ. 58. გაზომომარაგების საშუალო დღე-ღამური გრაფიკი, საყოფაცხოვრებო დატვირთვით: 1. გრაფიკი აგებული (1) ფორმულით; 2. გრაფიკი აგებული შპს “ყაზტრასგაზ-თბილისის” მონაცემებით

ფურიეს ჰარმონიული მწკრივის ყველა შემადგენელი ზემოქმედებას ახდენს წნევის რეგულირებადი პარამეტრზე. ჰარმონიული შემადგენლები საკმაოდ კარგად აპროქსიმირდება საშუალოდღეღამური მოხმარებით [61]. მაღალი რიგის ჰარმონიული შემადგენლები ითრგუნება წნევის პროცესში და ამ სიდიდის მნიშვნელოვან რეგულირებას გავლენა არ გააჩნია.

როგორც ცნობილია, გაზგამანაწილებელ სისტემებში წნევის რეჟიმების მართვის საკითხები საჭიროებს მნიშვნელოვნად ეფექტურ

გადაწყვეტას მართვის ძირითად პროცესში; კერძოდ გამოიყენება ბუნებრივი გაზის დაუმყარებელი მოძრაობის ანალიზი გაზგამანაწილებელ გაზსადენებში. რადგანაც ქალაქების გაზგამანაწილებელი სისტემების წნევა შედგება გაზის რამდენიმე საფეხურისაგან, ამიტომ საათური უთანაბრობა და ცვლადი წნევის არსებობა განისაზღვრება გაზგამანაწილებელი პუნქტის შესასვლელში [62].

ქალაქის მაღალი და საშუალო წნევის ქსელის ხარჯების ცვლილების ხასიათის ანალიზი გვიჩვენებს დატვირთვის გლუვი ცვლილების არსებობას, დღელამური განმეორებადი პერიოდით და ქვედა ზღვრის კლებადი სინუსოიდების სპექტრით, ექვსი რხევითი ციკლით დღელამეში. აგრეთვე მიიღება პიკური რხევები განმეორადი პერიოდით არანაკლებ 3-5 წუთით, კერძოდ, პროცესი აღიწერება ნახტომისებრი რხევით ერთეულოვანი ფუნქციით. ასეთი ხასიათის ცვლილება განისაზღვრება მრეწველობით, რომელიც შეიძლება გამოიყოფოს სამ ძირითად ჯგუფში: საწარმოები მუდმივი გაზმომარაგებით; საწარმოები, რომელთა გაზმომარაგება იცვლება მნიშვნელოვან ზღვრებში და მკვეთრად, დროის ინტერვალებით მხოლოდ რამდენიმე წუთის განმავლობაში; საწარმოები, რომელთა გაზმომარაგება იცვლება მნიშვნელოვან ზღვრებში და მკვეთრად, დროის ინტერვალებით რამდენიმე საათით (ნახ. 59).



ნახ. 59. საწარმოებების საშუალო დღელამური გაზმომარაგების გრაფიკი: 1. მკვეთრი ცვლადი დატვირთვა; 2. უცვლელი დატვირთვა.

ბუნებრივი გაზის ნაკადის მოძრაობის ამპლიტუდასა და სიხშირეზე დაკვირვების შედეგად, შეიძლება გამოვყოთ სამი ტიპი (ცხრილი 30). პირველი - ხასიათდება წნევის რხევა, რომელსაც გააჩნია მცირე ამპლიტუდა და შედარებით მაღალი სიხშირე. ასეთი რხევებისას წარმოიქმნება უწყვეტად ცვლადი ბუნებრივი გაზის ხარჯი. მეორე ტიპი მიიღება რხევის დიდი ამპლიტუდით და მცირე სიხშირით. იგი ხასიათდება ძირითადი ხარჯის ცვლილებით, რომელიც განაპირობებს ბუნებრივი გაზის მოხმარების დღეღამურ უთანაბრობას. მესამე ტიპი ახასიათებს წნევის დიდ ცვლილებს, ბუნებრივი გაზის მოწოდების შეჩერებით, ან პირიქით: წნევა ქსელში მიიღება დაუშვებელი სიდიდით. წნევის ასეთი ცვლილება მიიღება ავარიული სიტუაციებისას.

აღნიშნული ბუნებრივი გაზის წნევის ჯამური რხევა მიიღება ცალკეული რხევების ზედდებით, რაც განაპირობებს ფურიეს მწკრივის რთულ არაჰარმონიულ შედეგს. მეორე ტიპი განაპირობებს ძირითადად, ხოლო პირველი - მეორე ჰარმონიკას. ბუნებრივი გაზის მოხმარების აღნიშნული ცვლილებები იწვევენ წნევის რხევას და ბუნებრივი გაზის ქსელში განსაზღვრავენ არასტაციონარულ პროცესებს (ცხრილი 31).

ცხრილი 30

ბუნებრივი გაზის წნევის ცვლილების ტიპები

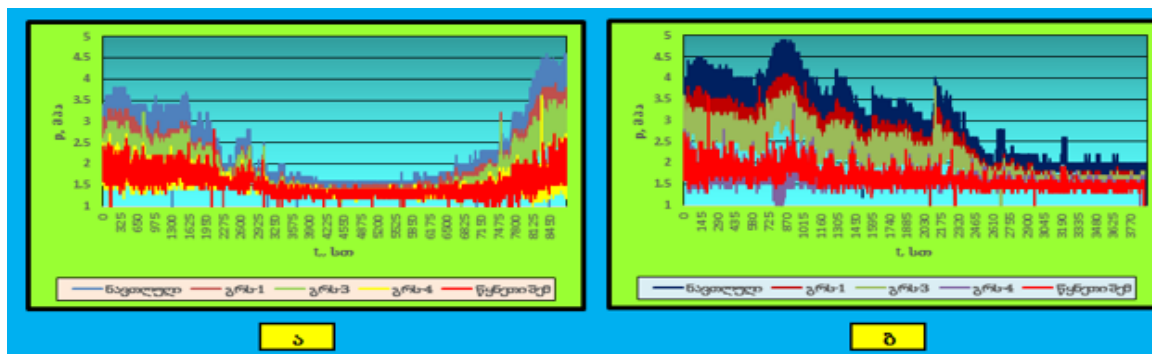
	ცვლილების სახე	მოვლენის მიზეზები	ცვლილების ხასიათი
1	სწრაფად დროში ცვლადი, ძირითადი ხარჯის ცვლილება	უწყვეტი ცვლადი ხარჯი	არაჰარმონიული პერიოდული რხევები
2	ნელა დროში ცვლადი, ძირითადი ხარჯის ცვლილება	მოხმარების დღეღამური მოხმარება	არაჰარმონიული პერიოდული რხევები
3	სწრაფად ცვლადი დიდი ცვლილებები	ავარიული სიტუაციები	შემთხვევითი მოვლენები

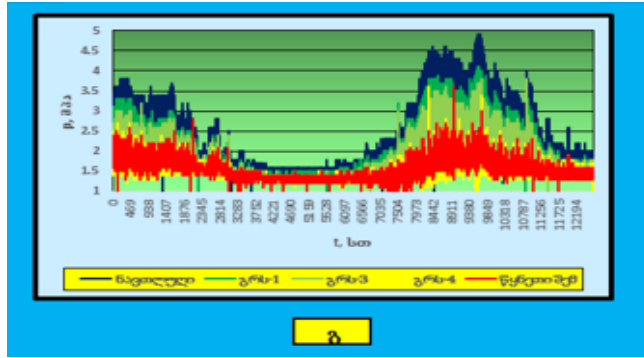
გაზგამანაწილებელ ქსელში ბუნებრივი გაზის წნევის ცვლილების მახასიათებლები

დაბალი წნევა		საშუალო წნევა	
ამპლიტუდა, კა	სიხშირე, ჰც	ამპლიტუდა, მკა	სიხშირე, ჰც
150	$(1 \div 10) \cdot 10^{-3}$	0,035	$(1 \div 10) \cdot 10^{-4}$
1850	$(3 \div 4) \cdot 10^{-2}$	0,28	$(3 \div 4) \cdot 10^{-2}$

4.4. მარეგულირებელ ნაგებობებში წნევის დინამიკის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა ემპირიული მონაცემების მიხედვით

განვიხილოთ შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” მარეგულირებელ ნაგებობებში წნევის დინამიკის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა ემპირიული მონაცემების მიხედვით. ნახ. 63-ზე ნაჩვენებია წნევის დინამიკა ქ. თბილისის მარეგულირებელ ნაგებობებში 2013 წლის (წნევის დინამიკის სრული ანსამბლი) საათების მიხედვით: ნავთლულის გაზმარეგულირებელი სადგური; გაზმარეგულირებელი სადგური №1; გაზმარეგულირებელი სადგური №3; გაზმარეგულირებელი სადგური №4; გაზმარეგულირებელი სადგური წყნეთის შესასვლელში. ნახ. 60-ზე აგრეთვე ნაჩვენებია მსგავსი წნევის დინამიკა ქ. თბილისის მარეგულირებელ ნაგებობებში 2014 წლის ნახევარი წლისათვის. ნავთლულის გაზმარეგულირებელი სადგურის წნევის მონაცემები - პრაქტიკულად იდენტურია გლდანის და გაჩიანის გაზმარეგულირებელი სადგურების წნევის მონაცემების.

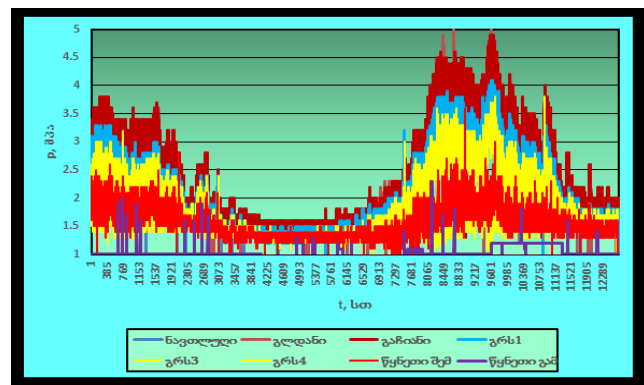




ნახ. 60. წნევის დინამიკა ქ. თბილისის მარეგულირებელ ნაგებობებში 2013 წლის (სრული ანსამბლი): 1. ნავთლულის გაზმარეგულირებელი სადგური (გლდანი და გაჩიანი იგივეა); 2. გაზმარეგულირებელი სადგური №1; 3. გაზმარეგულირებელი სადგური №3; 4. გაზმარეგულირებელი სადგური №4; 5. გაზმარეგულირებელი სადგური წყნეთის შესასვლელში. ა) 2013 წლის (სრული ანსამბლი); ბ) 2014 წლის ნახევარი წლისათვის (სრული ანსამბლი); გ) 2013 წლის და 2014 წლის პირველი ნახევარი წლის (იანვარი-ივნისი)

მაგალითისათვის, ნახ. 61-ზე ნაჩვენებია ქ. თბილისის ყველა გაზგამანაწილებელი სადგურის წნევის სრული ანსამბლი.

განვიხილოთ წნევის დინამიკის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა ემპირიული მონაცემების მიხედვით მაგალითზე: ნავთლულის გაზმარეგულირებელის სადგურის წნევისათვის სრული ანსამბლი 2013 წლის და 2014 წლის ნახევარი წლისათვის.



ნახ. 61. ქ.თბილისის ყველა გაზგამანაწილებელი სადგურის წნევის სრული ანსამბლი.

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (119)$$

ლაგრანჟის მრავალწევრების თანახმად, აღნიშნული მრავალწევრები გაანგარიშდება შემდეგნაირად:

$$L(x) = \sum_{i=0}^n y_i \varphi_i(x), \quad (120)$$

სადაც ბაზისური პოლინომები წარმოადგენენ შემდეგ ფორმულას:

$$\varphi_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} = \frac{x - x_0}{x_i - x_0} \dots \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \dots \frac{x - x_n}{x_i - x_n}. \quad (121)$$

$\varphi_i(x)$ ფუნქციებს გააჩნიათ შემდეგი თვისებები:

* მრავალწევრებს გააჩნიათ n -ის ხარისხი.

* $\varphi_i(x_i) = 1$.

* $\varphi_i(x_j) = 0$, როდესაც $j \neq i$.

აქედან ჩანს, რომ $L(x)$ წარმოადგენს $\varphi_i(x)$ ფუნქციების წრფივ კომბინაციას და გააჩნია არა უმეტეს n -ის ხარისხი, და $L(x_j) = y_j$.

ლაგრანჟის პოლინომები გამოიყენება ინტერპოლაციისათვის. კერძოდ, თუ $f(x)$ ფუნქციისათვის ცნობილია გარკვეული წერტილების $y_i = f(x_i)$ -ის მნიშვნელობები, მაშინ შეიძლება მოვახდინოთ ფუნქციის ინტერპოლირება შემდეგნაირად:

$$f(x) \approx \sum_{i=0}^n f(x_i) \varphi_i(x). \quad (122)$$

სრული ანსამბლი მოყვანია ნახ. 65ა-ზე. ლაგრანჟის პოლინომის ასაგებად განვიხილოთ წნევის მწკრივის პირველი ნაწილი, რომლის ალბათური მახასიათებლების დასადგენად საკმარისია 400 ემპირიული მონაცემი. შევარჩიოთ საკვანძო წერტილები და შევიტანოთ ცხრილში 32, 50 სთ-ის ბიჯით.

საკვანძო წერტილების მნიშვნელობები ლაგრანჟის პოლინომის კოეფიციენტის დასადგენად

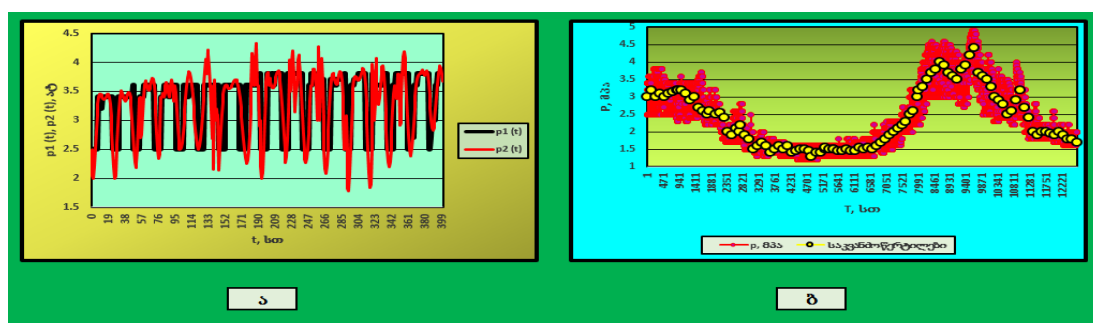
t, სთ	p, ატ
0	2,5
50	2,8
100	2,1
150	2,5
200	3,8
250	3,6
300	3,7
350	3,8
400	2,9

პოლინომს გააჩნია შემდეგი სახე:

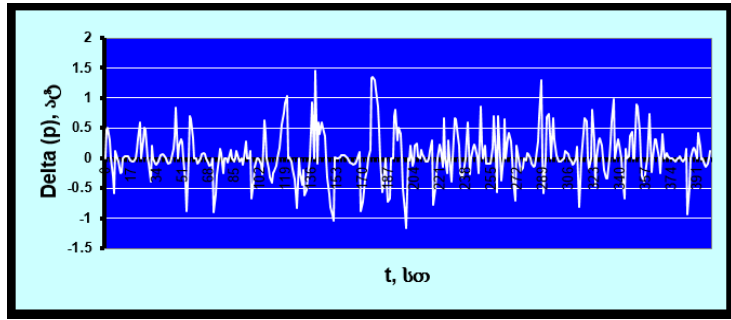
$$\varphi_i(t) = \prod_{j=0, j \neq i}^9 \frac{t-t_j}{t_i-t_j} = \frac{t-t_0}{t_i-t_0} \dots \frac{t-t_n}{t_i-t_n} \quad (127)$$

ნახ. 62ა-ზე ნაჩვენებია წნევის მწკრივი (წითელი მრუდი) და ტრენდი - ლაგრანჟის პოლინომი (შავი ფერი). ანალოგიურად, წნევის მწკრივი განიხილება მონაკვეთებად და მიიღება სრული ტრენდი ლაგრანჟის პოლინომით (ნახ.62ბ).

გამოვყოთ ძირითადი ფლუქტუაციები, რისთვისაც გამოვაკლოთ ემპირიულ მონაცემების და ტრენდის მნიშვნელობები (ნახ. 63).

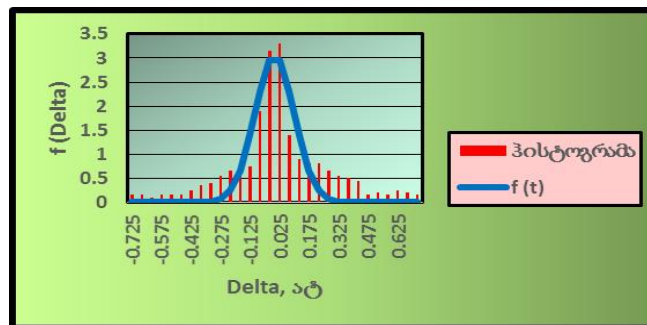


ნახ. 62. ა) ნავთლულის გაზმარეგულირებელის სადგურის წნევის დინამიკა 2013 წლის 400 საათისათვის: 1. ემპირიული მონაცემები; 2. ტრენდის დადგენა ლაგრანჟის პოლინომების საშუალებით; ბ) შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” წნევის დინამიკა ნავთლულის მარეგულირებელ ნაგებობაში 2013 წლის და 2014 წლის პირველი ნახევარი წლის (იანვარი-ივნისი) სათების მიხედვით: 1. ემპირიული მონაცემები; 2. ტრენდი.



ნახ. 63. სხვაობა Δp (აგ) ემპირიულ მონაცემებს და ტრენდს შორის

ნახ. 63-ზე ნაჩვენებია ტიპური “თეთრი ხმაური”, რისთვისაც დავადგინოთ ალბათური მახასიათებლები. განვსაზღვროთ ინტერვალის რაოდენობა ფორმულით $k = \log_2 N + 1 = 3,3 \lg N + 1$. მივიღებთ $k = 14$, $m = 0.0425$, $\sigma = 0,1$. ჩავატაროთ აპროქსიმაცია ალბათობის ნორმალური განაწილების სიმკვრივის კანონით. გვექნება $f(\Delta) = 3,9904e^{-\frac{\Delta^2}{0,02}}$. ნახ. 64-ზე ნაჩვენებია ჰისტოგრამა და ალბათობის ნორმალური განაწილების კანონის სიმკვრივის აპროქსიმაცია.



ნახ. 64. ჰისტოგრამა და ალბათობის ნორმალური განაწილების კანონის სიმკვრივის აპროქსიმაცია

მიღებული შედეგი დამაკმაყოფილებელია და გვაქვს აშკარა “თეთრი ხმაური”.

თავი 5. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელში მომსახურების ხარისხი, რისკის ანალიზი

5.1. რისკის მაჩვენებლების დადგენა ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელ ქსელებში

განვითარებულ ინდუსტრიული ქვეყნების ბუნებრივი გაზის სექტორის უსაფრთხოება დამოკიდებულია უწყვეტ და კოორდინირებულ მუშაობაზე და ე.წ. კრიტიკულ ინფრასტრუქტურაზე. კრიტიკული ინფრასტრუქტურა შეიცავს ფიზიკურ რესურსებს, მომსახურეობას, საინფორმაციო ტექნოლოგიების საშუალებებს, ქსელებს და ინფრასტრუქტურის ობიექტებს, რომლებიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ჯანმრთელობაზე, უსაფრთხოებაზე, ეკონომიკურ და სოციალურ კეთილდღეობაზე.

განვითარებული ქვეყნებისათვის მნიშვნელოვანია შეუფერხებლად განხორციელდეს ელექტროენერჯის წარმოება, გადაცემა და განაწილება; ბუნებრივი გაზის წარმოება, ტრანსპორტირება და განაწილება; ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების წარმოება, ტრანსპორტირება და განაწილება; ტელეკომუნიკაცია; წყალმომარეგება (სასმელი წყალი, ნარჩენების წყალარინება, ზედაპირული წყლების ამოსვლა) და ა.შ.

ბოლო ათწლეულში, განვითარების ამ სტრატეგიის მნიშვნელობამ და აქტუალობამ განაპირობა გაზმომარაგების უწყვეტი მომსახურეობა, რაც იწვევს რთულ და ურთიერთდამოკიდებულ მიზეზებს, კერძოდ ინფრასტრუქტურის განვითარებისას ჩნდება ურთიერთდამოკიდებული ეკონომიკური, სოციალური, პოლიტიკური და ტექნოლოგიური საკითხები.

თუ მომსახურების ხარისხი უმჯობესია, მაშინ გარკვეული ხარვეზები დაკავშირებულია ახალ გაუთვალისწინებელ ხარჯებთან. ტექნიკურმა გაუმართაობამ, ავარიებმა, სტიქიურმა მოვლენებმა და ა.შ., შესაძლოა გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი უარყოფითი ეფექტები. ნებისმიერი ქვეყნის

ხელისუფლება ცდილობს შეისწავლოს და დაგეგმოს პრევენციული ზომები, რათა შეამციროს ომის, სტიქიური უბედურების, ვანდალიზმის ან საბოტაჟის რისკები. ასეთი პრევენცია განისაზღვრება დაცვის კონტროლის კრიტიკული ინფრასტრუქტურით (CIP - Critical Infrastructure Protection).

ამ პრობლემების შესწავლა და კვლევა დაიწყო 1996 წლიდან აშშ-ში. ტრაგიკული მოვლენების გამო (განსაკუთრებით 2001 წლის 11 სექტემბრის ტერაქტების შემდეგ), როდესაც მნიშვნელოვნად გაიზარდა ინტერესი და 2006 წელს დამტკიცდა ეროვნული ინფრასტრუქტურის დაცვის გეგმა (NIPP – National Infrastructure Protection Plan) [63-66].

ევროკავშირმაც განავითარა აღნიშნული თემა: ჩატარდა სამეცნიერო და ტექნოლოგიური გამოკვლევები (საკანონმდებლო და მარეგულირებულ დონეზე), კერძოდ შეიქმნა ევროპული პროგრამა კრიტიკული ინფრასტრუქტურის დაცვის შესახებ (ERCIP – European Program on Critical Infrastructure Protection). 2008 წლის 8 დეკემბერს ევროკავშირის საბჭომ მიიღო დირექტივა 2008/114/EC - ევროპის კრიტიკული ინფრასტრუქტურის იდენტიფიცირების და შეფასების აუცილებლობისა და მათი დაცვის გაუმჯობესების შესახებ.

ამასთან დაკავშირებით, „უბედური შემთხვევების რისკის ანალიზი მიზნად ისახავს კრიტიკული ინფრასტრუქტურის ავარიის ან დაზიანების კვლევის“ დოკუმენტი, მიზნად ისახავს ინფრასტრუქტურის ავარიის ან დაზიანების კვლევას. აგრეთვე, ჩნდება ახალი ტექნოლოგიები და ახალი რისკები [67-72].

აღნიშნული პრობლემა სწავლობს ინფრასტრუქტურის CO₂-ის ემისიებს ბუნებრივი გაზის განაწილების ქსელებში და შენახვის პროცესში [73-75].

ევროპის ენერგეტიკულ ბაზარზე ელექტროენერჯის წარმოების, გათბობის და საოჯახო გამოყენების მნიშვნელოვან საშუალებას

წარმოადგენს ბუნებრივი გაზი. ევროპაში მოხმარებული ბუნებრივი გაზის 50%-ზე მეტი იმპორტირებულია (სამი ძირითადი ქვეყანა: რუსეთი, ნორვეგია და ალჟირი). სავარაოდ, 2020 წელს ბუნებრივი გაზის იმპორტი გაიზრდება 70%-მდე. მნიშვნელოვან როლს თამაშობს წყაროების დივერსიფიკაცია, მიწოდების საიმედოობა, რაც განსაზღვრულია ევროპული ენერგეტიკული დირექტივის (92004/67/CE) შესაბამისად [58,76,77].

ბუნებრივი გაზის მიწოდება ქსელში, ხდება ორნაირად: ტრადიციული ხერხით და გათხევადებული გაზით (LNG - Liquefied Natural Gas). აღსანიშნავია, რომ მცურავი ან ოშფორული გათხევადებული გაზის ტერმინალებისათვის, საჭიროა ახალი რისკების გათვალისწინება.

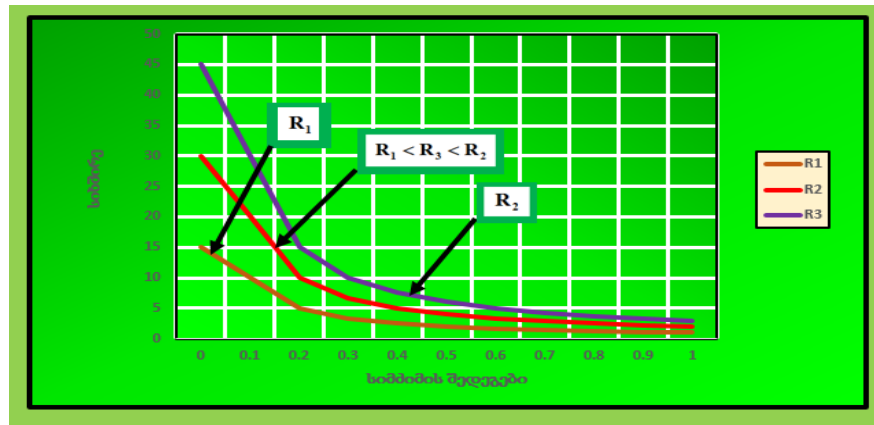
მეორე მიშვნელოვანი მომენტია ინფრასტრუქტურის მიერ მიღებული ნახშირბადის ჩაჭერა შენახვის პროცესში. ასეთი ტიპის ტექნოლოგია მნიშვნელოვანია, კლიმატის გლობალური ცვლილების გამო, კიოტოს ოქმის შესაბამისად. საერთაშორისო ენერგეტიკულმა ასოციაციამ (IEA - International Energy Agency) 2008 წელს გამოაქვეყნა ანალიზი - ენერჯის ტექნოლოგიის პერსპექტივების პროექტი (ETP – Energy Technology Perspectives), რომლის თანახმად ენერგეტიკულ სექტორში CO₂-ის ემისიების გაზრდა 2005-დან 2050 წლამდე 130%-ით მოხდება. წიაღისეული საწვავის ფართომასშტაბიანი გამოყენება სათბური გაზისათვის (GHG – Greenhouse Gas), დაკავშირებულია მნიშვნელოვან რისკებთან [78-81].

რისკი ხშირად ასოცირდება დადებითი ან უარყოფითი ობიექტური შედეგების ხდომილებასთან ან პირობებთან. კლასიკური მათემატიკური რისკი წარმოადგენს შემდეგნაირად: რისკი = ალბათობის ხდომილება (ან სიხშირე) × შედეგების სიმძიმე (ან ზემოქმედება). იმ შემთხვევაში, თუ კონკრეტული უარყოფითი შედეგი ცნობილია, მაშინ რისკი შეიძლება წარმოვადგინოთ ალბათობით დროის გარკვეული პერიოდში, რომელიც

ფაქტორების მდგომარეობის გაუარესების მთელ რიგზეა დამოკიდებული (მაგალითად კოროზია და ა.შ.) [76-84,88].

მტყუნებების ალბათობის საბაზისო შეფასებისათვის, შესაძლოა ანალოგიური სისტემების ქსელების გამოყენება. აგრეთვე, ცნობილია ხელმისაწვდომი მტყუნების მონაცემების საჯარო ჩანაწერების ინციდენტების ანგარიშები. შედეგების ასეთი ავარიების შეფასება ეფუძნება ისტორიულ და ნატურულ მონაცემებს. მსგავსი მონაცემების გაერთმთლიანობით (კრებსითი მონაცემებით), რისკის ანალიზის თვალსაზრისით, ხდება რისკის რაოდენობრივი შეფასების განსაზღვრა, თუმცა მხოლოდ ალბათობის გარკვეული უზრუნველყოფით [85-87].

რისკი შეასძლებელია იყოს მეტად დაბალი, რაშიც იგულისხმება დაბალი დონის ზემოქმედება, თუმცა შეიძლება გვექონდეს იშვიათი ხდომილებები კატასტროფული შედეგებით (ნახ. 65).



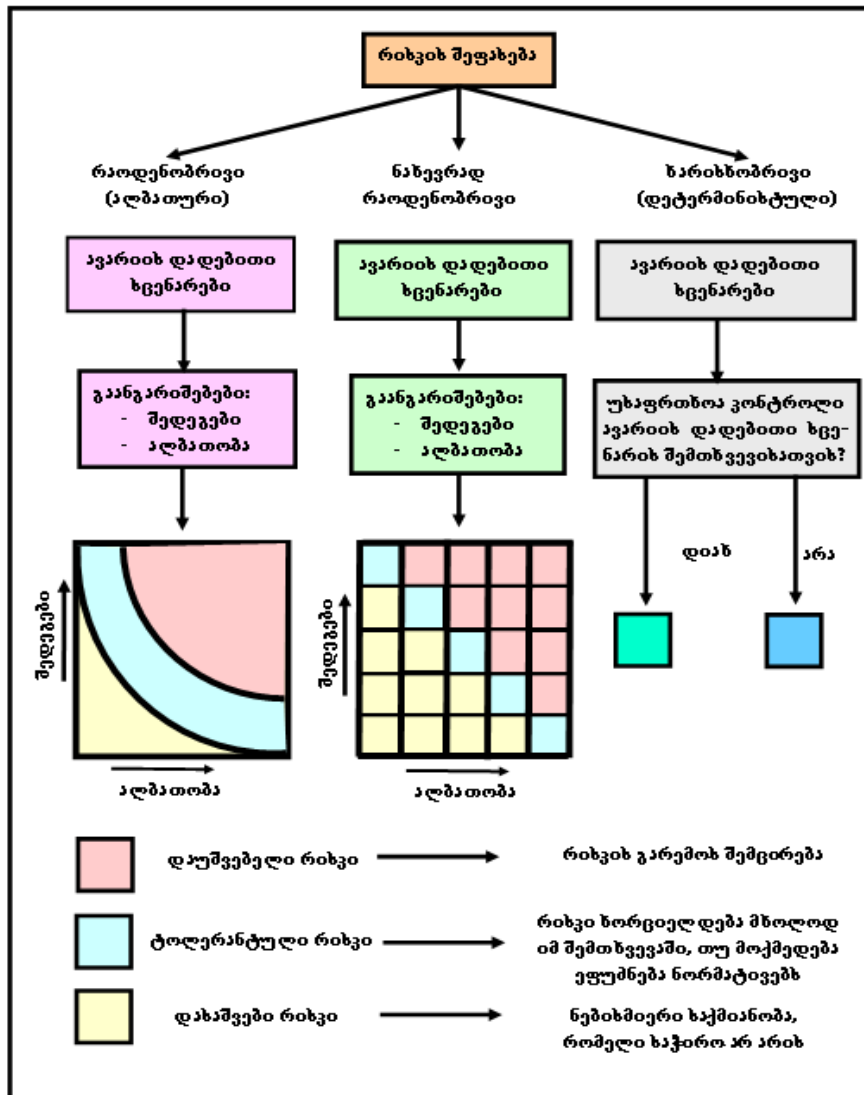
ნახ. 65. 1. ინტუიციური რისკი - R_1 ; 2. პრევენციული რისკი - R_2 ; 3. შემარბილებელი რისკი - R_3 . $R_1 > R_2 > R_3$

რისკის ანალიზის პროცესში, მისი შემცირების მნიშვნელოვანი ცვლილების და განსხვავების აღმოჩენა შესაძლებელია შეიზუდლოს შედეგების შემთხვევითი ხდომილების პრევენციის დონისძიების

განხორციელებით (მაგალითად ალბათობის შემცირება, ავარიის დამცავი ღონისძიებების გამოყენება), ან შემარბილებელი ღონისძიებებით, შემცირების უარყოფითი ეფექტით. რისკების ანალიზისას გამოიყენება მეთოდების კლასიფიკაცია რაც ნაჩვენებია ნახ. 66-ზე. ავარიის რისკის დონის შეფასებისას გამოიყენება ძირითადი მეთოდები: თვისობრივი, ნახევრად რაოდენობრივი და რაოდენობრივი.

თვისობრივი მეთოდები გამოიყენება მოქმედი პრინციპების სამართლებრივი ნორმების და სტანდარტების შესაბამისად, უსაფრთხოების გადამოწმებისას. ასეთი გადამოწმება ეხება ცალკეულ მოწყობილობებს და წარმოადგენს მინიმალურ მოთხოვნებს, რომლებიც უნდა დაკმაყოფილდეს მისაღები უსაფრთხოების დონისათვის. ნახევრად რაოდენობრივი მეთოდები გამოიყენება რისკების საშიშროების იდენტიფიცირებისას გარკვეული მეთოდებით [50]. რისკის რაოდენობრივი შეფასება (QRA – quantitative risk assessment) წარმოადგენს კომპლექსური ანალიზის სერიებს და გაანგარიშებებს, რისთვისაც გამოიყენება სიმულაციური მოდელები, განსაკუთრებით ფიზიკური მოვლენების ანალიზი. საბოლოოდ ხორციელდება რისკის რაოდენობრივი შეფასება.

რისკის რაოდენობრივი ანალიზის შეფასება წარმოადგენს მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს, რათა ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირებისას და შესანახვისას მოხდეს რისკების მართვა. QRA-ს პოტენციური რისკის შეფასების გამოყენება, კერძოდ რისკის უზრუნველყოფა ხდება კომპენენტური ორგანოების მიერ ადგილზე, ან გარკვეულ სატრანსპორტო დერეფანში [89-90].



ნახ. 66. რისკის ანალიზის მეთოდების კლასიფიკაცია

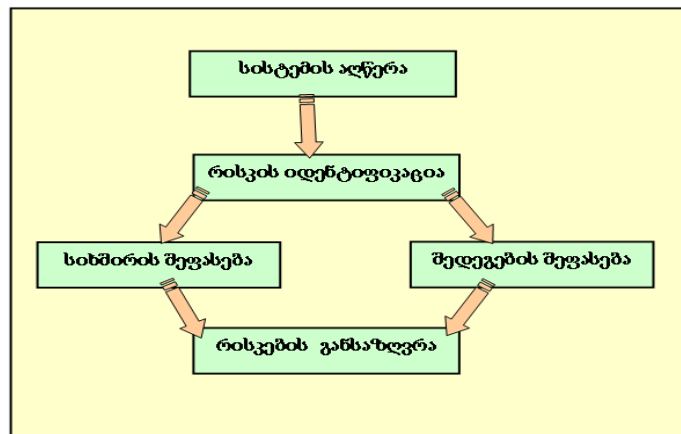
განვიხილოთ QRA-ს ზოგადი ეტაპები: მონაცემთა შედგენა, ამ დროს ხდება მონაცემთა შედგენა - იგი წარმოადგენს პირველ ნაბიჯს ყველა შესაძლო რისკების კომპილაციის ანალიზს, გაზის ობიექტების ადგილმდებარეობის და მახასიათებლების მიხედვით; საშიშროების იდენტიფიკაცია - ხდება გაზსადენების სისტემის დახასიათება პოტენციური სცენარისათვის, დეტალური ფორმულირებით, ალბათობით, გარკვეული ხარჯებით, ზემოქმედების ხასიათით და მასშტაბების შეფასებით; ალბათობის ანალიზი (ალბათობების ღონისძიებების

განსაზღვრა); შედეგების ანალიზი - პოტენციური ფიზიკური ზემოქმედება და პროდუქტის ემისია გაზსადენის დაზიანებისას; რისკის შეფასება - ორივე ალბათობის ღონისძიების რიცხვითი კომბინაცია და მათი შედეგები. QRA-ს პროცედურა შეჯამებულია ნახ. 67-ზე.

განვიხილოთ QRA-ს შედეგები და მაგალითები [91].

1. ხშირად გამოიყენება რისკების დიაპაზონის მეთოდი, რომელიც ამ დროს გამოიყენება მხოლოდ შედეგები ანალიზის გარეშე (კერძოდ ზედა და ქვედა ზღვრების ზონების ეფექტი). ასეთი კვლევა გამოიყენება მხოლოდ შემოსაზღვრული ჯგუფების ინციდენტებისათვის.

2. რისკის დიაპაზონის შემცირების ღონისძიების შეფასება. ამ შემთხვევაში მსგავსი მიზანი არ წარმოადგენს შეზღუდული დაჯგუფების ინციდენტებს, თუმცა ხშირად ხელსაყრელია ცალკეული ინციდენტების გამოყენება. ამ შემთხვევაში, რისკების ძირითადი წვლილი განსაზღვრავს მის იდენტიფიცირებას.



ნახ. 67. რისკის რაოდენობრივი ანალიზის პროცედურა

3. უსფრთხოების ინვესტიციების პრიორიტეტი: ნებისმიერ ორგანიზაციას გარკვეულწილად შეზღუდული რესურსები გააჩნია. QRA-ს უნდა გახდეს პრიორიტეტი და უზრუნველყოფდეს ინვესტიციების

მიმართვას უსაფრთხოების ხარისხის გაუმჯობესებისათვის როგორც წესი გამოიყენება ინციდენტების შემოსაზღვრული ჯგუფი.

4. საზოგადოებრივი რისკის შეფასება: პერსონალის რისკი, მარეგულირებელი სააგენტოს შესაბამისად, საჯარო რისკი მიღებულია დასაშვებულ რისკად.

5. იურიდიული ან ნორმატიული მოთხოვნები: ხშირად კანონმდებლობა მიღებულია QRA-ს შესაბამისად. კონკრეტული მიზნებისათვის და წესებისათვის უნდა მოხდეს აქცენტი საჯარო რისკზე და საგანგებო დაგეგმარებაზე.

6. QRA-ს გამოსაყენა ხელს უწყობს საგანგებო დაგეგმვის პროგნოზირების ეფექტს, კერძოდ ზონების გამოყენებას.

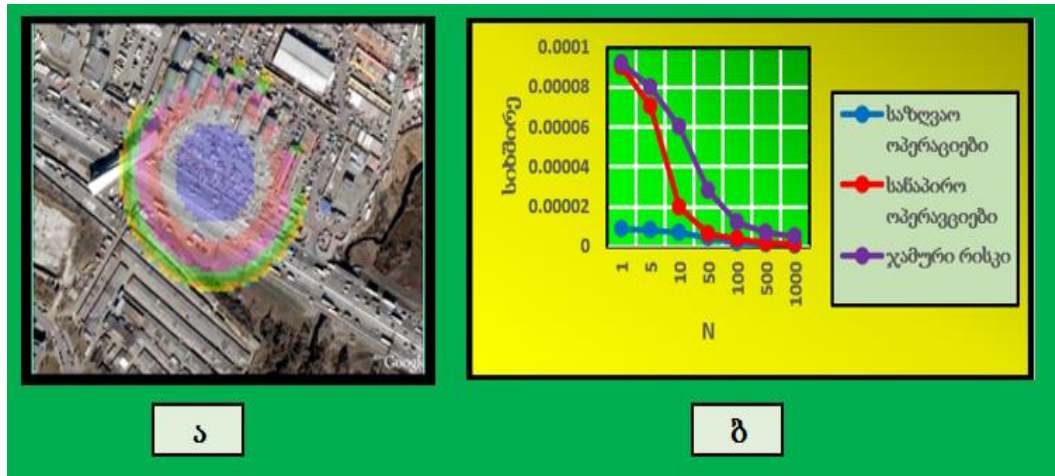
გარდა ამისა, QRA-ს შედეგები შეიძლება იყოს: ინდივიდუალური და სოციალური რისკები.

ინდივიდუალური რისკი (IR-Individual Risk) წარმოადგენს ინდივიდუალური საშიშროების სიხშირეს. მიჩნეულია, რომ ადამიანი უნდა იყოს დაცული, სიცოცხლის სრული პერიოდის განმავლობაში. ნახ. 68-ზე ნაჩვენებია ინდივიდუალური კონტურული წირების რისკის მონაცემები, ტოპოგრაფიულ რუკაზე [92,93].

განვიხილოთ ჩვენს მიერ შექმნილი პროცედურა, რომელიც ეფუძნება ინდივიდუალური რისკის გაანგარიშებას. საერთო ინდივიდუალური რისკი ყოველი წერტილისათვის ტოლია ინდივიდუალური რისკების ჯამის:

$$\mathbf{IR}_{x,y} = \sum_{i=1}^n \mathbf{IR}_{x,y,i}, \quad (124)$$

სადაც $\mathbf{IR}_{x,y}$ - არის საერთო ინდივიდუალური რისკი საშიშ შემთხვევაში, გეოგრაფიულ x,y მდებარეობაში (საშიშროების ხდომილების რისკი წელიწადში);



ნახ. 68. ა) ინდივიდუალური რისკი; ბ) სიხშირის და წელიწადში ინციდენტების საშიშროების დამოკიდებულება (სოციალური რისკის მგალითები): 1. საზღვაო ოპერაციები; 2. სანაპირო ოპერაციები; 3. ობიექტების ჯამური რისკი.

$IR_{x,y,i}$ - საერთო ინდივიდუალური რისკი საშიშ შემთხვევაში, გეოგრაფიულ x,y მდებარეობაში i შემთხვევაში (საშიშროების მოხდენის რისკი წელიწადში);

n - ყველა ინციდენტების რაოდენობა.

განტოლება (4.1)-დან, მივიღებთ:

$$IR_{x,y,i} = f_i p_{f,i} \tag{125}$$

სადაც f_i არის ინციდენტის შედეგის სიშირე - i , სიხშირის ანალიზის მიხედვით (წელი⁻¹);

$p_{f,i}$ - ალბათობა, რომ ინციდენტი შედეგის i შემთხვევაში, გამოიწვევს საშიშროებას ადგილმდებარეობის x,y -თვის.

განვიხილოთ სოციალური რისკი (**SR**), რომელიც წარმოადგენს N სიხშირის მქონე ავარიის საშიშროებას (დაღუპვას) ერთდროულად. სოციალური რისკი განიხილება F,N მრუდით, სადაც N არის საშიშროება, ხოლო F უბედური შემთხვევების კუმულაციური სიხშირე. F,N მრუდისათვის, როგორც ცნობილია, ინდივიდუალური რისკის

განგარიშებისათვის საჭიროა სრული ინფორმაცია: ინფორმაცია მოსახლეობის შესახებ და შემარბილებელი ფაქტორების შეფასება (მაგალითად საცხოვრებელი სახლები, ოფისები, საწარმოები, სკოლები, საავადმყოფოები და ა.შ.); ინფორმაცია - დროის ეფექტი (მაგალითად სკოლები); ინფორმაცია - დღე-კვირის ეფექტი (მაგალითად სამრეწველო, საგანმანათლებლო ან რეკრეაციული ობიექტები); ინფორმაცია - მოსახლეობის დროის პროცენტი დახურულ შენობებში და მათი შემარბილებელი შეფასებები.

მაგალითისათვის განვიხილოთ ზემოქმედების კრიტერიუმები (ცხრილი 33). მაგალითად, იტალიის შეფასების კრიტერიუმები ეფუძნება შემთხვევითი მოვლენის ალბათურ საფუძველს. ცხრილი 34-ში მოყვანილია დაგეგმვის შეფასების სამი ზონის ეფექტი. კერძოდ: პირველი ზონა - განისაზღვრება პარამეტრების ჩამონათვალი, რომელიც ეხება დაზიანებას (მაღალი ლეტალობა); მეორე ზონა - განისაზღვრება პარამეტრების ჩამონათვალი, რომელიც ეხება შეუქცევად დაზიანებას; მესამე ზონაა დაგეგმვა, რომელიც განსაზღვრავს რთულ ტერიტორიას.

ცხრილი 33

ადამიანზე და გარემოზე ზემოქმედების კრიტერიუმები

ეფექტი	საფრანგეთი		გერმანია ადამიანების და გარემოს რისკი
	მსხვერპლის კრიტერიუმები	შეუქცევადი ეფექტის კრიტერიუმები	
თბური გამოსხივება	5 კვტ/მ ² , თუ ექსპოზიცია მეტია ერთ წუთზე	3 კვტ/მ ² , თუ ექსპოზიცია მეტია ერთ წუთზე	
ჰარბი წნევა	0,14 ბარი	0,05 ბარი	
ტოქსიკური დოზა	1% და ექსპოზიციის დრო (დრუბლის გასვლისას)	შეუქცევადი ეფექტი (პირველი წუთი) და ექსპოზიციის დრო	

ადამიანზე და გარემოზე ზემოქმედების კრიტერიუმები
(იტალიის მაგალითი)

ფიზიკური მოვლენები	აუცილებელის ასახვა, მაღალი ლეტალობა	შემოქმედების ზონა, შეუქცევადი დაზიანება	შექცევადი დაზიანება
აფეთქება (ჭარბი წნევა)	0,3 ბარი. 0,6 ბარი ღია სივრცეში	0,07 ბარი	0,03 ბარი
ცვლადი თერმული გამოსხივება	ცეცზლოვანი სფერო	200 კვ/მ ²	125 კვ/მ ²
ცეცხლი (სტაციონარი თერმული გამოსხივება)	12,5 კვტ/მ ²	5 კვტ/მ ²	3 კვტ/მ ²
აღებადი ორთქლის ღრუბელი	LFL	0,5 LFL	-
ორთქლის ტოქსიკური ღრუბელი	LC50 30 წუთი	IDLH	1/10 IDLH

საზოგადოებრივი რისკის კრიტერიუმებს განსაზღვრავს შემდეგი ფორმულა, რომელშიც შედის ფაქტორი α :

$$R = FN^\alpha. \quad (126)$$

გალოგარიტმების შემდეგ მივიღებთ:

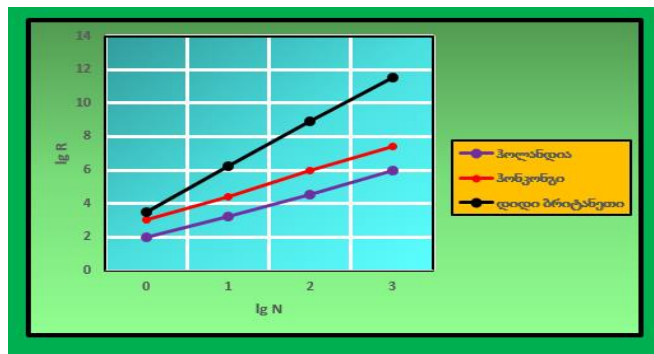
$$\lg R = \lg F + \alpha \lg N, \quad (127)$$

სადაც α არის კრიტერიუმის წირის დახრა (ნახ. 69).

საბაზო წერტილი (ფიქსირებული წყვილი - შედეგი და სიხშირე) კვეთავს γ -ღერძს. ნაშრომები [94-96] ამტკიცებს, რომ საკითხის გადაწყვეტა - სადავოა. დიდ ბრიტანეთში ითვალისწინებს ე.წ. ნეიტრალურ ფაქტორს, ხოლო ჰოლანდიაში უარყოფენ რისკის კოეფიციენტს. გაზსადენების სიხშირეების შეფასება ხდება ცალკეული დაზიანების შესაბამისად (გაზსადენის ერთეულის სიგრძე 1/წელი:კმ) [97,98]. გაზსადენის თითოეული ავარიის სცენარისას, უნდა მოხდეს მტყუნების ინტენსივობის შეფასება:

$$\varphi_i = \sum_j \varphi_{i,j,0} K_j(a_1, a_2, a_3, \dots), \quad (128)$$

სადაც φ_i არის მოსალოდნელი მტყუნება გაზსადენის ერთეულის სიგრძეზე (1/წელი:კმ); $\varphi_{i,j,0}$ - ძირითადი მტყუნება გაზსადენის ერთეულის სიგრძეზე (1/წელი:კმ); K_j - კორექციის ფუნქცია, რომელიც დაკავშირებულია მტყუნების მიზეზთან და რომელიც გვიჩვენებს წარუმატებლობის მიზეზს; a_k - კორექციის ცვლადი.



ნახ. 69. კრიტერიუმები (F, N) 2010 წ): 1. პოლანდია; 2. ჰონგკონგი; 3. დიდი ბრიტანეთი

ანალიზი განხორციელდა მონაცემთა ბაზის შესაბამისად [99]. ინციდენტების და მათი წარმოშობის შესახებ მონაცემები მოყვანილია ცხრილებში 35 და 36: 1). ტრანსპორტირება; 2) ქარხნული პროცესი; 3) შენახვა; 4) შიგა კომერციულობა.

ცხრილი 35

ინციდენტების გადანაწილება სისტემაში

დასახელება	ინციდენტების რაოდენობა	%
ტრანსპორტირება	134	69
ქარხნული პროცესი	33	17
გაზსაცავი	17	9
შიგა კომერციულობა	9	5
სულ	193	100

კუთრი ავარიების რაოდენობა ბუნებრივი გაზის შემთხვევაში

დასახელება	ინციდენტების რაოდენობა	საერთო პროცენტი	%, სულ
ტრანსპორტირება			
საკომპრესორო	129	96,27	65,80
სარკინიგზო ცისტერნა	2	1,49	1,04
ქვესადგური	1	2,24	0,52
		100	
ქარხნული პროცესი			
მილსადენები	6	18,18	3,11
საკომპრესორო	4	12,12	2,07
ტექნოლოგიური მოწყობილობა	2	6,06	1,04
ტექნოლოგიური რეზერვუარი	2	6,06	1,04
სხვა	19	57,58	9,84
		100	
გაზსაცავები			
მაღალი წნევის რეზერვუარები	6	35,29	3,11
დასაწნევანი რეზერვუარები	5	29,42	2,59
სატუმბო	1	5,88	0,52
სხვა	5	29,41	2,59
		100	
შიგა კომერციულობა			
მილსადენები	4	44,44	2,07
ხანძარ	1	11,12	0,52
საწინააღმდეგო მოწყობილობა			
სხვა	4	44,44	2,07
		100	100

გაზსადენები, როგორც წესი, ჩალაგებულია გრუნტში და გარე ფაქტორების გამო შეიძლება მოხდეს დაზიანება. მიუხედავად ამისა, შესაძლოა ავარიების ინციდენტების გარკვეული კლასიფიკაცია, რაც ნაჩვენებია ცხრილში 37 [100-101].

ინციდენტების პროცენტული რაოდენობა

მიზეზი	სრული პროცენტი (%)
გარე ჩარევა	49,6
სამშენებლო დეფექტები/მასალა	16,5
კოროზია	15,4
გრუნტის მოძრაობა	7,3
ტემპერატურული მტყუნებები	4,6
სხვა	6,6
	100%

განვიხილოთ CO₂-ის სისტემების კუთხით გარკვეული გამოცდილება. გაზსადენების ინციდენტების შესახებ მონაცემები (როგორც ბუნებრივი გაზისათვის, ასევე საშიში ნივთიერების და CO₂-ის შესახებ), მოყვანილია ცხრილებში 38 და 39 (აშშ-ს საშიში მილსადენების უსფრთხოების სამმართველო PHMSA, 1986-დან 2001 წლებამდე).

საშიში ინციდენტების სტატისტიკა აშშ-ში 1986-2001 წწ

მილსადენები	ბუნებრივი გაზი	საშიში ნივთიერებები	CO ₂
ინციდენტების რაოდენობა	1287	3035	10
ლეტალური რაოდენობა	58	36	0
დაზიანების რაოდენობა	217	249	0
ზარალი	\$ 285 · 10⁶	\$ 764 · 10⁶	\$ 469000
მილსადენების ინციდენტების რაოდენობა 1000 კმ/წელი	0,17	0,82	0,32
ზარალი 1000 კმ/წელი	\$37000	\$205400	\$15200

საშიში ინციდენტების სტატისტიკა აშშ-ში 2002-2012 წწ

მილსადენები	ბუნებრივი გაზი	საშიში ნივთიერებები
ინციდენტების რაოდენობა	1278	3344
ლეტალური რაოდენობა	94	18
დაზიანების რაოდენობა	390	41
ზარალი	\$710 · 10⁶	\$922 · 10⁶

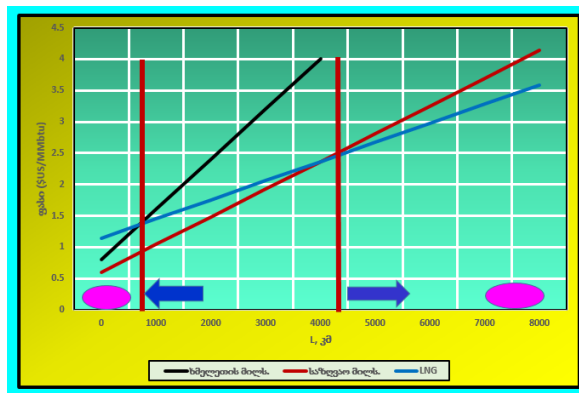
ცხრილში 40-ზე ნაჩვენებია შესაბამისი კლასიფიკაცია.

ცხრილი 40

CO₂-ის გაფრქვევის მიზეზები

მიზეზი	რაოდენობა	%
გარემო	6	16
კონტროლი/მოწყობილობა	16	42
კოროზია	5	13
მესამე მხარე	1	3
სხვა	10	26

დიდ მანძილზე ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირებისას, საჭიროა განისაზღვროს სავარაუდო პროექტის ოპტიმალური გადაწყვეტილება: 1. საზღვაო გაზსადენები; 2. სახმელეთო გაზსადენები; 3. გათხევებული ბუნებრივი გაზის (LNG) ტრანსპორტირება საზღვაო ხომალდებით (ნახ. 70). სქემიდან ჩანს, თუ როგორ შეირჩევა სხვადასვა ვარიანტები.



ნახ. 70. ბუნებრივი გაზის სხვადასხვა გზებით ტრანსპორტირების ეკონომიკური ვარიანტები; 1. საზღვაო გაზსადენი; 2. სახმელეთო გაზსადენი; 3. გათხევებული ბუნებრივი გაზის (LNG) ტრანსპორტირება საზღვაო ხომალდებით

რეგაზიფიკაციისას ხდება გათხევებული ბუნებრივი გაზის აირად გარდაქმნა და მიღებული გაზის შეშვება ქსელში. რეგაზიფიკაციის ქარხანა, როგორც წესი, მდებარეობს პორტების აკვატორიებში და შედგება სამი

ძირითადი ნაწილისგან: გათხევამული ბუნებრივი გაზის მიღება საზღვაო ხომალდებიდან; გათხევამული ბუნებრივი გაზის შენახვა; 3. რეგაზიფიკაცია.

განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის ქსელში რისკის რაოდენობრივი ანალიზის (QRA) მეთოდოლოგია, ამ სისტემის აღწერა, რისკების იდენტიფიკაცია, სიხშირის შეფასება და შედეგები მაღალი წნევის უბნისა და საზღვაო ტერმინალებისათვის.

CO₂-ის შენახვა ხდება სამი ტიპის გეოლოგიურ ფორმაციებში: ნავთობის და გაზის, მარილების ფორმაციები და ნახშირის ფენები. ყველა შემთხვევაში ხდება CO₂-ის შენახვა ჩატუმბვით აირის სიმკვრივის გაზრდით.

5.2. გაზგამანაწილებელი ქსელები, მოდელირება

განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელების შეკრება და მოდელირება ფრაგმენტარული მონაცემებით. მოდელირება ხდება სიმულატორით Aspen Plus[®]-ით და პროგრამული უზრუნველყოფით ArcGIS. განვიხილოთ იტალიის ქსელის და ინფრასტრუქტურის საინფორმაციო ბაზა, გაზის ბალანსის შეთანხვებით.

მონაცემები შეტანილია უზრუნველყოფა ArcGIS-ის მიერ. გეოგრაფიული საინფორმაციო სისტემა გვაძლევს ობიექტების ლოკალიზების, მართვის და ანალიზირების საშუალებას, წარმოქმნილი ხდომილების დატანას რუქაზე. თითოეული ელემენტი იდენტიფიცირდება გეოგრაფიული კოორდინატებით, რომლებიც გვიჩვენებს ზუსტ ადგილმდებარეობას, თითოეული ელემენტებისათვის და ანალიზისათვის.

გაზგამანაწილებელი ქსელების იმიტაციის მოდელირება ხდება Aspen Plus-ის, სიმულაციური პროცესით. მისი საშუალებით ხდება სტაციონარული პროცესის მოდელირება, პროექტირება, მწარმოებლურობა, ბიზნეს-დაგეგმარება და ა.შ. იგი წარმოადგენს Aspen Engineering Suite[™]

(AES)-ს შემადგენელ ნაწილს. აღნიშნული პროცესის მოდელირება ხდება ისეთი ტექნიკური ოპერაციებით, როგორებიცაა: მასის და ენერჯის ბალანსი; ქიმიური და ფაზური წონასწორობები; რეაქციის კინეტიკა.

მნიშვნელოვანი საიმედო თერმოდინამიკური მონაცემების უზრუნველყოფა, ექსპლუატაციის რეალურ პირობებში, შეიძლება ახალი და არსებული გაუმჯობესებული ობიექტების რეალური სისტემების იმიტაციით.

შემდეგ ნაბიჯს წარმოადგენს გაზსადენის ფუნქციონირებასთან დაკავშირებული რისკების იდენტიფიცირება. ამოცანების სიაში უნდა განვიხილოთ პოტენციური საშიშროება, რომლის ალბათობა ნულის არა ტოლია და შესაძლოა მოხდეს მნიშვნელოვანი დაზიანებები. ხშირად გამოიყენება შემდეგი მეთოდები [102-104]: ინციდენტების ისტორიული ანალიზი; ჩანაწერების მეთოდი; საშიშროების ინდექსური მეთოდი; იერარქიული ხეები, ხდომილების ხე და მტყუნების ხე; რეჟიმის და დაზიანების შედეგები.

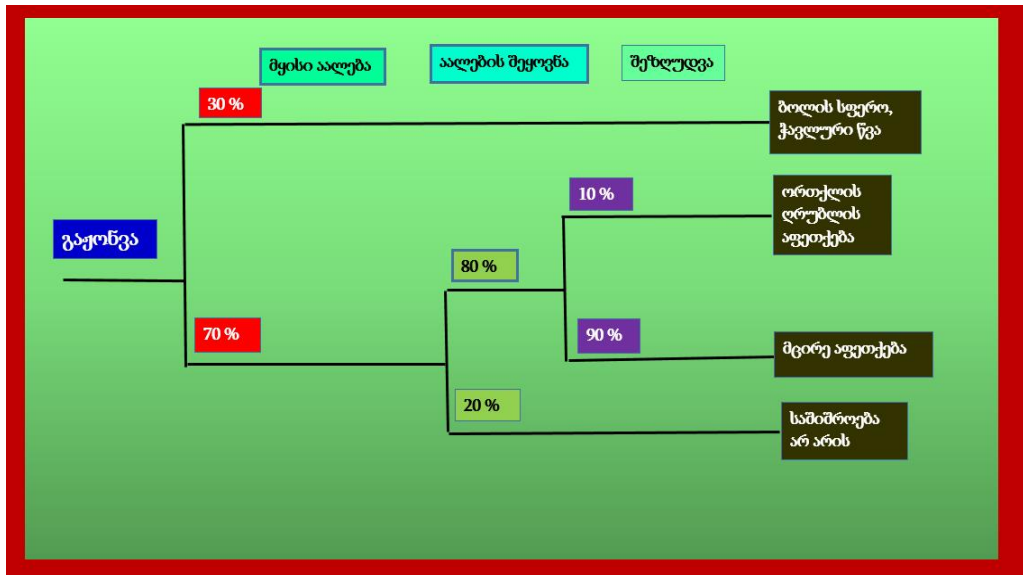
ინციდენტების ისტორიული ანალიზის კლასიფიცირება შემდეგნაირია: მესამე მხარედან ჩარევა; სამშენებლო დეფექტები და არახარისხიანი მასალები; საგზაო მოძრაობა; ტემპერატურული შეცდომები; სხვა უცნობი მიზეზები. ცხრილში 41 ნაჩვენებია ალბათობის მიზეზები.

ცხრილი 41

ინციდენტების რაოდენობის მიზეზები

მიზეზი	წილი, %
გარე მიზეზი	49,6
სამშენებლო დეფექტების/მასალის მტყუნება	16,5
კოროზია	15,4
გრუნტის მოძრაობა	7,3
ტემპერატურული შეცდომები;	4,6
სხვა უცნობი მიზეზები	6,6

განვიხილოთ ხდომილების ანალიზი, რომელიც წარმოადგენს იცინდენტების გამოკვლევის სტანდარტულ პროცედურას (მაგალითად ETA-Event Tree Analysis) და ლოგიკურ მიმდევრობას, რომელიც გრაფიკულად წარმოადგენს ხდომილების და გარემოების კომბინაციას დაზიანების შესახებ. ჩვენს მიერ შემუშავებულია ინდუქციური მეთოდი, რომელიც იწყება არასასურველი ხდომილების ინიცირებით და მუშაობს საბოლოო შედეგამდე. ხეს თითოეული ტოტი გვიჩვენებს ხდომილების თანმიმდევრობით დაზიანების შემთხვევას. ნახ. 71 გვიჩვენებს ბუნებრივი გაზის გაჟონვას გაზსადენიდან [105,106].



ნახ. 71. გაზსადენის ხეს ხდომილების სქემა

გაზსადენიდან გაჟონვამ შესაძლოა შექმნას ჭავლური ნაკადი, რომლის მყისიერმა აალებამ შეიძლება გამოიწვიოს რეაქტიული ხანძარი ან ცეცხლოვანი სფერო. აალების შეყოვნებამ შეიძლება გამოიწვიოს გაზის გაჟონვა არა სწრაფად, არამედ გაზი დისპერგირებს წყაროს შემდეგ და მისი კონცენტრაცია ცეცხლ საშიშ დიაპაზონში ხდება. მეთანი მსუბუქია

ჰაერზე და შესაბამისად, ღია გარემოს გაშლისას აალების შეყოვნებამ შეიძლება გამოიწვიოს თვითაალება (90%) და მხოლოდ ორთქლის ღრუბლის აფეთქება (10%).

განვიხილოთ მტყუნებების სიხშირის შეფასება, კერძოდ როგორც ინდივიდუალური რისკის გაანგარიშება, ასევე მოწყობილობის მტყუნების სიხშირე. ცხრილში 42 ნაჩვენებია მტყუნების სიხშირის პერიოდები.

ცხრილი 42

პირველადი მტყუნებების სიხშირეების სხვადასხვა პერიოდები

დროის პერიოდი	ინციდენტების რაოდენობა	სისტემის სრული ექსპოზიცია (კმწელიწადი)	მტყუნების სიხშირე (კმწელიწადი)
1970 – 2007	1172	$3,15 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
1970 – 2004	1123	$2,77 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
2003 – 2007	88	$0,62 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
2007	14	$0,13 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^{-4}$

Mathurkar (Mathurkar HN, Gupta A.)-ის შესაბამისად შემთხვევების 13% ხდება გაზსადენის სრული რღვევის შედეგად, ხოლო 87%-ში ხდება გაჟონვა ბზარიდან ან ხვრეტიდან.

ცხრილში 43 ნაჩვენებია გაჟონვების დაზიანების სიხშირეები.

ცხრილი 43

გაჟონვების სრული რღვევის, ბზარის და ხვრეტის შემთხვევაში

გაჟონვის ტიპი	ალბათობა	სიხშირე, პერიოდი 1970-2007 წწ (ხდომილება/კმწელი)	სიხშირე, 2007 წლის პერიოდი (ხდომილება/კმწელი)
სრული რღვევა	13%	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
გაჟონვა ხვრეტიდან	87%	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$9,57 \cdot 10^{-5}$
სულ	100%	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$

ცხრილში 44 ნაჩვენებია სრული რღვევის გაჟონვების განსხვავება სხვადასხვა დიამეტრის გაზსადენებისათვის. ცხადია, რომ უფრო დიდია დიამეტრები, ამიტომ შესაბამისად მეტი იქნება წნევა.

ცხრილი 44

გაგლეჯის აალების ალბათობა

გაჟონვის ზომა (გაგლეჯა)	აალებადობა ალბათობა (%)
გაგლეჯა ≤ 406 მმ-ზე	10
გაგლეჯა ≥ 406 მმ-ზე	33

ქსელის შეფასებისას ითვლება, რომ სრული რღვევისას გვაქვს აალების 33%-ის ალბათობა, როდესაც მილის დიამეტრი მეტა 406 მმ-ზე. თუ ხვრეტი მცირეა, მაშინ გვექნება 10%-ის ალბათობა. მოცემული აალების და ხდომილების ხეს ალბათობებით, შესაძლებელია განისაზღვროს კონკრეტული თითოეული მნიშვნელობისათვის.

2007 წლის შემდეგ, გაზსადენებიდან გაჟონვის პრობლემა სხვაგვარია, რადგანაც მოხდა შეცვლა თანამედროვე მასალებით. ცხრილში 45 ნაჩვენებია შედეგებთან დაკავშირებული სიხშირეების მნიშვნელობები.

ცხრილი 45

სიხშირეების მნიშვნელობები

შედეგები	ხდომილების ალბათობა (%)	სიხშირე (ხდომილება/კმწელი)	
		გაჟონვა ხვრეტიდან	სრული გაგლეჯა
სფერო-ჭავჭავური წვა	30,0%	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$
ორთქლის დრუბლის აფეთქება	5,6%	$5,36 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-6}$
მცირე აფეთქება	50,4%	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$
საშიშროება არ არის	-	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$6,61 \cdot 10^{-7}$

აღნიშნული სიხშირეების და ალბათობების გაანგარიშებული მნიშვნელობებით შეიძლება დადგინდეს ლოკალური რისკი, ამოფრქვევის წერტილიდან გარკვეულ მანძილზე.

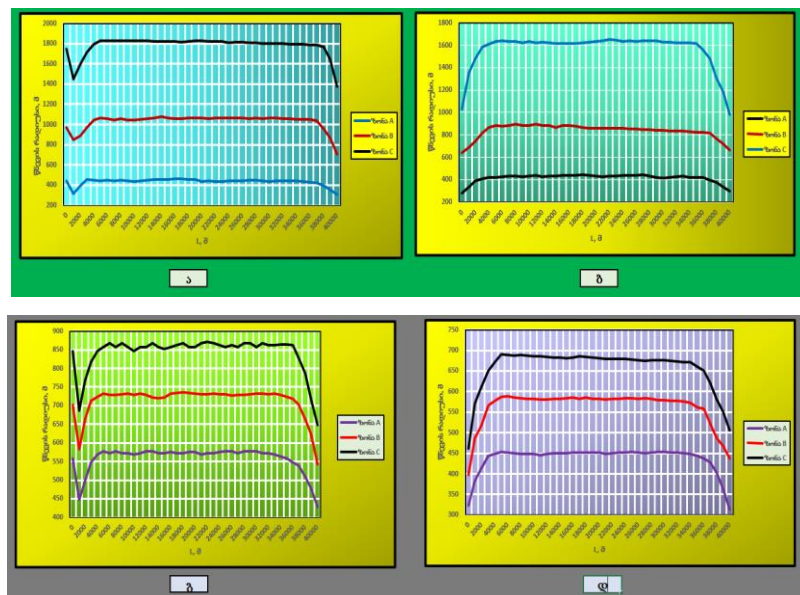
განვიხილოთ გაზსადენის გარკვეული ცოცხალი კვეთის გაგლეჯა და გაჟონვა. ამასთან დაკავშირებით მოვახდინოთ გაზის ნაკადის მოდელირება სიგრძის გასწვრივ. კერძოდ, გვექნება შემდეგი პარამეტრები (2001 წლის 9 მაისის შემთხვევა): დიამეტრი $D=1200$ მმ, უბნის სიგრძე $L=37$ კმ, წნევა $p=70$ ბარი, ხარჯი $Q=140,4$ კვ/წმ. განვიხილოთ ორი გაჟონვა: სრული გაგლეჯა და ხვრეტი 560 მმ-ის დიამეტრი. შევადგინოთ შესაბამისი დაზიანების პარამეტრები (ცხრილი 46).

ცხრილი 46

ზარალის ზღურბლი

ფიზიკური მოვლენები	სიმძიმის შედეგი. მაღალი ლეტალობა (ზონა A)	შუქცევადი დაზიანება (ზონა B)	შუქცევადი დაზიანების არე (ზონა C)
აფეთქება	0,3 ბარი	0,07 ბარი	0,03 ბარი
ცეცხლი	12,5 კვ/მ ²	5 კვ/მ ²	3 კვ/მ ²

ნახ. 72 (ა და ბ)-ზე ნაჩვენებია გაზსადენის სიგრძის მიხედვით შედეგების აფეთქების, ხოლო ნახ. 72 (გ და დ)-ზე ჭავლური აალების შემთხვევა.



ნახ. 72. ა),ბ) აფეთქების რადიუსების გაანგარიშება; გ),დ) ჭავლური აალებადობის რადიუსის გაანგარიშება.

რიცხვითი მოდელირება გვიჩვენებს, რომ დასაწყისში პროფილის მნიშვნელობები მცირეა, შემდეგ გვაქვს სტაციონარული მდგომარეობა, ხოლო გაზსადენის ბოლოში მნიშვნელობები კვლავ მცირდება. ეს იწვევს გადაქაჩვის რეჟიმს დასაწყისში, ხოლო ბოლოში ხდება ხარჯის შემცირება. ამიტომ შუალედურ პროცესში, გვაქვს დამყარებული რეჟიმი და შესაძლოა მხოლოდ ერთი უბნის გაანგარიშება, ხოლო გაანგარიშება შემდეგ გრძელდება ანალოგიურად.

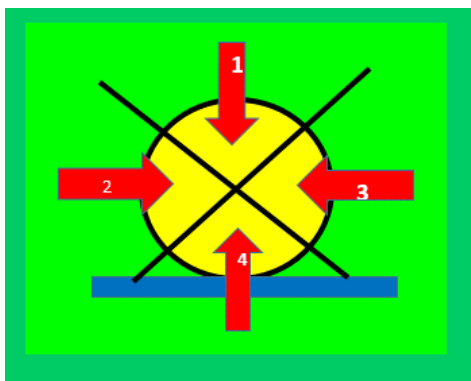
გაჟონვის მოდელირება წარმოადგენს გარემოში პროდუქტის გამოფრქვევის სიჩქარის დაკარგვის დადგენას დამცავი ინციდენტისათვის, შესაბამისი ფიზიკური თვისებებით (ტემპერატურა, იმპულსი). საერთაშორისო წესების თანახმად მილსადენები უნდა იყვნენ ჩალაგებული სიღრმეში არა ნაკლებად 0,9 მ. მაღალი წნევის მილსადენებისათვის ითვლება, რომ საშუალო სიღრმე 1,5 მ-ს წარმოადგენს. მილსადენებისათვის ასეთი პირობა და შესაბამისი მდგომარეობა მხედველობაშია მისაღები.

მილის სრული რღვევისას ხდება გამოფრქვევა მილის ორივე მხრიდან. ამიტომ, მიწისქვეშა მილსადენის სრული გამოფრქვევის მოდელირება ხდება შემდეგნაირად:

1. ნაკადის საწყისი მაღალი სიჩქარისას, დაუყოვნებლივ ხდება აალება, ან ცეცხლოვანი სფეროს არსებობის შემთხვევაში მის მიერ გამოთავისუფლებული მასა, სანამ ამ სფეროს მასა ტოლია იგივე ცეცხლოვანი სფეროს ხანგრძლივობის;

2. შემდგომი შემცირებული ხარჯი: დისპერსიის შეყოვნება და დაგვიანებული აალების იმპულსის (სიცქარით) მოდელით, ისე რომ იმპულსები ურთიერთქმედებენ გაგლეჯის ორივე მხრიდან.

ნახ. 73-ზე ნაჩვენებია მიწისქვეშა მილსადენის გაჟონვისას გაფრქვევის კვადრანტების მიმართულებების ილუსტრირების გამარტივება. ასეთი მოდელირების მიდგომა შესაძლოა საშუალო და მსხვილი გაჟონვებისას.



ნახ. 73. მიწისქვეშა მილსადენის გაჟონვა, კვადრანტების მიმართულებით გაფრქვევის გამარტივება

1. ვერტიკალური გამოფრქვევა. ვერტიკალური გამოფრქვევის (ზევით) მოდელი გვიჩვენებს ნორმალურ გამოფრქვევას ცვლილების გარეშე, ე.ი. სიჩქარის სრული განმუხტვა (ნამუშევარი).

2 და 3. ჰორიზონტალური გამოფრქვევა. ამ მოდელისას გვაქვს კუთხე 45° -ით ზევით და სიჩქარე 70 მ / წმ.

4. დაღმავალი გამოფრქვევა. მოდელი როდესაც ვერტიკალური დაღმავალი გამოფრქვევა (ქვევით) ხდება დაბალი სიჩქარით (მაგალითად 5 მ/წმ სიჩქარით), რაც ასახავს იმპულსის დაკარგვას დარტყმისას ნიადაგის ქვეშ.

მცირე ჰორიზონტალური ან ქვევით გამოფრქვევისას, ნაკადზე მოქმედი ძალით ნაკლებად სავარაუდოა მოხდეს ზედაპირის გადახსნა, ამიტომ ნაკადი ნელ-ნელა გაიჟონება დედამიწის ზედაპირზე. გაფრქვევის ყველა მიმართულებისას შემოთავაზებულია შემდეგი მიდგომა: დაბალი წნევის მილსადენისათვის გაანგარიშდება ნორმალური ან განსხვავებული განმუხტვის სიჩქარე (1 ბარი მუშა წნევისას < 10 ბარი, ხოლო 0,1 ბარისათვის <10 ბარზე), რათა ნიადაგში იმიტაციის დიფუზია, მოდიფიცირებული ხვრეტისათვის, მოგვცემს იგივე სიჩქარეს, რაც იყო ადრე ზევით.

შეფასების შედეგებისთვის ჩატარდა კატასტროფული გაფრქვევა და საშუალო/დიდი გაჟონვა (მცირე გაფრქვევა უგულებელყოფილია).

იმის გათვალისწინებით, რომ მილი დაყოფილია ოთხ კვადრანტად (ნახ. 80), ალბათობა, რომ გაფრქვევა თითოეული კვადრანტისათვის იქნება 25%. ასე რომ გაფრქვევის ვერტიკალურ ზონაში (ზონა 1), ალბათობა არის 25%, ჰორიზონტალური გაფრქვევისათვის (ზონები 2 და 3) 50% და გაფრქვევა ქვევით არის 25%. ეს ალბათობა გამოყენებული იქნება ინდივიდუალური რისკის გასაანგარიშებლად.

განვიხილოთ აფეთქების მოდელირება. აფეთქება იწვევს გაზის გაფართოებას და მყისიერად ტემპერატურის და წნევის გაზრდას, რაც იწვევს სტრუქტურულ დაზიანებებს [107-110]. თუ პროცედურა გვაქვს მხოლოდ წნევის უმნიშვნელო შემცირება, მაშინ მას ეწოდება ფლემ (აფეთქების)-ხანძარი.

არსებობს აფეთქების მრავალი მოდელები: ექვივალენტური, ენერჯის მულტი-ენერგეტიკული და ა.შ. ამ შემთხვევაში გაანგარიშების მოცულობა მიწისქვეშა გაზსადენის შესაბამისად ვიყენებთ პროდუქტის რეაქტივობას (მაღალი, საშუალო და დაბალი), სიმკვრივეს (მაღალი, საშუალო და დაბალი) და გრუნტის ფაქტორს (საჭაერო და გრუნტის ამრეკლი).

$$W = \pi L \left(\frac{D}{2} + d_a \right)^2, \quad (129)$$

სადაც L არის მილსადენის სიგრძე, D - მილსადენის შიგა დიამეტრი, d_a - საშუალო სიღრმე დაახლოებით 1,5 მ.

ბუნებრივი გაზისათვის პროდუქტის რეაქტივობა ძალზე მცირა, ხოლო სიმკვრივე დაახლოებით საშუალოა.

ამგვარად გვაქვს შემდეგი შედეგი: ხდომილების ხეს მიხედვით გვაქვს: ჭავლური წვა, ორთქლის ღრუბლის აფეთქება და მცირე აფეთქება. თუ ვიყენებთ ცხრილ 45-ს და უვნებელი მოდელის მდგრადობას, მაშინ დოზის კონცეფცია უნდა დადგინდეს [111-114]-ის მიხედვით და საშიში შედეგის ალბათობა ისაზღვრება პრობიტ-ფუნქციით:

$$\mathbf{Pr} = \mathbf{a} + \mathbf{bx} , \quad (130)$$

სადაც \mathbf{Pr} არის პრობიტ-ფუნქცია, რომელიც შეესაბამება საშიშროების ალბათობას, \mathbf{a}, \mathbf{b} - აღწერილი სცენარის მუდმივები; \mathbf{x} - ზემოქმედობის ვექტორი.

ზემოქმედობა აღწერს დოზის ცნებას, რომელიც წარმოადგენს ფიზიკური და დროის ერთობლივი ექსპოზიციის ეფექტს.

$$\mathbf{x} = \int \mathbf{C}^n dt , \quad (131)$$

სადაც \mathbf{C} არის ფიზიკური ეფექტი, t_f, t_i - ექსპოზიციის დრო, n - ექსპონენტის მაჩვენებელი, რომელიც ადგენს დროის და ფიზიკური ეფექტის ფაქტორების წონით მნიშვნელობას. კავშირი \mathbf{P} ალბათობასა და შესაბამის პრობიტს შორის, მოყვანილია შემდეგ განტოლებაში

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mathbf{Pr}-5} \exp\left(-\frac{\mathbf{x}^2}{2}\right) d\mathbf{x} . \quad (132)$$

ამგვარად მიღებულია, დაზიანების ზღვრების თერმული გამოსხივების და ჭარბი წნევისათვის დამოკიდებულება, მიღებული საშიშროების ალბათობებისათვის (ცხრილი 47).

ცხრილი 47

საშიშროების ალბათობები

ფიზიკური მოვლენა	თერმული გამოსხივება/ ჭარბი წნევა	საშიშროების ალბათობა (%)
აფეთქება	0,3 ბარი	100
	0,16 ბარი	1
	0,07 ბარი	0
	0,03 ბარი	0
ჭავლური წვა	38,5 კვტ/მ ²	99
	19,5 კვტ/მ ²	50
	12,5 კვტ/მ ²	6,5
	9,8 კვტ/მ ²	1
	5 კვტ/მ ²	0
მცირე აფეთქება	LFL	100
	½ LFL	0

თავი 6. მომსახურების ხარისხის მართვის და საიმედოობის საკითხების გამოკვლევის შედეგების გამოყენება გაზის ტრანსპორტირებისა და განაწილების სექტორში მოქმედი საწარმოების ფინანსური სტაბილურობის ანალიზისას

წარმოდგენილი ნაშრომი საშუალებას აძლევს ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების და განაწილების ლიცენზიატებს შეაფასონ საკუთარ გაზგამანაწილებელ ქსელში არსებული რისკების დონე, რაც გულისხმობს მტყუნების საფრთხეების და შემდგომში მასზე დაყრდნობით შესაძლო ავარიების რეალიზების პირობებში სოციალური რისკების იდენტიფიცირებას. ეს უკანასკნელი კი ხელს შეუწყობს სოციალური საფრთხეების მინიმიზებას, კომპანიის მიერ ადეკვატური მოკლე, საშუალო და გრძელვადიანი საინვესტიციო გეგმების შემუშავებას და საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის (შემდგომში - კომისია) მიერ გონივრული და მიზანშეწონილი სატარიფო პოლიტიკის გატარებას ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირებისა და განაწილების სექტორებში. ნაშრომის ერთ-ერთ მთავარ მიზანს წარმოადგენს ლიცენზიატი კომპანიების ხელშეწყობა გაზსადენების ოპერირებასთან დაკავშირებული რისკების იდენტიფიცირებისა და მათი შემდგომი პრევენციის კუთხით, თუმცა აღნიშნული საკითხის სატარიფო რეგულირების პროცესისგან განყენებულად განხილვა არ მოგვცემს რეალისტურ სურათს და ვერ ჩაითვლება მიზანშეწონილად.

მას შემდეგ რაც ნაშრომში მოყვანილი მეთოდური მიდგომების გამოყენებით მოხდება მტყუნების საფრთხეების განსაზღვრა და შემდგომში უკვე სოციალური რისკების რაოდენობრივი მაჩვენებლების შეფასება, საწარმოს ექნება საშუალება მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით მოახდინოს ქსელის უბნების პრიორიტეტიზაცია რისკის დონეების მიხედვით და პირველ ეტაპზე შეიმუშაოს შესაბამისი მოკლე, ხოლო შემდგომ ეტაპზე უკვე საშუალო

და გრძელვადიანი საინვესტიციო გეგმა, მათი პრევენციისა და მინიმიზაციის მიზნით. გონივრული საინვესტიციო გეგმა კი თავის მხრივ, გაზსადენის ქსელის უსაფრთხოების მაღალი დონისა და ავარიების სიხშირის შემცირების ხარჯზე დაკარგული ბუნებრივი აირისა და მომხმარებლისათვის მიუწოდებელი მომსახურების მოცულობის შემცირების წინაპირობას წარმოადგენს. საყურადღებოა, რომ ქსელში ავარიების ინტენსივობა და შედეგად წარმოქმნილი ბუნებრივი აირის დანაკარგი პირდაპირ გავლენას ახდენს კომპანიის ფინანსურ მდგომარეობაზე. დანაკარგების მაღალი დონე საფრთხეს უქმნის ტრანსპორტირების და განაწილების ოპერატორების საიმედო და უწყვეტ ფუნქციონირებას.

ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების და განაწილების საქმიანობა წარმოადგენს ბუნებრივად მონოპოლიურ საქმიანობას და შესაბამისად, ექცევა კომისიის რეგულირების სფეროში.

კომისია ელექტროენერგეტიკისა და ბუნებრივი გაზის შესახებ საქართველოს კანონით განსაზღვრული ვალდებულებებისა და უფლებამოსილების ფარგლებში ადგენს კანონქვემდებარე აქტებს, რომლითაც განსაზღვრავს რეგულირების წესებსა და პრინციპებს.

განზგამანაწილებელი კომპანიების განაწილების (გატარების) ტარიფების გაანგარიშება ხდება კომისიის 2014 წლის 25 დეკემბრის #33 დადგენილების საფუძველზე დამტკიცებული „ბუნებრივი გაზის ტარიფების გაანგარიშების მეთოდოლოგიის“ საფუძველზე. კომისიის მიერ დადგენილმა ტარიფმა უნდა უზრუნველყოს ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების და განაწილების კომპანიებისათვის სატარიფო წლის მანძილზე საჭირო შემოსავლების ფორმირება.

სატარიფო მეთოდოლოგიის შესაბამისად ბუნებრივი გაზის განაწილების და გატარების ტარიფები დგინდება ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელი ქსელის წნევის საფეხურების მიხედვით:

- ა) მაღალი წნევა (1.2- 0.3 მპა);
- ბ) საშუალო წნევა (0.3-0.005 მპა);
- გ) დაბალი წნევა (<0.005 მპა);

განაწილების და გატარების ტარიფი სატარიფო წლისთვის იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$T_{i \text{ Gan } (t+1)} = \frac{RCB_{i (t+1)}}{G_{i \text{ Gan } (t+1)}} \times 100, \quad (133)$$

სადაც:

- $T_{i \text{ Gan } (t+1)}$ – წნევის i -ური საფეხურის განაწილების ტარიფი (თეთრი/მ³);
- $RCB_{i (t+1)}$ – განაწილების ლიცენზიატის რეგულირებადი დანახარჯების ბაზის ღირებულება წნევის i -ურ საფეხურზე სატარიფო წლისთვის (ლარი);
- $G_{i \text{ Gan } (t+1)}$ – წნევის i -ურ საფეხურზე გამანაწილებელი ქსელის საშუალებით განაწილებული და გატარებული ბუნებრივი გაზის საპროგნოზო მოცულობების ჯამი სატარიფო წლისთვის (მ³);
- i – გამანაწილებელი ქსელის წნევის შესაბამისი საფეხური.

რეგულირებადი დანახარჯების ბაზა ანუ მისაღები შემოსავლები ფორმირდება ისეთი კომპონენტების ერთობლიობით, როგორცაა: კაპიტალური დანახარჯები, საოპერაციო დანახარჯები, ნორმატიული დანაკარგების ღირებულება და დანახარჯების კორექტირების მაჩვენებელი და იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$RCB_{(t+1)} = CAPEX_{(t+1)} + OPEX_{(t+1)} + CNL_{(t+1)} + CORR_{(t+1)}, \quad (134)$$

სადაც:

- $RCB_{(t+1)}$ – რეგულირებადი დანახარჯების ბაზა სატარიფო წლისთვის (ლარი);
- $CAPEX_{(t+1)}$ – კაპიტალური დანახარჯები სატარიფო წლისთვის (ლარი);

OPEX_(t+1) – საოპერაციო დანახარჯები სატარიფო წლისთვის (ლარი);

CNL_(t+1) – ნორმატიული დანაკარგების ღირებულება სატარიფო წლისთვის (ლარი);

CORR_(t+1) – დანახარჯების კორექტირების მაჩვენებელი, რომელიც უზრუნველყოფს სატარიფო წლის დანახარჯების ბაზაში კორექტირებას დაქვემდებარებული სატარიფო წლის ფაქტობრივ და დაგეგმილ დანახარჯებს შორის სხვაობის, არასაოპერაციო საქმიანობიდან მიღებული შემოსავლის სატარიფო მეთოდოლოგიით განსაზღვრული პრინციპებით ასახვას (ლარი).

სატარიფო რეგულირების განხორციელებისას ხდება ყველა კაპიტალური და საოპერაციო დანახარჯის მიზანშეწონილობის დადგენა, რაც გულისხმობს იმას, რომ ტარიფში აისახება მხოლოდ ის დანახარჯი, რომელიც აუცილებელი და მიზანშეწონილია რეგულირებადი საქმიანობის განხორციელების უზრუნველსაყოფად.

შესაბამისად, კაპიტალური და საოპერაციო რემონტების დაგეგმვა და განხორციელება უნდა მოხდეს ქსელის მდგომარეობის სწორი შეფასების, პრობლემური მონაკვეთების იდენტიფიცირების, რისკების ზუსტი შეფასების და მოხმარების დინამიკის გათვალისწინებით, რომლის შესაძლებლობასაც იძლევა სადისერტაციო ნაშრომი.

რაც შეეხება ბუნებრივი გაზის დანაკარგებს, მისი მოცულობა პირდაპირ არის დამოკიდებული ქსელის მდგომარეობაზე. ბუნებრივი გაზის განაწილების (გატარების) ტარიფში აისახება მხოლოდ ნორმატიული დანაკარგების ღირებულება, რომლის ოდენობა დგინდება კომისიის მიერ. ნორმატიული დანაკარგის ღირებულება იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$\mathbf{CNL}_{(t+1)} = \mathbf{P}_{(t+1)} \times \mathbf{G}_{\text{Dan } (t+1)} / 100, \quad (135)$$

სადაც:

$CNL_{(t+1)}$ – ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების ან გამანაწილებელ ქსელში არსებული ბუნებრივი გაზის ნორმატიული დანაკარგების ღირებულება სატარიფო წლისთვის (ლარი);

$\bar{P}_{(t+1)}$ – სატარიფო წლისთვის ბუნებრივი გაზის შესყიდვის საშუალო შეწონილი ფასი (თეთრი/მ³);

$G_{Dan (t+1)}$ – ბუნებრივი გაზის ნორმატიული დანაკარგების მოცულობა სატარიფო წლისთვის (მ³).

ლიცენზიატი საწარმოს ფაქტობრივ დანაკარგსა და კომისიის მიერ დადგენილ ნორმატიულ დანაკარგს შორის სხვაობა წარმოადგენს ზენორმატიულ დანაკარგს, რომლის ღირებულებაც არის საწარმოს ზარალი, ვინაიდან იგი არ ანაზღაურდება ტარიფით. შესაბამისად, რაც უფრო დიდია ავარიების რიცხვი განაწილებისა და ტრანსპორტირების ქსელებში, მით მეტია ზენორმატიული დანაკარგის მოცულობა და საწარმოს ზარალი, რამაც შესაძლოა საფრთხე შეუქმნას მის ფუნქციონირებას და კითხვის ნიშნის ქვეშ დააყენოს ქვეყნის ენერგოუსაფრთხოება.

ყოველივე ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია გონივრული და თანმიმდევრული საინვესტიციო პოლიტიკის შემუშავება და შემდგომში მისი განხორციელება ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირებისა და განაწილების ლიცენზიატების მიერ მათი ფინანსური სტაბილურობისა და შესაბამისად მომხმარებელთა და ქვეყნის ენერგოუსაფრთხოებისათვის.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, რეგულირებადი დანახარჯების ბაზის (RCB) ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს კაპიტალური დანახარჯები (CAPEX) წარმოადგენს. კაპიტალური დანახარჯების ოდენობა დამოკიდებულია რეგულირებად საქმიანობაში ჩართული აქტივების ღირებულებაზე. ბუნებრივი გაზის გამანაწილებელი კომპანიების რეგულირებადი აქტივების უდიდეს ნაწილს კი წარმოადგენს ბუნებრივი გაზის განაწილების ქსელი. შპს

„კატრანსგაზ-თბილისის“ მაგალითზე გამანაწილებელი ქსელის ღირებულება მთლიანი აქტივების თითქმის 90%-ს შეადგენს. ქსელის ღირებულება კი დამოკიდებულია ერთი მხრივ განაწილების არეალის გაფართოების შემთხვევაში ახალი ქსელის მშენებლობაზე, ხოლო მეორე მხრივ არსებული ქსელის რეაბილიტაციაზე. ამ უკანასკნელის მიღწევა კი შესაძლებელია აუცილებელი კაპიტალური რემონტების (ინვესტიციების) განხორციელების შედეგად. აუცილებელი და მიზანშეწონილი ინვესტიციები აგრეთვე გულისხმობს იმას, რომ სწორად უნდა იქნეს შეფასებული გადაჭარბებული კაპიტალიზაციის რისკი, რაც დროის მოკლე მონაკვეთში დიდი ოდენობით ინვესტიციების განხორციელებას გამორიცხვას ისეთი მიმართულებებით, სადაც ამის აუცილებლობა არ არსებობს, რაც თავის მხრივ გამოიწვევს ტარიფის უსამართლოდ ზრდას. ასეთ შემთხვევაში აუცილებელია აგრეთვე მოხდეს იმის ანალიზიც თუ რამდენად მნიშვნელოვანია აღნიშნული კაპიტალური დანახარჯები მომსახურების ხარისხის შენარჩუნების ან ზრდის კუთხით. შესაბამისად, საინვესტიციო გეგმების შემუშავების პროცესში უზრუნველყოფილ უნდა იქნეს კომისიის ჩართულობა და დაგეგმილი კაპიტალური დანახარჯების მიზანშეწონილობის შეფასება. ამ კუთხით სასურველია, ლიცენზიატი საწარმოების მიერ მოხდეს გეგმების წინასწარ წარდგენა და მათი შეთანხმება კომისიასთან. სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი რისკების შეფასების მოდელი კი დაეხმარება კომისიას საწარმოების მიერ წარმოდგენილ გეგმებში პრიორიტეტული საინვესტიციო პროექტების შერჩევაში. ხოლო, აღნიშნული მექანიზმი უზრუნველყოფს ბუნებრივი აირის ტრანსპორტირების და განაწილების ქსელების სტაბილურ და თანმიმდევრულ განვითარებას კომპანიების ფინანსური მდგრადობისა და მომხმარებელთა ინტერესების გათვალისწინებით.

ბუნებრივი გაზის განაწილების და ტრანსპორტირების საქმიანობის საბოლოო მიზანს მომხმარებლების უწყვეტი გაზომომარაგება წარმოადგენს,

წყვეტების სიხშირე და მათი ხანგრძლივობა კი პირდაპირ გავლენას ახდენს მომსახურების ხარისხზე. კომისიის ერთ-ერთ მთავარ ფუნქციას მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებაზე ზრუნვა და ამ მიმართულებით მომხმარებელთა ინტერესების დაცვა წარმოადგენს. ამდენად მნიშვნელოვანია, წყვეტების ხანგრძლივობისა და მათი გამომწვევი მიზეზების მუდმივი მონიტორინგი. წყვეტა ბუნებრივი გაზის მიწოდებისას შესაძლებელია გამოწვეული იყოს სხვადასხვა მიზეზით, მათ შორის ქსელში მომხდარი ავარიებით ან გეგმიური რემონტებით. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ქსელში ავარიების შედეგად გამოწვეული წყვეტების სიხშირის მაჩვენებლის შემცირება თანმიმდევრული და გონივრული საინვესტიციო პოლიტიკის გატარების შედეგად შეიძლება იქნეს მიღწეული. რაც შეეხება გეგმიური რემონტებით გამოწვეულ გაზომარაგების შეწყვეტას, მიუწოდებელი მომსახურების მოცულობისა და აღნიშნული ფაქტით გამოწვეული უარყოფითი შედეგების მინიმიზაციის მიზნით ლიცენზიატ საწარმოებს მართებთ ადეკვატური მექანიზმის შემუშავება. კერძოდ, გეგმიური რემონტებისას ბუნებრივი აირის მიწოდების შეწყვეტის შედეგად დამდგარი უარყოფითი შედეგების მინიმუმამდე შემცირებისთვის, ხშირად მიზანშეწონილია სამუშაოები განხორციელდეს დღე-ღამის იმ მონაკვეთში, როცა მოხმარება მინიმალურია. ასევე გასათვალისწინებელია სეზონურობის ფაქტორიც. შესაბამისად, დღის წესრიგში დგება ბუნებრივი აირის მოხმარების დინამიკის შესწავლა და შემდგომში მასზე დაყრდნობით მოხმარების დღე-ღამური პროგნოზირების მეთოდების შემუშავების აუცილებლობა.

აღნიშნული პრობლემის გადაჭრის მიზნით, შემუშავებულ იქნა და ნაშრომში წარმოდგენილია ბუნებრივი აირის დღე-ღამური მოხმარების პროგნოზირების მეთოდოლოგია ფურიეს მწკრივების გამოყენების საშუალებით შპს “ყაზტრანსგაზ-თბილისის” მოხმარების მაგალითზე. შესაბამისად, სადისერტაციო ნაშრომი საშუალებას მისცემს ლიცენზიატ საწარმოებს,

დანერგონ ბუნებრივი აირის მოხმარების პროგნოზირების თანამედროვე მექანიზმი და ამით ხელი შეუწყონ მომსახურების ხარისხის დონის ამაღლებას და ფინანსური ზარალის მინიმიზაციას.

აღსანიშნავია, რომ ნაკლები მოცულობის ტრანსპორტირების ან განაწილების და გატარების შემთხვევაში კომისია უზრუნველფს ვერ მიღებული შემოსავლის კორექტირებას შემდეგი ფორმულით:

$$cRe v_{(t+1)} = [(aG_{(t-1)} - pG_{(t-1)}) \times T_{(t-1)}] \times (1 + WACC_{(t-1)}) \times (1 + WACC_t), \quad (136)$$

სადაც:

cRe v_(t+1) – შემოსავლების კორექტირებული ღირებულება სატარიფო წლისთვის (ლარი);

aG_(t-1) – ტრანსპორტირებული ან განაწილებული და გატარებული ბუნებრივი გაზის ფაქტობრივი მოცულობა სატესტო წლისთვის (ლარი);

pG_(t-1) – ტრანსპორტირებული ან განაწილებული და გატარებული ბუნებრივი გაზის დაგეგმილი მოცულობა სატესტო წლისთვის (ლარი);

T_(t-1) – ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების ან განაწილების ტარიფი სატესტო წლისთვის (ლარი);

WACC – დროში ფულის ღირებულების განაკვეთი, რომელიც კაპიტალის საშუალო შეწონილი ღირებულების (WACC) ტოლია (%).

თუმცა, კორექტირების მექანიზმი არ გაითვალისწინება, თუ ტრანსპორტირებული ან განაწილებული და გატარებული ბუნებრივი გაზის ფაქტობრივი მოცულობის შემცირება დაგეგმილთან მიმართებაში გამოწვეულია საწარმოს მიზეზით. გამომდინარე აქედან, ძალიან მნიშვნელოვანია გაანალიზდეს თუ რა იყო მიზეზი დაგეგმილ მოცულობაზე ნაკლები მოცულობის ტრანსპორტირების ან განაწილების და გატარების. ერთი

მხრივ, ეს შეიძლება იყოს მოხმარების დინამიკის შემცირება, მეორე მხრივ კი ხშირი ავარიები, ავარიების აღდგენაზე დახარჯული გაუმართლებლად დიდი დრო, გეგმური რემონტების განხორციელება იმ პერიოდში, როდესაც ადგილი აქვს მოხმარების ზრდას და სხვა.

სადისერტაციო ნაშრომი, ერთი მხრივ, კომპანიას აძლევს შესაძლებლობას შეაფასოს შესაძლო რისკები და მაქსიმალურად თავიდან აირიდოს ფინანსური ზარალი, როგორც საკუთარი ბრალეულობით ვერ მიწოდებული მომსახურების შედეგად ვერ მიღებული შემოსავლების, ასევე მომსახურების ხარისხის გაუარესებით დაკისრებული სანქციების სახით, ხოლო მეორე მხრივ კომისიას ეხმარება გაანალიზოს რამდენად შესაძლებელი იყო კომპანიის მხრიდან აღნიშნული რისკების თავიდან არიდება.

აღსანიშნავია, რომ ზემოთ განხილული პრობლემატური საკითხების შემდგომი ანალიზის მიზნით მოძიებულ იქნა და ნაშრომში წარმოდგენილია ინფორმაცია შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ მიერ 2013, 2014 და 2015 წლებში განხორციელებული ინვესტიციების, ქსელის სიგრძის, გეგმიური და არაგეგმიური რემონტებისა და გაზმომარაგებისას დაფიქსირებული წყვეტების შესახებ. საყურადღებოა, რომ განხორციელებული ინვესტიციების მოცულობა 2015 წელს 22%-ით გაზრდილია 2014 წელთან შედარებით, თუმცა პარალელურად 42%-ით (238,896 ერთეული) არის გაზრდილი გაზმომარაგების არაგეგმიური წყვეტების რიცხვი ავარიების შედეგად. ამასთან, დანაკარგების მოცულობა უცვლელია და 10,3% შეადგინა როგორც 2014, ასევე 2015 წელს. წარმოდგენილი მაჩვენებლები, კიდევ ერთხელ ხაზს უსვამს, განსახორციელებელი ინვესტიციების დაგეგმვის, შესაბამისი სამიზნე მაჩვენებლების განსაზღვრის და მათი კომისიათა წინაწარ შეთანხმების აუცილებლობას (ცხრილი 48).

შპს „ცაზტრანსგაზ-თბილისი“ 2013, 2014 და 2015 წლის ტექნიკური მონაცემები

	2013	2014	2015
ავარიების რაოდენობა	1064	1131	1384
საშუალო წნევა	402	339	510
დაბალი წნევა	662	792	874
გაზმარეგულირებელ ნაგებობებზე	98	0	0
აბონენტების რაოდენობა	367 362	378 356	392 889
გაზმომარაგების შეწყვეტა (აბონენტი) არაგეგმიური	154 912	238 896	338 189
გაზმომარაგების შეწყვეტა (აბონენტი) გეგმიური	93 798	93 955	182 946
ინვესტიციები (ლარი)	405 048	5 215 428	6 379 248
ქსელის სიგრძე (კმ)	4 022.3	4 064.2	4 237.9
დანაკარგები	13.7%	10.3%	10.3%

შედეგების განსჯა

სამუშაოს აქტუალობას განაპირობებს ის გარემოებები, რომ გაზგამანაწილებელ ქსელებზე ავარიებს ახასიათებს მნიშვნელოვანი მასშტაბურობა და გარემოსა და ადამიანებზე უარყოფითი ზემოქმედების ფორმების მრავალფეროვნება. გაზგამანაწილებელი ქსელების ექსპლუატაციისას ერთ-ერთ აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს გაზსადენების უსაფრთხო ექსპლუატაციის უზრუნველყოფა, რომელიც წყდება უმთავრესად სარემონტო-აღდგენითი სამუშაოების დროულად ჩატარების ხარჯზე. დაზიანებებისა და ავარიების ადეკვატური გამაფრთხილებელი ზომების ასარჩევად აუცილებელია რისკის რაოდენობრივი შეფასების სამეცნიერო-მეთოდური ბაზის ქონა. ამ პრობლემის გადასაწყვეტად მნიშვნელოვანია, რომ გარემოსა და ადამიანების დაცვა ინტეგრირებულ იქნეს ინჟინრული გადაწყვეტილებების მიღების პროცესში, რომელიც ეკონომიკური დასაბუთების საფუძველზე მინიმიზირებას გაუკეთებს ნეგატიური ზეგავლენების შედეგებს ყველაზე რაციონალური გზებით.

გაზგამანაწილებელი ქსელების უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად რისკის ანალიზის მეთოდოლოგიის გამოყენება ითხოვს მეცნიერულად დასაბუთებულ, მოცემულ პრობლემატიკასთან ადაპტირებულ ავარიების წარმოქმნის ალბათობის პროგნოზების მეთოდიკების დამუშავებასა და გაზსადენების მიერ გადამზიდი საშიში ნივთიერებების გამოტყორცნების შესაძლო შედეგების ანალიზს. გაზგამანაწილებელ ქსელებზე ავარიების რისკის ხარისხის შეფასებისა და გაჟონვების განსაზღვრასთან დაკავშირებული ანგარიშის მომზადებისას გამოიყენება სხვადასხვა მოდელები და მეთოდიკები. აღნიშნულ მეთოდიკებს გააჩნიათ თვალსაჩინო ფასეულობა ავარიული გაჟონვების ხარისხის შეფასების დროს. გაზგამანაწილებელ ქსელებზე ავარიების დროს ეკოლოგიური რისკის შეფასების არსებული მეთოდების ანალიზი აჩვენებს, რომ სამწუხაროდ არ არსებობს ერთიანი მეთოდიკა,

რომელიც განსზღვრავდა რისკისა და ეკოლოგიური ზარალის მაჩვენებლებს. მოქმედი მეთოდები განცალკევებულია და ატარებენ ფრაგმენტულ ხასიათს. ამგვარად, გაზგამანაწილებელ ქსელებზე ავარიების დროს ეკოლოგიური, ეკონომიკური და სოციალური რისკის შეფასების მეთოდური აპარატის შემუშავება წარმოადგენს ძალზე მნიშვნელოვან ამოცანას და გააჩნია დიდი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა.

დღეისათვის საქართველოში ძნელად მოიძებნება სამეცნიერო ნაშრომები, რომელიც ეხება ბუნებრივი გაზის სექტორს. აგრეთვე, არ არსებობს მაგისტრალური გაზსადენების (ტრანსპორტირების სისტემა) და გაზგამანაწილებელი ქსელების მდგომარეობის და ავარიული გაგლეჯის შედეგების პროგნოზირების, გარემოს დაცვითი ღონისძიებების დაგეგმვისათვის აუცილებელი მეცნიერულად დასაბუთებული, დასრულებული, მეთოდოლოგიურად გამართლებული, ნატურულ მონაცემებზე და თეორიაზე დამყარებული მეთოდი. ასევე, სრულად არ არის შემუშავებული ნატურულ გამოკვლევებზე და თეორიაზე დაყრდნობილი ისეთი მეთოდიკა, რომლის თანახმადაც შესაძლებელი იქნებოდა გაზგამანაწილებელი ქსელების საიმედოობის და უსაფრთხოების მართვა. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, აღნიშნული პრობლემის მეცნიერული გადაწყვეტა აუცილებელი და მეტად **აქტუალურია**.

ობიექტების გამოკვლევის მეთოდები. გაანგარიშებების არსებული ალგორითმები თეორიული განზოგადებისა და პრაქტიკული შემოწმების საშუალებას იძლევა, კერძოდ: 1. ავარიების დროს რისკის შეფასების მეთოდები უნდა ითვალისწინებდეს ავარიების რეალიზაციისას წარმოქმნილ მოვლენებსა და ეფექტებს, ავარიის სხვადასხვა სცენარის წარმოშობისა და განვითარების სიხშირეს. 2. მეთოდებმა უნდა გადაწყვიტოს გაზგამანაწილებელი ქსელების პოტენციური საშიშროების მიყენების რაოდენობრივი შეფასების ამოცანა. ამასთან, რისკის ანალიზისა და ზარალის შეფასების შედეგები უნდა იქცეს

გაზგამანაწილებელი ქსელების უბნების „სუსტი ადგილების“ განსაზღვრის საფუძვლად.

კვლევის ობიექტად შერჩეულია საქართველოს სათბობ-ენერგეტიკულ კომლექსში, გაზის სექტორში არსებული გაზგამანაწილებელი მეურნეობების მდგომარეობა, კერძოდ, შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ გაზგამანაწილებელი მეურნეობა. საკითხის თანამედროვე მოთხოვნების დონეზე დამუშავების მიზნით გაანალიზებულია საქართველოს გაზის სექტორის განვითარების პროგნოზირების გამოცდილება და დასმულია საქართველოში გაზის სექტორის სტრუქტურის საშუალოვადიანი პროგნოზირების ამოცანა. დასახულია მისი განხორციელების კომპლექსური პროგრამა. ამ პროგრამის შესაბამისად კვლევის საწყის ეტაპზე ჩატარებულია საქართველოში ენერგეტიკული რესურსების მდგომარეობის ანალიზი 1999-2012 წლებში. სამუშაოს შემდგომი ეტაპი მიეძღვნა საქართველოში გაზის სექტორში სტატისტიკური და ნატურული მონაცემებზე დაყრდნობით პრობლემის კვლევას და ქვეყანაში გაზის სექტორში საბაზო საინფორმაციო ბაზის შექმნას. გარდა ამისა, ამ მოდელით მიღებული გაზმომარაგების რისკ-ფაქტორების საპროგნოზო პარამეტრების ანალიზი ჩატარდა ექსპერტული და ანალიზური მეთოდებით.

შესაბამისად **დისერტაციის მიზანს** წარმოადგენს შეიქმნას მეცნიერულად დასაბუთებული, ნატურულ მონაცემებზე დაყრდნობილი თეორია, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელი იქნება ბუნებრივი გაზის სექტორის რეგულირება, გაზგამანაწილებელი ქსელების საიმედოობის გაზრდა, გაზის მოხმარების პროგნოზის დადგენა, მოსალოდნელი ავარიების შემთხვევაში სტრესული ეკოლოგიური მოვლენების რისკების პროგნოზირება, გარემოსდაცვითი ღონისძიებების შემუშავება და ეკონომიკური ეფექტურობის ამაღლება. ნაშრომში მოცემულია გაზგამანაწილებელი ქსელების ხარისხის დონის დიფერენცირებული

შეფასებისა და მილსადენის უბნების საიმედოობის პარამეტრების ცვლილებათა პროგნოზირების საფუძველზე ავარიების დროს, სამშენებლო კონტროლის პროცესში გამოვლენილ არა კრიტიკულ ლოკალურ დეფექტებთან ერთად გაზგამანაწილებელი ქსელების რისკის და საიმედოობის გაზრდის შესაფასებელი მეცნიერულად დასაბუთებული მეთოდები. ამიტომ, ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს გაზგამანაწილებელი ქსელების ექსპლუატაციისას საწარმოო უსაფრთხოების გაზრდა მილსადენებზე ავარიების რისკის და გაზის მოხმარების პროგნოზის ანალიზის მეთოდური მიდგომების სრულყოფის საფუძველზე.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზნის მისაღწევად ფორმულირებული იყო შემდეგი მეცნიერული ამოცანა - გაზგამანაწილებელი ქსელების ავარიის დროს რისკის შესაფასებლად ავარიების რისკის ანალიზის თეორიის შედეგებისა და ავარიების დროს გარემოსა და ადამიანებისთვის მიყენებული ზარალის შეფასების არსებული მეთოდების გამოყენების საფუძველზე მეთოდური აპარატის დამუშავება. აგრეთვე ბუნებრივი გაზის დღე-ღამური მოხმარების პროგნოზის დადგენა.

აგრეთვე, მიზნის მისაღწევად დასმული და შემდგომ ამოხსნილ იქნა შემდეგი ძირითადი ამოცანები:

1. თეორიულად შესწავლილია შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ გაზგამანაწილებელი ქსელის მისახმარისი, ნორმალური და დაღლილობითი მტყუნებების, აღდგენების და კომპლექსური საიმედოობის მახასიათებლები. დადგინდა ნამუშევარის თეორიული ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ანალიზური გამოსახულებები და შემუშავებულია მათი შესაბამისი მტყუნების საფრთხეები და საიმედოობის ფუნქციები;

2. საქართველოს გაზის სექტორში რისკის ანალიზის და გადაწყვეტილების მიღების ასპექტები, მათი სტოქასტიკური პროცესების ანალიზი, ავარიების და დაზიანების გათვალისწინებით;

3. ნატურულ გამოკვლევებზე და არსებულ კვლევებზე დაყრდნობით, ისეთი მოდიფიცირებული მეთოდის შექმნა, რომლის თანახმად შესაძლებელია დღე-ღამური გაზის მოხმარების პროგნოზის გაანგარიშება.

სადისერტაციო ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში: რისკის შეფასების მეთოდური აპარატი საშუალებას იძლევა გაზგამანაწილებელი ქსელების მიერ გარემოსა და ადამიანებისთვის მიყენებული პოტენციური საშიშროების რაოდენობრივი შეფასების ამოცანების გადაწყვიტას, რომლებიც განსახვევებულია არსებულისაგან იმით, რომ რეალიზაციის დროს გათვალისწინებულია დაზიანების ყველა მდგენელი. დამუშავებულია გაზგამანაწილებელი ქსელების „სუსტი ადგილების“ განმსაზღვრელი მეთოდიკა, რომელიც განსხვავდება არსებული მეთოდიკებისაგან იმით, რომ „სუსტი ადგილები“ განისაზღვრება რისკის ანგარიშის საშუალებით. შემუშავებულია მოდიფიცირებული მეთოდიკა, რომლის საშუალებით ხდება გაზგამანაწილებელი ქსელების სისტემების ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ნარევის ფუნქციების დადგენა.

პირველად მიღებულია ურთიერთკორელაციური კავშირები დღე-ღამურ მოხმარებასა და ბუნებრივი გაზის მოხმარებას შორის, სხვადასხვა დღე-ღამეების და თვეების საშუალო სიდიდეებისათვის. დადგენილია მოხმარების უთანაბრობის კოეფიციენტები სხვადასხვა ქალაქისათვის.

ნატურული და თეორიული კვლევების საფუძველზე დამუშავებულია გაჟონვებისა და ავარიების მოცულობათა განსაზღვრა. საქართველოს გაზის სექტორში დადგენილია მტყუნების საფრთხეების და აღდგენების ინტენსივობების ინტეგრალური მახასიათებლები, რომლებიც შექმნიან საორინტაციო ბაზას. ნატურული და თეორიული კვლევების საფუძველზე, შემუშავებულია მოდიფიცირებული მეთოდიკა. ნატურულმა და ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ შესაძლოა დადგინდეს შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ გაზგამანაწილებელი ქსელების საიმედოობის

ერთეულოვანი (მტყუნების საფრთხეების და აღდგენების ინტენსივობის ინტეგრალური მახასიათებლები) და კომპლექსური მაჩვენებლები, რომლებიც ქმნიან გაზგამანაწილებელი მეურნეობის საორიენტაციო საინფორმაციო ბაზას.

ნატურული და თეორიული კვლევების მიხედვით შემუშავებულია მოდიფიცირებული მეთოდოლოგია, რომელიც ეფუძნება დღე-ღამური და თვიური გაზის მოხმარების პროგნოზირებას ფურიეს კოეფიციენტების საშუალებით.

დასკვნები

1. არსებული ლიტერატურის ანალიზის და მსოფლიოში გაზის სექტორის მიმოხილვის შედეგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ დღეს საქართველოში გაზის სექტორში სუსტადაა შესწავლილი საიმედოობის, პრევენციის ღონისძიების და გადაწყვეტილების მიღების პრინციპები, რაც მოითხოვს დამატებით კვლევას.

2. გაზგამანაწილებელი ქსელების რისკის შეფასებები წარმოადგენს საშიში საქმიანობის დეკლარირების რელიზაციის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პირობას. ამიტომ, ჩვენ მიერ, ნაშრომში დამუშავებულია გაზგამანაწილებელი ქსელების ავარიებისას დაზიანებების რისკის შეფასების მეთოდური აპარატი, რომელიც არსებულისგან იმით განსხვავდება, რომ მისი რელიზაციის დროს გათვალისწინებულია ყველა შემადგენელი. აგრეთვე დამუშავებულია გაზგამანაწილებელი ქსელების უბნების "სუსტი ადგილების" განსაზღვრის მეთოდიკა, რომელიც განსხვავებულია არსებულისგან იმით, რომ "სუსტი ადგილები" განისაზღვრება რისკის გაანგარიშების საშუალებით.

3. ნატურულმა და ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა ცხადყო საქართველოს გაზგამანაწილებელი მეურნეობების საიმედოობის მაჩვენებლების დადგენა, კერძოდ მტყუნების საფრთხეების და აღდგენების ინტენსივობების ინტეგრალური მახასიათებლების დადგენა, რომლებიც ქმნიან საორინტაციო საინფორმაციო ბაზას.

4. პირველად შექმნილია გაზმომარაგების და გაზგამანაწილებელი ობიექტების რისკ-ფაქტორების თვისობრივი მოდელის შეფასება და შესრულდა რისკ-ფაქტორის თვისობრივი მოდელის შეფასების ამოცანა.

5. განსხვავებით არსებული მეთოდებისაგან, ჩატარებულია გაზგამანაწილებელი ქსელების მტყუნებისა და აღდგენების რაოდენობრივი მახასიათებლების შეფასება. კერძოდ, დადგენილია ექსპლუატაციის სრული

დროის განმავლობაში დინამიკური პროცესის აღწერა ალბათობის განაწილების ნარევის ფუნქციების საშუალებით. მიღებული ფუნქციის საშუალებით შესაძლოა მტყუნებისა და აღდგენების პროცესის მართვა.

6. ჩვენ მიერ პირველად მიღებულია ურთიერთკორელაციური კავშირი დღელამურ მოხმარებასა და სხვა თვეებს შორის - კერძოდ, მიღებულია ახალი შედეგი: წარმოდგენილია ავტოკორელაციის და ურთიერთკორელაციის ფუნქციები არსებული და პროგნოზული მიწოდების მწკრივებისათვის. დადგინდა, რომ ავტოკორელაციური კოეფიციენტები მაღალია და მიისწრაფვის ერთისაკენ.

7. წარმოდგენილი შედეგები მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნეს საქართველოს კანონმდებლობისათვის ნორმატიული დოკუმენტაციის დასამუშავებლად გაზგამანაწილებელი ქსელების ობიექტების უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით, მათ შორის, უსაფრთხოების ტექნიკური რეგლამენტის და გაზგამანაწილებელი ქსელების უსაფრთხოების წესების შექმნაში.

8. ნაშრომში წარმოდგენილი ბუნებრივი გაზის ქსელის ოპერირებასთან დაკავშირებული რისკების იდენტიფიცირებისა და მათი შეფასების, ასევე ბუნებრივი გაზის დღე-ღამური მოხმარების პროგნოზირების მეთოდები საშალებას მისცემს, ერთი მხრივ გაზის ტრანსპორტირებისა და განაწილების ლიცენზიატ საწარმოებს მოახდინოს ქსელის უზნების პრიორიტეტიზაცია რისკის დონეების მიხედვით და შეიმუშაონ შესაბამისი მოკლე, საშუალო და გრძელვადიანი საინვესტიციო გეგმები არსებული საფრთხეების პრევენციისა და მათი რეალიზების შემთხვევაში უარყოფითი შედეგების მინიმიზაციის მიზნით, ხოლო მეორე მხრივ დაეხმარება სემეკს გონივრული სატარიფო პოლიტიკის გატარებაში, რაც ლიცენზიატი საწარმოების ფინანსური მდგრადობისა და საქართველოს ენერჯო სექტორის უსაფრთხო და სტაბილური ფუნქციონირების წინაპირობას წარმოადგენს.

ლიტერატურა

1. Гостинин И.А., Вирясов А.Н., Семенова М.А.. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов. Электронный научный журнал. “Инженерный вестник Дона”. 2007- 2015
<http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1618>
2. РД 03-418-01 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов утв. Постановлением № 30 Госгортехнадзора России от 10.07.2001. 18 с.
3. Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.С., Сорокин. А.А., Феоктистов А.А.. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора. М.: ООО “Анализ опасностей”. 2003. 320 с.
4. Filatov A.V., Yevtyushkin A.V., Bryksin V.M.. Some results of long term geodynamic monitoring of oil and gas fields and power engineering infrastructure in Western Siberia and Arctic by INSAR technique using ERS-2, ENVISAT and ALOS satellite data. Electronic scientific journal "Oil and Gas Business", 2012, Issue 3, pp. 43-73.
5. Надежность распределительных систем газоснабжения.
<http://engineeringystems.ru/n/nadejnost-raspr-sistem-gazosnabjeniya.php>
6. Надежность систем газоснабжения. http://gazovik-gas.ru/katalog/articles/nadejnostj_sistem/
Безопасность и надежность систем газоснабжения. <http://refleader.ru/jgebewujgyfsotr.html>
7. Торчинский Я.Б. Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем. Изд. 2. М., 1988г
8. Главные пути увеличения надежности систем газоснабжения.
http://referatmn.ru/ref_0f3fa8a132fb1ca42cf3496b26b1013a.html
9. Корчгин А.Б., Сердюк В.С., Бокарев А.И. Надежность технических систем и техногенный риск. Уч. пособие: в 2 ч. Омск. Изд. ОмГТУ. 2011г.
<http://www.twirpx.com/file/533598/>
10. Костылев Н.А. Тепловые расчёты, теория газификации, газогенераторы. Томск: Изд-во КУБУЧ, 2003г
11. Копытов В.В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. Изд. Инфра-Инженерия. М., 2012г
http://ua-energy.org/upload/files/Kopytov_liquid%20fuel%20gazification.pdf
12. Седак В. С. Інноваційні технології в діагностиці та експлуатації систем газопостачання. - Харків, 228 с.
13. Седак В. С., Слатова О. Н, Кротикова Е. С, Броневский Ю. Ф. Состояние газопроводных сетей в Украине и перспективы их строительства и реконструкции с применением современных технологий для городских критерий // Науковий вісник будівництва. Харків. 2003г
14. Седак В. С, Слатова О. Н, Кротикова Е. С. Причины трудности обеспечения безопасности систем газоснабжения. Способы увеличения надежности систем газоснабжения // Коммунальное хозяйство городов :Науч.-техн. сб. Вып. 81. - К: техника, 2002.- с. 164-172.

15. Седак В. С., Супонев В. Н., Слатова О. Н. Пути увеличения безопасности систем газоснабжения // Научно-производственный журналчик «Охрана труда» 2009. с. 45-47.
16. Говдяк Р. М., Коснирєв Ю. М.. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної небезпеки // Практичні рекомендації: -Львів, 2007. 160 с.
17. Ионин А. А., Алибеков К. С., Экила В. А. Затиркин С. С. Надежность городских систем газоснабжения . М.: Стройиздат, 1990. 231 с. 18.Каслин Н. Д., Супонев В. Н. Оценка свойства и безопасности инженерно-коммуникационных сетей // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. 84. К. Техника, 2008. с. 164-172.
19. Кулявец Ю. В., Богатов О. И., Литвиненко В. Н., Олейник Г.И.. „Оценка обстановки на объекте хозяйственной деятельности в форсмажорных ситуациях техногенного характера“. Харьков: 2008. 312 с.
20. Sturgess H.A. The choice of classic intervals//J. Am. Statist. march.1926. 47p.
21. Шторм Р. Теория вероятности. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.,: Мир, 1970. 368 с.
22. Heinbold I., Gaede K.W. Ingeniur statistic. Munchen: Wien, Springer Verlag. 1964. 352 s.
23. Mann H.B., Wald A. On the choce of the number of class intervals in the application of the chi square test//Ann. Math. Stat., 1942. V. 13. p 306-317
24. Krumbein W.C. Size frequency distribution of sediments.// J.Sediment.Petrol., 1934, vol.4, p. 65-77.
25. Moiola R.J., Weiser D. Textural parameters: an evaluation.// J.Sediment.Petrol., 1968, v.38, N 1, p.45-53.
26. Расчет показателей надежности системы газораспределения. ОАО "Газпром". М. : Газпром, 2011. 38 с
27. Оценка влияния отказов в системах газораспределения на безопасность и надежность газоснабжения на основе методов риск-анализа. ОАО "Газпром". М. : Газпром, 2011. 42 с.
28. Ланкин Д.И., Тепляков Е.А., Кузнецова Г.А. Мониторинг надежности распределительных инженерных сетей.
<http://www.scienceforum.ru/2013/258/5242>
29. Панов, М.Я.. Мартыненко Г.Н. Оперативное управление городской системой газоснабжения с использованием современных ультразвуковых методов замера расхода газа. Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2008. №3(11).с.100-105
30. Панов М.Я, Мартыненко Г.Н., Дмитриев И.А Алгоритм идентификации гидравлических характеристик управляемых дросселей на ветвях структурного графа абонентских подсистем. Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2008. №3(11). с.106-112
31. Калинин В. М.. Оценка безотказности и прогнозирование долговечности трубопроводов подземной прокладки.
http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3370
32. Joule Processing provides high-quality product. <http://www.obzh.ru/nad/4-3.html>

33. [Tom Irwin, The Rayleigh Distribution \(Revision A\), December 2012](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/similar?doi=10.1.1.366.811&type=ab)
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/similar?doi=10.1.1.366.811&type=ab>
34. [Marcelo Fernandes, Statistics for Business and Economics, 2009, ISBN 978-87-7681-481-6](http://bookboon.com/en/statistics-ebooks-zip)
<http://bookboon.com/en/statistics-ebooks-zip>
35. [Mohammed A. Shayib, Applied Statistics, 2013, ISBN 978-87-403-1210-2](http://bookboon.com/en/statistics-ebooks-zip)
<http://bookboon.com/en/statistics-ebooks-zip>
36. Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Слепцов О.И., Левин А.И. Моделирование аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса.
http://ogbus.ru/authors/Struchkova/Struchkova_1.pdf
37. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М.:Наука. 1984. 327 с.
38. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.:Радио и связь. 1983. 414 с.
39. Иванцов О.М., Харитонов В.И, Надежность магистральных трубопроводов. М.:Недра. 1998. 166 с.
40. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Советское радио. 1996.192 с.
41. S.Nadarajah, S., Kotz. Moments of some J-shaped distributions. Journal of Applied Statistics. 2003. Vol 30 93) pp. 311-317
42. S.Nadarajah, S., Kotz. A family of J-shaped bivariate distributions. Bull/ Int. Stat. Inst. 59
43. Wang F.K. A new model with bathtub-shaped failure rate using an additive Bunt XII distribution. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 70 (30, December, 2000. pp 305-312
44. Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Кластерный анализ / Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
45. Кластерный анализ. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>
46. Назаров А.Л. Приближенные методы разделения смесей вероятностных распределений. Дисс. канд. физ.мат. 2013 г.
<http://www.dissercat.com/content/priblizhennye-metody-razdeleniya-smesei-veroyatnostnykh-raspredelenii>
47. About U.S. Natural Gas Pipelines – Transporting Natural Gas. 2008.
http://www.eia.gov/pub/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/ngpipeline/process.html
48. Rzaeva G. Natural Gas in the Turkish Domestic Energy Market. Policies and Challenges. The Oxford Institute for Energy Studies. 2014.
<http://www.oxfordenergy.org/2014/02/natural-gas-in-the-turkish-domestic-energy-market-policies-and-challenges/>
49. Rodger J.M. Expansion of natural gas distribution in southern bruce county. Toronto ON. Canada. 2014
50. Beaumont G. Gas Distributin.

http://www.enbridge.com/~media/www/Site%20Documents/Investor%20Relations/2015/ENBDay2015_GasDistribution.pdf

51. Cimillaro G.P and all. Resilience-Based Design of Natural gas Distribution Networks. J. Infrastruct. System.

<http://www.eng.buffalo.edu/~bruneau/ASCE%20JIS%202014%20Cimillaro%20Villa%20Bruneau.pdf>

52. Distribution. Book D-1. System Design. (Gas Engineering and Operating Practice Series). USA: American Gas Association, A.G.A., 1990, 356 p

53. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справлчник по математике. М., Лейпциг: Наука. Тойбнер, 1981, 687 p

54. სანიკიძე გ. ბუნებრივი გაზის საპროგნოზო მოხმარების ტრენდის დადგენა, ქ. თბილისის გაზგამანაწილებელი ქსელის მაგალითზე. “ენერჯია”. № 4. თბილისი. 2014

55. სანიკიძე გ. Natural gas distribution network service quality, risk analysis and dynamic processes. საერთაშორისო კონფერენცია ”მექანიკა 2014”, 19-21 ივნისი, 2014, თბილისი, საქართველო

56. Корреляция. http://forexaw.com/TERMs/Economic_terms_and_concepts/Exchange_Terminology/1675_%D0%9A%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F_Correlation_%D1%8D%D1%82%D0%BE

57. Корреляционная связь.

<http://exceltip.ru/%D0%BA%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%87%D0%B8%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%DB8%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BA%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%86/>

58. Directive 2003/55/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 98/30/EC, Official Journal L 176, 15/7/2003, p. 57–78 (ES, DA, DE, EL, EN, FR, IT, NL, PT, FI, SV)

59. Булович С.В., Виколайнен В.Э. Волновое движение газа. Учебное пособие. Изд. Санкт-Петербург. Изд. Политехнического университета. 2006 г. 68 с

60. Новиков А.А., Чухарева Н.В. физико-химические основы процессов транспорта и хранения нефти и газа. Изд. ТПУ. Томск. 2005г. 101 с

61. Седак В.С. Надежность и качество регулирования современных систем газоснабжения. ХНФГХ. Харьков. 2011г. 226 с

62. Комина Г.П., Прошутинский А.О. Гидравлический расчет и проектирование газопроводов. СПбГАСУ-СПб. Санкт-Петербург. 2010г. 148 с

63. <http://www.dnv.com/services/software/news/2008/Phast6531Released.asp>

64. Mart van Bracht. Er is een nieuwe visie nodig op de toekomst van gas. http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=markt_product&laag1=896&laag2=186&laag3=267&item_id=739&Taal=2

65. Katz, D.L., 1959: Handbook of natural gas engineering. McGraw-Hill, New York, 802 pp.

66. Rojey, A., Jaffret, C., Cornot-Gandolph, S., Durand, B., Jullin, S., and Valais, M., 1997. “Natural Gas Production, Processing, Transport,” Editions Technip, Paris, France

67. QUEST. Consultants Inc. <http://www.questconsult.com/software/canary.html>

68. Safer Systems. <http://www.safersystem.com/>
69. Institute for the Protection and Security of the Citizen. <http://emars.jrc.ec.europa.eu/>
70. PHMSA. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. <http://phmsa.dot.gov/portal/site/PHMSA>
71. Saeid Mokhatab, William A. Poe and James G. Speight 2006, "Chapter 1 - Natural gas fundamental" in Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, eds.
72. Saeid Mokhatab & William A. Poe and James G. Speight; Saeid Mokhatab, William A. Poe & James G. Speight, Gulf Professional Publishing, Burlington, pp. 1-28.
73. Sedak V.S. Rybnikov N.Ja., Kaslin N.D. Method of analysis of emergency risks and prognosis of refuses of regional distributive systems of gas supplying. http://refereed.ru/ref_c929f2210333206f417e3862f431776d.html
74. Simioni G.P. Risk analysis of high combustible gas storage, supply, and distribution systems in PWR plants. Office of nuclear Regulatory research U.S. Washington. 2011
75. A report on the issues and risks of acquiring and operating a local natural gas distribution systems. Iowa Utility Association. <http://www.iowautility.org/wp-content/uploads/2013/05/the-issues-and-risks-of-acquiring-and-operating-a-local-natural-gas-distribution-system.pdf>
76. Maschio G., Vianello C., Palazzi E., Fabiano B., (2010). Experimental study on thermal and toxic hazards connected to different accident scenarios in road tunnels. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, CISAP4, 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry, Volume 19, pag207 – 212, ISBN 978-88-95608-11-2
77. Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M. & Post, J.G. 2001, "T10-1 - The 'Purple Book': Guideline for Quantitative Risk Assessment in the Netherlands" in Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, eds. H.J. Pasma
78. Nasr G.G., Connor N.E. Transmission pipelines. Natural gas and safety challenges. Springer International Publishing Switzerland. 2014
79. Galli P. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. "Technophysics". 2011. 324 (3). pp 169-187
80. Han Z.Y., Weng W.G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. J. Hazard Mater. 2007.189 (1-2), pp 509-518
81. Jo Y.D., Crowl D.A. Individual risk, analysis of high pressure natural gas pipelines. J. Loss Prevent. Process Ind. 2004.21 (6). pp 589-595
- Markowski A.S., Mannan M.S. Fuzzy logic for piping risk assessment. J. Loss Prevent. Process Ind. 20013. 22 (6). pp 921-927
82. Vianello C., Maschio G., Albanese A. (2011). Chlorine gas release in urban area: calculation of consequences through CFD modeling and comparison with standard software. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, IcheaP10, 10th International Conference on Chemical & Process Engineering, Volume 24, pag 1117 – 1122, ISBN 978-88-95608-15-0
83. Vianello C., Maschio G., (2011). Risk analysis of natural gas pipeline: case study of a generic pipeline. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS 10th International Conference on Chemical & Process Engineering – IcheaP10, Volume 24, pag 1309 – 1314, ISBN 978-88-95608-15-0

84. სანიკიძე გ. გაზგამანაწილებელი ქსელების მზადყოფნის კოეფიციენტის განსაზღვრა, ნატურული მონაცემების მიხედვით. "ენერჯია". № 4. თბილისი. 2013
85. Chen W.W. and all. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* 2002.22 (9-12). pp1209-1214.
86. Choo Y.W. and all. Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* 2007. 27 (12). pp 1043-1055
87. Eguichi R.T. Seismic vulnerability models for underground pipes. *Proc. earthquake behavior and safety of oil and gas storage.* ASME. New York. 1983. pp 368-373
88. ნამგალაძე დ., სანიკიძე გ. გაზგამარეგულირების პუნქტების მზადყოფნის კოეფიციენტის განსაზღვრა, ნატურული მონაცემების მიხედვით. *GEN.* თბილისი. 2014. № 4 (72)
89. Markowski A. S. (2000). Loss prevention in industry, Part III—Management of process safety. Technical University of Lodz.
90. Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M. & Post, J.G. 2001, "T10-1 - The 'Purple Book': Guideline for Quantitative Risk Assessment in the Netherlands" in *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, eds. H.J. Pasma A2O. Fredholm
91. Stanley S., G. 2001, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis: 2nd Edition; By Center for Chemical Process Safety; American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, 2000, pp. 750.", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, no. 5, pp. 438-439.
92. Ron S. 2005, "Chapter 16 - Risk Management" in *Physical Rehabilitation's Role in Disability Management*, ed. David W. Clifton A2Jr. A2PTA2 David W. Clifton, Jr.,PT, W.B. Saunders, Saint Louis, pp. 240-246.
93. David J. S. 2011, "Chapter 10 - Risk Assessment (QRA)" in *Reliability, Maintainability and Risk (Eighth Edition)* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 155-175.
94. Salvi O. and Gaston D.. 2004. "Risk assessment and risk decision- making process related to hazardous installation in France". *Journal of Risk Research*: 7 (6), 599-608, September.
95. Skjong R., Vanem E., Endresen. 2007. "Risk evaluation criteria". Technical report, SAFEDOR -D-4.5.2 DNV.
96. Ball D., Floyd P. 1998. "Societal risks, Final report". Technical report, The Health and Safety Executive.
97. Jo Y. & Crowl D.A. 2008, "Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 21, no. 6, pp. 589-595.
98. Jo Y.D. & Ahn B.J. 2005, "A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas", *Journal of hazardous materials*, vol. 123, no. 1-3, pp. 1-12.
99. Montiel H., Vilchez J.A., Arnaldos J. & Casal J. 1996, "Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas", *Journal of hazardous materials*, vol. 51, no. 1-3, pp. 77-92.
100. EGIG 2007, "Gas Pipeline incidents", 7th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group

101. Brito A.J. & de Almeida A.T. 2009, "Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines", Reliability Engineering & System Safety, vol. 94, no. 2, pp. 187-198.
102. Zio, Enrico, 2007. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis, World Scientific, Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics - Vol. 13, Singapore
103. Wells G. Hazard identification and risk assessment. IChemE. CV21 3HQ. UK 162 p
104. Terms of reference: Queensland Gas Supply and Demand Action Plan.
<https://www.dnrm.qld.gov.au/our-department/policies-initiatives/mining-resources/gas-supply-demand-action-plan/terms-of-reference>
105. Mathurkar H.N., Gupta A. Cross-country pipeline safety assessment. Report of National Environmental Research Institute (NEERI), India.
106. Beattie A. Biggest Risks Faced By Oil and Gas Companies.
<http://www.investopedia.com/articles/fundamental-analysis/12/5-biggest-risks-faced-by-gas-and-oil-companies.asp>
107. Lea C., 2002. A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling. Health & Safety Laboratory
108. Gas explosion. https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_explosion
109. Gas leak causes explosion at Sunny Isles Beach high-rise building.
<http://www.local10.com/news/possible-explosion-reported-at-sunny-isles-beach-highrise-building/35619130>
110. Pipe Flow Software. http://www.engineeringtoolbox.com/explosive-concentration-limits-d_423.html
111. Jo Y.D. & Ahn B.J. 2005, "A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas", Journal of hazardous materials, vol. 123, no. 1-3, pp. 1-12.
112. Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M. & Post, J.G. 2001, "T10-1 - The 'Purple Book': Guideline for Quantitative Risk Assessment in the Netherlands" in Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, eds. H.J. Pasman
113. API 581, 2008. Risk-Based Inspection Technology. American Petroleum Institute.
114. Cox W., F. P. Lees, M. L. Ang. 1990. Classification of Hazardous Location. IChemE. ISPRA, 2008. The indicators of climate in Italy in 2008