

Primjena teorije prometnoga toka u brojenju prometa na cestama

Planko Rožić

Ključne riječi

cesta,
prometni tok,
brojenje prometa,
obrada podataka,
prometni sustav,
gospodarenje
prometnim sustavom

Key words

road,
traffic flow,
traffic count, data
processing,
traffic system,
traffic system
management

Mots clés

écoulement de trafic,
comptage de trafic,
traitement des données,
système de trafic,
gestion du système
de trafic

Ключевые слова

дорога,
поток движения,
подсчёт движения,
обработка данных,
транспортная система,
управление
транспортной системой

Schlüsselworte

Strasse,
Verkehrstrom,
Verkehrszählung,
Datenbearbeitung,
Verkehrssystem,
Waltung des
Verkehrssystems

P. Rožić

Pregledni rad

Primjena teorije prometnoga toka u brojenju prometa na cestama

U radu se analizira sustav brojenja prometa na hrvatskoj cestovnoj mreži s motrišta teorije prometnoga toka. Obrađeni su načini brojenja prometa i obrade podataka. Dokazano je da brojenje prometa automatskim brojilima samo djelomično zadovoljava suvremene potrebe gospodarenja cestovnim prometnim sustavom. Analizom tehničkih značajki brojila zaključeno je da postoji osnova za bitno poboljšanje sustava i prevođenje sustava brojenja u dinamičku analizu prometnih tokova u mreži.

P. Rožić

Subject review

Use of traffic flow theory in road traffic counting

The traffic count system operated in the Croatian road network is analyzed from the aspect of the theory of traffic flow. The methods used in traffic count and in traffic data processing are analyzed. It is shown that the traffic count restricted to automatic counters only is hardly capable of meeting the needs of a modern road traffic management. The analysis of technical properties of traffic counters shows that the present system can significantly be improved and converted into the dynamic analysis of traffic flow in the network.

P. Rožić

Ouvrage de syntèse

Emploi de la théorie d'écoulement de trafic dans le comptage du trafic routier

Le système de comptage de trafic utilisé sur le réseau routier croate est analysé sous l'aspect de la théorie d'écoulement de trafic. Les méthodes utilisées dans le comptage de trafic et dans le traitement des données de trafic sont analysées. Il est précisé que le comptage de trafic basé uniquement sur les compteurs automatiques ne correspond pas aux besoins d'une gestion moderne de circulation routière. L'analyse des caractéristiques techniques des compteurs de trafic montre que le système courant peut être amélioré de manière considérable et que le système de comptage peut être transformé en une analyse dynamique d'écoulement de trafic à travers le réseau national.

П. Рожич

Обзорная работа

Применение теории потока движения при подсчёте движения на дорогах

В статье анализируется система подсчёта потока движения на хорватской дорожной сети с точки зрения теории потока движения. Обработаны способы подсчёта, движения и обработки данных. Доказано, что подсчёт движения автоматическими счётчиками только частично удовлетворяет современным требованиям управления дорожной системой транспорта. При анализе технических свойств счётчиков заключено, что существует основа для существенного улучшения системы и перевода системы подсчёта в динамический анализ теорий потока движения в динамический анализ теорий потоков движения в сети.

P. Rožić

Übersichtsarbeit

Anwendung der Theorie des Verkehrsstroms bei der Strassenverkehrszählung

Im Artikel analysiert man das System der Verkehrszählung am kroatischen Strassennetz vom Blickpunkt der Theorie des Verkehrsstroms. Dargestellt sind die Arten der Verkehrszählung und der Datenbearbeitung. Es wird bewiesen dass die Verkehrszählung mit automatischen Zählern die zeitgemässen Erfordernisse der Waltung des Strassenverkehrssystems nur zum Teil befriedigt. Durch die Analyse der technischen Eigenschaften der Zähler schliesste man dass die Grundlage besteht für eine wesentliche Besserung des Systems und eine Transformation des Zählungssystems in eine dynamische Analyse der Verkehrsströme im Netz.

Autor: Prof. dr. sc. **Planko Rožić**, dipl. ing. prom., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

1 Uvod

Brojenje prometa čini sustavno prikupljanje podataka o prometnom opterećenju i strukturi prometnoga toka (sastavu prometnog toka prema vrstama vozila) te o kolebanjima prometa u prostoru i vremenu na cestovnoj mreži. Temeljne informacije o prometu na cestama rezultat su analiza brojenjem prikupljenih i potom obrađenih podataka. Te su spoznaje nužna pretpostavka za izradu i provođenje djelotvorne prometne politike. Bez točno utvrđenih podataka o prometnim tokovima u cestovnoj mreži nemoguće je zamisliti gospodarski i tehnički racionalno gospodarenje cestovnim prometnim sustavom.

U protekla tri desetljeća stvoren je bogati fond podataka o prometnom opterećenju cestovne mreže Republike Hrvatske, posebno s automatskih brojila, što omogućuje raznovrsna istraživanja u području same metodologije i izrade prognostičkih modela, trendova prometa i tome slično. Od početka sustavnoga brojenja prometa u našoj zemlji neprekidno se radi na njegovu razvoju, što je pratio i razvoj sustava predočivanja rezultata obrađenih i analiziranih podataka. Razvoj cestovnoga i ukupnoga prometnog sustava zahtijeva kvalitetne informacije o prometu, što nameće potrebu neprekidnog proširivanja i obogaćivanja sustava brojenja prometa. Teorija prometnoga toka razvijena je na prvim promatranjima toka cestovnoga prometa u Sjedinjenim Američkim Državama u ranim tridesetim godinama prošloga stoljeća i utvrđivanju zakonitosti u prometnome toku. Svrha ovoga rada jest analiza sustava brojenja prometa na cestovnoj mreži Republike Hrvatske upravo s motrišta teorije prometnog toka.

2 Značajke različitih načina brojenja prometa

2.1 Razvoj brojenja prometa

Sustavno i trajno prikupljanje podataka o cestovnom prometu u Republici Hrvatskoj započelo je 1971. ručnim načinom na ukupno 201 lokaciji [1, 2, 3, 4]. Do godine 1973. podaci brojenja prometa obrađivali su se ručno, a nakon toga s pomoću elektroničkoga računala.

Značajnije širenje sustava brojenja provedeno je 1978. uvođenjem novoga načina brojenja prometa stacionarnim automatskim brojilima prometa - automatsko brojenje prometa na 53 lokacije. Broj lokacija povećavao se nekoliko puta s nabavkom brojila novijih generacija.

Nakon puštanja u promet prve autoceste u Republici Hrvatskoj na dionici Zagreb - Karlovac, uvedeno je 1973. tzv. naplatno brojenje prometa, koje se proširivalo skladno razvoju mreže autocesta, kao i na ostalim cestovnim građevinama s naplatom prolaska: Krčki most i tunel Učka.

Od godine 1980. prikupljaju se i publiciraju podaci o prijevozu cestovnih vozila trajektima. Odgovarajuće podatke o prevezenim vozilima vode organizacije koje obavljaju trajektni prijevoz. One registriraju broj i strukturu prevezenih vozila po trajektnim linijama.

Bitni napredak u opsegu, organizaciji prikupljanja i obradi podataka postignut je 1980. kad je oblikovan i primijenjen sustav integralnoga brojenja prometa, u kojem su povezani različiti načini prikupljanja podataka, a rezultati obrade integrirani su u jedinstvenoj publikaciji. Brojenje se prometa provodi u suglasju s Preporukama Odbora za unutarnji promet Europske ekonomske komisije OUN-a (UN/ECE).

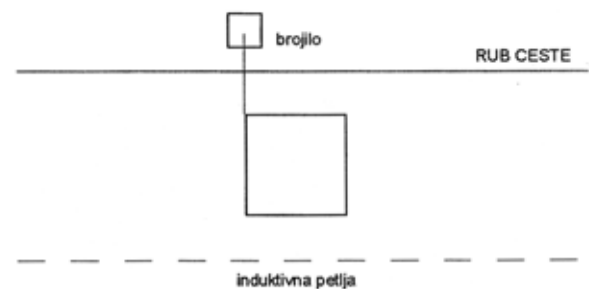
Prijenosna automatska brojila uvedena su u sustav 1997. i tada počinje povremeno automatsko brojenje prometa, čime se prestalo s ručnim brojenjem, osim na lokacijama brojenja automatskim brojilima starije generacije.

2.2 Automatsko brojenje prometa stacionarnim brojilima

Kontinuirano prikupljanje podataka o prometu na cestama, tj. neprekidno brojenje prometa kroz cijelu godinu obavlja se stacionarnim automatskim brojilima. Mjesto prikupljanja podataka jest lokacija brojenja. U uporabi je nekoliko generacija i vrsta brojila. Zajednička im je značajka da količine prometa bilježe kumulativno u zadanim intervalima i po voznim trakovima, što pri dvotračnim cestama istodobno znači promet po smjerovima. U primjeni su tri tipa brojila: SBH/DL 2000, Peek Traffic ADR-2000 i Mikrobit QLD-6CX. U nastavku su opisane glavne značajke pojedinih tipova brojila, ključne za analizu sa stajališta teorije prometnih tokova.

Automatska brojila prometa Signalbau-Huber, tip SBH/DL 2000

Prva stacionarna automatska brojila prometa na našim su cestama tipa SBL/DL 2000 tvrtke Signalbau-Huber GmbH iz Njemačke. Instalirana su sredinom sedamdesetih godina prošlog stoljeća i u radu je sada 51 brojilo [5]. Vozila se detektiraju preko jedne induktivne petlje dimenzija 2×2 m ugrađene u kolničku konstrukciju voznoga traka, kako je to prikazano na slici 1.

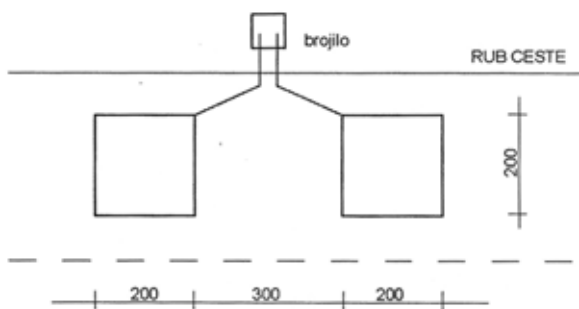


Slika 1. Položaj induktivne petlje u voznome traku

Izvorno su brojila prolazak manjeg vozila registrirala kao prolazak jedne ekvivalentne jedinice vozila (uvjetnog vozila). Prolazak kamiona s prikolicom, tegljača i sličnog vozila brojila su registrirala kao prolazak dviju ili triju ekvivalentnih jedinica vozila. Tijekom 1997. novim je tehničkim rješenjima na elektroničkom sklopu brojila omogućeno da brojila registriraju prolazak jednog vozila kao jedne jedinice. S obzirom da ova brojila ne razlikuju vozila po vrstama, već bilježe ekvivalentne jedinice vozila, pojavio se problem transformiranja tih jedinica u broj stvarnih vozila. Do 1984. na lokacijama automatskog brojenja prometa nije utvrđivana struktura prometnoga toka, već su za transformiranje ekvivalentnih jedinica vozila u stvarna vozila upotrijebljeni podaci s najbližih ili sličnih lokacija ručnoga brojenja prometa, a u praksi se kasnije za navedenu transformaciju primjenjivala posebna jednadžba koja je kao svoje elemente uzimala postotke strukture prometnoga toka. Struktura prometnog toka sada se utvrđuje ručnim brojenjem u odabranome vremenskom uzorku. Vozila se tako razvrstavaju u devet skupina: motocikli, osobna vozila, teretna vozila ukupne mase do 3,5 t, autobusi, teretna vozila ukupne mase 3,5 do 7 t, teretna vozila ukupne mase veće od 7 t, teretna vozila s prikolicom, tegljači te traktori i radna vozila. Rezultat brojenja prometa je broj vozila po voznim trakovima dvotračne ceste, koji se bilježi u satnim intervalima.

Automatska brojila prometa Peek Traffic, tip ADR-2000

Automatska brojila tvrtke Peek Traffic, proizvedena u Velikoj Britaniji, prva su brojila novije generacije instalirana na našim cestama 1998., a sada postoji 15 brojila [5]. Sustav detekcije čine dvije induktivne petlje ugrađene u svaki vozni trak, kako je to prikazano na slici 2.



Slika 2. Sustav detekcije s dvije induktivne petlje u jednome voznom traku

Takva detektorska konfiguracija omogućuje mjerenje brzine vozila i njegove duljine i tako omogućuje brojilu da razlučuje vozila prema određenim razredima njihovih duljina i da ih svrstava u odgovarajuće skupine, pri čemu ne raspoznaje tipove vozila. Obrada podataka daje klasi-

fikaciju vozila u pet skupina prema njihovim duljinama: vozila duljine do 5,5 m, od 5,5 do 9,1 m, od 9,1 do 12,2 m, od 12,2 do 16,5 m i više od 16,5 m. Vrsta, konfiguracija i format podataka koji se prikupljaju jest izbor korisnika iz *menija* ili se može programirati.

Na tri se lokacije brojenja provodi testiranje rada sustava vaganja vozila u pokretu - VUP (WIM sustav - *Weight-in-Motion*). Sustav detekcije u svakome voznom traku sličan je onome na slici 2., samo je razmak induktivnih petlji 4 m, a između njih je poprečno na vozni trak ugrađen jedan piezosenzor koji detektira osovinsko opterećenje vozila.

Pokazalo se da je potrebna kalibracija senzora osovina - piezosenzora, jer njegov rad ovisi o različitim temperaturnim uvjetima. Općenito to se rješenje nije pokazalo uspješnim, a otvoreno je i pitanje baždarenja i atestiranja detektora osovina, tj. osovinskog opterećenja.

Automatska brojila prometa Mikrobot, tip QLD-6CX

Kao probni projekt, tri stacionarna automatska brojila Mikrobot, tip ADR-2000 uvezena iz Slovenije instalirana su na autocestama u prvome dijelu 1999. Od 2001. nastavljena je instalacija tih brojila namijenjenih neprekidnome automatskom brojenju, tako da je sada u sustav brojenja uključeno 81 brojilo na mreži državnih cesta [5]. Osim ostalih odlika, ova brojila mogu izbrojena vozila razvrstavati na određene vrste i podvrste te omogućiti daljinsku bežičnu povezanost. Podaci se prikupljaju prijenosnim računalima na kojima su instalirani servisni programi.

I ta brojila primjenjuju poznatu i dokazanu tehnologiju detekcije vozila s pomoću induktivnih petlji ugrađenih u kolničku konstrukciju. Dispozicija induktivnih petlji u jednome voznom traku slična je onoj na slici 1., samo su petlje nešto manje i njihov je međusobni razmak manji. Uređaj omogućuje 7 promjenjivih razreda brzina. Podaci se mogu spremati u izabranim intervalima od 5, 10, 15, 30 ili 60 minuta ili posebno za svako pojedino vozilo. Ako se podaci spremaju u intervalima, za oba se vozna traka posebno spremaju: broj vozila po razredu, prosječna brzina po razredu, broj vozila po području brzine, najveća, najmanja i prosječna putna brzina po voznom traku. Ako se podaci prikupljaju posebno za svako pojedino vozilo, spremaju se ovi podaci: datum i vrijeme, vozni trak, kategorija vozila i brzina vozila. Brojila imaju mogućnost razvrstavanja vozila u devet skupina: motocikli, osobna vozila, osobna vozila s prikolicom, kombi vozila s prikolicom ili bez nje, manja teretna vozila, srednja teretna vozila, teška teretna vozila, teretna vozila i tegljači s prikolicom i poluprikolicom, autobusi, sva neprepoznata, to jest nerazvrstana vozila.

2.3 Povremeno brojenje prijenosnim automatskim brojilima

Povremeno se brojenje primjenjuje ako se žele dobiti informacije o prometu na cestovnim dionicama koje nisu obuhvaćene neprekidnim automatskim brojenjem i rabi se u mnogobrojnim državama. Provodi se u trajanju od nekoliko dana, pri čemu je ključno utvrđivanje rasporeda brojenja tijekom godine. To je moguće jedino simulacijama na relativno velikom uzorku sastavljenom od datoteka neprekidnoga automatskog brojenja iz raspoloživog razdoblja, obično u nizu od 3 ili više godina.

Automatska brojila Nu-Metrics, tip NC - 90A

Godine 1997. dogodila se značajna novina u sustavu brojenja prometa na našim cestama, uključivanjem prijenosnih automatskih brojila prometa američke tvrtke Nu-Metrics, model NC-90A, namijenjenih povremenom brojenju. Takvo je brojenje bilo sasvim novo i s obzirom na raspored brojenja unutar kalendarske godine i s obzirom na način izvedbe.

Samo brojilo je dimenzija 30 x 14 x 1,5 cm i pričvršćuje se na površinu kolnika unutar voznoga traka. Vozilo se detektira na principu promjene magnetskog polja. Vozila se razvrstavaju u pet skupina s obzirom na duljinu vozila: vozila duljine do 5,5 m, vozila duljine od 5,5 do 9,1 m, od 9,1 do 12,2 m, od 12,2 do 16,5 m i više od 16,5 m. Brojila razvrstavaju vozila prema njihovim duljinama i nije moguće točno utvrditi kojem tipu pripadaju prebrojena vozila. Tijekom godine 2004. u radu je bilo 100 brojila [5].

2.4 Brojenje prometa na cestovnim građevinama s naplatom prolaska

Infrastrukturne cestovne građevine s naplatom prolaska su posebni objekti na kojima se pravo prolaska posebno naplaćuje. U Republici Hrvatskoj to su mreža autocesta, tunel Učka i Krčki most. One se odlikuju i posebnošću registriranja prolaza vozila, koje se prati prvenstveno radi financijskih potreba. Ta se posebnost očituje time što se prolazak vozila bilježi na odgovarajućoj informacijskoj kartici s podacima o vremenu korištenja građevinom, vrsti vozila prema naplatnoj kategoriji te o lokacijama ulaska i izlaska na naplatnoj građevini. Za razliku od ostalih načina brojenja lako je utvrditi ne samo količinu prometa na pojedinoj lokaciji, nego i po odsječcima, a vrlo se lako bilježi i sastav prometnoga toka. Vozila se raščlanjuju u pet skupina:

- vozila s dvije osovine osim kombi vozila, visine do 1,30 m, mjereno pri prvoj osovini;
- vozila s tri ili više osovine uključujući i kombi vozila, visine do 1,30 m, mjereno pri prvoj osovini;

- vozila s dvije ili tri osovine uključujući i kombi vozila s prikolicom, visine veće od 1,30 m, mjereno pri prvoj osovini;
- vozila s četiri ili više osovine, visine veće od 1,30 m, mjereno pri prvoj osovini;
- vozila koja su oslobođena plaćanja ili se njihov prolazak posebno naplaćuje.

Obradom podataka kombinacija ulaska i izlaska s građevine dobiva se prometno opterećenje po pojedinim dionicama mreže autocesta, odnosno u tunelu i na mostu, bez dodatnih informacija o prometnome toku.

2.5 Brojenje vozila prevezenih trajektima

Trajektni se promet ostvaruje na domaćim i međunarodnim trajektnim linijama. Brojenje prevezenih vozila na tim je linijama posebna vrsta naplatnoga brojenja. Kod nas se prate i obrađuju samo podaci o prijevozu vozila na domaćim trajektnim linijama, što obavljaju poduzeća koja i prevoze vozila.

Podaci o prevezenim vozilima vode se po linijama za određeno razdoblje prema pojedinim vrstama vozila. Prikaz podataka sukladan je načinu njihova prikupljanja u brodarskim tvrtkama koje održavaju trajektno linije. Prema tome vozila se razvrstavaju u četiri skupine: osobna vozila, autobusi, kamioni s prikolicom ili bez nje i tegljači te ostala vozila. Podaci se obrađuju i prikazuju po mjesecima u godini i prema tome se izračunava PGDP i PLDP, ukupno za sva vozila zajedno i prema svakoj vrsti vozila posebno.

2.6 Zaključak analize sustava brojenja

Iz analize prometnih značajki različitih načina brojenja može se zaključiti:

1. stacionarna brojila prometa Signalbau-Huber daju samo broj vozila po smjerovima kretanja na dvotračnim cestama, s ručno utvrđenom strukturom prometnoga toka na osnovi vremenskog uzorka koji je potrebno dodatno verificirati;
2. stacionarna brojila prometa Peek Traffic i Mikrobit mjere brzine vozila i duljine vozila što je osnovica za strukturiranje prometnoga toka u pet odnosno devet skupina;
3. prijenosna brojila Nu-Metrics u povremenom brojenju na temelju uzorka omogućuju dobivanje procjene prometnog opterećenja, pri čemu se vozila razvrstavaju u pet skupina;
4. zajedničko je obilježje automatskog brojenja prometa da su brojila prvenstveno programirana na brojenje vozila, tj. utvrđivanje apsolutnog broja vozila u lokaciji brojenja, bez obzira na prošireno ili suženo

razvrstavanje vozila u pojedine skupine, pri čemu se svi podaci koji definiraju stanje prometnoga toka ili ne mogu dobiti ili se u obradi ne uzimaju u obzir (brzina vozila, tj. brzina toka) i na prometno-tehnički ispravan način vrednuju;

- brojenje prometa na građevinama s naplatom prolaska i nije brojenje u klasičnom smislu, već se iz podataka financijske naravi na temelju kombinacija ulaska vozila na građevinu i izlaska s nje dobivaju strukturirana prometna opterećenja po dionicama, jednako kao i brojenje na trajektnim linijama gdje su podaci o prometnom opterećenju iskazani po pojedinim linijama. Naplatno brojenje svojim načinom provođenja i ne može pružiti više informacija od statičkoga prometnog opterećenja jer se i obavlja u uvjetima prekinutoga prometnog toka.

3 Primjena teorije prometnoga toka

Rezultati brojenja prometa imaju višestruku namjenu, a jedna je od važnijih stvaranje osnovice za određivanje propusne moći ceste i razina uslužnosti. U tom kontekstu sam broj vozila nije dostatan za opisivanje stvarnoga stanja prometnoga toka, već je potrebno odrediti odnose između fundamentalnih varijabli prometnoga toka i njima pripadajućim i međusobno povezanim parametrima prometnoga toka [6, 7]:

- količina prometa Q ili protok q i njegova recipročna vrijednost, vremenski interval između vozila h_t ,
- srednja prostorna brzina prometnoga toka V_s i njoj recipročno vrijeme putovanja t_p ;
- gustoća prometnoga toka k i njoj recipročni prostorni razmak između vozila h_d .

Međusobna zavisnost varijabli određena je *fundamentalnom jednačjom prometnoga toka*:

$$q = k \cdot V_s \quad (1)$$

Sve tri varijable stohastički su nezavisne, tj. ako su dvije poznate treća je automatski određena relacijom navedenom u jednačbi (1). Međutim, gustoća prometnoga toka često se tretira kao zavisna varijabla, jer je protok i brzinu toka lakše izmjeriti i zato one služe kao nezavisne varijable.

Međusobni odnosi varijabli mogu se prikazati u prostornom koordinatnom sustavu, od čega je u praksi posebno interesantna projekcija odnosa protoka i gustoće, prikazana na slici 3. [6, 7]:

Oznake na slici 3. znače:

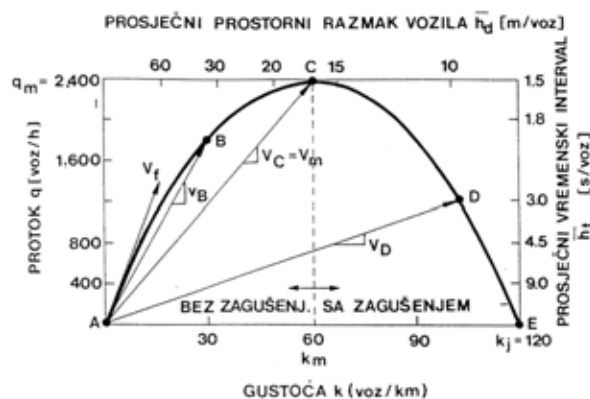
q_m - najveći protok - propusna moć ceste

V_f - slobodna brzina - brzina pri uvjetima slobodnoga toka

V_m - kritična brzina - brzina pri kojoj je protok najveći ($q = q_m$)

k_j - gustoća zagušenja - gustoća pri kojoj su sva vozila stala ($V = 0$)

k_m - kritična gustoća - gustoća pri kojoj je protok najveći ($q = q_m$).



Slika 3. Odnos između protoka i gustoće

Gраниčne točke dijagrama dobivene su iz pretpostavljenih uvjeta. Ako se pretpostavi da je prosječna duljina vozila $\bar{L}_v = 6,1$ m/voz., a da je prosječan međusobni razmak između vozila uzduž jednoga voznog traka u uvjetima gustoće zagušenja toka (kad je $k = k_j$) 2,23 m/voz., slijedi da je srednji prostorni razmak između vozila $\bar{h}_d = 8,33$ m/voz. Gustoća prometnoga toka i srednji prostorni razmak između vozila obrnuto su proporcionalne veličine i njihov je odnos određen jednačjom (2):

$$k = \frac{1000}{\bar{h}_d}, \quad (2)$$

što za gustoću prometnoga toka u uvjetima zagušenja, pri najmanjem srednjem prostornom razmaku između vozila, postaje:

$$k_j = \frac{1000}{\bar{h}_d}, \quad (3)$$

a za pretpostavljene uvjete jest:

$$k_j = \frac{1000}{8,33} = 120 \text{ voz./km.}$$

Protok i srednji vremenski interval između vozila također su obrnuto proporcionalne veličine i njihov je odnos određen jednačjom (4):

$$q = \frac{3600}{h_t}, \quad (4)$$

što za najveći protok, pri najmanjem srednjem vremenskom intervalu između vozila, postaje:

$$q_m = \frac{3600}{h_t} \quad (5)$$

Ako se pretpostavi da je najmanji srednji vremenski interval između vozila u uvjetima najvećeg protoka ili propusne moći $\bar{h}_t = 1,5$ s/voz., najveći je protok ili propusna moć ceste:

$$q_m = \frac{3600}{1,5} = 2400 \text{ voz./h,}$$

koja je prikazana točkom C na slici 3. Tako su određene vertikalne i horizontalne granice dijagrama. Kritična gustoća k_m u točki C može se s obzirom na simetričnost parabole pročitati izravno iz dijagrama i ona iznosi $k_m = 60$ voz./km.

Srednja prostorna brzina prometnoga toka V_s predočena je nagibom radijvektora položenog od ishodišta do točke na paraboli, tj. tangensom kuta koji vektor zatvara s apscisom. Vektor koji je tangenta na krivulju u ishodištu predočuje slobodnu brzinu ili brzinu slobodnog toka V_f . Da bi se odredila brzina V_m pri propusnoj moći jednostavno se nađe nagib vektora iz točke A u točku C. Tako je $V_m = V_c = 2400/60 = 40$ km/h. Vrijednosti drugih točaka na krivulji mogu se naći na sličan način.

Točka B tipična je točka koja predstavlja područje s uvjetima toka prometa bez zagušenja, koji su prikazani lijevom polovinom parabole i definirani kao:

$$q \leq q_m; \quad k \leq k_m; \quad V \geq V_m.$$

Točka D tipična je točka iz područja toka prometa sa zagušenjem, koje je prikazano desnom polovinom parabole i definirano kao:

$$q < q_m; \quad k > k_m; \quad V < V_m.$$

Zbog činjenice da se na dijagramu protok – gustoća mogu objasniti veličine fundamentalnih varijabli prometnoga toka i njihovi međusobni odnosi, te odnosi pojedinih varijabli s parametrima prometnoga toka, Haight je taj dijagram nazvao *osnovnim dijagramom prometnoga toka* [8].

Jedan od graničnih uvjeta područja prometnoga toka temelji se na pretpostavci da je srednja prostorna brzina toka V neprekidna opadajuća funkcija gustoće raspona od nule ($k = 0$) do gustoće zagušenja ($k = k_j$).

Pri gustoći zagušenja k_j nema kretanja vozila – tok je stacionaran, tj. $V(k = k_j) = 0$ i zato je protok jednak nuli, tj. $q(k = k_j) = 0$, što je prikazano točkom E na dijagramu. To je *prvi granični uvjet*.

Ako na cesti nema vozila, gustoća toka jednaka je nuli, tj. ($k = 0$), pa je i $q(k = 0) = 0$, što je prikazano točkom A na dijagramu. Da bi postojala slobodna brzina V_f , na

cesti mora postojati barem jedno vozilo ($k \sim 0$) pa se dobiva $V(k \sim 0) = V_f$. To je *drugi granični uvjet*.

Između tih dvaju ekstrema jest nepoznata funkcija $q = q(k)$, a njezin je kvalitativni oblik prikazan na slici 3. (odnos protok-gustoća). Kako su protok, brzina i gustoća međusobno povezane i uvijek pozitivne veličine, funkcija protoka i gustoće mora biti neprekidna u intervalu u kojem je definirana ($k = 0, k = k_j$) i mora imati jedan maksimum – q_m . Taj je maksimum propusna moć ceste i tad je brzina toka $V = V_m$ i gustoća toka $k = k_m$. To je *treći granični uvjet*.

U uvjetima maloga prometnog opterećenja brzina vozila ograničena je fizičkim elementima ceste i pri takvim uvjetima brzina toka odgovara slobodnoj brzini V_f . S porastom broja vozila rastu protok i gustoća toka, a istodobno se smanjuje brzina toka. Taj se trend ne mijenja sve dok se ne postigne najveći protok ili propusna moć ceste ($q = q_m$) i pri tim uvjetima tok postiže svoju kritičnu brzinu ($V = V_m$) i kritičnu gustoću ($k = k_m$). Daljnjim porastom prometne potražnje, koju cesta ne može prihvatiti u promatranom presjeku jer je već dosegnuta propusna moć, gustoća i dalje raste što izaziva smanjenje brzine vozila i time automatski smanjenje srednje prostorne brzine toka i odgovarajuće smanjenje protoka. Taj se trend nastavlja sve dok se sva vozila ne zaustave i tok ne postane stacionaran. U tim je uvjetima gustoća dosegnula maksimalnu vrijednost ($k = k_j$), brzina toka jednaka je nuli jer nema kretanja vozila ($V = 0$), pa automatski nema ni protoka ($q = 0$). Ti se odnosi promjena mogu sumarno prikazati kao:

$$1. \quad k \rightarrow k_j \quad \begin{array}{l} q \rightarrow 0 \\ V \rightarrow 0 \end{array}$$

$$2. \quad k \rightarrow 0 \quad \begin{array}{l} q \rightarrow 0 \\ V \rightarrow V_f \end{array}$$

$$3. \quad k \rightarrow k_m \quad \begin{array}{l} q \rightarrow q_m \\ V \rightarrow V_m \end{array}$$

Prvi i treći granični uvjet posebno su zanimljivi u brojenju prometa automatskim brojilima. Temeljna je tehnička značajka svih opisanih brojila da se vozila moraju kretati da bi se mogla registrirati. Naime, princip rada brojila koja u detektorskom sustavu imaju induktivne petlje ugrađene u kolničku konstrukciju jest taj da vozila prelaskom preko petlje mijenjaju inicijalni induktivitet u petlji i ta se promjena razine induktiviteta bilježi kao prolazak vozila. Sličan je princip rada brojila koja funkcioniraju na principu promjene magnetskoga polja. Znači, ako nema kretanja vozila nema ni brojenja vozila, tj. registracije vozila. Pri prvome graničnom uvjetu, kao i pri trećemu, brzina toka jednaka je nuli. Međutim, pri prvom uvjetu na cesti nema ni jednog vozila, a pri trećem uvjetu cesta je potpuno zagušena kolonom vozila koja stoje. U oba

slučaja rezultat brojenja bit će da na cesti nema prometa, što nije točno.

Najčešće primjenjivani interval brojenja, tj. vrijeme kumulativnog zapisa broja vozila koja su prošla lokacijom brojenja jest jedan sat. Primjena te duljine intervala jedinstvena je na svim cestama obuhvaćenim brojenjem prometa u Republici Hrvatskoj, što nema uvijek prometno-tehničko opravdanje. Naime, stacionarni tok kao posljedica zagušenja prometa uglavnom je posljedica incidentnih situacija u prometu i vjerojatnost pojavljivanja tih uvjeta nije jednaka na svim dionicama i odsječcima cestovne mreže, kao i lokacijama na kojima se promet broji, a dokaz tome jest da smo sve češće svjedoci ponavljanja takvih uvjeta na istim dionicama (kritični tuneli, naplatne postaje). Prometno je opterećenje promjenljivo i u prostoru i u vremenu, što znači da se unutar intervala zapisa podataka o brojenju od jednog sata uvjeti prometa mijenjaju pa se može pojaviti situacija pri kojoj se kao rezultat brojenja dobije «mali» promet, iako je veći dio intervala prometni tok stajao. Primjenom kraćih intervala brojenja, petminutnih na primjer, dobila bi se puno točnija slika stvarnoga stanja u prometnome toku i dinamika tih promjena.

Analogno tome, teško je pretpostaviti čestu situaciju da na cesti u 60 minuta ne prođe ni jedno vozilo. Kraći intervali brojenja dat će i situaciju kad unutar takvog intervala i nije bilo vozila, iako je brojilo zabilježilo «mali» promet na satnoj razini.

Kao rezultat brojila daju satnu količinu prometa, a ne protok koji je jedna od fundamentalnih varijabli prometnoga toka. Pri mjerenju prometnoga toka u presjeku ceste protok se definira kao stupanj pri kojemu vozila prolaze kroz točku opažanja voznoga traka ili ceste, u određenome vremenu, a izražen je u vozilima na sat (voz./h), kao:

$$q = \frac{N}{T} (\text{voz./h}), \quad (6)$$

gdje je:

N - izbrojena vozila (voz)

T - vrijeme opažanja u satima (h).

Na primjer, ako je kroz presjek ceste u 15 minuta prošlo 50 vozila, protok q iznosi:

$$q = \frac{50}{\frac{1}{4}} = 200 \text{ voz./h.}$$

Protok je prosječna mjera i podložan je vremenu u kojem mjerenje počinje i završava. U praksi gdje je protok neujednačen, tj. podložan kolebanjima, potrebno je brojiti vozila kroz dovoljno dugačko razdoblje, tako da su

samo minorna kolebanja u protoku rezultat malih promjena u intervalu brojenja.

Količina prometa (prometno opterećenje) Q jest broj vozila zabilježenih u određenome vremenu T , kao:

$$Q = N(T) \quad (7)$$

Na navedenome primjeru, kroz presjek ceste u 15 minuta prošlo je 50 vozila. Količina prometa Q iznosi:

$$Q = 50 \text{ vozila u 15 minuti.}$$

Količina prometa temelji se na stvarnom brojenju i izražena je u vozilima u vremenu, pa se može govoriti na primjer o godišnjoj, dnevnoj i satnoj količini prometa. Za razliku od protoka, količina prometa ne može se temeljiti na izvedenom brojenju.

Pod prijašnjim pretpostavkama da se promet pojavi u samo 15 minuta unutar 60-minutnog intervala brojenja, na temelju definicija i primjera brojilo će kao rezultat dati količinu prometa $Q = 50$ vozila na sat, iako je stvarni $Q = 50$ vozila u 15 minuta, a protok $q = 200$ vozila na sat. Zbog toga u brojenju prometa treba postojeće intervale brojenja skratiti na 5-minutne ili 15-minutne i izračunavati protoke, uz pripadajuće mjerenje i izračunavanje i ostalih varijabli prometnoga toka, naročito na lokacijama koje su od posebnog prometnog interesa, jer je evidentno da protok puno bolje odražava fina kolebanja prometnoga opterećenja unutar prometnoga toka.

Osim toga uvođenje protoka kao dinamičke mjere prometnog opterećenja umjesto statičke količine prometa otvara još jednu ključnu situaciju u određivanju stvarnoga stanja prometnoga toka. Iz fundamentalnog dijagrama prometnoga toka na slici 3. vidi se da za svaku veličinu protoka postoje dva rješenja brzine prometnoga toka i gustoće toka. Ta se situacija dobije ako se iz bilo koje točke protoka na ordinati položi pravac paralelan s apscisom, osim u tjemenu parabole koji predočuje najveći protok ili propusnu moć ceste. Presjecištem pravca i parabole dobiju se dvije točke na paraboli koje definiraju dva uvjeta toka prometa: bez zagušenja i sa zagušenjem. Projekcije tih točaka na apscisu određuju dvije vrijednosti gustoće, a tangensi kutova koji radijvektori povučeni iz ishodišta na te točke zatvaraju s apscisom daju dvije prostorne brzine prometnoga toka. U području bez zagušenja promet će teći pri maloj gustoći toka i velikoj brzini toka, a u području sa zagušenjem pri velikoj gustoći toka i pripadajućoj maloj brzini toka.

Brzina vozila i srednja prostorna brzina prometnoga toka pod utjecajem su niza elemenata. Brzina vozila na cesti u ruralnom okruženju pri uvjetima neprekinuta toka najčešće je ograničena prometnom signalizacijom sukladno horizontalnim i vertikalnim elementima ceste ili zakonskim odredbama. Međutim, u praksi postoje

situacije gdje se na dugačkoj dionici ceste s velikim uzdužnim nagibom, a bez radikalnih uvjeta ograničenja, ne postižu visoke brzine, jer i «mali» promet s visokim udjelom teških teretnih vozila stvara kolone vozila i visoku gustoću prometnoga toka. Pri uvjetima dobrih elemenata ceste identičan ili sličan promet dat će visoke brzine i odgovarajuću malu gustoću toka.

Navedeno se može prikazati i na konkretnom primjeru na našim cestama. Iz obrade podataka brojenja prometa na cestama Republike Hrvatske za godinu 2003. izlučene su dvije lokacije automatskog brojenja koje imaju vrlo slične rezultate brojenja prometa, gledajući PGDP, PLDP i strukturu toka, kako je prikazano u tablici 1., ali koje sa stajališta elemenata ceste omogućuju dijametralno suprotne uvjete toka prometa: lokacija Klis na županijskoj cesti ŽC-6253 i lokacija Karanac na državnoj cesti DC-7 [9].

Tablica 1. Rezultati brojenja prometa na lokacijama Karanac i Klis

Lokacija brojenja	PGDP [voz./dan]	Laki promet [%]	Teški promet [%]
	PLDP [voz./dan]	Laki promet [%]	Teški promet [%]
Karanac	5216	93,7	6,3
	5662	94,9	5,1
Klis	5170	94,2	5,8
	5727	94,6	5,4

Iz tablice se vidi da te dvije lokacije imaju vrlo bliske značajke prometnog opterećenja. Međutim uzdužni nagib na lokaciji brojenja Klis, koja obuhvaća dionicu županijske ceste od Solina do Klisa činio je tu dionicu kao jednu od najkritičnijih na cestovnoj mreži Republike Hrvatske, s kilometarskim kolonama vozila i visokom gustoćom toka zbog čega je i izgrađena nova cesta na padinama Mosora. Istodobno je, lokacija Karanac na dionici državne ceste u baranjskoj ravnici, gdje s naslova ceste ne postoje ograničenja toka prometa. Ne poznajući brzinu i gustoću toka i oslanjajući se samo na podatke o prometnom opterećenju ne može se na ispravan način utvrditi stvarno stanje prometa. U sustavu gospodarenja cestovnim prometom te bi ceste bile gotovo ravnopravno tretirane, iako je iz prakse više nego evidentno da to ni prometno-tehnički ni gospodarski nije ispravno. Nažalost neke od tih spoznaja nisu na pravi način uzete u obzir niti pri planiranju i projektiranju nove ceste Solin – Klis, što se je u praksi vrlo brzo negativno potvrdilo.

Dodatni primjer promjene uvjeta toka prometa na istoj lokaciji može još bolje potvrditi navedeno. Niz dionica državne ceste D-1 kroz slunjska brda predstavljale su sa stajališta propusne moći i sigurnosti prometa kritične točke cestovne mreže, kao posljedica vođenja trase čiji ele-

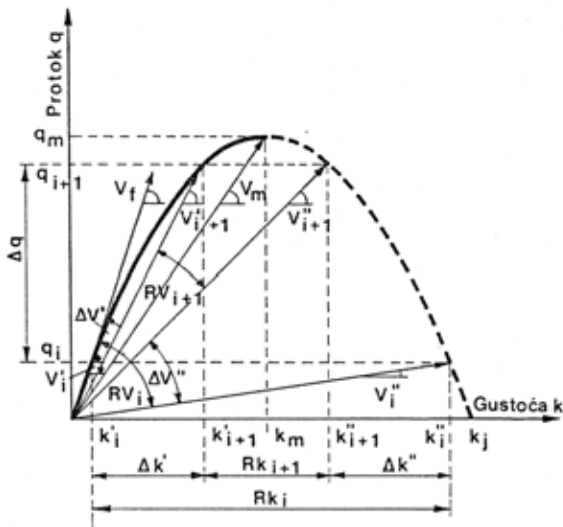
menti nisu dopuštali sigurno pretjecanje, zbog čega su se formirale kilometarske kolone vozila, tj. formirani su prometni tokovi s izrazito visokom gustoćom i malom brzinom toka. Na nekoliko dionica problem je riješen izgradnjom trećeg traka, što je omogućilo pretjecanje sporijih vozila, pretežno teških teretnih vozila, a tijekom turističke sezone i rekreacijskih vozila. Razdvajanje vozila po brzinama vožnje za posljedicu je imalo znatno povećanje brzine toka i smanjenje gustoće toka. Vizualnom opservacijom opaža se da je promet «nestao» jer više nema meteža na cesti, što je samo optička varka. Naime, razine protoka nisu se nakon rekonstrukcije ceste bitno promijenile, međutim uvjeti toka prometa prešli su iz područja sa zagušenjem, opisanim visokom gustoćom i malom brzinom, u područje bez zagušenja opisanim malom gustoćom i visokom brzinom, pa se stvara lažni dojam da se je promet smanjio.

Nažalost, jedno uglavnom dobro rješenje odbacuje se zbog neshvatljivoga nesuglasja između nadležnih institucija tako da se na navedenim lokacijama treći trak privremeno zatvara u uvjetima velike prometne potražnje, navodno zbog problema priključaka na točkama završetka trećega traka, pa se jedna kompleksna prometna situacija ponovno vraća u stanje prije rekonstrukcije.

Između graničnih situacija definiranih s tri granična uvjeta postoji bezbroj kombinacija odnosa između fundamentalnih varijabli prometnoga toka, tj. bezbroj različitih stanja prometnoga toka, odnosno uvjeta toka prometa. S obzirom da je gustoću toka teže izmjeriti nego brzinu i protok, iako se mogu raditi relativno dobre procjene gustoće primjenom detektora prisutnosti, ona se zbog toga u praksi tretira kao zavisna varijabla i izračunava primjenom jednadžbe (1). Tehnički je najjednostavnije iz podataka brojenja izračunavati protoke, a suvremeni sustavi detekcije vozila omogućuju precizno mjerenje brzine vozila i izračun srednje vremenske i srednje prostorne brzine prometnoga toka. Zato se veličine i promjene brzine i gustoće toka mogu prikazati kao funkcija protoka, kako je to prikazano na slici 4. [10].

Iz dijagrama se vidi da se promjene međusobnih odnosa mogu promatrati na dva načina. Jedne su promjene međusobnih odnosa promatrajući istodobno uvjete toka prometa bez zagušenja i sa zagušenjem, a druge su promjene unutar samo jednoga od tih dvaju područja.

Iz dijagrama se vidi da će povećanje protoka za Δq , s q_i na q_{i+1} , u uvjetima bez zagušenja, izazvati smanjenje brzine toka za $\Delta V'$, s V'_i na V'_{i+1} (prikazano kutom između tih dvaju vektora) i povećanje gustoće za $\Delta k'$, s k'_i na k'_{i+1} , a u uvjetima sa zagušenjem povećanje brzine za $\Delta V''$, s V''_i na V''_{i+1} i smanjenje gustoće za $\Delta k''$, s k''_i na k''_{i+1} , sve to sukladno jednadžbi (1).



Slika 4. Dijagram međusobne zavisnosti srednje prostorne brzine toka V_s , gustoće toka k i protoka q

Istodobno se promjene brzine i gustoće toka pri nekom protoku mogu promatrati i kao razlika gustoća toka Rk (na primjer $Rk_i = k''_i - k'_i$) i razlika brzina toka RV (za isti primjer $RV_i = V'_i - V''_i$), koje ovise o veličini protoka q . Ta se razlika smanjuje s povećanjem protoka, na primjer s q_i na q_{i+1} , i ekstremno u tjemenu parabole, tj. pri propusnoj moći ceste postaje jednaka nuli. Autor je razvio modele zavisnosti razlike gustoća i razlike brzina o veličini protoka koji u normaliziranom obliku glase [10]:

$$\frac{Rk}{k_j} = \sqrt{1 - \frac{q}{q_m}} \quad (8)$$

$$\frac{RV}{V_f} = \sqrt{1 - \frac{q}{q_m}}, \quad (9)$$

kao i modele odnosa zavisnosti promjena gustoća i brzina toka o veličini promjena protoka, koje se događaju unutar jednoga područja toka prometa (bez zagušenja ili sa zagušenjem) i koji u normaliziranom obliku glase:

$$\frac{\Delta k}{k_j} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{q_i}{q_m}} - \sqrt{1 - \frac{q_{i+1}}{q_m}} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\Delta V}{V_f} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{q_i}{q_m}} - \sqrt{1 - \frac{q_{i+1}}{q_m}} \right]. \quad (11)$$

Obradom podataka prikupljenih snimanjem prometnoga toka mogu se izračunavati granične vrijednosti fundamentalnih varijabli toka - q_m , k_j i V_f . Pogodnost razvijenih modela je u tome što su vrijednosti varijabli i promjena

u bezdimenzijskom obliku, pa su primjenjivi bez obzira na veličine varijabli, i to što se mogu primjenjivati i rezultati komparirati istodobno na više lokacija koje nemaju identične granične vrijednosti varijabli. Modeli su naročito korisni u primjeni na lokacijama od posebnoga prometnog interesa kad se promet prati bez prekida i kad se prometnim tokovima upravlja na temelju trenutnog stanja prometnoga toka. Praćenjem promjena vrijednosti pojedinih varijabli može se prometno-tehnički ispravno reagirati na nastalu situaciju, međutim što je još važnije na temelju trenda promjena može se predvidjeti stanje toka i pravodobno raspodijeliti prometno opterećenje na mrežu i tako izbjeći nepotrebna zagušenja.

Posebno je važno mjerenje prometnoga toka u području visokih protoka [11]. Analiza tih tokova otvara prostore utvrđivanja uvjeta toka prometa i definiranja propusne moći i razina uslužnosti u lokalnom okruženju, što sadašnji sustav brojenja prometa ne omogućuje [12, 13].

4 Zaključak

Analiza postojećeg sustava brojenja prometa na cestama u Republici Hrvatskoj sa stajališta teorije prometnoga toka pokazuje da automatska brojila prometa ili ne mogu dati ključne varijable toka i parametre koji jednoznačno opisuju stanje prometnih tokova u mreži, ili se oni ne obrađuju, pa tako nisu ni poznati, što znači da se i postojeće tehničke mogućnosti brojila ne iskorištavaju. Naplatno brojenje teče u uvjetima prekinutoga prometnoga toka i kao rezultat daje samo prometno opterećenje po pojedinim cestovnim dionicama, bez mogućnosti dublje analize prometnih tokova. Općenito, postojeći je sustav statičan i usmjeren je k formiranju statističkih podataka o prometu.

Neki najnoviji sustavi brojenja prometa u razvijenom okruženju oblikovani su tako da omogućuju trenutno utvrđivanje tokova na mreži cesta. Tu je brojenje prometa povezano s regulacijom prometa, pa se tako brojenje prometa ne iscrpljuje samo u još uvijek važnom registriranju podataka, nego i kao dio upravljanja prometom u realnom vremenu. Primjena teorije prometnoga toka nudi razvoj sustava, a razvijeni modeli odnosa između temeljnih varijabli prometnoga toka otvaraju nove mogućnosti u kontroli i upravljanju prometnim tokovima u mreži.

Općenito se može zaključiti da postojeći sustav brojenja prometa, bez obzira na stalna proširenja i poboljšanja, u potpunosti ne zadovoljava suvremene potrebe u procesu planiranja, izgradnje, održavanja i gospodarenja cestovnim prometnim sustavom.

LITERATURA

- [1] *Brojanje saobraćaja na putevima u 1970. Metodološki materijal - 194*, Savezni zavod za statistiku, Beograd, 1970.
- [2] *Brojenje prometa na cestama SR Hrvatske godine 1971.*, Institut za saobraćaj, pomorstvo i veze, Zagreb, 1972.
- [3] Mihoci, F.; Rožić, P.: *Organizacija prikupljanja i obrade podataka o prometu na cestama SR Hrvatske*, *Suvremeni promet*, 6 (1948) 6., str. 403.-408.
- [4] Rožić, P.; Mihoci, F.: *Razvoj i stanje brojenja prometa na cestama Jugoslavije*, XII Kongres SDPJ, Budva - Bečići, 1986., str. 153.-157.
- [5] Hrvatske ceste d.o.o.: *Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2004.*, Zagreb, 2005.
- [6] Institute of Traffic Engineers: *Transportation and Traffic Engineering Handbook*, Washington, D.C., 1976.
- [7] Rožić, P.: *Istraživanje parametara prometnog toka na dvotračnim cestama*, magistarski rad, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 1987.
- [8] Haight, F. A.: *Mathematical Theories of Traffic Flow*, Academic Press, New York, 1963., str. 67.-89.
- [9] Hrvatske ceste d.o.o.: *Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2003.*, Zagreb, 2004.
- [10] Rožić, P.: *Dinamika promjena fundamentalnih varijabli prometnoga toka*, *Građevinar*, Vol. 45 (1993)1, str. 13.-22.
- [11] Rožić, P.: *Mjerenje prometnih tokova pri visokim protocima*, *Građevinar*, 51 (1999) 10, str. 637.-644.
- [12] Rožić, P.: *Propusna moć dvotračnih dvosmjernih cesta u našim uvjetima*, disertacija, FAGG, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, 1989.
- [13] Rožić, P.: *Capacity of Two-Lane, Two-Way Rural Highways: The New Approach*, Transportation Research Record 1365, TRB, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 1992, str. 19.-29.