

UPOTREBA FUZZY UPRAVLJAČA U ODREĐIVANJU KAPACITETA NAPLATNIH POSTAJA NA AUTOCESTAMA

Marko Matulin, Štefica Mrvelj, Hrvoje Gold
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

Sažetak

Naplatne postaje na autocestama predstavljaju posebne objekte prometne infrastrukture. Posljedice neadekvatno raspoređenog kapaciteta naplatnih postaja na području naplate, u pojedinom smjeru vožnje, odražavaju se na čekanje korisnika u redu, tj. na razinu usluge (LoS - Level of Service). Nakon provedene analize sustava posluživanja na područjima naplate, predložen je novi način određivanja potrebnog broja naplatnih postaja ovisno o prometnom opterećenju u svakom smjeru vožnje, upotrebom neizrazite (fuzzy) logike. Ulazne veličine u fuzzy upravljač koji odlučuje o potrebnom kapacitetu, tj. o potrebnom broju naplatnih postaja su: odstupanje trenutne veličine reda od dozvoljene (definirane pojedinim razredom LoS-a) i promjena veličine reda u dva susjedna petnaestominutna intervala promatranja. Pokazano je da upravljač dobro određuje kapacitet sustava, te je sposoban svesti varijacije u razini usluge u dva susjedna petnaestominutna intervala na minimum.

USING A FUZZY BASED CONTROLER FOR DETERMINING TOLLBOOTH CAPACITY ON MOTORWAYS

Abstract

Toll collection systems represent a special transport infrastructure objects on motorways. Inefficient capacity allocation on a toll plaza will produce additional negative effects which will be reflected on queuing delay, i.e. on the Level of Service (LoS). After the analysis of toll plaza queuing system and by introducing fuzzy logic into inference process, we propose a novel approach to determine the necessary number of tollbooths based on the traffic volume. We selected two input variables for our fuzzy based controller which determines the necessary number of tollbooths, i.e. the capacity: difference between current number of vehicles in a queue and maximum allowed queue length (defined separately for every LoS class); and difference in a queue length in two consecutive fifteen minute intervals. We showed that fuzzy controller successfully allocates necessary capacity, and it is able to reduce LoS variations in two consecutive fifteen minute intervals to a minimum.

1. UVOD

Naplatne postaje na autocestama i ostalim prometnicama na kojima se obavlja izravna naplata naknade za korištenje predstavljaju posebne objekte prometne infrastrukture. Promatrajući proces odvijanja prometa na takvim prometnicama, jasno je da naplatne postaje unose određene poremećaje u prometni tok. Osnovni utjecaj koji naplatne postaje imaju na prometni tok jest smanjivanje brzine kretanja vozila, odnosno povećanje trajanja putovanja. Uz to, autori u [1] naglašavaju i sigurnosti aspekt budući da na području naplate može nastati niz konfliktnih točaka prilikom dolaska vozila, kao i u trenucima

ponovnog ulijevanja vozila nakon plaćanja naknade.

Vrijeme provedeno na području naplate sastoji se od vremena čekanja na posluživanje, samog trajanja posluživanja i vremena potrebnog za ponovno ulijevanje u prometni tok. Trajanje posluživanja je relativno konstantna veličina, dok vrijeme čekanja na posluživanje ovisi o veličini prometnog toka kao i o broju aktivnih poslužiteljskih mjesta, [2], [3]. Analizirajući sustav posluživanja moguće je odrediti potreban broj naplatnih postaja kako bi se zadovoljila određena razina usluge (LoS - Level of Service). Različiti LoS razredi definirani su na temelju prosječnog čekanja vozila na posluživanje, [4]. Stoga, dizajn

područja naplate i dodijeljeni kapacitet pojedinom smjeru kretanja vozila uvelike utječe na odvijanje prometnog procesa, te, ne manje važno, na zadovoljstvo korisnika što je pokazano u [5] i [6].

Nekoliko je autora analiziralo performanse prometnog toka na područjima naplate. Autor u [7] koristi simulacijske alate kako bi modelirao zagušenja na području naplate, te predložio potreban broj poslužiteljskih mjesta. U svome radu modelira samo dio područja naplate gdje vozila čekaju u redu, tj. ne analizira proces ponovnog ulijevanja vozila na autocestu nakon obavljene naplate. Sličan pristup koriste i autori u [8]. Cherng i drugi u [6] u analizu uključuju i proces ponovnog ulijevanja vozila na autocestu nakon obavljene naplate, te koristeći teoriju redova određuju optimalan raspored naplatnih postaja. U svojim zaključnim razmatranjima ističu da iako velik broj otvorenih naplatnih postaja jamči višu razinu usluge, on također uzrokuje ozbiljne poremećaje prilikom ponovnog ulijevanja vozila na autocestu.

Provedeno je također niz analiza o utjecaju elektroničke naplate cestarine na odvijanje prometa (primjerice u [5] i [9]). Primaran cilj ovih sustava jest povećati efikasnost sustava naplate, te na taj način smanjiti vremena čekanja, a samim time i vremena putovanja.

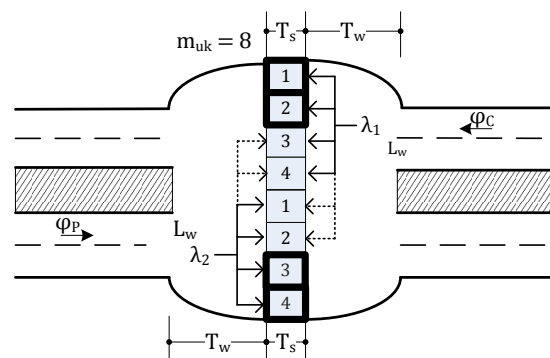
U ovome radu opisan je upravljač koji na temelju neizrazitog zaključivanja (*fuzzy logike*) donosi odluku o potrebnom broju poslužiteljskih mjesta s ciljem da bi se zadovoljila unaprijed određena razina usluge. Cilj je stvoriti upravljač koji bi imitirao čovjekov način razmišljanja i proces donošenja odluke. Kao i autori u [7] i [8] analizira se samo proces dolazaka na područje naplate, dok proces ponovnog uključivanja na autocestu, nakon obavljene naplate, autori ovog rada ostavljaju za buduća istraživanja.

Ulazne veličine u *fuzzy* upravljač su: odstupanje trenutne veličine reda od dozvoljene (definirane pojedinim razredom LoS-a) i promjena veličine reda u dva susjedna petnaestominutna intervala promatranja. Drugo navedena ulazna veličina odabrana je upravo kako bi se pokušao imitirati proces zaključivanja čovjeka, budući da kod manjih promjena trenutne veličine reda, u dva dovoljno kratka susjedna intervala promatranja, nije efikasno odmah mijenjati broj dodijeljenih naplatnih postaja u određenom smjeru. Ova ulazna veličina služi kako bi svela promjene u dodijeljenom kapacitetu u pojedinom smjeru na minimum, ali ipak uz zadovoljavanje zadane razine usluge unutar određenih tolerancija.

2. OPIS SUSTAVA POSLUŽIVANJA

U ovome radu analizira se zamišljeno područje naplate (slika 1) na kojoj se naplata odvija klasičnim putem u kojoj postoji razmjena novčanih sredstava između operatera i vozača, budući da je,

prema [1], kod te vrste naplate prosječno vrijeme posluživanja (T_s) najdulje. Ono se sastoji od ukupno 8 naplatnih postaja, tj. poslužiteljskih mjesta ($m_{uk} = 8$), na koje dolaze prometni tokovi iz dva smjera. Za svaki smjer kretanja vozila predviđene su četiri naplatne postaje, međutim uslijed povećanog prometnog opterećenja iz pojedinog smjera moguće je posuditi kapacitet (do dvije naplatne postaje) iz suprotnog smjera (isprekidane strelice). Pretpostavlja se da u svakom trenutku mora biti otvoreno minimalno dvije naplatne postaje za svaki smjer (označeno debljim pravokutnicima). Vozila dolaze na područje naplate prosječnim intenzitetom dolazaka λ_1 i λ_2 , staju u red i čekaju na posluživanje (t_w). Prosječna veličina reda, tj. prosječan broj vozila u redu označen je s L_w , te će se ta veličina pratiti s korakom od 15 minuta.



Sl. 1. Analizirano područje naplate

U analizi se pretpostavlja da je, gledano u kratkim vremenskim intervalima, prometni tok stacionaran, da vremenski intervali između dolazaka vozila i prosječno vrijeme trajanja posluživanja prate eksponencijalnu razdiobu, da je prostor ispred naplatnih postaja dovoljno velik da vozila stanu u red, da su poslužitelji ravnomjerno opterećeni, te da je disciplina posluživanja pridošao-prvi-poslužen. U skladu s [2] pod ovim pretpostavkama primjenjiv je model M/M/1. Prema [4] postoji šest razreda LoS-a koji su određeni prema prosječnom vremenu čekanja:

- Razred A. $T_w \leq 10$ s
- Razred B. 10 s $< T_w \leq 20$ s
- Razred C. 20 s $< T_w \leq 35$ s
- Razred D. 35 s $< T_w \leq 55$ s
- Razred E. 55 s $< T_w \leq 80$ s.
- Razred F. $T_w > 80$ s.

Isti razredi razina usluge korišteni su u analizama područja naplate u [1], [5], [7] i [8], pa će stoga i ovdje oni biti upotrijebljeni za izračun prometnih parametara.

Prosječno vrijeme posluživanja (T_s), prema mjerenjima prezentiranim u [1], za klasičnu metodu naplate cestarine iznosi 10 sekundi. Prema [3], za model M/M/1, iz navedenih veličina, za svaki

razred LoS-a moguće je izvesti izraz za veličinu prometnog opterećenja ρ kako slijedi:

$$\rho = \frac{T_w}{T_w + T_s} \quad (1)$$

Prema [2] i [3] ukupan promet (A) računa se prema izrazu:

$$A = \rho \cdot m \quad (2)$$

dok je prosječan intenzitet nailazaka vozila (λ) jednak:

$$\lambda = \frac{A}{T_s} \quad (3)$$

Naposljetku, prosječan broj vozila u redu L_w računa se prema izrazu:

$$L_w = \lambda \cdot T_w \quad (4)$$

Na temelju ovih izraza, u tablici 1 izračunate su dozvoljene prosječne duljine reda u odnosu na broj naplatnih postaja, za razred C LoS-a.

Tab. 1. Dozvoljena prosječna duljina reda za razred C

Broj aktivnih poslužitelja (m)	Broj vozila u 15 minuta	Prosječan broj vozila u redu
1	70	2,72
2	140	5,44
3	210	8,17
4	280	10,89
5	350	13,61
6	420	16,33

Uzme li se za primjer da je otvoreno 5 naplatnih postaja u jednom smjeru, tada u tom smjeru u petnaest minuta na naplatu ne smije doći više od 350 vozila, tj. ukupno na posluživanje smije čekati maksimalno 13,61 (≈ 14) vozila da bi razina usluge bila unutar razreda C.

3. FUZZY UPRAVLJAČ

3.1. Određivanje ulaznih/izlaznih veličina

Pretpostavlja se da je u svakom trenutku t moguće doznati trenutnu veličinu reda na području naplate L_{w_t} (npr. putem sustava video nadzora, detektorima u kolniku i sl.), te se stoga u svakom trenutku može izračunati odstupanje trenutne od dozvoljene veličine reda: $\Delta L_{w_1} = L_{w_t} - L_{w_{LoS}}$ što predstavlja prvu ulaznu veličinu *fuzzy* upravljača. Ukoliko je rezultat pozitivan broj, razina LoS nije zadovoljena, a ukoliko je negativan ili jednak nuli LoS je zadovoljen. U nekim slučajevima izračunato odstupanje (pozitivno ili negativno) može biti svega za 1 vozilo. Takve male promjene u trenutku očitavanja duljine reda ne bi trebale utjecati na promjene u veličini broja otvorenih poslužiteljskih mjesta. To navodi na zaključak da je potrebno definirati određene kategorije promjene duljine reda. U ovome slučaju razlikovat će se pet

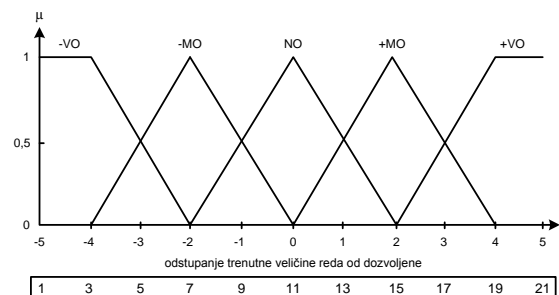
kategorija ΔL_{w_1} (*Pozitivno veliko odstupanje* +VO, *Pozitivno malo odstupanje* +MO, *Nema odstupanja* NO, *Negativno malo odstupanje* -MO i *Negativno veliko odstupanje* -VO).

Druga ulazna veličina u *fuzzy* upravljač je promjena odstupanja veličine reda u petnaestominutnim intervalima promatranja koja će biti označena s ΔL_{w_2} . Slično kao i ranije ΔL_{w_2} računa se kao razlika odstupanja u trenutku t i odstupanja u prethodnom trenutku $t - 1$, odnosno $\Delta L_{w_2} = \Delta L_{w_{1t}} - \Delta L_{w_{1t-1}}$. Kategorije promjene ΔL_{w_2} su *Veliko povećanje* VP, *Malo povećanje* MP, *Nema promjene* NP, *Malo smanjenje* MS i *Veliko smanjenje* VS.

Izlazna veličina *fuzzy* upravljača bit će broj aktivnih naplatnih postaja m i to u obliku instrukcije \rightarrow povećaj broj aktivnih poslužitelja za dva (+2), povećaj broj aktivnih poslužitelja za jedan (+1), te tako redom, 0 (bez promjene), -1 (smanji za jedan) i -2 (smanji za dva).

3.2. Određivanje funkcija pripadnosti

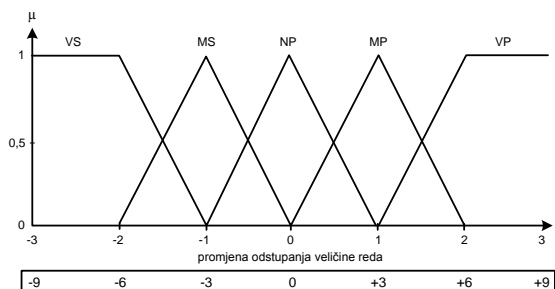
Veličina dozvoljenog reda za različite razrede LoS-a varira i do 39 vozila u slučaju da se uspoređi veličina reda razreda A i E za šest poslužitelja. Budući da su takvi rasponi relativno veliki, bilo bi potrebno izraditi funkcije pripadnosti ulaznih veličina zasebno za pojedini broj aktivnih poslužitelja. Da bi se to izbjeglo ovdje je usvojeno da se neizrazite vrijednosti nalaze u intervalu [-5, 5] za ΔL_{w_1} , i [-3, 3] za ΔL_{w_2} (slike 2 i 3). Tim intervalima pridružuju se odgovarajući intervali apsolutnih vrijednosti ovisno o broju aktivnih poslužitelja i definiranoj razini usluge. Pa tako za slučaj razreda C LoS-a, uokvireni brojevi pri dnu slike 2 označavaju broj vozila koji se nalazi u redu (apsolutne vrijednosti). Jedanaest vozila znači da nema odstupanja od zadanog $L_{w_{LoS}}$, tj. 11 vozila pripada kategoriji *Nema odstupanja* s faktorom 1, dok primjerice 17 vozila pripada kategoriji *Pozitivno malo odstupanje* faktorom 0,5 i kategoriji *Pozitivno veliko odstupanje* također faktorom 0,5.



Sl. 2. Funkcije pripadnosti ΔL_{w_1} za razred C LoS-a i 4 aktivna poslužitelja

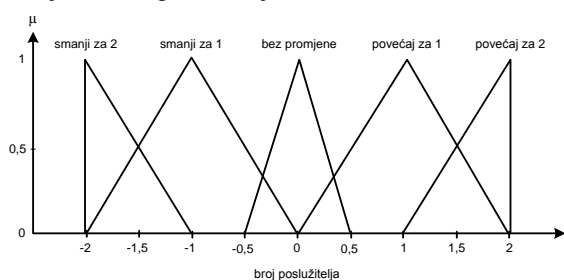
Uokvireni brojevi pri dnu slike 3 označavaju odstupanje u broju vozila u odnosu na prethodni

period promatranja za razred C LoS-a i 4 aktivna poslužitelja.



Sl. 3. Funkcije pripadnosti ΔL_{w_2} za razred C LoS-a i 4 aktivna poslužitelja

Funkcije pripadnosti izlazne veličine prikazane su na slici 4. Kategorije izlazne veličine ostaju nepromijenjene za bilo koje ispitivanje duljine reda, odnosno za bilo koji razred LoS-a i bilo koji broj aktivnih poslužitelja.



Sl. 4. Funkcija pripadnosti izlazne veličine

3.3. Proces zaključivanja

Fuzzy logika nalazi primjenu u području ekspertnih sustava gdje se pokušava izgraditi računalni sustav koji je opskrbljen znanjem stručnjaka i oponaša način njegovog zaključivanja. Ljudsko znanje se tada najčešće predstavlja u obliku jezičnih izraza AKO-ONDA, pa se stoga često u literaturi nailazi na izraz *sustavi temeljeni na pravilima* (primjerice u [10] i [11]). Fuzzy upravljač predstavljen u ovome radu koristi ukupno 25 pravila, po jedno za svaku kombinaciju dviju ulaznih veličina.

Ako je uvjet (ili uvjeti) pojedinog pravila zadovoljen izračunava se vrijednost zaključka za to pravilo. Ovaj postupak naziva se *Inference procedure*. Postupak dobivanja jedinstvenog zaključka na temelju zaključaka svih pravila zove se agregacija. Prema [11] postoje dva pristupa agregiranja: konjunktivni sustav pravila u kojem su zaključci pojedinih pravila povezani logičkim operatorom "I" (presjek), te disjunktivni sustav pravila u kojem su zaključci pojedinih pravila povezani logičkim operatorom "ILI" (unija). U ovome radu upotrijebljen je drugi pristup, točnije metoda zaključivanja Mamdani max-product. U tom slučaju agregirani izlaz (površina) za r pravila dobije se prema izrazu:

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\mu_{A_1^k}(\text{input}(i)) \cdot \mu_{A_2^k}(\text{input}(j))] \quad (5)$$

za sve $k = 1, 2, \dots, r$

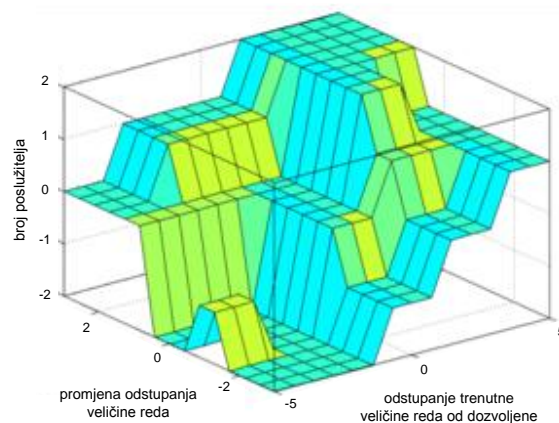
gdje je:

- B^k neizraziti skup koji predstavlja k -tu posljedicu
- A_1^k i A_2^k neizraziti skupovi koji predstavljaju k -ti par ulaznih veličina.

Fuzzy upravljač zaključuje na temelju neizrazitih ulaznih vrijednosti. Međutim, na izlazu je potrebno ponovno dobiti skalarnu vrijednost budući da nije moguće, primjerice *malo povećati broj naplatnih postaja*. Stoga, potrebno je provesti postupak defuzifikacije, tj. proces pretvorbe fuzzy vrijednosti u skalarnu vrijednosti. U literaturi ([11] i [12]) se spominje niz metoda kako provesti postupak defuzifikacije:

1. odabir maksimalne vrijednosti
2. metoda središta
3. metoda otežanog prosjeka
4. srednja vrijednost maksimuma
5. središte suma; središte unije, i dr.

Nakon testiranja nekoliko metoda odabrana je metoda srednje vrijednosti maksimuma. Površina koja prikazuje ukupno ponašanje fuzzy upravljača za različite vrijednosti ulaznih veličina prikazana je na slici 5.



Sl. 5. Prikaz površine koja opisuje rad fuzzy upravljača

Na x osi prikazane su relativne vrijednosti odstupanja trenutne veličine reda od dozvoljene (ΔL_{w_1}), na y osi prikazane su relativne vrijednosti promjene odstupanja veličine reda (ΔL_{w_2}), a na z osi nalazi se izlazna veličina iz fuzzy upravljača. Primjerice, ukoliko je $\Delta L_{w_1} = 0$ i $\Delta L_{w_2} = 0$ tada izlazna instrukcija iz fuzzy upravljača glasi *nema promjene*, dok u slučaju velikog pozitivnog odstupanja trenutne veličine reda ($\Delta L_{w_1} = 5$) i velikog povećanja duljine reda ($\Delta L_{w_2} = 3$) upravljač daje instrukciju *povećaj broj poslužitelja za 2*.

4. ANALIZA REZULTATA

Veličina prometnog opterećenja varira u vremenu. Autori ovoga rada željeli su uključiti i veličinu tih varijacija u proces odlučivanja o potrebnom kapacitetu za određeni smjer vožnje, te na taj način imitirati čovjekov način zaključivanja. Stoga je jedna od dviju definiranih ulaznih veličina *promjena duljine reda u dva petnaestominutna intervala*. Ova ulazna veličina omogućuje da se ponuđenim kapacitetom prati trend promjene prometnog opterećenja u vremenu, te se tako svedu promjene u dodijeljenom kapacitetu na minimum. Točnije, *fuzzy* upravljač pokušava trenutno održati zadanu razinu LoS-a, ali i određuje potreban kapacitet za idući petnaestominutni interval.

Analiza rada *fuzzy* upravljača napravljena je za razred C LoS-a. Međusobno su komparirane vrijednosti izračunate izrazom (4) za razred C (tablica 1) i izlazne instrukcije *fuzzy* upravljača. Dobiveni rezultati pokazuju da je u 33% slučajeva broj predloženih naplatnih postaja identičan potrebnom broju u odnosu na zadanu prometno opterećenje. To su slučajevi kada su promjene u duljini reda u dva susjedna petnaestominutna intervala male ili ih uopće nema.

U ostalih 67% slučajeva, kada su promjene u duljini reda značajne (*veliko povećanje* ili *veliko smanjenje*) *fuzzy* upravljač svojim odlukama „prati“ trend promjene u duljini reda te dodjeljuje više, odnosno manje, naplatnih postaja od trenutnih potreba. Ovo omogućuje da u idućem petnaestominutnom intervalu ne dođe do zagušenja u području naplate, odnosno da se u pojedinom smjeru ne dogodi prekapacitiranost sustava naplate.

5. ZAKLJUČAK

Ovdje predstavljeni *fuzzy* upravljač koji donosi odluku o potrebnom broju naplatnih postaja, u proces zaključivanja uključuje parametar koji, koliko je autorima poznato, do sada nije korišten u analizama: promjena duljine reda u dva susjedna intervala promatranja. Značaj ovog parametra je u tome da se proces zaključivanja približi onom čovjeka. Pokazano je da upravljač dobro određuje kapacitet sustava, te što je možda i važnije, sposoban je kapacitirati sustav tako da se varijacije u razini usluge u dva susjedna petnaestominutna intervala svedu na minimum.

U budućim istraživanjima autori ovoga rada pažnju će posvetiti i procesu ponovnog uključivanja vozila na autocestu nakon obavljene naplate.

6. LITERATURA

[1] Cherng, C., Lewis, A., Pai, S.: *Modelling Toll Plaza Behaviour Using Queuing Theory*,

- Mathematical Contest in Modelling, University of Washington, Department of Mathematics, Washington, February, 2005.
- [2] Begović, M.: *Podvorbeni sustavi*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [3] Mrvelj, Š., Bošnjak, I.: *Primjeri i zadaci iz telekomunikacijskog prometa*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2000.
- [4] Transportation Research Board: *US Highway Capacity Manual*, National Research Council, Washington, 2000.
- [5] Diaz, C. E. D., Mappala, A. U., Sigua, R. G., Madrigal, J. J., Palmiano, H. S.: *Allocation of Electronic Toll collection Lanes at Toll Plazas Considering Social Optimization of Service Times and Delay*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5., pp. 1496 – 1509, 2005.
- [6] HNTB Corporation: *Maine Turnpike Southern Toll Plaza: Existing Site Evaluation*, The Maine Turnpike Authority, June, 2009.
- [7] Ito, T.: *Process Simulation Approach to Design and Evaluation of Toll Plaza With ETC Gates*, International Journal of Simulation, Vol. 6., No. 5., 2005.
- [8] Bitton, E., Kulkarni, A., Shlimovich, M.: *Two Tools for Tollbooth Traffic Analysis*, Mathematical Contest in Modelling, University of Washington, Department of Mathematics, Washington, February, 2005.
- [9] Padayhag, G. U., Sigua, R. G.: *Evaluation of Metro Manila's Electronic Toll Collection (ETC) System*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, p.p. 1946-1961, October, 2003.
- [10] Gold, H.: *Autorizirana predavanja kolegija „Ekspertni sustavi u prometu“*, Fakultet prometnih znanosti, Poslijediplomski doktorski studij, Zagreb, 2010.
- [11] Ross, T. J.: *Fuzzy Logic with Engineering Applications (2nd Edition)*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, 2004.
- [12] Nurcahyo, G. W., Shamsuddin, S. M., Alias, R. A.: *Selection of Defuzzification Method to Obtain Crisp Value for Representing uncertain Data in a Modified Sweep Algorithm*, Journal of Computer Science & Technology, Vol. 3., No. 2., p.p. 22-28, October, 2003.