

LAZAR CVETANOVIĆ, dipl.inž.  
Centar vojnotehničkih škola KoV  
"General armije Ivan Gošnjak"  
Zagreb, Ilica 256 B

Tehnologija i organizacija prometa  
Pregled  
UDK: 656.1.011  
Primljeno: 18.05.90.  
Prihvaćeno: 09.07.90.

## STRATEGIJA UPRAVLJANJA PUTNIM SAOBRAĆAJEM, ZASNOVANA NA OPTIMIZACIJI RASPODELE TOKOVA

### SAŽETAK

*Saobraćaj u određenim prilikama može da izazove na mreži saobraćajnica kaos u vidu zastoja, zagušenja, velikih redova, saobraćajnih nezgoda i sl. Sve to može da ima dalje negativne posledice na mobilnost društva, pokretljivost učesnika, zastoje u snabdevanju industrije, stanovništva, velike troškove i dr.*

*U svim tim prilikama mora postojati odgovarajuća strategija upravljanja kojom bi se saobraćaj učinio pouzdanim, brzim, ekonomičnim i dovoljnim da zadovolji naše potrebe.*

*U članku se obrađuje model raspodele saobraćajnih tokova na putno-uličnoj mreži primenom metode linearnog programiranja i organizacije prikupljanja i obrade informacija o saobraćaju radi donošenja optimalnih odluka o upravljanju saobraćajem.*

### 1. UVOD

Efikasnost funkcionisanja osnovnog sistema "put - saobraćajni tok" umnogome zavisi od izabrane strategije upravljanja i metoda njezne realizacije. Strategija upravljanja putnim saobraćajem je skup akcija što su ih utvrdili nadležni organi i neposredni učesnici (vozači) u saobraćaju kojima se postiže najbolje iskorišćenje putne mreže u određenim uslovima.

Najniži nivo upravljanja putnim saobraćajem jeste skup onih akcija koje preduzimaju vozači i drugi učesnici u saobraćaju, birajući po slobodnoj želji parametre kretanja, a da im se iz okruženja ne nude posebne informacije o tome da li se njihove želje mogu ili ne mogu realizovati na određenom putnom pravcu.

Viši nivo upravljanja jeste onaj koji - uzimajući u obzir širi društveni interes, naročito u nekim vanrednim prilikama - raznim upravljačkim aktivnostima, inženjerskim i organizacijsko-tehničkim rešenjima usmerava, pa čak i primorava učesnike u saobraćaju da se kreću određenim maršrutama, jer se time, u principu, najefikasnije iskorišćava data propusna moć puta i putna mreža, povećava bezbednost saobraćaja i postiže veća ekonomičnost. Strategija upravljanja putnim saobraćajem, prema tome, sadrži više uzajamno povezanih akcija koje se odnose na put i putne uslove, organizaciju saobraćaja, saobraćajni tok i režim saobraćaja. Strategiju upravljanja saobraćajem ostva-

ruju odgovarajući upravno-rukovodni organi neposredno ili iz posebnog centra za upravljanje, kakav imamo prilike videti u velikim svetskim metropolama.

U principu se, pri izboru upravljačkih akcija, prednost daje bezbednosnim aspektima odvijanja saobraćaja, propusnoj moći mreže, ukupnom vremenu putovanja i preraspodeli, odnosno uravnoteženju saobraćajnih tokova na mreži da bi se pozitivni efekti iskoristili.

Važna strategijska postavka je preraspodela saobraćajnih tokova na mreži, i to davanjem preporuka iz centra o povoljnijim varijantnim maršrutama. To je naročito važno u nekim vanrednim prilikama, pri zagušenju ili takvim saobraćajnim nezgodama koje za duže vreme smanjuju protok na nekoj saobraćajnici. Strategija varijantnih maršruta je posebno efektivna na dobro razvijenoj putnoj ili gradskoj mreži.

Da bi se moglo delovati na ponašanje saobraćajnog toka na mreži, u centru za upravljanje mora da postoji odgovarajući model realne mreže sa nosiocima informacija, odgovarajućim algoritmima i rešenjima kako postupati u kritičnim prilikama.

### 2. MODEL OPTIMALNE RASPODELE SAOBRAĆAJNIH TOKOVA

Obično su saobraćajne situacije složene i kritične, pa se protok na mreži raspodeljuje preusmeravanjem i zavodjenjem odgovarajućeg režima, koji se na adekvatan način mora saopštiti učesnicima u saobraćaju.

Pretpostavićemo, radi jednostavnosti modela i boljeg razumevanja, da se kretanje na mreži vrši samo u jednom pravcu. Takva rešenja imaju mnogi veliki gradovi: Pariz, Minhen, Rim i dr.

Ako sa  $q_j$  označimo intenzitet saobraćaja po pravcu  $j$ , onda je  $q_j \geq 0$  nenegativna veličina protoka. Međutim, kao kriterijum efikasnosti raspodele saobraćajnih tokova na mreži može se koristiti i vreme putovanja, s pretpostavkom da se računa čisto vreme putovanja a zanemaruju zastoje na putu i u raskršćima koji nastaju iz drugih razloga. Ali, ako bi se uzimali i oni u obzir, potrebno je uvesti još neke metode pri modeliranju raspodele tokova, što nije predmet ovog rada.

Ako je sada  $t_j(q_j)$  vreme putovanja po



pravcu  $j$  funkcija intenziteta saobraćaja  $q_j$ , onda je ukupno vreme putovanja na mreži određeno funkcijom cilja  $F$ :

$$F = \sum_{j=1}^p g_j t_j(q_j) \quad (1)$$

gde je:

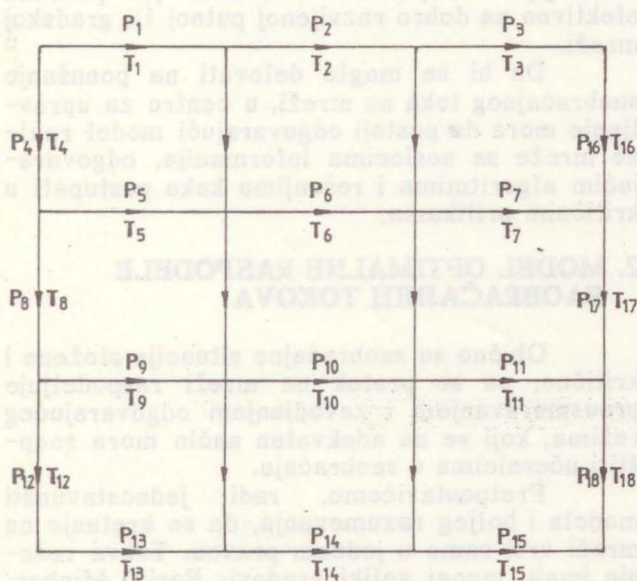
- $F$  - funkcija cilja ukupnog vremena putovanja
- $g_j$  - intenzitet toka koji počinje kretanje iz nekog reiona (generira se u  $i$ -tom rejonu)
- $t_j$  - vreme putovanja po pravcu  $j$
- $q_j$  - intenzitet saobraćaja na pravcu  $j$
- $p$  - pravac, grana, linija, luk

Protok saobraćaja po pravcu  $j$  može se izraziti kao:

$$q_j = \sum_{k=1}^N q_j^k \quad (2)$$

pri čemu je ograničenje  $q_j \geq 0$  za sve  $j, k$  i  $q_j \leq P_j$ , gde je  $P_j$  propusna moć grane, pravca  $j$ .

Ako se pretpostavi neka putna mreža, kao na slici 1, i na njenim granama utvrde veličine realne propusne moći  $P_j$  ( $i=1, \dots, n$ ) i minimalna vremena putovanja  $T_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), onda je moguće tražiti optimizaciju kretanja po nekim već utvrđenim metodama, na primer linearnog, kvadratnog programiranja ili po nekoj drugoj metodi.

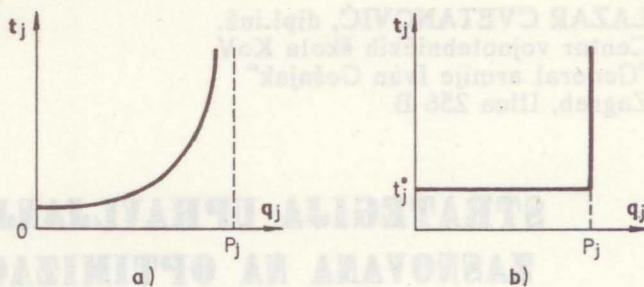


Slika 1. Izgled modela neke putne mreže

### 2.1. Optimizacija korišćenjem metode linearnog programiranja

Zavisnost vremena putovanja i protoka saobraćaja na pravcima mreže može se predstaviti opštom funkcijom, kao na slici 2a [1, 2, 5, 6]. Međutim, takav način rešavanja zavisnosti vremena putovanja dosta je složen, jer uzima u obzir i zastoje u saobraćajnom toku.

Drugačiji je slučaj ako se pretpostavi da je vreme putovanja konstantno, pa bi onda opšti



Slika 2. Zavisnost vremena putovanja od protoka

izgled zavisnosti bio kako pokazuje slika 2b, odnosno:

$$t_j(q_j) = t_j^0 \text{ konstantno za } 0 \leq q_j \leq P_j \quad (3)$$

Pri ovom modelu se pretpostavlja da je srednja brzina vozila konstantna i da zavisi od intenziteta protoka sve do protoka koji je jednak propusnoj moći pravca  $P_j$ . Funkcija cilja, prikazana na slici 2, može se dobiti na osnovu izraza (2) i (3):

$$F = \sum_{j=1}^p t_j^0 q_j = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^N t_j^0 q_j^k = q_j^k \quad (4)$$

Ograničenja ovog odnosa su u vidu:

$$q_j^k \geq 0, (j = 1, p; k = 1, N)$$

$$\sum_{k=1}^N q_j^k \leq C_j, (j = 1, p) \quad (5)$$

$$A_q^k = g^k, (k = 1, N)$$

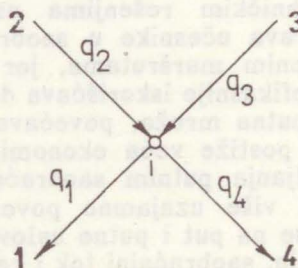
pri čemu oznaka  $A$  predstavlja matricu u obliku  $a_{i1}q_1 + a_{i2}q_2 + a_{i3}q_3 + \dots = g_i$ , a  $q$  i  $g$  su:

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_p \end{pmatrix}; \quad g = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

pa je

$$A_q = g \quad (7)$$

Dakle, veza između generiranog protoka  $g$  i pobudjenog protoka  $q$  nalazi se u čvoru  $i$ , kako prikazuje slika 3:

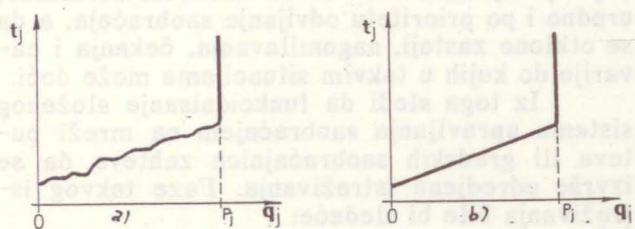


Slika 3. Prikaz saobraćajnog protoka u čvoru  $i$



Primenom metoda linearnog programiranja može se sada dobiti  $q_j^k$ , koji odgovara minimumu  $F$ . To zahteva da se na  $k$ -toj tački uvede matrica pomoću koje bi se definisali intenziteti svih pravaca  $j$  koji dolaze u  $k$ -tu tačku.

Činjenica je da pretpostavka o konstantnom vremenu nije realna, pa se moraju uvesti novi momenti u rešavanju takvih, reklo bi se, realnijih slučajeva. Tada bi promenljiva  $q_j^k$  imala stepenastu vrednost funkcije cilja (sl. 4a), koja se potom može aproksimirati radi jednostavnijeg prikazivanja zavisnosti vremena putovanja od protoka (sl. 4b).



Slika 4. Zavisnost vremena putovanja od protoka

Prema [1, 2, 3, 5, 6], ako se aproksimira vreme putovanja po svakom pravcu (prema slici 1), dobija se:

$$t_j = \alpha_j q_j + \beta_j \quad \text{za} \quad 0 \leq q_j \leq P_j \quad (8)$$

gde  $\beta_j$  označava vreme prolaza pri nultom protoku koje je jednako dužini pravca  $j$ , podeljenog sa brzinom kretanja vozila u slobodnim (neometanim) uslovima a  $\alpha_j = \beta_j/P_j$ . Sada se funkcija cilja rešava primenom metode kvadratnog programiranja, pa se tako dobija minimum funkcije cilja  $F$ , što je optimum kretanja toka na određenoj mreži puteva ili gradskih ulica.

### 3. PRIKUPLJANJE I OBRADA INFORMACIJA O STANJU SAOBRAĆAJA

Da bi saobraćaj bio uredan, bezbedan i ekonomičan, neophodno je njime upravljati. Naša zemlja je postigla takav stepen razvijenosti da se moraju preduzimati konkretne akcije radi boljeg funkcionisanja saobraćaja na putevima. U protivnom, doživljavamo redove, zagušenja, čekanja, a po broju saobraćajnih nezgoda i velikim troškovima u saobraćaju bićemo i dalje na vrhu evropske lestvice.

Funkcija upravljanja saobraćajem je iscepkana i razdeljena izmedju raznih organa i organizacija. Nužno je povezati ih u jedan zajednički organ. Osnovu takvog organa činila bi regija, a ove bi pak bile povezane u jedinstveni republički centar za upravljanje saobraćajem. U vezi s tim se u ovom radu izlaže ideja o mogućnosti funkcionisanja jednog takvog centra, te o prikupljanju, obradi i korišćenju informacija o saobraćaju koje bi stizale u njega.

Ako pretpostavimo da takav centar postoji (mogao bi se formirati fuzionisanjem kompetentnih organa iz oblasti saobraćaja) na nivou

regije, velikog grada ili republike, onda u njega pristižu tri tipa informacija o stanju saobraćaja.

U prvom redu to su informacije o stanju putne mreže na dotičnom području  $P = p_i$ , ( $i=1, \dots, n$ ), koje pojedini delovi ili odsecci imaju u datom trenutku. Ti su podaci potrebni za utvrđivanje kapaciteta deonica i mreže  $C_j(q_j)$  i za ocenu funkcionalnih elemenata mreže. Zatim su to informacije o stanju saobraćaja na putnoj mreži, što ćemo izraziti preko protoka  $q = \{q_j\}$ , ( $i=1, \dots, n$ ). Takva stanja biraju sami učesnici, odnosno korisnici, nezavisno od stanja ukupnog saobraćaja, pa ona imaju potpuno stohastički karakter ponašanja.

Sve te informacije centar za upravljanje saobraćajem treba da prati i analizira, kako bi mogao birati one akcije i odluke kojima se obezbeđuje ekonomičnije, bezbednije i urednije funkcionisanje saobraćaja. Pri tome se pojavljuju i stanovita ograničenja koja ćemo izraziti zajedničkim simbolom  $Y = \{y_i\}$ , ( $i=1, \dots, n$ ), što predstavlja treću grupu informacija. Ta ograničenja se moraju uzimati u obzir, jer predstavljaju skup ograničenja propusne moći, protoka, vremena putovanja i dr.

Raspolažući informacijama o stanju putne mreže, saobraćaja na njoj, ograničenjima i ciljevima funkcionisanja saobraćaja na dotičnoj regiji, možemo upravljanje saobraćajem predstaviti u obliku sledećeg algoritma:

$$U = \varphi(I_{p/q}, Z) \quad (9)$$

pri čemu je:

$U$  - upravljanje kao rezultat delovanja algoritma ( $\varphi$ )

$\varphi$  - operator koji transformiše informacije o okruženju, saobraćaju, propusnoj moći, protoku i cilju upravljanja

$I_{p/q}$  - informacije o propusnoj moći, mreži i intenzitetu saobraćaja

$Z$  - cilj upravljanja (uredan, bezbedan i ekonomičan saobraćaj)

Osnovna karakteristika toga sistema (putne mreže, saobraćaja i centra za upravljanje) jeste činjenica da se informacije o stanju saobraćaja i putnoj mreži mogu dobiti samo na nivou elemenata putne mreže  $p_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), stvarnog protoka  $q_j$  ( $j=1, \dots, n$ ), stvarnog vremena putovanja  $t_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) i ograničenja  $y_i$  ( $i=1, \dots, n$ ).

Na bazi dobijenih informacija centar za upravljanje saobraćajem vrši njihovu preradu i ocenjuje karakter delovanja.

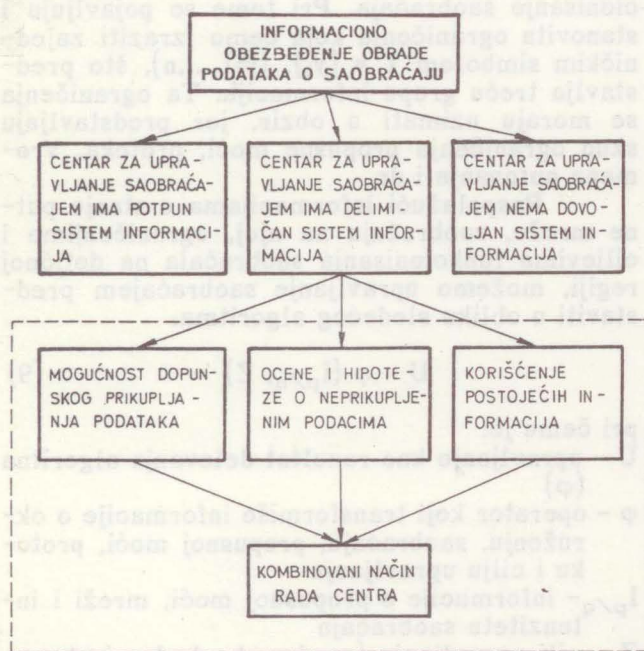
Proces prikupljanja, prerade i transfera informacija može da protiče u automatizovanom i neautomatizovanom režimu obrade. U našim velikim gradovima i regijama za sada još uvek ne funkcionišu takvi centri, odnosno funkcionišu u nekoliko velikih gradova (Beograd, Zagreb, Novi Sad, Ljubljana i dr.), ali sa delimično izvršenom automatizacijom.

Ako bi centar za upravljanje saobraćajem imao i kompetencije u vezi sa planiranjem saobraćaja - što se može dobiti u sklopu mnogobrojnih vanrednih situacija i prilika u saobra-



ćaju - onda se mora kompleksnije prići pouzdanosti prikupljanja i obradi podataka. Pri tome treba obezbediti veću brzinu prikupljanja, prebrade informacija o saobraćaju i visoku tačnost radi prognoziranja budućih stanja u saobraćaju. To naravno zahteva izvesna materijalna i finansijska ulaganja i izradu programa za obezbedjenje neprekidnog funkcionisanja.

Ako centar za upravljanje saobraćajem posmatramo kao jedno telo u sistemu upravljanja saobraćajem na datoj teritoriji, onda sam centar može da funkcioniše uspešno u dvema prilikama - kada je moguće obezbediti potpunu informiranost i različite varijante delimične informiranosti. Centar dakako ne može funkcionisati ako ne raspolaže potrebnim sistemom informacija (sl. 5). Objasnimo svrhu i smisao sheme na slici 5.



Slika 5. Prikaz mogućnosti rada centra za upravljanje saobraćajem u uslovima nepotpune informiranosti o saobraćajnoj situaciji

Ako centar za upravljanje saobraćajem ima potpun sistem informacija, onda u njega pristižu informacije u automatizovanom režimu rada. Tada nije potrebna etapa prikupljanja podataka pa su organi centra u mogućnosti da brže donose odluke o režimima funkcionisanja saobraćaja. Ali, kada centar ne raspolaže potpunim sistemom informacija (automatizovanim), moguće je imati različite varijante prikupljanja i obrade informacija:

- da se organizuje postupak prikupljanja i prenosa u centar nedostajućih informacija o stanju putne mreže i saobraćaja na njoj;
- da se organizuje postupak formiranja predloga i planova zasnovanih samo na podacima koje centar za upravljanje saobraćajem poseduje (iz nekih razloga nije moguće organizovati dopunsko prikupljanje); i
- da se kombinuju različite metode delovanja

na prikupljanju informacija o saobraćajnoj situaciji.

Navedenim opisom mehanizma prikupljanja i obrade informacija o stanju saobraćaja na putnoj mreži ukazuje se na mnogobrojne probleme koji se pojavljuju pri funkcionisanju saobraćaja. To zavisi od mnogih ograničenja koja ovde nisu posebno i sistematski iznesena. Jer, u svim tim uslovima, učesnici u saobraćaju ne mogu slobodno i nezavisno od uvedenog režima birati svoja stanja: putni pravac ili deonicu puta, vreme putovanja, brzinu kretanja i dr. Uvodjenje određenog režima u saobraćaju ustvari je specijalni zahtev da se obezbedi normalno, uredno i po prioritetu odvijanje saobraćaja, a da se otklone zastoji, nagomilavanja, čekanja i havarije do kojih u takvim situacijama može doći.

Iz toga sledi da funkcionisanje složenog sistema upravljanja saobraćajem na mreži puteva ili gradskih saobraćajnica zahteva da se izvrše određena istraživanja. Faze takvog istraživanja bile bi sledeće:

- formirati model koji će dati konkretan opis cilja, procesa i efekata upravljanja;
- opisati aktivnosti koje dovode do postizanja cilja - optimalna raspodela saobraćaja pri minimumu vremena putovanja;
- razraditi postupak prikupljanja, obrade i prenosa informacija za sve nivoe upravljanja;
- oceniti i uporediti efekte,
- razraditi algoritme i matematičke modele za njihov opis.

Prema tome, strategija upravljanja saobraćajem posmatra saobraćajni tok kao višedimenzionalni proces koji traži mnoštvo upravljačkih aktivnosti i delovanja, kako u vremenu tako i duž putne mreže. Ona se mora zasnivati na potpuno razradjenom postupku prikupljanja i obrade informacija o saobraćaju. Jer, samo se na osnovu takvog postupka može efikasno upravljati saobraćajem. Zato ćemo strategiju upravljanja saobraćajem shvatiti kao skup izabranih i koordiniranih akcija nadležnih operativnih organa, ali i stručno-planerskih. Njihove akcije moraju delovati združeno na saobraćajni tok s ciljem takve njegove raspodele da se pojedinačna kretanja vozila izvedu s minimumom vremena putovanja po svakoj grani mreže. Time se saobraćaj odvija brže, pouzdanije i ekonomičnije, a upravljanje je, dakako, efikasnije što je i krajnji cilj ove strategije.

## SUMMARY

### STRATEGY OF ROAD TRAFFIC CONTROL BASED UPON MAKING OPTIMAL THE DISTRIBUTION OF FLOWS

Traffic can in certain circumstances cause chaos in the system of traffic network manifested as gridlocks, saturation, bumper-to-bumper traffic, traffic accidents and similar. All this may have further repercussions on general and individual mobility, problems in provisioning of industries and population, addi-



tional costs, etc.

*In all situations we must have available the best-suited strategy of control and management to make the traffic reliable, speedy, economic and adequate to meet the needs. This paper deals with the model of distribution of traffic flows on the system of roads and streets by means of the method of linear programming and organisation of compilation and processing of traffic information towards an optimal decision-making in the process of traffic management and control.*

#### LITERATURA

- [1] L.J. KUZOVIĆ: Teorija saobraćajnog toka. Beograd, Saobraćajni fakultet, 1989.
- [2] A.P. STENBRINK: Optimizacija transportnih mreža. Moskva, Transport, 1981.
- [3] G. JOVANOVIĆ: Planiranje saobraćaja korišćenjem računarske tehnike. Zagreb, VVTŠ, 1985.
- [4] P. VASILEV, I. PRIMSTEJN: Upravljanje saobraćajem na automobilskim putevima. Moskva, Transport, 1979.
- [5] J. PADJEN, A. PULJIĆ, S. SKOK: Optimiziranje magistralne cestovne mreže u SR Hrvatskoj. Zagreb, 1986.
- [6] D. TODOROVIĆ: Transportne mreže. Beograd. Saobraćajni fakultet, 1984.
- [7] L. CVETANOVIĆ: Značaj poznavanja karakteristika saobraćajnog toka s aspekta upravljanja putnim saobraćajem. Vojnotehnički glasnik, 1989, 3, SSNO, Beograd.