

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
კომპიუტერულ მეცნიერებათა დეპარტამენტი

გიორგი მარჯანიძე

**ინტელექტუალური მხარდამჭერი სისტემა: სატრანსპორტო
მარშრუტიზაციის ამოცანის ევრისტიკული ალგორითმები**

სამაგისტრო პროგრამა: ინფორმაციული სისტემები

სამაგისტრო ნაშრომი შესრულებულია ინფორმაციულ სისტემებში მეცნიერების
მაგისტრის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

ხელმძღვანელი: **გია სირბილაძე,**
ფიზ.-მათ. მეცნიერებათა დოქტორი,
სრული პროფესორი
თანახელმძღვანელები: **ბეჟან ღვაბერიძე,**
ასოცირებული პროფესორი
ბიძინა მაცაბერიძე,
ასისტენტ პროფესორი

თბილისი

2014

ანოტაცია

სამაგისტრო ნაშრომში განხილულია სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის ამოცანა (სმა) გართულებულ და ექსტრემალურ გარემოში. ასეთ შემთხვევებში ობიექტური შემაჯავლი მონაცემები კლასიკური სმა-თვის არ არსებობს და მხოლოდ ექსპერტული ცოდნა და ექსპერტთა მონაცემები წარმოადგენს ერთადერთ საშუალებას პრობლემის გადასაწყვეტად. ასეთი მონაცემებია: გზებზე სატრანსპორტო საშუალების (სს) მიერ გადაადგილებისთვის დახარჯული მიახლოებითი დრო; პუნქტებს შორის სს -ის დროული გადაადგილების შესაძლებლობის ხარისხები და სხვ. ექსპერტული მონაცემები იძლევა იმის საშუალებას, რომ გადაწყდეს სმა სხვა კრიტერიუმებთან ერთად კიდევ ერთი კრიტერიუმის - მარშრუტის სანდოობის გათვალისწინებით.

ნაშრომის შესავალ თავში წარმოდგენილია ფაზი-სიმრავლეების მოკლე თეორია, რომელიც ზემოთ წარმოდგენილი პრობლემის გადაწყვეტის აპარატს წარმოადგენს. ჩამოყალიბებულია კლასიკური სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის ამოცანა. ნაშრომის ძირითად ნაწილში განხილულია კომივოიაჟერის ამოცანა, რომელსაც საკვანძო ადგილი უკავია სმა-ში. განხილულია ამ ამოცანის რეალიზაციის რამდენიმე ვარიანტი. ასევე წარმოდგენილია ამ ამოცანის პროგრამული უზრუნველყოფის ერთი რეალიზაცია მაგალითებით.

არსებობს სმა-ს რეალიზაციის ისეთი მიდგომები, რომლების დაიყვანება დაფარვის ამოცანებზე. დანართში განხილულია დაფარვის ამოცანის რეალიზაციის მონტე-კარლოს მეთოდი, მისი პროგრამული რეალიზაცია და სატესტო მაგალითები.

Annotation

The following master's thesis deals with the vehicle routing problem (VRP) in difficult and extreme environments. In such cases, there is no objective data as in classic VRP, but the only way to solve the problem is using expert knowledge and the expert data. This kind of data includes: the estimated time spent by the vehicle while driving the route; possibility of movement of the vehicle between the points on time and so forth. Expert data gives us the opportunity to solve the VRP with classic criteria, but also considering the reliability of the routes.

The introductory chapter of the thesis briefly presents Fuzzy-sets theory, which is a mathematical instrument for solving the problem. The classic vehicle routing problem is also formulated. The main part of the paper deals with the traveling salesman problem which plays the key role in VRPs. The paper discusses several options for dealing with this problem, presents corresponding software and examples.

There exist VRP approaches, when the problem is reduced to the covering problems. Appendix deals with the task of solving covering problems with Monte-Carlo method, its software implementation and testing examples.

სარჩევი

შესავალი	5
1. სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემები ექსტრემალურ და განუზღვრელ გარემოში	5
2. ფაზი-სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემები.....	6
3. კლასიკური სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის ამოცანის ფორმირება	7
თავი 1.....	10
§1.1. გადაწყვეტილების მიღების ინტელექტუალური მხარდამჭერი (საკონსულტაციო-მრჩეველი) ანალიტიკურ-საინფორმაციო სისტემების მოკლე მიმოხილვა.	10
§1.2. ფაზი-სიმრავლეების სათავეებთან	19
§1.3. არასრული ინფორმაციის წარმოდგენის შესახებ. ინფორმაციის უზუსტობა და განუზღვრელობა	21
თავი 2.....	27
§2.1. კომივოიაჟერის ამოცანა	27
§2.2. ევრისტიული ალგორითმები კომივოიაჟერის ამოცანისათვის	30
§2.2.1. უახლოეს წერტილში გადასვლის ალგორითმი	30
§2.2.2. უმოკლესი რკალის არჩევის ალგორითმი.....	31
§2.2.3. 2-opt ალგორითმი	32
დასკვნა	35
გამოყენებული ლიტერატურა.....	36
დანართი A: რეალიზაციები და გამოყენებული ტექნოლოგიები	38
A.1. დაფარვის ამოცანის რეალიზაცია მონტე-კარლოს მეთოდით	38

შესავალი

1. სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემები ექსტრემალურ და განუზღვრელ გარემოში

თანამედროვე მსოფლიოში უფრო და უფრო პრობლემური ხდება სატრანსპორტო საშუალებების (სს) მარშრუტებზე ოპტიმალური გადაადგილების მენეჯმენტი ექსტრემალური და გართულებული პროცესების მიმდინარეობის პირობებში. ესენია: 1. კატასტროფების, მიწისძვრების, მასობრივი განადგურების იარაღის გამოყენების შედეგად და სხვ. დაზიანებულ გეოგრაფიულ ზონებში არსებული სამხედრო, და სხვა ტიპის ობიექტების ოპტიმალური და უსაფრთხო მომარაგების მენეჯმენტი; 2. ექსტრემალურ და რთულ სიტუაციებში სწრაფი რეაგირებისა და მოსახლეობისათვის უსაფრთხო დახმარების დაგეგმვა; 3. ექსტრემალურ სიტუაციაში სამხედრო მოქმედებისას სატრანსპორტო საშუალებებით ტვირთების გადაზიდვის მარშრუტების სტრატეგიული მენეჯმენტი; 4. მჭიდროდ დასახლებულ გეოგრაფიულ ზონებში (ქალაქები და სხვ.) გზებზე გართულებულ სიტუაციებში ტრანსპორტით გადატვირთული გზები, სამოქალაქო მიტინგები და გაფიცვები, გზებზე მეტეოროლოგიური და სხვა მიზეზებით გამოწვეული ცუდი ხილვადობა, მოყინული გზები და სხვ.) სატრანსპორტო საშუალებების მარშრუტებზე ოპტიმალური გადაადგილების მენეჯმენტი და სხვა.

ამ პრობლემატიკით დაინტერესებული სახელმწიფო თუ კერძო ორგანიზაციები ცდილობენ შექმნან მაღალი სანდოობის ინტელექტუალური ინფორმაციული ტექნოლოგიები, რომლებიც გაითვალისწინებენ ექსტრემალური სიტუაციებში წარმოქმნილ განუზღვრელობებს და მხარდაჭერას გაუკეთებენ სს-ების გადაადგილების ოპტიმალური მარშრუტების დაგეგმვას.

ასეთი ტიპის პრობლემატიკაზე მუშაობისას დეტერმინისტული თუ სტოქასტური მოდელების ბაზაზე აგებული სიმულაციური მხარდამჭერი ტექნოლოგიები ხშირად ვერ გვაძლევენ სანდო და დამაკმაყოფილებელ შედეგებს საკვლევი ობიექტის სირთულის, წინააღმდეგობრივი, ბუნდოვანი და არასაკმარისი ინფორმაციის ან ობიექტური ინფორმაციის სიმცირის გამო, რაც პირველ რიგში გამოწვეულია მიმდინარე რთული

სიტუაციებით. პრობლემატიკის სირთულის ზრდასთან ერთად ჩვენი შესაძლებლობა გავაკეთოთ სანდო დასკვნები საკვლევი ობიექტების მომავალ ქცევაზე, გარკვეულ ზღვრამდე ეშვება, რომლის მიღმაც ინფორმაციის ისეთი მახასიათებლები, როგორიცაა სიზუსტე და განსაზღვრელობა, ურთიერთგამომრიცხავი ხდება. მნიშვნელოვან როლს იძენს პრობლემატიკის გადაწყვეტის სისტემური კვლევა და ანალიზი. აუცილებელი ხდება შეფასებებში და ანალიზში ჩავრთოთ ექსპერტთა ჯგუფები და მათი ცოდნა, რომელთა სუბიექტური მონაცემები მოდელის კონსტრუქციებში წარმოშობს ახალ, სუბიექტურ განუზღვრელობას. მოდელირების კლასიკურ მიმართულებათა პარალელურად მნიშვნელოვანი ხდება სუბიექტური, ფაზი-განუზღვრელობის დაშვება. ასეთ შემთხვევაში აუცილებელია ექსპერტული ცოდნის ინჟინერიის ფაზი-მეთოდებისა და ფაზი-ლოგიკის გამოყენება, რაც შესაბამისი მაღალი ღირებულების ავტომატიზირებული სისტემებისა და ინტელექტუალური ხელშემწყობი ტექნოლოგიების კონსტრუირებას უზრუნველყოფს.

2. ფაზი-სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემები

საქმე ეხება სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემატიკას (Vehicle Routing Problem (VRP)). მარშრუტიზაციის ამოცანები სკალარული მიზნის ფუნქციის შემთხვევაშიც ე.წ. NP- რთულ ამოცანებს განეკუთვნებიან და მათი ამოხსნის ზუსტი ალგორითმები რეალური განზომილებების შემთხვევაში არ არსებობს. VRP-ის ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული მიმართულებაა ფაზი-სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის პრობლემატიკა (Fuzzy Vehicle Routing Problem (FVRP)). FVRP -ამოცანებმა რთულ და განუზღვრელ სიტუაციებში უნდა უზრუნველყოს ოპტიმალური მარშრუტების გენერაცია.

მკვლევართა ჯგუფმა, რომელშიც შესრულდა სამაგისტრო ნაშრომი, ერთ-ერთი პროექტის ფარგლებში შეიმუშავა ახალი FVRP-მიდგომა. ცოტა რამ ამ პროექტის ამოცანებზე და მიზნებზე: ეს მიდგომა გაითვალისწინებს ზემოთ წარმოდგენილი პრობლემის გადაწყვეტას. აიგება აგრეგირების ახალი ინსტრუმენტი. ეს ინსტრუმენტი უზრუნველყოფს გზებზე გადაადგილების მარშრუტების სანდოობის კრიტერიუმების

აგებას. რაც FVRP-მიდგომებსა და კვლევებში საერთოდ ახალ მიმართულებას მოგვცემს. ამ მიდგომის საფუძველზე შეიქმნება პროგრამული პროდუქტი, რომელიც უზრუნველყოფს ექსტრემალური და რთული მოვლენების შედეგად გზებზე გართულებული გადაადგილების გამო სს-თვის ოპტიმალური და სანდო მარშრუტების დაგეგმვას. პროგრამული უზრუნველყოფის ფუნქცია იქნება სატრანსპორტო საშუალებათა მართვის სახელმწიფო სამსახურებსა, ტვირთების გადაზიდვების კომპანიებსა, სადისტრიბუციო ქსელებსა თუ სხვა კონპანიებს შეუქმნას მხარდაჭერა საჭიროების შემთხვევაში სწრაფი რეაგირებისა და მნიშვნელოვან გეოგრაფიულ პუნქტებში ტვირთების გადაზიდვის ოპტიმალური მარშრუტების დაგეგმვაში. სისტემაზე მუშაობის პროცესში სისტემის მომხმარებლებს შესაძლებლობა ექნებათ ინფორმაციის მიღების მიზნით ჩართონ დარგის ცნობილი ექსპერტები, რათა მათი ცოდნა გამოყენებული იყოს კონკრეტულ სიტუაციებში პუნქტებს შორის გადაადგილების შესაძლებლობის ხარისხების შეფასებისა და სს-ებისთვის სანდო მარშრუტების აგების მიზნით. პროექტში წარმოდგენილი პრობლემისთვის აიგება ახალი ტიპის შესაძლებლობითი კრიტერიუმი - მარშრუტებზე გადაადგილების სანდოობის მაქსიმიზაცია. მარშრუტებზე გადაადგილების სიგრძის მინიმიზაციის კრიტერიუმთან ერთად შეიქმნება ორკრიტერიალური ამოცანის რეალიზების ორ ფაზიანი სქემა. ეს მიდგომა წარმოშობს ახალ მიმართულებას და პერსპექტივებს FVPP-პრობლემატიკაში. ყოველ მიდგომაში, რომელიც სწავლობს FVRP-ამოცანებს, შეიძლება ჩაიდოს ჩვენი ახალი მეთოდოლოგია და იქ აიგოს ახალი კრიტერიუმები და შეზღუდვები. რაც მათ შემატებს მეტ სანდოობას ექსტრემალურ და განუზღვრელ გარემოში.

3. კლასიკური სატრანსპორტო მარშრუტიზაციის ამოცანის ფორმირება

კვლევების სისტემური და ანალიზური მიდგომა რთული და დიდი განზომილების მქონე ბუნებაში და საზოგადოებაში მიმდინარე ექსტრემალური და რთული პროცესების მოდელირების პრობლემატიკაში გადამწყვეტ როლს თამაშობს.

განვიხილოთ სტაციონარულ გარემოში სს-ების მოძრაობის ოპტიმალური მარშრუტების დადგენის შემდეგი ამოცანა.

ძირითადი ამოცანა: ცნობილია გეოგრაფიული ობიექტების (მომავალში პუნქტების, მომხმარებლების) სიმრავლე $I = \{1, 2, \dots, n+1\}$, სადაც $n+1$ -ე პუნქტი წარმოადგენს ცენტრალურ ბაზას. ცენტრალური ბაზიდან დანარჩენი პუნქტები სატრანსპორტო საშუალებებით მარაგდებიან ერთგვაროვანი ტვირთებით. პუნქტებისთვის განსაზღვრულია გადასაგზავნი ტვირთების სიდიდეები. ასევე ცნობილია სატრანსპორტო საშუალებების ტვირთშიდაობა და მაქსიმალური განარბენის სიდიდე. *ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში: საჭიროა პუნქტებში სს-ებით გადაიგზავნოს მათთვის განკუთვნილი ტვირთი ისე, რომ სატრანსპორტო საშუალებები დაბრუნდნენ ბაზაში და მათი ჯამური განარბენი იყოს მინიმალური.* იგულისხმება, რომ თითოეული პუნქტისათვის განკუთვნილი ტვირთის მოცულობა გაცილებით ნაკლებია სატრანსპორტო საშუალებების ტვირთშიდაობაზე.

ვთქვათ, $C = \|c_{ij}\|$, $i, j \in I$ – დადებითი ნამდვილი რიცხვების მატრიცა (პუნქტებს შორის მანძილების მატრიცა); D და Q მოცემული მთელი რიცხვებია – შესაბამისად შეზღუდვები სატრანსპორტო საშუალების ტვირთშიდაობაზე და მაქსიმალურ განარბენზე. P_i , $i = 1, 2, \dots, n$ ასევე მთელი რიცხვებია – i -ური პუნქტისთვის გადასაგზავნი ტვირთის მოცულობა $1 \leq P_i < Q$, $i = 1, 2, \dots, n$.

უნდა ვიპოვიოთ ისეთი ჩაკეტილი მარშრუტების $\{M_k\}$ სიმრავლე, $k = 1, 2, \dots, m$, სადაც $M_k = \{n+1, i_1^k, \dots, i_{\ell_k}^k, n+1\}$, $i_j^k \in \{1, 2, \dots, n\}$, $j = 1, \dots, \ell_k$, $1 \leq \ell_k \leq n$ (m და ℓ_k წინასწარ დაფიქსირებული არ არის), რომლებიც აკმაყოფილებენ პირობებს (შეზღუდვებს)

$$\bigcup_{k=1}^m M_k = I; \quad M_k \cap M_q = \{n+1\},$$

$$k, q \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad k \neq q; \quad \sum_{j=1}^{\ell_k} P_{i_j^k} \leq Q;$$

$$c_k = c_{n+1, i_1^k} + c_{i_{\ell_k}^k, n+1} + \sum_{j=2}^{\ell_k} c_{i_j^k, i_{j-1}^k} \leq D, \quad k=1, 2, \dots, m;$$

და რომელთაც აქვთ მინიმალური ჯამური სიგრძე (მიზნის ფუნქცია, პირველი კრიტერიუმი)

$$\sum_{k=1}^m c_k = \sum_{k=1}^m \left(c_{n+1, i_1^k} + c_{i_{\ell_k}^k, n+1} + \sum_{j=2}^{\ell_k} c_{i_j^k, i_{j-1}^k} \right).$$

დასმული ამოცანა შეესაბამება ზემოთ წარმოდგენილი პრობლემატიკის გარკვეულ მათემატიკურ მოდელს, როცა საქმე გვაქვს გეოგრაფიული პუნქტებში ერთგვაროვანი ტვირთის წვრილ პარტიებად გადაზიდვის პრობლემასთან. მას აქვს კომბინატორული ხასიათი და მიეკუთვნება კომბინატორული ოპტიმიზაციის ე.წ. რთულად ამოსახსნელი ამოცანების კლასს, რომელიც ცნობილია NP -რთული ამოცანების სახელწოდებით.

თავი 1

§1.1. გადაწყვეტილების მიღების ინტელექტუალური მხარდამჭერი (საკონსულტაციო-მრჩეველი) ანალიტიკურ-საინფორმაციო სისტემების მოკლე მიმოხილვა.

თანამედროვე ადამიანის მოღვაწეობის ნებისმიერი სფერო დაკავშირებულია ინფორმაციის მიღებასთან და მის დამუშავებასთან. ამასთანავე მნიშვნელოვანი როლი გადაწყვეტილების მიღებისთვის განეკუთვნება ანალიტიკურ ამოცანებს, რომლებიც საშუალებას იძლევა პირველადი ინფორმაციის ბაზაზე დაყრდნობით, მივიღოთ ახალი ცოდნა წარმოქმნილი სიტუაციის შესახებ, ღრმად გავერკვიოთ მიმდინარე პროცესებში და შესაბამისად მივიღოთ სწორი გადაწყვეტილება. ამგვარად, სასურველი ეფექტის მიღწევა გადაწყვეტილების მიღებისას შეუძლებელია ანალიტიკური ამოცანების შედეგებზე დაყრდნობის გარეშე, რომლებიც ვარაუდობენ შესასწავლი სისტემის მდგომარეობათა ზუსტ აღრიცხვასა და მოსალოდნელი შედეგის შეფასებას.

უფრო ხშირად გადაწყვეტილების მიღება კავშირშია საბოლოო შედეგის განსაზღვრის მაღალ დონესთან. ამავე დროს ის შეიძლება გართულდეს სიტუაციათა ვითარების შეცვლის ან გადაწყვეტილების გამომუშავებისათვის დროის უკმარისობით. ასეთ შემთხვევაში გადაწყვეტილების მიღება უნდა განხორციელდეს შესაბამისი ანალიტიკურ-ექსპერტულ კომპიუტერული სისტემების დახმარებით.

აქედან გამომდინარე ადეკვატური მათემატიკური მოდელები და შესაბამისი მეთოდები, აგრეთვე გამოთვლითი ამოცანები, მითითებული ანალიტიკური ამოცანების ამოსახსნელად, მოითხოვს ყოველმხრივ კვალიფიკაციურ განხილვა-შესწავლას.

ანალიზმა გვიჩვენა: იმისათვის, რომ აღნიშნული კომპიუტერული სისტემების გამოყენებით მივაღწიოთ ეფექტურობას, ამისათვის საჭიროა ანალიტიკურად გადაწყდეს მდგომარეობის შეფასება, განისაზღვროს ინფორმაციული მოდელი და მოხდეს საკვლევი სისტემის გადაწყვეტილების მიღების მოდელის ფორმირება.

აღნიშნული ანალიტიკურ-ექსპერტული სისტემები დარგის მცოდნეთა (ექსპერტების) ცოდნის ბაზის შექმნის კომპიუტერულ ტექნოლოგიებს წარმოადგენს.

ტრადიციულად, ანალიტიკური ამოცანების გადასაწყვეტად განუზღვრელობის პირობებში იყენებდნენ ალბათურ-სტატისტიკურ მეთოდებს [4], მაგრამ პრაქტიკამ გვიჩვენა რომ, მხოლოდ ამ მეთოდების გამოყენება გარკვეული ამოცანების ამოსახსნელად შეზღუდულია შემდეგი ფაქტორების არსებობის გამო. [2],[3],[7-8].

1) არა სტატისტიკური ბუნების მქონე ობიექტებისათვის განუზღვრელობის ფაქტორის აღრიცხვის აუცილებლობა, სუბიექტური შეფასება, ექსპერტულ-ლინგვისტიკური განუზღვრელობა, სათამაშო განუზღვრელობა და სხვა.

2) ალბათურ-სტატისტიკური მონაცემების უქონლობა რთულ ტექნიკურ-ორგანიზაციულ სისტემებში.

3) ინფორმაციული შეზღუდვა, არამდგრადი ალბათური განაწილების არსებობა (ორმაგი ბუნების, ალბათურ-არამკაფიო განუზღვრელობის არსებობა და სხვა).

ამგვარ საინფორმაციო-ანალიტიკურ სისტემებს ხშირად *სუსტად სტრუქტურირებულ სისტემებსაც* უწოდებენ [5].

განვიხილავთ **გადაწყვეტილების მიღების ინტელექტუალური** საკონსულტაციო-მხარდამჭერი ინფორმაციული სისტემების მოკლე მიმოხილვას; ძირითად მიმართულებებს და უპირატესობებს.

გადაწყვეტილების მიღება, რომელიც ეხება სასიცოცხლო მნიშვნელობის ობიექტებს, პირველ რიგში უკავშირდება ინფორმაციის დამუშავებას. ასეთ მაშტაბურ, გლობალურ ობიექტებად ითვლება ობიექტები, როგორიცაა: სახელმწიფო, მსოფლიო ფინანსური სისტემა, საერთაშორისო უსაფრთხოების სისტემა, ასევე შედარებით ნაკლებად გლობალური ობიექტები, როგორიცაა: საინვენსტიციო პროექტი, კომერციული ოპერაციები, წარმოების სტრუქტურა და მრავალი სხვა ობიექტი.

ძირითადი გადაწყვეტილებისა და მიზნის მისაღწევად პირველ რიგში, ყურადღება უნდა მიექცეს შიდა და გარე ფაქტორების ანალიზს, რომლებიც განსაზღვრავენ

გამოსაკვლევი ობიექტის მდგომარეობას და ახლო მომავალში მის პერსპექტიულ განვითარებას.

როგორც პრაქტიკამ გვიჩვენა, ასეთი გადაწყვეტილების მიღება შეუძლებელია ახალი მიდგომების, საინფორმაციო ანალიზისა და ავტომატიზაციის გარეშე.

ასეთი სისტემები ხელს უწყობენ მართვის ეფექტურობის ამაღლებას, ოპერატიულობას, სისრულეს, კოლექტიური გადაწყვეტილების პრობლემური სიტუაციებიდან გამოსვლას.

აღსანიშნავია რომ, გადაწყვეტილების მიღება, რომელიც წარმოიშვება საპასუხისმგებლო ამოცანების ამოხსნისას, ძირითადად ატარებს ანალიზურ სახეს და მოითხოვს გარკვეული სიტუაციების გათვალისწინებით გარკვეული ოპტიმალური შეფასების მიღებას.

ამასთან დაკავშირებით, მოცემული ამოცანები შეიძლება მივაკუთვნოთ საექსპერტო-ანალიზური ამოცანების კლასს, რომლებშიც გადაწყვეტილებები არსებულ მონაცემთა ბაზაზე დაყრდნობით ექსპერტული ცოდნის გამოყენებას მოითხოვს.

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ ანალიზური ამოცანების ამოხსნისას – გადაწყვეტილების მიღების პროცესში ვიყენებთ რა ავტომატიზირებულ სისტემებს, აუცილებელია შევექმნათ შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფა, რომელიც ჩაითვლება ბაზისად ექსპერტულ-ანალიზური ამოცანების გადასაწყვეტად. ასეთი უზრუნველყოფა თავის თავში უნდა მოიცავდეს მათემატიკურ მოდელებს და გამოთვლით მეთოდების არსებობას, რომლებიც შეიძლება დავყოთ ორ დიდ კლასად:

- 1) საინფორმაციო მოდელები და ამოცანები.
- 2) ანალიტიკური მოდელები და ამოცანები

საინფორმაციო ამოცანებს მიეკუთვნება ისეთი ამოცანები, რომლებიც დაკავშირებულია ინფორმაციის მთლიანობასთან, შენახვასთან, მასიურობის ასახვასთან და ინფორმაციის ნაკადთან. ასეთი ამოცანების ამოხსნას დიდი მნიშვნელობა აქვს ეფექტური გადაწყვეტილების მისაღებად. მათემატიკური მოდელირებისა და გამოთვლითი

მეთოდების ძირითადი დანიშნულება მდგომარეობს ოპტიმალური გადაწყვეტილების მიღების მოდელირებასა და შეფასებაში.

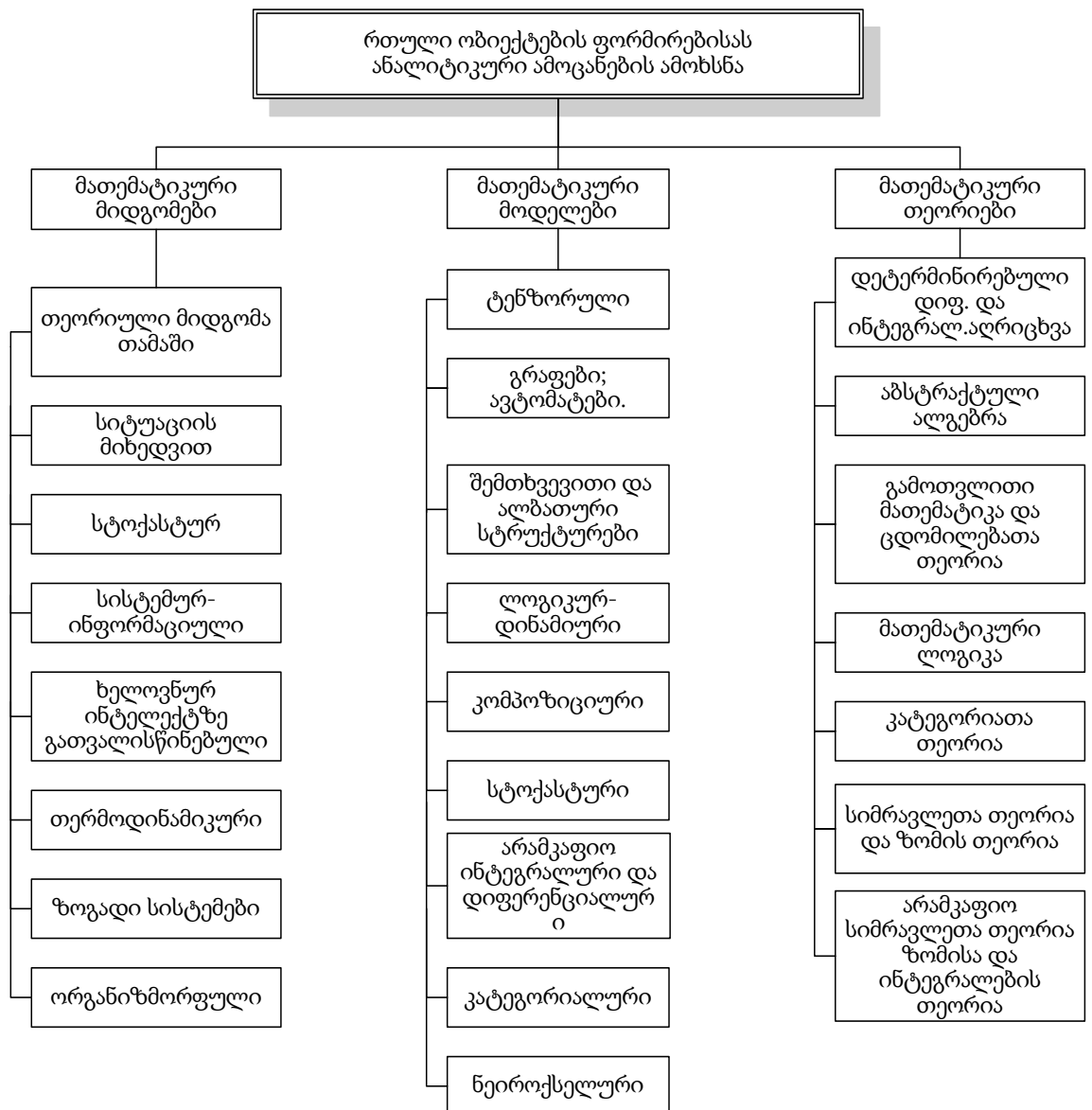
ანალიტიკური ამოცანების ასეთი სახით ამოხსნა წარმოადგენს ძირითად გასაღებს და მასზე უნდა იქნეს ორიენტირებული შესაბამისი მომავალი კომპიუტერული ინფორმაციულ-ინტელექტალური ტექნოლოგიები.

როგორც გამოყენებითი პროგრამირების უზრუნველყოფის გამოცდილება გვიჩვენებს, გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება მომავალ პროგრამულ კომპლექსს, რომელიც დაფუძნებულია ეფექტურ მათემატიკურ მიდგომებზე, მეთოდებზე და ალგორითმებზე. არასწორი მათემატიკური მეთოდების არჩევას, როგორც წესი მივყავართ ამოცანების რეალიზაციის დაბალ ეფექტურობასთან და შედეგების არასანდოობასთან.

აქედან გამომდინარე, შექმნილი პროგრამული კომპლექსები და მისი გამოყენების ტექნოლოგია, ანალიტიკური გადაწყვეტილებების მიღებისათვის შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც ხელშემწყობი რაიმე ფუნქციონალური სისტემა, მიმართული ეფექტური, ოპტიმალურად უზრუნველყოფილი შედეგის მისაღებად.

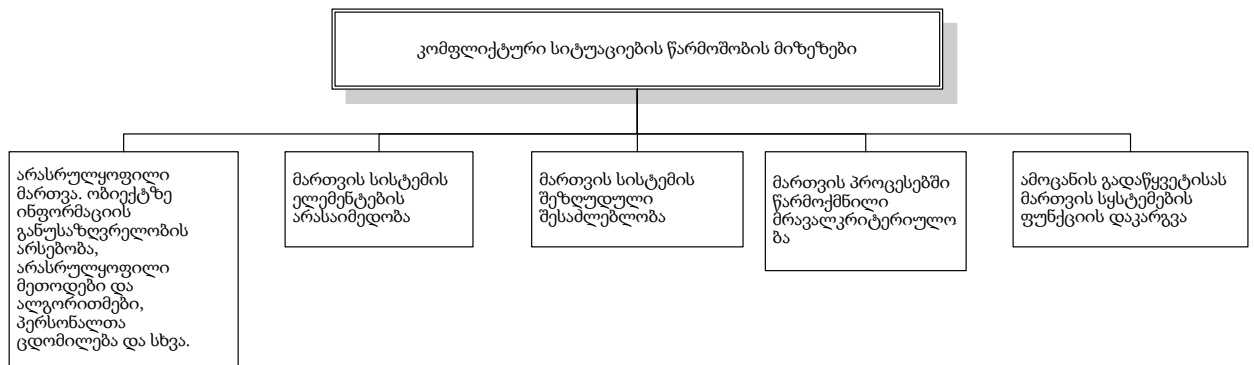
ფუნქციონალური სისტემების შესწავლამ საშუალება მოგვცა გამოგვევლინა მთელი რიგი უმნიშვნელოვანესი სისტემური მახასიათებლები, რომელთაგან ერთ-ერთია: შიდა და გარეთა სიმეტრია [5],[6]. სიმეტრიაში იგულისხმება ისეთი კატეგორია, რომელიც აღნიშნავს მრავალი ობიექტების მაჩვენებლების არასისტემურ დამახსოვრებას ზოგიერთი ცვლილებების მიმართ.

დღესდღეობით არსებობს ბევრნაირი მიდგომა ანალიტიკური ამოცანების ამოსახსნელად. ამასთან დაკავშირებით მოცემული მიდგომები, რომლებიც პროცესების ფორმალიზებას აკეთებენ, შეიძლება იყოს სხვადასხვა მათემატიკური მოდელები. ისინი ეყრდნობიან განსაზღვრულ მათემატიკურ თეორიებს. ასეთი მათემატიკური მიდგომები მოცემულია შემდეგ ცხრილში [3]:



ყოველი მეთოდი, მოყვანილი ანალიტიკური ამოცანების კლასიდან, გამოირჩევა თავისი მიდგომით, ამოხსნის სირთულით და სხვა შესაძლებლობებით. მაგრამ ანალიტიკური ამოცანების გამოყენებით, რომ მივიღოთ ეფექტური შედეგები, აუცილებელია გამოსაკვლევი ობიექტის ყოველმხრივი შეფასება. მაგალითად, კონფლიქტური სიტუაციები.[5]

კონფლიქტური სიტუაციის გამომწვევი მიზეზები, გადაწყვეტილების მიღებისას უშუალოდ დამოკიდებულია სამართავი ობიექტის კონფლიქტურ ბუნებასთან. მოცემული მიზეზები შეიძლება დაიყოს ხუთ ძირითად ჯგუფად:



ობიექტების კონფლიქტური ბუნების მოქმედება განსაზღვრავს იმას, რომ მოცემული ობიექტები მიზანშეწონილია გადაისინჯოს, როგორც რთული სისტემები, რომელთა უმეტესობა ურთიერთდაკავშირებულია ცალკეული რგოლებით, სტრუქტურებითა და ელემენტებით. ამის გამო გართულებულია არა მარტო მათი შესწავლა და მოდელირება, არამედ მთლიანად მათში მომხდარი პროცესების აღქმა.

რთული ობიექტები, როგორც მართვის ობიექტები, ქმნიან გარკვეულ განსაკუთრებულობებს [3], [5], [6] :

1. მართვის პროცესში გადაწყვეტილების მიღება და პირობების არჩევის ზოგიერთი მიზანი, რომლებიც გავლენას ახდენენ ამ არჩევანზე, შეიძლება გამოხატული იყოს რაოდენობრივი კავშირის ფორმით. ამ თვალსაზრისით, სუსტად სტრუქტურირებული არამკაფიო განუზღვრელობის მქონე ობიექტებზე გადაწყვეტილების მიღების კრიტერიუმების უმრავლესობა ბუნებრივია იქნება არაზუსტი [5]. არაზუსტად იქნება განსაზღვრული არსებული კლასების დახასიათება ამოცანების ამოხსნის კლასიფიკაციის შემთხვევაშიც.

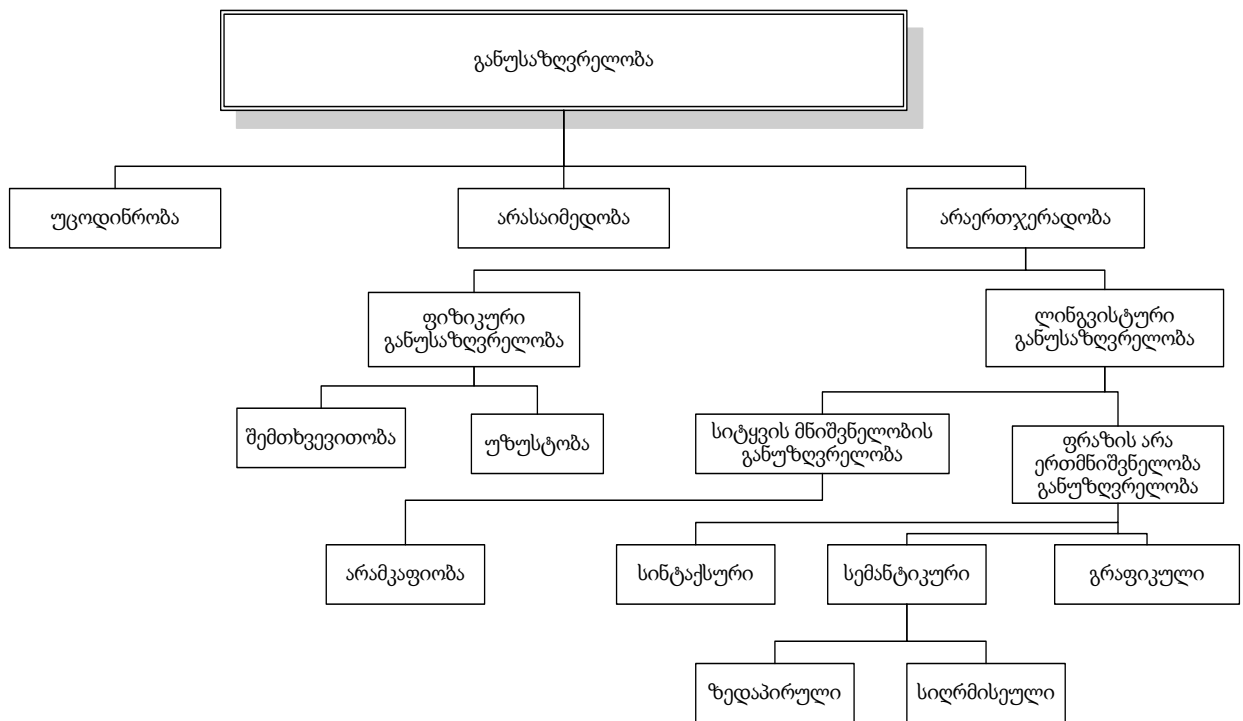
2. ინფორმაციის მნიშვნელოვანი ნაწილი, რომელიც აუცილებელია ობიექტის მათემატიკური აღწერისათვის, არსებობს მოცემულ ფორმაში და გამოცდილი ექსპერტ-სპეციალისტების დახმარებით, რომლებსაც აქვთ გარკვეული გამოცდილება და ცოდნა მოცემული ობიექტის შესახებ, ხშირ შემთხვევაში მივდივართ არამკაფიო ფორმალურ წარმოდგენაზე. წარმოიშობა არამკაფიო განუზღვრელობა [1].

აქედან გამომდინარე, განუზღვრელობა წარმოიქმნება მრავალი ფაქტორებიდან გამომდინარე, ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების გარდა, უნდა გავითვალისწინოთ ამოცანის მრავალკრიტერიულ განუზღვრელობა, ერთდროულად მოქმედი ყველა

ფაქტორის აღწერის შეუძლებლობა, სტატისტიკური განუზღვრელობა და სხვა ფაქტორები.

ბოლო წლების გამოცდილებამ გვიჩვენა, რომ ანალიტიკური ამოცანების გადაწყვეტისას, წარმოქმნილი განუზღვრელობა უფრო ზოგადი ბუნებისაა და არა მარტო სტატისტიკურია.

ქვემოთ მოყვანილია განუზღვრელობის კლასიფიკაციის სქემა [5]:



აღნიშნული ანალიტიკური ამოცანების გადაწყვეტისათვის ტრადიციული მიდგომების განუზღვრელობის შემთხვევაში გამოიყოფა ორი ალტერნატივა:

1. ვეცადოთ აღვრიცხოთ ყველა შესაძლო ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ობიექტზე. სამწუხაროდ, რთული ობიექტების სპეციფიკიდან გამომდინარე, ეს ყოველთვის არ ხერხდება, შესაძლებელიც რომ იყოს, ავარგოთ ტრადიციული მეთოდებით მათემატიკური მოდელი, იგი მაინც არ იქნება გამოსადეგარი პრაქტიკული გამოყენებისათვის, რომელიც გამოწვეულია, როგორც ფუნქციონალური, ასევე ეკონომიკური ასპექტებით. ამგვარად, რთული ობიექტების ზუსტი მათემატიკური მოდელების აგება, გამოსადეგი რეალიზაციებისათვის, ანალიტიკური ამოცანების ამოხსნისთვის, მისაღები გადაწყვეტილებისთვის, ტრადიციული საწყისების

გამოყენებით, ფართოდ გავრცელებული ფორმალიზაციის ვარიანტები და ობიექტების წარმოდგენა ან რთულდება, ან საერთოდ შეუძლებელია. გარდა ამისა მტკიცდება, რომ ამგვარი ანალიტიკური ამოცანების შეერთება განუზღვრელობებთან ზუსტად დადგენილ მათემატიკური ამოცანებით კლასიკური მიდგომის გამოყენებით, პრინციპში შეუძლებელია, რადგანაც ეს ითხოვს ე.წ. „განუზღვრელობის მოხსნას“ [5]. რაც ასეთ პირობებში პრაქტიკულად შეუძლებელია.

ასეთი კლასის ამოცანების ამოსახსნელად, ჩვენ ვხვდებით ალტერნატივის არჩევის პრობლემას, გაურკვეველი ობიექტის ფორმალიზაცია მდგომარეობს იმაში, რომ მოდელი შეიძლება იყოს აგებული დამატებით ინფორმაციაზე დაყრდნობით, მიღებული სპეციალისტებისგან, ექსპერტებისგან და პირებისგან, რომლებიც რეალურ პირობებში იღებენ გადაწყვეტილებებს. აქედან გამომდინარე, ჩნდება სპეციალური მათემატიკური აპარატის დამუშავების აუცილებლობა, *სუსტი სტრუქტურირებული ან არასტრუქტურული ანალიტიკური ამოცანების ამოსახსნელად* [5]. შესაბამისად შექმნილი აპარატი ადეკვატურად უნდა გამოხატავდეს რეალური სინამდვილის აღწერას.

2. მოდელირების ალტერნატიული გზების მოძიება. რთულ სისტემებთან მუშაობისას, ალბათ ყველაზე მნიშვნელოვანი არის არამკაფიო მონაცემების აღწერა და დამუშავება. ეს აზრი დაფუძნებულია გარკვეულ პრინციპზე. ფორმალურად, ამ პრინციპის აზრი იმაშია, რომ სისტემის სირთულეების ზრდასთან ჩვენი შესაძლებლობა, ზუსტი და აზრიანი დასკვნების გამოტანის შესახებ, საკმაოდ არასაიმედოა.

ამიტომ, ასეთ შემთხვევებში არამკაფიო განუზღვრელობის მქონე რთულ სტრუქტურებზე არამკაფიო ანალიზის გამოყენებას პრაქტიკულად ალტერნატივა არ გააჩნია.

დღესდღეობით შეიძლება გამოვყოთ მათემატიკური თეორიები, რომლებიც მიეკუთვნებიან არამკაფიო ინფორმაციის ფორმირებას:

1. მრავალმნიშვნელოვანი ლოგიკა.
2. ალბათობის თეორია.
3. ცდომილებათა თეორია.

4. ინტერვალების თეორია.
5. სუბიექტური ალბათობათა თეორია.
6. არამკაფიო სიმრავლეთა თეორია.
7. აგრეგირების ოპერტორების თეორია.

მათემატიკური თეორიები, რომლებიც გამოიყენება ზემოთ აღწერილი ანალიტიკური ამოცანების ამოსახსნელად, დამახასიათებელი ნიშნების მიხედვით მოყვანილია ცხრილში [5].

#	დამახასიათებელი ნიშნები	მათემატიკური თეორიები						
		1	2	3	4	5	6	7
1	რიცხვითი განუზღვრელობის აღრიცხვა	–	+	+	+	+	+	+
2	განუზღვრელ მოვლენათა აღრიცხვა	+	+	–	+	+	+	+
3	არარიცხვითი ლინგვისტური გან. აღრიცხვა	+	–	–	–	+	+	+
4	სემანტიკურ-მოდალური ინფორმაციის აღრიცხვა	+	–	–	–	–	+	+
5	კვალიფიკაციის აღრიცხვა განუზღვრელობით	–	+	–	–	+	+	+
6	კვალიფიკაციის აღრიცხვა ზოგადად	+	–	–	–	–	+	+
7	სიზუსტისა და განუზღვრელობის შეუთავსებლობის აღრიცხვა	+	–	–	+	+	+	+
8	ფორმალიზების ეფექტურობა სრული უცოდინრობისას	+	–	+	+	+	+	+

როგორც ცხრილიდან ჩანს ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი აქვს სუბიექტურ ალბათობას, არამკაფიო სიმრავლეთა თეორიას და აგრეგირების ოპერატორების თეორიას. ჩვენ არჩევანი გავაკეთედ ბოლო ორ მიმართულებაზე. მათი გამოყენებით სადიპლომო ნაშრომში განვითარებულია გადაწყვეტილების მიმღების აგრეგირების OWA-ს ტიპის ოპერატორების გამოყენება საექსპერტო შეფასებების ბაზაზე. შექმნილია მხარდანჭერი ინტელექტუალური სისტემა.

§1.2. ფაზი–სიმრავლეების სათავეებთან

არასრული ინფორმაციის არსებობისას, უზუსტობისა და განუზღვრელობის პირობებში, გადაწყვეტილების მიღების პრობლემატიკაში დღეს აქტუალური ხდება არამკაფიო მოდელირება. წარმოდგენილია არამკაფიო სიმრავლეების თეორიის ძირითადი, ელემენტარული ასპექტები, რომლის შექმნა განაპირობა ადამიანის სწრაფვამ შემეცნებისა და აზროვნების პროცესების უკეთ შესწავლისათვის, ხოლო საწყისი არამკაფიო ინფორმაციის ასახვათა მათემატიკური ინსტრუმენტები რეალობის ადექვატური მოდელების აგების საშუალებას იძლევა.

ადამიანის ინტელექტის საოცარი თვისებაა არასრული და არამკაფიო ინფორმაციის პირობებშიც კი მიიღოს საკმაოდ ზუსტი გადაწყვეტილება. ადამიანის აზროვნების მსგავსი ინტელექტუალური მოდელების აგება, მათი მომავალი თაობათა კომპიუტერულ სისტემებში გამოყენება – დღევანდელი მეცნიერების ერთ-ერთი უმთავრესი პრობლემაა.

ამ მიმართულებით დაახლოებით 45 წლის წინათ მნიშვნელოვანი ნაბიჯი გადადგა წინ კალიფორნიის (აშშ) უნივერსიტეტის (ბერკლი) პროფესორმა ა.ზადემ (Lotfi A. Zadeh). მისმა ნაშრომმა, რომელიც 1965 წელს დაიბეჭდა, ადამიანის ინტელექტუალური საქმიანობის მოდელირებას ჩაუყარა საფუძველი, რამაც არსებული ზოგიერთი მათემატიკური თეორიის ახალ ინტერპრეტაციას მისცა ბიძგი. მოკლედ, რაც ა.ზადემ თავის ნაშრომში ახალი შემოგვთავაზა:

1) მან განაზოგადა სიმრავლის კლასიკური, კანტორისეული ცნება, დაუშვა რა, რომ სიმრავლის მახასიათებელმა ფუნქციამ, ელემენტების სიმრავლეში შეთანხმებულობის

(membership) ფუნქციამ შეიძლება მიიღოს არა მარტო 0 ან 1 მნიშვნელობა, არამედ ნებისმიერი მნიშვნელობა $[0,1]$ შუალედიდან. ასეთ სიმრავლეებს მან არამკაფიო (Fuzzy) უწოდა.

2) მან შემოიღო მთელი რიგი ოპერაციები არამკაფიო სიმრავლეებზე.

3) შემოიღო რა ე.წ. „ლინგვისტური ცვლადის“ ცნება და დაუშვა, რომ მისი მნიშვნელობები (ტერმები) არამკაფიო სიმრავლეებია, მან ააგო ინტელექტუალური საქმიანობის აქტივობის აღმწერი აპარატი, რომელიც უზრუნველყოფს მოცემული განუზღვრელობის პირობებში აქტივობის შედეგის რაოდენობრივ მხარეს.

უკვე 1990 წლისთვის ამ დარგში გამოქვეყნებულ ნაშრომთა სიამ 10 000-ს მიაღწია, ხოლო ბოლო წლებში არამკაფიო სისტემების კვლევის მიმართულებით უფრო პრაქტიკული გამოყენებისკენ სწრაფვამ გამოიწვია ისეთი პრობლემატიკის შექმნა, როგორიცაა არამკაფიო გამოთვლების კომპიუტერთა არქიტექტურა, კონტროლერებისა და არამკაფიო კომპიუტერების ელემენტური ბაზა, შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფა, გადაწყვეტილების მიღების არამკაფიო ექსპერტული აპარატი და ა.შ.

არამკაფიო სიმრავლეების მათემატიკური თეორია, რომელიც ა.ზადემ შემოგვთავაზა, არამკაფიო ცნებებისა და ცოდნის აღწერის, ასევე ამ ბაზაზე ოპერირებისა და გადაწყვეტილების მიღების საშუალებას იძლევა. ცხადია ამ თეორიაზე დაფუძნებული ახალი კომპიუტერული სისტემები აფართოებენ მომავალი თაობების კომპიუტერების გამოყენების არეალს, რაც ბოლო პერიოდში არამკაფიო ლოგიკის სწრაფმა განვითარებამ განაპირობა.

არამკაფიო სიმრავლეების თეორია – ეს არის კლასიკურ მათემატიკასა და რეალურ სამყაროს ყველგან შეღწევადი უზუსტობათა შორის დაახლოების გზაზე წინგადადგმული ნაბიჯი, რომლის შექმნა განაპირობა ადამიანის სწრაფვამ შემეცნებისა და აზროვნების პროცესების უკეთ შესწავლისთვის.

დღევანდელ დღეს ჩვენ არ შეგვიძლია ავაგოთ ისეთი მანქანები, რომელნიც შეძლებდნენ ადამიანის დონეზე მისთვის მეტოქეობა გაეწიათ ისეთი ამოცანების შესრულებაში, როგორიცაა ენიდან თარგმნა, საუბრის ამოცნობა, ინფორმაციის აგრეგირება და რა თქმა უნდა გადაწყვეტილების მიღება შესაძლებლობითი ბუნების მქონე განუზღვრელობაზე.

ასეთი მანქანების შექმნის შეუძლებლობა პირველ რიგში აიხსნება ერთი მხრივ ადამიანის აზროვნებასა და მეორეს მხრივ მანქანის „აზროვნებას“ შორის ფუნდამენტური განსხვავებით. განსხვავება ადამიანის ტვინის შესაძლებლობებშია, რომლებიც დღევანდელ ციფრულ კომპიუტერულ სისტემებს არ გააჩნიათ (ანუ ძირითადად იფიქროს და მიიღოს გადაწყვეტილება არაზუსტი, არარაოდენობრივი, არამკაფიო ინფორმაციის ბაზაზე). ამიტომაც, რომ თანამედროვე რთული კომპიუტერული გამოთვლითი სისტემები გამოუყენებია მათი ადამიანთან ბუნებრივი ურთიერთობის, კონტაქტის დასამყარებლად (ანალოგიურად იმისა რაც ხდება ადამიანსა და ადამიანს შორის).

სიმრავლე – მათემატიკის ერთ-ერთი ძირითადი ცნებაა. შევნიშნოთ, რომ ბევრს, შესაძლოა ადამიანის გარშემო არსებული სამყაროს შესახებ ადამიანის ცოდნის უმრავლესობას, ვერ ვუწოდებთ კლასიკური აზრით სიმრავლეებს. მათ უფრო „არამკაფიო სიმრავლეები“ უნდა ვუწოდოთ, ანუ კლასები „არაზუსტი“ საზღვრებით, როდესაც გადასვლა ელემენტის ერთ კლასში შეთანხმებულობიდან მეორე კლასში შეთანხმებულობაზე მიმდინარეობს თანდათანობით და არა მყისიერად.

§1.3. არასრული ინფორმაციის წარმოდგენის შესახებ.

ინფორმაციის უზუსტობა და განუზღვრელობა

არასრული ინფორმაციის არსებობისას მისი უზუსტობა და განუზღვრელობა შეიძლება განხილული იქნას, როგორც ორი ურთიერთსაპირისპირო აზრი ერთი და იმავე რეალობაზე. შემდგომში ინფორმაცია წარმოდგენილი იქნება ლოგიკური გამონათქვამის ფორმით, რომელიც შეიცავს პრედიკატს და აუცილებლობის შემთხვევაში კვანტიფიკატორს. საბაზისო ცოდნად აღებული იქნება ცნობათა (ფაქტების) სიმრავლე, რომელიც გააჩნია სუბიექტს, სუბიექტთა ჯგუფს ან მოთავსებულია ინფორმაციულ სისტემაში და რომელიც ერთი და იგივე პრობლემური გარემოდანაა აღებული. მაშინ პრედიკატი, რომელიც ინფორმაციის წარმოდგენისას ჩნდება, შეიძლება გაგებული იქნას, როგორც ერთი და იგივე უნივერსალური სიმრავლის ქვესიმრავლე. ნებისმიერი გამონათქვამი შეიძლება განხილული იყოს, როგორც მტკიცება, რომელიც რომელიმე მოვლენის წარმოშობას ეკუთვნის. თავის მხრივ, მოვლენები წარმოდგენილია იმ

უნივერსალური სიმრავლის ქვესიმრავლების სახით, რომელსაც „აუცილებლად განხორციელებადი მოვლენა“ ეწოდება. ასე, რომ გვაქვს მონაცემთა სიმრავლის ანალიზის სამი ექვივალენტური საშუალება იმის და მიხედვით არის თუ არა აქცენტი გაკეთებული სტრუქტურაზე (ლოგიკური თვალსაზრისით), ამ ინფორმაციის შინაარსზე (თეორიულ-სიმრავლური თვალსაზრისით) ან მის დამოკიდებულებაზე რეალურ ფაქტებთან (მოვლენური თვალსაზრისით).

ჩვენ განვსაზღვრავთ *ინფორმაციულ ერთეულს* ოთხეულით = (ობიექტი, ნიშანი, მნიშვნელობა, დასაჯერობა). ნიშანი, რომელიც ღებულობს ობიექტის ან საგნის მნიშვნელობას (მნიშვნელობათა სიმრავლეს) ფუნქცია შეესაბამება. ამ ფუნქციის სახელი ფიგურირებს ინფორმაციულ ერთეულში, რომლის მნიშვნელობა (მნიშვნელობები) შეესაბამება რომელიმე პრედიკატს ანუ უნივერსალური სიმრავლის ქვესიმრავლეს, დაკავშირებულს მოცემულ ნიშნით. დასაჯერობა - ინფორმაციული ერთეულის საიმედოობის მაჩვენებელია. ცხადია, რომ ინფორმაციული ერთეულის შემადგენელი ოთხი კომპონენტი შეიძლება იყოს შედგენილი (ობიექტთა სიმრავლე, ნიშანთა სიმრავლე, n-ადგილიანი პრედიკატი, დასაჯერებლობის სხვადასხვა ხარისხი), ამას გარდა შეიძლება შემოყვანილი იქნას ცვლადები, განსაკუთრებით ობიექტის დონეზე, თუკი ინფორმაცია შეიცავს კვანტიფიკატორებს.

მოცემულ კონტექსტში შეიძლება მკაფიო განსხვავება გავაკეთოთ განუზღვრელობასა და უზუსტობის ცნებებს შორის. *უზუსტობა* ეკუთვნის ინფორმაციის შინაარსს (ოთხეულში იგი *მნიშვნელობითაა* წარმოდგენილი), ხოლო *განუზღვრელობა* მის *დასაჯერობას*, რომელიც სინამდვილესთან შესაბამისობის აზრითაა გაგებული.

ინფორმაციის განუზღვრელობის ხარისხი გამოისახება ისეთი კვალიფიკატორებით, როგორიცაა „აღბათ“, „შესაძლებელია“, „სარწმუნოა“ და ა.შ., რომელთაც ჩვენ აქ შევეცდებით მივანიჭოთ მეტ-ნაკლებად ზუსტი აზრი. კვალიფიკატორი „აღბათ“-ის მოდალურობის კვლევა თითქმის 2 საუკუნის განმავლობაში მიმდინარეობდა. აღბათობას გააჩნია ორი განსხვავებული ინტერპრეტაცია. პირველი მათ შორის ფიზიკური (სტატისტიკური), რომელიც დაკავშირებულია სტატისტიკური გამოცდების ჩატარებასთან და მოვლენის (შემთხვევითი ხდომილების) სიხშირის განსაზღვრასთან, მეორე – ეპისტომოლოგიური, რომელიც დაკავშირებულია სუბიექტურ მსჯელობასთან.

„შესაძლებელია” და „აუცილებელია” – მოდალურობები შეისწავლებოდა ჯერ კიდევ არისტოტელეს დროს, როდესაც მან მათი დუალური ბუნების ფაქტი დაადგინა (თუ რომელიმე მოვლენა არის აუცილებელი, მაშინ მისი საპირისპირო მოვლენა შეუძლებელი და პირიქით).

საყურადღებოა, რომ ცნება „ალბათ”-ის საპირისპიროდ, ცნებები „შესაძლებელია” და „აუცილებელია” ორმოდუსიანი ლოგიკის ფარგლებში ხშირად განიხილებოდა, როგორც „ყველაფერი” ან „არაფერი” კატეგორიების ტიპები. მაგრამ ცნება „შესაძლებელია” ისე როგორც ცნება „ალბათ” უშვებს ორ ინტერპრეტაციას: ფიზიკური (რომელიმე ქმედების შესრულების შრომატევადობის ზომა) და ეპისტემოლოგიური (მსჯელობა, რომელიც ნაკლებად ზღუდავს მის ავტორს). ცნება „აუცილებელია” – პირიქით, ფიზიკური და ეპისტემოლოგიური აზრით გაცილებით მეტი მტკიცებითი ცნებაა (სუბიექტური აუცილებლობა განუზღვრელობაა, სარწმუნოობაა). ბუნებრივია შესაძლებლობის და აუცილებლობის ხარისხის არსებობა ისევე დასაშვებია, როგორც ალბათობის ხარისხის. სარწმუნოობასა და ნდობას აქვს სუფთა ეპისტემოლოგიური ინტერპრეტაცია და შესაბამისად შესაძლებლობასთან და აუცილებლობასთან არიან დაკავშირებულნი.

თითოეული ამ ცნებათაგანი შეესაბამება ცოდნის ბაზიდან გამოყვანის რომელიმე საშუალებას: ნდობას იმსახურებს ყველა ის, რომელიც უშუალოდ დედექტიურად გამოიყვანება ცოდნის ბაზიდან, ხოლო სარწმუნოობა ყველაფერს, რომელიც არ ეწინააღმდეგება მას (ინდუქციური შეხედულება).

განუზღვრელობის შემცველი გამონათქვამთა მაგალითებია (ინფორმაციული ერთეულით):

„ალბათ ნათიას სიმაღლე 1,70მ-ზე ნაკლები არაა” (სიმაღლე; ნათია; 1,70მ; ალბათ),

„ალბათობა იმისა, რომ ხვალ თბილისში 10მმ ნალექი მოვა 0,5-ის ტოლია” - (რაოდენობა; ნალექები ხვალისთვის; 10მმ; ალბათობა=0,5)

ინფორმაციულ ერთეულს ვუწოდებთ ზუსტს, თუ ქვესიმრავლე, რომელიც შეესაბამება „მნიშვნელობას” ოთხეულში, ერთელემენტია. რაც იმას ნიშნავს, რომ მისი „გახლეჩა” ნაწილებად არ შეიძლება; თუმცა სიზუსტე რა თქმა უნდა დამოკიდებულია საბაზისო სიმრავლის განსაზღვრის ხერხზე, მაგალითად განზომილების ერთეულის შერჩევაზე

და სხვა. სხვა შემთხვევებში უნდა ვილაპარაკოთ არაზუსტ (imprecise) ინფორმაციაზე. ქართულ ენაში არის უზუსტობის აღმწერი მრავალი კვალიფიკატორი: „ბუნდოვანი“, „არამკაფიო“, „გაურკვეველი“, „ორაზროვანი“ და ა.შ. აქ შევნიშნოთ, რომ ორაზროვნება წარმოადგენს უზუსტობის ფორმას დაკავშირებულს ენასთან.

უნივერსალური სიმრავლე, რომელიც დაკავშირებულია ინფორმაციულ ერთეულთან ცნობილად ითვლება. განზოგადოება უზუსტობის „კეთილთვისებიან“ ფორმად შეიძლება მივიჩნიოთ, რომელიც აბსტრაგირების პროცესთან არის დაკავშირებული. ინფორმაცია განზოგადოებულია, თუ ნაჩვენებია საერთო თვისებების მქონე ობიექტების სიმრავლე. ინფორმაციის არამკაფიო (ბუნდოვანი) ხასიათი გამოიხატება შესაბამისი ობიექტების მნიშვნელობათა სიმრავლის მკაფიო საზღვრების არქონაში. მაგალითი:

„შესაძლებელია, ნათიას სიმაღლე დაახლოებით 1,70მ იყოს“ (სიმაღლე; ნათია; დაახლოებით; 1,70მ; შესაძლებელია)

ამ მაგალითში ობიექტის მნიშვნელობათა სიმრავლეს მკაფიო საზღვრები არ გააჩნია (დაახლოებით 1,70მ). ბუნებრივი ენის მრავალი კვალიფიკატორი არამკაფიოა და მათთვის დამახასიათებელია განზოგადოება. ბუნდოვანი ტერმინი „დაახლოებით“ ახასიათებს ობიექტის მნიშვნელობათა ერთობლიობას, ბევრი ან ცოტას ადექვატური სიზუსტით. აქედან გამომდინარე ინფორმაცია შეიძლება იყოს ერთდროულად არამკაფიო და განუზღვრელი, რასაც შემდეგი გამონათქვამიც დაადასტურებდა.

“ალბათ ხვალ ბევრი ნალექი იქნება” (რაოდენობა; ნალექი ხვალ; ბევრი, ალბათ)

მონაცემთა ცნობების, ფაქტების მოცემული სიმრავლისთვის უზუსტობასა და განუზღვრელობას შორის წინააღმდეგობა გამოიხატება იმაში, რომ გამონათქვამის შინაარსის სიზუსტის გაზრდით იზრდება მისი განუზღვრელობა და პირიქით. ზოგად შემთხვევაში ზუსტი ინფორმაციის განუზღვრელ ხასიათს მივყავართ საბოლოო დასკვნამდე, რომელიც უზუსტობამდე, გამომდინარე ამ ინფორმაციიდან.

გაზომვებისას ზუსტი ინფორმაციის მიღება პრაქტიკულად შეუძლებელია და თუ შესაძლებელია ის ხშირად ნაკლებად სასარგებლოა ან რთულად ასახსნელი. გამარტივებული მოდელი უზრუნველყოფს ხშირად უფრო გასაგები ინფორმაციის

მიღებასა და წარმოდგენას, ვიდრე დეტალური და უფრო რთული მოდელები. ამიტომაც, სხვადასხვა შემთხვევებში, საზომი ხელსაწყოების მიერ ცდომილებებით ანდა ადამიანის (ექსპერტის) მიერ წარმოდგენილი ინფორმაცია მონაცემებზე არაზუსტია, წინააღმდეგობრივი და არასრულიც.

ცნობილია, რომ ალბათობის თეორია ერთი მხრივ და ცდომილებათა თეორია მეორე მხრივ – არასრული ინფორმაციის წარმოდგენის ორი კლასიკური მიდგომაა. მაგრამ თანამედროვე ინფორმაციის დამუშავებასთან მიმართებაში ორივე თეორია არაა საკმარისი: ცდომილებათა თეორია გამოიყენება მხოლოდ რიცხვითი მონაცემებისთვის, როდესაც ისინი წარმოდგენილია „საკმარისი“ უზუსტობით, მაგრამ „ცხადი“, ჩვეულებრივი ინტერვალებით. თუ რიცხვითი მონაცემები წარმოდგენილია შემთხვევითი ცდომილებებით (ნდობის ინტერვალებით), მაშინ წარმოიშობა ალბათურ – სტატისტიკური განუზღვრელობა და მონაცემების დამუშავებისთვის გამოიყენება შესაბამისი მეთოდები. მაგრამ როდესაც მონაცემები წარმოდგენილია ინტერვალებით, მათი განაწილება „ბუნდოვანია“, ხასიათდება გადაფარვებით და ქმნიან ე.წ. კონსონანტურ ტანს. როდესაც მონაცემების აღწერასა და მიღებაში „ჩარეულია“ სუბიექტი (ექსპერტი), რომელიც მონაცემთა ობიექტური აღწერის (ხელსაწყოები, საზომი საშუალებანი და სხვა) პარალელურად „ერევა“ მონაცემთა შეფასებასა და წარმოდგენაში, მაშინ მონაცემთა ბუნება კომბინირებული ხდება. ალბათურ – სტატისტიკური განუზღვრელობის პარალელურად არსებობს ე.წ. შესაძლებლობითი განუზღვრელობა, რომელიც რა თქმა უნდა სუბიექტის ინტელექტუალური აქტივობის შედეგად წარმოიშობა. ცხადია ასეთ შემთხვევებში მხოლოდ ალბათურ – სტატისტიკური და ცდომილებათა თეორიების გამოყენება არ იძლევა დამაკმაყოფილებელ შედეგებს და ბუნებრივია მიზეზი მონაცემთა ბუნებაში და მათი აღწერის, გაზომვის, სკალირების, ექსპერტის შეფასებების და სხვა თავისებურებაში უნდა ვეძიოთ. სუბიექტურ – ობიექტური მონაცემების აღწერისათვის ალბათურ – სტატისტიკური მეთოდები მეტისმეტად ნორმატიულად გვეჩვენება, ხოლო ცდომილებათა თეორია მხოლოდ ობიექტური, თავისი შინაარსით ზუსტი სიდიდეების გაზომვის ან გამოთვლების უზუსტობას ასახავს, როდესაც მონაცემები ინტერვალებით

წარმოიდგინება და ქმნიან ე.წ. დისონანტურ ტანს. ასეთივე დისონანტურ ტანთან აქვს საქმე ალბათობის თეორიას.

ცხადი ხდება, რომ ასეთ შემთხვევებში მხოლოდ ალბათურ – შესაძლებლობითი ანალიზი განაპირობებს მეტ – ნაკლებად ადექვატურ შედეგებს, რაც არამკაფიო ანალიზის, არამკაფიო სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებას მოითხოვს.

თავი 2

§2.1. კომივოიაჟერის ამოცანა

კომივოიაჟერის ამოცანა დისკრეტული ოპტიმიზაციის ერთ-ერთ ყველაზე საინტერესო ამოცანას წარმოადგენს, როგორც თეორიული კვლევის ასევე პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით.

კომივოიაჟერმა (მოხეტიალე ვაჭარმა) უნდა შემოიაროს ქალაქების ფიქსირებული ერთობლიობა. მოძრაობა უნდა დაიწყოს იმ ქალაქიდან სადაც იმყოფება და უნდა დაამთავროს იმავე ქალაქში. ამასთან ყველა ქალაქში უნდა შევიდეს ერთხელ. ეს ისე უნდა გააკეთოს, რომ მთელი მოგზაურობის ჯამური დანახარჯები იყოს მინიმალური. დანახარჯებში იგულისხმება ან თანხა, ან დრო, ან ჯამური გავლილი მანძილი.

კომივოიაჟერის ამოცანა (TSP - Travelling Salesman Problem) კომბინატორული ოპტიმიზაციის ტიპური ამოცანაა, რომლის ჩამოყალიბება (სიტყვიერი ფორმულირება) მარტივი ამოცანის შთაბეჭდილებას ტოვებს, თუმცა ზუსტი ამონახსნის პოვნა სერიოზულ ძალისხმევას ითხოვს და დიდი განზომილებისთვის გადაუჭრელ პრობლემად რჩება. ბიზნეს-გამოყენებებში გვხვდება კომივოიაჟერის ამოცანის სხვა ვარიანტი - ხელსაწყოთა ოპტიმალური გადაწყობის ამოცანის სახით.

ზოგად შემთხვევაში კომივოიაჟერის ამოცანა შეიძლება ჩამოყალიბდეს როგორც გრაფში უმოკლესი სიგრძის ჰამილტონის ციკლის მოძებნის ამოცანა.

ვთქვათ, გვაქვს $n + 1$ ქალაქი $0, 1, \dots, n$ და ქალაქების ყოველი i და j წყვილისათვის მოცემულია მათ შორის მანძილი - $c_{ij} \geq 0$. კომივოიაჟერი იმყოფება 0 ქალაქში, შემოივლის ყველა ქალაქს და დაბრუნდება 0 ქალაქში. უნდა ვიპოვოთ ქალაქების შემოვლის ისეთი მიმდევრობა, რომლისთვის ჯამური მანძილი იქნება მინიმალური. კომივოიაჟერის სიმეტრიული ამოცანისათვის $c_{ij} = c_{ji}$.

განვიხილოთ ამოცანის კომბინატორული დასმა. მარშრუტის ქვეშ გვესმის $Z = (0, i_1, i_2, \dots, i_n, 0)$, სადაც $i_1, i_2, \dots, i_n$ არის $1, 2, \dots, n$ რიცხვების გადანაცვლება. Z მარშრუტის სიგრძე

$$\ell(Z) = \sum_{k=0}^n c_{ik, ik+1},$$

ვთქვათ, Z არის ყველა მარშრუტის სიმრავლე, $|Z| = n!$ უნდა ვიპოვოთ ისეთი Z_0 მარშრუტი, რომ

$$\ell(z_0) = \min \ell(Z), \quad z \in Z.$$

განვიხილოთ ამოცანის დასმა მთელრიცხვა პროგრამირების ტერმინებში, შემოვიღოთ ბულის ცვლადები

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{თუ კომივოიაჟერი გადადის } i - \text{ური ქალაქიდან } j - \text{ურ ქალაქში} \\ 0, & \text{წინააღმდეგ შემთხვევაში} \end{cases}$$

მაშინ მარშრუტის სიგრძე იქნება

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

ყოველ ქალაქში თითოჯერ შესვლის და თითოჯერ გამოსვლის პირობებს კი უზრუნველყოფს შესაბამისად შემდეგი შეზღუდვები:

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 0, 1, \dots, n,$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

ამას ემატება $x_{ij} \in \{0; 1\}$, $i, j = 0, 1, \dots, n$ პირობები.

ადვილი შესამჩნევია, რომ მიღებული მოდელი არ განსხვავდება დანიშვნის ამოცანის მათემატიკური მოდელისაგან, რომლის ოპტიმალური ამონახსნი შეიძლება არ შეესაბამებოდეს კომივოიაჟერის დასაშვებ მარშრუტს. ამიტომ მიღებული შეზღუდვები არ არის სრული და საჭიროებს ისეთი პირობების დამატებას, რომელიც არ დაუშვებს ამონახსნში რამდენიმე ციკლის არსებობას. ამ საკითხს დაწვრილებით ქვემოთ განვიხილავთ.

ადვილი შესამჩნევია, რომ კომივოიაჟერის ამოცანის ამონახსნი ყოველთვის იქნება დანიშვნის ამოცანის ამონახსნი, მაგრამ პირიქით ეს ხშირად ასე არ არის. n -ზე ნაკლებ განზომილებიანი ციკლების არსებობა დანიშვნის ამოცანის ამონახსნში ეს არის მტავარი პრობლემა, რის გამოც დანიშვნის ამოცანა რჩება „ადვილად ამოხსნადი“ ამოცანების კლასში, კომივოიაჟერის ამოცანა კი ე.წ. „რთულად ამოხსნადი“ ამოცანათა კატეგორიას მიეკუთვნება. იმისათვის, რომ მივიღოთ კომივოიაჟერის ამოცანის სრულყოფილი მოდელი მტელრიცხვა პროგრამირების ამოცანის სახით, საჭიროა დამატებითი პირობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ n -განზომილებიანი ციკლის არსებობას. ამ პირობებს აქვს სახე

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j,$$

სადაც $u_i \geq 0$ დამატებითი (ახალი) ცვლადებია, შედეგად მიიღება ნაწილობრივ მთელრიცხვა წრფივი პროგრამირების ამოცანა.

ვაჩვენოთ, რომ მოყვანილი პირობები უზრუნველყოფენ ზუსტად ერთი ციკლის არსებობას. დავუშვათ, რომ არსებობს ორი ციკლი მაინც, მაშინ მოიძებნება ციკლი τ შედგენილი k რკალით, რომელიც არ გადის ქალაქზე 0; $\tau = (i_1, i_2, \dots, i_k, i_1)$, ამოვწეროთ ამ ციკლის ყოველი რკალისთვის ზემოთ მოყვანილი უტოლობები

$$u_{i_1} - u_{i_2} + n \leq n - 1,$$

$$u_{i_2} - u_{i_3} + n \leq n - 1,$$

$$u_{i_k} - u_{i_1} + n \leq n - 1.$$

თუ ამ უტოლობებს შევკრებთ მივიღებთ $nk \leq k(n - 1)$, რაც შეუძლებელია, თუ $k \neq 0$. ე.ი. თუ არსებობს ციკლი, რომელიც არ გადის 0 ქალაქზე, მაშინ აღნიშნული პირობა არ სრულდება.

ვაჩვენოთ, რომ ყველა ციკლისთვის, რომელიც გადის 0 ქალაქზე და რომელიც მოიცავს ყველა ქალაქს, ეს პირობა შესრულებულია, ანუ შესაძლებელია u_i ცვლადების შესაბამისი მნიშვნელობების პოვნა. ავიღოთ $u_i = p$, თუ i -ურ ქალაქში შესვლა ხდება p

ბიჯზე, მაშინ $u_i - u_j \leq n - 1$. ე.ი როცა $x_{ij} = 0$ პირობა შესრულდება. ვთქვათ $x_{ij} = 1$, მაშინ $u_i = p$ და $u_j = p + p - (p + 1) + n \leq n - 1$, რადგან $n - 1 = n - 1$.

განვიხილოთ დანიშვნისა და კომივოიაჟერის ამოცანები ერთი და იგივე C მატრიცისათვის მიზნის ფუნქციების მნიშვნელობების თანაფარდობის საკითხი ოპტიმალური ამონახსნებისათვის. ვთქვათ, p_0 არის დანიშვნის ამოცანის ოპტიმალური ამონახსნი, $f(p_0)$ - კი მიზნის ფუნქციის შესაბამისი მნიშვნელობა, Z_0 კომივოიაჟერის ამოცანის ოპტიმალური ამონახსნი, $\ell(Z_0)$ - კი მიზნის ფუნქციის შესაბამისი მნიშვნელობა. ადვილი შესამჩნევია, რომ კომივოიაჟერის დასაშვებ ამონახსნთა სიმრავლე წარმოადგენს დანიშვნის ამოცანის დასაშვებ ამონახსნთა სიმრავლის ქვესიმრავლეს, ამიტომ $f(p_0) \leq \ell(Z_0)$. დანიშვნის ამოცანის ოპტიმალური ამონახსნი წარმოადგენს კომივოიაჟერის ამონახსნის ქვედა შეფასებას. ეს ფაქტი, ხშირად გამოიყენება კომივოიაჟერის ამოცანის ამოხსნის ალგორითმებში.

§2.2. ევრისტიული ალგორითმები კომივოიაჟერის ამოცანისათვის

ევრისტიული ალგორითმების ქვეშ გვესმის ალგორითმები რომლებიც ემყარებიან პრაქტიკულ მოსაზრებებს, ანუ ალგორითმები, რომელთათვისაც ფორმალური დასაბუთებები არ გვაქვს და რომლებიც ემყარებიან ამოცანის სტრუქტურის ანალიზს.

§2.2.1. უახლოეს წერტილში გადასვლის ალგორითმი

ხშირად ამ ალგორითმს „უახლოესი მეზობლის“ ალგორითმსაც უწოდებენ.

ვირჩევთ საწყის წერტილს და ვპოულობთ ამ წერტილის უახლოეს წერტილს, შემდეგ დარჩენილებიდან უახლოესს და ა.შ.

ვთქვათ $P = \{1, 2, \dots, n\}$, $c_{ij} \geq 0$ მანძილებია. $i \in P$ და $j \in P$ წერტილებს შორის, i_1 - იყოს საწყისი წერტილი. ვიპოვოთ i_2 წერტილი ისეთი, რომ $c_{i_1 i_2} = \min_i c_{i_1 i}$, $i \neq i_1$. ვთქვათ $Z_k = (i_1, \dots, i_k)$ - არის ასაგები მარშრუტის აგებული ნაწილი. i_{k+1} წერტილი განისაზღვრება პირობიდან $c_{i_k i_{k+1}} = \min_i c_{i_k i}$, $i \in P \setminus \{Z_k\}$, $Z_{k+1} = (i_1, \dots, i_k, i_{k+1})$. თუ

$P \setminus \{z_{k+1}\} \neq \emptyset$, მაშინ ვიპოვით i_{k+2} წერტილს და ა.შ. მიღებული Z მარშრუტის $\ell(z)$ სიგრძე განისაზღვრება

$$\ell(z) = \sum_{k=1}^{n-1} c_{i_k, i_{k+1}} + c_{i_n, i_1}$$

გამოსახულებით.

ცხადია, რომ აღწერილი ალგორითმის სირთულე შეიძლება შეფასდეს, როგორც $O(n^2)$.

აღწერილი ალგორითმის მოდიფიცირებულ ალგორითმში საწყის წერტილად იღებენ $1, 2, \dots, n$ წერტილებს და აირჩევენ საუკეთესო მარშრუტს. ამ ალგორითმის სირთულე შეიძლება შეფასდეს, როგორც $O(n^3)$.

§2.2.2. უმოკლესი რკალის არჩევის ალგორითმი

ეს ალგორითმი მუშაობას იწყებს მინიმალური სიგრძის რკალის არჩევით $c_{i_1 i_2} = \min c_{ij}$ (თუ ასეთი რამდენიმეა, ვირჩევთ ნებისმიერს). ვთქვათ, $Z_k = (i_1, i_2, \dots, i_k)$ უკვე აგებული ნაწილია, მას ემატება (i_k, i_{k+1}) რკალი, ან (i_{k+1}, i_k) რკალი. ვთქვათ,

$$c_{i_k i_{k+1}} = \min_i c_{i k i} , \quad c_{i_{k+1} i_1} = \min_i c_{i i 1} ; \quad i \in P \setminus \{Z_k\}$$

თუ $c_{i_k i_{k+1}} < c_{i_{k+1} i_1}$, მაშინ $Z_{k+1} = (i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1})$, თუ პირიქით, მაშინ $Z_{k+1} = (i_1, i_2, \dots, i_k)$. ხელახლა აღვნიშნოთ აგებული მარშრუტის ნაწილი $Z_{k+1} = (i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1})$, თუ $P \setminus \{z_{k+1}\} \neq \emptyset$ გადავდივართ შემდეგ ბიჯზე. ამ ალგორითმის სირთულე ასე შეიძლება შეფასდეს, $\min c_{ij}$ საჭიროებს n^2 ოპერაციას, ერთი გადასვლის დამატება ნაწილობრივ აგებულ მარშრუტზე ითხოვს $2(n-k)$ ოპერაციას, ამიტომ სირთულე შეიძლება შეფასდეს ასე

$$n^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) = O(n^2).$$

ალგორითმი მუშაობას იწყებს ისევ მინიმალური რკალის არჩევით, შემდეგ ეტაპზე ირჩევს ასევე მინიმალურ რკალს, ოდონდ არა აუცილებლად ბმულობის პირობით. ანუ ალგორითმის მუშაობის პროცესში ხდება ე.წ. „ფრაგმენტების“ აგება, ყოველი ახალი

რკალის დამატებისას ვაკონტროლებთ n -ზე ნაკლები განზომილების ციკლების წარმოშობის საკითხს, თან ვახდენთ „ფრაგმენტების“ კორექტირებას. გარკვეული ბიჯების შემდეგ „ფრაგმენტები“ გადაბმას დაიწყებენ და შემდეგ ვღებულობთ ჰამილტონის ციკლს.

§2.2.3. 2-opt ალგორითმი

ოპტიმიზაციაში, 2-opt არის მარტივი ლოკალური ძიების ალგორითმი პირველად შემოთავაზებული Croes-ის მიერ 1958 წელს კომივოიაჟერის პრობლემის გადასაწყვეტად. მთავარი იდეა მდგომარეობს იმაში რომ აიღოს მარშრუტი რომელიც კვეთს თავის თავს და შეცვალოს მიმდევრობა ისეთნაირად რომ ეს გადაკვეთა აღარ მოხდეს [9].



სრული 2-opt ლოკალური ძიება შეადარებს შეცვლის მექანიზმის ყველა შესაძლო დასაშვებ კომბინაციას. ეს მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნას კომივოიაჟერის ამოცანისთვის და ასევე ბევრი მსგავსი ამოცანისთვის. ამ ამოცანებში იგულისხმება ტრანსპორტის მარშრუტიზაციის პრობლემა (VRP), ასევე მოცულობით ტმპ (Capacitated VRP). ამისათვის ალგორითმის უმნიშვნელოდ ცვლილება იქნება საჭირო.

ეს არის მექანიზმი რომლითაც 2-opt ჩანაცვლება (swap) ცვლის მოცემულ მარშრუტს

2optSwap(route, i, k) {

1. წაიყვანე route[0] route[i-1]-თან და დაამატე ისინი new_route-ს

2. წაიყვანე route[i] route[k]-თან, დაალაგე ისინი საპირისპირო მიმართულებით და დაამატე new_route-ს

3. წაიყვანე route[k+1] ბოლოსთან და დაამატე ისინი new_route-ს

return new_route;

}

მაგალითი

მარშრუტი: $A \Rightarrow B \Rightarrow C \Rightarrow D \Rightarrow E \Rightarrow F \Rightarrow G \Rightarrow H \Rightarrow A$

მაგალითისთვის $i = 3$ და $k = 6$

new_route:

1. $(A \Rightarrow B \Rightarrow C)$
2. $A \Rightarrow B \Rightarrow C \Rightarrow (G \Rightarrow F \Rightarrow E \Rightarrow D)$
3. $A \Rightarrow B \Rightarrow C \Rightarrow G \Rightarrow F \Rightarrow E \Rightarrow D (\Rightarrow H \Rightarrow A)$

ეს არის სრული 2-opt ჩანაცვლება (swap) რომელიც იყენებს ზემოთ აღწერილ მექანიზმს

გაიმეორე მანამ სანამ არ გაუმჯობესდება {

start_again:

best_distance = calculateTotalDistance(existing_route)

for ($i = 0$; $i < \text{გადასანაცვლებელი კვანძების რაოდენობა} - 1$; $i++$) {

for ($k = i + 1$; $k < \text{გადასანაცვლებელი კვანძების რაოდენობა}$; $k++$) {

new_route = 2optSwap(existing_route, i, k)

new_distance = calculateTotalDistance(new_route)

if (new_distance < best_distance) {

existing_route = new_route

goto start_again

}

}

}

}

შენიშვნა: თუ მარშრუტი იწყება/სრულდება კონკრეტულ კვანძთან ან დეპოსთან, მაშინ ის კონკრეტული კვანძი ძიებიდან უნდა წაიშალოს როგორც გადასანაცვლებელი კვანძი, რადგან წყობის გადანაცვლების შედეგად მივიღებთ არასწორ გზას.

მაგალითისათვის, როდესაც A არის დეპო: $A \implies B \implies C \implies D \implies A$

კვანძი[0]-სა და კვანძი[2]-ს გადანაცვლება მოგვცემს $C \implies B \implies A \implies D \implies A$ რომელიც არასწორია (A -დან (დეპოდან) არ გადის).

დასკვნა

სამაგისტრო ნაშრომში განხილულია სატარნსპორტო მარშრუტიზაციის ამოცანა (სმა) გართულებულ და ექსტრემალურ გარემოში. ასეთ შემთხვევებში ობიექტური შემავალი მონაცემები კლასიკური სმა-თვის არ არსებობს და მხოლოდ ექსპერტული ცოდნა და ექსპერტთა მონაცემები წარმოადგენს ერთადერთ საშუალებას პრობლემის გადასაწყვეტად. ასეთი მონაცემებია: გზებზე სატარნსპორტო საშუალების (სს) მიერ გადაადგილებისთვის დახარჯული მიახლოებითი დრო; პუნქტებს შორის სს -ის დროული გადაადგილების შესაძლებლობის ხარისხები და სხვ. ექსპერტული მონაცემები იძლევა იმის საშუალებას, რომ გადაწყდეს სმა სხვა კრიტერიუმებთან ერთად კიდევ ერთი კრიტერიუმის - მარშრუტის სანდოობის გათვალისწინებით.

დასკვნის სახით ვიტყვით, რომ თემატიკა განვითარებადია. მისი გამოყენებითი ასპექტები იძლევა იმის ვარაუდს, რომ შექნილი პროგრამული უზრუნველყოფა განვითარდეს და აიგოს იგი სხვა პროგრამული ინსტრუმენტებით, თუ დაინტერესება შეიძენს კომერციულ ღირებულებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. **D. Dubois, H. Prade**, Theory of possibility: an approach to computerize processing of uncertainty, Plenum Press, N. Y., 1988.
2. **G.Sirbiladze, A.Sikharulidze**, Weighted fuzzy averages in fuzzy environment, part I: Insufficient expert data and fuzzy averages. part II: Generalized weighted fuzzy expected values in fuzzy environment, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems, volume 11, No. 2 (2003) 139-157, 159-172.
3. **В.П.Бочарников**, Fuzzy-Технология: Математические основы. Практика Моделирования в экономике. – Санкт-Петербург: “наука”б РАН, 2001, -328с.
4. **გ. სირბილაძე, ბ. მაგაბერიძე**, გადაწყვეტილების მიღების ანალიზი რისკის გარემოში, "უნივერსალი", თბილისი, 2001.**A.Smets**, Medical Diagnosis: Fuzzy sets and Degrees of belief, Fuzzy Sets and Systems, 5, 1081, 259-266.
5. **А.Н. Борисов** и др. Обработка нечётной информации в системах принятия решений. Москва, “Радио и связь”, 1989.
6. **G. Sirbiladze, A. Sikharulidze, G. Korakhashvili**, Decision-making Aiding Fuzzy Informational Systems In Investments. Part I – Discrimination Analysis In Investment Projects. Proceeding of Javakhishvili Tbilisi State University Applied Mathematics and Computer Sciences Vol. 353 (22-23), (2003), pp. 77-94
7. **G. Sirbiladze, G. Khachidze**, Decision-making Aiding Fuzzy Informational Systems In Investments. Part II - Demster-Shaper’s Expected Utility In Investment Decisions, Proceeding of Javakhishvili Tbilisi State University Applied Mathematics and Computer Sciences Vol. 353 (22-23), (2003), pp. 95-108.
8. **Lotfi A. Zadeh**, Fuzzy Sets, Information and control 8 (1965).
9. **G. A. CROES**, A method for solving traveling salesman problems. Operations Res. 6 (1958) , pp., 791-812.
10. **L. Levy**, Telephone interview, February 1999.
11. **Anonymous**, Oshawa foods embracing latest computer technologies. Truck News, 14, October 1994.

12. **M.L. Fisher**, Optimal solution of vehicle routing problems using minimum fc-trees. Operations Research, 42:626-642, 1994.
13. **I. Or**. Traveling salesman-type combinatorial optimization problems and their relation to the logistics of regional blood banking. Ph.D. dissertation, Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University, Evanston, IL, 1976.
14. **S. Lin and B.W. Kernighan**, An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. Operations Research, 21:498-516, 1973.
15. **M. Micco**, Telephone interview, February 1999.
16. **B.V. Ghvaberidze, Z.A.Machaidze, Z.A.Tsinstadze**, On the solution of one class of problems of route planning (In Russian), Applied Problems of Management of Macro Systems, Moscow, 1985.
17. **B.V. Ghvaberidze, Z.A.Machaidze**, Calculation of the stability radius in minimal partitioning problem (In Russian), Applied Problems of Management of Macro Systems, Moscow, 1989.

დანართი A: რეალიზაციები და გამოყენებული ტექნოლოგიები

A.1. დაფარვის ამოცანის რეალიზაცია მონტე-კარლოს მეთოდით

მაგალითისათვის განვიხილოთ დაფარვის ამოცანა, როდესაც ერთ-ერთ ორგანიზაციას ესაჭიროება განსხვავებული ენის სპეციალისტები-თარგმნები. კონკურსის საფუძველზე შეიქმნა შესაძლო კანდიდატთა სია, რომელთა შორის არიან ისეთი პერსონები, რომლებმაც კომპანიისთვის სასურველი ენებიდან მინიმუმ ერთი ენა მაინც იციან. კომპანიისთვის დაისვა შემდეგი ამოცანა: კანდიდატებიდან გაკეთდეს ისეთი შერჩევა, რომ 1. ყოველი ენისთვის შერჩეული სპეციალისტებიდან მოიძებნებოდეს სულ მცირე ერთი სპეციალისტი, რომელმაც იცის ეს ენა; 2. შერჩეული კანდიდატების მიერ სახელფასო მოთხოვნილი თანხების ჯამი (შერჩეული სპეციალისტების ჯამური ხელფასი) იყოს მინიმალური.

ვთქვათ კომპანიას ესაჭიროება 6 ენის სპეციალისტი და აქვს შესაბამისი კანდიდატების სია.

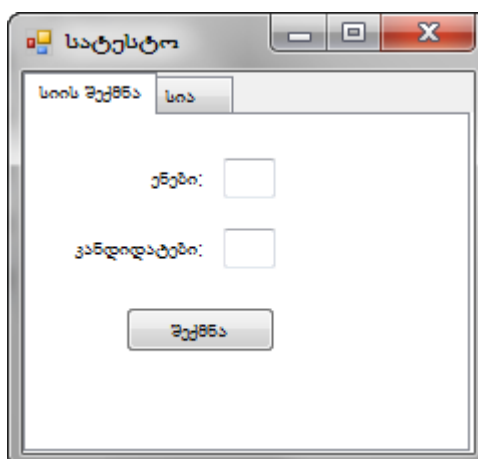
ენების სია:

#	ენა
1	ქართული
2	ინგლისური
3	გერმანული
4	ფრანგული
5	იტალიური
6	რუსული

კანდიდატების სია:

კანდიდატი	ენები რომელიც კანდიდატმა იცის	ანაზღაურება
კანდიდატი 1	1	100 ლარი
კანდიდატი 2	4	350 ლარი
კანდიდატი 3	1, 2	1000 ლარი
კანდიდატი 4	1, 2	700 ლარი
კანდიდატი 5	1	500 ლარი
კანდიდატი 6	3, 4	460 ლარი
კანდიდატი 7	5	320 ლარი
კანდიდატი 8	1	150 ლარი
კანდიდატი 9	5, 6	1200 ლარი
კანდიდატი 10	4, 5	800 ლარი
კანდიდატი 11	2, 3	900 ლარი
კანდიდატი 12	3	700 ლარი
კანდიდატი 13	5	600 ლარი
კანდიდატი 14	2	420 ლარი
კანდიდატი 15	4	320 ლარი

საწყისი მდგომარეობით პროგრამა ასე გამოიყურება



ველში „ენები“ ვუთითებთ ენების რაოდენობას, ამ შემთხვევაში 6-ს, ხოლო ველში „კანდიდატები“ - შესაბამისად კანდიდატების რაოდენობას, ამ შემთხვევაში 15-ს:

და ვაჭერთ ღილაკს, რის შედეგად იქმნება შესაბამისი ცხილი:

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13	k14	k15
e1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$p_1, p_2, \dots, p_{15}$ უჯრებში ვწერთ $k_1, k_2, \dots, k_{15}$ კანდიდატების ანაზღაურებას. $k_1, k_2, \dots, k_{15}$ სვეტები შეესაბამება კანდიდატებს, ხოლო $e_1, e_2, \dots, e_6$ სტრიქონები კი ენებს. სვეტისა და სტრიქონის გადაკვეთაზე მდებარე უჯრაში უნდა ჩავწეროთ 1 ან 0 იმის მიხედვით იგი თუ არა კონკრეტულმა კანდიდატმა კონკრეტული ენა. მაგ.: k_1 სვეტისა და e_1 სტრიქონის გადაკვეთაზე უნდა ჩაიწეროს 1 რადგან პირველმა კანდიდატმა იცის

პირველი ენა (ქართული). ხოლო k1 სვეტის დანარჩენ სტრიქონებთან გადაკვეთაში უნდა ჩაიწეროს 0, რადგან პირველმა კანდიდატმა მხოლოდ პირველი ენა იცის. ჩვენი სიების მიხედვით ცხრილი მიიღებს შემდეგ სახეს:

სატესტო

სიის შექმნა სია

შემთხვევითი არჩევა: 1 გამოთვლა

შედეგი:

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15
	100	350	1000	700	500	460	320	150	1200	800	900	700	600	420	320
	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13	k14	k15
e1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
e3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
e4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
e5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
e6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

„შემთხვევითი არჩევების“ რაოდენობაში იწერება ის რაოდენობა თუ რამდენჯერ უნდა აირჩიოს პროგრამამ შემთხვევითად კანდიდატები მოცემული კანდიდატების სიიდან. ყოველ შემთხვევით დაგენერირებაზე ხდება შემდეგი რამ: პროგრამა აგენერირებს იმდენ შემთხვევით რიცხვს, 0-ს ან 1-ს, რამდენი კანდიდატიცაა და წერს ამ შემთხვევით რიცხვებს მასივში. მაგალითად: 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 . გენერირება ხდება შემდეგი კოდით:

```
var ran = new Random();

for (int r = 0; r < jM; r++) /* jM ცვლადი ტოლია კანდიდატების რაოდენობის */
{
    ranArr[0, r] = ran.Next(2);
}
```

შემდეგ დგინდება არჩეული კანდიდატებით კმაყოფილდება თუ არა პირობა, რომ ყველა ენისათვის უნდა მოიძებნებოდეს თითო სპეციალისტი მაინც:

```
for (int r = 0; r < iN; r++) /* iN ენების რაოდენობა */
{
    int temp = 0;
    for (int m = 0; m < jM; m++)
    {
        if (ranArr[0,m] > 0) { temp = temp + valueArr[r, m]; } /* კონკრეტული
ენისათვის მოწმდება იცის თუ არა ის რომელიმე სპეციალისტმა და შესაბამისად
temp ცვლადი 0-ზე მეტი ხდება */
    }

    if (temp == 0) { daf[r] = 0; } /* თუ temp ცვლადი 0-ის ტოლია ე.ი. ამ ენისთვის
სპეციალისტი არ მოიძებნა და daf მასივში შესაბამისი ენის ადგილზე იწერება 0 */
    else { daf[r] = 1; } /* თუ temp დადებითია ე.ი. შესაბამისი ენისთვის მოიძებნა
სპეციალისტი და daf მასივში შესაბამისი ენის ადგილზე იწერება 1 */
}
```

ამ კოდის შესრულების შემდეგ სრულდება შემდეგი კოდი:

```
if (daf.Sum() == iN) /* თუ daf მასივის ელემენტების ჯამი უდრის ენების საერთო
რაოდენობას (iN) ე.ი. ყველა ენისთვის მოიძებნა შესაბამისი ერთი სპეციალისტი მაინც
და კონკრეტული შემთხვევითი არჩევის მიხედვით დანახარჯი გამოითვლა. წინააღმდეგ
შემთხვევაში პროგრამის შესრულება ამ ნაწილში წყდება, გენერირდება ახალი
შემთხვევითი რიცხვები/კანდიდატების სია, და გადადის ისევ ზემოთ აღწერილი კოდის
შესრულებაზე */
{
    float temp = 0;
```

```

    if (first == 0) /* სრულდება მაშინ თუ ეს პირველი შემთხვევაა როდესაც
შემთხვევითმა სიამ დააკმაყოფილა პირობა */
    {
        for (int m = 0; m < jM; m++)
        {
            if (ranArr[0, m] > 0) { temp += prices[m]; } /* შემთხვევითი სიის მიხედვით
დანახარჯების დათვლა */
            ranArr[1, m] = ranArr[0, m]; /* შემთხვევითი სიის ელემენტის დამახსოვრება,
როგორც ყველაზე ნაკლები დანახარჯის მქონესი */
        }

        minPrice = temp; /* მინიმალურ ფასს ენიჭება პირველივე ვარგისი შემთხვევითი
სიის მიხედვით დათვლილი ხარჯი */
        first++;
    }

    else /* სრულდება მაშინ როდესაც ეს უკვე აღარაა პირველი შემთხვევა, როდესაც
შემთხვევითმა სიამ დააკმაყოფილა პირობა */
    {
        for (int m = 0; m < jM; m++)
        {
            if (ranArr[0, m] > 0) { temp += prices[m]; } /* შემთხვევითი სიის მიხედვით
დანახარჯების დათვლა */
        }

        if (temp < minPrice) /* სრულდება თუ ახალი შემთხვევითი სიის მიხედვით
დათვლილი ხარჯი ნაკლებია წინა ხარჯზე */
        {

```

```

        minPrice = temp; /* მინიმალურ ფასს ენიჭება ახალი/უკეთესი სიის
მიხედვით დათვლილი ხარჯი */
        for (int m = 0; m < jM; m++)
        {
            ranArr[1, m] = ranArr[0, m]; /* შემთხვევითი სიის ელემენტის
დამახსოვრება, როგორც ყველაზე ნაკლები დანახარჯის მქონესი */
        }
    }
}
}

```

ზემოთ მოყვანილი კოდის ფრაგმენტი სრულდება იმდენჯერ, რამდენი „შემთხვევითი არჩევების“ რიცხვსაც მივუთითებთ. შესაბამისად რაც უფრო დიდი იქნება ეს რიცხვი მით უფრო ზუსტი (უკეთესი) იქნება შედეგი რადგან ეს ალგორითმი მიეკუთვნება ევრისტიულ ალგორითმებს. მაგალითად თუ „შემთხვევითი არჩევების“ რაოდენობაში მივუთითებთ 1-ს შეიძლება პირველივე შედეგი აღმოჩნდეს 0 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 რაც ნიშნავს, რომ კანდიდატების სიიდან მოხდა მე-2-ე, მე-5-ე და მე-6-ე კანდიდატების არჩევა, ეს არჩევა კი საერთოდ არ აკმაყოფილებს იმ პირობას რომ თითო საგანი თითო კანდიდატმა მაინც უნდა იცოდეს.

ახლა კი პროგრამაში მივუთითო ბოლო პარამეტრი, „შემთხვევითი არჩევების“ რაოდენობა

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15
e1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
e3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
e4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
e5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
e6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

ამ შემთხვევაში 1000000 და ღილაკზე „გამოთვლა“ დაჭერით გავუშვათ პროგრამას შესრულებაზე. პროგრამის შესრულების შემდეგ მივიღებთ ასეთ შედეგს:

მიწიანალური დანახარჯი: 2180, არჩეული კანდიდატები: 1, 6, 9, 14

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15
e1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
e3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
e4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
e5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
e6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

ანუ პროგრამამ შეარჩია შემდეგი კანდიდატები: კანდიდატი 1, კანდიდატი 6, კანდიდატი 9 და კანდიდატი 14. ამ კანდიდატების ხელფასების ჯამი გამოვიდა $100+460+1200+420=2180$ რაც ამ კონკრეტული შემთხვევისათვის არის საუკეთესო

ვარიანტი. და რა თქმა უნდა ასევე შესრულდა ის პირობა, რომ თითოეული საგნისთვის მინიმუმ ერთი სპეციალისტი მაინც მოიძებნება:

#	ენა	კანდიდატი
1	ქართული	კანდიდატი 1
2	ინგლისური	კანდიდატი 14
3	გერმანული	კანდიდატი 6
4	ფრანგული	კანდიდატი 6
5	იტალიური	კანდიდატი 9
6	რუსული	კანდიდატი 9