



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

ვახტანგ არჩვაძე

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის თანამედროვე ციფრული სისტემები და მათი სოციალურ- ეკონომიკური ეფექტიანობა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად სადოქტორო

პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0160, საქართველო

2022 წ

საავტორო უფლება © 2022 წელი ვახტანგ არჩვაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი სამშენებლო

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ვახტანგ არჩვაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის თანამედროვე ციფრული სისტემები და მათი სოციალურ-ეკონომიკური ეფექტიანობა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიების და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: პროფესორი ელინა ქრისტესიაშვილი
პროფესორი ზურაბ კიკნაძე

რეცენზენტი:-----

რეცენზენტი:-----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ

ავტორი: ვახტანგ არჩვაძე

დასახელება: „არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის თანამედროვე ციფრული სისტემები და მათი სოციალურ-ეკონომიკური ეფექტიანობა“

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა _____

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემოძოყვანილი 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

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ავტომატიზაციის ხარისხობრივად ახალი დონე ინფორმაციული მოდელირების ტექნოლოგიას იძლევა, რომელიც პროექტირების სხვადასხვა სტადიაზე სამშენებლო ობიექტების ერთიანი საინფორმაციო მოდელის შექმნას, მის გამოყენებასა და განვითარებას გვთავაზობს მშენებლობის და ექსპლუატაციის ეტაპებზე.

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მნიშვნელოვანი ნაწილია მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარება. პროექტირების პროცესში კალენდარულ გეგმას წამყვანი როლი უკავია. სამშენებლო სამუშაოთა შესრულების ხერხების საუკეთესო კომბინაციის განსაზღვრა რთულ ამოცანას წარმოადგენს. სამშენებლო სამუშაოთა წარმოების მეთოდების ამორჩევა და რესურსების განსაზღვრა დაგეგმარების მნიშვნელოვან ნაწილს შეადგენს და არსებითად მოქმედებს კალენდარული გეგმის შედგენაზე.

მშენებლობის ორგანიზაციის პროექტირებისთვის კალენდარული გეგმის შედგენა უზრუნველყოფილია პროგრამული საშუალებებით, რაც საჭიროებს შენობის ინფორმაციული მოდელის ინტეგრაციის მეთოდის შექმნას, შექმნილი ალგორითმების გამოყენებით და სამუშაოთა წარმოების პროექტისათვის სამუშაოთა სივრცეების გათვალისწინებით.

მშენებლობის ორგანიზაციის და სამუშაოთა წარმოების პროექტირების პროცესში პროექტის ხარისხი და ეფექტიანობა გადამწყვეტ გავლენას ახდენს პროექტის რეალიზაციის მთელ პროცესზე. სამშენებლო საორგანიზაციო-ტექნოლოგიური პროექტირების და სამუშაოთა წარმოების ერთ-ერთ მთავარ ეტაპს წარმოადგენს სამშენებლო წარმოების კალენდარული დაგეგმარება, რომელიც მოიცავს მშენებლობის ტექნოლოგიის ამორჩევას, სამუშაოთა განსაზღვრას, აუცილებელი რესურსების შეფასებას, სამუშაოთა ხანგრძლივობის გაანგარიშებასა და ამ სამუშაოთა თანმიმდევრობის განსაზღვრას.

პროექტირების ავტომატიზაციის პროცესი საშუალებას გვაძლევს დავაჩქაროთ გადაწყვეტილებების მიღება, შევამციროთ შესაგანი ინფორმაციის რაოდენობა და ავიცილოთ ადამიანურ ფაქტორებთან დაკავშირებული შეცდომები. არსებობს კალენდარული დაგეგმარების მრავალი თანამედროვე მეთოდი და საშუალება, რომელიც გვხვდება რთული საპროექტო ამოცანის გადაწყვეტაში, მაგრამ მშენებლობის დაგეგმარება ჯერ ისევ შრომატევად პროცესს წარმოადგენს, რომელიც ბევრ დროს გვართმევს. პროექტირების ავტომატიზაციის ერთ მხარეს წარმოადგენს ეფექტიანი ალგორითმების და გამოყენებითი ამოცანების გადაწყვეტის პროგრამული საშუალებათა ამორჩევა და დამუშავება.

ტექნოლოგიური პროგრესის და შენობის ინფორმაციული მოდელირების ტექნოლოგიის მეშვეობით BIM პროექტირების პროცესების სრულყოფისთვის ახალი შესაძლებლობები წარმოიქმნება, მაგალითად, 4D BIM ტექნოლოგია არის 3D მოდელს + „დრო“, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შენობის კომპონენტები დავაკავშიროთ მშენებლობის კალენდარულ გეგმასთან და ვიზუალურად გამოვსახოთ მშენებლობის პროცესი. ავტომატიზაციის ალგორითმების განვითარების სფეროში შემდგომი წინსვლა საშუალებას მოგვცემს შევამციროთ დრო, ავამაღლოთ პროექტის კალენდარული დაგეგმარების პროცესის ხარისხი.

პროექტის შესრულების კრიტერიუმები „დრო“ და „ღირებულება“ პროექტის ოპტიმიზაციის ძირითად მიზანს შეადგენს. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ პროექტში თითოეული სამუშაო შეიძლება არა მარტო გარკვეული რესურსების განსაზღვრული რაოდენობის გამოყენებით განხორციელდეს, არამედ რესურსების სხვადასხვა ტიპების ამორჩევით, მათ შორის შრომითი რესურსის, მანქანა-დანადგარების, მეთოდებისა და მშენებლობის წარმოების ტექნოლოგიის ჩართულობით.

არსებობს ოპტიმიზაციის მოქნილი მოდელის შექმნის აუცილებლობა, რომელიც ითვალისწინებს სამუშაოთა თანმიმდევრობის სხვადასხვა ტიპებს, სამუშაოთა ხანგრძლივობის შემცირებას, მინიმალურად ამცირებს პროექტის საერთო ღირებულებასა და დროს მთელი პროექტის შესასრულებლად. არსებობს გადაწყვეტილების მიღების სცენარების ფორმალიზაციის აუცილებლობა პროექტის შესრულების დროისა და ღირებულების ოპტიმიზაციისას.

სამშენებლო სამუშაოთა შესრულების ოპტიმალური სტრატეგიის განსაზღვრისათვის აუცილებელია მრავალი შესაძლო ალტერნატივის განხილვა. პროექტირების ავტომატიზაციის განვითარების და მშენებლობაში კალენდარული დაგეგმარების ოპტიმიზაციის ამოცანების გადაწყვეტაში დიდი შესაძლებლობები ევოლუციურ ალგორითმებს EA-ს აქვთ, განსაკუთრებით კი გენეტიკურ ალგორითმებს GA.

გენეტიკური ალგორითმის საფუძველზე შემუშავებულ ახალ მეთოდებს პროექტის ვადისა და ღირებულების მოთხოვნილ მნიშვნელობებთან საკონტაქტო და სახელშეკრულებო შესაბამისობაში მოყვანის უზრუნველყოფა შეუძლია. გენეტიკური ალგორითმების საფუძველზე შემოთავაზებულია პროექტის სამუშაოთა შესრულების სტრატეგიის ალტერნატივების და პროექტის გეგმის ოპტიმიზაციის ანალიზი. შემოთავაზებულია სამუშაოთა ხანგრძლივობის შემცირების მეთოდიკა პროექტის ხანგრძლივობის ოპტიმიზაციისას. შენობის ინფორმაციული მოდელირების BIM და გენეტიკური ალგორითმის GA საფუძველზე შემუშავდა მშენებლობის კალენდარული გეგმა და ოპტიმიზაციის ინტეგრირებული ავტომატიზაციის მეთოდიკა.

გამოვლენილია კალენდარული გეგმის შემუშავების კომპლექსური ავტომატიზაციის შესაძლებლობა პროგრამული საშუალებების ინტეგრაციის საფუძველზე. შენობის კომპონენტებზე BIM-ში შენახული ზუსტი ინფორმაციის გამოყენება საშუალებას მოგვცემს პროექტის სამუშაოთა სახეობები უფრო ეფექტიანად განვსაზღვროთ, გავიანგარიშოთ მათი ხანგრძლივობა და ბოლოს მოვახდინოთ პროექტირება.

შენობის ინფორმაციული მოდელის საფუძველზე შემოთავაზებულია სამუშაო სივრცეების სამგანზომილებიან ვიზუალურ რეჟიმში და დროში ასახვის მოდელი სამუშაო სივრცეთა რაიმე კონფლიქტის განსაზღვრისათვის. ოპტიმიზაციის შემოთავაზებულმა მეთოდიკამ აჩვენა ალგორითმის უნარი, გადაწყვიტოს ამოცანები ლოგიკური ფარდობის სხვადასხვა ტიპებით და სამუშაოებს შორის წყვეტების გათვალისწინებით. შემუშავებულმა პროგრამამ შეიძლება წარმოადგინოს პროექტის შესრულების ხანგრძლივობის გაანგარიშების სხვადასხვა სცენარი შესაბამის ხარჯებთან ერთად, იმისათვის, რომ მოხდეს მშენებლობის გრაფიკის ოპტიმიზაციის გადაწყვეტა.

პროგრამამ აჩვენა თავისი უნარი რეალური პროექტის და ოპტიმიზაციის სცენარების მოქნილი გამოყენების ამოცანების გადასაწყვეტად სხვადასხვა

კრიტერიუმებისგან დამოკიდებულებით. სამუშაოთა შესრულების სხვადასხვა შესაძლო ხერხების კომბინაცია პროექტის მრავალი ალტერნატიული გეგმის გენერირებას ახდენს თავისი ხანგრძლივობით და ღირებულებებით. მაგრამ, შემოთავაზებული ალგორითმის პროგრამული რეალიზაცია შედეგს ძალიან მოკლე დროში გვაძლევს. კორექტირებული და შევსებული 3D BIM, საშუალებას გვაძლევს მთლიანად ან ნაწილობრივ მოვახდინოთ ანგარიშების და ოპერაციების ავტომატიზირება, რომლებსაც ადრე ხელით ვასრულებდით.

შემოთავაზებული 4D მოდელი საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ სამშენებლო პროცესის ვიზუალიზაცია, რაც გვაძლევს თვალსაჩინო, იოლად აღსაქმელ ინფორმაციას მთელი პროცესის წარმოსადგენად და გასაგებად. სამუშაო სივრცეებთან ორგანიზებასთან დაკავშირებული პრობლემების ადრეული იდენტიფიკაცია ამცირებს მოცდენის დროს, აუმჯობესებს სამუშაოთა ხარისხს, ასევე ამცირებს პროექტის განხორციელების გეგმიდან გადახრას. მშენებლობის თითოეული გრაფიკის შენობის კომპონენტების და სამუშაო სივრცეების 4D ვიზუალიზაციის კომპლექსური განხილვისას, რომელსაც შემოთავაზებული გენეტიკური ალგორითმით ვიღებთ, შესაძლებელია სამუშაო სივრცეების და კონფლიქტების განსაზღვრა.

აღწერილია რეალურ მშენებარე ობიექტზე სამუშაო პროცესის მაღლივი შენობის ფასადის არარეგულარული ზომის წახნაგების მოსაპირკეთებლად ფილების ამორჩევა და დამუშავება. ოპტიმიზაციის მაგალითი ავტორის მიერ დინამიური პროგრამირების და იმიტაციური მოდელირების მეთოდით შემუშავებული პროგრამული მოდულების გამოყენების საფუძველზე. მეთოდოლოგიური თვალსაზრისით ფაქტობრივად ეს CAD/BIM გამოყენებითი პროგრამული პაკეტების ინტერფეისის ადაპტაციისა API (Application Programming Interface) და ხელოვნური ინტელექტის პრინციპის გათვალისწინების მცდელობაა. რაც სიმპტომატურია BIM ტექნოლოგიის ათვისების და დანერგვის თვალსაზრისით.

Rezume

A qualitatively new level of automation of architectural and construction design is provided by information modeling technology, which assumes the creation, use and development of a single information model of construction objects at different stages of design, both during construction and during operation.

An important part of architectural and construction design is construction planning, which is the main part of the diploma work. The calendar plan plays a leading role in the design. The definition of the best combination of construction methods is a complex task. The choice of methods of production of construction works and the definition of resources is an important part of planning and significantly affects the choice of a calendar-planning decision. The planned work has an alternative way of implementation.

A calendar-planned study for the design of a building organization is provided by software. That requires the creation of a method of integration of the information model of the building with the use of developed algorithms and taking into account working spaces for the project of production of works.

The quality and efficiency of the project in the process of designing the organization of construction and production of works has a decisive influence on the entire process of project implementation. One of the main stages of the organizational and technological design of construction and production works is the development of a calendar plan for construction production. Составление календарного плана includes selection of construction technologies, determination of works, estimation of necessary resources, calculation of duration of works and determination of the sequence of these works.

The process of automation of the design allows us to speed up decision-making, reduce the amount of input data and avoid errors related to the human factor. There are many modern methods and means of calendar planning that can be found when solving complex project tasks, but construction planning is still a laborious process that takes a lot of time. One of the sides of the automation of design is the selection and processing of effective algorithms and software solutions for applied tasks.

Thanks to technical progress and the widespread technology of information modeling of buildings, new opportunities appear to improve BIM design processes, for example, 4D BIM technology is a 3D model + "time", which allows you to connect building components with a calendar construction plan and visualize the construction process. Further progress in the development of automation algorithms will allow us to reduce time, improve the quality of the process of creating a project calendar plan.

Project efficiency criteria «time» and «cost» constitute the main goal of project optimization. Considering that each work in the project can be performed not only with the use of a certain amount of resources, but also by choosing different types of resources, including workers, machines, methods and technology of construction production.

There is a need to create a flexible optimization model that takes into account different types of work sequences, limits the duration of work, minimizes the total cost of the project and the time to complete the entire project. It is necessary to formalize decision-making scenarios when optimizing the time and cost of project implementation.

To determine the optimal strategy for construction work, it is necessary to consider several possible alternatives. Evolutionary algorithms EA, especially genetic algorithms GA, have great possibilities in solving tasks of optimization of calendar planning during automation of design and construction.

The new method, developed on the basis of the genetic algorithm, compares the required values of the term and cost of the project with contacts, contracts, etc. can provide compliance. On the basis of genetic algorithms, the analysis of alternative strategies for the implementation of the project and optimization of the project plan are proposed. Proposed methods of reducing the duration of work when optimizing the duration of the project. Based on information modeling of buildings BIM and genetic algorithm GA, a calendar construction plan and a complex automated optimization method were developed.

The possibility of complex automation of the development of a calendar plan based on the integration of software tools is revealed. The use of accurate information stored in BIM about construction components will allow us to more effectively determine the types of project work, calculate their duration, use the rule of order and, finally, plan.

On the basis of the information model of the building, a three-dimensional visual mode and a time reflection model of working spaces are offered for determining any conflict of working spaces. The proposed optimization methodology demonstrated the ability of the algorithm to solve tasks with various types of logical connections and taking into account breaks between tasks. The developed software can represent various scenarios for calculating the duration of the project along with the corresponding costs to help in making a decision to optimize the construction schedule.

The program demonstrated its ability to solve the tasks of flexible use of real projects and optimization scenarios depending on various criteria. The combination of various possible ways of performing work generates multiple alternative project plans with their duration and cost, but the software implementation of the proposed algorithm gives us the result in a very short time. Corrected and completed 3D BIM allows us to fully or partially automate reports and operations that were previously performed manually.

The proposed 4D-model allows us to visualize the construction process, which gives us visual, easy-to-understand information for presenting and understanding the entire process. Early detection of problems related to the organization of workplaces reduces the time of fulfillment of orders, increases the quality of work, and also reduces deviations from the project implementation plan. When viewing the complex 4D-visualization of the building components and working spaces of each construction schedule, which we obtain with the help of the proposed genetic algorithm, it is possible to calculate the existing conflicts and determine the schedule with the minimum number of conflicts.

შინაარსი

შესავალი	-----	
-----	19	
თავი	1.	ლიტერატურის
მიმოხილვა	-----	23

1.1. მშენებლობის კალენდარული გეგმის შედგენის ავტომატიზებული მეთოდები, სისტემები და მათი ანალიზი-----	23
1.2. მშენებლობის კალენდარული გეგმის შედგენის მოდელები BIM პროგრამული უზრუნველყოფით-----	25
1.3. სამუშაო სივრცის დაგეგმარება-----	29
1.4. მშენებლობის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის მოდელები და მეთოდები-----	36

1

თავის

დასკვნები-----	47
თავი 2. მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის ძირითადი მეთოდოლოგიური მიდგომები-----	48
2.1. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ძირითადი წარმოდგენები-----	48
2.2. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა-----	54
2.3. გენეტიკური ალგორითმების თეორია-----	57
2.4. ავტომატიზებული პროექტირების სისტემა CAIP-----	60
2.5. შენობის ინფორმაციული მოდელირება BIM-----	64
2.6. მშენებლობის პროექტირებისა და კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის მეთოდის შემუშავება-----	83
2.7. სამუშაო სივრცის 4D მოდელირება-----	88
2.8. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია-----	94
2.9. სამშენებლო პროექტის ხანგრძლივობის დადგენა-----	101
2.10. პროექტის ღირებულების მინიმიზაცია-----	103
2.11. პროექტის ხანგრძლივობის მინიმიზაცია-----	104
2.12. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია გენეტიკური ალგორითმების ბაზაზე-----	105
მე-2 თავის დასკვნები-----	114
თავი 3. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის მეთოდის	

პროგრამული	ვერიფიკაცია	და
რეალიზაცია		116
3.1. კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის შემუშავებული პროგრამის კომპონენტები		116
3.2. შემოთავაზებული მეთოდის დადასტურება		122
3.3. შემუშავებული მეთოდის პრაქტიკული აპრობაცია „Allianc Highline Tbilisi“-ის შენობის არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების განხორციელებისას		132
3.4. შენობის ინფორმაციული მოდელირება 3D-BIM		139
3.5. სამუშაოების თანმიმდევრობის, რესურსების, ხანგრძლივობისა და თითოეული სამუშაოს ღირებულების განსაზღვრა		142
3.6. პროექტის კალენდარული გეგმის გაანგარიშება		143
3.7. პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია		144
3.8. პროექტის 4D მოდელის სიმულაცია		147
3.9. სამუშაო სივრცეების ვიზუალიზაცია		148
3.10. სამუშაოს შედეგების ანალიზი და შემდგომი კვლევების პერსპექტიული მიმართულებები		150
მე-3	თავის	
დასკვნები		151
ძირითდი დასკვნები		153
გამოყენებული	ლიტერატურა	155

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. სამუშაო სივრცის დაგეგმვის შესახებ კვლევების მიმოხილვა	35
ცხრილი 2. სამშენებლო გეგმის ოპტიმიზაციის მეთოდებს შორის შედარება	37
ცხრილი 3. კვლევები პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის შესახებ	43
ცხრილი 4. შეგუებადობის ფუნქციის რანჟირება	45
ცხრილი 5. სელექციის ფუნქციის რანჟირება	45
ცხრილი 6. კროსოვერის მეთოდების რანჟირება	46
ცხრილი 7. მუტაციის მეთოდების რანჟირება	46
ცხრილი 8 Autodesk-ის პროდუქტები, რეკომენდებული პროექტების კატეგორიის მიხედვით	65

ცხრილი	9.	ხარისხის	შეფასების	მეთოდების	მახასიათებლების
მიხედვით					
			70		
ცხრილი			10.		პოპულაციის
შექმნა					106
ცხრილი.			11.		ქრომოსომის
სტრუქტურა					105
ცხრილი		12.		I-ელი	მაგალითის
მონაცემები					123
ცხრილი		13.		მე-2	მაგალითის
მონაცემები					124
ცხრილი		14.	მე-2	მაგალითის	შედეგები
					124
ცხრილი		15.		მე-3	მაგალითის
მონაცემები					125
ცხრილი		16.	მე-3	მაგალითის	შედეგები
					125
ცხრილი			17.მე-4		მაგალითის
მონაცემები					127
ცხრილი		18.	მე-4	მაგალითის	შედეგები
					128
ცხრილი		19.	მე-4	მაგალითის	შედეგები
					129
ცხრილი		20.		მე-5	მაგალითის
მონაცემები					130
ცხრილი		21.		მე-5	მაგალითის
შედეგები					131
ცხრილი		22.		ერთი	გამოცდის
ხანგრძლივობა					132
ცხრილი	23.	შემოთავაზებული ალგორითმის შედეგები			146
ცხრილი		24.			გამოცდის
შედეგები					147

ნახაზების ნუსხა

ნახ.	1.	სამუშაო	სივრცის	ტიპები
				30
ნახ.2.	სამუშაო	სივრცის	იერარქიულ	სტრუქტურა
				32
ნახ.	3.	მიახლოების	კონვერტი	(AE)
				32
ნახ.	4.	სამშენებლო	მოედნის	დაყოფა უჯრედებად
				33
ნახ.	5.	შემოსაზღვრული		ჩარჩო
				35
ნახ.	6.			საპროექტო
				სამკუთხედი
				49
ნახ. 7.	სამშენებლო პროექტების მართვის ძირითადი პროცესები			50
ნახ. 8.	დაგეგმარების პროცესის საწყისი მონაცემები და გამოსავალი შედეგები			51
ნახ.	9.	დაგეგმარების		პროცესი
				52
ნახ.	10.	კალენდარული		გეგმების
				სახეობები
				53
ნახ. 11.	სამუშაოს შესრულების „ღირებულება-ხანგრძლივობის“ ალტერნატიული ვარიანტები			55
ნახ.	12.			ოპტიმალური
				გადაწყვეტა
				56
ნახ.	13.	გენეტიკური		ალგორითმის
				ეტაპები
				58
ნახ. 14..	პროგრამული უზრუნველყოფის შემადგენლობა			63
ნახ. 15.	მონაცემთა ბაზის სრულად გამოყენების ტენდენცია BIM პაკეტებში			67
ნახ. 16.	პროექტის ხარისხის მართვა ფუნდამენტური დროებრივი პარამეტრების მიხედვით			68
ნახ. 17.	ოპტიმალური მართვის ფუნდამენტური კატეგორიები			68
ნახ.	18.	წრფივი		დეკომპოზიციის
				მოდელი
				71
ნახ. 19.	არქიტექტურულ-სამშენებლო	პროექტირების	მართვის	სქემა
				74
ნახ.	20.			მოდელის
				განზომილება
				74
ნახ.	21.	BIM-ის		ზომები
				81
ნახ. 22.	3D BIM-ის და კალენდარული გეგმების მონაცემების იმპორტი			82

ნახ. 23. მშენებლობის 4D მოდელის შედგენის ავტომატიზაციის სქემა----	85
ნახ. 24. სამუშაოების შემადგენელი დეკომპოზიცია-----	88
ნახ. 25. მშენებლობის 4D მოდელი-----	88
ნახ. 26. სამუშაო სივრცეების ფორმები-----	91
ნახ. 27. სამუშაო სივრცეების მოდელირების სქემა-----	92
ნახ. 28. კონკურენტული სამუშაოს მოთხოვნადი სამუშაო სივრცეების სტრუქტურა -----	93
ნახ. 29. კონფლიქტის გადაწყვეტა -----	94
ნახ. 30. ღირებულების დამოკიდებულება სამუშაოს ხანგრძლივობაზე --	96
ნახ. 31. პროექტირების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის და კალენდარული დაგეგმარების სქემა-----	98
ნახ. 32. პროექტის მოთხოვნადი ხანგრძლივობა-----	103
ნახ. 33. პროექტის მინიმალური ღირებულება-----	103
ნახ. 34. პროექტის მინიმალური ხანგრძლივობა-----	105
ნახ. 35. რულების ბორბლს გიპის შერჩევის ოპერატორი -----	109
ნახ. 36. კროსოვერი (ორი წერტილი)-----	110
ნახ. 37. პოპულაციის განახლება-----	111
ნახ. 38. შემოთავაზებული მეთოდის ბლოკ-სქემა მოდიფიცირებული გენეტიკური ალგორითმის ბაზაზე-----	114
ნახ. 39. ალგორითმის მუშაობის სქემა-----	136
ნახ. 40. არსებული შენობის გეგმა -----	139
ნახ. 41. პროექტის 4D მოდელი-----	144
ნახ. 42. სამუშაო სივრცეების და კონფლიქტების 1 4D ვიზუალიზაცია----	150
ნახ. 43. სამუშაო სივრცეების და კონფლიქტების 2 4D ვიზუალიზაცია----	151

სურათების ნუსხა

სურ.	1.	სამუშაო	
სივრცე			29
სურ.	2.	შენობის ინფორმაციული მოდელირება	
BIM			64
სურ.	3.	BIM -ის ზრდის ტემპი მსოფლიოში რეგიონების მიხედვით	83
სურ.	4.	მშენებლობის დაგეგმარების ოპტიმიზაციის მაგალითი	118
სურ.	5.	ახალი პროექტის შექმნა	120
სურ.	6.	პროექტის სამუშაოების მონაცემთა შეგანა	119
სურ.	7.	შედეგების გამოგანა	122
სურ.	8.	სამუშაო სივრცეების შეყვანა	122
სურ.	9.	„Allianc Highline Tbilisi“-ის შენობა	134
სურ.	10.	ნიუტონის სკოლა	137

სურ.	11.	თავისუფლების	თეგრის
ფასადი-----			138
სურ. 12. პეტრიაშვილის ქ. #46 მრავალბინიანი საცხოვრებელი სახლი-----			138
სურ. 13. მასობრივი საცხოვრებლის სათავსოების პარამეტრები-----			140
სურ.14.კონსტრუქციულ-გეგმარებითი ელემენტების პარამეტრების დადგენა 3D სკანერით-----			140
სურ.	15.	შენობის	3D
მოდელი-----			142
სურ. 16. შენობის კომპონენტების რაოდენობის სამუშაო წიგნი-----			143
სურ. 17. პროექტის სამუშაოთა ყველა პარამეტრის განსაზღვრა-----			144
სურ.	18.	შენობის	კალენდარული გეგმის
განგარიშება-----			145

გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა*

3D - ობიექტების გეომეტრიის და მათი აღვივლებადობის ჩვენება სივრცეში - X, Y და Z კოორდინატებში.

4D - 3D მოდელის საფუძველზე დროსთან ინტეგრაცია. 4D-BIM გამოიყენება მშენებლობის დაგეგმარებასთან დაკავშირებული მოვლენების მოდელირებისთვის. მოდელის უპირატესობაა: დაგეგმარების ოპტიმიზაცია და გუნდური კოორდინაციის შესაძლებლობა.

BIM - Building Informational Modeling - შენობის ინფორმაციული მოდელირება.

Industry Foundation Classes (IFC) - CAD მონაცემთა გაცვლის სქემა, რომელიც შექმნილია არქიტექტურის, მშენებლობისა და სამშენებლო ინდუსტრიის მონაცემების აღსაწერად.

Microsoft Project **и Primavera (MPP)** - ცნობილი პროგრამები მშენებლობის დაგეგმვისათვის. Microsoft Project გამოიყენება კალენდარული გეგმის გაანგარიშებისთვის, სამუშაოთა დაწყებისა და დასრულების თარიღის გამოსათვლელად და პროექტის საერთო ხანგრძლივობის განსაზღვრისთვის

Autodesk Revit, Autodesk Navisworks, Microsoft Excel and Microsoft Project - არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების პროგრამები.

GA გენეტიკური ალგორითმები.- გენეტიკური ალგორითმები არის ადაპტირებული ევრისტიკული ძებნის ალგორითმები დაფუძნებული ბუნებრივი სელექციისა და გენეტიკის ევოლუციურ იდეებზე. როგორც ასეთი, ისინი წარმოადგენენ შემთხვევითი ძებნის ინტელექტუალურ ექსპლუატაციას ოპტიმიზაციის ამოცანების ამოსახსნელად.

CAD - Computer-Aided Design- ავტომატიზებული სისტემა, რომელიც ახორციელებს ინფორმაციულ ტექნოლოგიას პროექტირებისთვის.

BEP - BIM -(BIM Execution Plan) - პროექტის განხორციელების გეგმა

Project Optimum - პროგრამული უზრუნველყოფა. პროექტის ეტაპების შესრულების ალტერნატიული ვარიანტების ოპტიმალური კომბინაცია განსაზღვრა დრო ან ღირებულება კრიტერიუმის მიხედვით.

LOD - განვითარების დონე, მოდელის დამუშავების დონე (Level of Development), განსაზღვრავს ინფორმაციის მოდელის ელემენტის შემუშავების სისრულეს.

Visual Basic - წარმოადგენს შემუშავების ინტეგრირებულ არეს, რომელიც შეიცავს დანართის დამუშავების პროცესის შემამსუბუქებელ და დამაჩქარებელ ინსტრუმენტების ნაკრებს.

Autodesk Navisworks - გამოიყენება საპროექტო მონაცემების ინტეგრირებული ნაკრებიდან რაოდენობრივი ანალიზის დაწვრილებითი სამუშაო წიგნების ფორმირებისთვის.

მაღლიერების გვერდი

მაღლობას ვუხდი საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს, უნივერსიტეტის რექტორს პროფესორ დავით გურგენიძეს, სამშენებლო ფაკულტეტის დეკანს პროფესორ ზურაბ გვიშიას, სამეცნიერო ხელმძღვანელებს: პროფესორ-ემერიტუს ზურაბ კიკნაძეს და პროფესორ ელინა ქრისტესიაშვილს, მშენებლობის ეკონომიკის და მენეჯმენტის დეპარტამენტის აკადემიურ პერსონალს ყურადღებისა და გაწეული დახმარებისთვის, რომელიც ჩემი სამეცნიერო მუშაობის დროს გამოიჩინეს.

შესავალი

კვლევის აქტუალობა. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ავტომატიზაციის ხარისხობრივად ახალი დონე, ინფორმაციული მოდელირების ტექნოლოგიას გვაძლევს, რომელიც პროექტირების სხვადასხვა სტადიაზე სამშენებლო ობიექტების ერთიანი საინფორმაციო მოდელის შექმნას, მის გამოყენებასა და განვითარებას ვარაუდობს, როგორც მშენებლობის და ისე ექსპლუატაციის ეტაპებზე.

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ნაწილია მშენებლობის ორგანიზაციის და საბუშაოთა წარმოების პროექტი, რომლის ხარისხი, ეფექტიანობა და ოპტიმალურობა გადაწყვეტს გავლენას ახდენს პროექტის რეალიზაციის მთელ პროცესზე და ამ ეტაპზე მიღებულ გადაწყვეტილებას დიდი გავლენა აქვს მის წარმატებით შექმნაზე.

პროექტირების ავტომატიზაციის ერთ მხარეს წარმოადგენს ეფექტიანი ალგორითმების და გამოყენებითი ამოცანების გადაწყვეტის პროგრამული საშუალებების შერჩევა და დამუშავება. ტექნოლოგიური პროგრესის და შენობის ინფორმაციული მოდელირების გავრცელებული ტექნოლოგიის მეშვეობით, BIM პროექტირების პროცესების სრულყოფისთვის ახალი შესაძლებლობები წარმოიქმნება. მაგალითად, 4D BIM ტექნოლოგია (3D მოდელს + „დრო“), მშენებლობის პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების დაკავშირების საშუალებას იძლევა, რაც შემდგომში მშენებლობის პროცესის ვიზუალიზაციაა შესაძლებელი.

შენობის ინფორმაციული მოდელი საშუალებას იძლევა შემცირდეს დრო და გაიზარდოს პროექტის კალენდარული დაგეგმვის პროცესის ხარისხი. რთული მრავალკრიტერიალური ამოცანების ოპტიმიზაციაში დიდი შესაძლებლობები ევოლუციურ ალგორითმებს EA-ს აქვს. განსაკუთრებით საინტერესოა გენეტიკური ალგორითმი GA. გენეტიკური ალგორითმის საფუძველზე შემუშავებულ ახალ მეთოდიკას შეუძლია უზრუნველყოს პროექტის ვადისა და ღირებულების მოთხოვნილ მნიშვნელობებთან შესაბამისობაში მოყვანა.

აღნიშნულის საფუძველზე თემა უდავოდ აქტუალურია.

კვლევების მიზანი და ამოცანები. ნაშრომის კვლევის მიზანია არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის ინფორმაციული მოდელირების მეთოდიკის შექმნა, რომელიც შემუშავებულია გენეტიკური ალგორითმების GA გამოყენებით.

კვლევის მიზნის შესაბამისად უნდა შესრულდეს შემდეგი ამოცანები:

- მშენებლობის პროექტის კალენდარული გეგმის 4D BIM მოდელის შემუშავებისას, გენეტიკური ალგორითმების საფუძველზე შემუშავებული პროექტირების ავტომატიზაციის და ოპტიმიზაციის საშუალოთა ანალიზი.
- სამშენებლო მოედანზე საშუაო სივრცეების სხვადასხვა ტიპების წარმოდგენის მეთოდების და კლასიფიკაციის სისტემების ანალიზი;
- პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის საშუალებათა ინტეგრაციის მეთოდიკის შემუშავება;
- პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ოპტიმიზაციის მეთოდიკის შემუშავება გენეტიკური ალგორითმების GA საფუძველზე, ინფორმაციული

მოდელირების და სამუშაო სივრცეების ვიზუალიზაციის გათვალისწინებით, რომელიც მათი კონფლიქტების ანალიზის საშუალებას იძლევა;

- შემოთავაზებული GA მეთოდების ვერიფიკაცია არსებული სამეცნიერო კვლევების მაგალითებთან შედარების საფუძველზე;
- შემოთავაზებული გადაწყვეტების პრაქტიკული აპრობაცია;

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე: არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის თანამედროვე ციფრული სისტემებით მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის, ინფორმაციული მოდელირების განვითარება BIM-ის და გენეტიკური ალგორითმების გამოყენებით;

- შენობის ინფორმაციული მოდელის მონაცემთა ინტეგრირების მეთოდика, ანალოგიური პროექტების და სამუშაო სივრცეების მონაცემთა ბაზის, სამუშაოთა წარმოების კალენდარული გეგმის პარამეტრების ავტომატიზებული ფორმირებისთვის;
- სამუშაოთა წარმოების კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის მეთოდика – პროექტის შესრულების ვადის და ღირებულების განსაზღვრა გენეტიკური ალგორითმების შემუშავებულ მოდიფიკაციაზე დაფუძნებული;
- სამუშაოთა წარმოების ინფორმაციული მოდელი, 4D BIM-ში ასახული სამუშაო სივრცეებით და მათი კონფლიქტების განსაზღვრით.

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის თანამედროვე ციფრული სისტემებით შენობის ინფორმაციული BIM მოდელირების პროცესები და პრაქტიკული შედეგები მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების და ოპტიმიზაციისთვის. შენობის ინფორმაციული მოდელირების პროცესები და პრაქტიკული შედეგები განხორციელებულია ქ. თბილისში მშენებარე ობიექტებზე.

ნაშრომის თეორიული და პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს ეფექტიანობის ამაღლების მიზნით, BIM-ის და გენეტიკური ალგორითმების GA-ს გამოყენებით პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის მეთოდის, მოდელებისა და ინფორმაციული პროგრამების შემუშავებაში.

კვლევის მეთოდები და მეთოდოლოგია დაფუძნებულია ძირითადად უცხოელ მეცნიერების და ადგილობრივი სამეცნიერო-საპროექტო არქიტექტურულ-სამშენებლო ფირმების პრაქტიკული სამუშაოების ანალიზზე. კვლევისათვის გამოიყენება САПР-ის აგების თეორიის ძირითადი დებულებები, შენობის ინფორმაციული მოდელირების თეორია BIM, პროგრამული პროდუქტების და ინფორმაციული სისტემების ინტეგრაციის მეთოდები, პროექტის მართვის თეორია და მეთოდოლოგია, ოპტიმიზაციის ამოცანათა გადაწყვეტის ევოლუციური მეთოდები, კერძოდ, გენეტიკური ალგორითმები GA. ჩატარებულია კვლევები გენეტიკური ალგორითმების შემოთავაზებული მოდიფიკაციის ეფექტიანობის ვერიფიკაციის და დადასტურების მიზნით. შექმნილია შემოთავაზებული მეთოდის რეალიზაციის დემონსტრირების პროგრამული მოდელები.

ნაშრომის შედეგების აპრობაცია: კვლევის შედეგად მიღებული შედეგები მოხსენებულია სასწავლო პროცესში 3 კოლოკვიუმზე, მიღებული შედეგები გამოქვეყნდა 10 სამეცნიერო ჟურნალში, მათ შორის 5 კონფერენციაზე. 4 სამეცნიერო სტატია თანაავტორების გარეშე გამოქვეყნებული.

პუბლიკაციები: დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 10 სამეცნიერო სტატია, მათ შორის 5 საერთაშორისო კონფერენციაზე.

სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა. ნაშრომი წარმოდგენილია 170 ფურცელზე. მოიცავს შესავალს, 3 თავს, დასკვნასა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხას. ლიტერატურის ნუსხა შესდგება 128 დასახელებისგან. ნაშრომში წარმოდგენილია 24 ცხრილი, 43 ნახაზი და 18 სურათი.

თავი 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

ამ მოცემულია სამშენებლო სფეროში მშენებლობის დაგეგმარების პროცესის მიმოხილვა გამოყენებული დაგეგმარების მეთოდების თვალსაზრისით. თავი მიმოხილავს BIM-ზე დაფუძნებული მშენებლობის დაგეგმარების მიმდინარე მოდელებს. განხილულია პროექტის ღირებულების და ღრის ოპტიმიზაციის მეთოდები. გამოკვლეულია სამუშაო სივრცეების დაგეგმვის მიდგომები მათი კლასიფიკაციის და სამუშაოების სახეობების განაწილების მიხედვით.

1.1. მშენებლობის კალენდარული გეგმის შედგენის ავტომატიზებული მეთოდები, სისტემები და მათი ანალიზი

პირველი პროგრამული უზრუნველყოფა პროექტის მენეჯმენტისთვის, რომელიც გამოჩნდა დაახლოებით 40 წლის წინ, დაფუძნებული იყო ქსელის დაგეგმვისა და პროექტის ღრის პარამეტრების გამოთვლის ალგორითმებზე კრიტიკული ბილიკის მეთოდის გამოყენებით. ამ პროგრამებმა შესაძლებელი გახადა პროექტის აღრეული და გვიანი თარიღების გამოთვლა და მათი ჩვენება განგის სქემაზე.

ტექნოლოგიების განვითარებასთან ერთად, ელექტრონული გამოთვლითი სისტემების დანერგვა დაიწყო სხვადასხვა ინდუსტრიაში. დაინერგა CAD-ის (Computer-Aided Design systems) კონცეფცია. CAD - ავტომატიზებული სისტემა, რომელიც ახორციელებს ინფორმაციულ ტექნოლოგიას პროექტირების შესასრულებლად, არის ორგანიზაციული და ტექნიკური სისტემა, რომელიც შექმნილია პროექტის პროცესის ავტომატიზაციისთვის. იგი შედგება

პერსონალისგან და მისი საქმიანობის ავტომატიზაციის ტექნიკური, პროგრამული და სხვა საშუალებების ნაკრებისგან.

მშენებლობის დაგეგმარება კვლავ შრომატევადი პროცესია. განხილული კვლევები ცდილობდნენ დაგეგმარების პროცესის სრულად ან ნაწილობრივ ავტომატიზაციას, პროექტების ინფორმაციის დამუშავების, მართვისა და გადაწყვეტილების მიღების სისტემების შემუშავების ჩათვლით. შემოთავაზებული სისტემები შეიძლება დაიყოს:

ცოდნაზე დაფუძნებული სისტემები;

4D CAD-ზე დაფუძნებული მოდელები;

4D BIM-ზე დაფუძნებული მოდელები.

ცოდნაზე დაფუძნებული სისტემების განვითარება დაიწყო 80-იანი წლების შუა ხანებში და ეხებოდა დაგეგმარების პროცესების ავტომატიზაციას ექსპერტის სისტემების გამოყენებით.

ყველა ეს სისტემა იყენებს ევრისტიკულ და შესწავლილ ცოდნას მშენებლობისა და დაგეგმვის პროცედურების შესახებ, რომლებიც ჩართულია კომპიუტერული პროტოტიპის მოდელში, რომ უზრუნველყოს უკუკავშირი და შექმნას დაგეგმვის გადაწყვეტილება. ისინი ძირითადად ეყრდნობოდა მომხმარებლის შეყვანის ციფრულ ფორმებს და ნაკლებად იყენებდნენ მექანიზმებს 2D და 3D ნახატების ინტერპრეტაციისთვის.

ტიპიური დაგეგმარების ცოდნაზე დაფუძნებული სისტემა შედგება კონტექსტისაგან, ცოდნის ბაზისა და დასკვნის ძრავისგან. კონტექსტი შეიცავს ინფორმაციას მიმდინარე პროექტის შესახებ. ცოდნის ბაზა შედგება სხვადასხვა სამშენებლო ტექნოლოგიების ცოდნისა და ევრისტიკისგან. დასკვნის ძრავა მუშაობს ცოდნით სამშენებლო გეგმა-გრაფიკის შექმნის კონტექსტში.

ცოდნაზე დაფუძნებული სისტემების მაგალითებია PLANEX, OARPLAN, GHOST, KNOWPLAN [87] და HISCHED [99].

ასეთი სისტემების მთავარი მიზნები არის მათი შემზღუდვეები და გადაწყვეტილების მიღების პროცესში დამოკიდებულება წესებისა და მეთოდების სახით დაპროგრამებულ ცოდნაზე, რაც თავის მხრივ იწვევს მომხმარებლის მინიმალურ ინტერაქციას სისტემასთან და ადამიანის პასუხისმგებლობის დაბალ ხარისხს დაგეგმვის პროცესში. გარდა ამისა, ის ფაქტი, რომ თითოეული

სამშენებლო პროექტი უნიკალურია და თითოეულ სამშენებლო ჯგუფს აქვს საკუთარი შესაძლებლობები, განსაზღვრული წესების ერთიან კრებულს უგარგის ხდის კონკრეტული გადაწყვეტილებების მისაღებად.

4D CAD მოდელები გაჩნდა 1990-იანი წლების დასაწყისში და აერთიანებდა 3D CAD მოდელებს პროექტის განრიგთან, რომ წარმოედგინა მშენებლობის გეგმა-გრაფიკის სახით.

CAD მოდელი იმპორტირებულია მოდელირების გარემოდან (მაგ. AutoCAD, MicroStation) და გრაფიკი იმპორტირებულია დაგეგმვის გარემოდან (მაგ. Primavera). CAD მოდელი და გეგმის ფაილები გაერთიანებულია სიმულაციური ფაილში, რომელიც აკავშირებს თითოეულ CAD კომპონენტს ან კომპონენტების ჯგუფს ერთ ან მეტ კონკრეტულ გეგმის აქტივობასთან, რათა შეიქმნას პროექტის 4D მოდელები.

4D CAD-ზე დაფუძნებული მოდელების მაგალითებია: Plan Visual Modeling System [102, 103], 4D Planner [110], 4D Annotator [82] და 4D Models [81].

ეს 4D ინსტრუმენტები სასარგებლო აღმოჩნდა დამგეგმავებისთვის ალტერნატიული გეგმის გადაწყვეტილებებზე დაფუძნებული ალტერნატიული სამშენებლო თანმიმდევრობის ვიზუალიზაციისთვის. თუმცა, ისინი არ უნდა ჩაითვალოს დაგეგმვის ინსტრუმენტებად, როგორც როგორ ეფუძნება უკვე ხელმისაწვდომ საგეგმო ინფორმაციას, მხოლოდ პროექტის გეგმის გრაფიკული წარმოდგენისთვის.

1.2. მშენებლობის კალენდარული გეგმის შედგენის მოდელები BIM პროგრამული უზრუნველყოფით

ბოლო წლებში BIM-ზე დაფუძნებული მოდელები აქტიურად იქნა გამოკვლეული ნაშრომებში [4, 12, 13, 48, 74, 80, 84, 86, 90, 100, 106, 107] და უკვე დადასტურდა, რომ აღემატება წარსულ ინსტრუმენტებს მშენებლობის ეფექტიანად წარმართვისთვის.

მრავალ უცხოურ ლიტერატურაში აღწერილია BIM-ზე დაფუძნებული სამშენებლო დაგეგმარების გენერირების პროცესის ავტომატიზაციის ზოგიერთი მცდელობა ამოცანის სირთულის შესამცირებლად.

ნაშრომი [106] გვიჩვენებს BIM-ში შენახული სამშენებლო ელემენტების რაოდენობის შესახებ ინფორმაციის გამოყენების შესაძლებლობას სამუშაოს ხანგრძლივობის გენერირებისთვის წარმოების განაკვეთების გამოყენებით.

ნაშრომში [106] შემოთავაზებულია ვიზუალური გრაფიკი პროექტების შესახებ ინფორმაციის ამოსაღებად და დაგეგმარების პროგრამაში გადასატანად. პროექტის ST მოდელი შეიქმნა Revit-ის გამოყენებით. პროექტის ელემენტების მოძიება, ორგანიზება, თანმიმდევრობა და გადატანა დაგეგმარების პროგრამულ უზრუნველყოფაში ხდება ST მოდელის გავლის დროს. გავლის დროს მომხმარებელს შეუძლია შეარჩიოს შენობის ელემენტი მასზე მითითებით. ეს შესაძლებლობა საშუალებას აძლევს მომხმარებელს შეარჩიოს ელემენტები, სანამ განახორციელებს ინფორმაციის გადაცემის ოპერაციას დაგეგმვის პროგრამაში. თუმცა, აპლიკაცია შემოიფარგლება მხოლოდ თანმიმდევრობით და ნავიგაციით შენობის მოდელის ფარგლებში. გარდა ამისა, ზოგიერთ მომხმარებელს შეიძლება გაუჭირდეს არჩევანის გაკეთება მაუსის და კლავიატურის გამოყენებით.

ნაშრომში [71] შეიმუშავა მარტივი 3D მოდელების გამოყენების კონცეფცია ობიექტების რაოდენობის, გეგმისა და 4D ვიზუალიზაციის შესაქმნელად, დაგეგმარების პროცესის სტრუქტურის შექმნა ინტერპრეტაციადი სისტემის შაბლონების გამოყენებით.

ნაშრომში [104] გვთავაზობს კომპიუტერულ სისტემას ნახევრად ავტომატურად შექმნას განრიგი ფაილებიდან ამოღებული მონაცემების საფუძველზე Industry Foundation Classes (IFC) სტანდარტის გამოყენებით.

ნაშრომში [89] შემოთავაზებული იყო პროექტის საინფორმაციო მოდელი PIM შენებლობის დაგეგმვის შესაქმნელად. PIM შედგება ტექნოლოგიის, ნორმების, რესურსების, კონსტრუქციისა და სამუშაოების კომპონენტებისგან. ტექნოლოგია შეიცავს მონაცემებს იმის შესახებ, თუ როგორ არის აგებული კონსტრუქციის სხვადასხვა კომპონენტი. ნორმები არის ელემენტები, რომლებიც გვაწვდიან ინფორმაციას იმის შესახებ, თუ რამდენ ხანს გრძელდება კომპონენტების აგების პროცესი. შემდეგ ტექნოლოგია და ნორმები

დაკავშირებულია რესურსებთან. რესურსები არის შემდეგი სახის: ხელსაწყოები, სამშენებლო მასალები, გრანსპორტი და ადამიანური რესურსები. მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების შესაქმნელად, დამგეგმავმა უნდა შემოიგნოს 3D BIM PIM-ში. შემდეგ PIM აფასებს 3D მოდელს და ამოიღებს სამუშაო პროცესს. ამ ტექნიკის მიხედვით, ინფორმაცია ნორმების, რესურსებისა და დამხმარე სამუშაოების შესახებ ამოღებულია PIM-დან. მიღებული მოდელი სტატიკურია და დამოკიდებულია სამშენებლო კომპანიის მონაცემებზე, ამიტომ მისი პრაქტიკაში გამოყენება რთულია.

ნაშრომში [64] წარმოდგენილია კვლევის ზოგიერთი გაფართოება [104], რათა შესაძლებელი გახდეს დაგეგმარების პროცესში მეტი ელემენტების დათვლა. სამუშაოების ავტომატური გაყოფა მომხმარებელს საშუალებას აძლევს მარტივად განსაზღვროს სამუშაოები, რომლებიც ნაწილობრივ პარალელურია დროში. იერარქიული სამუშაო სტრუქტურა უზრუნველყოფს სწორ დამუშავებას დეტალების სხვადასხვა დონეზე ერთ გრაფიკში. თუმცა, საჭიროა შემდგომი კვლევა, რათა მოხდეს ინფორმაციის მოცულობის ინტეგრირება. გარდა ამისა, საჭიროა ყველა მონაცემის შენახვა მხოლოდ ერთ მოდელში.

ნაშრომში [90] გამოიყენა Navisworks Autodesk 4D დაგეგმვის ვიზუალიზაციის დემონსტრირებისთვის. Navisworks პროგრამული უზრუნველყოფის ერთ-ერთი ყველაზე დიდი უპირატესობა ის არის, რომ მას შეუძლია მიიღოს 3D მოდელების უმეტესობა. მას შემდეგ, რაც მოდელი და პროექტის განრიგი Navisworks გარემოში იქნება, ინდივიდუალური სამუშაოები პირდაპირ უკავშირდება მოდელში დაყენებულ პუნქტს. თუ 10 სვეტი ეკუთვნის ერთსა და იმავე სამუშაოს, ანუ ისინი აგებულია ერთსა და იმავე დროს, მაშინ ეს სვეტები ჯგუფდება მოდელში ნაკრების შესაქმნელად და სამუშაოს ენიჭება ნაკრები.

ნაშრომში [74] წარმოდგენილია მიდგომა პროცესის შაბლონების მინიჭებისთვის და მათი ურთიერთდამოკიდებულების ავტომატურად განსაზღვრის მიზნით. წარმოდგენილმა მეთოდმა მოახდინა სამშენებლო სამუშაოების პროცესების მოდელირება, როგორც პროცესის შაბლონები და გამოიყენა ისინი BIM მონაცემებთან ასოცირების საფუძველზე სხვადასხვა სცენარების დასამუშავებლად. მიუხედავად შემოთავაზებული მოდელის უპირატესობებისა,

აუცილებელია უფრო მოქნილი შაბლონების დამუშავება. მაგალითად, სივრცითი ურთიერთობები და შენობის საინფორმაციო მოდელის სხვა თვისებები შეიძლება იყოს გათვალისწინებული. გარდა ამისა, საჭიროა შაბლონების ავტომატური აღმოჩენა და მინიჭება.

ნაშრომში [73] შეიქმნა ჩარჩო, რომელიც გამოიყენება BIM მოდელის განრიგის ავტომატურად შესაქმნელად. ეს სისტემა ორიენტირებულია მონაცემთა გაცვლაზე ifcXML-ის გამოყენებით. შემოთავაზებული პროცესი დაყოფილია ხუთ ეტაპად:

1. BIM პროექტირების მიღება;
2. BIM მონაცემების ანალიზი;
3. გაანალიზებული მონაცემების სამუშაო მონაცემებად გარდაქმნა;
4. კალენდარული გეგმის შექმნა;
5. გაწმენდის პროცესი.

მიუხედავად იმისა, რომ შემოთავაზებულ მეთოდოლოგიას შეუძლია სწრაფად შექმნას მშენებლობის კალენდარული დაგეგმვა-გრაფიკი, არსებობს რამდენიმე შეზღუდვა. მშენებლობის გრაფიკის შექმნა შემოიფარგლება ძირითადი შენობის კომპონენტების რაოდენობით. ტექნიკა ასევე განიცდის თავად ifcXML ფორმატის შეზღუდვას. მოდელები, რომლებიც შემოწმდა ამ ტექნიკის გამოყენებით, არის მარტივი BIM ობიექტები შეზღუდული რაოდენობით დეტალებით.

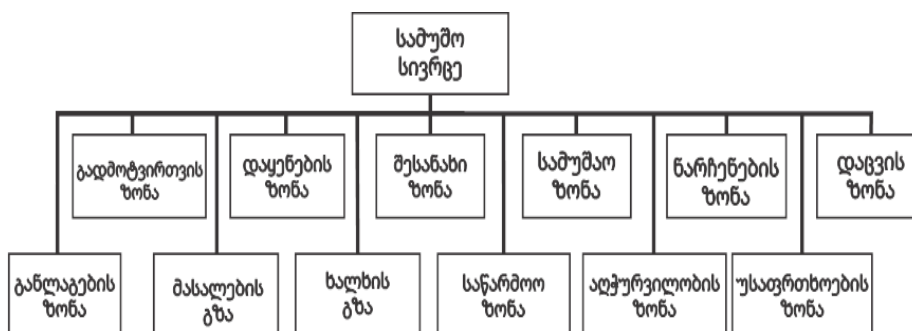
1.3. სამუშაო სივრცის დაგეგმარება

სამუშაო ადგილი არის ტერიტორია, სადაც მიმდინარეობს სამშენებლო სამუშაოები. მშენებლობის დროს შეზღუდულ სამუშაო სივრცეში ჩართულია შრომისთი მუშახელი, საინჟინრო აღჭურვილობა, სამშენებლო მასალები, დროებითი და მუდმივი ნაგებობები. სამუშაო სივრცის მოთხოვნამ შეიძლება გამოიწვიოს სამუშაო პროცესის გადაკვეთა, ამიტომ აუცილებელია სამუშაო ადგილების ეფექტიანად ორგანიზება (სურ. 1.) [63].



სურ. 1. სამუშაო სივრცე

ნაშრომში [98] წარმოდგენილია სამშენებლო სამუშაოებისთვის საჭირო სხვადასხვა ტიპის სამუშაო ადგილების ემპირიული კლასიფიკაციის სისტემა. სამშენებლო მოედანზე სამუშაოებზე დაკვირვებით დადგინდა, რომ სამშენებლო დავალების შესრულებისას საჭიროა სხვადასხვა „ტიპის“ სივრცე. სივრცითი საჭიროებები იყოფა ორ კატეგორიად: მონებად და ბილიკებად. მონები არის სივრცეები, რომლებიც დაკავებულია აქტიური საქმიანობით საქმიანობის პერიოდში. ბილიკები არის სივრცეები, რომლებიც საჭიროა მასალების, ადამიანებისა და სხვა რესურსების გადაადგილებისთვის. ამ ორი კატეგორიიდან გამომდინარე, იდენტიფიცირებულია სამუშაო ადგილის 12 ტიპი (ნახ. 1.).



ნახ. 1. სამუშაო სივრცის ტიპები

ნაშრომში [40, 41] ავტორები ვარაუდობენ, რომ სამშენებლო სამუშაო ადგილები არსებობს 12 განსხვავებული ფორმით, რომლებიც შეიძლება დაიყოს 3 ჯგუფად: მაკრო და მიკრო ღონე და ბილიკები. მაკრო ღონე მოიცავს იმ სივრცეებს, რომლებიც ღილია და განლაგებულია სამშენებლო მოედანზე შედარებით სტატიკურ

მდგომარეობაში, როგორიცაა მასალების შესანახი ადგილები. მიკრო ღონე ეხება იმ სფეროებს, რომლებშიც უშუალოდ მიმდინარეობს სამუშაოები სამშენებლო პროდუქციის შესაქმნელად, მაგალითად, ადამიანების, აღჭურვილობისა და დაცული უსაფრთხოების სფეროები. ეს სივრცეები ასევე შეიძლება შეიცავდეს შენობის კომპონენტებს. ბილიკები არის სივრცეები, რომლებიც საჭიროებენ სივრცეს ადამიანებისა და მანქანების გადასაყვანად მაკრო და მიკრო ღონის სივრცეებს შორის.

შემუშავებულია კომპიუტერიზებული მეთოდი სამუშაო ადგილების ზოგადი კონსტრუქციის მეთოდის მოდელში წარმოდგენისთვის. მან შეაჯამა 3 საერთო აგრიბუგი სხვადასხვა სახის სამუშაო სივრცის წარმოსადგენად:

1. საცნობარო ობიექტი, რომელსაც ეხება სივრცე;
2. სივრცის ორიენტაცია მის საცნობარო ობიექტთან მიმართებაში;
3. სივრცის ზომა ან მოცულობითი პარამეტრები, როგორიცაა სიგრძე, სიგანე და სიმაღლე.

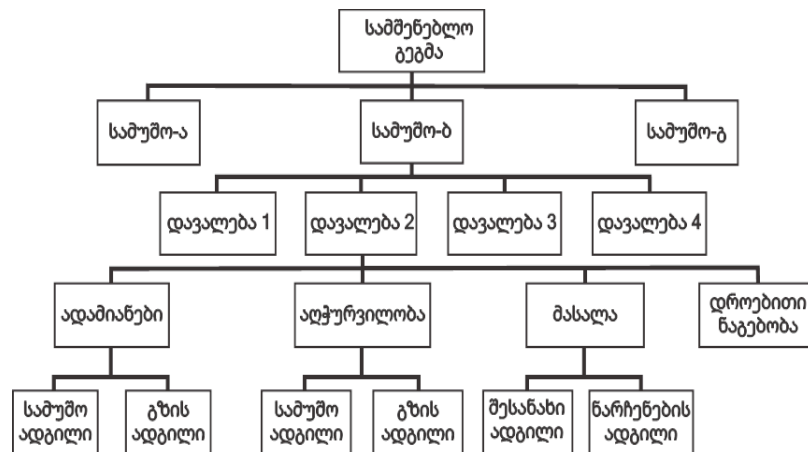
ნაშრომი [93]-ის ავტორების შექმნილია მეთოდი, სადაც სამშენებლო ობიექტზე გამოყენებული სამუშაო ადგილები კლასიფიცირდება შემდეგნაირად:

- მთლიანი ფართობი - ეს არის სამშენებლო მოედნის მთლიანი ფართობი;
- სამშენებლო მასალებისთვის სივრცე - ეს არის შენობის კომპონენტების მიერ დაკავებული სივრცე;
- სამონტაჟო სივრცე - ეს არის ღრობითი ნაგებობების მიერ დაკავებული სივრცე;
- ხელმისაწვდომი სივრცე - ეს არის სხვაობა მთლიან სივრცესა და პროდუქტის სამშენებლო მასალებისთვის სივრცისა და სამონტაჟო სივრცის ჯამს შორის.

ნაშრომში [63] მოცემულია იერარქიულ სტრუქტურა საჭირო სამუშაო სივრცისთვის, რომელშიც სამუშაო შეიძლება შეიცავდეს მრავალ დავალებას და ასევე მოითხოვს სხვადასხვა სამუშაო სივრცეს და ბილიკებს (ნახ. 2.). გაკეთდა მცდელობა დაემატებინა სამუშაო სივრცის მიკრო ღონის გამოყენების უფრო დინამიური სურათი CAD-ის გამოყენებით მეთოდის გამოყენებით. Microsoft Project-ისა და AutoCAD-ის ინტეგრაციით, მშენებლობის დამგეგმავს შეუძლია ხელით განავითაროს სამშენებლო მოედნის სივრცითი განლაგება. სამშენებლო

მოედანზე არსებული ადგილების აღსანიშნავად, თითოეული სამუშაოსთვის განისაზღვრა რესურსები, სივრცის მოთხოვნების ჩათვლით, რომლებიც ინტეგრირებული იყო 2D ნახაზებთან. საჭირო სივრცე მიიღება ორიგინალური პროექტის განრიგიდან და იყოფა იერარქიულ სტრუქტურად.

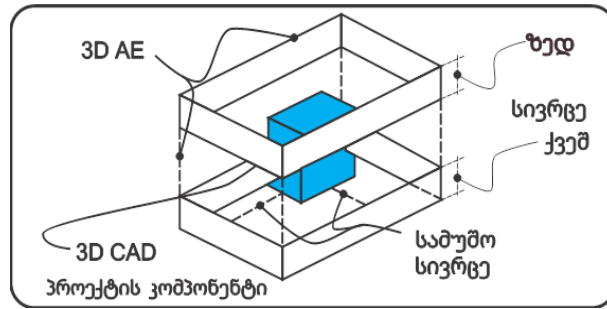
ნაშრომში [93] შემოთავაზებული იქნა პროგრამული პაკეტი, რომელიც საშუალებას იძლევა ხელით განსაზღვროს ხელმისაწვდომი ზონები. ეს ტექნიკა საშუალებას აძლევდა მშენებლობის დამგეგმავის ინტერაქტიულად მონიშნოს ტერიტორიები, რომლებიც არ არის დაკავებული ძირითადი სამუშაოებით ან ღროებითი სამუშაოებით. თანმიმდევრულად საჭირო რესურსების სივრცეები შეიძლება მიენიჭოს ხელით დახატულ ზონებს.



ნახ.2. სამუშაო სივრცის იერარქიულ სტრუქტურა

საჭირო სამუშაო სივრცის დინამიურად აღწერა, ე. ი. სამუშაო სივრცის კომპლექტების განსაზღვრა და ღროთა განმავლობაში მათი შეცვლა რთული პრობლემაა, რადგან არსებობს მრავალი ალტერნატიული სტრატეგია სამუშაო სივრცის გამოყენებისას გაშვების დროს.

ავტორმა [79] თავის კვლევაში გადაწყვიტა შეექმნა სამშენებლო სამუშაო ადგილი დაფუძნებული აპროქსიმაციის მრუდის AE საფუძველზე, რომელიც იყენებს GE ყუთს სამუშაო სივრცის წარმოსადგენად (ნახ. 3).



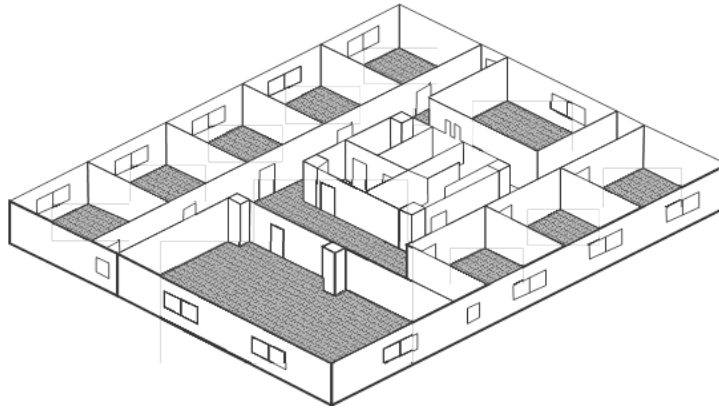
ნახ. 3. მიახლოების კონვერტი (AE)

ნაშრომში [85] ავტორებმა სამუშაო სივრცე დაყვეს სამონტაჟო, საწარმოო, საგრანსფერო, უსაფრთხოების და სატვირთო სივრცედ, სამუშაოს მახასიათებლებისა და რესურსის გამოყენების ტიპის მიხედვით. დროებითი ნაგებობები, რომლებიც კვლევის ყურადღების ცენტრში იყო, მოიცავდა მასალების ჩასატვირთად, გამაგრების დამზადებას, დაცვას, უსაფრთხოების მოწყობილობების დამონტაჟებას და შესაბამისი აღჭურვილობის განთავსებას.

სამუშაო [112] განსაზღვრავს სამშენებლო სამუშაო ადგილს, როგორც რესურსების ერთობლიობას, რომელიც მოიცავს შენობის კომპონენტებს: სივრცეებს, შენობის გეგმას, ხალხს, აღჭურვილობასა და მასალებს.

ნაშრომის [54, 55] ავტორებმა შემოგვთავაზეს სამუშაოებისთვის საჭირო სხვადასხვა ტიპის სამუშაო ადგილების ჩართვა, რომლებიც ეფუძნება [43, 97, 98]-ში აღწერილ კლასიფიკაციას. მათ განსაზღვრეს ეს სამუშაო ადგილები, როგორც ადგილები ადამიანებისთვის, აღჭურვილობისთვის, მასალების, ნამსხვრევებისა და უსაფრთხოებისთვის.

ავტორებმა დააკავშირეს ID კლავიშების გამოყენებით საჭირო სამუშაო ადგილი კონკრეტულ სამუშაოსთან, ობიექტების ყველა 3D კომპონენტის ავტომატური სინქრონიზაციის გზით. სამუშაოს ID ემთხვევა 3D კომპონენტის ID-ს. შემდეგ განისაზღვრება და მოწოდება შესაბამისი სამუშაო სივრცის მოთხოვნები. საჭირო სამუშაო ადგილების გრაფიკული წარმოდგენისთვის გამოყენებული იქნა ბადეზე დაფუძნებული წარმოდგენა. სამშენებლო მოედანი დაყოფილი იყო უჯრედებად, თითოეულს საჭირო სამუშაო ადგილი მიეკუთვნებოდა ქსელის უჯრედების სერიას (ნახ. 4.).



ნახ. 4. სამშენებლო მოედნის დაყოფა უჯრედებად

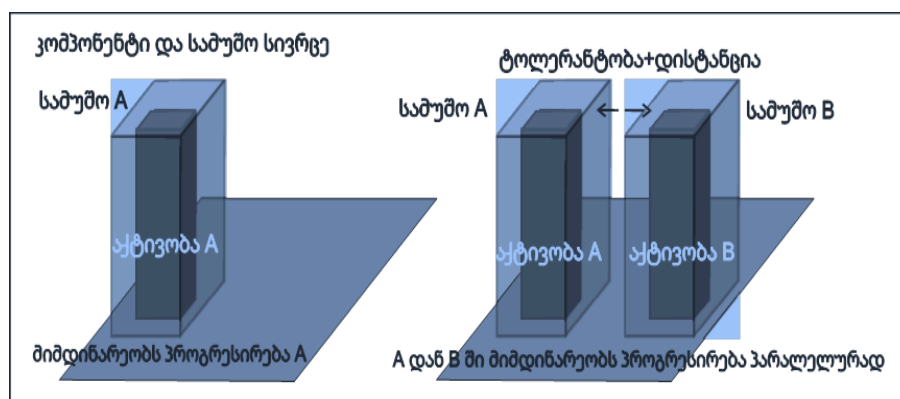
ნაშრომი [86] გვთავაზობს სამუშაო სივრცის ორ გიჟად დაყოფას, რომლებიც ჰყოფს ობიექტის სივრცეს და ზოგად სივრცეს რესურსების შერჩევის ნიშუმისა და სამუშაო მახასიათებლების შესაბამისად. ობიექტის სივრცე, როგორიცაა საძირკველი, სვეტი ან ფილა, არის სივრცე, რომელსაც აქვს მასთან დაკავშირებული ინდივიდუალური სამუშაო. საერთო ფართი არის სამუშაო სივრცე, რომელიც საერთოა სამუშაოების უმეტესობისთვის მაგალითად, ყალიბებისა და აარმატურის წარმოებისთვის, მიწოდებული მასალების, აღჭურვილობისა და სამშენებლო უბნიდან მიღებული ნარჩენების შესანახად.

ნაშრომში [46] სამუშაო ადგილები დაიყო შემდეგ კატეგორიებად: ობიექტებისთვის ძირითადი სივრცეები, დამხმარე სივრცეები და უსაფრთხოების ზონები.

ავტორებმა ასევე წარმოადგინეს სხვადასხვა გიჟის სამუშაო სივრცის გენერირებისა და განაწილების პროცესი. ეს პროცესი იწყება რესურსების გამოყოფით თითოეული გიჟის სამუშაოსთვის, მშენებლობის მეთოდის დადგენის შემდეგ. მომხმარებელი შეიყვანს სამუშაო სივრცის სავარაუდო ზომასა და გიჟს, რათა შექმნას სამუშაო სივრცის შეზღუდვის ველი, მშენებლობის მეთოდის საფუძველზე. ადრე განსაზღვრული ყველა სხვადასხვა გიჟის სამუშაო სივრცე შეიძლება მინიჭებული იყოს რამდენიმე გზით, რომლებიც მიიღება სამუშაო სივრცის აგრიბუტების რელაქტირებით, როგორიცაა მისი მოცულობა, ფორმა და განლაგების პოზიცია.

ნაშრომში [84] გამოყენებულია შემოსაზღვრული ჩარჩოს კონცეფცია (ნახ. 5.), რომელიც გამოიყენება 3D გრაფიკების გამოთვლით გეომეტრიაში 3D ფორმის

სამუშაო სივრცის შესაქმნელად. სამუშაო სივრცის ფორმა იქმნება თითოეული კომპონენტის მხოლოდ მინიმალური და მაქსიმალური კოორდინატთა მნიშვნელობების (X, Y და T) გამოყენებით, რომლებიც დაკავშირებულია თითოეულ სამუშაოსთან YW8 4D მოდელში.



ნახ. 5. შემოსაზღვრული ჩარჩო

სამუშაო სივრცის დაგეგმვის ბოგეირთი კვლევის მიმოხილვა ნაჩვენებია ცხრილი 1.-ში ანალიზმა აჩვენა, რომ თითქმის ყველა წარმოდგენილი მიდგომა მოითხოვს დეტალური მონაცემების შეყვანას და მონაცემთა შეყვანის სახელმძღვანელო მეთოდს.

ცხრილი 1.

სამუშაო სივრცის დაგეგმვის შესახებ კვლევების მიმოხილვა

წარსული კვლევები	გეგმის დეტალიზაციის დონე	მონაცემთა შეყვანის მეთოდი	კონფლიქტის ასახვა გამომსვლელ მონაცემებზე (გრაფიკზე)	ჯამური გრაფიკის მეთოდი
Thabet & Beliveau [1997]	საშუალო	ხელის მეთოდი	მხოლოდ ვიზუალიზაცია	2D
Riley & Sanvido [1997]	საშუალო	ხელის მეთოდი	მხოლოდ ვიზუალიზაცია	2D
Akbas [2004]	დაბალი	ხელის და ავტომატური მეთოდი	ვიზუალიზაცია და კონფლიქტის გადაწყვეტა	2D

Dawood & Mallasi [2006]	საშუალო	ხელის მეთოდი	მხოლოდ ვიზუალიზაცია	3D
Vinch & N0111 [2006]	საშუალო	ხელის მეთოდი	მხოლოდ ვიზუალიზაცია	2B
IonSe1^ [2006]	საშუალო	ხელის მეთოდი	მხოლოდ ვიზუალიზაცია	3D
E1tabcH [2013]	მაღალი	ხელის მეთოდი	ვიზუალიზაცია და კონფლიქტის გადაწყვეტა	2B
Dongyi ძრ. [2013]	საშუალო	ხელის მეთოდი	ვიზუალიზაცია და კონფლიქტის გადაწყვეტა	3B

1.4. მშენებლობის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის მოდელები და მეთოდები

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ძირითად მიზნებს წარმოადგენს დროისა და ღირებულების ოპტიმიზაცია. თანამედროვე პირობებში აღინიშნება კონკურენციის ზრდა, ამიტომ აუცილებელია გექნიკურმა მომხმარებელმა ეფექტიანად მოაწყოს სამშენებლო პროექტები, რათა მაქსიმალური სარგებელი მიიღოს დროისა და რესურსების მინიმალური ხარჯვით [35]. გარდა ამისა, დღესდღეობით მშენებლობის სერიოზული პრობლემაა მშენებლობის ვადების შეუსრულებლობა [11, 21, 24, 31, 36]. ეს იწვევს პროექტის განხორციელების ღირებულების ზრდას და შესაბამისად, მშენებლობის მონაწილეთა მოგების დაკარგვას.

პროექტის თავდაპირველი გრაფიკი (კალენდარული გეგმა) შესაბამისი შეიძლება არ იყოს მინიმალური დროისა და ჯამური ღირებულების შემცირების მისაღწევად. ოპტიმიზაციის სირთულეები წარმოიქმნება, რადგან ასობით სამუშაო პროექტისათვის ამ სამუშაოების შესრულების სხვადასხვა ვარიანტი არსებობს, მაგალითად, სხვადასხვა სამშენებლო ბრიგადების ან აღჭურვილობის გამოყენება.

ეს ქმნის ინჟინრებისთვის კომბინატორული ძიების პრობლემებს საუკეთესო სამშენებლო ბრიგადების ან საუკეთესო გექნიკა-აღჭურვილობის განსაზღვრისას, რათა დაასრულდეს პროექტი სამიზნე დროის მინიმალური ღირებულებით.

ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, მრავალი კვლევა ჩატარდა სამშენებლო დაგეგმარების პროექტის ოპტიმიზაციის პრობლემის გადასაჭრელად. გამოყენებული მეთოდებიდან გამომდინარე.

ეს კვლევები შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად [78]:

- მათემატიკური პროგრამირების საფუძველზე;
- ევრისტული მეთოდების საფუძველზე;
- ევოლუციური ალგორითმების საფუძველზე.

თითოეული ჯგუფის უპირატესობები და უარყოფითი მხარეები ნაჩვენებია ცხრილი 2.-ში.

ცხრილი 2.

სამშენებლო გეგმის ოპტიმიზაციის მეთოდებს შორის შედარება

	ევრისტული მეთოდები	მათემატიკური პროგრამირება	გენეტიკური ალგორითმები
უპირატესობები	უბრალოდ გაგება დროის ეკონომია დამუშავებაზე მისაღები გადაწყვეტილებები	• უზრუნველყოფს ოპტიმალურ გადაწყვეტას მცირე ზომის პროექტებისთვის	შეუძლია გადაწყვეტის მასშტაბური პროექტები იძლევიან ოპტიმალური გადაწყვეტის გარანტიას. იძლევიან შესაძლო გადაწყვეტილებების დიაპაზონს
ნაკლოვანები	არ უზრუნველყოფს ოპტიმალურ გადაწყვეტას არ იძლევა შესაძლო გადაწყვეტილებების დიაპაზონს	ძნელია ფორმულირება მასშტაბური პროექტების მოგვარება შეუძლებელია	დიდი დრო სჭირდება არ უთითებენ, თუ როდის მიიღებენ საერთო ოპტიმალურ გადაწყვეტილებას

მათემატიკური პროგრამირების მოდელები პრობლემას გარდაქმნის მათემატიკურ მოდელად და იყენებენ წრფივი პროგრამირების, მთელი რიცხვებით პროგრამირების ან დინამიკური პროგრამირების მეთოდებს პრობლემის გადასაჭრელად

ოპტიმიზაციის პრობლემების გადასაჭრელად დაინერგა მთელი რიცხვებით პროგრამირების 3 ტიპის მოდელი:

- დროსა და ღირებულებას შორის წრფივი დამოკიდებულებით;
- ნაწილობრივ წრფივი დამოკიდებულებით;
- დისკრეტული დამოკიდებულებით;

დაინერგა ძირითადი მოდელის კონცეფცია პროექტის მთლიანი ღირებულების შესამცირებლად, პროექტის მაქსიმალური დასაშვები ხანგრძლივობის გათვალისწინებით. გამოყენებული იყო მათემატიკური პროგრამირების მოდელი და აშენდა სამიზნე ფუნქცია ისე, რომ პროექტის მთლიანი ღირებულება მინიმალური იყო, ხოლო პროექტის დასრულების დრო სასურველ დროზე ნაკლები, ამავე დროს სრულდებოდა სამუშაოების თანმიმდევრობის მოთხოვნები.

ნაშრომში [18] შემოთავაზებულია მათემატიკური მოდელი და პროექტის ღირებულების შეზღუდვით შესასრულებელი სამუშაოების მინიმიზაციის მეთოდი, რომლებიც გამოიყენება შესასრულებელი სამუშაოებისა ან მათი კომპლექსების მოცემული ალგერნატიული ვარიანტებით ქსელური მოდელების პროექტებისათვის.

ნაშრომში [17] აღწერილია პროექტირების ხარჯების შემცირებისა და სამუშაო დროის შეზღუდვების მოდელი და მეთოდი. ამ მეთოდების გამოყენებით გამოთვლების ავტომატიზაციისთვის, შემუშავებული იქნა „Project Optimum“ პროგრამული უზრუნველყოფა. ამ პროგრამული უზრუნველყოფის დახმარებით, მომხმარებელს შეუძლია განსაზღვროს პროექტის ეტაპების შესრულების ალგერნატიული ვარიანტების ოპტიმალური კომბინაცია ერთ-ერთი კრიტერიუმის მიხედვით: ან დრო ან ღირებულება. პროექტით გათვალისწინებული სამუშაოების ხანგრძლივობის გრაფიკული წარმოდგენისათვის, ასევე მათი პროგრამაში ურთიერთკავშირებისათვის იგებოდა განგის დიაგრამა.

ნაშრომში [92] წარმოდგენილია მათემატიკური მიდგომა, რომელიც დაფუძნებულია მთელ რიცხვთან პროგრამირებაზე, ფულის დროებითი ფულადი ღირებულების კონცეფციის დამატებით, კრიტიკული გზის ხანგრძლივობის შესამცირებლად. ფულის დროებითი ღირებულების კონცეფცია ღიდ გავლენას ახდენს ღიდი კაპიტალის დაბანდებების პროექტების ოპტიმალურ შედეგებზე, რაც იმას ნიშნავს, რომ როცა პროექტის დასაწყისში მუშაობის ხანგრძლივობა

მცირდება, ინვესტიციები განხორციელდება პროექტის დასაწყისიდან ბოლომდე. როდესაც სამუშაო ხანგრძლივობა მცირდება პროექტის ბოლოს, ინვესტიცია გაცილებით მცირე პერიოდით განხორციელდება. მათ ჩამოაყალიბეს მოდელი, რომ იპოვონ ყველაზე იაფი ხერხი სამუშაო დროის შესამცირებლად, ფულის დროებითი ღირებულების საფუძველზე.

ოპტიმიზაციის პრობლემების აღწერილ მოდელებში ერთ-ერთი უდიდესი სირთულეა დამუშავებული პარამეტრებისა და მრავალი განტოლების რაოდენობა. ნაშრომში მოცემულია მათემატიკური მოდელი, რომელშიც შეზღუდვები ემყარება არა სამუშაოების რაოდენობას, არამედ ქსელში ბილიკების რაოდენობას. როდესაც ბილიკების რაოდენობა ნაკლებია, ვიდრე სამუშაოების რაოდენობა, განტოლებების რაოდენობაც ნაკლები იქნება, ვიდრე წინა მოდელებში, ამრიგად, გადაწყვეტის დრო და გამოთვლების სიმარტივე წარმოადგენს ამ მოდელის უპირატესობებს.

მათემატიკური პროგრამული მოდელების ძირითადი უარყოფითი მხარეებია ფორმულირების სირთულე და დიდ პროექტებთან გამკლავების შეუძლებლობა.

ევრისტული მეთოდები ეძებს გზებს ინფორმაციის ინტერპრეტაციისთვის თითოეული ცდისათვის, ხოლო შემდეგ კი შეარჩევენ მეთოდებს, რომლებიც მიდიან გამოთვლით ალგორითმთან საერთო გადაწყვეტის მოსაძებნად.

[77] ნაშრომში გამოყენებული იყო ევრისტული მეთოდი დროისა და ღირებულების ოპტიმიზაციის პროექტისთვის. მეთოდიკა ემყარება „მაქსიმალური ნაკადის მინიმალური ჭრის“ „maximal flow-minimum cut“ თეორიას. ამ მეთოდიკაში, დაგეგმარების პროცედურა განსაზღვრავს კრიტიკულ გზებს ქსელში. სამუშაო გეგმობა არის იმ ღირებულების ზრდა, რომელიც საჭიროა სამუშაოს ხანგრძლივობის შესამცირებლად დროის ერთეულში. თითოეულ კრიტიკულ გზაზე განისაზღვრება მინიმალური გეგმობით ზედაობა. ეს სამუშაოები არის მინიმალური ჭრის (ღირებულება) ნაკრები. ალგორითმი შეკუმშავს მინიმალური ღირებულების სამუშაოების ერთობლიობას, ციკლი განმეორდება გაჩერების კრიტერიუმამდე ან სანამ არ მიიღწევა კალენდარული გეგმის მაქსიმალური შეკუმშვა.

ევრისტული მეთოდები ადვილად გასაგებია და შესაბამისად, უფრო ადვილად განსახორციელებელია, მაგრამ ოპტიმალური გადაწყვეტის პოვნა არაა გარანტირებული.

ევოლუციური ალგორითმები ხელოვნური ინტელექტის მიმართულებაა, რომელიც ეფუძნება ევოლუციური ბიოლოგიისა და მოსახლეობის გენეტიკისგან ნასესხებ პრინციპებსა და კონცეფტუალურ აპარატი. გენეტიკური ალგორითმები GA წარმოადგენენ ოპტიმიზაციის მეთოდს, რომელიც დამყარებულია ბუნებრივი შერჩევის კონცეფციასა და გენეტიკაზე. გენეტიკური ალგორითმები ძირითადად ემსახურებიან გადაწყვეტის მოძებნას ძეხვის ძალიან დიდ, რთულ სივრცეებში [22].

ნაშრომში [65] GA-მოდელი წარმოდგენილია ერთი მიზნით, რომ პროექტის ვარიანტებში დასრულების სხვადასხვა დროით მოხდეს საერთო ღირებულების მინიმიზირება და პარეტო-ფრონტის მიღება. [56] ნაშრომში დამუშავებულია მრავალკრიტერიული მოდელი სამშენებლო ბაჟნის დაგეგმვისთვის, იმისათვის, რომ ღირებულების ოპტიმიზაციაში ჩაიღოს ერთდროულად უსაფრთხოების საკითხებიც. [121] ნაშრომში შემოთავაზებული იყო მრავალკრიტერიული GA-მოდელი დრო-ღირებულების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად. მათ ასევე განიხილეს არამკვეთრი სიმრავლის თეორიები მოდელის პრაქტიკულობის ასამაღლებლად. სხვა ნაშრომებში [123] შემუშავებულია სისტემა-პროტოტიპი მრავალმიზნობრივი GA-მოდელის საფუძველზე, რომელიც აღჭურვილია ადაპტაციური წონალობით. [115]-ის ავტორებმა კომპრომისის ამოცანის გადასაწყვეტად პროექტის ღირებულების, დროისა და რესურსებს შორის გამოიყენეს გენეტიკური მოდელი სტოქასტიკური უკმარზომილი დახარისხებით.

[37] ნაშრომში წარმოდგენილია მოდელი რომელიც შეიცავს გენეტიკური ალგორითმების მრავალმიზნობრივ მოდელში „LOB“ ბალანსირების ხაზის და „GPM“-ის კრიტიკული გზის მეთოდის ძირითად კონცეფციებს. მოდელი შემუშავებული იყო რესურსების გამოყენების ოპტიმიზაციის შემსუბუქებისათვის ტიპურ სამშენებლო პროექტებში, იმისათვის, რომ მოხდეს პროექტის ღირებულებისა და ხანგრძლივობის ერთდროული მინიმიზაცია მისი ხარისხის მაქსიმიზაციის დროს.

[44, 45] ნაშრომებში შესრულებულია ექსპერიმენტული ჰიბრიდული მეტა-ევრისტიკული გენეტიკური ალგორითმის კვლევა იმისათვის, რომ გაიზომოს

ძირითად პარამეტრებს შორის ურთიერთქმედება, როგორებიც არის კროსოვერი, მუტაცია და პოპულაციის ზომა. ექსპერიმენტმა გვაჩვენა, რომ მოდელის პარამეტრების გაუმჯობესების ხარჯზე ოპტიმალური გადაწყვეტა გაანგარიშების მოკლე ვადებში მიიღება.

[61] ნაშრომში მოყვანილია მრავალკრიტერიული გენეტიკური ალგორითმი კომპრომისის ამოცანის გადასაწყვეტად დროსა და ღირებულებებს შორის. მიდგომა ეძებს ლოკალურად პარეტოს ოპტიმალურ ან ლოკალურად უკმარზომილის მიჯნას, სადაც ერთდროულადაა ოპტიმიზირებული პროექტის დრო და ღირებულება.

[101] ნაშრომის ავტორებმა შეიმუშავეს ალგორითმი შეზღუდული რესურსების მდგომარეობაში პროექტის დროსა და ღირებულებას შორის კომპრომისის ამოცანის გადასაწყვეტად გადაწყვეტის მიღების მულტიინდექსის მეთოდის გამოყენებით გენეტიკური ალგორითმის საფუძველზე.

ნაშრომში [1] შემოთავაზებული იყო სამუშაოთა დაგეგმვის ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდი ევოლუციური და იმიტაციური მოდელების ინტეგრაციის საფუძველზე. ამოცანის გადასაწყვეტად შემუშავებული იყო გენეტიკური ოპტიმიზაციის ინტელექტუალური აგენტი, გენეტიკური ალგორითმების ევოლუციური მეთოდის მარეალიზებული. იმიტაციური მოდელის დანიშნულებაა ინდივიდუალურ-გადაწყვეტათა ვარგისიანობის ფუნქციის შეფასება საპროექტო სამუშაოების მიხედვით საკუთარი და სუბმოიჯარეთა რესურსების განაწილების დინამიური ხასიათის.

[119] ნაშრომში შემოთავაზებულია გენეტიკური ალგორითმის საფუძველზე ოპტიმიზაციის მოდელი პროექტის დროსა და ღირებულებას შორის კომპრომისის ამოცანის გადასაწყვეტად სამუშაოთა რესურსის უწყვეტობისადმი სხვადასხვა მოთხოვნების გათვალისწინებით.

კვლევის ზოგიერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრები ოპტიმიზაციის დაგეგმვისათვის ევოლუციური ალგორითმის გამოყენებით ნაჩვენებია ცხრილი 3.-ში.

როგორც ცხრილშია ნაჩვენები, მკვლევარების განსაკუთრებულ ყურადღებას იპყრობს გენეტიკური ალგორითმები GA.

დეტერმინირებულ მოდელებში ყველა ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს გადაწყვეტის მიღების სიგუაციის განვითარებაზე, ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრულია და მათი მნიშვნელობები ცნობილია გადაწყვეტის მიღების მომენტში.

სტოქასტიკური მოდელი ვარაუდობს განუსაზღვრელობის ელემენტის არსებობას, ითვალისწინებს სიგუაციის განმსაზღვრელი ფაქტორებისა და პარამეტრების მნიშვნელობათა ალბათურ განაწილებას.

ცხრილი 3.

კვლევები პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის შესახებ

წარსული კვლევები	მეთოდი	პრობლემის ტიპი	გადაწყვეტა
Feng и др. (1997)	GA	დეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Li & Love (1997)	GA	დეტერმინული	საუკეთესო გადაწყვეტა
Hegazy (1999)	GA	დეტერმინული	საუკეთესო გადაწყვეტა
Feng и др. (2000)	GA	სტოქასტიკური	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Leu и др. (2001)	არამკაფიო ლოგიკა და GA	სტოქასტიკური	საუკეთესო გადაწყვეტა
Zheng и др. (2004)	GA და ადაბტიური წონა	დეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Yang (2007)	PSO	დეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Rahimi & Iranmanesh (2008)	PSO	დეტერმინული	საუკეთესო გადაწყვეტა

Xiong & Kuang (2008)	ACO	ლეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Zhang & Li (2010)	PSO	ლეტერმინული	საუკეთესო გადაწყვეტა
Christodoulou (2010)	ACO	სტოქასტიკური	საუკეთესო გადაწყვეტა
Ghorbanali (2011)	GA	ლეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი
Zhang и др. (2013)	GA	ლეტერმინული	უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფი

ლეტერმინირებული მოდელები ერთის მხრივ უფრო გამარტივებულს წარმოადგენენ, რამდენადაც განუსაზღვრელობის ელემენტის საკმარისად სრულად გათვალისწინების საშუალებას არ იძლევიან. მეორეს მხრივ, ისინი საშუალებას იძლევიან გავითვალისწინოთ მრავალი დამატებითი ფაქტორი, ხშირად მიუწვდომელი სტოქასტიკური მოდელებისათვის.

ზოგიერთ გამოკვლევებში შედეგები უკმარზომილი გადაწყვეტების ჯგუფს წარმოადგენენ, სხვებში კი ამოცანის ერთ გადაწყვეტას წარმოადგენს.

პროექტის დაგეგმარების ოპტიმიზაციის ამოცანა ეკუთვნის რთული სისტემების მართვის მრავალკრიტერიულ ამოცანათა კლასს, რომელთა გადაწყვეტის ძეგნის დრო ექსპონენციალურად იზრდება ამოცანის განზომილებისაგან დამოკიდებულებით. დაგეგმარების ამოცანის გადაწყვეტის კლასიკურ მეთოდებს მრავალი ნაკლი აქვთ. მაგ. კომბინირებული მეთოდის გამოყენება, ასევე, მათემატიკური პროგრამირება დაკავშირებულია მნიშვნელოვნად ხანგრძლივ გამოანგარიშებასთან დიდი განზომილების ამოცანების კვლევისას. ამას გარდა, მოცემული მეთოდები განიცდიან სიძნელეებს ოპტიუმის ძეგნაში შეზღუდვების დინამიური სისტემის არსებობისას, რომელიც დაგეგმარების ყოველ ნაბიჯზე იცვლება [27]. გენეტიკური ოპტიმიზაციის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს გადავლახოთ წინა მეთოდების გამოკვეთილი ნაკლი, მათ შორის, მივალწიოთ გადაწყვეტის ძიების დროის შემცირებას, ამოცანის განზომილებიდან კვადრატულ დამოკიდებულებამდე [1, 19, 26].

იმისათვის, რომ GA გამოვიყენოთ ეფექტიანად, აუცილებელია შევიზუშაოთ პრობლემის წარმოდგენის შესაბამისი სქემები, ინტელექტუალურად შევასრულოთ

გენეტიკური ოპერატორების შერჩევა (ამორჩევა მშობლების, კროსოვერის, მუტაცია) და ავტომატურად დაკავშირებული პარამეტრები. ზოგიერთი კვლევა, რომლებიც მიმართულია იმაზე, თუ როგორ შევარჩიოთ გენეტიკური ოპერატორები და პარამეტრების აწყობა იმისათვის, რომ ვიმოქმედოთ ალგორითმზე, წარმოდგენილია სამუშაოებში [2, 34, 42, 70].

კოდირების ხერხის არჩევა ევოლუციური ალგორითმების გამოყენებისას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ეტაპს წარმოადგენს. მნიშვნელოვნად მოსახერხებელია კოდირება მოვასდინოთ გენში არა მთელი რიცხვის, არამედ ნივთიერად. ნივთიერი კოდირება საშუალებას გვაძლევს გავთავისუფლოთ კოდირების დეკოდირების ოპერაციისაგან, რომელიც მთელ რაოდენობაში კოდირებაში გამოიყენება, ასევე გაგზავნოთ მოძებნილი გადაწყვეტის სიზუსტე. პოპულაციის დაწყებითი რაოდენობისათვის არ არსებობს განსაზღვრული რიცხვის მკაფიო შერჩევის წესი, ე.ი. შეიძლება ვთქვათ, რომ ის გაგანსხვავდება სხვადასხვა პარამეტრებისთვის. პოპულაციის დაწყებითი რაოდენობისათვის სხვადასხვა ცდებში (გაანგარიშებებში) რეკომენდირებულია სხვადასხვა რიცხვების გამოყენება [42].

წრფივი რანჟირება საუკეთესო ფუნქციაა შეგუებადობის ფუნქციისთვის (ცხრ. 4.). სელექციის მეთოდისთვის რეკომენდირებულია გამოვიყენოთ ტურნირის ფუნქცია ან რულეტის ბორბალი (ცხრ. 5.). კროსოვერებისთვის რეკომენდირებულია ორი წერტილის მეთოდი, ხოლო მუტაციისთვის – ერთწერტილიანი მუტაცია.

კროსოვერისთვის რეკომინდირებულია ალბათობის სიდიდის გამოყენება 0,7-დან 0,9-მდე. კროსოვერის მეთოდებთან მიმართებაში რეკომენდირებულია ორი წერტილის მეთოდი (ცხრ. 6.).

ცხრილი 4.

შეგუებადობის ფუნქციის რანჟირება

რანჟირება	შეგუებადობის ფუნქცია
1	წრფივი რანჟირება
2	ცვლადი მასშტაბურობა
3	პროპორციული
4	წრფივი გადაადგილება
5	რანჟირება

ცხრილი 5.

სელექციის ფუნქციის რანჟირება

რანჟირება	სელექციის ფუნქცია
1	გურნირი
2	რულეტის ბორბალი
3	თანაბარი
4	ნარჩენი
5	სტოქასტიკური თანაბარი

ცხრილი 6.

კროსოვერის მეთოდების რანჟირება

რანჟირება	კროსოვერის მეთოდი
1	ორი წერტილი
2	ერთი წერტილი
3	შუალედური
4	ევრისტიკული
5	არიტმეტიკა

მუტაციისთვის შემჩნეული იყო, რომ ოპტიმალური გადაწყვეტის მიღწევა პოპულაციის რაოდენობისგან დამოკიდებულებით შეიძლება მოხდეს მუტაციის მეთოდების გამოყენებით მისი ალბათობის მრავლობის ან კლების მიხედვით. მუტაციის მეთოდებთან მიმართებაში რეკომენდირებულია ერთწერტილიანი მუტაცია (ცხრ. 7).

ცხრილი 7.

მუტაციის მეთოდების რანჟირება

რანჟირება	მუტაციის მეთოდი
1	ერთი წერტილი
2	ცოცვალობა
3	გაუსისეული
4	ცვლა
5	ინვერსია

მიუხედავად მრავალი ცდისა, იმისათვის, რომ გამოვიკვლიოთ გენეტიკური ალგორითმის პარამეტრებისა და ფუნქციების საუკეთესო სიდიდეები, არ არსებობს ერთეული საუკეთესო ოპერატორი, რომელიც კარგი იქნებოდა გამოყენების ყველა სხვადასხვა ტიპებისათვის. ამ ოპერატორების ამორჩევა დამოკიდებულია პრობლემის ძიების სივრცის სტრუქტურასა და გამოყენების ხასიათზე.

ოპერატორების ერთი ტიპი შეიძლება კარგია ერთი პრობლემის ან გამოყენების ტიპისათვის და შეიძლება არ ვარგოდეს გამოყენების სხვა ტიპისათვის.

1 თავის დასკვნები

1. არსებობს მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების მრავალი თანამედროვე მეთოდი და საშუალება, რომელიც გვხვდება რთული საპროექტო ამოცანის გადაწყვეტაში, მაგრამ მშენებლობის დაგეგმარება ჯერ ისევ შრომატევად პროცესს წარმოადგენს, რომელიც ბევრ დროს გვართმევს.
2. გამოვლენილია მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარებისთვის მონაცემთა ფორმირების ავტომატიზაციის აუცილებლობა. შენობის კომპონენტებზე BIM-ში შენახული ზუსტი ინფორმაციის გამოყენება საშუალებას მოგვცემს პროექტის სამუშაოთა სახეობები უფრო ეფექტიანად განვსაზღვროთ, გავიანგარიშოთ მათი ხანგრძლივობა, გამოვიყენოთ მოწესრიგების წესი, და ბოლოს მოვახდინოთ დაგეგმარება.
3. არსებობს აუცილებლობა ალგორითმების შემუშავებაში, რომლებიც წყვეტენ სპეციალიზებულ ამოცანებს მათი ინტეგრირებულ სისტემებში ჩართვის შესაძლებლობით.
4. არსებობს ოპტიმიზაციის მოქნილი მოდელის შექმნის აუცილებლობა, რომელიც მხედველობაში იღებს სამუშაოთა თანმიმდევრობის სხვადასხვა ტიპებს, სამუშაოთა ხანგრძლივობის შეზღუდვას, მინიმალურად ამცირებს პროექტის საერთო ღირებულებას და დროს მთელი პროექტის შესასრულებლად.
5. არსებობს გადაწყვეტილების მიღების სცენარების ფორმალიზაციის აუცილებლობა პროექტის შესრულების დროისა და ღირებულების ოპტიმიზაციისას.
6. არსებობს პრობლემების წინასწარი იდენტიფიკაციის აუცილებლობა, რომელიც ეხება სამუშაო სივრცეებს, რომ დაცული იქნეს სამშენებლო სამუშაოების უსაფრთხოება, შემცირდეს მომუშავეთა შორის კონფლიქტები, შემცირდეს

მოცდენების დრო, გაუმჯობესდეს სამუშაოთა ხარისხი და შემცირდეს პროექტის განხორციელების გეგმიდან გადახრა.

თავი 2. მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის ძირითადი მეთოდოლოგიური მიდგომები

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების და მისი გენეტიკური ალგორითმების, შენობის ავტომატიზებული პროექტირების CAIP და ინფორმაციული მოდელირების BIM თეორიის ძირითადი წარმოდგენები. ასევე, წარმოდგენილია მშენებლობის 4D მოდელის ფორმირების ავტომატიზაციის მეთოდოლოგია შენობის ინფორმაციული მოდელის მონაცემთა საფუძველზე და სამუშაო სივრცის ვიზუალიზაციის 4D მოდელი. განხილულია მშენებლობის პროცესის, პროექტის შესრულების ვადებისა და ღირებულების ოპტიმიზაციის მეთოდოლოგია, დაფუძნებული გენეტიკურ ალგორითმებზე.

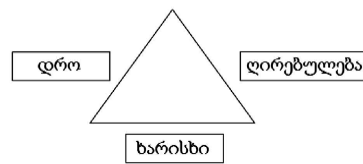
2.1. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის ძირითადი წარმოდგენები

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირება შეზღუდულია დროის, თანხისა და ხარისხის პარამეტრებით. ეს პროექტები მაღალ რისკს შეიცავენ. მისი მართვა მდგომარეობს გეგმის და მისი მონიტორინგის დამუშავებაში. გეგმა ღებდა სამუშაოთა განსაზღვრისათვის, რომლებიც საჭიროა პროექტის შედეგის მისაღწევად, ადამიანური რესურსისა და დანადგარების შესარჩევად, რომლებიც ამ სამუშაოთა შესასრულებლად საჭირო, დროის განსაზღვრისათვის, იმ დროს როდესაც შრომითი რესურსი და მანქანა-დანადგარები მუშაობით დაკავებული არის [83, 94, 108].

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების პროფესიული მართვის საფუძველს წარმოადგენს მისი როგორც კონსტრუქციული ინფორმაციული ობიექტის გაგება, რომლის ყოველი ელემენტი ემორჩილება ლოგიკურ მსჯელობას და ფორმალურ წესებს. პროექტირების ფუნქციის რთული კომპლექსის მართვის სისტემის ასეთი გაგება წინ წამოწევს პროექტის დაყოფას, პროექტის დეკომპოზიციას, რომელიც ხორციელდება გარკვეული პრინციპების დაცვით. ამ

პრინციპების თანახმად შესაძლებელია არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტის მართვის ნებისმიერი ფუნქციის დეკომპოზიცია, ხოლო დეკომპოზიციის სტრუქტურა და ღონე, ანუ პროექტის დეტალიზაციის ხარისხი დამოკიდებულია მშენებლობაში მისი რეალიზაციის მიზნებსა და ამოცანებზე.

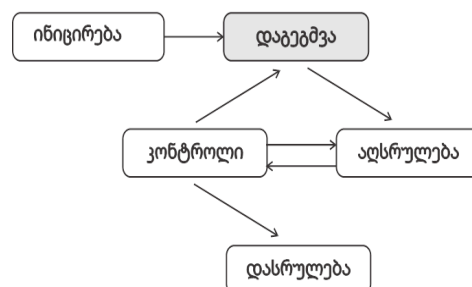
დროს, ღირებულებასა და ხარისხს საპროექტო სამკუთხედი ეწოდება, რადგან ერთ-ერთ ამ ელემენტში ცვლილების შეგანისას იცვლება სხვა ორი (ნახ. 6.).



ნახ. 6. საპროექტო სამკუთხედი

თუ სამშენებლო კომპანიები პროექტების მართვის ტექნიკას ვერ იყენებენ, მაშინ ხდება ვადების მნიშვნელოვანი დარღვევა, ბიუჯეტის გადაჭარბება და დაგეგმილი შედეგების მიუღწევლობა. [23, 25].

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტის მართვა არის ძირითადი პროცესების შესრულება (ნახ. 7.). პირველი ეტაპი არის პროექტის ინიცირების ეტაპი, ხდება მისი განსაზღვრა და დასაბუთება. მეორე ეტაპი მოიცავს პროექტის დაგეგმვას, რაც მოიცავს მოქმედების საუკეთესო ხერხის განსაზღვრას დასახული მიზნების მისაღწევად. მესამე და მეოთხე ეტაპები მოიცავს პროექტის შესრულებას და კონტროლს. დამამთავრებელი ეტაპი კი არის პროექტის დახურვა [32].



ნახ. 7. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტების მართვის ძირითადი პროცესები

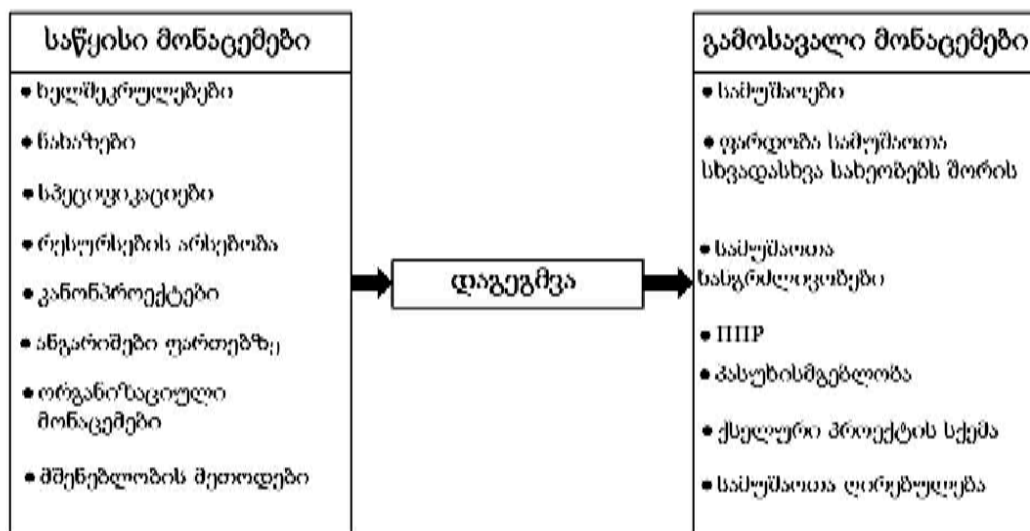
მშენებლობის დაგეგმარება მიმდინარეობს პროექტის რეალიზაციის მთელი ვადის განმავლობაში. პროექტის სიცოცხლის ციკლის დასაწყისში ჩვეულებრივ მუშავდება წინასწარი გეგმა, ე.ი. პირველი დაახლოება იმ საკითხის გადაწყვეტასთან, რომლის შესრულებაც იქნება საჭირო პროექტის რეალიზაციისას. პროექტის ფორმალური და ლეგალური დაგეგმვა იწყება მისი გახსნის გადაწყვეტის მიღების შემდეგ [72].

მშენებლობის დაგეგმარება წარმოადგენს ამოცანათა სისტემატიზებულ გადაწყვეტას, რომელიც მიმართულია დასახული მიზნის მისაღწევად. დაგეგმარების ეტაპზე განისაზღვრება პროექტის რეალიზაციის პარამეტრები (პროექტის ამოცანები, ბიუჯეტი და ვადები), მათ რიცხვში მისი შესრულების ხანგრძლივობა მთლიანად და ცალკეული ნაწილების (ქვეპროექტები), ფინანსირების, მატერიალური და შრომითი რესურსების საჭიროება [29].

ანსხვავებენ გეგმების რამდენიმე ღონეს: სტრატეგიული გეგმები, წინასაგენდერო გეგმები, მშენებლობის მოკლევადიანი გეგმები, მშენებლობის გრძელვადიანი გეგმები და სხვ. [60]. ყველა ეს გეგმა მუშავდება ოთხი ძირითადი ეტაპის შესრულების გზით:

- პროექტის სამუშაო ელემენტების დაყოფა სამუშაოებად;
- სწორი თანმიმდევრობის გამოვლენა, რომელთა მეშვეობითაც ეს სამუშაოები უნდა შესრულდეს;
- სამუშაოს წარმოდგენა;

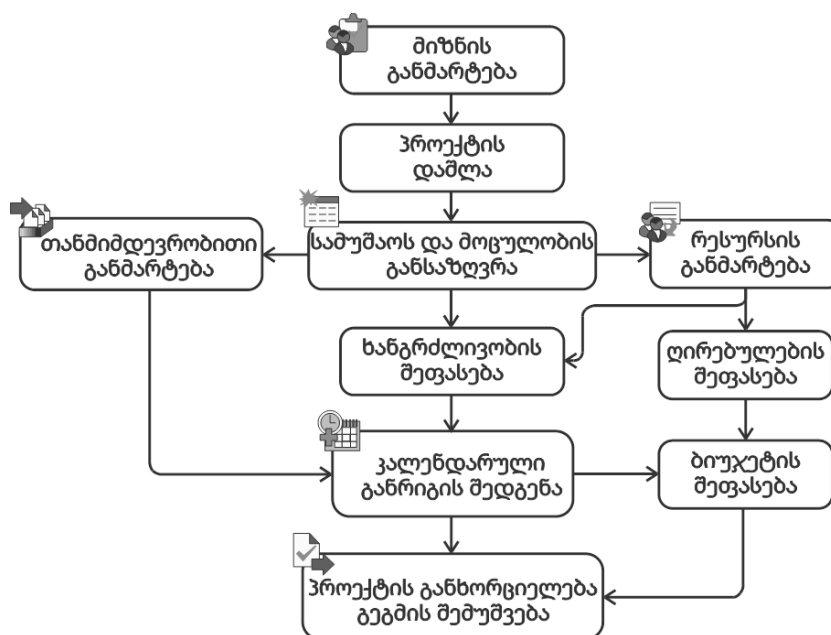
რესურსების, ღრისა და ფინანსური დანახარჯების შეფასება სამუშაოთა ცალკეული სახეობისათვის, დაგეგმარების პროცესის საწყისი მონაცემები და გამოსავალი შედეგები ნაჩვენებია ნახ. 8.-ზე.



ნახ. 8. დაგეგმარების პროცესის საწყისი მონაცემები და გამოსავალი შედეგები

მნიშვნელოვანია დაგეგმარება პროექტის აღრეულ ეტაპზე მოვახდინოთ, რომ განვსაზღვროთ შესაძლო შეცდომები, მოვამზადოთ შესაძლო გადაწყვეტები და აღამიანებს დავუნიშნოთ სამუშაოები, სწორად შერჩეული ტექნიკის სახეობებით [116].

მშენებლობის დაგეგმარება – ეს განმეორებადი პროცესია, სადაც გეგმები შეიძლება შეიქმნას და შეფასდეს არაერთხელ, ვიდრე დამაკმაყოფილებელ გეგმას არ მივიღებთ. დაგეგმვის პროცესი ნაჩვენებია ნახ. 9.-ზე.



ნახ. 9. დაგეგმარების პროცესი

დაგეგმვის პროცესის ძირითადი ამოცანები შეიცავს:

- პროექტის მიზნების განსაზღვრა და მათი აღწერა;
- ტექნოლოგიური სტადიების განსაზღვრა (პროექტისთვის ამორჩეული უნდა იყოს რეალიზაციის ტექნოლოგია, პროექტის განვითარების სტადიის განმსაზღვრელი);
- სამუშაოთა სიის განსაზღვრა, მათი თანმიმდევრობისა და პროგრამირებადი ხანგრძლივობის განსაზღვრა;
- სახარჯთაღრიცხვო დოკუმენტაციის შედგენა, სამუშაოს თითოეული სახეობისთვის ხარჯთაღრიცხვის დანახარჯების მიბმა;
- კალენდარული დაგეგმვა.

კალენდარული დაგეგმვარება მშენებლობაში მართვის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან და რთულ, შრომატევად და საპასუხისმგებლო ამოცანას წარმოადგენს. კალენდარული გეგმების ხარისხი უშუალო გავლენას ახდენს სამშენებლო ორგანიზაციის მნიშვნელოვან მაჩვენებლებსა და შედეგებზე. ამით აიხსნება მაღალი მოთხოვნები კალენდარული დაგეგმვრების მოდულებისა და მეთოდებისადმი [3].

კალენდარული დაგეგმვრების განვითარების მიზემს პროექტების სირთულე და მათი განხორციელების ეფექტიანობის ამაღლების აუცილებლობის წარმოშობა წარმოადგენს [33].

კალენდარული გეგმის სწორად შედგენა პროექტის შესრულების წარმატების ალბათობას ზრდის [30], [106].

კალენდარული გეგმა სამშენებლო ამოცანებისა და დოკუმენტაციის სახეობიდან გამომდინარე, შეიძლება დაიყოს 4 სახეობად [14] (ნახ. 10.).

კრებსითი კალენდარული გეგმა

მშენებლობის ორგანიზაციის პროექტი – მოპ)

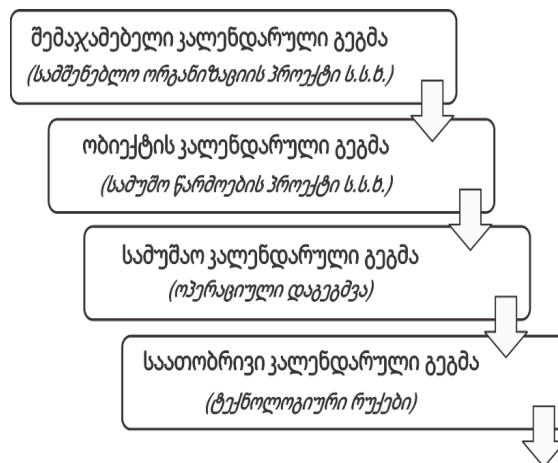
ობიექტის კალენდარული გეგმა

სამუშაოთა წარმოების პროექტი – სნპ

მუშაო კალენდარული გეგმები

ოპერატიული დაგეგმვა – ოდ

საათობრივი კალენდარული გეგმები, (ტექნოლოგიური რუკები – გრ)



ნახ. 10. კალენდარული გეგმების სახეობები

კრებსითი კალენდარული გეგმა ობიექტების აშენების რიგობითობას განსაზღვრავს, ე.ი. თითოეული ობიექტის დაწყებისა და დასრულების ვადას, მომზადებული პერიოდის ხანგრძლივობას და მთლიანობაში მთელი მშენებლობის ხანგრძლივობას.

ობიექტის კალენდარული გეგმა კონკრეტულ ობიექტზე სამუშაოთა თითოეული სახეობის შესრულების ვადებსა და რიგობას განსაზღვრავს მისი აშენების დასაწყისიდან ექსპლუატაციაში ჩაბარებამდე. ჩვეულებრივ, ასეთ გეგმას დაყოფენ თვეების ან დღეების მიხედვით ობიექტის სირთულისა და სიდიდისაგან დამოკიდებულებით.

სამუშაო კალენდარული გეგმები არის ოპერატიული დაგეგმვის ელემენტი, რომელიც მშენებლების მთელ პერიოდს მოიცავს.

საათობრივი კალენდარული გეგმები გამოიყენება ტექნოლოგიური და შრომითი პროცესების რუკებში, მაგ. შრომითი რესურსების ოპტიმალური დაგვირთვის ფორმირებისათვის.

Microsoft Project и Primavera – ცნობილი პროგრამები მშენებლობის დაგეგმვისათვის. ამ პროგრამებს გააჩნიათ მსგავსი ფუნქციონალები და იყენებენ დაგეგმვის კლასიკურ ინსტრუმენტებს, როგორებიცაა კრიტიკული გზის მეთოდი და განგის დიაგრამა. ამავე დროს, ეს ინსტრუმენტები საშუალებას არ გვაძლევენ დავინახოთ როგორ შესრულდება პროექტის სამუშაოები და როგორი შედეგები იქნება მიღებული [16].

2.2. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა

სამშენებლო პროექტის სამუშაოთა რეალიზაცია ითხოვს სხვადასხვაგვარ რესურსებს: შრომითი რესურსებს, მანქანა-მექანიზმებს და სხვ. სამუშაოთა წარმოების მეთოდების ამორჩევა და რესურსების განსაზღვრა დაგეგმვის მნიშვნელოვან ნაწილს შეადგენს, ისინი არსებითად მოქმედებენ კალენდარული დაგეგმარების გადაწყვეტის ამორჩევაზე. სამუშაოს ხანგრძლივობის და ასევე სამუშაოს ღირებულების შესაფასებლად გამოიყენება ინფორმაცია რესურსების საჭირო ტიპებსა და მათ რაოდენობაზე.

მრავალ დაგეგმილ სამუშაოს აქვს მათი რეალიზაციის ალტერნატიული ხერხი. სამუშაოთა შესრულების სხვადასხვა შესაძლო ხერხების კომბინაცია გენერირებას ახდენს პროექტის მრავალი ალტერნატიული კალენდარული გეგმების თავისი ხანგრძლივობით და ღირებულებებით. სამშენებლო სამუშაოთა შესრულების ხერხების საუკეთესო კომბინაციის განსაზღვრა რთულ ამოცანას წარმოადგენს (ნახ. 11.).



ნახ. 11. სამუშაოს შესრულების „ღირებულება-ხანგრძლივობის“
ალტერნატიული ვარიანტები

ეს ამოცანა ხასიათდება შემდეგი პირობებით:

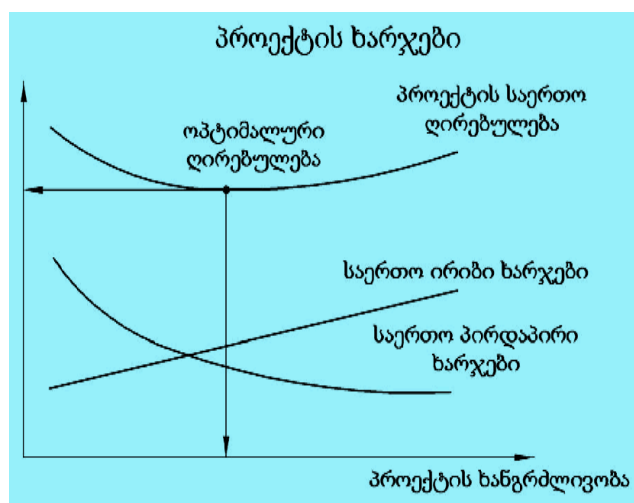
- არსებობს სამუშაოთა რიგი, რომლებიც უნდა შესრულდეს;
- არსებობს რესურსების საკმაო რაოდენობა სამუშაოთა შესრულებისთვის;

- ზოგიერთი სამუშაო შეიძლება შესრულდეს სხვადასხვაგვარი ხერხებით, სხვადასხვაგვარი რესურსების გამოყენებით, მათი კომბინაციებით და რაოდენობით;
- ოპერაციების შესრულების ზოგიერთი ხერხი ზოგჯერ უკეთესია, უფრო იაფია, დროის ნაკლებ დანახარჯს ითხოვს და სხვ.

ამოცანა იმაში მდგომარეობს, რომ მოვძებნოთ სამშენებლო სამუშაოთა შესრულების ხერხების საუკეთესო კომბინაცია, რომლის დროსაც პროექტის კალენდარული გეგმა ოპტიმალურ ხანგრძლივობას და ღირებულებას მიაღწევს, ე. ი. საჭიროა პროექტის ოპტიმიზაცია მისი განხორციელების დროისა და ღირებულების კრიტერიუმებით, სამუშაოთა ან მათი კომპლექტების შესრულების მოცემული ალგებრული ვარიანტების გათვალისწინებით (ნახ. 12.).

პროექტის საერთო ღირებულება ირიბი და პირდაპირი ხარჯების ჯამია. პირდაპირი ხარჯები ჩვეულებრივ დაკავშირებულია სამუშაო მოედანზე პროექტის კომპონენტების აშენების ხარჯებთან. ისინი მოიცავს პროექტის შესრულებისათვის გამოყენებულ ყველა რესურსის ღირებულებას, მაგალითად, მასალების, დასაქმებული შრომითი რესურსის, მანქანა-დანადგარების და ა. შ. ირიბი ხარჯები ჩვეულებრივ წარმოადგენენ ზედნაღებ ხარჯებს, ისეთებს, როგორიცაა ხარჯები პროექტის მართვასა და კონტროლზე, ადმინისტრირებასა და კონსულტაციებზე.

პროექტის შეფერხება



ნახ. 12. ოპტიმალური გადაწყვეტა

გეგმიური გადაწყვეტების მრავალვარიანტულობა და გრადიციული მეთოდებით კალენდარული გეგმის საუკეთესო ვარიანტების ძებნის სირთულე გულისხმობს დაგეგმვის პრაქტიკაში ვარიანტების შედარების მეთოდების აქტიური დანერგვის აუცილებლობას. ვარიანტების შედარების მეთოდის რეალიზება შესაძლებელია სცენარული მოდელირების საშუალებით. სცენარული მოდელირების მიზანი მდგომარეობს იმის გამოვლენაში, თუ როგორ გავლენას ახდენს შენობებისა და მისი ელემენტების ძირითადი პარამეტრების ცვლილება სამშენებლო სამუშაოთა ღირებულებაზე შენობის მთელი სიცოცხლის ციკლის განმავლობაში [5].

პროექტის ოპტიმიზაციის მოცემული ამოცანა დროისა და ღირებულების კრიტერიუმებით მოიცავს შემდეგ ქვეამოცანებს:

- მონაცემთა საინფორმაციო ბაზასთან დაკავშირებული შენობის 3D მოდელის პროექტირება;
- კალენდარული გეგმის შემუშავება;
- გენეტიკური ალგორითმის ბაზაზე კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის პროგრამის შექმნა;
- სამუშაოთა სამუშაო სივრცეების ორგანიზაციისა და ვიზუალიზაციისთვის 4D მოდელის შემუშავება.

2.3. გენეტიკური ალგორითმების თეორია

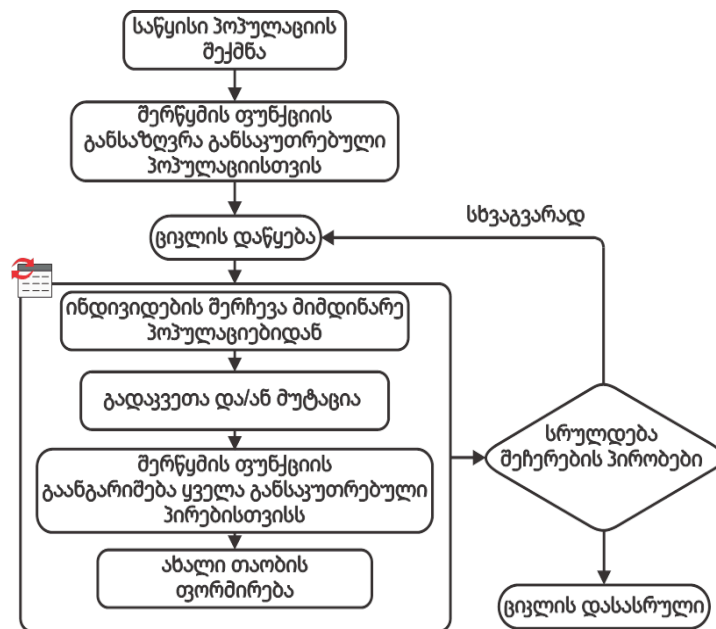
გენეტიკური ალგორითმები GA ბუნებრივი შერჩევისა და გენეტიკის კონცეპტიაზე დაფუძნებულ ოპტიმიზაციის მეთოდს წარმოადგენს.

გენეტიკური ალგორითმის GA დახმარებით ამოცანის გადასაწყვეტად აუცილებელია მისი მონაცემები წარმოვადგინოთ ქრომოსომაში გენების სახით (კოდირება). ამისათვის საჭიროა, განისაზღვროს ამოცანის რომელი პარამეტრების აწყობაა უპირველესად აუცილებელი.

ძირითადი გენეტიკური ალგორითმის ბლოკ-სქემა გამოსახულია ნახ. 13.-ზე.

საწყისი პოპულაცია იქმნება შემთხვევითი სახით საწყისი ქრომოსომების რაიმე რაოდენობიდან. მათი შეფასებისათვის შეიძლება „შეგუების ფუნქცია“,

რომლის შედეგადაც თითოეულ ქრომოსომას მიეკუთვნება განსაზღვრული მნიშვნელობა (შეგუებადობა), რომელიც განსაზღვრავს მოცემული ქრომოსომებით წარმოდგენილი ორგანიზმის გადარჩენის ალბათობას [9].



ნახ. 13. გენეტიკური ალგორითმის ეტაპები

შეგუებადობის მიღებული მნიშვნელობებისაგან დამოკიდებულებით შეირჩევა რეკომბინაციაზე (გამრავლებაზე) დაშვებული ქრომოსომები (სელექცია-შერჩევა). ამ ქრომოსომებისაგან გამოიყენებიან „გენეტიკური ოპერატორები“ (უმეტეს შემთხვევაში „კროსინგოვერი“ – crossover და „მუტაცია“ mutacion), ასეთი სახით შემდეგი „თაობის“ შემქმნელი. შემდეგ თაობებში ინდივიდუალები ასევე შეფასდებიან, იმისათვის, რომ შემდგომ მოახდინოს სელექცია, ამგვარად, მოდელირება იგერაციული „ევოლუციური პროცესი“, გახანგრძლივებული სიცოცხლის რამდენიმე ციკლით (თაობებით), ვიდრე არ შესრულდება ალგორითმის შეჩერების კრიტერიუმი [7, 15].

ამგვარი კრიტერიუმი შეიძლება იყოს:

- გლობალური ან სუბოპტიმალური გადაწყვეტის პოვნა;
- ევოლუციაზე დაშვებული თაობების რიცხვის ამოწურვა;
- ევოლუციაზე დაშვებული ღრის ამოწურვა.

ქვემოთ მოყვანილია გენეტიკური ალგორითმების რამდენიმე მოდელი [109].

- უბრალო მოდელი: პირველად აღწერილი იყო გოლდბერგის მიერ ჰოლანდის შრომების საფუძველზე. ალგორითმი ახდენს შემთხვევით გენერირებას ქრომოსომების თანმიმდევრობების პოპულაციის ალგერნატიული მოწესრიგებული და მოუწისრიგებელი გადაწყვეტების. შემდეგ წარმოებს ქრომოსომების თანმიმდევრობის კოპირება და მათი ნაწილების გადანაცვლება. შემდგომში ალგორითმი დაწყებითი პოპულაციისადმი მრავალ მარტივ ოპერაციას უკეთებს რეალიზებას და ახალი გადაწყვეტების გენერირებას ახდენს.
- გენიგორის მოდელი: მოცემულ მოდელში გამოიყენება შერჩევის განსაკუთრებული სტრატეგია. დასაწყისში პოპულაცია ინიციალიზირდება და მისი ინდივიდუალები შეფასდება. შემდეგ ორი ინდივიდუალი შემთხვევითი სახით შეირჩევა, მათი შეჯვარებით მიიღება მხოლოდ ერთი შთამომავალი, რომელიც შეფასდება და შედარებით ნაკლებად შეგუებული ინდივიდუალის ადგილს დაიკავებს. ამის შემდეგ იგერაცია მეორდება. ამგვარად, თითოეულ ნაბიჯზე პოპულაციაში განახლდება მხოლოდ ერთი ინდივიდუალი.
- ჰიბრიდული მოდელი: მოცემულ მოდელში გაერთიანებულია გენეტიკური ალგორითმების GA უპირატესობა კლასიკური მეთოდების უპირატესობებთან, ისინი საშუალებას გვაძლევენ მოვძებნოთ კარგი გადაწყვეტა, მაგრამ ოპტიმალური გადაწყვეტის პოვნა უფრო რთულ ამოცანად გვევლინება ალგორითმის მუშაობის პრონციპების სტოქასტიკურობის გამო. საწყის ეტაპზე GA შეიძლება გამოვიყენოთ გლობალური ექსტრემუმის ირგვლივ ძებნის სივრცის ეფექტიანი შევიწროებისთვის, დამატებით, უკეთესი ინდივიდუალისთვის საჭიროა გამოვიყენოთ ერთ-ერთი ოპტიმიზაციის „კლასიკური“ მეთოდებიდან.
- კენტლოვანი მეთოდი: მოცემულ მოდელში მუშაობა მიმდინარეობს პარალელურად ორ პოპულაციასთან. ამისათვის, პოპულაცია დაიყოფა რამდენიმე ქვეპოპულაციად. თითოეული მათგანი ცალკე ვითარდება რომელიმე გენეტიკური ალგორითმის დახმარებით. შეიძლება ანალოგია ვიპოვოთ ინდივიდუალების განსახლებასთან ცალკეულ იმპლირებულ

კუნძულებზე. დაახლოებით თითოეული 5 თაობის მიგრაცია ხდება, ე.ი. კუნძულები ერთმანეთში ცვლიან რამდენიმე კარგ ინდივიდუალს. რამდენადაც კუნძულების დასახლება დიდი არ არის, ქვეპოპულაციები მიდრეკილი იქნებიან აღრეული კრებადობისადმი. გენეტიკური ალგორითმები სტოქასტიკურია, ამიტომ მისი სხვადასხვა ამუშავებისას პოპულაცია შეიძლება შეერთდეს სხვადასხვა კარგ გადაწყვეტასთან. კუნძულოვანი მოდელი საშუალებას გვაძლევს ალგორითმი ავაშუშაოთ ერთბაშად რამდენიმე ჯერზე პარალელურად და შევათავსებოდეთ სხვადასხვა კუნძულების „მიღწევები“ საუკეთესო გადაწყვეტის მისაღებად.

2.4. ავტომატიზებული პროექტირების სისტემა CAIP

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირება – ეს არის პროცესი, რომელიც აღწერს ობიექტის საწყისი მდგომარეობას და საბოლოო გარდაქმნას და შესრულებულია კომპლექსური კვლევითი, გაანგარიშებითი და საკონსტრუქტორო ხასიათის სამუშაოების საფუძველზე [8].

პროექტირებას, რომლის დროსაც ყველა საპროექტო გადაწყვეტას ან მათ ნაწილს იღებენ ადამიანისა და კომიუტერის ურთიერთქმედებით უწოდებენ ავტომატიზებულს, ხელით პროექტირებისაგან განსხვავებით, როცა ავტომატური გამოთვლელი მანქანა გაანგარიშებისა და გადაწყვეტების მისაღებად არ გამოიყენება. ადამიანი-მანქანის სისტემა, რომელიც ავტომატიზებული პროექტირების რეალიზებას ახდენს, თავად წარმოადგენს ავტომატიზებული პროექტირების სისტემას CAIP [94].

CAIP მოიცავს შემდეგ ძირითად ამოცანებს:

- პროექტირების პროცესის ანალიზს, საპროექტო ამოცანების ალგორითმიზაციას მათემატიკური მოდელირების ბაზაზე, ოპტიმიზაციას, დისკრეტულ მათემატიკას და ხელოვნურ ინტელექტს;
- პროგრამული კომპლექსების დამუშავებას პროექტირების ამოცანების გადასაწყვეტად;

- ტექნიკური საშუალებების შერჩევას, მომხმარებლის ინტერფეისის შემუშავებას, ავტომატიზებული პროექტირების მეთოდის შექმნას, მომხმარებლების სწავლებასა და ავტომატიზაციის საშუალებათა ექსპლუატაციას.

საორგანიზაციო-ტექნოლოგიური პროექტირება (სგპ) – სამშენებლო დოკუმენტაციის შემუშავება, რომელიც შეიცავს საორგანიზაციო, ტექნიკურ და ტექნოლოგიურ გადაწყვეტებს სამშენებლო ობიექტის ექსპლუატაციაში დადგენილ ვადებსა და აუცილებელი ხარისხით შეყვანაში.

საორგანიზაციო-ტექნოლოგიური დოკუმენტაციის (სგდ) შემადგენლობა – ეს არის:

- მშენებლობის ორგანიზაციის პროექტი (მოპ);
- სამუშაოთა წარმოების პროექტი (სწპ);
- ტექნოლოგიური რუკა (ტრ);
- სამუშაო პროცესის რუკა (სპრ);
- მშენებლობის ობიექტების კომპლექტაციის უნიფიცირებული ნორმატიულ-ტექნოლოგიური დოკუმენტაცია (კუნგდ);

სნპ-ს საწყისი მასალები:

- დავალება შემუშავებაზე, გაცემული სნპ დამკვეთის მიერ;
- მოპ;
- აუცილებელი სამუშაო დოკუმენტაცია;
- მასალების, კონსტრუქციების, დანადგარების მოწოდების, სამშენებლო მანქანებისა და სატრანსპორტო საშუალებების გამოყენების, მომუშავე კადრებით უზრუნველყოფის პირობები;
- მოქმედ სამშენებლო საწარმოთა ტექნიკური გამოკვლევის მასალები და შედეგები.

სნპ შემადგენლობა:

- სამუშაოთა წარმოების კალენდარული გეგმა;
- ობიექტის მშენებლობის გენგეგმა;
- ტექნოლოგიური რუკები ძირითადი სამშენებლო-სამონტაჟო და სპეციალური სამუშაოების წარმოებაზე;

- უწყისები შრომითი, მაგერიალური რესურსების მოთხოვნების (მომუშავე კადრები, მანქანა-მექანიზმები, სამშენებლო მასალები, ნახევარფაბრიკატები, კონსტრუქციები, დანადგარები და ა.შ.);
- სამშენებლო-სამონტაჟო და სპეციალური სამუშაოების წარმოების მეთოდები;
- მომუშავეთა შრომის ორგანიზება;
- შრომისა და უსაფრთხოების ტექნიკის დაცვა სამშენებლო-სამონტაჟო სამუშაოების წარმოებისას;
- ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები.

მშენებლობის ორგანიზაციის ეტაპის უმნიშვნელოვანეს დოკუმენტს წარმოადგენს კალენდარული გეგმა, დადგენილი მიღებული საორგანიზაციო-ტექნოლოგიური სქემის და შესაბამისი თანმიმდევრობითი გადაწყვეტის, სამუშაოთა შესრულების ვადების დროში ურთიერთდაკავშირების საფუძველზე. გაანგარიშებული კალენდარული გეგმის შედეგს წარმოადგენს ასევე ობიექტზე სამშენებლო ნაკეთობებისა და მასალების შემოგანის გრაფიკი, ობიექტზე ძირითადი სამშენებლო მანქანების და მომუშავეთა კადრების მოძრაობის გრაფიკი [8].

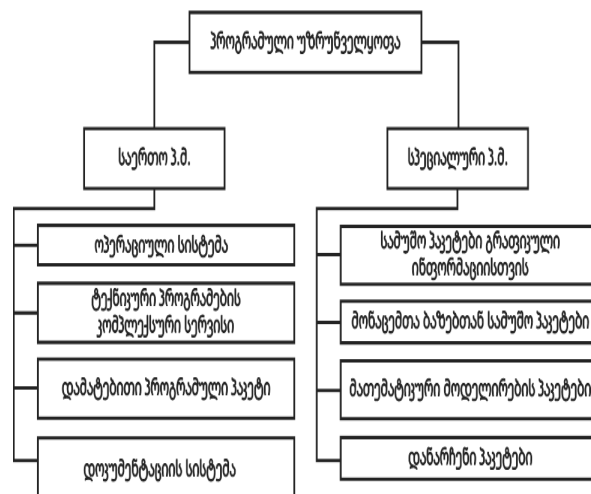
პროდუქციის სასიცოცხლო ციკლი, ეს დროში გაწეული პროცესია, რომელიც თავის თავში შეიცავს სხვადასხვა ეტაპებს, პროექტირებიდან უტილიზაციამდე. ყველა ეტაპზე წარმოიშვება ავტომატიზაციის საშუალებათა გამოყენების მოთხოვნა, დაფუძნებული კომპიუტერების გამოყენებაზე, რომელთა დანიშნულებაა პროდუქციის თვისებებსა და თანმხლებ მოვლენებზე სრული აუცილებელი ინფორმაციის გადამუშავებისა და გამოყენების უზრუნველყოფა.

პროდუქციის სასიცოცხლო ციკლის სხვადასხვა ეტაპზე გამოიყენება ავტომატიზაციის სხვადასხვა საშუალება ან ავტომატიზებული სისტემები (ას) – სისტემები, შემდგარი პერსონალისა და მისი მოქმედების ავტომატიზაციის საშუალებათა კომპლექსისგან, რომლებიც დადგენილი ფუნქციების შესრულების საინფორმაციო ტექნოლოგიების რეალიზებას ახდენენ.

მშენებლობაში ავტომატიზებული პროექტირების ამოცანების გადაწყვეტისას წარმოიქმნება სხვადასხვა ინფორმაციის დიდი მოცულობა, პროექტირების პროცესის თანმხლები მის ყველა ეტაპზე. შესაბამისად, წარ-მოიშვება აუცილებლობა ინფორმაციის სისტემატიზაციის, შენახვის, დამუშავებისა და

გადაცემის როგორც ობიექტის პროექტირების ქვესისტემებს შორის, ისე სისტემასა და გარე არეს შორის. მსგავსი ოპერაციების განხორციელების ინსტრუმენტს წარმოადგენს საინფორმაციო უზრუნველყოფა [8].

პროგრამული უზრუნველყოფა (პუ) – პროგრამის და პროგრამული დოკუმენტების ერთობლიობაა, რომლის დანიშნულებაა ავტომატიზებული სისტემის შრომისუნარიანობის გამართვა, ფუნქციონირება და შემოწმება. პროგრამულ უზრუნველყოფას ჰყოფენ საერთო (სისტემურად) და სპეციალურ (გამოყენებად) პროგრამებად (ნახ. 14.).



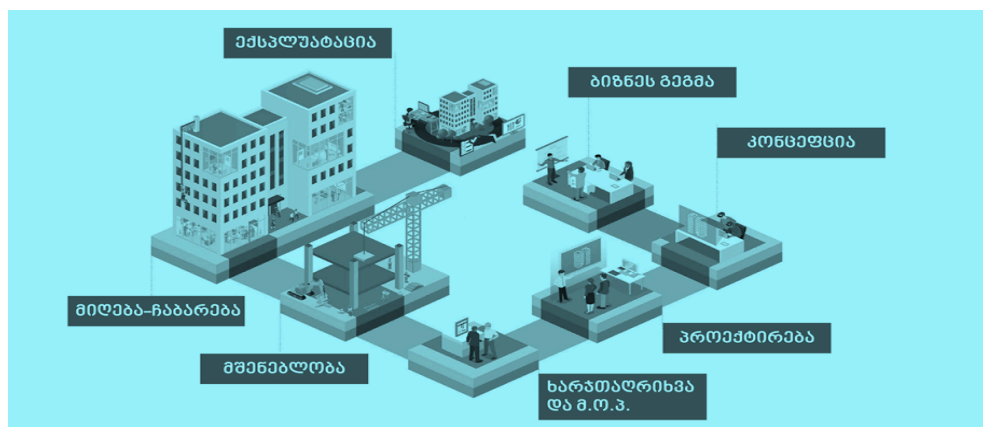
ნახ. 14. პროგრამული უზრუნველყოფის შემადგენლობა

2.5. შენობის ინფორმაციული BIM მოდელირება

შენობის ინფორმაციული მოდელირება – BIM (Building Information Modeling) – ეს არის გენერაციის პროცესი შენობის მონაცემთა მართვის შესახებ მისი სასიცოცხლო ციკლის განმავლობაში. BIM-ი არის შენობის ფიზიკური და ფუნქციური თვისებების და მახასიათებლების ციფრული გამოსახულება.

BIM ტექნოლოგია გულისხმობს შენობის ზუსტი ვირტუალური მოდელის აგების ციფრული სახით. ინფორმაციული მოდელირება არის პროექტირების, მშენებლობის, აღჭურვის, ექსპლუატაციისა და სარემონტო სამუშაოების მიმართ კომპლექსური მიდგომა, რომელიც გულისხმობს პროექტირების პროცესში მთელი არქიტექტურულ-კონსტრუქციული, ტექნოლოგიური, ეკონომიკური და სხვა სახის

ინფორმაციის შეგროვებას და კომპლექსურ დამუშავებას, შენობა და მასთან დაკავშირებული ობიექტები განიხილება, როგორც ერთიანი ობიექტი წარმოდგენილი პარამეტრული (მონაცემთა, ცოდნათა ბაზის ფორმაგით) ჩანაწერით ინფორმაციის კომპიუტერულ მაგარებელზე. მოდელების გამოყენება ამსუბუქებს პროექტირების პროცესს ყველა ეტაპზე, უზრუნველყოფს სრულყოფილ ანალიზს და კონტროლს. კომპიუტერული მოდელები ფლობენ კონსტრუქციის ზუსტ გეომეტრიას და ყველა აუცილებელ მონაცემს მასალათა შესყიდვის, კონსტრუქციების დამზადებისა და სამშენებლო სამუშაოთა წარმოებისათვის [52] [20, 28, 67] (სურ. 2.).



სურ. 2. შენობის ინფორმაციული BIM მოდელირება

მნიშვნელოვანია, რომ CAD და BIM პროგრამული პაკეტები აღარ განიხილება, როგორც მხოლოდ კომპიუტერული გრაფიკა, არამედ ოპტიმალური პროექტირების და მართვის უალტერნატივო საშუალება [199].

პროექტების კატეგორიების მიხედვით დაჯგუფებულია ფირმა Autodesk-ის პროგრამული პაკეტები და CAD და BIM პაკეტების კლასიფიკაცია გამოყენების სფეროს მიხედვით (ცხრილი 8. და ნახ. 15.).

ცხრილი 8.

Autodesk-ის პროდუქტები, რეკომენდებული პროექტების კატეგორიის მიხედვით:

1. მანქანათმშენებლობა და სამრეწველო წარმოება

კატეგორია 1.1: ნაწარმის 2D-ნახაზები, ელექტრული სქემები	▪ AutoCAD ▪ AutoCAD Mechanical ▪ AutoCAD Electrical
--	---

კატეგორია 1.2: ნაწარმის 3D მოდელი	▪ AutoCAD ▪ Autodesk Inventor ▪ Autodesk Fusion 360
კატეგორია 1.3: ინჟინრული ანალიზი და ანგარიშები	▪ Autodesk Inventor Professional ▪ AutodeskSim 360 ▪ Autodesk Moldflow ▪ Autodesk Simulation Mechanical ▪ Autodesk Simulation CFD ▪ Autodesk Simulation Composite ▪ Autodesk Simulation DFM ▪ Autodesk ForceEffect ▪ Autodesk ForceEffect Motion ▪ Autodesk Force Effect Flow
კატეგორია 1.4: სამრეწველო დიზაინი	▪ Autodesk Alias Design ▪ Autodesk Alias Surface ▪ Autodesk Alias Automotive ▪ Autodesk Fusion 360 ▪ Autodesk Maya ▪ Autodesk 3ds Max

2. არქიტექტურა/მშენებლობა

კატეგორია 2.1: საცხოვრებელი სახლების არქიტექტურა	▪ Autodesk Revit ▪ AutoCAD Architecture ▪ AutoCAD
კატეგორია 2.2: სამოგადოებრივი და საწამოო შენობების და ნაგებობების არქიტექტურა	▪ Autodesk Revit ▪ AutoCAD Architecture ▪ AutoCAD
კატეგორია 2.3: სატრანსპორტო ნაგებობები (ხიდეები, გვირაბები, რკინიგზები და სხვა საზოგადოებრივი ნაგებობები	▪ AutoCAD Civil 3D ▪ InfraWorks ▪ AutoCAD
კატეგორია 2.4: გარე საინჟინრო კომუნიკაციები, მილსადენები	▪ AutoCAD Plant 3D

	▪ AutoCAD P&ID ▪ AutoCAD Civil 3D ▪ AutoCAD
კატეგორია 2.5: გის, კარტოგრაფია, ტერიტორიის გეგმარებითი გადაწყვეტა	▪ AutoCAD Map 3D ▪ InfraWorks
კატეგორია 2.6: პროექტის მართვა (საპროექტო დოკუმენტაციის ფორმირებისა და გამოშვების პროცესის ორგანიზაცია და თანხლება)	▪ Autodesk Vault

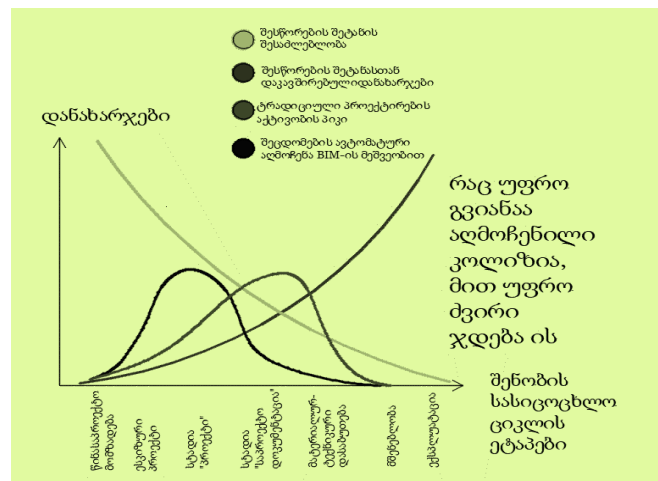
3. გრაფიკა და ანიმაცია

კატეგორია 3.1: 2D გრაფიკა, ჩანახატები, ესკიზები, სამოსის დიზაინი	▪ Autodesk Sketchbook
კატეგორია 3.2: ინტერიერის და გარემოს ვიზუალიზაცია	▪ Autodesk 3ds Max ▪ Autodesk Maya ▪ Autodesk MotionBuilder
კატეგორია 3.3: პროცესებისა და ობიექტების ანიმაცია (ფიზიკური, ტექნოლოგიური, სამრეწველო წარმოების, არქიტექტურის და მშენებლობის)	▪ Autodesk 3ds Max ▪ Autodesk Maya ▪ Autodesk MotionBuilder
კატეგორია 3.4: კომპიუტერული ანიმაცია, კომპიუტერული მულტიპლიკაცია, ანიმაცია კინოფილმებისთვის, ტელევიზიისთვის და კომპიუტერული თამაშებისთვის	▪ Autodesk 3ds Max ▪ Autodesk Maya ▪ Autodesk MotionBuilder
კატეგორია 3.5: 3D-სკულპტურა, პერსონაჟები კომპიუტერული თამაშებისა და კინოფილმებისთვის	▪ Autodesk Mudbox ▪ Autodesk Softimage

4. ეკოლოგიურად რაციონალური პროექტირება

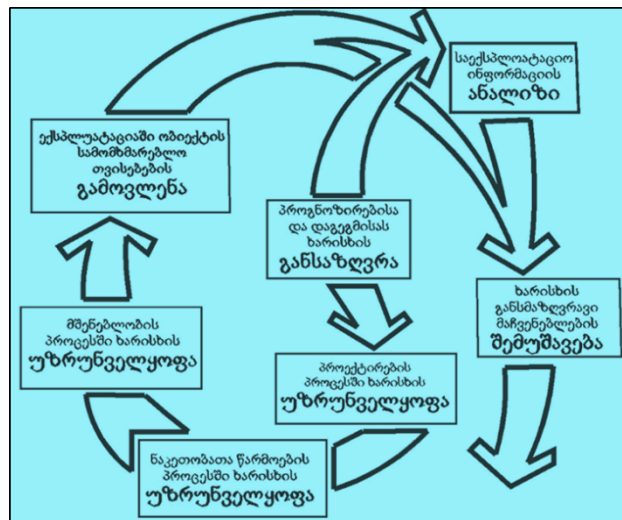
კატეგორია 4.1: ეკოლოგიურად-რაციონალური პროექტირება მანქანათმშენებლობაში	▪ Autodesk Inventor ▪ Autodesk Moldflow ▪ Autodesk Simulation Mechanical ▪ Autodesk Simulation CFD ▪ Autodesk Simulation Moldflow
--	---

	▪ Autodesk Simulation Composite ▪ Autodesk ForceEffect ▪ Autodesk ForceEffect Motion
კატეგორია 4.2: ენერგეტიკულად ეფექტური შენობების პროექტირება	▪ Autodesk Revit ▪ Autodesk Ecotect Analysis ▪ Autodesk Robot Structural Analysis



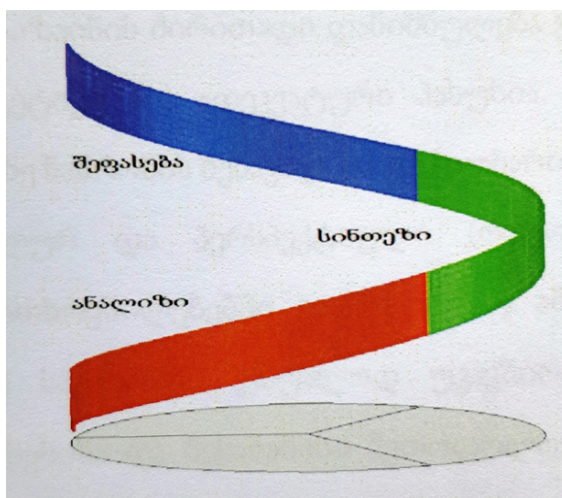
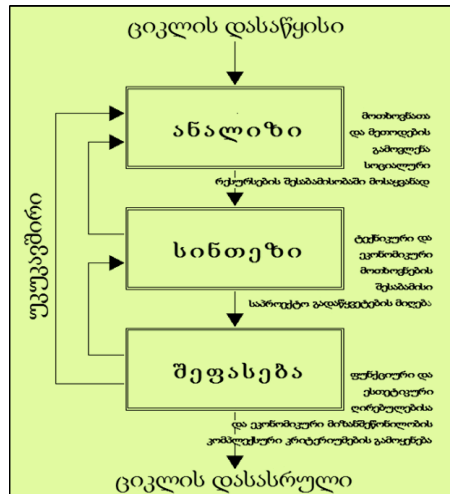
ნახ. 15. მონაცემთა ბაზის სრულად გამოყენების გენდენცია BIM პაკეტებში

არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტის პროფესიული მართვის საფუძველს წარმოადგენს მისი როგორც სტრუქტურული ინფორმაციული ობიექტის გაგება, რომლის ყოველი ელემენტი ემორჩილება ლოგიკურ მსჯელობას და ფორმალურ წესებს. არქიტექტურული პროექტის ფუნქციის რთული კომპლექსის მართვის სისტემის ასეთი გაგება წინ წამოწევს პროექტის დაყოფას და პროექტის დეკომპოზიციას, რომელიც ხორციელდება გარკვეული პრინციპების დაცვით. ამ პრინციპების თანახმად შესაძლებელია არქიტექტურული პროექტის მართვის ნებისმიერი ფუნქციის დეკომპოზიცია, ხოლო დეკომპოზიციის სტრუქტურა და ღონე, ანუ პროექტის დეგალიზაციის ხარისხი დამოკიდებულია მშენებლობაში მისი რეალიზაციის მიზნებსა და ამოცანებზე [120]. მაგალითისათვის შეგვიძლია განვიხილოთ პროექტის ხარისხის მართვა დროითი პარამეტრებით. შეიძლება გამოვეყნოთ შესაბამისი დეკომპოზიციის ელემენტები და ღონეები (ნახ. 16.).



ნახ. 16. პროექტის ხარისხის მართვა ფუნდამენტური დროებრივი პარამეტრების მიხედვით

ასეთი ლეკომპოზიციების რეალიზაცია მოითხოვს რიგი აუცილებელი მოთხოვნების შესრულებას, კერძოდ, პირდაპირი ძალისხმევისა და უკუკავშირის (კიბერნეტიკის ე. ი. ოპტიმალური მართვის ფუნდამენტური კატეგორიების) კორექტულ გააზრებას საწარმოო-შემოქმედებითი პროცესის ყველა ეტაპზე. ნებისმიერ შემოქმედებით-საწარმოო სფეროში, მათ შორის არქიტექტურისა და ქალაქთმშენებლობის დარგის დროებრივ-ტექნოლოგიურ პროცესში: ანალიზი-სინთეზი-შეფასება პირობითად ბოლო ეტაპს შეფასებას გადამწყვეტი როლი ენიჭება [150], (ნახ. 17.).



ნახ. 17. ოპტიმალური მართვის ფუნდამენტური კატეგორიები

მოდელის ფორმალური მახასიათებლები (მოდელების კლასიფიკაცია).

ექსპერტების დამოკიდებულება პროექტის მახასიათებლებისადმი არის სწორედ ის მიმართება, რომელიც ობიექტის პარამეტრებსა და მის ხარისხის არგუმენტებსა და ფუნქციის მნიშვნელობის სავარაუდო მათემატიკური ინტერპრეტაციის შესაძლებლობას იძლევა. აპრიორი დასაშვებია, რომ პრინციპულად შესაძლებელია ხარისხის რაოდენობრივი განსაზღვრა მისი ცალკეული (დიფერენცირებული) მაჩვენებლების შეფასებისა და მათი ე. წ. „შედეგების“. პრაქტიკულად უმეტეს შემთხვევაში, საქმე გვაქვს წრფივ და ადიტიურ მოდელებთან, თუმცა, რასაკვირველია არ უნდა გვავიწყდებოდეს, რომ ყველა შესაძლო შემთხვევაში, უნდა გავითვალისწინოთ ამ დაშვებების აპროქსიმაციის ხარისხი. კერძოდ, ურთიერთგამომრიცხავი ალტერნატიული

ხასიათი: წრფივი - არაწრფივი, ადიტიური - არაადიტიური, სტატიკური - დინამიკური, ლეტერმინისტიკული - სტოქასტიკური [109].

მოდელის გიპები.

კონკრეტულ მოდელებში რეალიზებულია ხარისხის შეფასების მეთოდების მახასიათებლების გარკვეული კომბინაციები. ცალკეული მოდელი შეიძლება დახასიათდეს სწორედ ამ კომბინაციის კონკრეტული მნიშვნელობებით (კორგეციით). მაგალითად:

ექსპერტული (ექსპერტების ჯგუფი – 1-10, 14, ერთი ექსპერტი – 1-10); სიციოლოგიური (მომხმარებელთა მოთხოვნების სტატისტიკური დამუშავება – 3, 4, 6-9, 11-14, მომხმარებელთა მოთხოვნები სუშუალოდ გამოვლენა – 2, 4, 7-9, 11-14);

ლიფერენცირებული (ერთი მაჩვენებლით შეფასება – 1-4, 7-8, 10, 14); ეკონომიკური (ეკონომიკური მაჩვენებლით შეფასება – 1-8, 10, 14, დაყვანილი ეკონომიკური მაჩვენებლით შეფასება – 1-6, 8-11, 14); შემლუღებით (ერთი არაეკონომიკური მაჩვენებლით შეფასება – 1-10, 13); კომპლექსური (ფუნქციური მოდელით შეფასება – 1-4, 6, 10, 12-14, „ღირებულება/ეფექტურობა“ – 1-4. 6, 8-13, დიხოტომიური შკალით შეფასება – 1-5, 7-11, არადიხოტომიური შკალით შეფასება – 1-5, 7-1, ქვალიომეგრიული მეთოდით შეფასება – 1-14); ეკონომიკურ-მათემატიკური (წრფივი პროგრამირების მეთოდი – 2-14, არაწრფივი პროგრამირების მეთოდი – 3-14); არამკვეთრი სიმრავლეების მეთოდი (ლინგვისტიკური ცვლალებით შეფასება – 3-14) (ცხრილი 9.)

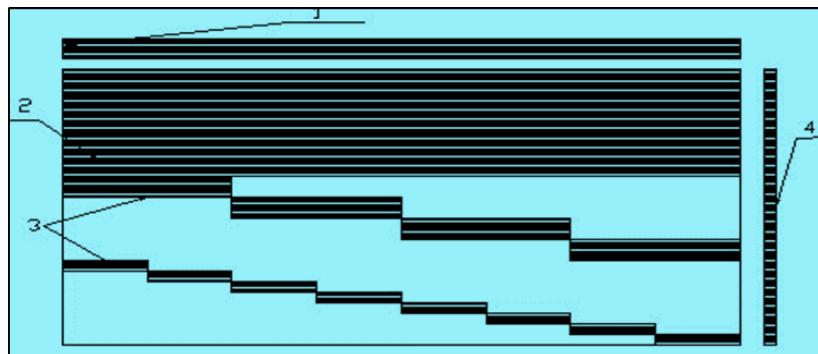
ცხრილი 9.

ხარისხის შეფასების მეთოდების მახასიათებლების მიხედვით

მოხერხებული							სარწმუნო						
პრაქტიკული			უნივერსალური				მკაფიო			ჭეშმარიტი			
1	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
ა	ოპე	გაუ	რა	ცალ	გლ	მოქ	ერ	შელ	გან	ყო	მგრ	მონ	ზუს
რ	რაგ	მჯო	ოლე	სახ	ობა	ნილ	ოკ	არე	მეო	ლის	ძნო	ოგ	ტი
ა	იულ	ბეს	ნობ	ა	ლუ	ი	რიტ	ბად	რეზ	მომ	ბია	ონუ	
შ	იი	ეზა	რივ		რი		ერი	ი	ადი	ცვე	რე	რი	
		დი	ი				უმი		ადი	ლი			

რ							ანი						
ო													
მ													
ა													
ბ													
ქ													
შ													
ჩ													
ც													
კ													
ღ													
ი													

გავრცელებულია ხარისხის შეფასების პროცედურა, როდესაც შესაფასებელი ობიექტი ელრება ეტალონს. II-განზომილებიან სივრცეში „მანძილი“ ეტალონამდე შეიძლება გამოდგეს ხარისხის საზომ კრიტერიუმად (რაც ნაკლები, მით უკეთესი; ეს მანძილი აუცილებელი არაა გაგებული იყოს როგორც ევკლიდური). ოპტიმიზაციის მეთოდებს და ხარისხის შეფასების პროცედურებს შორის მსგავსება ინტუიციურად მისაღებია. მაგრამ აქ უნდა აღინიშნოს, რომ ერთი ფორმულით, რაც არ უნდა რთული იყოს იგი, ბოგად შემთხვევაში ვერ აღიწერება მრავალპარამეტრიანი ოპტიმიზაციის პროცედურა (ნახ. 2. 13.) [104].



ნახ. 18. წრფივი დეკომპოზიციის მოდელი
1. მიზნის ფუნქცია; 2. „გლობალური შემლუღვები“;
3.ლოკალური შემლუღვები; 4.თავისუფალი წევრები

წრფივი და ალიგური დამოკიდებულებების შემთხვევაში მოდელი შეიძლება წარმოვადგინოთ გამოსახულებებით:

$$\sum_{i=1}^n C_i X_i \rightarrow \max \quad (1.1.)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i X_i \leq A_j \quad (1.2.)$$

$$b_{ik} x_i \leq B_k \quad (1.3.)$$

სადაც, X_i - ცვლია, რომლის მნიშვნელობა ინტეგრირებულია, როგორც სტრუქტურული ელემენტის (ობიექტის) არსებობა, რაოდენობა ან სიმძლავრე;

C_i - ერთეული ობიექტის ღირებულება (ფასეულობა);

a_i და B_k - სტრუქტურული ელემენტის მახასიათებლებია. თავისუფალი წევრები და შეესაბამება A_j, B_k - სტრუქტურულ-ტერიტორიულ ერთეულებში მათი ფუნქციური გამოყენების სხვადასხვა ვარიანტების ნორმას, რესურსებს (ტერიტორია და სხვ.) და ლიმიტებს (მინიმუმი, მაქსიმუმი, გრადაცია).

მიზნის ფუნქციას და შეზღუდვების სისტემას აქვს ფიზიკური (ეკონომიკური) ინტერპრეტაცია, თუმცა კრიტერიუმად შეიძლება გამოყენებული იქნას ინტეგრალური ხარისხის ცნება (სამომხმარებლო ხარისხი/საწარმოო დანახარჯები). ასევე ეკონომიკური ეფექტიანობის ნაცვლად შესაძლებელია მიღებული იყოს სოციალური ეფექტიანობა. ამ შემთხვევაში საჭიროა ეკონომიკურად ძნელად ინტერპრეტირებადი დაშვებებისა და პრიორიტეტების ჩამოყალიბება. ხარისხის შეფასების შემდგომი განვითარება შესაძლებელია თანამედროვე მიდგომებისა და ხედვების საფუძველზე, მათ შორის როგორცაა კატასტროფების და ქაოსის თეორია, კვამირეგულარული სტრუქტურების ფორმალიზმი და სხვა.

პრაქტიკაში ხარისხის შეფასების პროცედურა მრავალფეროვანია, მაგრამ მასში შეიძლება დავინახოთ საერთო თვისებები და განმასხვავებელი ნიშნები.

4D-BIM გამოიყენება მშენებლობის დაგეგმვასთან დაკავშირებული მოვლენების მოდელირებისთვის. BIM-ის მეოთხე განზომილება პროექტის მონაწილეებს საშუალებას მისცემს, მიიღონ და განიხილონ თავიანთი საქმიანობის თანმიმდევრობა მთელი საპროექტის ციკლის განმავლობაში. უზრუნველყოფს

თანამშრომლების კომუნიკაციის და რისკების შესახებ ინფორმაციის მიღებას. მოდელის უპირატესობაა: დაგმარების ოპტიმიზაცია და გუნდური კოორდინაციის შესაძლებლობა.

5D BIM (შენობის ინფორმაციის 5-განზომილებიანი მოდელირება) გამოიყენება ბიუჯეტის შეშუშავების და ხარჯების ანალიზისთვის. BIM- ის მეხუთე განზომილება, რომელიც დაკავშირებულია 3D (გეომეტრიულ) და 4D (დროებით) პარამეტრებთან, პროექტირების მონაწილეებს საშუალებას აძლევს განიხილონ თავიანთი საქმიანობისა და შესაბამისი ხარჯების დინამიკა. 5D BIM ტექნოლოგიის გამოყენებით შესაძლებელია პროექტების შეფასების დაზუსტება, მასალების, აღჭურვილობის ხარჯისა და სამუშაო ძალის პროგნოზირება. უპირატესობები: 5D სიმულაციური მოდელების მეშვეობით შესაძლებელია ეფექტიანი, ეკონომიკური და სტაბილური საპროექტო პროცესის უზრუნველყოფა.

6D BIM მოდელირება განკუთვნილია ენერგიის მოხმარების ანალიზისთვის. ის სიმულაციური მოდელების მეშვეობით უზრუნველყოფს ენერგიის მოხმარების შემცირებას.

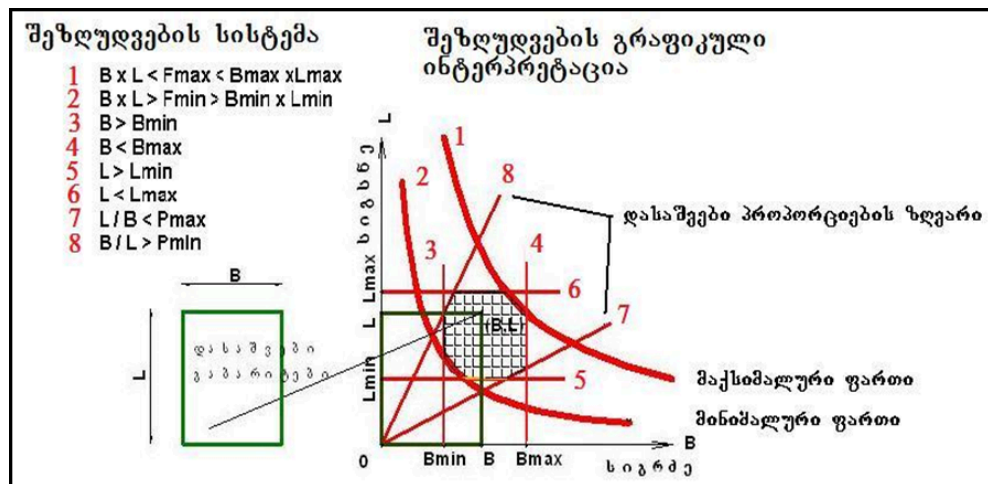
7D BIM მოდელირება შეესაბამება შენობის და მისი ფუნქციურ-სტრუქტურული კომპონენტების მდგომარეობას მთელი სასიცოცხლო ციკლის განმავლობაში. ობიექტის ოპერირებისა და შენარჩუნების დროს. BIM- ის მეშვიდე განზომილება მონაწილეებს საშუალებას მისცემს მიიღონ და აკონტროლონ სათანადო აქტივების მონაცემები, როგორიცაა კომპონენტის სტატუსი, სპეციფიკაციები, რემონტი, გარანტიები და სხვა. უპირატესობები - სიმულაციური მოდელების მეშვეობით აქტივების მართვის ოპტიმიზაცია.

ობიექტის ნებისმიერი გარდაქმნა (მოდიფიკაცია) ძალისმიერ მოქმედების (ენერგეტიკული ზემოქმედების) შედეგთან შეიძლება იყოს ასოცირებული; ხოლო რიგი, CAD სისტემებში გამოყენებული მოდიფიცირების ბრძანებებისა (კერძოდ, სივრცითი გარდაქმნების მოდიფიკატორები) უშუალოდ რაიმე ფიზიკური პროცესის იმიტაციას წარმოადგენს.

აღნიშნული გარემოება სულ უფრო და უფრო ფართო გამოყენების არეალს უქმნის ინფორმაციული ტექნოლოგიების, კერძოდ, კომპიუტერული გრაფიკის საშუალებებს სხვადასხვა სამეცნიერო-პოპულარულ, სარეკლამო, საწარმოო-შემოქმედებით სფეროებში. არანაკლებ მნიშვნელოვანია ამ ფაქტორის

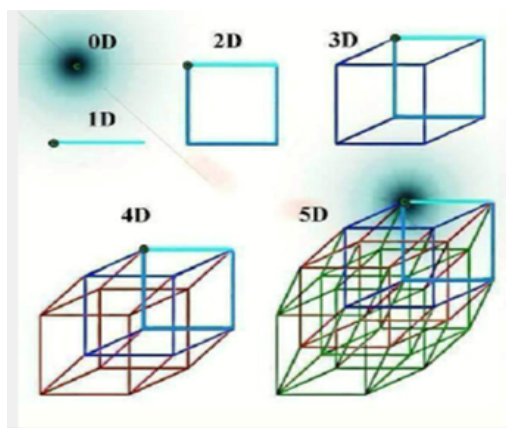
შემეცნებითი მნიშვნელობის გათვალისწინება განათლების სფეროში (მოდელირება და ვიზუალიზაცია)

CAD და BIM პაკეტების ადაპტაციის პრინციპული შესაძლებლობები არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის სრულყოფისათვის მოცემულია ნახ. 19.-ზე



ნახ. 19. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვის სქემა

განზომილება, როგორც მოდელის უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელი და მისი ასოციაციები მათემატიკურ ობიექტებთან (სტრუქტურებთან) (ნახ. 20.).



ნახ. 20. მოდელის განზომილება

განზომილების ცნების განზოგადოება და მისი გამოყენების პერსპექტივაა ფრაქტალური განზომილება. ფრაქტალის მანდელბროტისეული პირველადი განსაზღვრება ასეთია: ეს არის სიმრავლე, რომლის ჰაუსდორფული (ფრაქტალური) განზომილება მეტია მის ტოპოლოგიურ განზომილებაზე. ამ, ერთი შეხედვით, ფორმალურ და არათვალსაჩინო განსაზღვრებას აქვს უდიდესი შემეცნებითი მნიშვნელობა. ვინც ფრაქტალობის პრინციპს მეტნაკლებად გაცნობილია, ინტუიციურად დათანხმება, რომ ნაცნობ 3-განზომილებიან სამყაროში, (რომელშიც ხაზი 1-განზომილებიანია, სიბრტყე - 2, ხოლო სხეულები - 3), არსებობს ფრაქტალები, რომლებსაც განზომილების მიხედვით შუალედური მდგომარეობა უჭირავთ, ე.ი. წილადი განზომილება აქვთ. არსებობს ფრაქტალების განზომილების გამოთვლის რამდენიმე ხერხი. ყველაზე უფრო პოპულარულია ჰაუსდორფის მეთოდი (კვადრატებით დაფარვა). აქ მთავარია გავერკვათ სამ თითქოს არც თუ ისე უცხო სიდიდეში (მოცემულია ქართულ, ინგლისურ, გერმანულ, რუსულ გრანსკრიპციებში):

ფრაქტალის მათემატიკური ცნება განსაზღვრავს მას როგორც სიმრავლეს წილადი განზომილებით. ფრაქტალური განზომილების წილადი მნიშვნელობა ახასიათებს სივრცის ფრაქტალური სტრუქტურით შევსების ხარისხს, მაშინ, როდესაც ლაკუნარობის მნიშვნელობა წარმოადგენს ფრაქტალის არაერთგვაროვანი სტრუქტურის ზომას. რთული სივრცობრივი ორგანიზაციის სტრუქტურების რაოდენობრივი დახასიათება ფრაქტალური განზომილების მეშვეობით შეიძლება იყოს ამ სტრუქტურების მორფოლოგიური სირთულის მაჩვენებელი. ამგვარად, განისაზღვრება ბუნებრივი მორფოგენები (ბუნებრივი, ჭეშმარიტი ფორმების რთული სივრცული ორგანიზაცია) ფრაქტალურ სტრუქტურებთან შედარებით. უნდა აღინიშნოს, რომ არქიტექტურული ფორმები უფრო რეგულარულია, ვიდრე ბუნებრივი, მოიცავენ ვარიაციების ნაკლებ რაოდენობას.

საერთოდ, განზომილების ცნება შეიძლება სხვადასხვაგვარად განისაზღვროს (ე. ი. ერთი და იგივე სიმრავლისთვის, ობიექტებისთვის შეიძლება განისაზღვროს არა ერთი, არამედ რამდენიმე სხვადასხვა განზომილება). სხვადასხვა განზომილების განხილვის აუცილებლობა გამომდინარეობს ობიექტების ტოპოლოგიური სირთულიდან. ჩვეულებრივ, მრუდის (წირის) ზომა

განისაზღვრება მისი სიგრძით, ზედაპირის ზომა - მისი ფართობით, სამგანზომილებიანი სხეულის სიდიდე - მისი მოცულობით. ფრაქტალური სტრუქტურისთვის ასეთი მიდგომა გამოუყენებელია. მაგალითად, უმარტივესი ფრაქტალის სიგრძე - კანტორის სიმრავლე - უდრის 0, კოხის ფიფქის (მრუდის) სიგრძე კი (უწყვეტი შეკრული მრუდი, რომელიც საზღვრავს საბოლოო ფართობს) უდრის უსასრულობას. ამავე დროს კანტორის სიმრავლის მეგრული ზომადობა (ან ზომადობა ქაუსდორფის გაგებით (ქაუსდორფის ზომადობა) უდრის $\ln 2 / \ln 3 \approx 0,63$, კოხის ფიფქის მეგრული ზომადობა კი უდრის $\ln 4 / \ln 3 \approx 1,26$. სერპინსკის კვადრატულ ხალიჩას გააჩნია ქაუსდორფის განზომილება $\ln 8 / \ln 3 \approx 1,89$. ქაუსდორფის განზომილება - მეგრულ სივრცეში სიმრავლის ზომადობის განსაზღვრის ბუნებრივი მეთოდია და სრულიად შეთანხმებულია ჩვენ ჩვეულ წარმოდგენებთან ზომადობის შესახებ რეგულარული (გლუვი) სიმრავლეების შემთხვევაში. მაგალითად, სამგანზომილებიან ევკლიდურ სივრცეში საბოლოო სიმრავლის ქაუსდორფის ზომადობა უდრის ნულს, გლუვი მრუდის ზომადობა - ერთს, გლუვი ზედაპირის ზომადობა - ორს და ნულოვანი მოცულობის სიმრავლის ზომადობა - სამს. ფრაქტალური სიმრავლეებისთვის (რომლებიც ასახავენ არაგლუვ მრავალფეროვნებას, გააჩნიათ არარეგულარული სტრუქტურა) ქაუსდორფის განზომილება შეიძლება ღებულობდეს წილად მნიშვნელებს [125].

საზოგადოდ, სისტემურ მიდგომას, როგორც თანამედროვე პარადიგმას წინ უნდა უძღოდეს: მონაცემთა კვანტიფიკაცია, პარამეტრიზაცია, მონაცემთა პირველადი სტატისტიკური დამუშავება, ჰიპოტეზების სტატისტიკური შემოწმება, ოპტიმიზაციის რაოდენობრივი მოდელები; ამ მეთოდის გამოყენების მიზგზ-შედეგობრივი განპირობებულობა და თვით ობიექტის სისტემური ხასიათი, მისი ცხადად გამოხატული იერარქიული სტრუქტურა.

ფრაქტალების ძირითადი ტიპები: ალგებრული, გეომეტრიული და სტოქასტიური.

ალგებრული ფრაქტალები ყველაზე მრავალრიცხოვანი ჯგუფია. ფორმირდება არაწრფივი პროცესების შედეგად n -განზომილებიან სივრცეში. უფრო კარგადაა შესწავლილი 2-განზომილებიანი პროცესები.

გეომეტრიული ფრაქტალები ყველაზე უფრო თვალსაჩინოა. ამ კლასის ფრაქტალები ფორმირდება შემადგენელი ტეხილის ციკლურად ცვლით შესაბამისი

მასშტაბის ე. წ. „ტეხილ გენერატორზე“ (3-განზომილების შემთხვევაში „ზელაპირ-გენერატორზე“).

სტოქასტიკური ფრაქტალები ჩნდება იტერაციულ პროცესში პარამეტრების ალბათური ცვლილებების შემთხვევაში. გამოსაყენებელია ბუნების (ცოცხალი და არამარტო), კერძოდ რელიეფის, წყლის ზელაპირის მოდელირებაში [126], [127], [128].

სივრცულ-დროებრივი მოდელირების პრიორიტეტები:

1. სივრცულ-დროებრივი კონტინუუმის გაგება მოიცავს ადამიანთა საწარმოო-შემოქმედებითი მოღვაწეობის ყველა სფეროს (ყოველ შემთხვევაში, დღეისათვის ჩამოყალიბებულ შემეცნებით თუ პრაქტიკული საქმიანობის ასპექტში). მაგრამ სივრცული (გეომეტრიული) კომპონენტის გამორჩეულად განხილვა „მიღებულია“ მისი უფრო მეტი თვალსაჩინოებისა და „აღქმადობის“ გამო. ცნობილია, რომ პროექტირების სისტემები (მათ შორის ავტომატიზირებული) ორიენტირებულია გეომეტრიულ გარდაქმნებზე, როგორც ზოგადი, ასევე სპეციალური გაგებით.

2. ისტორიულ ასპექტში პერსონალიზაციის თვალსაზრისით ჩვენთვის საინტერესო სფეროს, კერძოდ, პროექტირების სრულყოფის პრობლემატიკის განხილვისას გვერდს ვერ ავუვლით ისეთ ავტორიტეტებს, როგორებიცაა: კ. მონჟი (მხაზველობითი გეომეტრია), ფ. კლაინი (გეომეტრიული გარდაქმნების ჯგუფების თეორია, „ერლანგენის „პროგრამა“, ნ. ვინერი (ოპერაციითა გამოკვლევის მოდელები და მეთოდები, „კიბერნეტიკა“, ანუ კავშირი და მართვა), ბ. მანდელბროტი („ბუნების ფრაქტალური გეომეტრია“). თუ გავისხენებთ რომ, რომ ამ მათემატიკოსების ინტელექტუალური ძალისხმევა ძირითადად ინიცირებული იყო სამხედრო გამოწვევებით, შეგვიძლია შემოგთავაზოთ მეგაფორა: განვითარების მშენებლობის პროექტირების სრულყოფის ფრონტი ამ პერსონების მიერ დასმული ისტორიული ნიშანსეგებით დაკვალებულ ღერძზე გადის.

3. ნიშანდობლივია ის გარემოება, რომ კომპიუტერული გრაფიკის რედაქტირების ყველა ბრძანება პრინციპში სამი ოპერაციის - გადაადგილება, ბრუნვა, მასშტაბირება (Move, Rotate, Scale) მოდიფიკაცია ან კომპოზიციაა.

4. არქიტექტურულ-სამშენებლო ნიმუშების ფრაქტალური გეომეტრიის ასპექტში სპეციფიკურ ანალიზზე და ფორმათწარმოქმნის და კომპოზიციის

ფრაქტალური გეომეტრიის დებულებები ინტერპრეტირებულია იქნება ფართო სამოგადოებისთვის გასაგები ცნებებით და კატეგორიებით, ასევე გეომეტრიული გარდაქმნების თვალსაჩინო, მაგრამ გონივრულ ფარგლებში, მათემატიკურად მკაცრად განსაზღვრული ფორმალიზმით [120],[121].

ინფორმაციული მოდელი ფორმირდება შენობის გეომეტრიული მოდელის შექმნისას, ხოლო შემდეგ პროექტირების მთელი პროცესის მანძილზე გამოიყენება და იესება სხვადასხვაგვარი ინფორმაციით [8].

შენობის ინფორმაციული მოდელი BIM არის კომპიუტერული დამუშავებისთვის გამოყენებადი, არსებული ან დასაპროექტებელი ობიექტების შესახებ ინფორმაცია. ეს არის ამ ობიექტის მონაცემთა ბაზა მართული შესაბამისი კომპიუტერული პროგრამის მეშვეობით. ამ ინფორმაციის საშუალებით შესაძლებელია:

- კონკრეტული საპროექტო გადაწყვეტილების მიღება;
- კვანძებისა და კომპონენტების გაანგარიშება;
- ობიექტის საექსპლუატაციო თვისებების პროგნოზირება;
- საპროექტო დოკუმენტაციის შექმნა;
- ხარჯთაღრიცხვის და მშენებლობის გეგმის შედგენა;
- მასალების და აღჭურვილობის შეკვეთა და წარმოება;
- რეალიზაციის მენეჯმენტი;
- ობიექტის მართვა მისი მთელი არსებობის ციკლის განმავლობაში;
- ობიექტის, როგორც კომერციული საქმიანობის ობიექტის მართვა;
- ობიექტის რეკონსტრუქციის ან რემონტის მართვა;
- ობიექტის დანგრევა და უტილიზაცია;
- ობიექტთან დაკავშირებული სხვა მიზნების განხორციელება.

შენობის ინფორმაციული მოდელი სტრუქტურულად შეიცავს:

- სამშენებლო ობიექტებს, რომლებიც ციფრული მოდელის სახით არიან წარმოდგენილნი, დაკავშირებულნი გრაფიკასთან, ატრიბუტებსა და ბმების პარამეტრულ პირობებთან;
- კომპონენტებს, რომლებიც სამშენებლო მოდელის ქცევას აღწერენ;

- შესათანხმებელ მონაცემებს, მაგალითად, 3D-დან 2D-ზე გადასასვლელად წარმოდგენილი ცვლილების განსახორციელებლად, 2-მიმართულებიანი ასოციაციური კავშირების ყველა სახის პრეზენტაციაზე;
- მართვის მონაცემები, რომლებიც ყველა სახის მონაცემებს კოორდინირებას უწევენ [142], [143].

შენობის ინფორმაციული მოდელის გამოყენების ერთ-ერთ მიმართულებას იმიტაციური მოდელირება და შენობის მშენებლობის პროცესის ანალიზი წარმოადგენს. სამშენებლო პროექტი რთულ სოციალურ-ეკონომიკურ სისტემას წარმოადგენს, რომელშიც მონაწილეობს ათეულობით ორგანიზაცია და ასეულობით და მეტი ადამიანი. ასეთი სისტემის ნორმალური ფუნქციონირებისათვის აუცილებელია მონაწილეთა კოორდინაციის უზრუნველყოფა, რაც კალენდარულ-ქსელური გრაფიკის გარეშე, რომელიც მშენებლობის რეალობას ასახავს, გაძნელებულია. კალენდარულ-ქსელურ გრაფიკზე ნებისმიერ გრაფიკულ ფორმაში (ჰანგის დიაგრამა, „მუშაობა კვანძებში“, „მუშაობა რკალებზე“) სივრცე არ ჩანს (XYZ). ამიგომ რთული ტენოლოგიის დაპროექტება, მაგალითად, მსხვილგაბარიტული დანადგარების მონტაჟი, მხოლოდ გრაფიკის დახმარებით, გაძნელებულია. უნდა ჩაირთოს „წარმოსახვა“. არსებობს იარაღები, რომელიც ამის გაკეთების საშუალებას გვაძლევს. ის შეიძლება იწოდებოდეს 4D პროექტირებად და დაფუძნებული იყოს BIM-ის გამოყენებაზე [8].

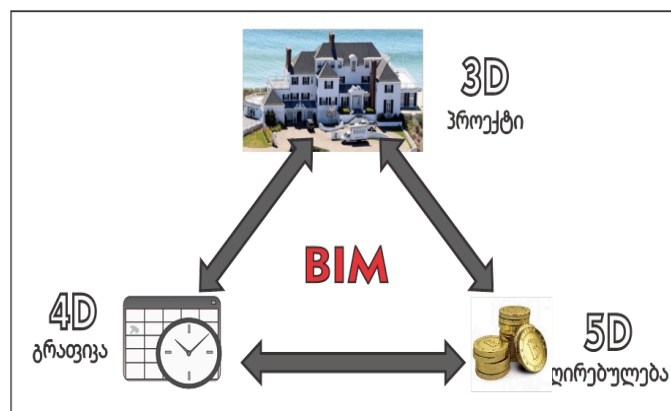
ინფორმაციული 4D მოდელი ფორმდება სამშენებლო სამუშაოების კალენდარულ-ქსელური გრაფიკის სამუშაოთა გაერთიანებით საპროექტო სამგანზომილებიანი მოდელის შესაბამის ელემენტებთან. 4D მოდელის გამოყენება შეიძლება როგორც მშენებლობის ვირტუალური მოდელირებისთვის, ისე სამშენებლო-სამონტაჟო სამუშაოების რეალური მსვლელობის ცოდნისთვის.

BIM-ის გამოყენება შეიძლება სხვადასხვაგვარ გამოყენებით სფეროში:

- მშენებლობის კალენდარული გეგმა: შენობის მოდელის დაკავშირება პროექტის კალენდარულ გეგმასთან მომხმარებლებს მშენებლობის პროცესის მოდელირების და სამშენებლო მოედანზე შენობის ვირტუალური სახის ჩვენების საშუალებას აძლევს;

- ღირებულების შეფასება: BIM-ის მომხმარებლებს შეუძლიათ მოახდინონ ღირებულების ზუსტი და საიმედო შეფასება შენობის მოდელიდან ავტომატურად მიღებული მონაცემების საფუძველზე, მათ შორის, მიიღონ სწრაფი შეფასება პროექტში ცვლილებების ხარჯებზე;
- შეჯახების გამოვლენა: პროექტის ყველა განყოფილებიდან კონსტრუქციები შეიძლება გაერთიანდეს და გამოიკვლიოს, ამგვარად, გეომეტრიული შეჯახებები არქიტექტურულ, სტრუქტურულ და MEP სისტემებს შორის იქნება გამოვლენილი, შემოწმებული და შეცვლილი. სხვადასხვა დამპროექტებლებს შორის კოორდინაცია ძლიერდება, ხოლო შეცდომების გაპარვის ალბათობა მნიშვნელოვნად მცირდება. ამგვარად, მშენებლობის პროცესი ჩქარდება, ხარჯები მცირდება, იურიდიული დავების ალბათობა მინიმიზირდება, ასევე პროექტის დასრულების ვადა მცირდება.

BIM-ი შეიძლება იყოს: 3D, 4D – დროსთან ინტეგრაცია, 5D – ღირებულების ჩართვა და „nD“-მდე (ტერმინი, რომელიც მოიცავს ნებისმიერ სხვა ინფორმაციას, ნახ. 21.).



ნახ. 21. BIM-ის ზომები

3D BIM მოდელი მოიცავს ყველა სივრცით თანაფარდობას, ტოპოლოგიურ ინფორმაციას და გეომეტრიას, მაგალითად შენობის კომპონენტების სიგრძეს, სიგანესა და სიმაღლეს.

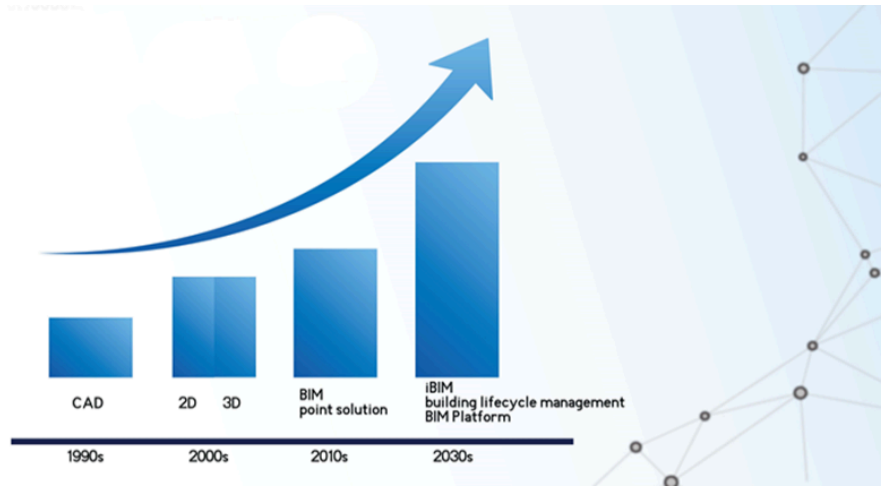
4D BIM მოდელი უმატებს 3D მოდელის კალენდარულ გეგმას მეოთხე განზომილებას. 4D მოდელი აკავშირებს 3D ელემენტს პროექტის რეალიზაციის დროსთან, იმისთვის, რომ მომხმარებლებს მიაწოდონ 4D არეში პროექტის ვირტუალური სიმულაცია [52].

5D BIM მოდელი შედის მე-5 განზომილების დამატებაში – ღირებულება 4D მოდელის მონაცემებში. 5D BIM მოდელი აკავშირებს მონაცემებს ხარჯებზე სამუშაოთა მოცულობასთან, რომლებიც გენერირდება 3D მოდელიდან პროექტის ღირებულების უფრო ზუსტი შეფასების უზრუნველსაყოფად [79].

BIM-ის საშუალებით მშენებლობის დაგეგმვის მეთოდები შეიძლება დაყვით 2 კატეგორიად [68], [142], [143].

3D BIM-ის 4D თავისებურებების ჩართვის გამოყენება პროექტირების პროგრამაში. ეს მეთოდი გამოიყენება 4D გამოსახულების შესაქმნელად ინსტრუმენტების საშუალებით, რომლებიც ავტომატურად ფილტრავენ ობიექტებს პარამეტრების ნაკრების საფუძველზე. Revit პროგრამა ფლობს ერთ-ერთ ასეთ ინსტრუმენტს, რომელიც ობიექტებს ჰყოფს რამდენიმე დროის ეტაპად მოცემული მოთხოვნების შესაბამისად. მომხმარებელს შეუძლია გამოიყენოს ფილტრი, იმისათვის, რომ დაათვალიეროს ობიექტების მდგომარეობა გარკვეულ ეტაპზე. 4D ფუნქციის ეს ტიპი გამოიყენება მშენებლობის ფაზისა და მოდელის 3D გამოსახულების დასაკავშირებლად, მაგრამ ის არ უზრუნველყოფს პირდაპირ ინტეგრაციას პროექტის კალენდარულ გეგმასთან.

3D BIM-ის და კალენდარული გეგმის მონაცემთა იმპორტი სპეციალიზებულ 4D დანართში. წინამდებარე მეთოდის შემუშავებამ პროგრამული უზრუნველყოფის შემუშავებლები აიძულა მოეძებნათ ინსტრუმენტი, რომელთაც შეუძლიათ სამშენებლო წარმოების დაგეგმარების ფუნქციის სრული ინტეგრირება 3D მოდელთან. ეს ინსტრუმენტები ამაღლებენ 4D მოდელირების წარმადობას და დამატებებს აძლევენ ბევრ შესაძლებლობას 4D მოდელის აწყობისთვის. ეს მეთოდიკა ითხოვს BIM დანართიდან შენობის 3D მოდელის და დაგეგმარების დანართიდან პროექტის გეგმის მონაცემების იმპორტირებას, ისეთების, როგორიც არის MS Project და Primavera. შემდგომში დამატება აკავშირებს 3D მოდელის კომპონენტებს სამუშაოებთან პროექტის სამშენებლო გეგმიდან, რათა საბოლოოდ მოხდეს 4D მოდელის ფორმირება (ნახ. 22.).



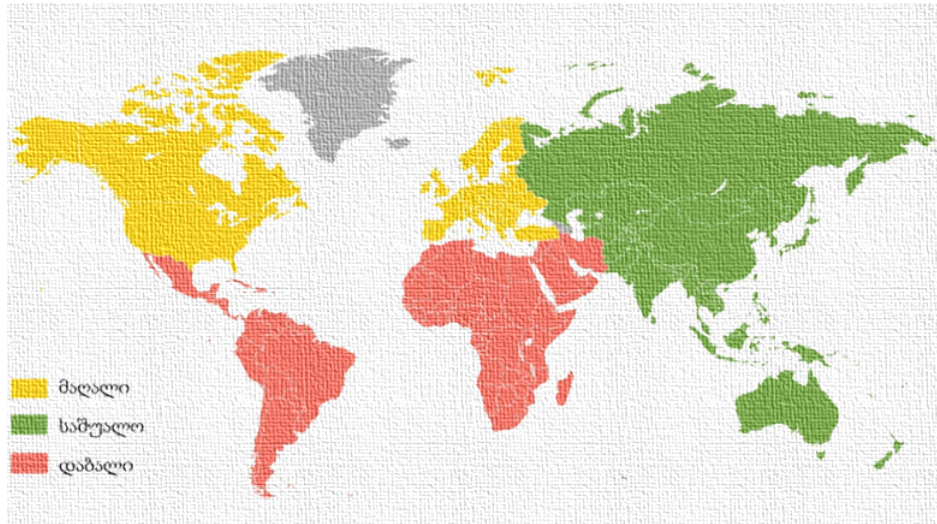
ნახ. 22. 3D BIM-ის და კალენდარული გეგმების მონაცემების იმპორტი

4D BIM ტექნოლოგიის გამოყენების უპირატესობები:

- ობიექტზე საბუშაოთა წარმოების შერჩეული ტექნოლოგიის კორექტირების ვიზუალური ასახვა;
- ღაგეგმვის სტადიაზე პროექტირების შეცდომების გამორიცხვა;
- ობიექტის მშენებლობის მსვლელობის ვიზუალური ასახვა;
- ობიექტზე საბუშაოთა შესრულების მსვლელობის ანიმირებული ანგარიშების ფორმირება 3D მოდელის გამოყენებით.

მართალია BIM ტექნოლოგიამ თავისი უპირატესობა აჩვენა, სახეზეა მრავალი ცალ-კეული პროგრამა, რომლებიც აიოლებენ არქიტექტურულ-სამშენებლო ამოცანების გადაწყვეტას, მაგრამ არსებობს აუცილებლობა მათ შორის ინტეგრირებული ავტომატიზაციის შემუშავებისთვის.

BIM ტექნოლოგიის ზრდა მსოფლიოში რეგიონების მიხედვით (სურ. 3.).



სურ. 3. BIM -ის ზრდის ტემპი მსოფლიოში რეგიონების მიხედვით

2.6. მშენებლობის პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ინტეგრირებული ავტომატიზაციის მეთოდის შემუშავება

მშენებლობის 4D მოდელის შექმნის ავტომატიზაცია.

მშენებლობის 4D მოდელს შეუძლია პროექტის 3D მოდელის ანიმაციით ვიზუალიზება, რომელიც აგებულია მშენებლობის კალენდარული გეგმების შესაბამისად. მშენებლობის მსვლელობის ყოველდღიური ანალიზი ეშვება სხვადასხვა პრობლემის და კონფლიქტების აღმოჩენას. მაგრამ, ინფორმაციის ფორმირება და შეკრება, 4D ანიმაციისთვის აუცილებელია და დიდ დროს მოითხოვს.

მშენებლობის 4D მოდელის ფორმირების ავტომატიზაციისთვის ახალი მეთოდის შემუშავებისთვის გაანალიზებული და გათვალისწინებული იყო შემდეგი შენიშვნები სამეცნიერო ლიტერატურიდან:

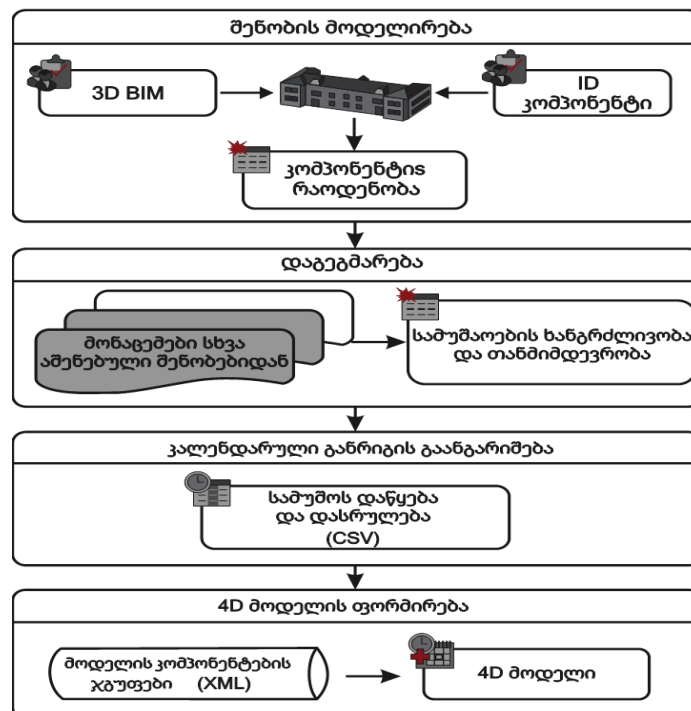
1. მოდელირების 4D პროგრამები ითხოვს მშენებლობის პროცესის ვიზუალიზაციის პროგრამასთან კალენდარული გეგმის კავშირის უზრუნველყოფას. ეს ნიშნავს, რომ თუ კალენდარული გეგმა მზად არ არის, მაშინ 4D მოდელირება და ვიზუალიზაცია არ შეიძლება შესრულდეს;
2. 4D მოდელის ფორმირების არსებული პროგრამული უზრუნველყოფა ითხოვს ხელით შრომის მნიშვნელოვან მოცულობას. ღებვა საკითხი ინფორმაციის

ავტომატიზირებულ გადაცემაზე პირდაპირ შენობის მოდელიდან კალენდარული დაგეგმარების პროგრამულ უზრუნველყოფაში;

3. აღნიშნულია, რომ არსებობს კომპიუტერული მეთოდის შემუშავების აუცილებლობა. სხვადასხვა სტანდარტული პროგრამული პროდუქტების და მშენებლობის 4D მოდელის ფორმირების ზოგიერთი ამოცანის ავტომატური შესრულების ინტეგრაციისთვის.

შესაბამისად, კვლევის ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ გავამარტივოთ დაგეგმვის და მშენებლობის 4D მოდელის შედგენის პროცესი მშენებლობის პროცესის ვიზუალიზაციისთვის დაგეგმარების აღრეულ სტადიაზე.

ნახ. 23.-ზე მოცემულია მშენებლობის 4D მოდელის შედგენის ავტომატიზაციისთვის შემოთავაზებული მეთოდის სქემა. ეს მეთოდიკა შეიძლება 4 ძირითად ეტაპად დაფიქსირდეს: შენობის მოდელირება, დაგეგმარება, კალენდარული განრიგის გაანგარიშება და 4D მოდელის ფორმირება.



ნახ. 23. მშენებლობის 4D მოდელის შედგენის ავტომატიზაციის სქემა

შენობის მოდელირება.

CAD-სისტემები, ფართოდ გამოყენებული CAIP-ში, კონსტრუქციის ელემენტებს ასახავენ ხაზების საშუალებით, რომლებიც ელემენტის მხოლოდ

გეომეტრიას განსაზღვრავენ. BIM-სისტემა გულისხმობს სტრუქტურის თითოეული ელემენტის, როგორც პარამეტრული ობიექტის შექმნას, რომელიც გეომეტრიული ზომების გარდა უამრავ სხვა ატრიბუტს ფლობს. ამასთანავე, თითოეულმა ელემენტმა BIM-ის შემადგენლობაში „იცის“ როგორ შეეფარდება შენობის სხვა ელემენტებს და მთლიანად მთელ პროექტს. ეს უპირატესობა განსაზღვრავს BIM-ის შერჩევას მშენებლობის ობიექტის 3D-მოდელის ფორმირებისათვის.

ამ ეტაპზე იქმნება შენობის ინფორმაციული მოდელი, რომელიც თავის თავში მოიცავს 3D მოდელის და ყველა კომპონენტებისთვის იდენტიფიკაციურ პარამეტრებს (კონსტრუქციის ელემენტების). მომხმარებელმა უნდა შექმნას კომპონენტის ID იდენტიფიკაციური ნომერი შენობის ყველა კატეგორიის კომპონენტებისთვის. ID კომპონენტი ინიშნება თითოეული კომპონენტისთვის ან კომპონენტთა ჯგუფისთვის და უკავშირდება პროექტის სამუშაო კალენდარული გეგმის ID-ს. ID კომპონენტი შეიძლება გამოვიყენოთ მშენებლობის ფაზის ამ ეტაპის განსაზღვრისათვის, მას შეუძლია ასევე დაადგინოს მშენებლობის თანმიმდევრობა, როცა რამდენიმე შენობა არსებობს ან საჭიროა დიდი შენობის დაყოფა რამდენიმე მცირე ნაწილად.

შენობის აგებული 3D მოდელი ექსპორტირდება ინფორმაციული მოდელის ანალიზის პროგრამულ უზრუნველყოფაში შენობის მოდელის სხვადასხვა კომპონენტების რამდენიმე ავტომატიზებული ამოღებისთვის და კომპონენტების კატალოგის შესადგენად.

დაგეგმარება.

დაგეგმარების პროცესი თავის თავში რამდენიმე ბიჯს მოიცავს: სამუშაოთა განსაზღვრა, აუცილებელი რესურსის შეფასება, სამუშაოთა ხანგრძლიობის ანგარიში და მათი თანმიმდევრობის განსაზღვრა.

მონაცემები შენობის მოდელის სხვადასხვა კომპონენტის რაოდენობაზე ექსპორტირდება პროგრამაში ელექტრონულ ცხრილებთან მუშაობისთვის. ეს შენობის მოდელის კომპონენტების გაანალიზების საშუალებას იძლევა დეტალიზაციის სხვადასხვა დონეზე.

შენობის კომპონენტების რეორგანიზაციისთვის მონაცემთა იერარქიულ მოდელში ფორმირებულია სამუშაოთა სტრუქტურულ დეკომპოზიცია,

განსაზღვრულია დეკომპოზიციის 4 დონე, იმისთვის, რომ ავსახოთ შენობის კომპონენტებსა და მათ სამუშაოთა შორის ურთიერთკავშირი.

სამუშაოთა ავტომატური იდენტიფიკაციის, მათი ხანგრძლივობის და თანმიმდევრობის გამოთვლის მიზნით შემუშავებულ იქნა დამატებითი მაკროსი. ის საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ და მოვახდინოთ მშენებლობის პროექტის სამუშაოების ყველა სახეობის დადგენა და დავაკავშიროთ ის წარსულის ანალოგიური პროექტების ისტორიული მონაცემების სხვა ცხრილთან. ასეთი კავშირი გვეხმარება ავტომატურად დავადგინოთ რესურსი, გამოვიანგარიშოთ სამუშაოთა ხანგრძლივობა გამოთქმების (წარმადობის) ძველი ნორმების გამოყენებით და განვსაზღვროთ მათ შორის დამოკიდებულება:

$$D_i = \frac{Q_i}{R_i} \quad (2.1.)$$

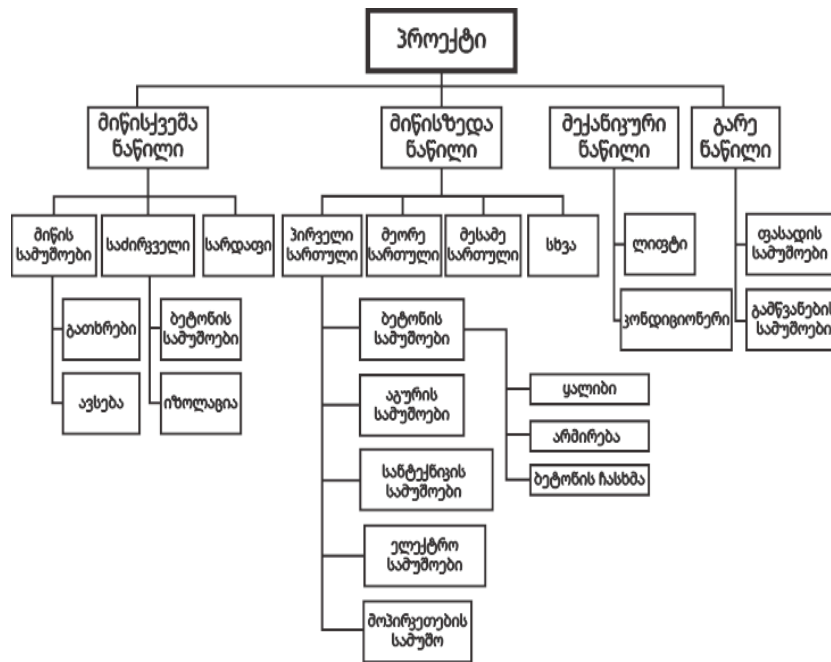
სადაც D_i – i სამუშაოს ხანგრძლივობა;

Q_i – i სამუშაოს მოცულობა;

R_i – დღე-ღამეში გამოთქმებული i სამუშაოს ნორმა.

კალენდარული გეგმის გაანგარიშება.

კალენდარული გეგმის გაანგარიშებისთვის საჭიროა შემდეგი შემავალი მონაცემები: სამუშაოთა შეკრება, სამუშაოებს შორის ურთიერთკავშირი, თითოეული სამუშაოს ხანგრძლივობა. ეს მონაცემები ექსპორტირდება პროექტების მართვის პროგრამულ უზრუნველყოფაში სამუშაოთა დაწყებისა და დასრულების თარიღის გამოსათვლელად. სამუშაოთა დაწყების და დასრულების თარიღების მიღებული მონაცემები ინახება CSV ფაილის ფორმატში (ნახ. 24.).

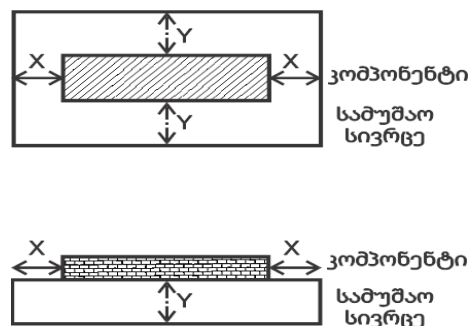


ნახ. 24. საბუშოების შემადგენელი ლეკომპოზიცია

მშენებლობის 4D მოდელის ფორმირება.

მოცემულ ეტაპზე წარმოებს 3D მოდელის კომპონენტების ავტომატური კავშირი 4D მოდელის შესაქმნელად საბუშოთა პარამეტრებთან (ნახ. 25.).

სამშენებლო საბუშოების კალენდარული გეგმა CSV ფაილის ფორმატში იმპორტირდება ვირტუალური რეალობის ფორმატში. ერთდროულად XML ფაილის ფორმატში იმპორტირდებიან მშენებლობის პროცესის ვიზუალიზაციისათვის მოდელის კომპონენტების ჯგუფების მონაცემები.



ნახ. 25. მშენებლობის 4D მოდელი

2.7. სამუშაო სივრცის 4D მოდელირება

არსებობს მოთხოვნილება პროექტების მოკლე კალენდარული გეგმების ფორმირებაში (პროექტის შესრულების დროის დაჩქარება). შესაბამისად, გენერალური შემსრულებლები იძულებულნი არიან დროის ერთეულში შესრულებული სამუშაოს მოცულობა გაზარდონ სამუშაოს შესრულებისთვის რესურსების გაზრდის ხარჯზე და სამუშაოთა დიდი რაოდენობის დაგეგმვის ხარჯზე, რომლებიც ერთდროულად სრულდება. ამასთანავე, მრავალ სამშენებლო მოედანზე არსებობს სამუშაოთა შესრულებისთვის საკმაოდ შემლუღული სივრცე. მშენებლობის ინგენიურობის გაზრდამ შეიძლება მიგვიყვანოს სამუშაო სივრცეების კონფლიქტამდე, რომელშიც ერთი სამუშაოსთვის სივრცის მოთხოვნა იკვეთება საქმიანობის სხვა სახის სივრცის მოთხოვნებთან.

სამუშაოთა კალენდარული გეგმა უშვებს სხვადასხვა სამუშაოთა პარალელურ მიმდინარეობას, მაგრამ არ იხილავს სამშენებლო წარმოების სამუშაო ზონებს, რამაც შეიძლება სამუშაო სივრცეების გადაკვეთა გამოიწვიოს. აუცილებელია წინასწარ განჭვრეტილი იყოს წარმოქმნილი პრობლემა, სამშენებლო სამუშაოთა უსაფრთხოება რომ ავამაღლოთ, დავწიოთ მომუშავეთა შორის კონფლიქტები, შევამციროთ მოცდენის დრო, გავაუმჯობესოთ სამუშაოთა ხარისხი, ასევე შევამციროთ პროექტის განხორციელების ვადიდან გადახრა.

ბოლო წლებში მკვლევარები დიდ ინტერესს იჩენენ სამუშაო სივრცეების დაგეგმვის ამოცანებისადმი. მაგრამ, მრავალი მათგანი განიხილავდნენ სამუშაო სივრცეების მოთხოვნას მხოლოდ სამუშაოთა საწყისი მონაცემების სახით და იძლეოდნენ მათ ხელით. სამუშაო სივრცეებთან ასეთი მუშაობა შეიძლება ძალიან მძიმე და რთული ამოცანა იყოს მონაცემთა მომზადების თვალსაზრისით. სხვა კვლევებში მეტი ყურადღება ექცეოდა სამუშაო სივრცეების მოდელირებას, იმისათვის, რომ სამუშაო სივრცეების განსაზღვრის პროცესი ავტომატიზებული იყოს. კვლევის კიდეც ერთ მიმართულებად იქცა სივრცითი მოთხოვნების აღრიცხვის მექანიზმის შემუშავება დაგეგმვის არსებულ მეთოდებში პროექტის ვიზუალიზაციის და მართვისთვის 4D-არეს რეალიზაციის მიზნით. მაგრამ, დამუშავებები მიმდინარეობდა გეომეტრიული ინფორმაციის საფუძველზე იმპორტირებული არა BIM არედან.

სამუშაო სივრცე წარმოადგენს ზონას, სადაც სამშენებლო სამუშაო ხორციელდება. წინამდებარე კვლევებში თავდაპირველად განხილული იყო

სამუშაო სივრცის ტიპი, რომელიც მხედველობაში იღებს ტექნოლოგიურ მონასთან დაკავშირებულ სივრცეს. შემოთავაზებული მოდელი უზრუნველყოფს მონების სხვადასხვაგვარი ტიპების გენერაციას. მოცემულ კვლევაში სამუშაო სივრცეები იყოფა შემდეგ კატეგორიებად:

1. ადამიანებისთვის: ეს მუშებისთვის აუცილებელი სამუშაო სივრცეა, იმისთვის, რომ შენობის კომპონენტები აშენონ უსაფრთხოდ და პროდუქტიულად. ასეთი სივრე საშუალებას იძლევა შემცირდეს შრომის ნაყოფიერების დანაკარგები და მინიმიზირებული იყოს უბედური შემთხვევები.
2. დანადგარებისთვის: ეს სამუშაო სივრცეა, ტექნიკური დანადგარების უსაფრთხო მანევრირებისთვის განკუთვნილი.
3. დამხმარე სივრცეები: ეს სამუშაო სივრცეა, აუცილებელი მასალების შენახვისთვის, მასალების გადაცემისა და მუშების გადაადგილებისთვის ერთი მონიდან მეორეში.
4. უსაფრთხოების ტექნიკის მონები: ეს მონებია, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს უზრუნველყოთ უსაფრთხო დაცემა ორ სამუშაო მონას შორის უბედური შემთხვევების თავიდან ასაცილებლად, ისეთის, როგორიცაა შეჯახება რესურსებს შორის და ტრავმები საგნების ვარდნისას.

სამუშაო სივრცეებს 3 განზომილება აქვთ, ამავდროულად ამ სივრცეების ზომები დროში იცვლება, ხოლო თვით სივრცე თავის ადგილმდებარეობას იცვლის. შესაბამისად, არსებობს იმის მოთხოვნა, რომ ვაკონტროლოთ ეს სამუშაო სივრცეები სამგანზომილებიან ვიზუალურ რეჟიმში და დროში, რომ განვსაზღვროთ სამუშაო სივრცეების კონფლიქტები.

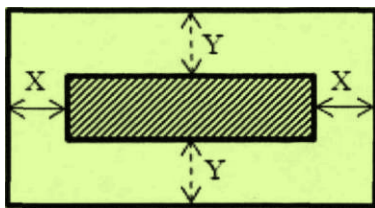
სამუშაო სივრცეების გენერაცია ორ დონედ იყოფა: სამუშაო სივრცეების ფორმირება და სამუშაო სივრცეები განაწილება. სამუშაო სივრცეების ფორმირება ეს არის სამუშაო სივრცეების ფორმების და ზომების შექმნის პროცესი. სამუშაო სივრცეების განაწილება არის სამუშაო სივრცეების ადგილმდებარეობის განსაზღვრა.

ნახ. 26.-ზე შემოთავაზებულია მოდელი სამუშაო სივრცეების 2 ფორმის გამოყენებას სამუშაო სივრცის შესაფერისი ფორმა მუშაობისთვის შეირჩევა შენობის შეკავშირებული კომპონენტების ტიპის შესაბამისად.

სამუშაო სივრცის ფორმა „1“ შემოთავაზებულია შენობის კომპონენტის ირგვლივ სამუშაო ზონის განსაზღვრისთვის, მაგალითად სვეტებისთვის. ეს ფორმა ასევე გამოიყენება სამუშაო ზონის სახით, რომელიც საჭიროა შენობის კომპონენტის ქვეშ ან ზემოთ, მაგალითად სართულშორისი გადახურვისთვის.

სამუშაო სივრცის ფორმა „2“ შემოთავაზებულია სამუშაო ზონის განსაზღვრისთვის, რომელიც საჭიროა შენობის კომპონენტის ერთ მხარეს, მაგალითად, კედლისთვის.

სამუშაო სივრცის ზონა იქმნება ამორჩეული ფორმის და მნიშვნელობებისგან X და Y დამოკიდებულებით, მომხმარებლის მიერ განსაზღვრული.

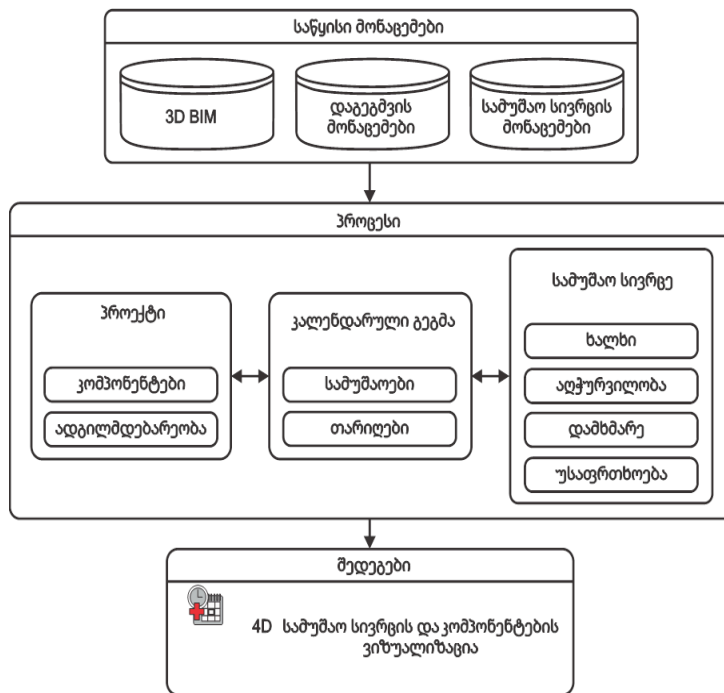


კომპონენტი
სამუშაო სივრცე

ნახ. 26. სამუშაო სივრცეების ფორმები

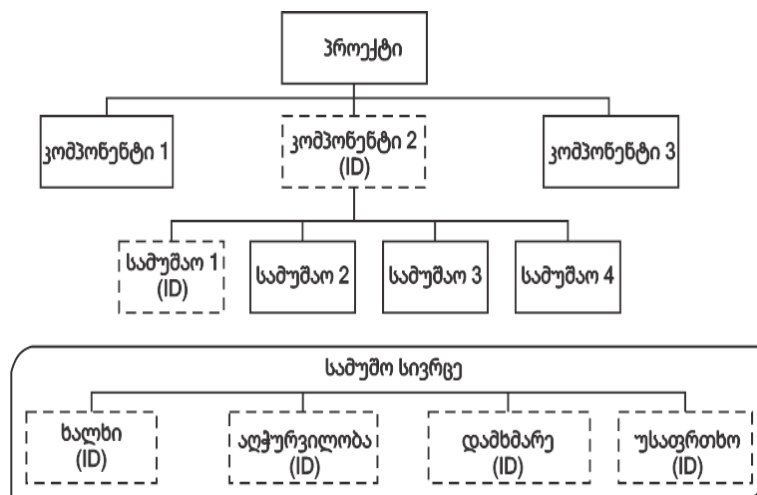
ნახ. 27.-ზე წარმოდგენილია შემოთავაზებული მოდელის სქემა. მოდელი იყენებს მონაცემებს სხვადასხვა წყაროებიდან:

- 3D მოდელი შენობის საინფორმაციო მოდელიდან BIM;
- მონაცემები დაგეგმვისთვის პროგრამული უზრუნველყოფიდან, ისეთის როგორც MS Project, Primavera და სხვ.
- მონაცემები მშენებლობის მიმდინარეობისას სამუშაო სივრცეების საჭირო ზომებზე. პროცესი იწყება რესურსების (ადამიანების, მანქანა-დანადგარების) განაწილებიდან და სამუშაო სივრცეების აუცილებელი ტიპის გამოვლენიდან თითოეული სამშენებლო სამუშაოსთვის. სამუშაო სივრცეების ზომა განისაზღვრება მომხმარებლის მიერ განსაზღვრული მნიშვნელობის გათვალისწინებით ან ასაგები კონსტრუქციის ზომით (შენობის საინფორმაციო მოდელის კომპონენტი). სამუშაო სივრცის სამგანზომილებიანი ფორმა იქმნება შემზღუდავი ჩარჩოს გამოყენებით.



ნახ. 27. სამუშაო სივრცეების მოდელირების სქემა

სამუშაო სივრცეები შენდება მუშაობასთან დაკავშირებული 3D-მოდელისა და შენობის კომპონენტების ადგილმდებარეობაზე ინფორმაციის საფუძველზე. მოთხოვნილი სამუშაო სივრცის განსაზღვრა კონკრეტული სამუშაოებისთვის მიიღწევა პროექტის ყველა 3-განზომილებიანი კომპონენტის ავტომატური სინქრონიზაციის ხარჯზე უნიკალური ID-ს (კომპონენტების იდენტიფიკატორი) დახმარებით. ეს ნიშნავს, რომ 3-განზომილებიანი კომპონენტის ID დაემთხვევა მუშაობის ID-ს და ასევე 3-განზომილებიანი სამუშაო სივრცის ID-ს (3D შემზღუდავი ჩარჩოსი), როგორც ნაჩვენებია ნახ. 28.-ზე.



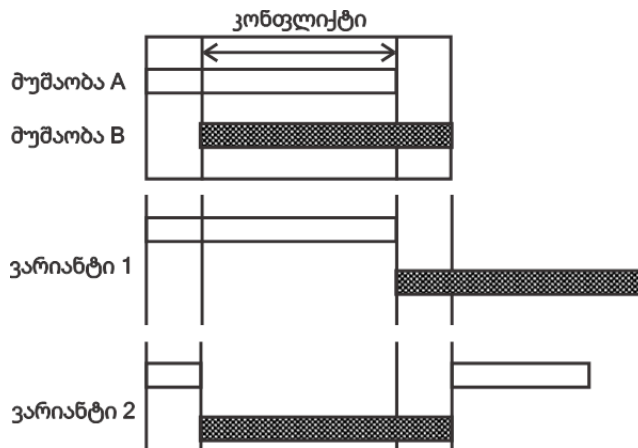
ნახ. 28. კონკურენტული სამუშაოს მოთხოვნადი სამუშაო სივრცეების

სტრუქტურა

შემოთავაზებული მოდელი არ ითვალისწინებს სხვაობას მომუშავეთა, დანადგარებისა ან მასალების სივრცეებს შორის. სამუშაო სივრცე მოცემულ კვლევაში განიხილება როგორც მუშაობისთვის აუცილებელი საერთო ფართი.

მოთხოვნების სამუშაო სივრცეებისადმი დროთა განმავლობაში იცვლება, ამიტომ შემუშავებული მეთოდის აკავშირებს შექმნილ სამუშაო სივრცეებს მშენებლობის კალენდარულ გეგმასთან, სამუშაო სივრცე 4 რეჟიმში რომ აისახოს. კალენდარული გეგმა განსაზღვრავს შენობის თითოეულ კომპონენტთან შესაბამისი თითოეული მუშაობის დაწყებას და დამთავრებას. 4D ანიმაცია აჩვენებს შენობის რომელი კომპონენტი შენდება დროის მოცემულ მომენტში, შესაბამისად, როგორი სამუშაო სივრცეებია აქტიური. სამუშაოთა პარალელურად მიმდინარეობისას სამუშაო სივრცეების „კონფლიქტი“ შეიძლება განვსაზღვროთ ვიზუალურად 4D გრაფიკზე. შესაძლებელია გადამკვეთი სივრცეების ავტომატური გამოყოფა ფერით.

იმისათვის, რომ შევამციროთ ან ავირიდოთ კონფლიქტი პარალელურ სამუშაოებს შორის, შეიძლება შემოთავაზებული იქნას სტრატეგიები. პირველ როგში უნდა განვიხილოთ სამუშაოები კრიტიკულ გზაზე და მათი სამუშაო სივრცეები. იმისათვის, რომ წინააღმდეგობაში არ ვიყვეთ სხვა სამუშაოებთან. თუ ეს შეუძლებელია, მაშინ საჭიროა მშენებლობის სხვა მეთოდი გამოვიყენოთ (ვარიანტი). არაკრიტიკული სამუშაოებისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ მათი სათადარიგო დრო სამუშაოების უფრო გვიან დროზე გადასატანად ან სამუშაოს შეწყვეტა (ნახ. 29.).



ნახ. 29. კონფლიქტის გადაწყვეტა

2.8. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია

პირველად შეძენილი კალენდარული გეგმა, რომელმაც შეიძლება არ უზრუნველყოს სამუშაოს ოპტიმალური დაწყება ან დასრულება. ამას გარდა, დამკვეთები მიისწრაფიან მაქსიმალურად შეამცირონ პროექტის ღირებულება და მისი ხანგრძლივობა ფინანსირების შემცირების მიზნით და შემოსავლების გასაზრდელად. მონაწილეებისთვის ხარჯების მინიმიზაცია ასევე მრდის ნამატს, ხოლო პროექტის ადრეულად დასრულება ამცირებს ინფლაციის რისკსა და მუშების არასაკმარისობას. პროექტის გენგეგმამ რა თქმა უნდა, უნდა გაითვალისწინოს ღრისა და ღირებულების ოპტიმიზაცია ერთდროულად.

სამუშაოს შეიძლება ჰქონდეს შესრულების რეჟიმების სხვადასხვა ალტერნატივა, რომლებსაც შეუძლიათ ჩაირთონ შესაძლო კომბინაციები ადამიანების, დანადგარების, მეთოდებისა და ტექნოლოგიების რიცხოვნების. სამუშაოს თითოეული სახეობისათვის ხერხის შერჩევა განსაზღვრავს ღრისა და დანახარჯებს ამ მუშაობის განხორციელებაზე და მოქმედებს პროექტის საერთო ხანგრძლივობასა და ღირებულებაზე. სამუშაოების შესრულების სხვადასხვა შესაძლო ხერხების კომბინაცია წარმოქმნის პროექტის მრავალ ალტერნატიულ გეგმებს თავისი ხანგრძლივობითა და ღირებულებებით. სამშენებლო სამუშაოების შესრულების საუკეთესო სტრატეგიის განსაზღვრა პრობლემური ხდება. პროექტის ამ ალტერნატიული გეგმების ნაკრები რთული ხდება, რამდენადაც პროექტის სამუშაოთა რიცხვის გაზრდით ალტერნატივების რიცხვი ექსპონენციალურად

იზრდება. მაგალითად, პროექტის შესაძლო ალგერნატიული გეგმების რიცხვის, რომელიც მხოლოდ 10 სამუშაოსგან და მხოლოდ მშენებლობის ორი ხერხისაგან შედგება, შეიძლება 1024 მიაღწიოს.

ამ პრობლემის გადასაწყვეტად ლიგერატურის მიმოხილვაში შემოთავაზებული იყო ოპტიმიზაციის მრავალი მეთოდი, მაგალითად, ევრისტიკული მეთოდი, მათემატიკური პროგრამირების მეთოდები, ევოლუციური ალგორითმები, მათ შორის გენეტიკური ალგორითმი.

ორიგინალური გენეტიკური ალგორითმი GA, ჯონ ჰოლანდის შექმნილი, საკმაოდ მარტივია პროგრამული რეალიზაციისთვის, მაგრამ დროში დანახარჯიანი. მრავალი თანამედროვე გენეტიკური ალგორითმების პროგრამაა, რომლებიც ხსნიან მრავალ დიდ და რთულ ამოცანებს, იყენებენ ორიგინალური გენეტიკური ალგორითმის მოდიფიცირებულ ვერსიებს. მშენებლობის მართვის პრობლემების გადასაწყვეტად შეიძლება გენეტიკური ალგორითმებიც ასევე წარმატებით გამოვიყენოთ.

ალგორითმი GA უფრო მოქნილია, ვიდრე სხვა ოპტიმიზაციის არაწრფივი მეთოდი. არ არსებობს რაიმე განსაზღვრული მათემატიკური შეზღუდვა შეთავსებადობის ფუნქციის თვისებებზე. ის შეიძლება იყოს დისკრეტული, მულტიმოდალური და სხვ. გენეტიკურ ალგორითმებში ქრომოსომები ერთმანეთს შორის ცვლიან ინფორმაციას და მთელი პოპულაცია გადაინაცვლებს ოპტიმალური გადაწყვეტის მიმართულებით. რამდენადაც GA იცავს შესაძლო გადაწყვეტების პოპულაციას, მას დიდი შანსი აქვს გლობალური ოპტიუმის მოძებნაზე სხვა მეთოდებთან შედარებით. ამგვარად მოცემული კვლევის მიზნისთვის ოპტიმიზაციის შერჩეულ მეთოდთა GA გვევლინება.

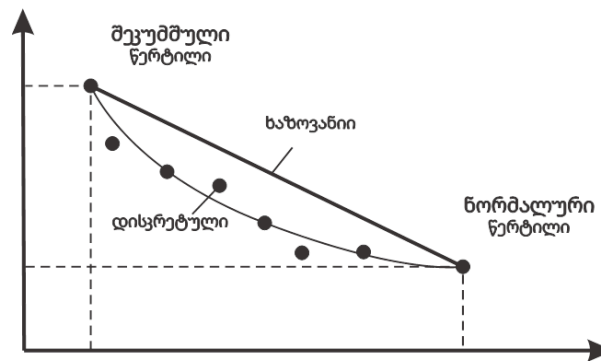
ზოგიერთი კვლევა პროექტის გეგმების ოპტიმიზაციისთვის პრობლემის გადაწყვეტას ცდილობდა ან მხოლოდ დროის მინიმიზაციით, ან მხოლოდ ღირებულების. სხვა კვლევები დროისა და ღირებულების მრავალკრიტერიულ პრობლემას ერთდროულად განიხილავდნენ.

პირველი კვლევები თვლიდნენ, რომ სამუშაოთა ღირებულებები (პირდაპირი ამონარიდები) სამუშაოთა ხანგრძლივობის წრფივ ფუნქციას წარმოადგენს ნახ. 30. ქვედა ნორმალური ხანგრძლივობით, ხოლო ზედა კრიტიკული ხანგრძლივობით შემოსაზღვრული. ბოლო წლების განმავლობაში

შესწავლილი იყო სამუშაოთა ღირებულების ფუნქციის სხვა ფორმები, მაგალითად, მრუდხაზოვანი, უწყვეტი და დისკრეტული.

რამდენადაც დისკრეტული თანაფარდობა სამუშაოს შესრულების დროსა და მის ღირებულებას შორის რეალური პროექტისთვის წარმოადგენს შედარებით წარმოსახვით ვერსიას, მშენებლობის გეგმის ოპტიმიზაციის პრობლემა დისკრეტული თანაფარდობით შედარებით პრაქტიკულ ვერსიას წარმოადგენს. ამგვარად, მოცემული კვლევა კონცენტრირდება დისკრეტულ ვერსიაზე.

სამუშაოს ღირებულება



სამუშაოს ხანგრძლივობა

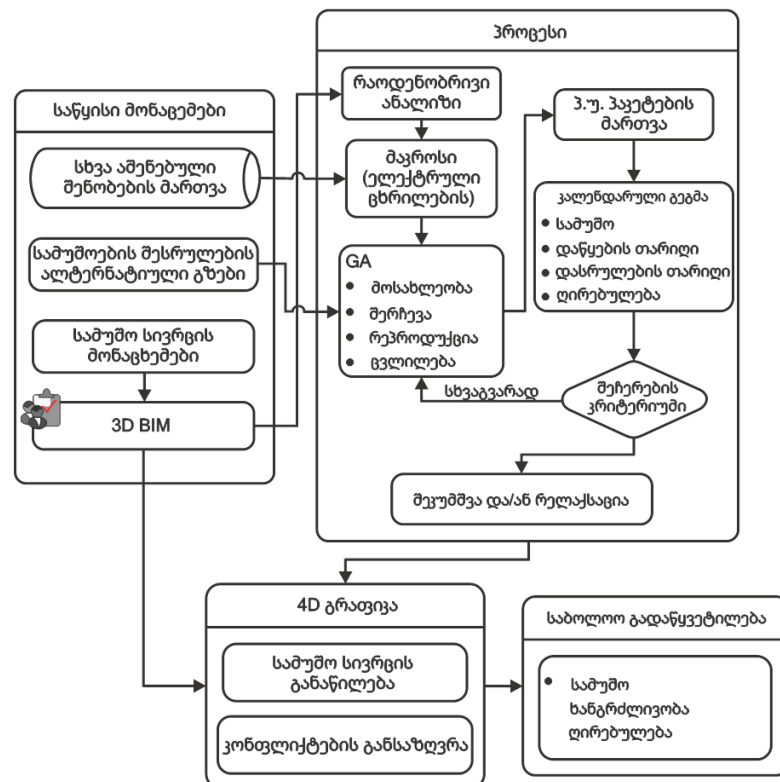
ნახ. 30. ღირებულების დამოკიდებულება სამუშაოს ხანგრძლივობაზე

მშენებლობის გეგმის ოპტიმიზაციის მოდელების გამოყენების ამოცანის სირთულის გამო, ლიგერატურაში ძირითადად შემოიფარგლებიან მცირე დემონსტრაციული მაგალითებით სამუშაოთა მცირე რაოდენობით, მნიშვნელოვნად მცირეთი, ვიდრე რეალურ სამშენებლო პროექტებში არსებობს.

ამ კვლევაში პროექტის ღირებულების და დროის ანალიზისთვის, იმისათვის რომ მისი გეგმის ოპტიმიზირება მოვახდინოთ, შემოთავაზებულია გამოვიყენოთ შენობის საინფორმაციო მოდელში BIM შენახული მონაცემები და გენეტიკური ალგორითმები GA პროექტის მართვის პროგრამულ უზრუნველყოფასთან ღინამიკური ინტეგრაციით.

შემოთავაზებული მოდელის სქემა წარმოდგენილია ნახ. 31.-ზე. ამ მოდელში არსებობს აუცილებელი მონაცემების წარმოდგენისთვის ორი შესაძლებლობა. ერთ-ერთი შესაძლებლობიდან BIM-ის 3D მოდელის გამოყენებაა. ყველა აუცილებელი გეგმიური მონაცემები გადაცემული იქნება სამუშაოს პროგრამაში ელექტრონული ცხილებით, შემდეგ კი - ოპტიმიზაციის ალგორითმში.

უნდა აღვნიშნოთ, რომ პროექტის თითოეული ხანგრძლივობისთვის საერთო ღირებულება ირიბი და პირდაპირი დანახარჯების ჯამია. ამოცანის ამოხსნაში ცვლადების სამუშაოს თითოეული სახეობისთვის მშენებლობის რეჟიმები წარმოადგენს (აღტერნატიული). ოპტიმიზაციის პროცესში თითოეული სამუშაოსათვის მიზნობრივი ფუნქციისა და შეზღუდვების დაკმაყოფილების მიზნით შერჩეული იქნება ერთი საუკეთესო რეჟიმი.



მეთოდულაში შემოთავაზებულია 3 შესაძლო მიზნობრივი ფუნქცია. პირველი მიზნობრივი ფუნქცია იყენებს მცნებას „ბოლო ვადა“ (პროექტის შესასრულებლად გახანგრძლივების მოთხოვნა), ე.ი. არსებობს შეზღუდვა პროექტის

გახანგრძლივებაზე, ხოლო მოდელი ცდილობს მოახდინოს შესაბამისი ღირებულების მინიმიზირება.

მეორე მიზნობრივი ფუნქცია იყენებს ბიუჯეტის მცნებას (პროექტის მინიმალური ღირებულება). მოდელი ცდილობს მინიმუმამდე დაიყვანოს ღირებულება და მისი შესაბამისი მინიმალური ხანგრძლივობა.

მესამე მიზნობრივი ფუნქცია იყენებს მცნებას „შეკუმშვა“ (მინიმალური ხანგრძლივობა), ე.ი. არსებობს აუცილებლობა პროექტის შესრულების დროის შემცირების მის მინიმალურ დონემდე, ხოლო მოდელი ცდილობს შეამციროს შესაბამისი ღირებულება.

შეზღუდვები მეთოდულად განსაზღვრავს ყველა თანაფარდობას სამუშაოებს შორის და ზღუდავს საერთო ხანგრძლივობას ან პროექტის ღირებულებას მოთხოვნების შესაბამისად.

მეთოდულა აგებს თანაფარდობებს მიზნობრივ ფუნქციას, შეზღუდვებს, ცვლად გადაწყვეტებსა და ცნობილ მონაცემებს შორის. ოპტიმიზაციის ამოცანა განსაზღვრავს ცვლადების სიდიდეებს, რომლებიც ამინიმიზირებენ მიზნობრივ ფუნქციას შეზღუდვების დაკმაყოფილებისას.

იმის მიუხედავად, რომ არსებობს კავშირების ოთხი ტიპი სამუშაოთა შორის (დასრულება-დაწყება; დაწყება-დაწყება; დასრულება-დასრულება; დაწყება-დასრულება), უმეტესობა ცნობილი მოდელებიდან განიხილავდა მხოლოდ კავშირს „დასრულება-დაწყება“. ზოგიერთი კვლევა ცდილობდა კავშირების მეტი რაოდენობის გათვალისწინებას, მაგრამ ისინი იხილავენ მხოლოდ ღირებულება-დრო უწყვეტ თანაფარდობას [38, 57].

მოცემულ კვლევაში შემუშავებულია დრკადი მეთოდულა, რომელიც განიხილავს კავშირს ყველა ოთხ ტიპს სამუშაოებისა და დამატებით ლაგს (გადათხრა) და დროის გადაფარვას შორის. იმისათვის, რომ GA ეფექტიანად გამოვიყენოთ, აუცილებელია შევიშუშოთ მოხერხებული სქემა პრობლემის წარმოსადგენად (კოდირება), გავაკეთოთ არჩევანი შესაბამისი გენეტიკური ოპერატორების (შერჩევა, კროსოვერი, მუტაცია) და მათი პარამეტრების აწყობა.

ზოგიერთი კვლევა, ლიტერატურაში განხილული ფოკუსირდებოდა, იმაზე, თუ როგორ შეგვერჩია გენეტიკური ოპერატორები და მათი პარამეტრები, რომელთაც შეუძლიათ გავლენა მოახდინოს ალგორითმის შედეგზე გამოვლენილი

იყო, რომ კოდირების გამოყენება პრობლემის წარმოსაჩენად რისკების საგნობრივი მნიშვნელობებით უკეთეს გადაწყვეტას იძლევა. პოპულაციის დაწყებითი რისკებისთვის სხვადასხვა ცდებში (გაანგარიშებებში) რეკომენდირებულია სხვადასხვა რისკის გამოყენება. შემჩნეულია, რომ წრფივი რანჟირება - საუკეთესო ფუნქციაა შეგუებადობის ფუნქციისთვის (Fitness Function). სელექციის მეთოდისთვის რეკომენდირებულია გურნირის ფუნქციის ან რულეტის ბორბლის გამოყენება. კროსოვერისთვის რეკომენდირებულია ერთწერტილიანი ზეგაცია.

როცა ამოცანა ოპტიმიზაცია იწყებს ზეგაცობის რეჟიმის შემთხვევითი კომბინაციების ფორმირებას, პირველდაწყებითი გადაწყვეტები შეიძლება განუხორციელებელი იყოს. მაგალითად, პროექტის ხანგრძლივობა შეიძლება მეტი აღმოჩნდეს, ვიდრე პროექტის შესრულების უკიდურესი ვადა. ოპტიმიზაციის პროცედურა ბევრ დროს ხარჯავს, იმისათვის რომ მოძებნოს განხორციელებადი გადაწყვეტა, ხოლო შემდეგ მის გაუმჯობესებას იწყებს. იმისათვის, რომ ავირიდოთ მონაცემთა დამუშავების დაწყებითი დრო, ცვლადი გადაწყვეტები ოპტიმიზაციის პროცესის დაწყებისთვის უკვე გადაწყვეტების დაშვების გათვალისწინებით იცვლება. როცა პოპულაცია ინიციალიზირდება, მეთოდის იწყებს სამუშაოს შედარებით შემჭიდროებულ რეჟიმთან მიახლოებულ მნიშვნელობათა საწყისი სიდიდეების შემთხვევით ამორჩევას.

ამას გარდა, მეთოდის სამუშაოს არ გვაძლევს ვაწარმოთ ან დავამატოთ ორი ან მეტი ერთგვაროვანი ქრომოსომი პოპულაციაში. ეს თავისებურება პროგრამას აიძულებს ოპტიმალურ გადაწყვეტას მივაღწიოთ სწრაფად პოპულაციაში სხვადასხვაგვარობის შენარჩუნების გზით. მეორეს მხრივ, როდესაც პროგრამა გადაწყვეტას ემთხვევა, ის აწარმოებს ძალიან მსგავს ქრომოსომებს, რაც ერთნაირი ქრომოსომების შექმნასა და ლოკალურ ოპტიმუმში ჩავარდნის ალბათობას ზრდის. რამდენადაც ალგორითმი ერთნაირი ქრომოსომების არსებობას არ უშვებს, პროგრამა ორი ერთნაირი ქრომოსომის გენს არასოდეს არ შეცვლის, ეს კი გაუმჯობესებს მოდელის ეფექტიანობას.

უმეტესობა არსებული GA-ს მეთოდები გამრავლების ეტაპზე შემდგომი სახით ზეგაცობენ: მშობლების შერჩევა, კროსოვერის მიღება შთამომავლობის შესაქმნელად, ახალი შთამომავლობის მისაღებად კროსოვერებიდან მიღებულ

შთამომავლებთან მუტაციის გამოყენება. ზოგიერთი მოდელი მშობლების შერჩევის შემდეგ თავისი შთამომავლობის შესაქმნელად კროსოვერ ან მუტაციას იყენებს. არსებობს შეხედულება, რომ კროსოვერიდან და მუტაციიდან ერთდროულად მიღებული შთამომავლები უკეთესია, ვიდრე ისინი რომლებიც მიიღებიან მხოლოდ ან კროსოვერიდან ან მუტაციიდან შემოთავაზებული მეთოდის მხედველობაში იღებს ყველა ამ შესაძლებლობას. ალგორითმიც ასევე ერთნაირ ქრომოსომებს ინფორმაციის გაცემის საშუალებას არ აძლევს.

ამის გარდა, მეთოდის გვთავაზობს ალგორითმის გაუმჯობესებას, იმის გარანტიისთვის, რომ შთამომავლობა განხორციელებად გადაწყვეტებს ეკუთვნოდს. ეს მიმდინარეობს შთამომავლობაში მოთხოვნად ღრისა და მიღებულ ღრის შორის სხვაობის გაანგარიშების გზით და ამ სხვაობის შემდგომი განაწილებით კრიტიკული ღრის მუშაობაზე.

პროექტის გეგმის ოპტიმიზაცია დაკავშირებულია პროექტის ვადისა და ღირებულებების შესაბამისობაში მოყვანით მოთხოვნადთან (კონტრაქტორებთან, სახელმძღვანელო ან სხვ.). შემოთავაზებული მეთოდის ოპტიმიზაციის 3 სცენარს წარმოადგენს:

1. პროექტის მოთხოვნადი ხანგრძლივობის მიღწევა;
2. პროექტის ღირებულების მინიმიზაცია;
3. პროექტის ხანგრძლივობის მინიმიზაცია.

მეთოდის იყენებს საწყის ეტაპზე გენეტიკურ ალგორითმს გლობალური ოპტიუმის ირგვლივ ძიების სივრცის ეფექტიან შევიწროებისთვის, ხოლო შემდეგ იღებს უკეთეს ინდივიდუალებს, იმისათვის, რომ გამოიყენოს შეკუმშვის ან შესუსტების (ან მოღუნების) მეთოდის.

2.9. სამშენებლო პროექტის ხანგრძლივობის დადგენა

წარმოდგენილია სამუშაოს თითოეული სახეობისთვის ხანგრძლივობა/ღირებულება ურთიერთდაკავშირებულ მნიშვნელობათა ნაკრები (შესრულების რეჟიმების კრებული) და პროექტის მოთხოვნადი ხანგრძლივობა. თითოეული სამუშაოსათვის ინიშნება ერთ-ერთი მისი შესაძლო რეჟიმიდან იმგვარად, რომ პროექტის საერთო ღირებულება მინიმიზირებული იყოს (ნახ. 32.).

მიზნობრივი ფუნქცია წარმოდგენილია შემდეგ სახით:

$$\text{მინიმიზაცია } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} * K_{ij} + I * D + P * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} * K_{ij} \quad (2.2.)$$

$$\text{შეზღუდვისას } O < T \quad (2.3.)$$

სადაც, n – სამუშაოთა რიცხვი პროექტში;

m_i სამუშაოთა ალტერნატივების რიცხვი;

C_{ij} – პირდაპირი ხარჯები სამუშაოზე, როცა ალტერნატივა ირჩევა;

K_{ij} – მუშაობის ბინარული ცვლადი, როცა y ალტერნატივა ირჩევა, მაშინ 1-ის ტოლია, სხვაგვარად K_{ij} ტოლია 0;

/ – პროექტზე დროის ერთეულში ირიბი ხარჯები;

E – პროექტის შესრულების დრო;

T – პროექტისთვის საჭირო დრო;

P – ხარჯების ირიბი პროცენტი.

საერთო ღირებულების მინიმიზაციისას, თითოეულ სამუშაოს დანიშნული უნდა ჰქონდეს უნიკალური რეჟიმი (ალტერნატივა), პროექტის ზღვრული დრო დაცული უნდა იყოს და არ უნდა დაირღვეს წინარე შეზღუდვა. შეზღუდვები წარმოდგენილი ინდა იყოს შემდეგი სახით:

$$\text{კავშირი (დასრულება-დაწყება)} S_B \geq S_A + D_{AJ} + L_{AB} \text{ ტიპის} \quad (2.4.)$$

$$\text{კავშირი (დაწყება-დაწყება)} S_B \geq S_A + L_{AB} \text{ ტიპის} \quad (2.5.)$$

$$\text{კავშირი (დასრულება-დასრულება)} S_B + D_{BJ} \geq S_A + D_{AJ} + L_{AB} \text{ ტიპის} \quad (2.6.)$$

$$\text{კავშირი (დაწყება-დასრულება) ტიპის } S_B + D_{BJ} \geq S_A + L_{AB} \quad (2.7.)$$

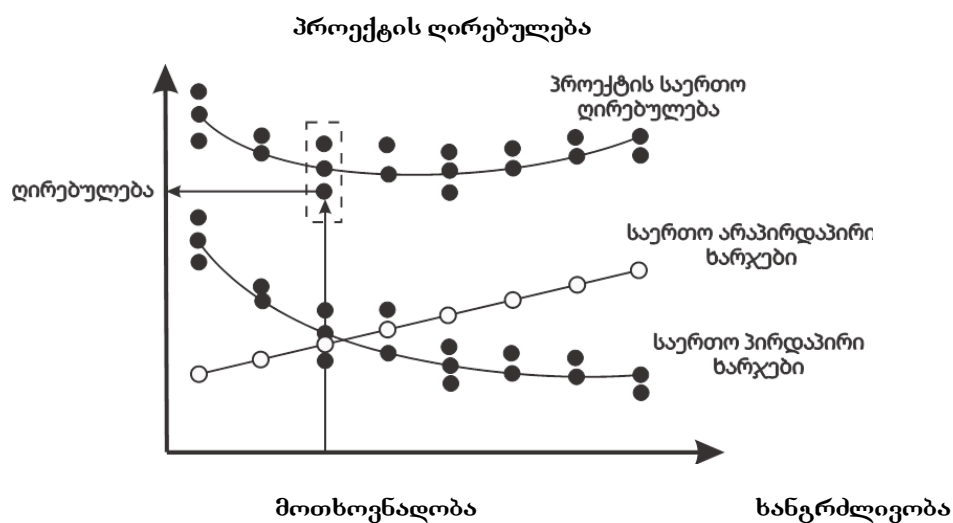
სადაც, S_B – B მუშაობის დაწყების დრო;

S_A – A მუშაობის დაწყების დრო;

D_{AJ} – A მუშაობის ხანგრძლივობა, როცა შეირჩევა ალტერნატივა;

D_{Bj} – B მუშაობის ხანგრძლივობა, როცა შეირჩევა i ალტერნატივა;

L_{AB} – შეზერება ან ზედღება A და B მუშაობათა შორის.

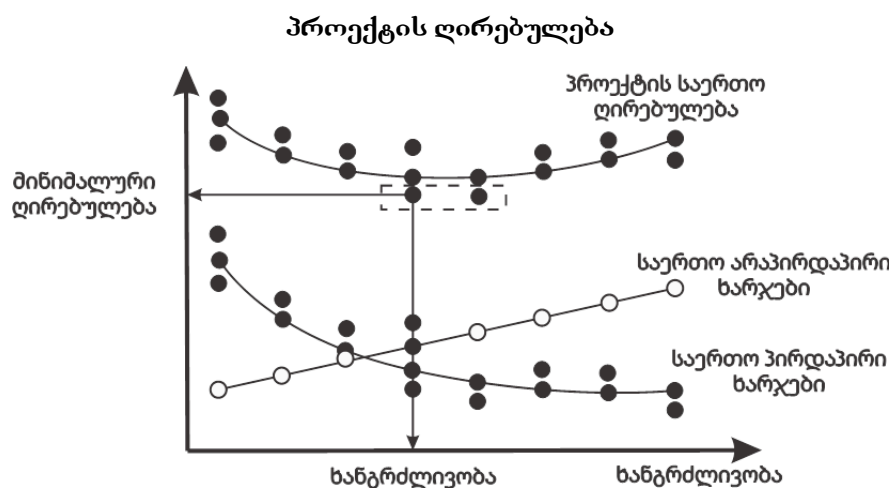


ნახ. 32. პროექტის მოთხოვნადი სანგრძლივობა

2.10. პროექტის ღირებულების მინიმიზაცია

თითოეული სამუშაო ინიშნება მისი შესაძლო რეჟიმებიდან ერთ-ერთზე ისეთი სახით, რომ მოხდეს პროექტის საერთო ღირებულების მინიმიზაცია მის მინიმალურ მნიშვნელობამდე და მოიძებნოს მისი შესაბამისი მინიმალური სანგრძლივობა (ნახ. 33.).

მიზნობრივი ფუნქცია განისაზღვრება (2.2) განტოლების შესაბამისად. წინამდებარეს შემთხვევა არ უნდა იყოს დარღვეული. შემთხვევები განისაზღვრება (2.4), (2.5), (2.6) და (2.7) განტოლებების შესაბამისად.



ნახ. 33. პროექტის მინიმალური ღირებულება

2.11. პროექტის ხანგრძლივობის მინიმიზაცია

თითოეულ სამუშაოს ენიშნება მისი შესაძლო ერთ-ერთი რეჟიმი, ისე, რომ პროექტის საერთო ხანგრძლივობის მინიმიზაცია მოხდეს მის მინიმალურ მნიშვნელობამდე და მოვებნით მისი შესაბამისი მინიმალური ღირებულება (ნახ. 34.).

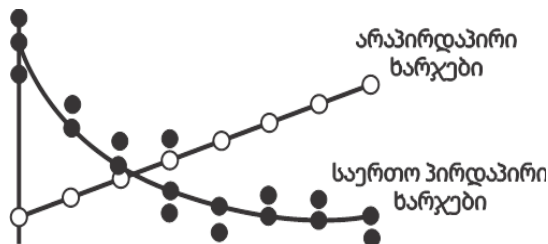
მიზნობრივი ფუნქცია წარმოდგენილია შემდეგნაირად:

$$\text{მინიმიზაცია } \sum_{i=1}^{zx} D_i \quad (2.8)$$

სადაც, x – სამუშაოების რაოდენობა კრიტიკულ გზაზე;

D_i – კრიტიკული მუშაობის i ანგრძლივობა.

წინარეს შემოღებები არ უნდა იყოს დარღვეული. ისინი ასევე განისაზღვრება განტოლებათა (2.4), (2.5), (2.6) და (2.7) შესაბამისად.



ნახ. 34. პროექტის მინიმალური ხანგრძლივობა

2.12. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია გენეტიკური ალგორითმების ბაზაზე

დაწერილებით აღწერილია პროექტის გეგმის ოპტიმიზაციის შემოთავაზებული მეთოდიკა გენეტიკური ალგორითმის გამოყენებით, ჩამოთვლილია მიზნის მისაღწევად გამოყენებული პროცესები.

კოდირება.

გენეტიკური ალგორითმის გამოყენებით ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა თავდაპირველად შევარჩიოთ ამოცანის პარამეტრების მნიშვნელობათა კოდირებისათვის შესაფერისი სტრუქტურა. რადგანაც ლიტერატურაში წარმოდგენილია, რომ ნივთიერებათა რიცხვებით კოდირების

გამოყენება უკეთეს გადაწყვეტას გვაძლევს, შემოთავაზებული მეთოდის კოდირების ამ ხერხს ეყრდნობა.

თითოეული ინდივიდუალური გადაწყვეტა ბჭარის სახით სახელით ქრომოსომა. ქრომოსომა – გენების მოწესრიგებული თანმიმდევრობაა მათში კოდირებული ამოცანის პირობებისგან (ძეზნის სივრცეში წერტილების რაოდენობაზე). მოცემულ კვლევაში ქრომოსომის სიგრძე დამოკიდებულია პროექტში სამუშაოთა რაოდენობაზე, ხოლო ქრომოსომის თითოეული გენი შეიცავს ერთ სამუშაოს და მისი ატრიბუტების ერთ ვარიანტს. ცხრ. 10.-ზე გამოსახულია კოდირების მეთოდი.

ცხრილი 10.

ქრომოსომის სტრუქტურა

A1	B3	C1	D4	E2
A 1				

• პოპულაცია

GA-ს მუშაობის პირველ ეტაპზე დაწყებითი პოპულაცია უნდა ფორმირირდეს შემთხვევით ინდივიდუალებზე (ქრომოსომა), რომელიც შესასწავლი პრობლემის ზოგიერთ შესაძლო გადაწყვეტას წარმოადგენს (არაოპტიმალურის).

ინდივიდუალები ინახებიან ფიქსირებული ზომის მასივში, რომელსაც განისაზღვრება პოპულაციის ზომით (ცხრ. 11.). ეს ზომა წარმოადგენს შემსვლელ პარამეტრს, რომელიც შეიძლება შეიცვალოს. ექსპერიმენტის შემდეგ პოპულაციის სხვადასხვა ზომებიანი, შესაფერისი აღმოჩნდა 100. ეს მასივი ზრდის მიხედვით ისეთი სახით ხარისხდება, რომ ინდივიდუალური მინიმალური ღირებულებით/ხანგრძლივობით პირველ ადგილზე დგება. ეს ძალიან სასარგებლოა ძეზნის გეჟნიკისთვის, იმისათვის, რომ ვიპოვოთ ინდივიდუალების კარგი გადაწყვეტის დიაპაზონი შემდეგი კვლევისთვის.

თითოეული შექმნილი ინდივიდუალისთვის მეთოდის შემოწმებას აწარმოებს. თუ პოპულაციაში ერთნაირი ინდივიდუალია, მაშინ ახალი

ინდივიდუალი შემთხვევითი სახით გადაფორმდება, გადაწყვეტის სხვადასხვაგვარობის შესანარჩუნებლად.

თითოეული გადაწყვეტისთვის წარმოებს შემოწმება განხორციელებადობაზე (დაშვება). თუ გადაწყვეტისთვის პროექტის მიღებული ხანგრძლივობა მეტია, ვიდრე მისი საბოლოო ვადა, მაშინ სამუშაოთა დაწყებითი სიდიდის სახით ალგორითმი იწყებს შემთხვევითი სახით ზოგიერთი დაჩქარებული რეჟიმის კრიტიკულ სამუშაოებს. ალგორითმის შედეგებით საწყისი პოპულაცია უნდა შეიცავდეს მხოლოდ განხორციელებად გადაწყვეტებს. ამგვარად, დროის ხარჯი ოპტიმალური გადაწყვეტის ძებნაზე შემცირებული იქნება.

ცხრილი 11.

პოპულაციის შექმნა

ქრომოსომა 1	A1	B3	C1	D3	E2
ქრომოსომა 2	A2	B2	C1	D4	E1
ქრომოსომა 3	A1	B1	C1	D1	E3
ქრომოსომა. 100					

• შეგუებადობის ფუნქცია

თითოეული ქრომოსომისთვის განსაზღვრული უნდა იყოს შესაბამისი გადაწყვეტის მნიშვნელობა (ხარისხი). ასეთ მნიშვნელობას მოცემული ქრომოსომის (ინდივიდუალის) შეგუებადობა ეწოდება. შეგუებადობა მნიშვნელოვან როლს თამაშობს, იმიტომ, რომ სახელდობრ ის გვეხმარება შეფასებაში, თუ კონკრეტული ინდივიდუალი პოპულაციაში რამდენად ვარგისია ამოცანის შემდგომი გადაწყვეტისათვის. შეგუებადობაზე დამოკიდებული შრის ალბათობა, მოხდება თუ არა მოცემული ინდივიდუალი წყვილში შეჯვარებისთვის. ალგორითმის თითოეული იტერაციისთვის თითოეული ინდივიდუალის შეგუებადობა გადის შეგუებადობის ფუნქციის შეფასებას.

თითოეული ინდივიდუალის შეგუებადობა პოპულაციაში გამოითვლება ალგორითმში პროექტის საერთო ღირებულების ინვერსიის დახმარებით მიზნობრივი ფუნქციის გამოყენებით. ინვერსიის გამოყენება უფრო მეტად ეფექტური აღმოჩნდა.

- **ინდივიდუალების შერჩევა**

შერჩევა ქრომოსომის (მშობლების) ამორჩევას ნიშნავს კროსოვერის ან მუტაციის შესასრულებლად. ის შეგუებადობის ფუნქციით გამოთვლილი იმ ქრომოსომების ამორჩევაში მდგომარეობს, რომლებიც მონაწილეობას მიიღებენ მომდევნო თაობის შთამომავლობის შექმნაში. ამგვარი ამორჩევა წარმოებს ბუნებრივი შერჩევის პრინციპების თანახმად, რომლის მიხედვითაც ინდივიდუალებს შეგუებადობის უდიდესი მნიშვნელობით გამრავლებაზე მეტი შანსი აქვთ.

გამრავლების შესაძლებლობის მისაღებად ნაკლებად შეგუებადი ინდივიდუალებისთვის შემუშავებულ ალგორითმში გამოიყენება ორი მეთოდი: რულეტის მეთოდი და რანჟირების მეთოდი.

პროპორციული ამორჩევის ძირითადი უპირატესობა რულეტის მეთოდის გამოყენებით იმაში მდგომარეობს, რომ ის საშუალებას აძლევს პოპულაციაში ყველა ინდივიდუალს მოხვდეს ამორჩევაში, რომლის ალბათობა მათ შეგუებადობაზეა დამოკიდებული. ამგვარად, პოპულაციის ნაირგვარობა ინახება. ამ მეთოდის ნაკლს წარმოადგენს ლოკალურ ოპტიუმში გადაწყვეტის ნაადრევის კრებადობის რისკი დომინირებადი ინდივიდუალის შესაძლო არსებობის გამო, რომელიც ხშირად იმარჯვებს კონკურსში და შერჩევა როგორც მშობელი.

ამ ნაკლის თავიდან ასაცილებლად გამოიყენება ინდივიდუალების რანჟირების მეთოდი მათი მიზნობრივი ფუნქციისაგან დამოკიდებულებით, რომლის დროსაც ინდივიდუალები მინიმალური ღირებულებით/ ხანგრძლივობით პირველ ადგილზე გადიან. საუკეთესო ინდივიდუალებს მიეზღვებათ რანგი 1 და მათ გამრავლებაში არ იყენებენ. დარჩენილი ინდივიდუალებიდან ადგენენ ჯგუფს ალგორითმში შემდგომი გამოყენებისთვის.

შემდეგ ჯგუფზე მშობლების შერჩევისთვის და კროსოვერის ან მუტაციის შესასრულებლად გამოიყენება რულეტის მეთოდი. რულეტის ბორბალი შეიცავს პოპულაციის თითოეული წევრისთვის თითო-თითო სექტორს. i -ული სექტორის ზომა დგინდება მოცემული ქრომოსომის შეგუებადობის ფუნქციის მნიშვნელობისადმი პროპორციულად (ნახ. 35.).

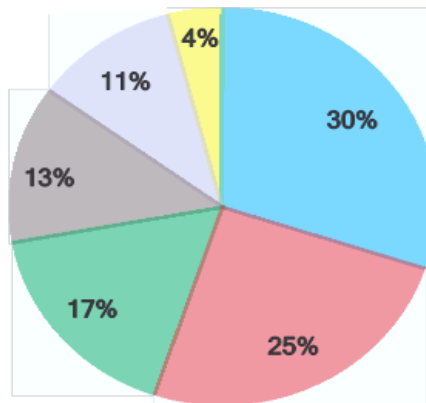
თითოეული ქრომოსომის $p(1)$ ამორჩევის ალბათობა შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} * 100\% \quad (2.9.)$$

სადაც, n – პოპულაციაში ინდივიდუალების რიცხვია

f_i – ქრომოსომის (i) შეგუებადობის ფუნქციის მნიშვნელობა.

შემდეგ შემთხვევითი რიცხვი გენერირდება. ქრომოსომა, რომლის სექტორში ეს რიცხვი შედის, შერჩეულად ითვლება.

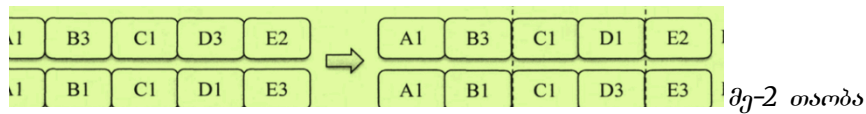


ნახ. 35. რულების ბორბლის ტიპის შერჩევის ოპერატორი

- **კროსოვერი.**

თაობიდან თაობაში, ინდივიდუალების კარგი მახასიათებელი მთელ პოპულაციაზე უნდა გავრცელდეს. შედარებით მეტად შეგუებული ინდივიდუალების შეჯვარებას იმასთან მივყავართ, რომ გამოიკვლევა ძიების სივრცის მეტად პერსპექტიული უბნები. საბოლოო ჯამში, პოპულაცია შეიკრიბება ამოცანის ოპტიმალურ გადაწყვეტასთან.

კროსოვერი პოპულაციაში ორ ქრომოსომას (შეიძლება მეტის) შორის ქრომოსომის ნაწილების მიმოცვლას ახორციელებს. კროსოვერი შეიძლება ერთწერტილიანი ან მრავალწერტილიანი იყოს. მრავალი მკვლევარი თანხმდება, რომ ორწერტილიანი კროსოვერი – უფრო ეფექტურია. ორწერტილიანი კროსოვერი შემდეგნაირად მოდელირდება. დასაწყისში შეარჩევენ პოპულაციიდან ორ მშობლიურ ინდივიდუალს, შემდეგ შემთხვევითი სახით ქრომოსომების შიგნით განისაზღვრება ორი წერტილი (გაწყვეტის წერტილი), რომელშიც ორივე ქრომოსომა სამ ნაწილად იყოფა და მიმოიცვლება შუა ნაწილთან. აღწერილი პროცესი გამოსახულია ნახ. 36.-ზე.



ნახ. 36. კროსოვერი (ორი წერტილი)

- **მუტაცია.**

ჩვეულებრივ GA-ს რეალიზაციისას პირველად იყენებენ კროსოვერის ოპერატორს, შემდეგ კი მუტაციის ოპერატორს, თუმცა შესაძლებელია სხვა ვარიანტებიც. არსებობს აზრი, რომ მუტაციის ოპერატორი ძირითადად საძიებო ოპერატორს წარმოადგენს. ცნობილია ალგორითმები, რომლებიც მუტაციის გარდა სხვა ოპერატორებს არ იყენებენ (კროსინგოვერი, ინვერსია და სხვ.).

მუტაცია მნიშვნელოვან როლს ასრულებს გენების ფორმირებისათვის, რომლებიც წარმოდენილი არ იყო საწყის პოპულაციაში, და ამცირებენ ლოკალურ ოპტიუმუმებთან შეკრებადობის რისკს. მუტაცია – ქრომოსომის გარდაქმნის ოპერაციაა, რომელიც შემთხვევით შეცვლის მის ერთ ან რამდენიმე პოზიციას, გენებს. მუტაციის შედარებით გავრცელებული სახეობა – შემთხვევითი შეცვლა ქრომოსომის მხოლოდ ერთი გენის.

შემუშავებულ მეთოდში მუტაცია მოდელირდება შემდეგი სახით. ამოირჩევა მშობლიური ინდივიდუალები (ქრომოსომები, შერჩევის ოპერაციით ამორჩეული) და მათი მემკვიდრეები კროსოვერის შემდეგ. თითოეულ ინდივიდუალს შემთხვევითი სახით შეერჩევა გენი, რომლის ადგილზეც ინიშნება ახალი გენი, შემთხვევით შერჩეული დაკავშირებული ალტერნატივების შესაძლო ვარიანტებიდან.

- **პოპულაციის განახლება.**

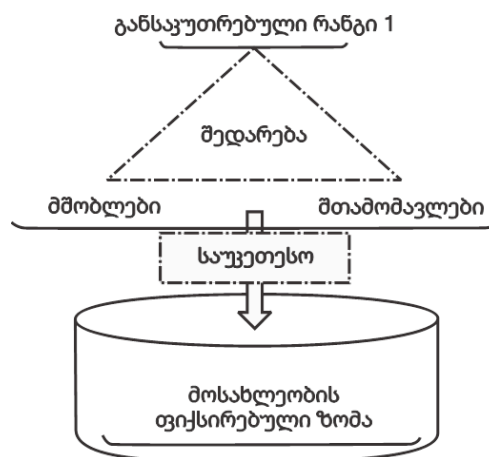
კროსოვერის ოპერატორის და მუტაციის ოპერატორის შენდევ ახალი ინდივიდუალები (შთამომავლები) ჩნდება. ყველა შექმნილი შთამომავალი ფასდება პროექტის ხანგრძლივობის საერთო ღირებულებით, იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ორი საუკეთესო შთამომავალი პოპულაციის განსაახლებლად.

შემდეგში ეს შთამომავლები მოწმდება განხორციელებადობაზე. თუ ისინი განხორციელებადი არ არიან, მაშინ კრიტიკული მუშაობისთვის ალგორითმი

შემთხვევითი სახით იწყებს ჩატარების რომელიმე დაჩქარებული ვარიანტების ამორჩევას, მოცემული ალტერნატივებიდან ამორჩევის გზით.

თუ შთამომავლები მიიღებიან პოპულაციაში სხვა ინდივიდუალების დუბლიკატიდან, მაშინ ისინი გადაიყრება, რაც პოპულაციის ნაირგვარობის შენარჩუნებას ეხმარება მისი უცვლელი ზომის დროს.

თუ შთამომავლები პოპულაციაში სხვა ინდივიდუალებთან არ დუბლირებენ, მაშინ ისინი 1 რანგის ინდივიდუალებს ედარებიან. თუ შთამომავლები უკეთესები აღმოჩნდებიან, მაშინ 1 რანგის ინდივიდუალები შეიცვლება ამ შთამომავლებით. თუ შთამომავლები უკეთესები არ არიან ვიდრე 1 რანგის ინდივიდუალები, მაშინ ისინი შეედარებიან მშობლებს. თუ შთამომავლები მშობლებზე უკეთესია, მაშინ მშობლები შთამომავლებით იცვლებიან, ე. ი. მშობლები პოპულაციიდან განირიდებიან შემდეგ, მიღებული პოპულაცია ისევ ზრდადობის მიხედვით ხარისხდება (ნახ. 37).



ნახ. 37. პოპულაციის განახლება

- **შეჩერების კრიტერიუმები.**

პოპულაცია ექვემდებარება შეფასებას, შერჩევას, გამრავლებასა და განახლებას (ჩანაცვლებას) ვიდრე არ შესრულდება ალგორითმის გაჩერების პირობები. თუ გაჩერების პირობები (თაობების რიცხვი, დრო, საჭირო შედეგის მიღწევა) შესრულებულია, მაშინ ამორჩევიან ინდივიდუალები შეგუებადობის ფუნქციის უკეთესი მნიშვნელობებით. თუ არა, მიმდინარეობს სელექციის ეტაპზე გადასვლა. საუკეთესო ინდივიდუალები ქმნის ჯგუფს შემდგომი განხილვისთვის. ეს

ინდივიდუალები განიცდის კუმშვას ან მოღუნებას რათა მიღწეულ იქნეს ერთი საუკეთესო გადაწყვეტა.

- **კუმშვა.**

ალგორითმში გამოყენებული მეთოდის დაფუძნებულია ქსელური გრაფიკის ყველაზე გრძელი გზის კუმშვაზე. კუმშვა გამოიყენება შემთხვევაში, როცა ქსელური გრაფიკის კუმშვისას პირდაპირი ხარჯების ზრდა ნაკლებია, ვიდრე ეკონომია, მიღებული ირიბი ხარჯების შემცირების გზით.

მიმდინარე პოპულაციაში საუკეთესო გადაწყვეტების კუმშვა მიმდინარეობს ან მუშაობისთვის, რომლებიც ამცირებენ პროექტის ხანგრძლივობას და უზრუნველყოფენ მის საერთო მინიმალურ ღირებულებას, ან სამუშაოებისთვის, რომლებიც ამცირებენ პროექტის ხანგრძლივობას და ამავე დროს ამცირებენ მის საერთო ღირებულებას.

მოცემულ კვლევაში კუმშვა მიმდინარეობდა შემდეგნაირად:

1. განისაზღვრება კრიტიკული სამუშაოების ღირებულების ცვლილების შედარებით დაბალი სიჩქარით;
2. განისაზღვრება ΔD -ს მაქსიმალური მნიშვნელობა კრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობის შესაკვეცად;
3. განისაზღვრება არაკრიტიკული გზის სიგრძე და გამოითვლება ΔD_e -ს უფრო ეფექტიანი მნიშვნელობა, კრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობის შეკვეცის.

$$\Delta D_e = L_c - L_{nc} \quad (2.10.)$$

სადაც,

L_c – კრიტიკული გზის სიგრძე;

L_{nc} – ყველაზე გრძელი არაკრიტიკული გზის სიგრძე;

4. განისაზღვრება ΔD_{op} ოპტიმალური მნიშვნელობა კრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობის შეკვეცის;

$$\Delta D_{op} = \min \{ \Delta D, \Delta D_e \} \quad (2.11.)$$

5. კრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობები ერთდროულად იკვეცება ΔD_{op} -ს მნიშვნელობაზე;

6. პროცედურა გრძელდება პროექტის საჭირო ხანგრძლივობის მიღებამდე ან სიტუაციამდე, როცა შემდგომი შემცირება შეუძლებელია.

• **მოდუნება.**

მიმდინარე პოპულაციაში დასკვნით პროგრამაში საუკეთესო გადაწყვეტის სამუშაოებში გამოიყენება მოდუნების ოპერაცია. მიზანი – ამოვირჩიოთ არაკრიტიკული სამუშაოების უფრო მაღალი ხანგრძლივობები, პროექტის შესრულების საერთო ღირებულება გაიზარდოს და იმავდროულად პროექტის საერთო ღირებულების შემცირებელი. ამგვარად საბოლოო გადაწყვეტას უნდა ჰქონდეს პროექტის შესრულების უმცირესი ღირებულება. მოდუნების მეთოდის შემდეგი სახით მოდელირდება:

1. არაკრიტიკული მოკლე გზის და ღირებულების ცვლილების უფრო მაღალი სიჩქარის განსაზღვრა;
2. არაკრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობის მოდუნების მაქსიმალური მნიშვნელობის $\Delta D_c'$ განსაზღვრა;
3. არაკრიტიკული სამუშაოების ჯგუფების ხანგრძლივობის მოდუნების მაქსიმალური ეფექტური მნიშვნელობების გამოთვლა;

$$\Delta D_e'' = L_c - L_{nc}' \quad (2.12.)$$

სადაც

L_{nc}' – ყველაზე მოკლე არაკრიტიკული გზის სიგრძე;

4. არაკრიტიკულ სამუშაოთა ჯგუფების ხანგრძლივობის მოდუნების ოპტიმალური მნიშვნელობების განსაზღვრა:

$$\Delta D_{op}'' = \min \{ \Delta D_c', \Delta D_e' \} \quad (2.13.)$$

5. არაკრიტიკულ სამუშაოთა ჯგუფების ხანგრძლივობის $\Delta D_{op}'$ მნიშვნელობის მიხედვით მოდუნება ერთდროულად;
6. პროცედურა მანამ გრძელდება, ვიდრე შემდგომი მოდუნება.

შემოთავაზებული მეთოდის აღწერის სქემა მოდიფიცირებული განეტიკური ალგორითმების ბაზაზე ნაჩვენებია ნახ. 38.-ზე.

5. აშენებული შენობების სხვა პროექტების მონაცემებთან ინტეგრაციის საფუძველზე შემუშავებულია მიმდინარე პროექტის დაგეგმვის პარამეტრების ფორმირების ავტომატიზაციის მეთოდოლოგია.
6. შენობის ინფორმაციული მოდელის მონაცემების საფუძველზე შემოთავაზებულია მეთოდოლოგია პროექტის 4D მოდელის შექმნის ავტომატიზაციისთვის.
7. გენეტიკური ალგორითმების საფუძველზე შემოთავაზებულია პროექტის სამუშაოთა შესრულების სტრატეგიის ალტერნატივების და პროექტის გეგმის ოპტიმიზაციის ანალიზი.
8. შემოთავაზებულია სამუშაოთა ხანგრძლივობის კუმშვისა და მოდუნების მეთოდოლოგია პროექტის ხანგრძლივობის ოპტიმიზაციისას.
9. პროექტის გეგმის ოპტიმიზაციის შემუშავებული მეთოდოლოგიის ბაზაზე შემოთავაზებულია პროექტის ოპტიმიზაციის, ან საჭირო ხანგრძლივობის, ან უმცირესი ღირებულების, ან უმცირესი ხანგრძლივობის მულტი სცენარი.
10. შემოთავაზებულია სამუშაო სივრცეების კლასიფიკაციის სქემა.
11. შენობის ინფორმაციული მოდელის საფუძველზე შემოთავაზებულია სამუშაო სივრცეების სამგანზომილებიან ვიზუალურ რეჟიმში და ღრეში ასახვის მოდელი, სამუშაო სივრცეთა რაიმე კონფლიქტის განსაზღვრისათვის.

3. მშენებლობის პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის ინტეგრირებული მეთოდოლოგიის პროგრამული ვერიფიკაცია და რეალიზაცია

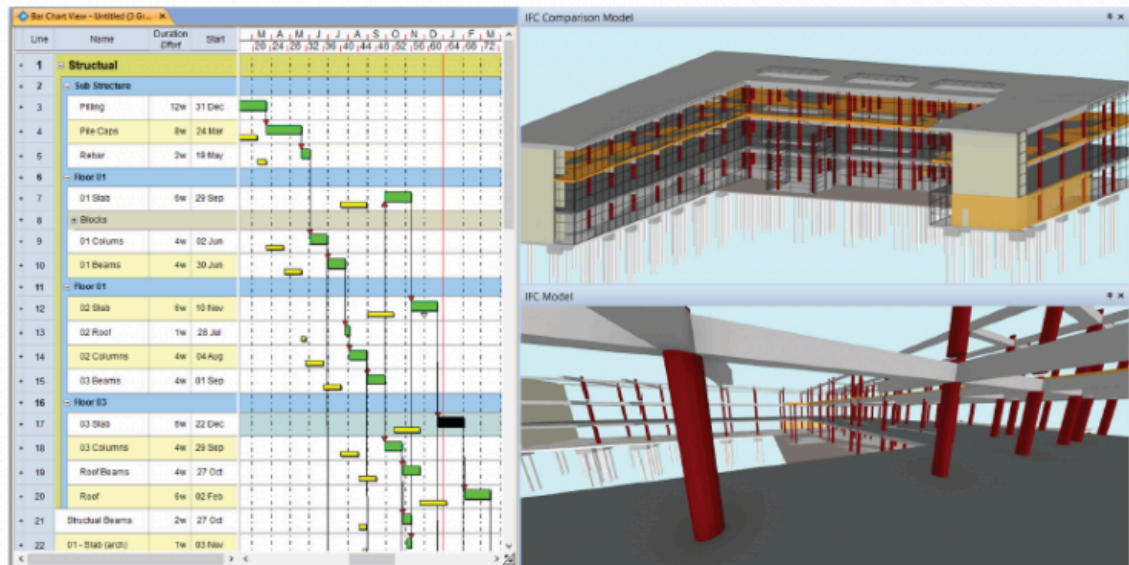
მოცემულ თავში მოყვანილია შემუშავებული პროგრამის კომპონენტების დაწვრილებითი აღწერა და შემოთავაზებული GA^* მეთოდოლოგიის გაანგარიშების

შედეგის შედარება პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის სხვა მეთოდებთან, ასევე მსჯელობაა რეალურ პროექტზე შემოთავაზებული მშენებლობის პროექტირებისა და კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის ინტეგრირებული მოდელის გამოყენება.

3.1. კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის შემუშავებული პროგრამის კომპონენტები

მშენებლობის დაგეგმარების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდები, რეალურ პროექტში თავისუფლად უნდა იყოს გამოყენებული, რომ გამარტივდეს მათი გამოყენება (სურ. 4.). ამ მეთოდების შემუშავებისას გათვალისწინებული იყო სხვა პროგრამულ უზრუნველყოფასთან ინტეგრაციის მოკლე დროში რთული გამოთვლების ჩატარების და მომხმარებლისთვის მოსახერხებელი ინტერფეისის შექმნის შესაძლებლობის უზრუნველყოფა. ამ მიზნებით შემოთავაზებული მეთოდის პროგრამული რეალიზაციისთვის შერჩეულ იქნა ენა Visual Basic.

კომპიუტერული არე 4 დანართისაგან შედგება, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებული არის და ფართო გამოყენება აქვს საპროექტო პრაქტიკაში: Autodesk Revit, Autodesk Navisworks, Microsoft Excel and Microsoft Project.



სურ. 4. მშენებლობის დაგეგმარების ოპტიმიზაციის მაგალითი

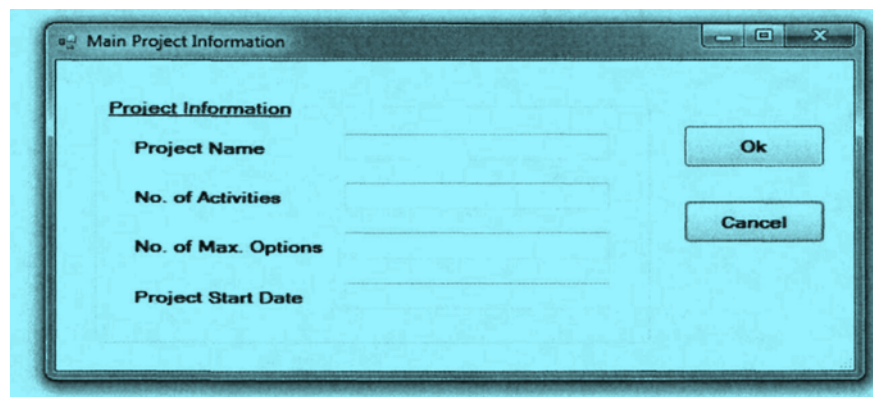
Autodesk Revit გამოიყენება BIM შენობის ინფორმაციული მოდელირებისთვის. Autodesk Navisworks გამოიყენება საპროექტო მონაცემების ინტეგრირებული ნაკრებიდან რაოდენობრივი ანალიზის დაწერილებითი საშუაო წიგნების ფორმირებისთვის. გარდა ამისა, Autodesk Navisworks გამოიყენება მშენებლობის 4D მოდელის მოდელირებისთვის და 3D მოდელის კომპონენტების გადაკვეთაზე შემოწმებისთვის. Microsoft Excel გამოიყენება სხვადასხვა ფაილებიდან და დოკუმენტებიდან ინფორმაციის გაერთიანებისთვის, ასევე, ინფორმაციისა და მონაცემთა შენახვის აუცილებელი სტრუქტურის ორგანიზებისთვის. Microsoft Project გამოიყენება კალენდარული გეგმის გაანგარიშებისთვის, საშუაოთა დაწყებისა და დასრულების თარიღის გამოსათვლელად და პროექტის საერთო ხანგრძლივობის განსაზღვრისთვის. ეს ოთხი დანართი დაკავშირებულია ერთმანეთთან მონაცემთა განზოგადოებისა და გადაცემისთვის.

Visual Basic წარმოადგენს შეუქმავების ინტეგრირებულ არეს, რომელიც შეიცავს დანართის დამუშავების პროცესის შემამსუბუქებელ და დამაჩქარებელ ინსტრუმენტების ნაკრებს. ამავე დროს, დამუშავების პროცესი პროგრამის დაწერაში კი არ მდგომარეობს (პროგრამული კოდირება), არამედ დანართის პროექტირებაში. თითოეული პროგრამული დანართი არსებობს როგორც

პროექტი, რომელიც თავის თავში შეიცავს მომხმარებლის ინტერფეისს, რომელიც შეყვანა-გამოყვანა ინფორმაციის და მონაცემთა დამუშავების პროგრამული კოდის ურთიერთქმედების საშუალებას აძლევს სისტემასთან.

დამუშავებული პროგრამა მუშაობს OC Windows-ში და აქვს ძირითადი ეკრანი, რომელიც ნახ. 3.2.-ზე არის გამოსახული. ინტერფეისი შედგება მენიუს სტრიქონისა და ინსტრუმენტების პანელისაგან. მენიუს სტრიქონი შემდეგ პუნქტებს შეიცავს: ფაილი, გამართვა, სახეობა, ფორმატი, ჩაყენება, მოცილება და დახმარება. მენიუს სტრიქონის ქვეშ განლაგებულია ინსტრუმენტების პანელის უბანი, რომლის თითოეული ღილაკი განკუთვნილია კონკრეტული ბრძანების სწრაფი შესრულებისთვის.

ახალი პროექტის შექმნის ეკრანი განკუთვნილია პროექტზე ძირითადი ინფორმაციის შესატანად, რომელიც მშენებლობის გრაფიკის ოპტიმიზაციისთვის გაანალიზდება. ეს შეიძლება გაკეთდეს, „new project“ პუნქტის არჩევით ძირითადი მენიუს „File“ ღილაკზე, შემდგომში ახალი პროექტის ეკრანი ასახული იქნება, როგორც სურ 5.-ზე არის ნაჩვენები.



სურ. 5. ახალი პროექტის შექმნა

ეს ეკრანი მომხმარებელს შესაძლებლობას აძლევს შეიტანოს ინფორმაცია პროექტზე, ისეთი, როგორიცაა პროექტის დასახელება, საშუაოთა რაოდენობა, ვარიანტების მაქსიმალური რაოდენობა (მშენებლობის მეთოდების რაოდენობა) პროექტის დაწყების თარიღი.

პროექტის შესახებ ძირითადი ინფორმაციის შეტანის შემდეგ გამოჩნდება ახალი ეკრანი, სურ. 6.-ზე ნაჩვენები. ეკრანი მომხმარებელს საშუალებას აძლევს

შეიტანოს აუცილებელი მონაცემები სამუშაოებზე, პროექტის ირიბ ხარჯებზე და გენეტიკური ალგორითმის პარამეტრებზე.

სურ. 6. პროექტის სამუშაოების მონაცემთა შეყვანა

სამუშაოებზე აუცილებელი მონაცემები თავის თავში მოიცავს პროექტში სამუშაოს თითოეული სახეობის აღწერას, მის იდენტიფიკატორს ID, წინამორბედ სამუშაოებს, სამუშაოთა შორის კავშირებს (დასრულება-დაწყება; დაწყება-დაწყება; დასრულება-დასრულება; დაწყება-დასრულება), შესვენებებს (ლაგი) სამუშაოთა შორის და ალტერნატივებს (პარამეტრების ვარიანტები) სამუშაოს თითოეული სახეობისთვის, რომლებიც მოიცავს ურთიერთდაკავშირებულ ხანგრძლივობასა და ღირებულებას.

მონაცემთა შეყვანის პეოცესის დასრულების შემდეგ, მონაცემები შეიძლება რედაქტირებული და გაახლებული იყოს. მომხმარებელმა შეიძლება დაამატოს ახალი სამუშაოები მენიუს „Insert“ და ასევე შეუძლია ამოიღოს მონაცემები მენიუს „Delete“ საშუალებით.

გაანგარიშებაზე პროგრამის გასაშვებად, როგორც სურ.7.-ზე ნაჩვენები, არსებობს 3 ღილაკი (Least cost, Target time, Least time). თითოეული ღილაკის დანიშნულებაა ანგარიშის განსაზღვრული ალგორითმის რეალიზაცია.

- **მინიმალური ღირებულება (Least cost)**

ალგორითმი განსაზღვრავს თითოეული სამუშაოს ხანგრძლივობას და სამუშაოთა ხანგრძლივობის ოპტიმალურ შეხამებას, რომელსაც მიეყვართ პროექტის მინიმალური საერთო ღირებულების და მისი შესაბამისი მინიმალური ხანგრძლივობის გადაწყვეტასთან.

- **საჭირო ხანგრძლივობა (Target time)**

ალგორითმი თითოეული სამუშაოს ხანგრძლივობას და სამუშაოთა ხანგრძლივობის ოპტიმალურ შეხამებას საზღვრავს, რომელსაც მიეყვართ პროექტის საჭირო ხანგრძლივობის და მისი მინიმალური ღირებულების გადაწყვეტასთან.

- **მინიმალური ხანგრძლივობა (Least time)**

ალგორითმი განსაზღვრავს თითოეული სამუშაოს და სამუშაოთა ოპტიმალური შეხამების ხანგრძლივობას, რომელსაც მიეყვართ პროექტის მინიმალური ხანგრძლივობის და მისი მინიმალური საერთო ღირებულების გადაწყვეტასთან.

გაანგარიშების შედეგების გამოყვანისა და დაბეჭდვების შემდეგ შესაძლებელია მოქმედების 4 ვარიანტი: Export to MS Project, Export to MS Excel, Compare results, Return to input Data (ნახ. 3.4.). მოცემული მონაცემების შედეგების ექსპორტი Microsoft Project-ში გამოიყენება იმისთვის, რომ გამოვიყენოთ მიღებული შედეგები სამუშაოთა ვიზუალიზაციისას დროის სკალაზე, გამოყენებული რესურსების ჰისტოგრამის რეცენზირებისას, სხვადასხვაგვარი ტიპის პროექტების ანგარიშების შექმნისას, პროექტის საერთო მსვლელობაზე რესურსების მიუწვდომლობის გავლენის გამოთვლისას და ა.შ. Microsoft Excel-ში მოცემული შედეგების ექსპორტი გამოიყენება მონაცემთა შემდგომი იმპორტისათვის Autodesk Navisworks-ში და პროექტის 4D დაგეგმვისას 3D მოდელთან შეერთებისთვის. შესაძლებელია გაანგარიშების შედეგების ვარიანტების წარმოდგენა გადაწყვეტის შედარებისა და მიღებისათვის. გათვალისწინებულია საწყისი მონაცემების რედაქტირებასთან დაბრუნება ფორმირებისასა და გაშვებისთვის საწყისი პარამეტრების სხვა ვარიანტის გაანგარიშებაზე.

სურ.7. შედეგების გამოგანა

სამუშაო სივრცეების ფორმისა და ზომების შექმნის და სამუშაო სივრცეების ადგილმდებარეობის განსაზღვრის პროცესის ავტომატიზაციისთვის Autodesk Revit არეში შემუშავებული იქნება ეკრანის მაფორმირებელი ფუნქცია (პლაგინი), მონაცემთა შეგანისთვის (სურ.8.).

სურ.8. სამუშაო სივრცეების შეგანა

სამუშაო სივრცეების შესახებ აუცილებელი მონაცემები მოიცავს შემდეგს:

- ID კომპონენტი;
- სამუშაო სივრცის Form 1 ან Form 2;
- სამუშაოთა სივრცეების თითოეული საჭირო ტიპისთვის x, y ზომები: Labor, Equipment, Supported, Protected.

3.2. შემოთავაზებული მეთოდის დადასტურება

რეალურ პროექტში პროგრამის გამოყენების წინ ჩატარებული იყო სამუშაოს ალგორითმის სიმუსგის შეფასება და შედეგების სისწორე. თეორიული მსჯელობის და პროგრამული დანართის ლოგიკის დასადასტურებლად ჩატარდა მოდელის წინასწარი შემოწმება სხვადასხვა მაგალითების საფუძველზე ლიგერატურიდან.

ვერიფიკაციის ეს ეტაპი ძალზე მნიშვნელოვანია, რადგანაც ის გვეხმარება გავასწოროთ შეცდომები და განვსაზღვროთ პრობლემური უბნები პროგრამის დასაზუსტებლად. ამგვარად, მოცემული განყოფილება მოიცავს ამოცანების რამდენიმე გადაწყვეტას ოპტიმიზაციის შემოთავაზებული მოდელის დახმარებით და მათ შედარებას წინამორბედი მოდელის დახმარებით მიღებულ გადაწყვეტებთან.

მაგალითი №1. მოცემული მაგალითი მოყვანილი იყო [77] სამუშაოში. მაგალითი ამოხსნილია მათემატიკური მოდელის გამოყენებით 8 სამუშაოზე დაყრდნობით. მაგალითის მონაცემები მოცემულია ცხრილი 12.-ში. ამ ამოცანაში პროექტის დასრულების ნორმალური დრო იყო დროის 38 ერთეული, ხოლო ირიბი დანახარჯები დროის ერთეულში ღირებულების 70 ერთეული, პროექტის საერთო ღირებულებამ შეადგინა 3790 ღირებულების ერთეული.

მათემატიკური მოდელის გამოყენების შედეგები ედარებოდა 2 სცენარისთვის ალგორითმის ხელით შემოწმების შედეგებს. პირველ სცენარს ოპტიმალური ღირებულების ძებნა წარმოადგენს. შედეგად, ღირებულება 3760 შეადგენს, ხოლო პროექტის შესაბამისი ხანგრძლივობა 35-ის ტოლია. გაანგარიშების მეორე სცენარს პროექტის საჭირო ხანგრძლივობის უზრუნველყოფა წარმოადგენს და 36-ის ტოლია. ხელით გაანგარიშებით მიღებული შედეგები ორივე სცენარისთვის ზუსტად ემთხვევა შემოთავაზებული მეთოდით ავტომატიზირებული გაანგარიშების შედეგებს. ეს გვიჩვენებს, რომ შემოთავაზებული მეთოდიკა მუშაობს ზუსტად და უნარი შესწევს გადალახოს ყველა შესაძლო სიტუაცია კუმშვის პროცესში.

ცხრილი 12.

I მაგალითის მონაცემები

სამუშაო	წინამორბედი	ხანგრძლივობა		პირდაპირი ხარჯები	
		ნორმალური	შეკუმშული	ნორმალური	შეკუმშული
A	-	12	10	200	360
B	-	12	10	100	340
C	B	10	9	200	250
D	A	13	10	240	600
E	C,D	7	7	∞	∞
F	E	6	3	120	300
G	B	14	12	140	250
H	G	8	5	140	350

მაგალითი №2. მოცემული მაგალითი მოყვანილი იყო [117] სამუშაოში. მაგალითი ამოხსნილია მათემატიკური მოდელის საშუალებით. მაგალითის მონაცემები მოყვანილია ცხრილი 13.-ში. ამ ამოცანაში პროექტის დასრულების ნორმალური ღრო – ღროის 20 ერთეულია, ხოლო ირიბი დანახარჯების – 25000 ღირებულების ერთეული ღროის ერთეულში, პროექტის საერთო ღირებულება 2044000 ღირებულების ერთეულია.

ცხრილი 14.-ში მოყვანილია შემოთავაზებული მეთოდის GA გამოყენებით მიღებული შედეგების შედარება [117] სამუშაოში წარმოდგენილ შედეგებთან.

შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით მიღებულმა შედეგებმა უკეთესი გადაწყვეტა მოგვცა მათემატიკური მოდელის გამოყენების შედეგებთან შედარებით. ამასთანავე უნდა აღვნიშნოთ, რომ მათემატიკური მოდელები გვაძლევს დამაკმაყოფილებელ გადაწყვეტას მცირე ზომის პროექტების დაგეგმვის ოპტიმიზაციის ამოცანისთვის. ისინი არაუფექტიანი ხდებიან, როგორც კი ამოცანის ზომა იზრდება.

ცხრილი 13.

მე-2 მაგალითის მონაცემები

სამუშაო	წინამორბედები	ხანგრძლივობა		პირდაპირი ხარჯები	
		ნორმალური	შეკუმშული	ნორმალური	შეკუმშული
A	-	15	13	225000	265000
B	A	2	1	26000	28000
C	-	14	10	210000	290000
D	C	2	1	26000	28000
E	-	2	1	30000	50000
F	E	2	1	16000	17000

G	F	4	3	52000	54000
H	-	3	1	45000	85000
I	H	2	1	16000	17000
J	I	5	3	65000	69000
K	-	3	2	45000	65000
L	K	4	2	32000	34000
M	L	3	1	39000	43000
N	-	5	2	75000	135000
O	N	6	4	78000	82000
P	-	5	3	75000	105000
Q	P	7	5	91000	95000
R	-	2	1	20000	35000
S	-	5	3	50000	80000
T	-	3	1	24000	26000
U	T	2	1	20000	35000
V	-	12	9	180000	240000
W	V	8	6	104000	108000

ცხრილი 14.

მე-2 მაგალითის შედეგები

ამოცანა	მათემატიკური მოდელი [117]		GA*	
	დრო	ღირებულება	დრო	ღირებულება
მინიმალური ღირებულება	16	1990000	16	1990000
მინიმალური დრო	15	2361000	15	2007000

მაგალითი №3. მოცემული მაგალითი მოყვანილი იყო [95, 122] სამუშაოში. მაგალითი ამოხსნილია გენეტიკური ალგორითმის გამოყენებით. მონაცემები გაანგარიშებისთვის მოცემულია ცხრილი 15.-ში.

ცხრილი 15.

მე-3 მაგალითის მონაცემები

სამუშაო	წინამორბედები	ალტერნატივები	ხანგრძლივობა	პირდაპირი ხარჯები
1	—	1	14	23000
		2	20	18000
		3	24	12000
2	1	1	15	3000
		2	18	2400
		3	20	1800
		4	23	1500
		5	25	1000
		1	15	4500

3	1	2	22	4000
		3	33	3200
4	1	1	12	45000
		2	16	35000
		3	20	30000
5	2.3	1	22	20000
		2	24	17500
		3	28	15000
6	4	1	14	40000
		2	18	32000
		3	24	18000
7	5, 6	1	9	30000
		2	15	24000
		3	18	22000

ცხრილი 16.-ში შედარებულია შემოთავაზებული მეთოდით GA და საბუშაოებში [95, 122] GA გამოყენებით მიღებული შედეგები.

ცხრილი 16.

მე-3 მაგალითის შედეგები

ამოცანა	GA [122]		GA [95]		GA*	
	დრო	ღირებულება	დრო	ღირებულება	დრო	ღირებულება
მინიმალური ღირებულება	67	225300	68	220500	68	220500
მინიმალური დრო	-	-	60	233500	60	233500
საჭირო დრო	63	225500	63	225500	63	225500
			66	236500	66	227500
			67	224000	67	224000

სამი გაანგარიშების შედეგების შედარებით შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ მინიმალური ღირებულება, მიღებული შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით უკეთესია, ვიდრე [122] საბუშაოს შედეგი. შემოთავაზებული მეთოდით მიღებული მინიმალური დროისა და მინიმალური ღირებულების ძეგლის შედეგები ისეთივეა, როგორც [95] საბუშაოთი მიღებული.

ამავე დროს, მოცემული დროისათვის ღირებულების განსაზღვრის ამოცანისთვის გადაწყვეტა, შემოთავაზებული ალგორითმის მიხედვით (66 დღე 227500 ღირებულების დროს), უკეთესია, ვიდრე ადრე [95] საბუშაოში მიღებული (66 დღე 236500 ღირებულების დროს).

კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი შედარება მიეკუთვნება გენეტიკური ალგორითმების პარამეტრებს. [95] სამუშაოში პოპულაციის რაოდენობა 200 შეადგენს, ხოლო თაობათა რაოდენობა ტოლია 1000-ის. [122] ნაშრომში პოპულაციის რაოდენობა 500 შეადგენს, ხოლო თაობათა რიცხვი 100. მოცემულ ნაშრომში პოპულაციის რიცხვია 100-ია, ხოლო თაობათა – 50. სხვა სიტყვებით პოპულაციის და თაობათა რიცხვი შემოთავაზებულ მეთოდში ნაკლებია, ვიდრე სხვა მოდელებში, ეს კი იმას ნიშნავს, რომ შემოთავაზებულმა დაჩქარებული გენეტიკური ალგორითმის მეთოდიკამ შეიძლება გაანგარიშების დრო შეამციროს.

მაგალითი №4. პროექტი 18 სამუშაოსგან შედგება და საბაზო მაგალითს წარმოადგენს, რომლებიც რამდენიმე წინამდებ კვლევაშია გამოყენებული. პირველად ის იყო გამოთვლილი [59] ნაშრომში, ხოლო შემდეგ გამოყენებული სხვა რიგ კვლევებში [53, 65, 120, 121]. ამგვარად, პროექტი მისაღები მაგალითია მოცემული კვლევის შესადარებლად ანალოგიური კვლევების შედეგებთან.

პროექტის საწყისი მონაცემები ნაჩვენებია ცხრილი 17-ში. მაგალითი ამოხსნილია ევოლუციური ალგორითმის გამოყენებით.

ცხრილი 3.6.

მე-4 მაგალითის მონაცემები

ალგორითმები – მშენებლობის მეთოდები											
სამუშაო	წინამორბედები	მეთოდი 1		მეთოდი 2		მეთოდი 3		მეთოდი 4		მეთოდი 5	
		D	C	D	C	D	C	D	C	D	C
1	—	24	1200	21	1500	16	1900	15	2150	14	2400
2	—	25	1000	23	1500	20	1800	18	2400	15	3000
3	—	33	3200	22	4000	15	4500	—	—	—	—
4	—	20	3000	16	3500	12	4500	—	—	—	—
5	1	30	1000	28	1500	24	1750	22	2000	—	—
6	1	24	1800	18	3200	14	4000	—	—	—	—
7	5	18	2200	15	2400	9	3000	—	—	—	—
8	6	24	120	21	208	16	200	15	215	14	220
9	6	25	100	23	150	20	180	18	240	15	300
10	2,6	33	320	22	400	15	450	—	—	—	—
11	7,8	20	300	16	350	12	450	—	—	—	—
12	5, 9, 10	30	1000	28	1500	24	1750	22	2000	—	—
13	3	24	1800	18	3200	14	4000	—	—	—	—
14	4, 10	18	2200	15	2400	9	3000	—	—	—	—

15	12	16	3500	12	4500		—■	—	—		
16	13, 14	30	1000	28	1500	24	1750	2 2	2000	2 0	300 0
17	11, 14, 15	24	1800	18	3200	14	4000	—		—	—
18	16, 17	18	2200	15	2400	9	3000			—	—

შრომები [59, 65]-ში მიღებულ შედეგებთან შედარების გზით სამუშაოებისთვის პირველად დადგენილი იყო მათი უმცირესი ღირებულების ვარიანტი. პროექტის საერთო პირდაპირი ღირებულება ამ შემთხვევაში გოლია 99740 \$, ხოლო პროექტის ხანგრძლივობა 169 დღეს შეადგენს. თუ ყოველდღიურად გავითვალისწინებთ ირიბ ღირებულებებს ღირებულების 200 ერთეულად დროს ერთეულში, მაშინ პროექტის საერთო ღირებულება 133540 \$ იქნება. გაანგარიშების მიზანი იმაში მდგომარეობდა, რომ მოგვეძებნა პროექტის რეალიზაციის ბოლო ვადისთვის - 110 დღე მინიმალური ღირებულება. მოცემული მეთოდით გაანგარიშების მეთოდულად აჩვენა, რომ მინიმალური ღირებულება, ისევე როგორც წინამორბედ სამუშაოებში, გოლია 128270 \$. შემოთავაზებული ალგორითმით გაანგარიშებაში შედეგი მიღებული იყო უფრო სწრაფად, ვიდრე სხვა კვლევებში, რომლებიც პოპულაციის რიცხვს 100-ის გოლად და თაობათა რიცხვს 1000-ის გოლად.

სადაც D- სამუშაოს ხანგრძლივობა;

C - პირდაპირი სამუშაოს ღირებულება.

ნაშრომი [53]-ში წარმოდგენილია 4 ევოლუციური ალგორითმი, რომლებიც განკუთვნილია გადაწყვეტის ოპტიმიზაციისთვის:

- ალგორითმი (PSO);
- ალგორითმი (ACO);
- ალგორითმი (SFL)
- გენეტიკური ალგორითმი GA.

ირიბი ხარჯები დადგენილია 500 \$-ის მნიშვნელობაზე. ამ ოთხი ალგორითმის გამოყენების და შემოთავაზებული ალგორითმის GA* შედეგების შედარება მოცემულია ცხრილი 18.-ში.

ცხრილი 18.

მე-4 მაგალითის შედეგები

ალგორითმი	მინიმალური ღირებულება	საშუალო ღირებულება	მინიმალური ხანგრძლივობა	საშუალო ხანგრძლივობა	წარმატების %	გამომუშაების დრო, წმ
PSO	161270	161940	110	112	60	15
ACO	161270	166675	110	122	20	10
SFL	161270	161270	110	110	100	8
GA	162270	164772	113	120	0	16
GA*	161270	161619	110	111	80	5

თითოეული ალგორითმის გამოყენებით მიმდინარეობდა 20-20 გამოცდა. წარმატების პროცენტი წარმოადგენს გამოცდის ფარდობას მიზნობრივი მიღწევის მნიშვნელობასთან 110 დღე გამოცდის საერთო რაოდენობასთან. როგორც ცხრილი 18-შია ნაჩვენები, შემოთავაზებულმა ალგორითმმა GA* სხვა უმრავლესობა ალგორითმებს აჯობა SFL-ის გარდა. საწყისი GA (%) წარმატების პროცენტთან შედარებით შემოთავაზებული GA*-ს წარმატების პროცენტი 80% შეადგენს. პროექტის ღირებულებამ მის მინიმალურ 161,270 \$ მნიშვნელობას მიაღწია. დამუშავების საშუალო დრო 5 წამი შეადგინა, რაც მცირეა, ვიდრე სხვა ალგორითმებში. იმ დროს, როცა ალგორითმებმა PSO და ACO შეძლეს წარმატების მიღწევა 60% და 20% ალბათობით, საშუალო საერთო ღირებულება ოცივე გამოცდისთვის მეტი იყო, ვიდრე შემოთავაზებული ალგორითმის.

სამუშაო [120]-ში ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისთვის გამოიყენებოდა ალგორითმი ირიბი ხარჯები დადგენილი იყო 1500\$ დონეზე. ცხრილი 19. გვიჩვენებს [121] სამუშაოში გენეტიკური ალგორითმის გამოყენებით მიღებული შედეგების შედარებას შემოთავაზებულ ალგორითმის GA და ალგორითმის ACS. შედეგებთან, რომელიც ნაშრომ [120]-ში გამოიყენებოდა.

ცხრილი 19.

მე-4 მაგალითის შედეგები

ალგორითმი	პოპულაციის რიცხვი	თაობათა რიცხვი	ხანგრძლივობა	ღირებულება
GA	50	500	100	287720
			101	284020
			104	280020
			110	273720

ACS	10	200	100 101 104 110	283320 279820 276320 271320
GA*	100	50	100 101 104 110	283320 279820 276320 271270

როგორც ცხრილი 19-ში ნაჩვენებია, შემოთავაზებული ალგორითმი GA^* და ACS გადაამეტა GA. შემოთავაზებული GA^* ალგორითმით მიღებული გადაწყვეტა – 110 დღე და 271270 \$, ACS-ის გამოყენებით მიღებული გადაწყვეტის ღირებულების გარეთაა და ის უკეთესია ვიდრე 110 დღე და 271320\$. ამის გარდა, GA^* მოდელის თაობათა რაოდენობა ნაკლებია, ვიდრე GA მოდელის და ACS მოდელის თაობათა რაოდენობა.

მაგალითი №5. მოცემული მაგალითი წარმოდგენილი იყო ნაშრომი [44]-ში. მაგალითი ამოხსნილია რიგი ევოლუციური ალგორითმების გამოყენებით:

EMS ალგორითმები – Electromagnetic Scatter Search;

GMASA ალგორითმები – Genetic Memetic Algorithm with Simulated Annealing;

GASAVNS ალგორითმები – Genetic algorithm with simulated annealing and variable neighborhood search;

GASA ალგორითმები – Genetic Algorithm with Simulated Annealing;

HGAQSA ალგორითმები – Hybrid Genetic Algorithm with Quantum Simulated Annealing.

მაგალითისთვის მონაცემები მოყვანილია ცხრილი 20-ში პროექტის ირიბი ხარჯი 1200 \$/დღეში. პირდაპირი ხარჯები წარმოდგენილია ათასეულ ერთეულებში.

ცხრილი 20.

მე-5 მაგალითის მონაცემები

ალგორითმები (მშენებლობის მეთოდები)							
სამუშაო	წინამორბედები	მეთოდი 1		მეთოდი 2		მეთოდი 3	
		D	C	D	C	D	C
1	—	15	60	12	C	D	C
2	1SS+5, IFF	25	30	20	68	—	—

3	1SS+10, 1FF+3, 2SS+10, 2FF+3	25	50	20	38	15	44
4	3FS	12	17	9	54	15	60
5	4FS	6	3	—	21	—	—
6	1FS	12	27	9	—	—	—
7	6SS, 6FF	6	8	—	32	—	—
8	7FS	20	44	15	—	—	—
9	4FS, 8FS	12	15	9	48	12	54
10	5FS, 9FS	6	3	—	22	—	—
11	5FS, 10FS	1	0.5	—	—	—	—
12	12PS	25	95	20	—	—	—
13	12SS+6	15	34	12	105	15	109
14	12FF+8, 13FF+8	12	9	9	41	9	51
15	12SS+6, 12FF 14FS-6, 14FF+10	25	30	15	13	—	—
16	15SS+10, 15FF	40	78	35	38	12	42
17	15PS-10, 15FF	25	23	20	85	30	90
18	15PS	20	14	15	26	12	35
19	15FS+12	25	14	20	18	12	24
20	17SS+10, 17FF+5	20	38	15	19	15	24
21	16FS-10, 16FF, 20SS+12, 20FF+2	40	42	35	42	—	—
22	21SS+15, 21FF+2	40	36	30	50	30	58
23	22PS-15, 22FF	40	65	35	48	25	56
24	23SS+15, 23FF+5	9	7	—	74	25	79
25	23PS-10, 23FF	25	45	20	—	—	—
26	25PS-10, 25FF	25	50	20	51	15	59
27	26PS-10, 26FF	30	60	25	58	15	64
28	27PS-10, 27FF	12	9	9	72	20	78
29	18PS, 19PS, 24PS, 28PS	1	0.5	—	13	7	18

სადაც D - სამუშაოს ხანგრძლივობაა;

C - სამუშაოს პირდაპირი ღირებულება (\$/1000);

SS- დასაწყისი-დასაწყისი;

FF - დასასრული-დასასრული;

FS - დასასრული-დასაწყისი.

პროექტის 29 სამუშაოსთვის მაგალითი მოიცავს ლოგიკური ფარდობის
ზოგიერთ ტიპს და შეიცავს ლაგს ზოგიერთ ამ დამოკიდებულებაში, რაც

დაგეგმარების პროგრამის შესაძლებლობების დემონსტრაციისთვის მნიშვნელოვანია. ევოლუციური ალგორითმების შედეგების ანალიზი ნაჩვენებია ცხრილი 21.-ში.

ცხრილი 21.

მე-5 მაგალითის შედეგები

ალგორითმი	მინიმ. ღირებულება	საშუალო ღირებულება	მინიმ. ხანგრძლივობა	საშუალო ხანგრძლივობა	წარმატების %
EMB	1237000	1243100	255	242	0
GA	1226200	1228600	251	256	0
ACO	1226200	1228200	251	253,	0
PSO	1226200	1226880	236	245	10
GMASA	1226200	1226200	236	242	20
GASAVNS	1226200	1227360	236	245	10
GASA	1226200	1226200	236	242	20
HGAQSA	1226200	1226200	236	244	20
GA*	1226200	1229980	236	242	40

შედეგები თავის თავში მოიცავს თითოეული ალგორითმის 10 გამოცდას. შედეგების გაანალიზების შემდეგ შეიძლება გაგვაკეთოთ დასკვნა, რომ შემოთავაზებული ალგორითმი GA* წარმოადგენს საუკეთესოს, რადგან ის გამოცდის უმეტესებაში ობიექტურ გადაწყვეტას ეთანადება და გაანგარიშების პროცესის მინიმალური დრო აქვს, როგორც ცხრილი 22.-შია მოცემული.

ცხრილი 22.

ერთი გამოცდის ხანგრძლივობა

ალგორითმი	წამები
EMS	67
GA	24
ACO	8
PSO	8
GMASA	8
GASAVNS	8
GASA	5
HGAQSA	2
GA*	5

3.3. შემუშავებული მეთოდის პრაქტიკული აპრობაცია „Allianc Highline Tbilisi“ -ის შენობის არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების განხორციელებისას

განხილულია „Allianc Highline Tbilisi“ შენობის ფასადის მოწყობის პრაქტიკული მაგალითი, სამონტაჟო სამუშაოების ოპტიმალური მართვის თვალსაზრისით (სურ. 9).

Alliance Highline მრავალფუნქციური კომპლექსი არის მიმდინარე პროექტი ქ. თბილისში, რომელსაც ახორციელებს დეველოპერული ფირმა „ალიანს ჯგუფი“. კომპლექსი გამოირჩევა თავისი ექსკლუზიური არქიტექტურით და შედგება სამი კოშკისაგან: პირველი 40-სართულიანია, მეორე 33-სართულიანი, მესამე კი - 26-სართულიანი. ყველაზე პატარა კოშკში საერთაშორისო სასტუმრო ბრენდი "ვინდემ გარდენი" (Wyndham Garden), ხოლო დანარჩენ კოშკებში პრემიუმ კლასის აპარტამენტები განთავსდება. პროექტის ჯამური საინვესტიციო ღირებულება 75 მილიონი დოლარია.

კომპანია „მოდერნ ლაინი“-ის მიერ ჩატარდა მშენებარე ობიექტის ფასადის მოსაპირკეთებელი სამუშაოები. დამკვეთის მოთხოვნების გათვალისწინებით შეჩეული იქნა ფასადის თანამედროვე კომპოზიციური მასალები. (ვენგლირებადი სისტემა - AGROB BUCHTAL Keratwin k20 კერამიკული ფილა).



სურ. 9. „Allianc Highline Tbilisi“-ის შენობა

- ფასაღზე მოსაპირკეთებელი მასალების ხარჯვის მინიმიზაციის მიზნით შექმნილია ოპტიმიზაციის მოდელი ფილების ზომების „დისკრეტული პარამეტრული რიგის ოპტიმალური უნიფიკაციის ამოცანის“ სახით.

- დაპროექტებული ობიექტის არარეგულარული სტრუქტურის ხასიათის გამო (ფასადის წახნაგების არასტანდარტული ზომები) საჭირო გახდა ფასადის განშლების დეტალიზაცია და მოწყობის ალგორითმის შექმნა.

- მოდულური კოორდინაციის გართულებისა და კლასიკური ოპტიმიზაციის მეთოდებით მათემატიკური მოდელის შეუსაბამობის გამო შერჩეულ იქნა ე. წ. იმიტაციური მოდელირების მეთოდი, რომელმაც საშუალება მოგვცა გათვალისწინებულიყო ძნელად ფორმალიზებული (ადამიანური „კაპრიზები“) მოთხოვნები.

პროგრამული უზრუნველყოფა.

კომპიუტერული პროგრამა დაწერილია ალგორითმული ენაზე „JavaScript (დანართი 1), (ფრეიმვორკი „GatsbyJS“) ოპტიმალური განშლისა და ვარიანტების გადათვლის ალგორითმის გამოყენებით, პროგრამა უზრუნველყოფს ნებისმიერი მითითებული წახნაგის მოპირკეთებისთვის საჭირო შესაბამისი ფილების შერჩევის, განთავსებისა და დამუშავების (ჩამოჭრის) მოდელირებას.

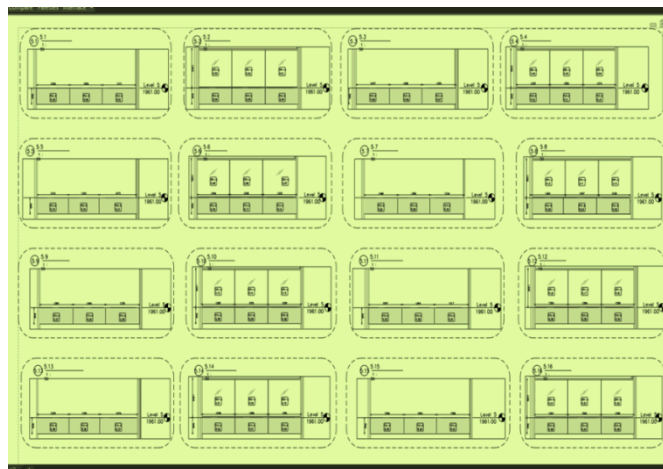
- Alliance Highline Algorithm

- ალგორითმის მუშაობის პრინციპი:

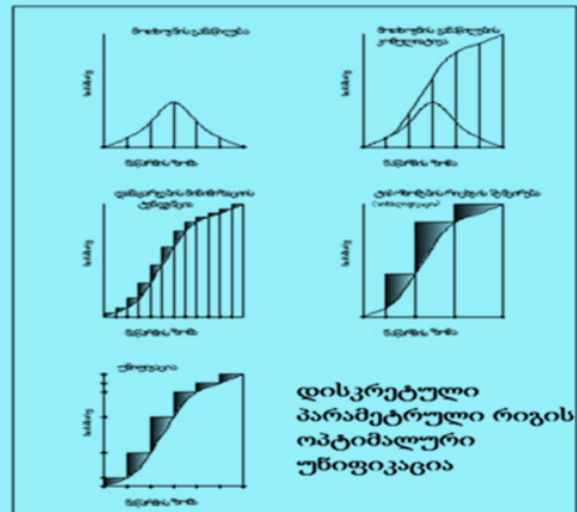
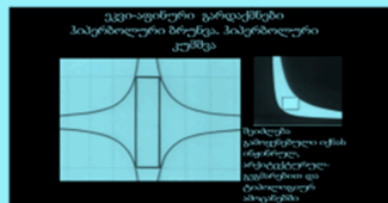
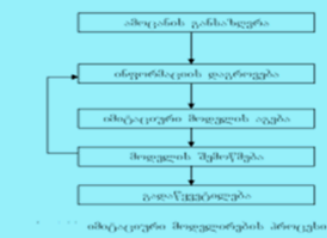
- ალგორითმი ცდილობს რომ იპოვოს მოცემული ფილების სიგრძეებიდან ისეთი კომბინაცია, რომ რაც შეიძლება ნაკლები ფილის სიგრძე დაეკარგოს მაშინ, როდესაც ამ კომბინაციას შეყვანილ წიბოს სიგრძეს შევუსაბამებთ.

- მოცემული ფილების პარამეტრებია:
- ფილების სიგრძეები: 120 125 130 135 140
- წიბოს სიგრძე: 4001სმ
- ფილების ზომები წიბოსთვის: 135 135 135
- ჩამოსაჭრელი ზომა ბოლო ფილიდან: 4

- შედეგი ფაქტიურად სამონტაჟო გეგმის ციფრული პროტოტიპია, რომელიც შეიძლება იყოს გამოხატული ციფრულად, გრაფიკულად და მომავალში 3D რობოტული ტექნოლოგიით (ნახ. 39).



5. მოდულური კორდინაციის გართულებისა და კლასიკური ოპტიმიზაციის მეთოდებზე მათემატიკური მოდელის შეესაბამების გამო შერჩეულ იქნა ე.წ. იმპტაციური მოდელირების მეთოდი, რომელმაც საშუალება მოგვცა გათვალისწინებულიყო ძნელად ფორმალიზებული (ადამიანური „კაპრიზები“) მოთხოვნები.



ნახ. 39. ალგორითმის მუშაობის სქემა

ანალოგიური ალგორითმი ჩვენ მიერ გამოყენებული იქნა სხვა შენობების პროექტირებისა და რეალიზაციის პროცესში. ნიუგონის სკოლის, პროექტირების დროს. სკოლა ქ. თბილისში მშენებარე პროექტია, ფასადი მოპირკეტებულია კომპოზიციური HPL პანელებით. პროექტის საინვესტიციო ღირებულებაა 5 მილიონი ევრო (სურ. 10., სურ. 11. და სურ. 12.).





სურ. 10. ნიგონის სკოლა

აღნიშნულ პროექტში ფასადის ფერადი გადაწყვეტა ინიცირებულ იქნა ე. წ. ევრონოვის დიაგრამის იდეით, რაც გამიხატება ფერადი ფილების განაწილებაში ფასადზე. კერძოდ: ზოგადად ეს მეთოდი წარმოადგენს ფრაქტალური გეომეტრიის კერძო ასპექტს, სადაც ფილების განთავსება განსაზღვრულია ე. წ. “რეაქტორის” ალბათური რანდომიზირებული ხასიათით (სტოქასტიური ფრაქტალი) [146].



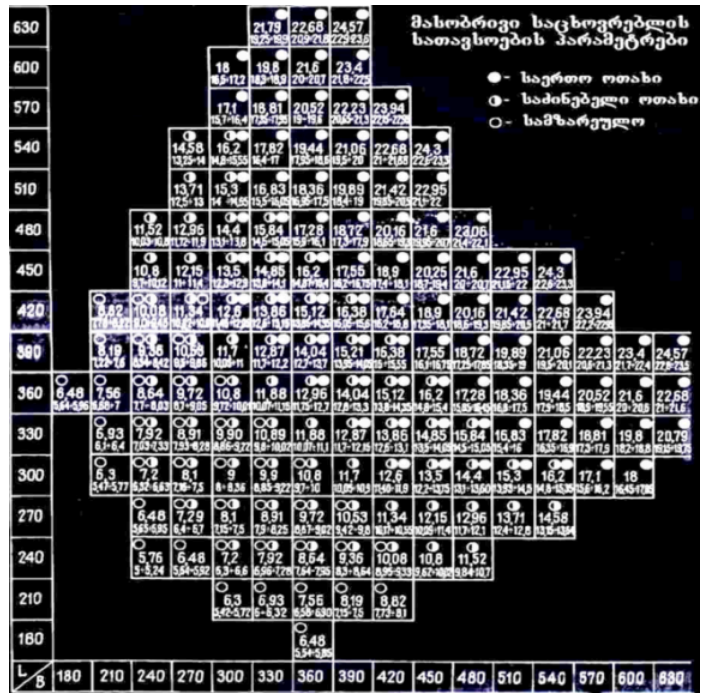
სურ. 11. თავისუფლების თეატრის ფასადი



სურ. 12. პეტრიაშვილის ქ. #46 მრავალბინიანი საცხოვრებელი სახლი

კონსტრუქციულ-გეგმარებითი ელემენტების პარამეტრების დადგენა.

ოპტიმალური, ალტერნატიული, სუბოპტიმალური და ნორმატიული კონსტრუქციულ-გეგმარებითი ელემენტების სიმრავლის ფორმირება, მათ შორის, „სინათლის ფრონტის“ და პარცელების გაბარიტების დადგენა (ნახ. 40. და სურ. 13. და სურ. 14.).



სურ. 13. მასობრივი საცხოვრებლის სათავსოების პარამეტრები



სურ. 14. კონსტრუქციულ-გეგმარებითი ელემენტების პარამეტრების დადგენა 3D სკანერით

3.4. შენობის ინფორმაციული მოდელირება 3D BIM

ამ ეტაპზე წარმოებს პროექტზე მონაცემთა ერთიანი ბაზის გენერაციის პროცესი. თავის თავში მონაცემები მოიცავს მშენებლობისთვის გამოყენებულ

შენობის კომპონენტებს. ინფორმაცია კომპონენტებზე უნდა შეიცავდეს მთელ გეომეტრიას და რეალური ობიექტის ყველა თვისებას.

მონაცემები მაგალითიდან ეყრდნობა დოკუმენტებს, რომლებიც მიღებული იყო უშუალოდ საპროექტო ოფისიდან. შემოთავაზებული მოდელის შემოწმების მიზნით შემუშავებულია საინფორმაციო 3D მოდელი.

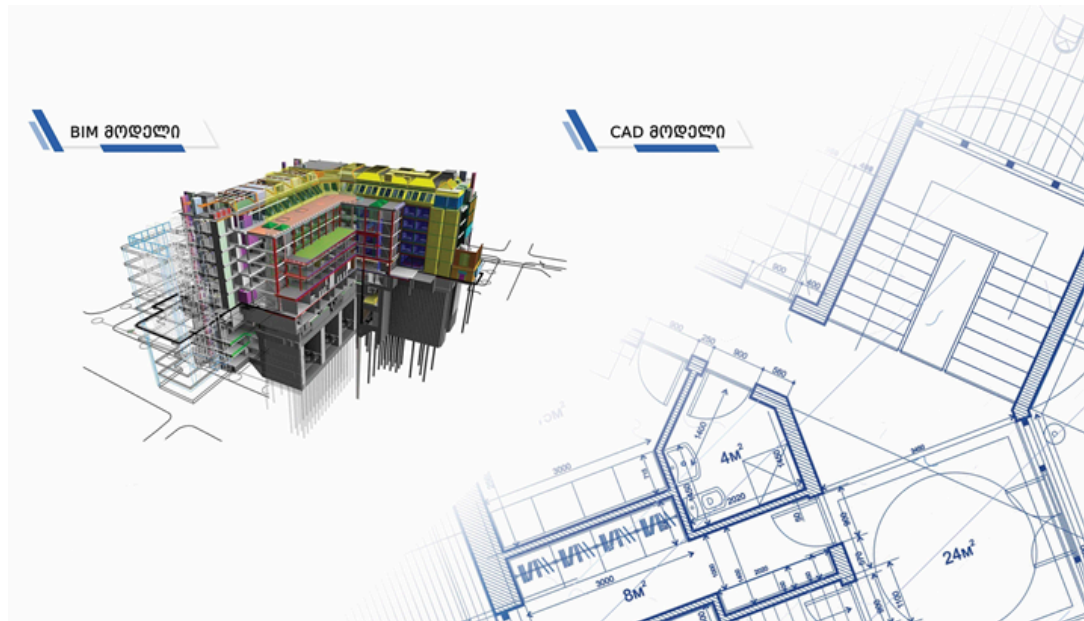
3D BIM პროექტირების პროცესი შედგება შემდეგი ბიჯებისაგან:

1. პროექტის ნახაზების ანალიზი;
2. პროექტის სპეციფიკაციის ანალიზი;
3. შენობის მოდელირება.

პროექტის ნახაზები ძირითადი ტექნიკური დოკუმენტაციებია, რომლის მიხედვითაც შენობას აგებენ. ისინი მოიცავენ გენერალურ გეგმას, გეგმებს, ჭრილებს და ფასადებს.

პროექტის სპეციფიკაციები შეიცავენ ყველა ტექნიკური მოთხოვნის, მშენებლობის პარამეტრების, ელემენტების დაწვრილებით აღწერას, რომელთა მონგაჟიც განხორციელდება ამა თუ იმ სამშენებლო ობიექტის აშენებისას.

ნახაზებისა და მოცემული მაგალითის სპეციფიკაციის საფუძველზე შექმნილი იყო შენობის საინფორმაციო მოდელი, რომელიც შეიცავთ თავში 3D მოდელს და ყველა კონსტრუქციული ელემენტები იდენტიფიკაციურ პარამეტრებს. ძირითად ელემენტებს, ან ნაწილებს მიაკუთვნებენ საძირკვლებს, სვეტებს, სართულშორისი გადახურვებს, კედლებს, გიხრებს, კიბეებს, ფანჯრებს, კარს, სახურავს, შიგა მოპირკეთებას და გარე მოპირკეთებას (სურ. 15). გამოხატავს მოცემული მაგალითის 3D BIM-ს, რომელიც ორგანიზებული და შემუშავებულია Autodesk Revit პლატფორმის ბაზაზე.



სურ.15. შენობის 3D მოდელი

მასალების და შემადგენელი კომპონენტების რაოდენობრივი ანალიზის სამუშაო წიგნების ფორმირება.

მოცემულ ბიჯზე შენობის აგებული 3D მოდელი ექსპორტირებული იყო პროგრამაში Autodesk Navisworks. ფორმირებულ იქნა შენობის კომპონენტების სია, ჩაგარდა შენობის კომპონენტების კლასიფიკაცია და განისაზღვრა კომპონენტების ჯგუფები მეორე თავში შემოთავაზებული პროექტის იერარქიული სტრუქტურის საფუძველზე. თითოეული ცალკეული კომპონენტის და კომპონენტების ჯგუფებისთვის, რომლებიც ერთდროულად აიგება განსაზღვრული იქნა იდენტიფიკაციური კოდი ID.

კომპონენტების კატალოგში გაერთიანდა კომპონენტების სია და კომპონენტების იდენტიფიკაციური კოდები. შემდეგ ჩაგარდა ობიექტის მოდელის და პარამეტრების ავტომატიზებული გაანგარიშება შენობის მოდელის სხვადასხვა კომპონენტების ამოსაკლებად.

სურ. 16.-ზე ნაჩვენებია სამუშაო წიგნის ნაწილი შენობის კომპონენტების რაოდენობის მითითებით. მარცხნივ განლაგებულია შენობის კომპონენტების ჯგუფების მონაცემები და მათი შესაბამისი ID. მარჯვნივ ნაჩვენებია თითოეული ჯგუფის ელემენტები და მათი გაანგარიშებითი ფართობი და მოცულობები.

Items	WBS
inish A(14)	104
inish B(11)	105
inish C(14)	106
olumns, Shear walls A(16)	107
olumns, Shear walls B(12)	108
olumns, Shear walls C(16)	109
ab, Stairs A(1)	110
ab, Stairs B(2)	111
ab, Stairs C(1)	112
rickworks A(12)	113
rickworks B(20)	114
rickworks C(12)	115

Status	WBS/RBS	Name	Volume
	107	7th F. Columns, Shear walls A	11.068 m³

Status	WBS	Object	ModelArea	ModelVolume
	107.11	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³
	107.12	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³
	107.13	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³
	107.14	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³
	107.15	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³
	107.16	M. Rectangular Column	3.510 m²	0.693 m³

სურ. 16. შენობის კომპონენტების რაოდენობის საშუალო წიგნი

3.5. საშუაოების თანმიმდევრობის, რესურსების, საშუაოს ხანგრძლივობისა და თითოეული საშუაოს ღირებულების განსაზღვრა

შენობის მოდელის გაანგარიშების მონაცემები ამ ეტაპზე ექსპორტირდებოდა შემდგომი განხილვისთვის პროგრამაში Microsoft Excel.

შემუშავებული მაკროსის Microsoft Excel და ძველი ანალოგიური პროექტების მონაცემების გამოყენებით ავტომატურად განსაზღვრული იყო საშუაოები, საჭირო შენობის კომპონენტების საძირკვლების, სვეტების, სართულშორისი გადახურვების, კედლების, ტიხრების, კიბეების, სახურავის, შიგა და გარე მოპირკეთების შესრულებისთვის.

შემდგომში საშუაოებისათვის დანიშნული იყო რესურსები. რესურსების გამოუმუშავების ნორმები დღე-ღამეში და მათი ღირებულების დღე-ღამური ნორმები ავტომატურად ამოღებული იყო ძველი წლების ანალოგიური პროექტების მონაცემთა ცხრილებიდან. გამოთვლილი იყო თითოეული საშუაოს ხანგრძლივობა და ღირებულება. ასევე განსაზღვრული იყო საშუაოებს შორის ლოგიკური დამოკიდებულება.

სურ 17-ზე ნაჩვენებია საშუაოთა ყველა პარამეტრის ცხრილი. ეს პარამეტრები შეიცავს ID შენობის კომპონენტებს, კომპონენტები, კატეგორიები,

მოედნები, მოცულობები, სამუშაოები, ხანგრძლივობები და შესაბამის სამუშაოთა ღირებულებები.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
34	2nd F. Columns, Shear walls C	Columns	56.16	11.09	16	Formwork for Columns	20	2.81	1500	871			
						Reinforcement for Columns	10	1.11	3600	10399			
						Concrete for Columns	50	0.22	6500	5980			
						Formwork Remove for Columns	30	1.87	800	0			
								6.01		29650			
35	2nd F. Slab, Stairs A	Slab	344.90	68.98	1	Formwork for Slab	80	4.31	2500	5350			
						Reinforcement for Slab	30	2.29	5400	64684			
						Concrete for Slab	80	0.86	6500	18542			
						Formwork Remove for Slab	150	2.29	800	0			
								9.75		103776			
36	2nd F. Slab, Stairs B	Slab	356.18	72.65	2	Formwork for Slab	80	4.45	2500	5525			
						Reinforcement for Slab	30	2.42	5400	68125			
						Concrete for Slab	80	0.91	6500	19528			
						Formwork Remove for Slab	150	2.37	800	0			
								10.15		108378			
37	2nd F. Slab, Stairs C	Slab	344.90	68.98	1	Formwork for Slab	80	4.31	2500	5350			
						Reinforcement for Slab	30	2.29	5400	64684			
						Concrete for Slab	80	0.86	6500	18542			
						Formwork Remove for Slab	150	2.29	800	0			
							0	9.75		103776			
38	2nd F. Brickworks A	Walls	354.04	41.29	12	Brickworks	80	4.43	1700	15800			
								4.43		17500			

სურ.17. პროექტის სამუშაოთა ყველა პარამეტრის განსაზღვრა

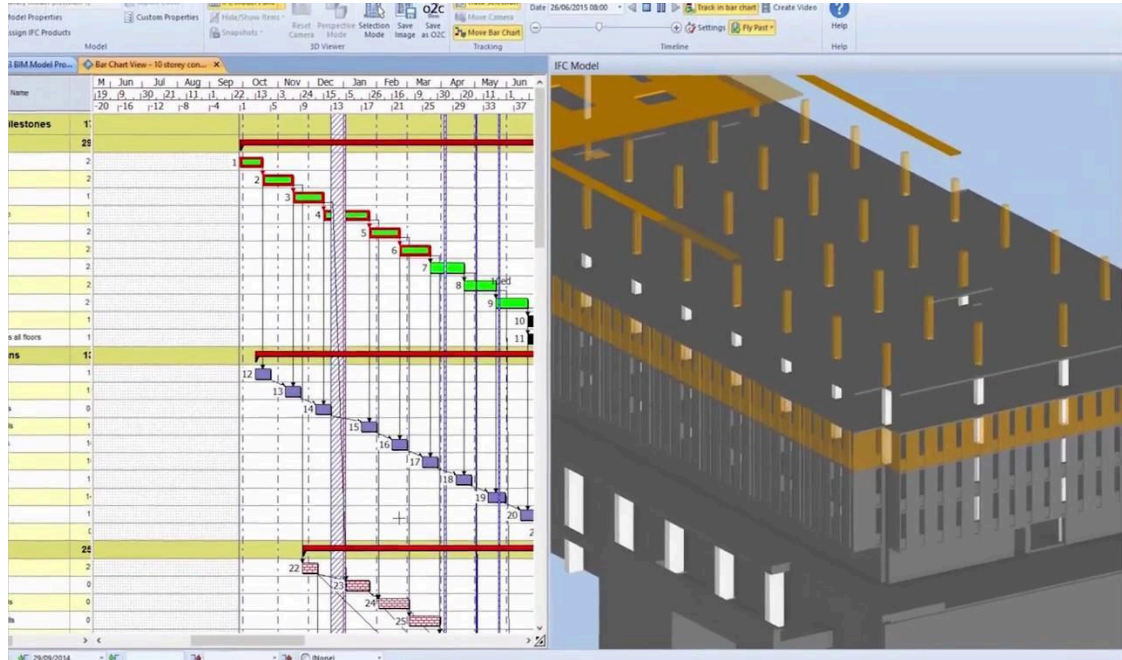
3.6. პროექტის კალენდარული გეგმის გაანგარიშება

ამ ეტაპზე Microsoft Excel არედან Microsoft Project პროგრამაში ექსპორტირდა მონაცემები ყველა სამუშაოზე, სამუშაოებს შორის თითოეული სამუშაოს ხანგრძლივობის დამოკიდებულების მონაცემები პროექტის ზუსტი და სრული განრიგის მისაღებად. ეს განრიგი შეიცავს:

- კრიტიკული გზის გაანგარიშება კრიტიკული სამუშაოების გამოვლენით;
- სამუშაოთა დასრულების ადრეული და გვიანი დროების განსაზღვრა;
- დროის რეზერვის განსაზღვრა არაკრიტიკული სამუშაოებისთვის;
- პროექტის დასაწყისისა და დასრულების დროის განსაზღვრა.

სურ. 18.-ზე გამოსახულია Microsoft Project პროგრამის ინტერფეისი. მარცხნივ განლაგებულია პროექტის რეალიზაციის პარამეტრების მონაცემები: სამუშაოების სია, სამუშაოთა დაწყებისა და დასრულების თარიღები. მარჯვნივ გამოსახულია განტის დიაგრამა.

სამუშაოების დაწყებისა და დასრულების მოცემული თარიღები ინახება CSV ფაილის ფორმატში, იმისათვის რომ შემდეგ შეუერთდეს შენობის 3D მოდელს პროექტის 4D მოდელის შექმნისთვის.



სურ. 18 შენობის კალენდარული გეგმის გაანგარიშება

3.7. პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია

პროექტის სამუშაოთა შესრულების ნორმალური რეჟიმის გამოყენებისას ისევე, როგორც რეალური მშენებლობისას პროექტის შესრულების დრო იყო 260 დროის ერთეული და მისი ღირებულება 8192468 ღირებულების ერთეული. მაგრამ, ნორმალური რეჟიმის გამოყენებას ყველა შემთხვევაში არ მიეყვართ პროექტის მინიმალური საერთო ღირებულების მიღებასთან.

მხედველობაში თუ მივიღებთ, რომ არსებობს სამუშაოთა შესრულების ხერხების (რეჟიმების) სხვადასხვა ალტერნატივები, რომლებსაც შეუძლიათ ჩაირთონ თავის თავში რაოდენობების აღამიანების, დანადგარების, მეთოდების და ტექნოლოგიების შესაძლო კომბინაციები, ოპტიმალური გადაწყვეტის ძებნა (პროექტის შესრულების საერთო მინიმალური ღირებულების) დამდევლ პროცესად რჩება, ბევრ დროს გვართმევს.

მოცემული პროექტი კომპონენტების 141 ჯგუფისგან და დაახლოებით 400 სამუშაოსგან შედგება. შემოთავაზებული ალგორითმის აპრობირების მიზნით პროექტის თითოეული სამშენებლო ოპერაციისთვის გამოყენებული რესურსების საფუძველზე ფორმირებული იყო მშენებლობის ორი ალტერნატიული რეჟიმი. მოცემული პროექტის შესაძლო ალტერნატიული გეგმის საერთო რაოდენობამ შეიძლება $1,87e + 67$ მიაღწიოს, ამიტომ სამშენებლო სამუშაოების შესრულების საუკეთესო სტრატეგიის განსაზღვრისთვის გადარჩევის მეთოდით, პრობლემატურია.

შემოთავაზებული ალგორითმი გვთავაზობს ოპტიმიზაციის 3 სცენარს:

1. პროექტის ღირებულების მინიმიზაცია;
2. პროექტის ხანგრძლივობის მინიმიზაცია;
3. პროექტის საჭირო ხანგრძლივობის მიღწევა.

შემუშავებული ალგორითმის გამოყენების შედეგები ნაჩვენებია ცხრილი 3.12-ში.

სოციალურ-ეკონომიკური ეფექტიანობა. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების ღირებულების მინიმიზაციის სცენარის გამოყენების დროს გაანგარიშების შედეგებმა გვაჩვენა, რომ პროექტის ღირებულება 8156588 ღირებულების ერთეულს შეადგენს, ეს კი საერთო ნორმალურ ღირებულებაზე ნაკლებია 0,44%-ით დროის ეკონომიით 7,69%.

პროექტის ხანგრძლივობის მინიმიზაციის სცენარის გამოყენების დროს შედეგებმა გვაჩვენა, რომ პროექტის მინიმალური ხანგრძლივობა 165 დროის ერთეულს შეადგენს და ის პროექტის ნორმალურ ხანგრძლივობაზე 36,54%-ით ნაკლებია, ხოლო ღირებულებით 5,37%-ით მეტი.

ცხრილი 23.-ში ნაჩვენებია პროექტის საჭირო ხანგრძლივობის მიღწევის რამდენიმე სცენარი. მაგალითად, თუ პროექტის ხანგრძლივობა 200 დროის ერთეულის ტოლია, მაშინ ის პროექტის ნორმალურ ხანგრძლივობაზე 23,08%-ით ნაკლებია, მაგრამ ღირებულებით 2,44%-ით მეტი.

ცხრილი 23.

შემოთავაზებული ალგორითმის შედეგები

	პროექტის ღირ	პროექტის ღირებულება	დანახარჯების ეკონომია	დროის ეკონომია

ნორმალური რეჟიმი	260	8192468		
მინიმალური ღირებულება	240	8156588	0,44 %	7,69 %
მინიმალური დრო	165	8632041	- 5,37 %	36,54 %
საჭირო დრო	250	8179960	0,15 %	3,85 % ■
	230	8225041	-0,40 %	11,54%
	220	8290837	- 1,20%	15,38%
	210	8328026	- 1,65 %	19,23 %
	200	8392223	- 2,44 %	23,08 %
	190	8467754	- 3,36 %	26,92 %
	180	8508888	- 3,86 %	30,77 %
	170	8608472	- 5,08 %	34,62 %

ალგორითმები იცვებოდა თითოეული სცენარისთვის 10 გაანგარიშებაზე. შედეგები ნაჩვენებია ცხრილი 24.-ში წარმატების პროცენტი თითოეული ამოცანის მინიმალურ მნიშვნელობამდე მიღწეული ცდების რაოდენობის (ღირებულების და დროის) ფარდობაა გამოცდათა საერთო რიცხვთან. ალგორითმის დამუშავების დრო ერთი გამოცდის ხანგრძლივობის გოლია. მაგალითად, გაანგარიშებაში ღირებულების მინიმალურობის მიზნით შედეგი 8157616 ღირებულების ერთეული მიღებული იყო ორჯერ, შედეგი 8156588 ღირებულების ერთეული მიღებული იყო რვაჯერ, ამავე დროს ყველა გამოცდისას პროექტის ხანგრძლივობად მიღებული იყო 240 დროის ერთეული.

ცხრილი 24.

გამოცდის შედეგები

ამოცანა	მინიმალური ღირებულება	საშუალო ღირებულება	მინიმალური ხანგრძლივობა	საშუალო ხანგრძლივობა	წარმატების %	დამუშავების დრო წმ.
მინიმალური ღირებულება	8156588	8156794	240	240	80	5

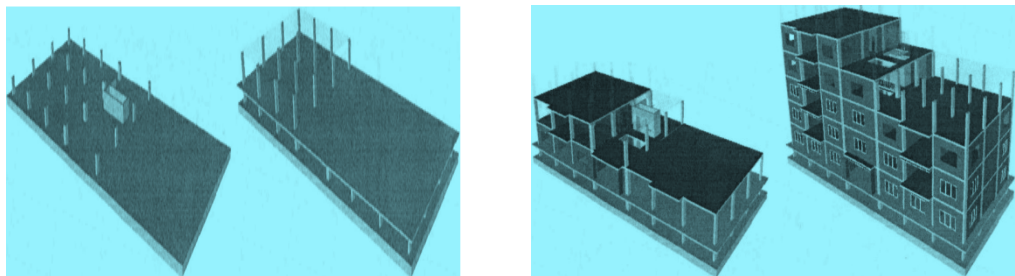
მინიმალური ღირსება	8632041	8637971	165	165	60	5
საჭირო ღირსება	8392223	8407563	200	200	60	7

3.8. პროექტის 4D მოდელის სიმულაცია

სამშენებლო სამუშაოების კალენდრული გეგმა შეიძლება უშუალოდ Navisworks შექმნათ, ან მისი იმპორტირება მოვახდინოთ Microsoft Project პროგრამიდან. იმის შემდეგ, რაც Navisworks აღწერილია სამშენებლო სამუშაოები, აუცილებელი გახდა დავაკავშიროთ სამუშაოები და მოდელის კომპონენტები ურთიერთკავშირის გეგმების მეთოდით.

ურთიერთკავშირის გეგმების გასამარტივებლად გამოიყენებოდა კომპონენტების ნაკრები კატეგორიების მიხედვით, ე.ი. ობიექტების ჯგუფები, გაერთიანებული განსაკუთრებული იდენტიფიკაციური კოდის ID პრინციპით, მოდელი ID-ზე მონაცემებს შეიცავს და მათი დახმარებით კომპონენტები მიეზღვნება შესაბამის სამშენებლო სამუშაოებს.

პროექტის 4D მოდელი შენობის მოდელის აშენების სიმულირებას ახდენს მშენებლობის დაწყებისა და დასასრულის თარიღების შესაბამისობაში პროექტის სიმულაცია საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ მშენებლობის პროცესის ვიზუალიზაცია, რაც თვალსაჩინოდ გადაცემს მთელი პროცესის იოლად, ალსაქმელად, გასაგებ და წარმოსადგენ ინფორმაციას (ნახ. 41.).



ნახ. 41. პროექტის 4D მოდელი

3.9. სამუშაო სივრცეების ვიზუალიზაცია

სამუშაოთა კალენდარული გეგმა გულისხმობს სხვადასხვა სამუშაოთა პარალელურ წარმართვას, მაგრამ არ განიხილავს სამშენებლო წარმოების სამუშაო მონებს, რამაც შეიძლება სამუშაო სივრცეების გადაკვეთა გამოიწვიოს.

აუცილებელია უზრუნველყოთ სამუშაო სივრცეებთან დაკავშირებული პრობლემების აღრეული იდენტიფიკაცია, იმისათვის, რომ შევამციროთ პროექტის განხორციელების გეგმიდან გადახვევა. ეს შეიძლება შემდეგი მოქმედებების შესრულებით მოვახდინოთ.

მშენებლობების თითოეული სამუშაოს დაწყებისა და დასრულების თარიღები, კალენდარული გეგმა, რომლებიც შენობის თითოეულ კომპონენტთანაა შესაბამისი 3D მოდელი, უკავშირდებიან სამუშაო სივრცეებს, რომ ასახონ ისინი 4D რეჟიმში.

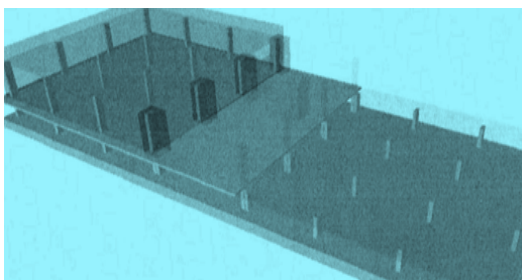
მშენებლობის თითოეული გეგმის კომპონენტებისა და სამუშაო სივრცეების 4D ვიზუალიზაციის განხილვისას, შეიძლება არსებული კონფლიქტების გათვლა და განსაზღვრა, თუ რომელ გეგმას აქვს კონფლიქტების მინიმალური რაოდენობა.

სამუშაო სივრცეების ზომები გაიცემოდა შენობის ასაგები კომპონენტების ზომების გათვალისწინებით.

ნახ. 42.-ზე ნაჩვენებია სამუშაო სივრცე. პირველი სართულის ფილის მშენებლობისთვის გამოყოფილი (ზონა „A“) და სამუშაო სივრცე პირველი სართულის სვეტების მშენებლობისთვის (ზონა „B“). პროექტის 4D გრაფიკის განხილვისას გამოჩნდა, რომ არსებობს ამ სამუშაოებს შორის კონფლიქტები.

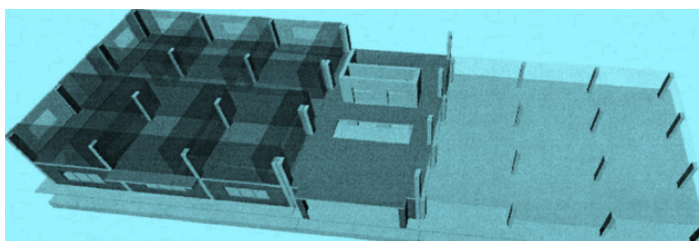
ამ კონფლიქტის მოსახსნელად, სვეტების მშენებლობა უნდა გადაიდოს და სამუშაოები ჩატარდეს სარგულშორისი გადახურვის მშენებლობის დასრულების შემდეგ. მაგრამ, სვეტების საერთო ღრის რეგერვი ნულის ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ ნებისმიერი შეფერხება სამუშაოში სვეტების აგების ღრის მთელ პროექტს შეაფერხებს.

არსებობს ამ პრობლემის გადაწყვეტის სხვა შესაძლებლობა, სარგულშორისი გადახურვის სამუშაოების დაჩქარების და სვეტების აგების დაწყების საჭირო ღრომდე, დასრულების ხარჯზე.



ნახ. 42. სამუშაო სივრცეების და კონფლიქტების 1 4D ვიზუალიზაცია

ნახ. 43.-ზე ნაჩვენებია სამუშაო სივრცეები, რომლებიც აუცილებელია „A“ მონაში კედლების აგების სამუშაოთა შესრულებისთვის. პროექტის 4D გრაფიკის განხილვისას, გამოჩნდა, რომ კონფლიქტი ასევე არსებობს სამუშაოთა შორისაც. რამდენადაც სამუშაოები ერთ მონაში მიმდინარეობს და ყველა ერთი და იგივე კატეგორიას მიეკუთვნებიან, ამიტომ ასეთი კონფლიქტები შეიძლება გადაყვეტილი იყოს სამუშაოთა ნაკადის მიმართულების რეორგანიზაციის გზით (შესრულების მიმართულება).



ნახ. 43. სამუშაო სივრცეების და კონფლიქტების 2 4D ვიზუალიზაცია

3.10. სამუშაოს შედეგების ანალიზი და შემდგომი კვლევების პერსპექტიული მიმართულებები

პროექტების და კალენდარული დაგეგმვის ინტეგრირებული ავტომატიზაციის შემუშავებაზე შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია მოკლე დროში შევიმუშაოთ პროექტის 4D მოდელი და შევაფასოთ პროექტის სამუშაოთა ხერხების სხვადასხვა ვარიანტები საუკეთესო კალენდარული გეგმის შესამუშავებლად.

შემოთავაზებული GA მეთოდის გამოყენებით სატესტე მაგალითების გაანგარიშების რიცხვითი შედეგების შედარებამ ამოცანის სხვა მეთოდებით გადაწყვეტის შედეგებთან, მათ შორის სამეცნიერო ანალიზში, საშუალება მოგვცა ჩაგვეყარებინა შესრულებული გაანგარიშების ნამდვილობის და სიზუსტის შეფასება, რამაც გვაჩვენა, რომ კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაციის შემუშავებულ მეთოდს მონაცემთა დამუშავების პროცესის მინიმალური დრო სჭირდება, ემთხვევა ოპტიმალურ გადაწყვეტას და საშუალებას გვაძლევს მოვძებნოთ პროექტის შესრულების რამოდენიმე სცენარი.

პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ სამუშაო სივრცის ორგანიზებასთან დაკავშირებული პრობლემების აღრეული იდენტიფიკაცია საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ მოცდენის დრო, გავაუმჯობესოთ სამუშაოთა ხარისხი, ასევე შევამციროთ პროექტის განხორციელების გეგმიდან გადახრა.

შემდგომი კვლევის პერსპექტიული მიმართულებიდან შეიძლება ორი მიმართულება გამოვყოთ:

- შეზღუდული რესურსების პრობლემის აღრიცხვა, როცა რომელიმე მომენტში საჭირო რესურსების რაოდენობა აღემატება რესურსების ხელმისაწვდომ რაოდენობას;
- სამუშაო სივრცეების ყველა სახეობის აღრიცხვა (არა მხოლოდ შენობის კომპონენტების ირგვლივ, არამედ მშენებლობის მთელ მოედანზე) საჭირო მშენებლობის მსვლელობისას.

მე-3 თავის დასკვნები

1. იმ შემთხვევასი, როცა მათემატიკური მოდელები დამაკმაყოფილებელ შედეგს იძლევიან მხოლოდ მცირე ზომის არქიტექტურულ-სამსენებლო პროექტირების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად, შემოთავაზებულმა ოპტიმიზაციის მეთოდიკამ კარგი შედეგები გვაჩვენა პროექტის სამუშაოთა რიგ მნიშვნელოვან შემთხვევაში.
2. შემოთავაზებული ალგორითმის შედეგები ანალოგიური იყო სხვა ევოლიციურ ალგორითმებთან, რასაც ამტკიცებს გაანგარიშებათა უტყუარობა, რიგ შემთხვევებში შედეგები კიდევ უკეთესი იყო.

3. შემოთავაზებული დაჩქარებული გენეტიკური ალგორითმი იყენებს პოპულაციის და თაობათა ნაკლებ რიცხვს, ვიდრე სხვა ევოლუციური ალგორითმები, ეს კი ნიშნავს, რომ შემოთავაზებულ ალგორითმს შეუძლია გამოთვლის დროის შემცირება.
4. ოპტიმიზაციის შემოთავაზებულმა მეთოდებმა აჩვენა ალგორითმის უნარი, გადაწყვიტოს ამოცანები ლოგიკური ფარდობის სხვადასხვა ტიპებით და სამუშაოებს შორის წყვეტების გათვალისწინებით.
5. შემუშავებულმა პროგრამამ შეიძლება წარმოადგინოს პროექტის შესრულების ხანგრძლივობის გაანგარიშების სხვადასხვა სცენარი შესაბამის ხარჯებთან ერთად, იმისათვის, რომ მიეხმაროს მშენებლობის გრაფიკის ოპტიმიზაციის გადაწყვეტის მიღებაში.
6. პროგრამამ აჩვენა თავისი უნარი რეალური პროექტის და ოპტიმიზაციის სცენარების მოქნილი გამოყენების ამოცანების გადასაწყვეტად, სხვადასხვა კრიტერიუმებისგან დამოკიდებულებით.
7. სამუშაოთა შესრულების სხვადასხვა შესაძლო ხერხების კომბინაცია პროექტის მრავალი ალტერნატიული გეგმის გენერირებას ახდენს თავისი ხანგრძლივობით და ღირებულებებით, მაგრამ, შემოთავაზებული ალგორითმის პროგრამული რეალიზაცია შედეგს ძალიან მოკლე დროში გვაძლევს.
8. კორექტირებული და შევსებული 3D BIM, საშუალებას გვაძლევს მთლიანად ან ნაწილობრივ მოვახდინოთ ანგარიშებისა და ოპერაციების ავტომატიზება, რომლებსაც ადრე ხელით ვასრულებდით.
9. შემოთავაზებული 4D მოდელი საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ სამშენებლო პროცესის ვიზუალიზაცია, რაც გვაძლევს თვალსაჩინო, იოლად აღსაქმელ ინფორმაციას მთელი პროცესის წარმოსადგენად და გასაგებად.
10. სამუშაო სივრცეებთან ორგანიზებასთან დაკავშირებული პრობლემების ადრეული იდენტიფიკაცია, ამცირებს მოცდენის დროს, აუმჯობესებს სამუშაოთა ხარისხს და ამცირებს პროექტის განხორციელების გეგმიდან გადახრას.
11. მშენებლობის თითოეული გრაფიკის შენობის კომპონენტების და სამუშაო სივრცეების 4D ვიზუალიზაციის კომპლექსური განხილვისას, რომელსაც

შემოთავაზებული გენეტიკური ალგორითმით ვიღებთ, შესაძლებელია გამოვითვალოთ არსებული სამუშაო სივრცეების კონფლიქტები და განესაზღვროთ გრაფიკი კონფლიქტების მინიმალური რაოდენობით.

ძირითადი დასკვნები

ჩატარებული კვლევების შედეგები საშუალებას იძლევა გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების და კალენდარული დაგეგმარების ავტომატიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისას, ჩატარებული სამეცნიერო და პრაქტიკული სამუშაოების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ჯერ კიდევ რჩება თეორიული და გამოთვლითი პრობლემები, რომლებიც დაკავშირებულია საინფორმაციო ნაკადების, გამომთვლელი რესურსებისა და გადაწყვეტის უნივერსალური მეთოდების გამოყენების ინტეგრაციასთან.
2. მოცემულ კვლევებში შემოთავაზებულია პროექტირების ავტომატიზებული ფორმირების 4D მოდელის მეთოდოლოგია, რომელიც მიღებულია არსებული შენობის ინფორმაციული მოდელის და ანალოგიური რეალიზებული პროექტების ინფორმაციის საფუძველზე, სადაც ინტეგრირებულია სხვადასხვა სტანდარტული პროგრამული პროდუქტები და შემუშავებული პროგრამული მოდულები.
3. შემუშავებულია გენეტიკურ ალგორითმებზე დაფუძნებული მრავალკრიტერიული ოპტიმიზაციის მეთოდოლოგია მშენებლობის კალენდარული დაგეგმარების პროცესის ავტომატიზაციისას მშენებლობის ვადის და პროექტის საერთო ღირებულების მინიმიზაციის მიზნით, ასევე პროექტის სამუშაოთა შესრულების სხვადასხვა შესაძლო ხერხების ანალიზისთვის.

4. შეშუშავებულია გენეტიკური ალგორითმის მოდიფიკაციები პოპულაციაში ნაირგვარობის შესანარჩუნებლად, დომინირებული ინდივიდუალების გავლენის და აღრეული შეერთების რისკის თავიდან ასაცილებლად ლოკალურ ოპტიუმში, რომლებიც ფლობენ არა მხოლოდ გამოანგარიშების კარგ სიჩქარეს, არამედ იყენებენ ბეზის ალგორითმის მოქნილი აწყობის შეზუსტებას, ფუნქციის ფართო კლასის ექსტრემუმების მოსაძებნად.
5. შეშუშავებული გენეტიკური ალგორითმების არეალში შემოთავაზებულია სამუშაოთა კალენდარული გეგმის დროის შემცირების მეთოდოლოგია.
6. შეშუშავებულია მშენებლობის სამუშაოთა სივრცეების და კალენდარული გეგმის შედგენის ინფორმაციული მოდელი, რომელიც პარალელურ სამუშაოებს შორის კონფლიქტების შემცირების მიზნით სამუშაო სივრცეებს ასახავს 4D რეჟიმში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Антонова А. С., Аксенов К. А. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ, Современные проблемы науки и образования, 2012, №6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7409-> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
2. Антонова А. С., и др. Применение мультиагентного и эволюционного моделирования при планировании работ, Научно-технические ведомости, СПбГПУ, № 6(186), 2013, С. Петербург, С. 126-136 <https://science.spbu.ru/publications/> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
3. Бирюков А. Н., Ивановский В. С., и др.. Основы организации, экономики и управления в строительстве, 2012, Москва, 432 с. <http://centrobuchenia.ru/d/upravlenie stroitelstvom.pdf> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
4. Волков А. А. Современные и перспективные информационные технологии в строительстве, 2015, №9, С. 5-6. <https://profspo.ru/books/40193> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
5. Волков А. А., и др. Интерактивное планирование ремонтных работ для жилых зданий, МГСУ, 2013, №4. С. 209—213.
6. Вороновский. Г. К.. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности, МГСУ, 2013, №4. [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/32404/3/Voronovskiy Geneticheskie algoritmy 1997.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/32404/3/Voronovskiy%20Geneticheskie%20algoritmy%201997.pdf) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
7. Гинзбург А. В. Системы автоматизации проектирования в строительстве: Учебник для вузов, 2014.-328 с. <https://elima.ru/books/?id=3755> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
8. Емельянов Д. И., Тихоненко А. А., Моделирование в решении задач управления проектами, Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, Серия: Высокие технологии, Экология, 2013, №1. С. 333-340. <https://tekhnosfera.com/modelirovanie-planov-proizvodstva-stroite>

[lno-montazhnyh-rabot-na-osnove-obobschennyh-matrichno-setevyh-modeley-s-ispolzov](#) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.

9. Игнатов В. П., Игнатова Е. В. Эффективное использование информационной модели здания. М., Вестник МГСУ, 2011, том 1, N 1, стр. 321-324.
<https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnoe-ispolzovanie-informatsionnoy-modeli-stroitel'nogo-obekta-1/viewer> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
10. Игнатова Е. В. Решение задач на основе информационной модели здания, Научно-технический журнал Вестник, МГСУ, 2012, №9, С.241-246.
<https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-zadach-na-osnove-informatsionnoy-modeli-zdaniya-1/viewer> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
11. Ильин А. И. Планирование на предприятии, Мн., Новое знание, 2014. 668 с.
<https://znanium.com/catalog/document?id=16987>
<https://altairbook.com/go2/6731237.html> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
12. Каширина И. Л. Генетический алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях специального вида, Вестник, ВГУ, 2003, №1, с. 128-131.
<http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2015/02/2015-02-10.pdf> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
13. Клименко А.Б., Клименко В. В. Разработка программного обеспечения: планирование в условиях неопределенности, Вестник таганрогского института управления и экономики, №1, 2010, С. 72-76.
<https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-planirovanie-v-usloviyah-neopredelennosti/viewer> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
14. Кононенко И. В., Емельянова Е. В. Математическая модель и метод минимизации затрат по проекту при ограничениях на сроки выполнения работ, Харьков. «ХПИ», 2019, №4, С. 46-53.
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/3244> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
15. Кононенко И. В., и др. Математическая модель и метод минимизации сроков выполнения работ по проекту, Восточно-европейский журнал передовых технологий, Харьков, 2007, №2 (26), С. 16-20.
<https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskaya-model-i-metod>

[-optimizatsii-soderzhaniya-proekta-s-tochki-zreniya-vremeni-i-stoimosti-ego-vypolneniya](#) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.

16. Кремер О. Б., и др. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма, Вестник Воронежского государственного технического университета, №3, 2012, С.21-24. <https://esik.magtu.ru/doc/2019-4/21-28.pdf> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
17. Кузнецов С. М., и др.. Оценка организационно-технологической надежности строительства зданий и сооружений, Известия высших учебных заведений, Строительство, №2, 2016, С. 47-52. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9296765> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
18. Курейчик В. М., и др. Эволюционные алгоритмы: генетическое программирование. Обзор, Известия РАН. Теория и системы управления, 2002, №1, С.127-137.
19. Лукманова И. Г. Управление проектами в инвестиционно-строительной сфере, МГСУ, Москва, 2012. С. 172. <https://www.iprbookshop.ru/16323.html> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
20. Лясковская Е. А., и др. Управление реализацией строительных проектов: проблемы и перспективы, Экономика, управление и инвестиции, № 1(1), 2018. С. 3. [http://euii.esrae.ru/pdf/2013/1\(1\)/4.pdf](http://euii.esrae.ru/pdf/2013/1(1)/4.pdf) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
21. Мазур И. И. Управление инвестиционно-строительными проектами: международный подход, Construction project management: international approach. Москва, 2010, С. 736. <https://search.rsl.ru/ru/record/01004397075> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
22. Мищенко В. Я., и др. Разработка методики оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства на основе генетических алгоритмов, Промышленное и гражданское строительство, 2013, №11, с. 68-70.
23. Мышенков К. С., и др.. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма,

Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2016, № 9.

24. Пинто Дж. К. Управление проектами Питер, 2014, 464 с.
<https://altairbook.com/go2/7435441.html> უკანასკნელად იქნა
გადამოწმებული - 14.11.2022.
25. Портни С. Э. Управление проектами для „чайников“. М.: 2019. 368
с. <https://www.labyrinth.ru/books/682217/> უკანასკნელად იქნა
გადამოწმებული - 14.11.2022.
26. Птухин И. А., и др. Формирование ответственности участников
строительства за нарушение календарных сроков выполнения
работ по методу PERT, Строительство уникальных зданий и
сооружений, 2014, № 3(18), С. 57-71.
27. Ричард Ньютон. «Управление проектами от А до Я, 2012.-С. 192.
<https://libking.ru/books/foreign-business/1118820-richard-nyuton-u-pravlenie-proektami-ot-a-do-ya.html>
უკანასკნელად იქნა
გადამოწმებული - 14.11.2022.
28. Частикова В. А. Идентификация механизмов реализации
операторов генетического алгоритма в экспертных системах
продукционного типа, Научный журнал КубГАУ, №75(01), 2012
года.
<https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-mehanizmov-realizatsii-operatorov-geneticheskogo-algoritma-v-ekspertnyh-sistemah-produktsionnogo-tipa> უკანასკნელად იქნა
გადამოწმებული - 14.11.2022.
29. Чеготова Е. В. Роль технического заказчика в организации
инвестиционно-строительной деятельности,
Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 29, №3, С. 5-11.
http://www.engstroy.spb.ru/index_2012_03/chegotova.pdf
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
30. Abd El Razek R. H., Diab A. M., Time-Cost-Quality Trade-off
Software by using Simplified Genetic Algorithm for
Typical-repetitive Construction Projects, World Academy of Science,
Engineering & Technology, 2020, Vol. 37, P. 312.
<https://publications.waset.org/15740/time-cost-quality-trade-off-software-by-using-simplified-genetic-algorithm-for-typical-repetitive-construction-projects> უკანასკნელად იქნა
გადამოწმებული - 14.11.2022.
31. Adeli H., Karim A. Scheduling/cost optimization and neural dynamics
model for construction, J. Constr. Engrg. and Mgmt, 2021, Vol. 123,
N4. P. 450-458.
https://www.researchgate.net/publication/245283414_SchedulingCost_Optimization_and_Neural_Dynamics_Model_for_Construction/link/

32. Akinci B., Fischer M., Representing Work Spaces Generically in Construction Method Models, Working Paper #57, CIFE. Stanford. https://www.researchgate.net/publication/249887585_Representing_Work_Spaces_Generically_in_Construction_Method_Models/link/0f31753bab38d4a25d000000/download უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
33. Akinci B., Formalization and Automation of TimeSpace Conflict Analysis, Working Paper 59, CIFE. - Stanford, (2000c) https://www.researchgate.net/publication/255554629_Formalization_and_Automation_of_Time-Space_Conflict_Analysis უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
34. Ayad A.R., Awad H.A., Parametric analysis for genetic algorithms handling parameter, Alexandria Engineering Journal, 2013, Vol. 52, P. 99-111 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001681200097X> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
35. Bargstädt H. J., Automatic Generation of workspace Requirements Using Qualitative and Quantitative Description, 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality CONVR2010 Japan, 2017, P. 131-137. http://www.convr2010.com/proceedings_contents უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
36. Bettemir Ö. II. Optimization of Time-Cost-Resource Trade-off Problems in Project 2019. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/18989/statistics> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
37. Bettemir O. H. Experimental Design For Genetic Algorithm Simulated Annealing For Time Cost Trade-Off Problems, International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS). 2011, Vol. 3, N1, P. 15-26. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijeas/issue/23577/251134> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.
38. Chavada R., Dawood N., Construction workspace management: the development and application of a novel nD planning approach and tool, J. of Information Technology in Construction, 2014, Vol. 17, P. 213-236. https://www.researchgate.net/publication/264905418_Construction_workspace_management_the_development_and_application_of_a_nov

el_nD_planning_approach_and_tool/link/5412eb1c0cf2788c4b3587d1/download უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022.

39. Dang D. T. P., Tarar M. Impact of 4D modeling on construction planning process. M.Sc., Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2020.
<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/161015.pdf>
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022
40. Eastman C., BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Second Edition, Wiley, Iloboken, 2018.
http://bim.pu.go.id/assets/files/BIM_Handbook_A_Guide_to_Building_Information_Modeling_for_Owners_Managers_Designers_Engineers_and_Contractors_Second_Edition.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
41. Elbeltagi E. Evolutionary algorithms for large scale optimization in construction management, The Future Trends in the Project Management. Riyadh, KSA, 2007, P. 7-11.
https://www.researchgate.net/publication/255659549_Evolutionary_Algorithms_for_Large_Scale_Optimization_In_Construction_Management უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
42. Elmahdi A. Grid Based Simulation Model for Workspace Management and Analysis. Germany: Bauhaus Universität Weimar. 2018.
https://epub.uniweimar.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1468/file/Proceedings_ConVR2011_final_pdfa.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022;
43. Elmahdi A., Wu I.-C., 4D grid-based simulation framework for facilitating workspace management, 2011.
https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1468/file/Proceedings_ConVR2011_final_pdfa.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 14.11.2022;
44. Feng C.W., Liu L., Burns S.A. Using Genetic Algorithm to Solve Construction Time- Cost Trade-Off Problems, Journal of Computing in Civil Engineering. 2007, Vol. 11, N3. P. 184-189.
<file:///C:/Users/user/Downloads/Article14.pdf>
46. Gerard M. H. The Complete Project Management Office Handbook, NY: Auerbach Publications 2004, 688 p.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420046823/complete-project-management-office-handbook-gerard-hill>
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022

47. Ghorbanali M. Using genetic algorithms to solve industrial time-cost trade-off problems, Indian Journal of Science and Technology, 2011, Vol. 4, N10.
<https://www.google.com/search?q=Ghorbanali+M.+Using+genetic+algorithms+to+solve+industrial+time-cost+trade-off+problems%2C+Indian+Journal+of+Science+and+Technology%2C+2011%2C+Vol.+4%2C+No.+10.&ei=FGyIY6ehKYmbsAfRppm4Ag&ved=0ahUKEwin->
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
48. Guo S. J. Identification and Resolution of Work Space Conflicts in Building Construction, Journal of Construction Engineering and Management, 2002 N4, P.287-295.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Identification-and-Resolution-of-Work-Space-in-Guo/572d8e514776d04871cd6c0956621daceda1451>
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
49. Hartmann V., Beucke K. E., Shapir K., Model-based Scheduling for Construction Planning, 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (14th ICCBE). M. 2012.
<https://smarsly.files.wordpress.com/2014/11/hartmann2012b.pdf>
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
50. Hegazy T. Optimization of Resource Allocation and Leveling Using Genetic Algorithms Journal of Construction Engineering and Management, 2019. Vol. 125, No. 3, P. 167-175.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-Resource-Allocation-and-Leveling-Hegazy/e73acf82f87a00356d13186d2ca812b32184d892>
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
51. Jongeling R. A Process Model for Work-flow management in construction: Combined Use of Location-based scheduling and 4D CAD. 2016.
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A990979&dswid=-8609>
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
52. Jorge K., Kunihiro Y., Masaharu M., proposal for zoning crossover of hybrid genetic algorithms for large scale traveling salesman problems, In IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2019.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:708381/FULLTEXT01.pdf>
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
53. Kataoka M. Automated generation of construction plans from primitive geometries, Journal of Construction Engineering and Management, 2018, Vol. 134, No. 8, P. 592-600.
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%28>

[2008%29134%3A8%28592%29](#) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

54. Kerzner I-I. Strategic Planning for project management using a project management maturity model. New York: John Wiley & Sons, inc. 2021. 255 p.
55. Kim H., Anderson K., Lee S., Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM technology, J. Automation in Construction, 2018, Vol. 35. P. 285-295. https://www.academia.edu/15022743/Generating_construction_schedules_through_automatic_data_extraction_using_open_BIM_building_information_modeling_technology უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
56. König M., I-Iabenicht I., Intelligent BIM-Based Construction Scheduling Using Discrete Event Simulation, Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 winter, Berlin, Germany, 2018. <https://informs-sim.org/wsc12papers/includes/files/inv168.pdf>; უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
57. Liu J., Rahbar F. Project Time-Cost Trade-Off Optimization by Maximal Flow Theory, J. Constr. Engrg. and Mgmt, ASCE, 2004, Vol. 130, N4. <https://trid.trb.org/view/705517> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
58. Maghrebi M, Afshar A, Novel Mathematical Model for Deterministic Time-cost Trade-off Based on Path Constraint, International Journal of Construction Engineering and Management, 2018, Vol. 2, No. 5, P. 137-142. <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijcem.20130205.01.html> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
59. Mallasi Z. Workspace planning and criticality assessment of construction activities' execution space using 4D CAD/VR visualization, Middlesbrough, UK, 2020. <https://research.tees.ac.uk/en/publications/construction-workspace-planningassignment-and-analysis-utilizing-> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
60. Man M. BIM, Building Information Modeling and estimation, Stockholm: Byggt teknik och design, Kungliga tekniska hogskolan, 2017. https://www.researchgate.net/publication/283118367_Building_Information_Modeling_BIM_A_New_Paradigm_for_Visual_Interactive_Modeling_and_Simulation_for_Construction_Projects უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

61. McKinney K., Fischer M. Generating, Evaluation, and Visualizing Construction Schedules with CAD tools, J. of Automation in Construction, 2018, Vol. 7, P.433447. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580598000533> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
62. McKinney K., Fischer M., 4D Annotator: A Visual Decision Support tool for Construction Planners, Proceedings of the 2018 Boston, MA, USA, P. 331-341. https://www.researchgate.net/publication/24077714_Trends_of_4D_CAD_applications_for_construction_planning უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
63. Michael W., Marina N. The Project Management Question and Answer Book. New York: AMACOM. 2014. 262 p. <https://www.amazon.com/Project-Management-Question-Answer-Book/dp/0814471641> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
64. Moon H., Dawood N., Kang L. Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule, Advanced Engineering Informatics, 2014, Vol. 28, No. 1, P. 50-65. <https://research.tees.ac.uk/en/publications/development-of-workspace-conflict-visualization-system-using-4d-o-3> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
65. Moon H., Kang L., Dawood N. Development of a workspace conflict verification model for temporary facilities based on a VR simulation, In Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the International Conference, UK., Nottingham University Press, 2010, P. 13. https://www.academia.edu/3031909/Development_of_a_workspace_conflict_verification_model_for_temporary_facilities_based_on_a_VR_simulation უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
66. Moon H-S., Kim H-S., Min C-H., Egide M., Kang L-S. Development and Application of Active Allocation Model for Construction Workspaces in BIM Environment, 2nd International Conference on Education and Management Technology IPEDR, Vol. 13, Singapore, 2011. <http://www.ipedr.com/vol13/33-T00061.pdf> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
67. Morad A. A., Beliveau Y. J. Knowledge Based Planning System, Journal of Construction Engineering and Management, 2001, Vol. 117, No. 1, P. 01-12. <https://trid.trb.org/view/352627> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

68. Mrkela A., Rebolj D. Automated construction schedule creation using project information model, Paper presented at the CIB W78 Conference, Managing IT in Construction, Istanbul, Turkey, 2019. <https://www.semanticscholar.org/paper/Automated-construction-schedule-creation-using-Rebolj/351a2cf809f98470b8b23d1c4416d1ae3a92d39f> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
69. Mukherjee K., Clarke R. 4D Construction Planning, 66th Appita Annual Conference, Melbourne, 2012. https://eprints.usq.edu.au/29282/1/Patterson_M_Abeysekera.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
70. Nikoomaram H., Hosseinzadeh L. F., Jassbi J., Shahriari M. R. A New Mathematical Model for Time Cost Trade-off Problem with Budget Limitation Based on Time Value of Money, Applied Mathematical Sciences, 2010, Vol. 4, No. 63, P. 3107-3119.
71. North S., Winch G.M. VIRCON: A proposal for critical space analysis in construction planning, Proceedings of the fourth European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Related Industries (ECPPM), Portoroz, Slovenia, 2012, P. 359-364. https://www.researchgate.net/publication/245283706_Critical_Space_Analysis უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
72. Oberlender G. D. Project management for engineering and construction / 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2000, 368 p.
73. Riley D. Modeling the Space Behavior of Construction Activities. Ph.D. Thesis, Department of Architectural Engineering; Pennsylvania State University, University Park, 2014. <https://worldcat.org/identities/lccn-no97069108/> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
74. Riley D. R., Sanvido V. E. Space Planning Method for Multistory Building Construction, Journal of Construction Engineering and Management, 2007, Vol.123,N2,P.171-180. <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/space-planning-method-for-multistory-building-construction-> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
75. Shaked O., Warszawski A. Knowledge-Based System for Construction Planning of highrise Buildings, Journal of Construction Engineering and Management. 2015, Vol. 121, No. 2, P. 172-182. https://document360.com/knowledgebase-software/?kc_campaign=s-knowledgebasesoftware-europe&kc_adgrp=knowledgebasedsystem&kc_keyword=knowledge%20based%20system&kc_device=c&kc_location=physical_ms=1007469&gclid=Cj0KCQIAvqGcBhCJARIsAFQ5ke6bh0os

[NS5EhgZZ v0Dqe25ZVWU8h1RDE-bvGCyFjblrVGcE9WAZCUaAqO5EALw_wCB](#) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

76. Sharma A. An Interactive Visual Approach to Construction Project Scheduling. Master's Thesis. Marquette University, 2019. https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=theses_open უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
77. Sheibatolhamdy S.A., Samady M., Shaabani A. Solving scheduling problem by multiindex genetic algorithm, African Journal of Business Management, 2012, Vol. 6, N22. P. 6480-6485. https://www.google.com/search?q=Sheibatolhamdy+S.A.%2C+Samady+M.%2C+Shaabani+A.+Solving+scheduling+problem+by+multi%2CACindex+genetic+algorithm%2C+African+Journal+of+Business+Managemen&ei=BXaIY6XNDJHk7UP-5-WqA4&ved=0ahUKEwj4-PWj9j7AhUR8rsIHfuPBeUQ4dUDCA8&uact=5&oq=Sheibatolhamdy+S.A.%2C+Samady+M.%2C+Shaabani+A.+Solving+scheduling+problem+by+multi%2CACindex+genetic+algorithm%2C+African+Journal+of+Business+Managemen&gs_lcp=Cgxn3Mtd2l6LXNlcnAQA0oECEEYAEoECEYYAFCrClirC2CyEmgBcAB4AIABAIgBAJIBAIgBAKABAaABArABAMABAQ&scient=gws-wiz-serp უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
78. Stumpf A. L., Liu L. Y., Chin S., Ahn K. Using CADD Applications to Support Construction Activities, Proceedings of the 1st Congress on Computing in Civil Engineering, 2014, P. 531-538. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0088533> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
79. Tauscher E., Mikulakova E., Beucke K., König M. Automated generation of construction schedules based on the IFC object model, ASCE, Computing in Civil Engineering, Austin, TX, 2019. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41052%28346%2966> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
80. new process and data model, CIB-W78 24th International Conference on Information Technology in Construction, Maribor, SLV, 2017. https://www.researchgate.net/publication/265866371_4D_construction_sequence_planning_-_New_process_and_data_model- უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
81. Viklund F. Model based quantity take off using BIM, Stockholm: Avdelningen for Byggnadsteknik, Kungliga tekniska hogskolan, 2013, Vol. 3, N1, P. 15-26. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/182031/182031.pdf> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

82. Walker A. Project management in construction, 4th ed. Oxford: Blackwell Science, 2022, 289 p.
https://www.academia.edu/2049803/Project_management_in_construction უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
83. Whitley D. A genetic algorithm tutorial. Statistics and Computing 2014, 4, 65-85. <https://link.springer.com/article/10.1007/bf00175354> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
84. Williams M. Graphical Simulation for project planning: 4D-Planner, Proceedings of Computing in Civil Engineering, 2015, P. 404-409. <https://www.semanticscholar.org/paper/Graphical-Simulation-for-Project-Planning%3A-T-M-Williams/a7b3cd5f3f6e78899da1396b063cba9a7152b49f> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
85. Wu I., Chiu Y. 4D Workspace conflict detection and analysis system, Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, Japan, 2018. https://www.academia.edu/5071449/Proceedings_of_the_13th_International_Conference_on_Construction_Applications_of_Virtual_Reality უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
86. Zahraie B, Tavakolan M. Stochastic Time-Cost-Resource Utilization Optimization Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm and Discrete Fuzzy Sets, Journal Of Construction Engineering And Management, 2019, Vol. 135, N11, P. 1162-1171. https://www.researchgate.net/publication/238179318_Stochastic_Time-Cost-Resource_Utilization_Optimization_Using_Nondominated_Sorting_Genetic_Algorithm_and_Discrete_Fuzzy_Sets უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
87. Zanen P., Hartmann T. The application of construction project management tools and overview of tools for managing and controlling construction projects Enschede: University of Twente, 2010. <https://docplayer.net/6155383-Working-paper-3-the-application-of-construction-project-management-tools-an-overview-of-tools-for-managing-and-controlling-construction-projects.html> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
88. Zeinalzadeh A. An Application of Mathematical Model to Time-cost Trade off Problem (Case Study,Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011., Vol. 5, No. 7, P, 208-214. <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2011/July-2011/208-214.pdf> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

89. Zhang L., Zou X., Su Z-x. GA Optimization Model for Time/cost Trade-off Problem in Repetitive Projects Considering Resource Continuity, Applied Mathematics & Information Sciences 2013, Vol. 7, N2, P. 611-617. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/amis/vol07/iss2/25/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
90. Zheng D.X.M., Ng ST. Stochastic Time-Cost Optimization Model Incorporating Fuzzy Sets Theory and Non-replaceable Front, Journal of Construction Engineering and Management, 2005, Vol. 131, No. 2.-P. 176-186. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282005%29131%3A2%28176%29> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
91. Zheng D.X.M., Ng S.T., Kumaraswamy M.M. Applying a Genetic Algorithm-based Multi-objective Approach for Time-Cost Optimization, Journal of Construction Engineering and Management, 2004, Vol. 130, No. 2, P. 168-176. <https://trid.trb.org/view/700258> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
92. Zheng D. X. M., Ng S. T., Kumaraswamy M. M. Applying Pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multiobjective time-Cost optimization, Journal of construction engineering and management, ASCE, 2005, Vol. 131, N1, P. 81-91. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282005%29131%3A1%2881%29?src=recsys> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
93. კიკნაძე ზ., ვარლოსანიძე ლ., ჩიგოგიძე თ. საკონკურსო პროექტების შეფასების ექსპერტული სისტემა. არქიტექტურისა და ქალაქთმშენებლობის თანამედროვე პრობლემები, სამეცნიერო გეგნიკური ჟურნალი, N4, სტუ. 2015. https://gtu.ge/Arch/Pdf/Arch_gamocema_3.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
94. Гигинейшвили Д.Я., Джавахишвили М. Н., Кристесиашвили Е Н. МАТЕМАТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ /история, проблемы и перспективы/. თბილისი, საერთაშორისო-სამეცნიერო ჟურნალი „მშენებლობა“, 4(47). 2017.
95. Keoki Sears S. Construction Project Management: A Practical Guide to Field Construction Management 5th Edition. 2015. <https://www.amazon.com/Construction-Project-Management-Keoki-Sears/dp/1118745051> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

96. Васючкова Т. С., Держо М. А., Иванчева Н. А., Пухначева Т. П. Управление проектами с использованием Microsoft Project. Электронная библиотека. 2020. <https://profspo.ru/books/89480> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
97. Гульяев А. К. Microsoft Office Project 2007. Управление проектами. Практическое пособие. КОРОНА-Век, Санкт-Петербург, 2008. https://www.studmed.ru/gulyaev-ak-microsoft-office-project-professional-2007-upravlenie-proektami-prakticheskoe-posobie_ebf87989494.html უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
98. Efraim Turban and Linda Volonino. Information Technology for Management : Improving Strategic and Operational Performance, 8th edition, John Wiley & Sons. 2011. <https://www.amazon.com/Information-Technology-Management-Operational-Performance/dp/047091680X> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
99. Скотт Беркун. Искусство Управления IT-проектами. Библиотека программиста. Питер, 2009. https://biznesbooks.com/components/com_jshopping/files/demo_products/skott-berkun-iskusstvo-upravleniya-it-proektami.pdf
100. Карл Четфилд, Тимоти Джонсон. Microsoft Office Project 2007. Шаг за шагом, Москва, ЭКОМ, 2007. <https://www.labyrinth.ru/books/209380/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
101. Olaf Passenheim. Project Management. 2009. Download free books at Bookboon.com. https://www.academia.edu/9927731/Olaf_Passenheim_Project_Management უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
102. კიკნაძე ზ. ზოგიერთი ცნობა და მოსაზრება ჩვენში მულტიმედია პროექტირების წინაპირობების, საწყისებისა და განვითარების შესახებ. თბილისი: საქართველოს განათლების მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალი მოამბის დამატება. შრომები #2(17) 2010. <http://www.nplg.gov.ge/ec/ka/jmat/catalog.html?pft=biblio&from=971&rnum=10&udc=72> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
103. არჩვაძე ვ., კიკნაძე ზ., ქრისტესიაშვილი ე. ფორმალიზებული მოდელები CAD/BIM ტექნოლოგიაში. მშენებლობა, #3, თბილისი, 202, გვ. 27-32. [https://gtu.ge/Journals/mas/Referat/ASU-2021\(1_32\)/ASU-2021\(1_32\)2.pdf](https://gtu.ge/Journals/mas/Referat/ASU-2021(1_32)/ASU-2021(1_32)2.pdf) უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
104. არჩვაძე ვ., ქრისტესიაშვილი ე., კიკნაძე ზ. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მენეჯმენტის თანამედროვე პარადიგმა (ანალიზი, სინთეზი და

- შეფასება ინფორმაციული ტექნოლოგიების საფუძველზე). მშენებლობა #4(47), 2017, გვ.14-18. https://gtu.ge/Library/Pdf/El_jurnalebi/samsh_47.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
105. ძოწენიძე მ., ბალაფაძე ვ., ქრისტესიაშვილი ლ. ინოვაციური მენეჯმენტის საკითხები მშენებლობაში. მშენებლობა 4(47). სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი. სტუ, 2017. გვ. 77-79. https://gtu.ge/Library/Pdf/El_jurnalebi/samsh_47.pdf უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
106. პატარაია რ., ბაქრაძე დ. მშენებლობის მართვის საფუძვლები. სტუ. თბილისი, 2019. https://gtu.ge/Learning/ElBooks/samsheneblo_books.php უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
107. არჩვაძე ვ. მაღლივი შენობის ფასადის მოპირკეთების სამუშაოების ოპტიმალური მართვის მოდელი („Allianc Highline Tbilisi“ პროექტის მაგალითზე) ნაბეჭდი სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა #2(4), თბილისი, 2020.
108. არჩვაძე ვ. მშენებლობის კალენდარული დაგეგმვის ავტომატიზაციის ძირითადი მეთოდოლოგიური მიდგომები. სტუდენტთა საუნივერსიტეტოშორისო კონფერენცია SIUEC. 2019, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, კრებული, 8 ლექსები.
109. არჩვაძე ვ., ქრისტესიაშვილი ე. სამშენებლო პროექტის კალენდარული გეგმის ოპტიმიზაცია გენეტიკური ალგორითმების ბაზაზე. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სტუდენტთა 87-ე ღია სამეცნიერო კონფერენცია, მოხსენებათა თეზისები, თბილისი, 2019.
110. ქრისტესიაშვილი ე., ქრისტესიაშვილი ლ., არჩვაძე ვ. რუხაძე ნ. სამშენებლო-საინვესტიციო პროექტების განხორციელების ეკონომიკური ეფექტიანობა რისკების პირობებში. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა, 2(58), თბილისი, 2021.
111. არჩვაძე ვ. სხვადასხვა განზომილებიანი მოდელების შესაძლო თემატური ინტერპრეტაციები არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირებაში. საერთაშორისო რეფერირებადი და რეცენზირებადი სამეცნიერო-პრაქტიკული ჟურნალი. საქართველოს ბიზნესის მეცნიერებათა აკადემია. თბილისი, 2021. <https://science.ug.edu.ge/publications> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
112. Kristesiashvili E., Kiknadze Z., Archvadze V. Possible Thematic Interpretations of Different Dimensional Models in Architectural-Construction Design, ЕВРОПЕЙСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, том II, 2021; მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული სემინარი გარემოს ინჟინერიის ევროპული ინოვაციური ტექნოლოგიები, სტუ, 28-30 ივლისი, 2021;

113. არჩვაძე ვ. არქიტექტურულ-სამშენებლო პროექტირების მართვა. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა. #1 (1), თბილისი, 2021;
114. V. Archvadze Possible Thematic Interpretations of Different Dimensional Models in Architectural-Construction Design, The International Scientific and technical Conference “Problems of Engineering Sciences”, Thesis, may, 20-22, 2022, Erevan;
115. E. Kristesiashvili, B. Abesadze, L.Kristesiashvili, V. Archvadze, N. Rukhadze In different crisis conditions, the issue of on-site production of composite panels for buildings, International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies, Dedicated to the 100th Anniversary of Georgian Technical University – GTU, June 24-26, 2022 / Tbilisi, Georgia;
116. ქრისტესიაშვილი ე. მშენებლობის ეკონომიკა, თბილისი: საგამომცემლო სახლი ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2018. <https://publishhouse.gtu.ge/ge/post/1167> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
117. ბალავაძე ვ., ქრისტესიაშვილი ლ., სამშენებლო პროექტების ეფექტიანი მართვის მეთოდები. თბილისი: სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა #2, 2022;
118. ბალავაძე ვ. ქრისტესიაშვილი ლ. პროექტების მართვის თანამედროვე საინფორმაციო სისტემები. თბილისი: სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი მშენებლობა #2, 2022;
119. В. В. Богданов. Управление проектами в. Учебный курс. Санкт-Петербург. 2018. <http://book.vadimbogdanov.ru/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
120. Т. С. Васючкова, М. А. Держо, Н.А.Иванчева, Т. П. Пухначева. Управление проектами с использованием Microsoft Project 2007, Электронная библиотека. 2020. <https://profspo.ru/books/89480> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
121. А .К. Гульяев. Microsoft Office Project 2007. Управление проектами. Практическое пособие. КОРОНА-Век, Санкт-Петербург, 2008. <https://www.moscowbooks.ru/book/585263/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
122. Efraim Turban and Linda Volonino. Information Technology for Management, Improving Strategic and Operational Performance, 9th edition, John Wiley & Sons. 2021. http://itacademic.ir/upload/MIT_Ref1.pdf - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;

123. Скот Беркун, Искусство Управления IT проектами, Библиотека программиста, Питер. 2017.
https://biznesbooks.com/components/com_jshopping/files/demo_products/skott-berkun-iskusstvo-upravleniya-it-proektami.pdf –
 უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
124. Карл Четфилд, Тимоти Джонсон. Microsoft Office Project 2007, Шаг за шагом. Москва, ЭКОМ, 2007.
<https://www.labyrinth.ru/books/155472/> უკანასკნელად იქნა
 გადამოწმებული - 01.12.2022;
125. Olaf Passenheim. Project Management. 2019, Download free books at
 Bookboon.com. <https://freecomputerbooks.com/specialProjectManagementBooks.html> – უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;
126. В. А. Вольнов, З. А. Кикнадзе Тизизация и оптимизация проектных решений гражданских зданий. М., 2015.
https://www.alib.ru/au-volnmnnov/nm-tipizaciya_optimizaciya_proektnyh_reshenij_grazhdanskih_zdanij/ – უკანასკნელად იქნა
 გადამოწმებული - 01.12.2022;
127. З. А. Кикнадзе, Численные методы оптимизации в архитектурном проектировании. М., 2015.
<https://korobkaknig.ru/arhitektura/proektirovanie-i-rascheti/modeli-unifikacii-v-optimalnom-proektirovanii-massovogo-zhilisha-18924.html> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.12.2022;