საცობების ზიანი ქალაქის ეკოლოგიაში და მათი წარმოშობა-აცილების სტრატეგიები თამაშთა თეორიის მოდელით

გურამ ბელთაძე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი: *განხილულია ქალაქში ავტომობილების საცობების გამომწვევი მიზეზები, რომლებიც წარმოიშობა მძღოლების გადაწყვეტილებით თამაშთა თეორიის ოპტიმალობის პრინციპების დარღვევით. საცობების ასაცილებლად მძღოლთა ქცევის აღწერისათვის განხილულია თამაშთა თეორიიდან ქსელური თამაშის მოდელი* ***ნეში-ვარდროპის წონასწორობით.*** *ნაპოვნია ეს წონასწორობა, რომლითაც სატრანსპორტო სისტემა იქნება წონასწორობაში (შემცირებული საცობებით).*

საკვანძო სიტყვები: *ეკოლოგია, სატრანსპორტო სისტემა, მძღოლები, საცობები, ქსელური თამაში, მარშრუტები, წონასწორობა.*

უძველესი დროიდან დადგენილია რომ, ქალაქის არქიტექტურა და განაშენიანება გავლენას ახდენს საცხოვრებელ გარემოზე, რაც ბოლო დროს ყველასათვის უფრო შესამჩნევია. ამიტომ დღეისათვის ძალიან აქტუალურია ურბანული (ქალაქთმშენებლობითი) დაგეგმარების განვითარების პროცესების არსის განსაზღვრისა და ურბანული სივრცის მართვის მოდელების შერჩევის ახალი მიდგომების პოვნა ეკოლოგიური პრობლემების გათვალისწინებით. ამისათვის თანამედროვე ეკონომიკაში გამოიყენება ახალი მიდგომები მუდმივად ცვალებადი პირობებით რეალობასთან შესაბამისობაში. ამ სფეროში ძალიან წარმატებული აღმოჩნდა თამაშთა მათემატიკური თეორია, რომელშიც თამაშების სივრცე წარმოადგენს განსხვავებული ინტერესების მქონე **(კონფლიქტური)** სოციალური ურთიერთქმედების სივრცეს, რაც გახდა მისი ეფექტური გამოყენების ფაქტორი არა მხოლოდ ეკონომიკაში, არამედ ყველა სფეროში. კონკრეტულად კი თამაშთა თეორია სწავლობს ინდივიდუალური სარგებლიანობის ოპტიმიზაციის გზებს სხვა ინდივიდებთან (მოვლენებთან) კონკურენციაში, რომლებიც რაციონალურად ცდილობენ საკუთარი სარგებლიანობის მიღწევას.

ქალაქთმშენებლობაში თამაშთა თეორიის გამოყენების საჭიროებაზე მიუთითებს ქართველი არქიტექტორი და მეცნიერი თავის სადოქტორო ნაშრომში [1]. მისი აზრით ეკოლოგები ქალაქს ხედავენ, როგორც რესურსების მომხმარებელს და ნარჩენების წარმომქმნელს. ქალაქი ეჯიბრება ბუნებას მიწისა და რესურსების გამოყენებაში და ყოველთვის წარმოადგენს გარემოსთვის საფრთხეს. სოციალური მგეგმავები ქალაქს ხედავენ, როგორც **კონფლიქტის ადგილს** რესურსების, სერვისებისა და შესაძლებლობების განაწილებაში. კონფლიქტი არსებობს აგრეთვე ქალაქის შიგნით მის სხვადასხვა ჯგუფებს შორის. სოციალური სივრცე წარმოდგენილია სხვადასხვა საზოგადოებრივი ორგანიზაციებითა და მოძრაობებით.

ქალაქის ბუნებრივ გარემოზე ზემოქმედების სხვადასხვა დონეს წარმოშობს სატრან-

სპორტო ნაკადების განსხვავებული სტრუქტურა, გადატვირთულობა და საცობები მათი გამონაბოლქვებით. ყველაფერი ეს იწვევს ატმოსფერულ ჰაერში მავნე ნივთიერებათა მაღალ კონცენტრაციას, რაც გარემოს ძირითადი კომპონენტების დაბინძურების მიზეზია. ჰაერის ასეთი დაბინძურება ხელს უწყობს სმოგის წარმოქმნას და ჰაერის ხარისხის გაუარესებას, რაც უარყოფითად აისახება მოქალაქეების ჯანმრთელობასა და კეთილდღეობაზე.

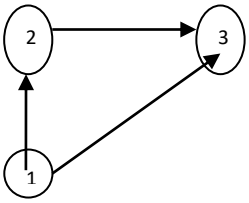
მოძრაობის რეგულირებას უდიდესი როლი აკისრია ქალაქის ქუჩებში საცობებისა და ავარიული სიტუაციების წარმოშობის თავიდან აცილების კუთხით. ამ მიზნით მნიშვნელოვანია უბნების დამაკავშირებელი საავტომობილო გზების, გზაჯვარედინების, შუქნიშნების ოპტიმიზაციისა და მართვის ერთიანი სისტემის შექმნა, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს საცობებს და ავარიულ სიტუაციებს, უნდა მოხდეს მოძრაობის ხელმძღვანელი პოლიციის თანამშრომლებისა და მძღოლების სათანადო მომზადება ასეთ სიტუაციებში გადაწყვეტილების მიღების წესების დაუფლებით.

საავტომობილო მოძრაობის სიტუაციის ეკოლოგიური ოპტიმიზაციის მიღწევა შესაძლებელია თამაშთა თეორიის წონასწორობის ძირითადი პრინციპების დაცვის შემთხვევაში. მკვლევარები ახლა მას იყენებენ ამ სფეროში რთული პრობლემების, მაგალითად სატრანსპორტო ნაკადების ანალიზისათვის.

ამ სფეროში შესაძლებელია გამოვიყენოთ მასაჩუსეტის ტექნოლოგიური ინსტიტუტის მკვლევართა მიერ ჩამოყალიბებული თამაშთა თეორიის ახალი მიმართულება **ქსელური თამაშები** თავიანთი წონასწორული სიტუაციებით.

განვიხილოთ ქსელური თამაშების ერთი კონკრეტული მოდელი, რომელშიც გვაქვს საავტომობილო სატრანსპორტო ქსელი. მოთამაშეები მძღოლებია, რომლებიც დამოუკიდებლად ღებულობენ გადაწყვეტილებებს. აქ ვნახავთ, რომ მძღოლების გადაწყვეტილებები იწვევს ავტომობილების საცობებს (ჭედვას) და ასეთი გადაწყვეტილებებით დარღვეულია ნეშის წონასწორობის პრინციპი.

წარმოვიდგინოთ ერთი გზაჯვარედინი (მე-2 წვეროში) და ორი საავტომობილო მარშრუტი, რომლებითაც შეიძლება ჩავიდეთ 1-ელიდან მე-3 წვეროში (ნახ. 1):



ნახ. 1.

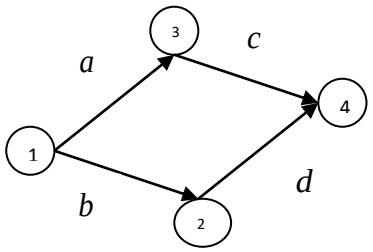
ამასთან, (1,3) გზა მოკლეა, ვიდრე (1,2,3) გზა. დავუშვათ (1,3) გზა ორზოლიანია და მის შუა ნაწილში ერთ-ერთი ზოლი გადაკეტილია რემონტის გამო. დროის საწყის მომენტში, როცა ორივე გზა ცარიელია (ვთქვათ დილით ადრე), ყველა მძღოლი, რომლებსაც სურთ ჩასვლა 1-დან 3-ში, აირჩევს (1,3)-ს. თუ ერთ ზოლს შეუძლია გაატაროს 1500 ავტომობილი/საათში, ხოლო გზაზე რაიმე მომენტში დაიწყებს შესვლას 2500 ავტომობილი/სააათში, მაშინ დაისმის კითხვა: საით წავა 1000 ატომობილი/საათში? რა თქმა უნდა, ისინი აღმოჩნდებიან გზის იმ ნაწილში, სადაც მიმდინარეობს სარემონტო

სამუშაოები. უფრო მეტიც, ავტომობილების გადანაწილების აუცილებლობიდან გამომდინარე, გადაადგილებად ზოლზე ნაკადი იქნება ნაკლები, ვიდრე 1500 ავტომობილი/-საათში. დროის გაზრდით, გაიზრდება საცობიც. ასევე დაისმის კითხვა, როდის შეწყდება საცობის გაზრდა? რა თქმა უნდა, ეს მოხდება, თუ გზაზე შესული ავტომობილების რიცხვი გაუტოლდება გზიდან გამომავალი ავტომობილების რიცხვს, ე.ი. გახდება დაახლოებით 1500 ავტომობილი/საათში. მაგრამ, საით წავა ზედმეტი 1000 ავტომობილი? ცხადია, საცობის გამო ისინი გამოიყენებენ შემოვლით გზას. ეს კი დაიწყება იმ მომენტში, როცა მძღოლებისათვის არ ექნება მნიშვნელობა მარშრუტის არჩევას. ცხადია, თუ მძღოლები თავიდანვე აირჩევდნენ შემოვლით გზას, მაშინ საცობი არ წარმოიშობოდა. მაგრამ, მძღოლის ინტერესებიც გასათვალისწინებელია, ვინ მოინდომებს შორი გზის გავლას, როცა იქვე უფრო მოკლე გზაა, თუნდაც იცოდეს, რომ ის გადატვირთულია. მძღოლი ყოველთვის იფიქრებს, რომ ამ სირთულესაც გადალახავს - სწორედ ასე იწყება საცობების შექმნა.

მას შემდეგ, რაც გავიგეთ, როგორ წარმოიშობა საცობები, მათთან საბრძოლ-ველად საჭიროა ამ სფეროში ჩვევების გამომუშავება.

დასკვნის სახით სატრანსპორტო ქსელთან დაკავშირებით აღვნიშნავთ, რომ ქალაქსა და რეგიონში სატრანსპორტო სისტემების გაუმჯობესება მოითხოვს მუდმივ მეცნიერულ ძიებას. ამ სისტემაში წარმოშობილ პრობლემათა მიზეზები იმაზე მეტია, ვიდრე ჰგონიათ. აქ მოკლევადიანი, ზედაპირული გადაწყვეტილებები გრძელვადიან პერსპექტივაში შეიძლება უარესი შედეგის მომტანი აღმოჩნდეს. ასეთი შეცდომის მაგალითია იმის მტკიცე რწმენა, რომ ახალი გზების აშენებით გადაწყდება საცობების მწვავე პრობლემა და გაუმჯობესდება ეკოლოგიური მდგომარეობაც. სინამდვილეში სატრანსპორტო პოლიტიკის გაუმჯობესებისთვის აუცილებელია ქვეყანაში მუდმივი მეცნიერული კვლევების ჩატარება. მათემატიკური ეკოლოგიის თვალსაზრისით ამ სფეროში ძალიან დიდი სიფრთხილეა საჭირო იმისათვის, რომ არ დავარღვიოთ ბუნების მიერ დადგენილი წონასწორობა. ასეთი კვლევები დიდი ხანია ჩატარებულია და ახალი წარმოშობილი პრობლემების კვლევა დღესაც მიმდინარეობს მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში (მაგალითად, აშშ-ში). თამაშთა თეორიის გამოყენებით შესაძლებელია სატრანსპორტო პრობლემებში რამდენიმე მიდგომის შემუშავება, რომელსაც შეეძლება გზებზე და გზაჯვარედინებზე არსებული სიტუაციის ოპტიმიზაცია, ეკოლოგიური სიტუაციის გაუმჯობესება.

მძღოლთა ქცევის აღწერისათვის განვიხილოთ შემდეგი მოდელი. ვთქვათ, მოცემულია საქალაქო სატრანსპორტო ქსელი ორიენტირებული $G(V,E,T)$ გრაფით (ნახ. 2), სადაც V გრაფის წვეროების სიმრავლეა, მათ შეესაბამება გზაჯვარედინები და ისინი აღნიშნულია 1,2,3,4-ით, $E=\{a,b,c,d\}$ გრაფის წიბოებია ანუ ისინი



ნახ. 2.

გზებია, რომლებსაც აქვთ მიმართულება. ამასთან ყოველ წიბოს შეესაბამება გარკვეული დრო და ის მიუთითებს ამ გზის გავლისათვის საჭირო დროს. ამ დროს ეწოდება წიბოს “წონა”, ამიტომ მოცემულ G გრაფს ეწოდება “აწონილი”.

თითოეული გზის წონა, დამოკიდებულია იმაზე, რამდენი მძღოლი იყენებს მას. ცხადია, რომ რაც მეტია ამ გზაზე ავტომობილების რიცხვი, მით მეტია მასზე საცობის წარმოშობის შანსი და მით მეტი იქნება მისი გავლის დრო. გზის “წონა” აღწერს მისი გავლისათვის საჭირო დროის დამოკიდებულებას მასზე მოძრავი ავტომობილების რიცხვზე, ე.ი. გზის წონა არის ფუნქცია, რომელიც დამოკიდებულია ამ გზაზე მოძრავი ავტომობილების რიცხვზე. აღვნიშნოთ შესაბამისად a, b, c და d გზების წონათა ფუნქციები შესაბამისად f_a, f_b, f_c და f_d-თი.

მოდელში ჩავთვალოთ, რომ ეს ფუნქციები წრფივია და აქვს შემდეგი სახე: $f_a(t) = f_d(t) = 50 + t$, $f_b(t) = f_c(t) = 10t$. მაგალითად, $f_d(t) = 50 + t$ აღნიშნავს: თუ d გზაზე დროის ერთეულში გადაადგილდება t ავტომობილი, მაშინ ამ გზის გავლის დრო იქნება $50 + t$ წუთი (ან საათი იმის შესაბამისად, რა არის დროის ერთეული).

ვთქვათ, მძღოლები მოძრაობენ 1-ელი წვეროდან მე-4 წვეროსაკენ, ამასთან დროის ერთეულში 1-ელიდან გამოდის ერთი და იმავე რაოდენობის ავტომობილი. ვთქვათ ეს რიცხვია 6. ამასთან, 1-ელიდან 4-ში შეიძლება ჩასვლა (1,3,4) და (1,2,4) ორი გზით. დავუშვათ, რომ მძღოლები გზაჯვარედინზე გავლისას დროს არ კარგავენ. მაშინ ამ მარშრუტების გავლის დრო იქნება შესაბამისად $f_a + f_c$ და $f_b + f_d$. სატრანსპორტო ნაკადი (1,3,4) მარშრუტზე აღვნიშნოთ x-ით, ხოლო (1,2,4) მარშ-რუტზე y-ით. მარშრუტზე სატრანსპორტო ნაკადში ვგულისხმობთ იმ მანქანების რაოდენობას, რომლებიც გამოდიან მარშრურტის საწყისი წვეროდან მარშრუტის ბოლოსაკენ დროის ერთეულში. ჩვენს ამოცანაში საპოვნია x და y რიცხვების ოპტიმალური მნიშვნელობები წონასწორობის სიტუაციაში, რომელთა ჯამია $x + y = 6$.

ცხადია, რომ x არის G გრაფის a და c წიბოებზე სატრანსპორტო ნაკადი, ხოლო y არის b და d წიბოებზე ნაკადი. შესაბამისად, (1,3,4) მარშრუტის გავლისათვის საჭიროა $f_a(x) + f_c(x)$ დრო, ხოლო (1,2,4) მარშრუტისათვის - $f_b(y) + f_d(y)$.

მძღოლი, აირჩევს რა მარშრუტს, მოქმედებს მხოლოდ საკუთარი ინტერესების შესაბამისად, რაც ნიშნავს, რომ ისინი ირჩევენ მარშრუტებს უმცირესი მოსალოდნელი დანახარჯებით. მაგრამ, რაც მეტი მძღოლი აირჩევს ერთი და იმავე მარშრუტს, მით მეტი იქნება მასზე დანახარჯები. მეორე მხრივ, დავაფიქსიროთ ავტომობილების საერთო რიცხვი, რომ-

ლებიც 1-ელი წვეროდან მე-4 წვეროსაკენ გადაადგილდებიან დროის ერთეულში. მაშასადამე, თუ რომელიმე მარშრუტს ირჩევს მძღოლების მეტი რაოდენობა, მაშინ მეორე მარშრუტს გამოიყენებს მძღოლების ნაკლები რაოდენობა და ასეთ მარშრუტზე დანახარჯები შემცირდება. ამრიგად, პირველი, ადრე უფრო მიმზიდველი მარშრუტი გახდება უფრო დამძიმებული, ხოლო მისი ალტერნატიული მეორე მარშრუტი გახდება უფრო მსუბუქი. ასეთი მოტივაციით მძღოლები ხელახლა შეცვლიან მარშრუტებს. ცხადია, მოტივაციის ასეთ ცვლილებებს მძღოლები პრაქტიკაში ნაკლებად იყენებენ.

განვიხილოთ **ნეში-ვარდროპის წონასწორობა** ჩვენი სატრანსპორტო ქსელისათვის, რომლის განმსაზღვრელი უტოლობების შინაარსი ასეთია: **მძღოლების მიერ არჩეულ მარშრუტებზე ნაკადთა განაწილება იქნება წონასწორული, თუ თითოეული მათგანის მიერ არჩეული მარშრუტის შეცვლა მისთვის არასასურველია.** მაგალითად, თუ სატრანსპორტო ქსელისათვის რეალიზებულია წონასწორობა და განვიხილავთ მასში მონაწილე ნებისმიერ მძღოლს, რომელიც იყენებს (1,2,4) მარშრუტს, მაშინ მის მიერ ამ მარშრუტის შეცვლა მისთვის არაა ხელსაყრელი.

ჩვენი მაგალითისათვის ვიპოვოთ წონასწორობა. ამისათვის განვიხილოთ ნაკადების განაწილების სამი შესაძლო ვარიანტი:

1). $x=6, y=0$ ანუ დროის ერთეულში ყველა მძღოლი ირჩევს (1,3,4) მარშრუტს. თუ ეს წონასწორობაა, მაშინ თითოეული მძღოლი ფიქრობს, რომ “ამ მარშრუტის გავლისათვის საჭირო დრო არ იქნება იმ დროზე მეტი, რომელიც დამჭირდებოდა (1,2,4) მარშრუტის გავლისათვის, მასზე მხოლოდ მე რომ ვმოძრავობდე”. მაშასადამე, უნდა შესრულდეს უტოლობა $f_a(6)+f_c(6)\le f_b(0)+f_d(0)$;

ანალოგიურად გვექნება მე-2) $x=0, y=6,\ f_b(6)+f_d(6)\le f_a(0)+f_c(0)$

და მე-3) $x+y=6, x>0, y>0,\ f_a(x)+f_c(x)=f_b(y)+f_d(y)$ შემთხვევებში.

რადგან ჩვენს შემთხვევაში $f_a(t)+f_c(t)=11t+50=f_b(t)+f_d(t),$ ამიტომ აქედან მივიღებთ: $f_a(0)+f_c(0)=f_b(0)+f_d(0)=50$ და $f_a(6)+f_c(6)=f_b(6)+f_d(6)=116.$ მაშასადამე, 1)-ელი და მე-2) ვარიანტები ვერ შესრულდება. რომ ვიპოვოთ ნაკადების წონასწორული განაწილება, უნდა ამოვხსნათ მე-3 ვარიანტისაგან შედგენილი განტო-ლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} x+y=6, \\ 11x+50=11y+50, \end{cases}$$

საიდანაც $x=3, y=3.$

ცხადია, მიღებული ამონახსნი აკმაყოფილებს წონასწორობის პირობებს: ორივე განვლილი მარშრუტის გავლის დრო ერთნაირია და ტოლია $f_a(3)+f_c(3)=f_b(3)+f_d(3)=83,$ ხოლო გამოუყენებელი მარშრუტი საერთოდ არ გვაქვს.

ამ მოდელიდან ჩანს, რომ წონასწორობაში ვერც ერთი მძღოლი ვერ მოიგებს, თუ იგი ცალმხრივად შეცვლის მარშრუტს. ამიტომ, თუ სატრანსპორტო სისტემა წონასწორობაშია, მაშინ ის რჩება ამ მდგომარეობაში (როგორც აღვნიშნეთ, მას ნეშის და ვარდროპის წონასწორობა ეწოდება). მოცემულ თამაშში მძღოლები არიან მოთამაშეები, ხოლო მარშრუტები სტრატეგიებია. რაც შეეხება ნეში-ვარდროპის წონასწორობის არ-

სებობას, ის გარანტირებულია ნეშის თეორემის ძალით, რადგან თამაში სასრულია - სასრულია მძღოლებისა და მარშრუტების რაოდენობა. ვარდროპმა შემოგვთავაზა ორი პრინციპი, რომლებიც აღწერენ მძღოლების შესაძლო ქმედებებს. პირველი გულისხმობს, რომ ყველა მძღოლი იქცევა ეგოისტურად - მხოლოდ საკუთარი ინტერესების შესაბამისად და თითოეული მათგანი თვლის, რომ მისი გავლენა უმნიშვნელოა. მეორე პრინციპით პირიქით, მძღოლები მოქმედებენ შეთანხმებულად, რათა მოახდინონ საზოგადო-ებრივი დანახარჯების მინიმიზაცია. მისი აზრით, ამ პრინციპებით და მათი კომ-ბინაციებით აღიწერება მძღოლთა ქცევის ყველა შესაძლო არსებითი ვარიანტები.

ლიტერატურა

1. მ. სალუქვაძე. მსხვილი ქალაქის ეკოლოგიური მდგომარეობის კომპლექსური კვლევის თანამედროვე ასპექტები ქალაქგეგმარებითი რგულირების მიზნით (თბილისის მაგალითზე). დისერტაცია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2012, 188 გვ.
2. გ. ბელთაძე. თამაშთა თეორია: ურთიერთობათა და წონასწორობის მათემატიკური თეორია. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საგამომცემლო სახლი “ტექნიკური უნივერსიტეტი”, თბილისი, 2016, 505 გვ.
3. Determination of atmospheric air pollution in the Tbilisi agglomeration using moss bioindicators N. Berdzenishvili, ʔɣʉwfŋʰ, 52

The damage of traffic jams to the city's ecology and their occurrence-avoidance strategies using the game theory model

Beltadze G. N.

Summary

From the point of view of mathematical ecology, great care is required in planning a city's transport network in order not to disturb the equilibrium established by nature. In the occurrence of traffic jams in traffic flows and their avoidance, among other factors, a decisive role is assigned to the decisions of drivers to maintain the equilibrium situation of game theory in a given network. This is shown using game theory network models.

Key words: ecology, transport system, drivers, traffic jams, network game, routes, equilibrium.