ISSN 1512-1232

სატრანსპორტო ნაკადების მოდელირების მიზნების, ამოცანების, მოდელირების მეთოდებისა და ტექნოლოგიების სისტემური ანალიზი

დავით საცერაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 0175 თბილისი, კოსტავას 77,
d_satseradze@gtu.ge

ანოტაცია

თანამედროვე საგზაო ინფრასტრუქტურა ეკონომიკის მნიშვნელოვანი და რთული სისტემაა რომლის მდგრადი მართვა საჭიროებს უამრავი პარამეტრების გათვალისწინებასა და სხვადასხვა სახის ღონისძიებების დაგეგმვას. სტატიაში განხილულია საგზაო ნაკადების მათემატიკური მოდელები, რომლებიც აღწერენ როგორც საავტომობილო ნაკადების ასევე ცალკეული ავტომობილის მოძრაობას სხვადასხვა რეჟიმებსა და პირობებში.

საკვანძო სიტყვები: *სატრანსპორტო ნაკადები, სატრანსპორტო ნაკადის სიმჭიდროვე, მოდელი, მოდელების კლასიფიცირება, სატრანსპორტო საშუალებები, სიჩქარე, დაყოვნება, საცობი.*

1. შესავალი

სატრანსპოტო ინფრასტუქტურა - ქალაქებისა და რეგიონების ცხოვრების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ინფრასტრუქტურაა. თანამედროვე ქალაქების უმრავლესობაში პრაქტიკულად ამოწურულია საგზაო ქსელის განვითარების საშუალება, ამიტომაც დიდი მნიშვნელობა ენიჭება საგზაო მოძრაობის გაუმჯობესებას, საზოგადოებრივი და სატვირთო ტრანსპორტის მარშუტების სისტემის ოპტიმიზირებასა და სატრანსპორტო ქსელის ოპტიმალურ დაგეგმვას.

ქალაქის ადმინისტრაციის ხელმძღავნელობისათვის ქალაქის განვითარების დაგეგმვა და ზემოთ ხსენებული სატრანსპორტო პრობლების მოგვარება წარმოუდგენელია სატრანსპორტო მოდელირების გარეშე, რაც თავის მხრივ წარმოადგენს აუცილებელ ინსტრუმენტს მმართველობითი გადაწყვეტილებების მიღებისას.

კარგად მართვადი ლოგისტიკური სისტემის შექმნა, სატრანსპორტო მომსახუეობის გაზრდა და მოძრაობის უსაფრთხოების ამოცანათა გადაწყვეტა შეუძლებელია სატრანსპორტო ქსელების მათემატიკური მოდელირების გარეშე. მათი უმთავრესი ამოცანაა - სატრანსპორტო ქსელის ფუნქციონირებისას მისი ყველა პარამეტრთა განსაზღვრა და შემდგომი პროგნოზი. აღნიშნულ პარამეტრებს განეკუთვნებიან:

- მოძრაობის ინტენსივობა ქსელის ყველა ელემენტებზე I, ავტ/სთ; ავტ/დღე-ღამეში;
- სატრანსპორტო ნაკადის სიმჭიდროვე k, ავტ/მ; ავტ/კმ;
- მოძრაობის სიჩქარე V, კმ/სთ; მ/წ;
- მოძრაობის დაყოვნების ხანგრძლივობა D, წ;
- სატრანსორტო ნაკადის შემადგენლობა $typeS$;

ISSN 1512-1232

- საზოგადოებრივი ტრანსპორტის ქსელში გადაზიდვების მოცულობა და ა.შ;

მეგაპოლისში, სატრანსპორტო ნაკადების მართვის ეფექტური სტრატეგიებისათვის, საგზაო ქსელის პროექტირების ოპტიმალური გადაწყვეტილების მიღებისას და უსაფრთხო მოძრაობის ორგანიზებისას, აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნას არამარტო სატრანსპორტო ნაკადის მახასიათებლების ფართო სპექტრი, არამედ გარე და შიდა ფაქტორების ზემოქმედება შერეული სატრანსპორტო ნაკადის დინამიურ მახასიათებლებზე, რაც, თავის მხრივ, ძნელად ექვემდებარება სრულ ფორმალიზირებას შემდეგ მიზეზთა გამო:

- სატრანსპორტო ნაკადი არასტაბილური და მრავალფეროვანია, მასზე ობიექტური ინფორმაციის მიღება მართვის სისტემის ყველაზე რთულ და რესურსმომთხოვნ ელემენტს წარმოადგენს;
- საგზაო მოძრაობის მართვის ხარისხის კრიტერიუმები წინააღმდეგობრივია: აუცილებელია მოძრაობის უწყვეტობის უზრუნველყოფა და ამავე დროს მოძრაობისაგან გამოწვეული ზარალის შემცირება, მოძრაობის მიმართულებაზე და სიჩქარეზე შეზღუდვების დაწესებით;
- საგზაო ქსელის გაფართოებისას გამტარუნარიანობის გაზრდის კომპენსირება და მისი გადანაწილება ახალი პირობების გათვალისწინებით;
- თითოეული მძღოლის მოქმედებათა არაპროგნოზირებადობა - მარშუტის არჩევა, სატრანსპორტო საშუალების ტარების მანერა და სხვა;
- შემთხვევითი ფაქტორების გათვალისწინება (საგზაო სატრანსპორტო შემთხვევები, ამინდი და ა. შ.) ასევე ფლუქტუაციები, რომლებიც დაკავშირებულია დასვენებისა და დღესასწაულის დღეებთან, სეზონებთან და ა. შ.

სატრანსპორტო ნაკადების ფორმალიზების სირთულის გამო, ერთის მხრივ არსებობს გარკვეული დისბალანსი მათემატიკურ გამოთვლებსა და სამეცნიერო გამოკვლევებს შორის, ხოლო მეორეს მხრივ პრაქტიკულად განხორციელებულ დაკვირვებეთა შედეგებს შორის. სწორედ ეს გარემოება განაპირობებს მათემატიკური მოდელირების სხვადასხვა მიდგომებსა და სატრანსპორტო ნაკადების მოდელირების პროგრამების დიდ რაოდენობას.

მოდელირების მიზნები და ამოცანები

1. ამოცანები ქალაქის მასშტაბში

- როგორ შეიცვლება სატრანსპორტო სისტემის მუშაობა ახალი ელემენტების შემოღებისას? კერძოდ, მეტროს ახალი ხაზებისა თუ სადგურების, ახალი სხივური თუ წრიული ავტომაგისტრალების აშენებისას;
- რა ცვლილებებს მოითხოვს ქალაქის სატრანსორტო სისტემაში ქალაქში ახალი საცხოვრებელი რაიონისა თუ ვიზიტორთა ახალი *მიზიდულობის ცენტრის* (სავაჭრო სახლი, სტადიონი, საკონცერტო დარბაზი და ა.შ.) მშენებლობა;
- რა ცვლილებებს მოითხოვს მგზავრთა და ტრანსპორტის ნაკადების გადანაწილებაში ქალაქის სატრანსპორტო სისტემის რომელიმე ელემენტის ლიკვიდაცია ან მისი დროებითი დახურვა;
- როგორ იმოქმედებს სატრნსოპრტო სისტემის მუშაობაზე ახალი ფინანსური სანქციების დაწესება? კერძოდ, ფასის შემოღება ავტომაგისტრალზე მოძრაობისათის, ქალაქის ცენტრში გადაადგილებისათვის, მეტროში ახალი ზონური ტარიფის შემოღება და ა. შ.);

ISSN 1512-1232

- რა ეფექტს მოიტანს საგზაო მოძრაობის მართვის ავტომატიზირებული სისტემის შემოღება;

2. ლოკალური ამოცანები:

- რა ეფექტს მოიტანს გზაჯვარედინის ახალი დაგეგმარება (გადაგეგმარება)?;
- გზაჯვარედინთა ჯგუფის გადაგეგმარება;
- ქუჩის სავალი ნაწილის გაფართოვება და მათ გადაკვეთებზე ცვლილებების შეტანა მოძრაობის ორგანიზებაში;
- შუქნიშნებით რეგულირების ოპტიმიზაცია;
- მგზავრთა ჩასხდომის (გადაჯდომის) პირობების შეცვლა და ა.შ.;

3. სატვირთო და სამგზავრო ტრანსპორტის, ასევე თვით საგზაო ქსელის მუშაობის ანალიზი.

სატრანსპორტო სიტუაციის მოდელირება შეიძლება ჩატარდეს ნებისმიერი პერიოდისათვის - ყოველდღიური ოპერატიული ამოცანებიდან დაწყებული ხანგრძლივ პერსპექტივებამდე (20-30 წელი) დამთავრებული. პირობითად პროგნოზირების ამოცანები შეიძლება დაიყოს:

- გრძელვადიანი (შორეული პერსპექტივა 10 და მეტი წელი);
- საშუალოვადიანი (შესაძლო განვითარების პირველადი ამოცანები - დაახლოებით 5 წელი);
- მოკლევადიანი (უახლოეს დღეებში, კვირეებში, თვეებში დაგეგმილი განზრახული ღონისძიებათა ანალიზი);
- ოპერატიული (რეალურ დროში).

მოდელების კლასიფიკაცია

საგზაო მოძრაობის მოდელირებაში ისტორიულად ჩამოყალიბდა ორი მიდგომა:

- <u>დეტერმინისტური</u>, რომელსაც საფუძვლად უდევს ფუნქციონალური (ანალიტიკური) დამოკიდებულება მოძრაობის ცალკეულ მაჩვენებლებს შორის. მაგალითად, ნაკადში მოძრავი ავტომობილების სიჩქარე დამოკიდებულია მათ შორის არსებულ დისტანციაზე;
- <u>ალბათური (სტოქასტური)</u>, სადაც სატრანსპორტო ნაკადი განიხილება როგორც ალბათური პროცესი;

სატრანსპორტო ნაკადების ყველა მოდელი პირობითად შეიძლება დაიყოს სამ კლასად:

- მოდელი-ანალოგები ანუ **მაკროსკოპული**;
- ლიდერზე მიდევნების მოდელები ანუ **მიკროსკოპული**;
- ალბათური მოდელები;

სამწუხაროდ მოდელთა ერთიანი კლასიფიცირება არ არსებობს, ამიტომაც ჩვენ კლასიფიცირებას განვახორციელებთ ორი ნიშნის მიხედვით - **რის მოდელირება ხორციელდება** (სატრანსპორტო ნაკადის რომელი თვისებები მოდელირდება) და **როგორ მოდელირდება** (როგორი ჰიპოტეზებია ჩადებული სატრანსპორტო ნაკადის ქცევასა და მის პარამეტრებს შორის არსებულ კავშირებზე მოდელის საფუძველში).

რა მოდელირდება?

ISSN 1512-1232

1. გზაზე / საგზაო ქსელის უბანზე არსებული სატრანსპორტო ნაკადის პარამეტრები - ეს *იმიტაციური* მოდელებია.

იმიტაციური მოდელების მეშვეობით ხსნიან ისეთი მათემატიკური მოდელების აგების ამოცანას, რომლებიც ადეკვატურად აღწერენ არა მარტო სატრანსპორტო ნაკადის მონაწილეთა ქცევას, არამედ მოძრაობის ამა თუ იმ მახასიათებელსა და პარამეტრებს.

მოდელები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად, რაც დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორაა განხილული სატრანსპორტო ნაკადები აღნიშნულ მოდელებში. ესენია:

a) **მაკროსკოპული** (საავტომობილო ნაკადი ემსგავსება სითხის მოძრაობას);

b) **მიკროსკოპული** (ხდება თითოეული ავტომანქანის მოდელირება).

იმიტაციური მოდელები საშუალებას გვაძლევენ შევაფასოთ მოძრაობის სიჩქარე, დაყოვნებები გზაჯვარედინებზე, საცობების წარმოქმნის დინამიკა, სიგრძე და ა. შ.

გამოყენების სფერო: მოძრაობის ორგანიზაციის გაუმჯობესება, შუქნიშანთა მუშაობის ფაზების (ციკლების) ოპტიმიზაცია და ა. შ.

2. სატრანსპორტო ქსელების დატვირთვა - ეს პროგნოზირების მოდელებია

პროგნოზირებადი მოდელები საშუალებას გვაძლევენ მოდელირება გაუკეთოდ ქალაქაში მოსახლეობისა და ტვირთების გადაადგილების პროცესს, რომლის დროსაც შესაძლებელია არჩეულ იქნას სატრანსპორტო საშუალების სახეობა შესაბამისი მარშრუტით. ისინი მიზნად ისახავენ სატრანსპორტო ნაკადების პროგნოზირებას როდესაც ცვლილებები მიმდინარეობს:

a) ქალაქის სატრანსპორტო ქსელში;

b) ქალაქის ნაკადშემქმნელ ობიექტებში;

გამოყენების სფერო: ქალაქის გაფართოების დაგეგმარებაში მხარდაჭერითი გადაწყვეტილების მიღებაში, მოძრაობის ორგანიზებაში ჩატარებული ცვლილებების ანალიზისას, სატრანსპორტო ქსელის განვითარების ალტერნატიული პროექტების არჩევისას და ა. შ.

როგორ მოდელირდება?

- ჰიპოთეზა - სატრანსპორტო ნაკადების მდგომარეობა წარსულსა და მომავალში განისაზღვრება მისი დღევანდელი მდგომარეობით - ესაა *დეტერმინირებული* მოდელები.

გამოიკვლევა ფუნქციონალური დამოკიდებულებები ცალკეულ მაჩვენებლებს შორის. მაგალითად, ავტომობილებს შორის არსებულ სიჩქარესა და დისტანციაზე, როდესაც ნაგულისხმევია, რომ ყველა ავტომობილი თანაბრად დაშორებულია ერთმანეთისაგან.

- ჰიპოთეზა - სატრანსპორტო ნაკადის მდგომარეობა დამოკიდებულია მთელი რიგი პარამეტრების (ფაქტორების) შემღხვევით კომბინაციებზე, რომლებიც მოდელის საფუძველს წარმოადგენს - ესაა *სტოქასტური* მოდელები.

სატრანსპორტო ნაკადი განიხილება, როგორც სატრანსპორტო ერთეულების ურთიერთქმედების შედეგი სატრანსპორტო ქსელის ელემენტებზე.

იმის გამო, რომ მოძრაობაში მონაწილეობენ ავტომობილთა დიდი რაოდენობა ხოლო სატრანსპორტო ქსელს გააჩნია საკმაოდ მკაცრი შეზღუდვები, სატრანსპორტო ნაკადში ყალიბდება მკაფიო კანონზომიერებები რიგების, ინტერვალების, სიჩქარეების, გზის ზოლებზე დატვირთულობისა და სხვა პარამეტრთა შექმნის თაობაზე. აღნიშნულ კანონზომიერებებს გააჩნიათ სტოქასტური ბუნება რის გამოც მათი განხილვისას გამოიყენაბა ალბათობის თეორის მათემატიკური აპარატი.

ISSN 1512-1232

- თუ პარამეტრები გასაშუალოებულია დროის განსაზღვრულ ინტერვალში - ეს *სტატიკური* მოდელებია;
- მოდელი მუშაობს რეალურ დროში - *დინამიური* მოდელები;
- ჰოპოთეზა - სატრანსპორტო ნაკადი კუმშვადი სითხის მასად იქცევა *-მოდელი-ანალოგები* ;
- ჰიპოთეზა - სატრანსპორტო ნაკადის მოძრაობის ფაზებს შორის გადასვლა მსგავსია იმ უეცარი გადასვლებისა, რომლებსაც ადგილი აქვს წყლის გაყინვასა და მისი კონდენსირებისას.

საგზაო ქსელთან მოდელების მიბმის მეთოდიკა

ყველაზე დიდი გავრცელება ჰპოვა შემდეგმა მათემატიკურმა მოდელებმა:

1. გრაფ - მოდელები.

- ელექტრონული გეოგრაფიული რუქის საფუძველზე (საგზაო რუქაზე) იგება გრაფი/ორგრაფი, რომელთა წვეროები საგზაო ქსელის კვანძებს ასახავენ და შეერთებულნი არიან წიბოებით. ყალიბდება გრაფის შემოვლის წესები - საგზაო მოძრაობის ორგანიზება.
- ელექტრონული გეოგრაფიული რუკის საფუძველზე (საგზაო რუკაზე) იგება გრაფი/ორგრაფი წვეროებით საგზაო რუქის კვანძებში და წიბო-რკალებით, რომლებიც იმეორებიან სატრანსპორტო საშუალებათა მოძრაობის ტრაექტორიას საგზაო რუკის გასწვრივ.

2. გსს (გეოგრაფიული საინფორმაციო სისტემა) - მოდელები (საგზაო რუკის შექმნა მისი მოდელის ელემენტარული მონაკვეთებისაგან).

- საგზაო ქსელის ელექტრონული რუკა იყოფა ერთგვაროვან ელემენტარულ უბნებზე: სწორხაზიანი, მრუდხაზიანი და მათი შეუღლების უბნები. ამის შემდეგ იქმნება თითოეული ელემენტარული უბნის მათემატიკური აღწერა.

დასკვნები

1. ***მიკრო*** და ***მაკრო*** დონეები დაკავშირებულნი არიან შემდეგნაირად. სისტემაში თვითორგანიზება აღიწერება სატრანსპორტო ნაკადების მაკრო დონეზე. მიკრო დონე ნაკადის დინამიური პარამეტრებით დაკავშირებულია ქსელის კვანძებთან, რომლებიც წარმოადგენენ საცობების წარმოქმნის, მოძრაობის მარშრუტების ბიფურაქციის წერტილებსა და ა.შ. აქ პროცესი მიმდინარეობს ავტომობილთა ურთიერთქმედების მიკრო დონეზე (მაგალითად, საცობი შეიძლება წარმოიქმნას ერთი ავტომობილის გაჩერების ან ორის დაჯახების შედეგად).

2. მოდელირების საფუძვლებში არსებული ჰიპოთეზების მრავალფეროვნება გამოწვეულია იმით, რომ სატრანსპორტო ნაკადები ურთულესი სისტემაა. კერძოდ, ლიტერატურაში აღნიშნულია რომ სატრანსპორტო ნაკადების მოდელირების სირთულე განპირობებულია

- სატრანსპორტო სისტემის მრავალდონიანი და მრავალფუნქციონალური ხასიათით;
- შესასწავლი პროცესების დინამიური და ალბათური ხასიათით;
- მართვის ობიექტის აქტიურობით, რომლის დასადგენათ საქიროა მრავალრიცხოვანი სოციალურ - ეკონომიკური და ფსიქოლოგიური ფაქტორების აღრიცხვა.

ISSN 1512-1232

2. ძირითადი ნაწილი. სატრანსპორტო ნაკადების მათემატიკური მოდელები

A.სატრანსპორტო ნაკადების დინამიური მოდელები

1. ჰიდროდინამიური მოდელები.

ამ მოდელებში სატრანსპორტო ნაკადები განიხილება როგორც მოძრავი „კუმშვადი სითხის" დინება, რომელიც შედგება ავტომობილებისაგან და გააჩნია სპეციფიკური თვისებები.

ამ დროს *ცალკეული ავტომობილების მოძრაობა პირდაპირ არ აღიწერება.* სატრანსპორტო ნაკადების ამ კლასის მოდელების ფუნდამენტალურ მახასიათებლებს წარმოადგენენ:

- **სიმჭიდროვე** (გზის სიგრძის ერთეულზე არსებული ავტომობილების რაოდენობა);
- **ნაკადი** (დროის ერთეულში გზის განივკვეთზე გამავალი ავტომობილების რაოდენობა)
- ნაკადში არსებული ავტომობილების **საშუალო სიჩქარე** (სხვადასხვაა გზის სხვადასხვა მონაკვეთზე).

განასხვავებენ სატრანსპორტო ნაკადების შემდეგ მაკრომოდელებს:

- ლაიტჰილ-უიზემის (Lighthill-Whitham) კინემატიკური მოდელები;
- კერნერ-კონჰოიზერის (Kerner-Konheuser) მეორე დონის მოდელები;
- კინეტიკურ განტოლებაზე დაფუძნებული მოდელები (პროგოჟინი (Prigogine), ჰელბინგი (Helbing))

2. ლაიტჰილ-უიზემის მოდელი

მაკროსკოპული მოდელების კლასში ისტორიულად პირველია (გამოქვეყნდა 1955 წელს ლაიტჰილ-უინზემის (Lighthill-Whitham) მიერ), და ყველაზე მარტივია.

აღნიშნული მოდელები დაფუძნებულია საავტომობილო ნაკადის სიმჭიდროვისათვის დამახასითებელ უწყვეტობის განტოლებაზე, რომელიც ასახავს გზაზე მყოფი ავტომობილების რაოდენობის მუდმივობას (1), და ჰიპოთეზაზე რომ გზის უბანზე საშუალო სიჩქარე არის იმავე უბანზე არსებულ ავტომობილთა სიმჭიდროვის განსაზღვრული (კლებადი) ფუნქცია (2).

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho V) = 0, \qquad (1)$$
$$V(x, t) = V_\varepsilon(\rho(x, t)), \qquad (2)$$

სადაც $V(x, t)$ - ავტომობილების სიჩქარეა გზის x კოორდინატზე დროის t მომენტში, ხოლო $\rho(x, t)$ - ავტომობილთა სიმჭიდროვეა.

ამ მოდელების <u>*ნაკლოვანებას*</u> წარმოადგენს ის ვარაუდი, რომ მოცემული სიმჭიდროვის პირობებში ავტომობილთა ნაკადის საშუალო სიჩქარე $V(x, t)$ დროის თითოეულ მომენტში შეესაბამება $V\varepsilon$ წონასწორულ მნიშვნელობას (2), რაც არღვევს მოდელის ადეკვატურობას სატრანსპორტო ნაკადების მოძრაობის აღწერისას ისეთ ადგილებში, როგორიცაა საცობები და ჭედვები, ჩასასვლელ-გასასვლელები, გზის შევიწროვებები და ასევე „stop-and-go"-ს მოძრაობის პირობები.

3. მეორე დონის მოდელები.

აღნიშნული მოდელები ნაკადის სიჩქარის აღწერისათვის გამოყენებულ უწყვეტობის განტოლების გარდა იყენებენ დინამიურ განტოლებას, რომელიც აღწერს ნაკადის

ISSN 1512-1232

მახასიათებელთა დინამიკასა და პოსტულირებულია კლასიკური ფიზიკიდან ცნობილი ჰიდროდიმაიური განტოლებათა ანალოგიების საფუძველზე.

ამ კლასიდან ყველაზე ცნობილია კერნერ-კონჰოიზერის (Kerner-Konheuser) მოდელი. აღნიშნული მოდელის კომპიუტერული გამოთვლების საფუძველზე შესწავლილ იქნა ისეთი პროცესების შექმნისა და განვითარების ფაზები, როგორიცაა კლასტერები ანუ ზონები, სადაც მაღალია ავტომობილთა შემჭიდროვება და დაბალია ნაკადის სიჩქარე.

ბოლო პერიოდში განვითარდა მიდგომა, რომელიც საშუალებას იძლევა მაკროსკოპული განტოლება გამოვიყვანოთ ავტომობილთა ურთიერთზემოქმედების პროცესის დეტალური აღწერისაგან. კერძოდ, ავტომობილთა მოძრაობა, სიჩქარეთა ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია მათი ურთიერთმოქმედებით ნაკადში აღიწერება სტატიკური ფიზიკის სპეციალური კინეტიკური განტოლებით, რომლის გაშუალედებით იღებენ ნაკადის საშუალო მახასიათებლების დინამიურ განტოლებას.

4. კინეტიკურ განტოლებაზე დაფუძნებული მოდელები.

ეს მოდელები დაფუძნებულნი არიან ნაკადის სიმჭიდროვის ფაზური დინამიკის აღწერაზე, რომლის დროსაც ავტომობილთა სიმჭიდროვე განაწილებულია მათი კოორდინატისა და სიჩქარის მიხედვით.

ფაზურ სივრცეში ავტომობილთა რაოდენობის მუდმივობის კანონი 1961 წელს პირველად ჩამოაყალიბა პრიგოჟინმა და ჰელბინგმა (Prigogine, Helbing) თავის კოლეგებთან ერთად. აღნიშული დიფერენციალური განტოლება შემდეგნაირად გამოიყურება:

$$\partial_t f + \partial_x(fv) = (\partial f/\partial t)_{int} + (\partial f/\partial t)_{rel}\,, \qquad (3)$$

რომლის მარცხენა მხარეს არსებული შესაკრებლები აღწერენ ფაზური სიმჭიდროვის ცვლილებას კინემატიკური გადატანის ხარჯზე, ხოლო მარჯვენა შესაკრებლები აღწერენ ავტომობილთა მყისიერ სიჩქარის ცვლილებას ე.წ. ურთიერთზემოქმედებისა და რელაქსაციის პროცესთა ხარჯზე. პრიგოჟინის მოსაზრებით, გზაზე ორი ავტომობილის ურთიერთზემოქმედებაში იგულისხმება მოვლენა, რომლის დროსაც უფრო სწრაფი ავტომობილი დაეწევა რა ნელად მიმავალს ან გადაასწრებს მას, ან შეამცირებს თავის სიჩქარეს მის სიჩქარემდე. აღნიშნული მოდელის აგებისას მიღებულია შემდეგი ტიპის დაშვებები:

1. გადამსწრები ავტომობილის სიჩქარე გადასწრების შედეგად არ იცვლება.
2. ნებისმიერ შემთხვევაში ურთიერთზემოქმედების შედეგად წინ მიმავალი ავტომობილის სიჩქარე არ იცვლება.
3. ურთიერთზემოქმედებას ადგილი აქვს წერტილში (ავტომობილთა შორის არსებული მანძილი და მათი ზომები იგნორირებულია).
4. ურთიერთზემოქმედების შედეგად სიჩქარე იცვლება მყისიერად.
5. ერთდროულად სამი ან მეტი ავტომობილის ურთიერთზემოქმედება დაუშვებელია.
6. კლასიკური აირის დინამიკაში არსებული "მოლეკულური ქაოსის" ჰიპოთეზის მსგავსად, გამოითქმევა მოსაზრება "საავტომობილო ქაოსის" თაობაზე, სადაც ნაკადში არსებული ავტომობილების სიჩქარეები ურთიერთზემოქმედებამდე და მის მერე არ არიან კორელირებულნი (ანუ ურთიერთდამოკიდებულნი).

აღნიშნული მოდელის მნიშვნელოვან ხარვეზებს განეკუთვნებიან:

ISSN 1512-1232

- "საავტომობილო ქაოსის" ჰიპოთეზის არაადეკვატურობა. მაგალითად, ნაკადში მყოფი ავტომობილების სიჩქარეები არ შეიძლება ჩაითვალოს სტატისტიკურად დამოუკიდებელი;
- თუ ნაკადი სივრცულად არაერთგვაროვანია, მაშინ სატრანსორტო ნაკადის ქცევაც არაადეკვატურია. მაგალითად, გზის თავისუფალ მონაკვეთებზე უფრო სწრაფად მოძრავი ავტომობილები პირველები მიაღწევენ საბოლოო უბანს, თუმცა მოდელში პირველივე წამებიდან გზის მთელ მანძილზე უნდა გაჩნდნენ ნელა მიმავალი ავტომობილები.

მაკროსკოპულ მოდელებს გააჩნიათ ხარისხობრივი ხარვეზები, ვინაიდან ისინი არ ითვალისწინებენ ცალკეული ავტომობილის გაბარიტებს. მაგალითად, აღნიშნული მოდელების ზოგიერთი პარამეტრის მნიშვნელობათა გამო, მიიღება ისეთი სიმჭიდროვე, რომელიც აღემატება მაქსიმალურად დასაშვებს (მოძრაობა ბამპერი ბამპერთან).

5. მიკრომოდელები

ასეთ მოდელებში თვითოეული ავტომანქანის მოძრაობა აღიწერება აშკარად და მკაფიოდ.

აღნიშნულ მოდელებში სატრანსოპრტო ნაკადი წარმოდგენილია ურთიერთმოქმედ ნაწილაკების სახით.

ამ ურთიერთმოქმედების აღწერის მეთოდი განსაზღვრას მოდელის ტიპსა და მის თვისებებს.

განასხვავებენ მოდელების შემდეგ ტიპებს:

5.1 *მოდელები, რომლებიც დაფუძნებულნი არიან ნაწილაკების ქცევის დეტერმინირებულ აღწერაზე* (Carfollowing-ის ვარიანტი). კერძოდ, როდესაც მოძრაობის აღწერა ხდება ლიდერზე მიდევნების მოდელის ტერმინებში მნიშვნელოვან მომენტს წარმოადგენს მოსაზრება იმის თაობაზე, რომ ამყოლი სატრანსპორტო საშუალების მოძრაობა გარკვეულ წილად ფსიქოლოგიურად დაკავშირებულია ლიდერი ავტომობილის გადაადგილებასთან. დროთა განმავლობაში, თეორიის განვითარებასთან ერთად ამ ჯგუფის მოდელებში იკვლევდნენ როგორც მოძრაობას მრავალზოლიან გზებზე და მის მდგარდობას, ასევე მძღოლის რეაქციასაც. შემუშავებულ იქნა ლიდერზე მიდევნების წრფივი და არაწრფივი მოდელები. დიდი სატრანსპორტო სისტემების ანალიზისათვის ისინი ძალზე დეტალურია. მათ იყენებენ როგორც გზების გადაკვეთებზე, რეგულირებად გზაჯვარედინებზე, ასევე გზის სხვა მონაკვეთებზე ნაკადის მახასიათებლების ანალიზისათვის.

5.2 *კინეტიკური მოდელები,* რომლებიც დაფუძნებულნი არიან ნაწილაკთა დიდი ანსამბმლის სტატისტიკურ აღწერაზე. აღნიშნულს ძირითადად იყენებენ მოძრაობის მაკროსკოპული განტოლებების დასაბუთებულ გამოყვანისას.

5.3 *უჯრედოვანი ავტომატები* - მიდგომა, რომელიც დაფუძნებულია ცალკეული ნაწილაკების სტოქასტურ აღწერაზე. აღნიშული მოდელების კლასში ყველა უწყვეტი სიდიდე, ისეთები როგორიცაა გზის სიგრძე, სიჩქარე, ნაკადის ინტენსივობა, იცვლება მათი დისკრეტული მნიშვნელობებით. ასეთი მიდგომა

ISSN 1512-1232

საკმაოდ ეფექტურია მოდელების გამოთვლითი თვალსაზრისით. ვინაიდან აღნიშნულ მოდელებში "ნაწილაკის" ცნებაში გულისხმობენ ავტომობილთა "პორციას", ამიტომაც ეს მოდელები გარკვეული პირობითობით შეიძლება მივაკუთნოთ მიკრომოდელების კლასს. სატრანსპორტო ნაკადების თეორიაში ეს მიდგომა ახალია და ამჟამად აქტიური განვითარების სტადიაშია.

ლოს-ალამოსის ეროვნულ ლაბორატორიაში არსებული მიდგომები მიკრომოდელირების პრობლემებისადმი

6. ჰიპოთეზა რთული სისტემის თვითორგანიზების თაობაზე

დიდი ქალაქისა ან რაიონის გადმოსახედიდან, სატრანსპორტო დინამიკა წარმოადგენს ათასი, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში კი მილიონი ინდივიდუალური გადაწყვეტილებების შედეგს დანიშნულების ადგილებს შორის ადამიანთა და ტვირთების გადაადგილების თაობაზე.

ყოველი ასეთი გადაწყვეტილება დაფუძნებულია არასრულ ინფორმაციაზე სატრანსპორტო სისტემის მთლიანობის თაობაზე. ვინაიდან, შეუძლებელია დროის ამჟამინდელ და შემდგომ მომენტებში სრული ინფორმაციის მიღება სატრანსპორტო საშუალების ყოველი მდგომარეობის თაობაზე, მართვის სტრატეგიები ემყარებიან რა "ცოდნას" სისტემის მომავალი მდგომარეობის შესახებ, შეიძლება დაფუძნებულნი იყვნენ სისტემის თვითორგანიზების თვისებაზე. ეს კი ნიშნავს, რომ მოძრაობის მართვის ზომებს ექნებათ ტენდენცია მოძრაობის სტრუქტურის გაწონასწორებისაკენ (სისტემა "აქრობს" რა თავის გადატვირთულ ნაწილებს, "ტვირთავს" დაუტვირთავ ნაწილებს).

ამ შემთხვევაშიც კი, შეუძლებელია რაიმე პროგნოზის გაკეთება იმის თაობაზე, თუ როგორ მოიქცევა ცალკეული მძღოლი, რომელიც მოძრაობს სატრანსპორტო ქსელში. ანუ რამდენი ხნის განმავლობაში დარჩება იგი კონკრეტულ მარშრუტზე. ეს კი ნიშნავს, რომ ვერც მძღოლი და ვერც მართვის კომპიუტერული პროგრამა ვერ უპასუხებენ იმ კითხვას, თუ რომელი გზა იქნებოდა რეალურად ყველაზე მოკლე და საუკეთესო იმ შესაძლო ვარიანტებიდან, რომლებიც არსებობენ სატრანსპორტო ქსელში.

მაშასადამე, სწორედ ეს მზარდი არაპროგნოზირებადობა წარმოადგენს დაბრკოლებას, რომელიც აფერხებს შემდგომ განვითარებას. ამ სირთულეების გადალახვის მეთოდს წარმოადგენს მიდგომა, როდესაც მოდელირების პროცესში მოქმედებათა თანმიმდევრობას აგებენ ისე, რომ შეიძლებოდეს პრობლემების თანმიმდევრული ამოხსნა მათი წარმოშობისთანავე. აქ ყველაზე მოკლე გზაა "აღმავალი მოდელირება", რომელიც დაფუძნებულია ყველა გადაადგილების დინამიკაზე, დაწყებული იმ მომენტიდან როდესაც გადაწყვეტილებები მოძრაობებზე უკვე მიღებულია.

7. დინამიური წონასწორობის მოდელები TRANSIMS-ში

TRANSIMS-ის (TRasportation ANalysis and SIMulation System) მოდელები შეიქმნა და მუშავდება ლოს-ალომოსის ეროვნული კვლევების ცენტრში და ფინანსირდება აშშ-ის ტრანსპორტის სამინისტორსა და გარემოს დაცვის მართვის დეპარტამენტის მიერ. აღსანიშნავია, რომ ამ მოდელებისათვის იქვე იქმნება პროგრამული უზრუნველყოფა იმავე სახელწოდებით.

ტრადიციული მიდგომა ქალაქის სატრანსპორტო ნაკადების დაგეგმვის პრობლემისადმი შედგება ოთხი ნაბიჯისაგან:

- მოძრაობის აღწარმოება: ე. წ. მოძრაობის ზონების ანალიზი - მოძრაობა გამგზავრების პუქტიდან დანიშნულების ადგილამდე.
- მოძრაობის განაწილება: მიმოსვლის გენერაციის პროცედურის შემდეგ ჩვენ გვაქვს მხოლოდ გასვლისა და მისვლის პუნქტები, რომლებიც არ არიან იგივურად ტოლნი ანუ იდენტურნი. ეს კეთდება მგზავრობის განაწილების სტადიაზე, რის შედეგადაც ვღებულობთ ცხრილს, რომელშიც ასახულია წყარო - დანიშნულების ადგილი ანუ **კორესპონდენციის მატრიცა**.
- გაყოფა: მოძრაობის ნაკადები შეიძლება დაყოფილ იქნან სხვადასხვა მეთოდით. მაგალითად, ტრანსპორტის სახეობების მიხედვით - მატარებლები, ავტობუსები, ავტომობილები და ა.შ.
- განაწილება (Assignment): სატრანსპორტო ნაკადები ნაწილდებიან საგზაო ქსელში არსებული მარშუტების მიხედვით, ანუ მათ ენიჭებათ (assign) აღნიშნული მარშრუტები.

დინამიური მაჩვენებლები სტატიკურ assigment-მოდელებში გაშუალდებიან არჩეული დროის მონაკვეთებზე. აღსანიშნავია, რომ ძალიან პატარა მონაკვეთებზე სტატიკური მოდელები უკვე უვარგისია.

TRANSIMS-ში ხდება მოძრაობის დინამიკის მოდელირება. მონაცემები გამგზავრებისა და ჩასვლის პუნქტების შესახებ "მაგრდებიან" ინდივიდუალურ სატრანსპორტო საშუალებებზე. თითოეულ ინდივიდუალურ სატრანსპორტო საშუალებებზე TRANSIMS-ში ფიქსირდება მონაცემები როგორც ყველა გამგზავრება-ჩასვლის პუნქტების შესახებ ასევე იმ მარშრუტებზეც, რომლებიც დაენიშნათ ქსელის ელემენტებს.

მოდელის იტერაციული გაშვებები საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ დანიშნულების მარშრუტების ალტერნატიული ვარიანტები. ურთიერთშეთანხმებულ მარშრუტთა ნაკრების მიღების მიზნით, მკვლევართა რამოდენიმე ჯგუფმა გამოიყენა იტერაციული გაშვებები ე.წ. "მარშრუტიზაციის მიკრომოდელირება მოძრაობის დროის უკუკავშირით" (routing microsimulation-feedback of travel-times).

მოდელირების პროცესი შედგება ორი ძირითადი ეტაპისაგან :

a) მარშრუტის დაგეგმვის ფაზიდან, რომელიც ეფუძნება დეიქსტრას (Edsger W. Dijkstra) სწრაფ ალგორითმს, სადაც უმოკლესი მარშრუტის საპოვნელად იყენებენ მოგზაურობის ხანგრძლივობის დამოკიდებულებას შერჩეულ მარშრუტზე. ხსენებული ალგორითმის მეშვეობით ამოიხსნება შემდეგი ამოცანა - "ისეთ საგზაო ქსელებში, როგორიცაა ორიენტირებული, არაორიენტირებული ან შერეული (გზები, რომლებსაც გააჩნიათ ცალმხრივი მოძრაობის მონაკვეთები) მოვიძიოთ უმოკლესი მანძილები მოცემული მწვერვალიდან ყველა დანარჩენ მწვერვალთან";

b) მოძრაობის მოდელირება მარშრუტების მიხედვით, რომლებიც დანიშნულნი არიან დამგეგმავის მიერ წინა (ანუ a) ეტაპზე. მიკრომოდელირების შედეგების მიხედვით პროგრამა ჰქმნის უკუკავშირის მქონე ფაილს, რომელიც გამოიყენება მარშრუტების შემდგომი გამოძახებისას.

8. უჯრედოვანი ავტომატები

აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ უჯრედოვანი ავტომატები საინტერესონი არიან მათი რთული დინამიური ქცევისა და გამოთვლითი სიჩქარის გამო. მათი გამოთვლის

ISSN 1512-1232

უზარმაზარი სიჩქარე და ეფექტურობა განპირობებულია შემდეგი თვისებებით, რომლებიც თავის მხრივ, იდეალურნი არიან პარალელური გამოთვლებისათვის:

- სივრცის დისკრედიტაცია Δx ზომის მქონე იდენტურ j უჯრედებში;
- შესაძლო მდგომარეობების სასრული რიცხვი $g(x)$;
- $t = i\Delta t$ პერიოდული (პარალელური) განახლება ელემენტარული დროის Δt -ის ბიჯით;
- გლობალური განახლებების გამოყენებითი წესების გამოყენებაზე, რომლებიც დაფუძნებულნი არიან მეზობლობის სასრული (მცირე) რიცხვების მქონე უბნების პატარა დიაპაზონის ურთიერთმოქმედებაზე;

ამ გამარტივების მიუხედავად, უჯრედოვანმა ავტომატებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს ინფორმაციის მარცვლოვანი მატარებლების რეალისტური მოდელებიდან დაწყებული ზვავების ჩამოწოლის მოდელირებამდე დამთავრებული.

სატრანსპორტო დინამიკაში მათმა გამოყენებამ გაზარდა კონტროლი არამდგრად მოძრაობაზე, რომელიც "stop-and-go"-ს რეჟიმის წარმოქმნის მიზეზია. ეს უკანასკნელი კი, თავის მხრივ, ხელს უწყობს ქალაქებსა და ავტომაგისტრალებზე ამტომობილთა დაგროვებას.

ავტოსტრადებზე მოძრაობის მოდელირებისათვის უჯრედოვანი ავტომატები პირველად შემოიღეს კრაემერმა (Cremer)-მა და ლადვიგმა (Ludwig) 1986 წელს. 1990 წ. მათ დაემატა შატი (Schutt), ხოლო 1992 წელს - ნეგალი (Nagel) და შრეკენბერგი (Schreckenberg). ამ მიმართულებით უკვე დაგროვებულია პუბლიკაციათა საკმაოდ დიდი რაოდენობა.

B. ქალაქების სატრანსპორტო ქსელების გავსების მოდელირება

მოდელები, რომელთა მიზანია ქალაქის სატრანსპორტო ქსელში არსებული სატრანსპორტო ნაკადების ანალიზი პირობითად შეიძლება დაიყოს მაკრომოდელებსა და მიკრომოდელებზე.

<u>მაკრომოდელები</u> გამოიყენება კორესპონდენციის პროგნოზისა და სატრანსპორტო ქსელის გავსების ანალიზისათვის. ეს უკანასკნელი წარმოიქმნება როგორც ქსელის, ასევე ქალაქის განვითარების შედეგად (ქალაქის არსებული რაიონების ფუნქციონალური სტრუქტურის გაუმჯობესება, გზების მოდერნიზაცია, ახლების მშენებლობა და ა.შ.). აღნიშნული მოდელები ოპერირებენ ქსელის ცალკეულ ელემენტებზე (კვანძებზე და რკალებზე) განხორციელებული მოძრაობის გაშუალედებული მახასიათებლებით.

<u>მიკრომოდელები</u> გამოიყენება ქსელის ცალკეული ელემენტებისა და მონაკვეთების გამტარუნარიანობისა და შეფერხების ანალიზისათვის. მაკრომოდელებისაგან განსხვავებით, ეს მოდელები იყენებენ უფრო დეტალურ ინფორმაციას გზებისა და მათი გადაკვეთების გეომეტრიის, საგზაო მონიშვნის თავისებურებებისა და შუქნიშნებით რეგულირების შესახებ. გლობალური მოდელების ძირითადი განსხვავება ლოკალური მოდელებისაგან გამოიხატება იმ გარემოებაში, რომ საგზაო ქსელში მოძრაობის განაწილება მარშრუტების მიხედვით, ასევე, აქედან გამომდინარე, ერთის მხრივ მოძრაობის ინტენსივობა რკალებსა და მოსახვევებზე არიან რა გლობალური მოდელების გამოსასვლელები, მეორეს მხრივ ლოკალური მოდელების შესასვლელებს წარმოადგენენ. ამითაა განპირობებული აღნიშნული მოდელების გამოყენების ძირითადი განსხვავებები.

ISSN 1512-1232

1. **მაკრომოდელები (გამოიყენება ქალაქის დაგეგმარებისას)**

განკუთვნილია ქალაქის სატრანსოპრო ქსელში მოძრაობის გაშუალედებული ძირითადი პარამეტრების, სატრანსპორტო ნაკადებისა და კორესპონდენციის (სატრანსპორტო ქსელში მოძრავი ავტომობილთა რაოდენობა) პროგნოზირებისათვის.

ყველა ამ ამოცანის ამოხსნა შესაძლებელია ე.წ. კლასიკური სატრანსპორტო ნაკადის პროგნოზირების 4 ნაბიჯიანი მოდელის მეშვეობით:

1) დემოგრაფიული და სოციალურ-ეკონომიკური ინფორმაციის საფუძველზე ქალაქის რაიონებში შესვლა-გასვლის მოცულობების განსაზღვრა;
2) რაიონებათშორისი კორესპონდენციის განსაზღვრა;
3) კორესპონდენციის გაყოფა გამოყენებული ტრანსპორტის მიხედვით;
4) კორესპონდენციის გაყოფა ქსელში და მისი გავსების პროგნოზი.

სატრანსპორტო ნაკადების მოდელირების ეს კლასიკური სქემა მოიცავს ოთხ ქვეამოცანას ანუ სტადიას, რაც პირობითია ვინაიდან ქვეამოცანები ურთიერთდაკავშირებულნი არიან და ამოიხსნებიან ან საერთო ალგორითმის გამოყენებით ან მათი ურტიერთქმედებისაგან გამომდინარე. გამოთვლებში გამოიყენება დაყოვნებების გაშუალედებული მახასიათებლები.

2. **კორესპონდენციის გამოთვლის მეთოდები**

კორესპონდენციის მატრიცა - ქსელში მოძრავი ავტომობილთა რაოდენობრივი მახასიათებელია. კორესპონდენციის გამოთვლის მოდელი შეიძლება დავყოთ შემდეგნაირად:

2.1 *გრავიტაციური მოდელი*

მოდელის აგებისას, ორ რაიონს შორის ჩასვლა-გასვლის ბალანსს ვარაუდობენ. ძირითადი იდეა დაფუძნებულია იმ გარემოებაზე, რომ ერთი რაიონიდან მეორეში მიმავალი კორესპონდენცია ჩასვლა-გასვლის საერთო მოცულობისა და იმ ფუნქციის პროპორციულია, რომელიც დამოკიდებულია მგზავრობის მანძილზე მგზავრთა მიზიდულობის ცენტრებს შორის.

<u>*ძირითადი ნაკლი*</u> - კორესპონდენციის მოცულობა დამოკიდებულია წყვილი რაიონის მახასიათებლებზე, რომლებიც განცალკევებულად არიან აღებულნი სხვა რაიონებისაგან.

2.1 *ენტროპიული მოდელი*

ეს მოდელი დაფუძნებულია ავტომობილთა ქცევის ალბათურ აღწერაზე, ანუ სისტემის განხორციელებულ მდგომარეობას გააჩნია ყველაზე დიდი სტატისტიკური წონა, რომელიც ასახავს სისტემაში სხადასხვა მდგომარეობათა რეალიზების შედარებით ალბათობებს.

2.2 *სტაუფორდის შესაძლებლობათა კონკურენციის მოდელი*

ეს მოდელი ეფუძნება იმ მოსაზრებას, რომ ქალაქის ორ რაიონს შორის კორესპონდენციათა მოცულობა განისაზღვრება მოძრაობის მარშრუტებზე მგზავრთა ალტერნატიული მიზიდულობის ცენტრების არსებობით, ანუ მონახულების ალტერნატიული შესაძლებლობების რაოდენობით.

2.3 *სხვა მოდელები*

ISSN 1512-1232

"კონკურირებადი ცენტრების" მოდელთა კლასი ითვალისწინებს ქალაქის რაიონის მეტ-ნაკლებ მიმზიდველობას. მათ განიხილავენ როგორც გრავიტაციული მოდელის განზოგადოებას. აღსანიშნავია, რომ შემდგომი განზოგადება აუცილებლად მოითხოვს რაიონის სისტემის სტრუქტურის გათვალისწინებას.

3. საგზაო ქსელის გავსება (assigmnet).

დაფუძნებულია ნაკადების წონასწორობის განაწილების მიებაზე. მოდელისათვის კორესპონდენციის მატრიცა შემავალ ინფორმაციას წარმოადგენს. გამოსასვლელებზე მოდელი იძლევა საგზაო ქსელის შესავლელებში არსებული ნაკადების გაშუალედებულ მნიშვნელობებსა და გაშუალედებულ წილს იმ ავტომობილთა რაოდენობიდან, რომლებიც მოტრიალდნენ გზაჯვარედინებზე.

Traffic Assignment-ის მოდელი შეიძლება განხილულ იქნს როგორც ორი ასპექტის ურთიერთმოქმედება:

1. მოთხოვნა (demand) - ხასიათდება პრინციპებით, რომლებიც მარშრუტის არჩევის მიზნით მიღებულია სატრანსპორტო ქსელის მომხმარებელთა მიერ;

2. წინადადება (supply) - წარმოადგენს ქსელის რეაქციას ამ არჩევანზე, ანუ ქსელის რეაქციაა.

შესაძლებელია შემდეგი ტიპის კლასიფიკაციები:

1. ნაკადების განაწილების მიზეზების შესახებ ჰიპოთეზების მიხედვით;
   - 1.1 ***ნორმატიული მიდგომა***
     კორესპონდენციის განაწილება ხორციელდება სატრანსპორტო ქსელის მუშაობის გლობალური ეფექტურობის კრიტერიუმების საფუძველზე.
   - 1.2 ***დესკრიპტული ანუ აღწერითი მიდგომა***
     ნაკადების სტრუქტურა ფორმირდება მოძრაობის მონაწილეთა ინდივიდუალური გადაწყვეტილებების საფუძველზე.
2. დროის ფაქტორის გათვალისწინების მიხედვით:
   - 2.1 სატრანსპორტო ქსელის გავსების **სტატიკური** მოდელი;
   - 2.2 სატრანსპორტო ქსელის გავსების **დინამიური** მოდელი

3. მარშრუტების არჩევის კრიტერიუმით:
   - 3.1 **სისტემის** წონასწორობა (system-equilibrium assignment);
   - 3.2 **მომხარებლის** წონაწსორობა (user-equilibrium assignment).

სატრანსპორტო ქსელში კორესპონდენციის განაწილების ყველაზე მარტივი საშუალებაა თითოეული კორესპონდენციის დადება ქალაქის ორი რაიონის შემაერთებელ ოპტიმალურ (ანუ უმოკლეს) მარშრუტზე. უფრო განვითარებული მოდელები გამოთვლიან რა ყველაზე მოკლე მარშრუტებს შემდგომ განაბნევენ კორესპონდენციას ამ მარშრუტემზე. თუმცა, ეს მეთოდები არ ითვალისწინებენ მნიშვნელოვან ფაქტორებს, რომლებსაც გავლენა აქვთ მოძრაობის მარშრუტის არჩევაზე:

- ზოგიერთი მომხმარებლის მიერ მარშრუტის არჩევანი იწვევს სატრანსპორტო ქსელის ელემენტების ავსების ზრდას. აღნიშნული კი თავის მხრივ, ზრდის მარშრუტის გავლის დროს და უარყოფითად მოქმედებს სხვა მძღოლების მხრიდან აღნიშნული მარშრუტის შეფასებასა და არჩევაზე, ანუ მოძრაობის მონაწილეთა ერთი ნაწილის არჩევანი მოქმედებს მეორე ნაწილზე.

შ ე ნ ი შ ვ ნ ა:

ISSN 1512-1232

ყველზე ეფექტურ მოდელს, რომელიც სრულად ითვალისწინებს მომხამრებელთა ურთიერთზემოქმედებას წარმოადგენს წონასწორობის განაწილების მოძიების მოდელი (user-equilibrium assignment). ამჟამად, ამ ტიპის სტატიკური მოდელების აგება დასრულებულია, ნაპოვნია ოპტიმიზირების ინტეგრალური კრიტერიუმი, რომელიც წმინდა მათემატიკურია, ამიტომაც არ გააჩნია შინაარსობრივი ინტერპრეტაცია სატრანსპორტო ტერმინოლოგიასა და გადაწყვეტილების მიღების ტერმინებში. (Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: User Equilibrium Analisys and Mathematical Algorithms, MTI, 1985.)

- საზოგადოებრივი ტრანსპორტის მარშრუტებზე მოძრაობის თავისებურებას წარმოადგენს ის გარემოება, რომ მომხმარებელს შეუძლია მიიღოს გადაწყვეტილება არა კონკრეტულ მარშრუტზე, არამედ ქცევის სტრატეგიაზე. მოდელს, რომელიც ქცევის სტრატეგიის საფუძველზე განსაზღვრავს სატრსპორტო ქსელის ავსებას, *ოპტიმალური სტრატეგიების მოდელს* უწოდებენ.

მიკრომოდელები განკუთვნილია სატრანსპორტო ქსელის სეგმენტებსა და გადაკვეთებზე დაგვიანებისა და მათი გამტარუნარიონობის შესაძლებლობების ანალიზისათვის.

დაგვიანება განისაზღვრება ნაკადის მოძრაობის მოდელირებით ქსელის ელემენტებზე, რომლებსაც გააჩნიათ გეომეტრიულად დეტალური აღწერა, რეგულირების რეჟიმები და სხვა თავისებურებანი. ქსელში ნაკადების განაწილება წარმოადგენს შესასვლელს.

შეფასების მეთოდების მიხედვით შესაძლებელია შემდეგი კლასიფიკაცია:

- შეფასებითი ფორმულები (გაშუალედებული მიდგომა);
- მოძრაობის დინამიკის მოდელირება;
- მიკრომოდელები (იმიტაციური მოდელირება);
- მაკრომოდელები (ნაკადის გაშუალედებული მახასიათებლების დინამიკის მოდელირება - "ჰიდროდინამიური მოდელები");
- უჯრედოვანი ავტომატები;

C. სატრანსპორტო ქაოსის თანამედროვე თეორია

მოძრაობის ქაოსის თეორია

ზოგიერთი მკვლევარი ადარებს სატრანსპორტო ნაკადს სითხეს, რომელშიც ტალღები პულსირებენ ისევე როგორც ავტომობილები დაჩქარებისა და დამუხრუჭების რეჟიმებში.

სხვები ცდილობენ ახსნან ეს პროცესები ქაოსის თეორიის ტერმინებში. ისინი ვარაუდობენ, რომ გარკვეულ მომენტებში, როდესაც ტრასა გადაივსება, ავტომობილთა ნაკადი იმდენად არამდგრადი (არასტაბილური) ხდება, რომ მოძრაობის დაგვიანების მთავარი მიზეზი შეიძლება იყოს შედეგი რაიმე უმნიშვნელო (მეორადი) მოვლენის დადგომა.

პირველი მიდგომა ნაკადის მოძრაობის შენელებას ბუნების მოვლენების მსგავსად ადარებს მოძრაობის სტადიების შეცვლას, მაგალითად, ორთქლის გარდასახვა წყალში ან ყინულში.

ISSN 1512-1232

პირველ სტადიაზე, სუსტი დატვირთვისას მძღოლები მოძრაობენ ისე, როგორც მათთვის მოსახერხებელია, ხოლო როდესაც გზა დაიტვირთება მძღოლები უკვე ნაკადში აღმოჩნდებიან, რის გამოც მათ შეუძლიათ იმოძრაონ მხოლოდ საერთო სიჩქარით და ისიც თავიანთ ზოლებზე. ეს შუალედური სტადიაა, რომელსაც "სინქრონიზებულ" ნაკადს უწოდებენ, ყველაზე ძალიან წააგავს სითხეს და ის მეორე სტადიას წარმოადგენს.

როდესაც ნაკადის მოძრაობა გაივლის აღნიშნულ მეორე სტადიას მას შეცვლის ე. წ. ”stop-and-go”-ს რეჟიმი. აქ ავტომობილები უკვე ყინულის ნაწილებს გვანან.

აღნიშნული ჰიპოთეზის საფუძველზე ლოს-ალამოსის ეროვნული ლაბორატორის მეცნიერებმა გამოყვეს სატრანსპორტო ნაკადების მოძრაობის შემდეგი მოდელები:

სტადია 1. სანამ გზა დაუტვირთავია, მძღოლები მოძრაობენ მათთვის მოსახერხებელი სიჩქარით და თავისუფალად გადადგილდებიან ერთი ზოლიდან მეორეში. ამ სტადიაზე ავტომობილები შედარებულნი არიან ნაწილაკთა ნაკადს, რომლებსაც გადადგილების დიდი თავისუფლება გააჩნიათ.

სტადია 2. როგორც კი გზა ავტომობილებით დაიტვირთება, მძღოლები უეცრად კარგავენ გადადგილებების თავისუფლების დიდ ნაწილს და იძულებულნი ხდებიან იმოძრაონ როგორც საერთო სატრანსპორტო ნაკადის ნაწილი და შეათანხმონ თავიანთი სიჩქარეები ნაკადთან. ამასთან, ისინი კარგავენ შესაძლებლობას შეიცვალონ მოძრაობის ზოლები. ეს სტადია, რომელიც წყლის ნაკადს წააგავს, "სინქრონიზებული" ნაკადის სახელწოდებითაა ცნობილი.

სტადია 3. ნაკადში ავტომობილთა დიდი რაოდენობის შემთხვევაში მოძრაობა ხდება წყვეტილი (ე.წ. ”stop-and-go”-ს რეჟიმი). ამ სტადიაზე სატრანსპორტო ნაკადი შეიძლება შეადარო გაყინული წყლის ნაკადს, ანუ ავტომობილები რაღაცა პერიოდის განმავლობაში თითქოსდა "ეწეპებიან" გზის ერთ ადგილს.

იმის მიუხედავად, რომ ავტმობილები შეიძლება მიამსგავსოთ სითხის მოლეკულებს, ისინი ბოლომდე მაინც არ გვანან მათ. კერძოდ, ადამიანები მოძრაობის გუშინდელი ან დღევანდელი დღის პროგნოზზე დაყრდნობით შეეწყობიან მარშრუტებს. ამის გარდა, მოლეკულები ეჯახებიან ერთმანეთს, რაც დაუშვებელია მძღოლთა მოქცევაში. მიუხედავად იმისა, რომ გამომდინარე მოღვაწეობის სფეროსათვის დამახასიათებელი ტრადიციული მიდგომებიდან ფიზიკოსები ხშირად ავრცელებენ სითხის მოლეკულების ქცევას სატრანსპორტო ნაკადებზე, სადაც აუცილებლად ფიგურირებს ადმიანური ფაქტორი. ამასთან დაკავშირებით, **Chris L. Barrett**-მა, მეცნიერმა, რომელმაც დაარწმუნა ლოს-ალომოსი რომ სატრანსპორტო ნაკადების შესწავლა წარმოადგენს ეროვნული უსაფრთხოების სერიოზულ საკითხს და ახლა ამ პროექტის ხელმძრვანელია, განაცხადა: "სატრანსპორტო ნაკადი - ესაა ნაწილაკთა ნაკადი, რომლებსაც გააჩნიათ მოძრაობის თავიანთი მოტივები. ვფიქრობ, ეს საოცრად საინტერესოა."

დასკვნა

სატრანსპორტო ნაკადების მათემატიკური მოდელების აგებისათვის არსებობს ორი ძირითადი მიდგომა:

- საწყის ჰიპოთეზთა ნაერთზე ერთბაშად იგება დასრულებული ანალიტიკური მოდელი. ეს მიდგომა ახასიათებს მიკრომოდელებს;
- გამოიყენება მოდელი, რომელსაც გააჩნია დამატებითი გამოყენების ქცევის კოდირებული ალგორითმი (იმიტაციური მოდელები მიკროდონისათვის).

მოდელებს, რომლებსაც განვითარებულ ქვეყნებში იყენებენ საჭიროებენ ფრთხილ გამოყენებას საქართველოს რეალობაში, ვინაიდან:

ISSN 1512-1232

- არსებობს მოძრაობის განსხვავებული სპეციფიკა, კერძოდ საზოგადოებრივ ტრანსპორტს გააჩნია მოძრაობის გარკვეული პრიორიტეტი, დაშვებულია მარჯვენა მოხვევა წითელ შუქნიშანზე და ა. შ.;
- ჩვენი მძღოლების ქცევა გზაზე არ გამოირჩევა დისციპლინით.

მათემატიკური მოდელების განვითარების თანამედროვე ტენდენციები და სატრანსპორტო ნაკადების ავტომატიზირებული მართვის სისტემების დანერგვის აუცილებლობა საშუალებას გვაძლევს ჩამოვყალიბოთ თანამედროვე მოთხოვნები, რომლის თანახმად აუცილებელია ისეთი მათემატიკური მოდელების შექმნა, რომლებიც საშუალებას მოქვცემს განვახორციელოდ საგზაო პარამეტრების მქონე მოდელის ინტეგრირება გსს (გეოგრაფიული საინფორმაციო სისტემა) - მოდელებსა და მონაცემთა ბაზებში.

ლიტერატურა

1. Anton Sukhochenkov - *Analysis of estimation methods of effectiveness different traffic management technologies;*
2. Nonlinear conservation laws and applications. University of Minnesota, July 13 – 31, 2009. http://www.ima.umn.edu/2008-2009/SP7.13-31.09/index.html#schedule ;
3. А.В. Гасников - Математическая физика транспортных потоков – 2009 г.;
4. П.С. Кравченко. Г. А. Омаров – Микроскопические математические модели транспортных потоков – Проблемы информатики. 2014. №1.
5. Михеева, Богданова, Сапрыкина – Интеллектуальное управление Транспортными потоками на локальном уровне / Синергетика в естественных науках // Труды международной междисциплинарной научной конференции. – Тверь, 2010. – С. 273-276.
6. С.Л. Кленов - Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке — новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий - ТРУДЫ МФТИ. — 2010. — Том 2, № 4, стр.75 – 89.
7. Тимофеева Г.А., Ахмадинуров М.М. - Гибридная математическая модель транспортного потока - Физико-Математические Науки №12, 2011, стр. 389 -392.

სტატია მიღებულია: 2016-03-29