

## UTICAJ TREPĆUĆEG ZELENOG SIGNALNOG POJMA NA EFEKTIVNO ZELENO VREME

Anica Kocić Stojanović, Tehnička škola, Smederevo, kocic.anica@tehnickasd.edu.rs

Stamenka Stanković, Saobraćajni fakultet, Beograd, s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Nikola Čelar, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.celar@sf.bg.ac.rs

Jelena Kajalić, Saobraćajni fakultet, Beograd, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

*Rezime: Trepćuće zeleno vreme je deo stvarnog zelenog signalnog pojma i uvodi se sa ciljem da upozori vozače da uskoro dolazi do promene signalnog pojma. Međutim, istraživanja su pokazala da primena trepćućeg zelenog signalnog pojma doprinosi zaustavljanju vozača i pre početka žutog signalnog pojma. Ranija zaustavljanja doprinose smanjenju efikasnosti saobraćaja na signalisanoj raskrsnici kroz smanjenje efektivnog zelenog vremena. Cilj ovog istraživanja je da se kvantifikuje uticaj trepćućeg zelenog na efikasnost saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici. Uticaj je kvantifikovan na osnovu smanjenja vrednosti efektivnog zelenog vremena kao jednog od ključnih uticajnih parametara na kapacitet raskrsnice, a samim tim i na efikasnost iste.*

*Ključne reči: trepćuće zeleno, efektivno zeleno, signalisana raskrsnica, efikasnost saobraćaja*

### 1. UVOD

Trepćući zeleni signalni pojam označava dozvoljen prolaz, jer predstavlja deo zelenog signalnog pojma. Pravilnikom o saobraćajnoj signalizaciji [1] je propisano da trepćuće zeleno traje 4 s, tako da naizmenični intervali uključeno-isključeno traju po 0,5 s. Trepćući zeleni signalni pojam (TZ) se uvodi sa ciljem da upozori vozače da uskoro dolazi do promene signalnog pojma, tj. da se uskoro završava zeleni signalni pojam.

Obzirom na ranije obaveštenje o promeni signalnog pojma, primena TZ doprinosi promeni teorijske zone odluke, tj. smanjuje se dilemma zona [2, 3]. Takođe, istraživanja su pokazala da primena TZ doprinosi smanjenju broja prolazaka na crveno i broja saobraćajnih nezgoda tipa bočni sudar [4-8]. Ipak, isti autori zaključuju da je povećan broj saobraćajnih nezgoda naletanja vozila od pozadi. S druge strane, utvrđeno je da je veći procenat zaustavljanja u slučaju primene TZ nego bez njega, bez obzira na udaljenost i brzinu kretanja [9]. Naime, primena TZ doprinosi većem broju ranijih zaustavljanja, obzirom da vozači podcenjuju preostalo vreme do kraja žutog signalnog pojma, kao poslednjeg legitimnog trenutka za prolazak raskrsnice [2].

Prethodno istraživanje u lokalnim uslovima, sa akcentom na efikasnost saobraćaja, je potvrdilo da se vozači zaustavljaju ranije kada je primenjen TZ. Naime, kada je primenjen TZ vozači se zaustavljaju u proseku 1,7 s ranije nego kada nije primenjen [10]. S druge strane, ispitivanje samoprijavljenog ponašanja vozača, je pokazalo da čak trećina ispitanika počinje da koči već pri pojavi TZ, dok polovina njih tada ubrzava [11]. Osim što rezultati potvrđuju ranija zaustavljanja kada je TZ primenjeno, ukazuju i na problem neusklađenih odluka vozača koje mogu voditi do nastanka nezgode.

Rezultati o uticaju primene TZ ukazuju na negativan uticaj na bezbednost saobraćaja, ali je neminovan uticaj i na efikasnost saobraćaja na signalisanim raskrsnicama. Očekivano je da ranija zaustavljanja, u slučaju primene TZ, doprinose smanjenju efektivnog zelenog vremena, jednog od ključnih uticajnih parametara na kapacitet raskrsnice, a samim tim i na efikasnost iste. Efektivno zeleno predstavlja deo stvarnog zelenog vremena prikazanog na semaforu tokom koga vozila prolaze raskrsnicu maksimalnim intezitetom.

Može se pretpostaviti da je ponašanje vozača na početku zelenog signalnog pojma identično u slučaju sa i bez TZ na kraju, te efektivno zeleno zavisi isključivo od ponašanja vozača na kraju zelenog pojma, odnosno od iskorišćenja žutog. U skladu sa tim, predmet ovog rada je utvrđivanje uticaja primene TZ na vrednost efektivnog zelenog vremena oslanjajući se na vrednost iskorišćenja žutog. Istraživanje sa i bez TZ je sprovedeno na istoj raskrsnici, što je značajno za postizanje cilja ovog rada, tj. omogućava analizu samo uticaja TZ, dok su svi ostali uticaji isti u oba slučaja.

## 2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Istraživanje je sprovedeno na četvorokrakoj raskrsnici Dimitrija Tucovića - Jenkova u Beogradu. Posmatrana su dva prilaza Ul. Dimitrija Tucovića koji imaju po dve saobraćajne trake namene pravo-levo i pravo-desno. Analizirani su samo tokovi pravo iz sve četiri trake, dok su skretanja, koja su zastupljena u malom procentu, isključena iz razmatranja.

Tokovi na raskrsnici se opslužuju u dve faze koje vremenski razdvajaju konfliktnonekompatibilne tokove na raskrsnici i primenjen je TZ. Za potrebe istraživanja, zahvaljujući Centru za upravljanje saobraćajem, Sekretarijata za saobraćaj Grada Beograda, omogućeno je da se na ovoj raskrsnici isključi TZ. Dakle, istraživanje je sprovedeno na istoj raskrsnici i sa i bez TZ, u dva uzastopna merodavna radna dana (po 24h snimaka). Kamera je bila postavljena na oko 160 m od raskrsnice, snimajući pritom nailazeća vozila sa oba prilaza duž Ul. Dimitrija Tucovića i istovremeno rad svetlosnih signala na raskrsnici (slika 1).



*Slika 1. Raskrsnica na kojoj je sprovedeno istraživanje i položaj kamere prilikom snimanja*

S obzirom na cilj istraživanja, neophodno je da saobraćajni zahtev postoji tokom trajanja čitavog zelenog signalnog pojma, pa i nakon njegovog završetka. Ipak, iz analize su izuzete situacije kada je na raskrsnici vladalo stanje zasićenja ili prezasićenja, jer u tom slučaju nastaje ometanje pri pražnjenju redova. Takođe, ovo istraživanje se prvenstveno zasniva na ponašanju vozača putničkih automobila, te su iz analize izuzeta teretna vozila,

autobusi i trolejbusi. Pretpostavlja se da se vozači ovih kategorija vozila drugačije ponašaju obzirom na drugačije manevarske sposobnosti.

Tokom pregledanja snimaka, u svakom pojedinačnom ciklusu, zavisno da li je primenjen TZ ili ne, posmatrana su dva različita perioda:

- Sa primenjenim TZ: od početka TZ do 7 sekundi nakon početka crvenog signalnog pojma, i
- Bez primenjenog TZ: od početka žutog do 7 sekundi nakon početka crvenog signalnog pojma.

Period od 7 sekundi nakon početka crvenog signalnog pojma usvojen je kao period u kom je posmatrano ponašanje vozača na samu pojavu crvenog signalnog pojma. Drugim rečima, analizirani su samo vozači koji prolaze samo na početku pojave crvenog signalnog pojma, što se može smatrati pogrešnom reakcijom na promenu, a ne njihovo generalno ponašanje na crveno. Ovim su iz istraživanja eliminisani vozači koji bi namerno prošli na crveno. Vrednost od 7 sekundi predstavlja vreme putovanja brzinom od 50 km/h (13,9 m/s) od tačke u kojoj vozač vidi svetlosni signal na raskrsnici (oko 100 m), odnosno  $t = 100/13,9 = 7$  sekundi.

Za potrebe istraživanja, u prethodno definisanim periodima posmatranja, razmatrana su samo prva vozila koja se zaustave u toku trajanja TZ i žutog pojma, i poslednja vozila koja prođu raskrsnicu od promene signalnog pojma, početka TZ kada je on primenjen ili početka žutog kada TZ nije primenjen. U skladu sa tim, za svaki analizirani ciklus koji zadovoljava prethodno navedene kriterijume, beležena su vremena poslednjeg vozila koje prođe i prvog koje se zaustavi kako bi se utvrdila vrednost iskorišćenog i neiskorišćenog dela žutog signalnog pojma kada je TZ primenjen i kada nije. Vrednost iskorišćenja/neiskorišćenja žutog signalnog pojma se utvrđuje kao razlika vremena prolaska/zaustavljanja vozila i vremena početka žutog signalnog pojma. Posebno su registrovani i slučajevi kada se vozila zaustave tokom trajanja TZ, kao i kada prođu tokom posmatranog dela crvenog, razmatrajući pri tom neiskorišćeni deo (trepćućeg) zelenog signalnog pojma i vreme prolaska nakon početka crvenog. U tom smislu, moguće je registrovati 4 različita slučaja ponašanja vozača na promenu signalnog pojma:

- Zaustavljanje na trepćuće zeleno, samo u situaciji kada je primenjeno - i utvrđivanje neiskorišćenog dela zelenog, odnosno gubitke zelenog,
- Zaustavljanje na žuto - i utvrđivanje neiskorišćenog dela žutog,
- Prolazak na žuto - i utvrđivanje iskorišćenog dela žutog,
- Prolazak na crveno - i utvrđivanje iskorišćenog dela crvenog.

### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Rezultati su prikazani na nivou raskrsnice, jer su rezultati na nivou saobraćajne trake pokazali da nema značajnih odstupanja od prosečnih na nivou raskrsnice. Takođe, rezultati su prikazani uporedno sa i bez primenjenog TZ. Kao što je metodološki definisano, za svaki od navedenih slučajeva, sa i bez TZ, utvrđeni su naredni parametri u skladu sa ponašanjem vozača u definisanom periodu vremena koji se posmatra (slika 2):

- Neiskorišćeni deo zelenog - vreme koje protekne od trenutka zaustavljanja vozila na TZ do kraja (trepćućeg) zelenog signalnog pojma;
- Neiskorišćeni deo žutog - vreme koje protekne od trenutka zaustavljanja vozila na žuti signalni pojam do kraja žutog signalnog pojma;

- Iskorišćeni deo žutog - vreme koje protekne od početka žutog do trenutka prolaska vozila na žuti signalni pojam;
- Iskorišćeni deo crvenog - vreme koje protekne od početka crvenog do trenutka prolaska vozila na crveno (samo u prvih 7 sekundi crvenog, jer ostali vozači nisu relevantni u smislu ovog istraživanja).



Slika 2. Način utvrđivanja vrednosti razmatranih parametara u zavisnosti od ponašanja vozača

U toku celokupnog istraživanja ponašanja vozača na promenu signalnog pojma posmatrano je po 1057 ciklusa kada je primenjen TZ i kada nije primenjen. U okviru posmatranih ciklusa registrovano je 1090 reakcija vozača kada je TZ primenjen, i 1039 reakcija kada isti nije primenjen. Na ovaj način, u oba slučaja, snimljena je, u proseku, jedna reakcija vozača po ciklusu na celoj raskrsnici.

Tabela 1. Broj i udeo reakcija vozača na promenu signalnog pojma na raskrsnici

Parametar	Broj vozila/reakcija		Udeo reakcija (%)	
	Sa TZ	Bez TZ	Sa TZ	Bez TZ
Zaustavljanje na zeleno	36	0	3%	0%
Zaustavljanje na žuto	333	159	31%	15%
Prolazak na žuto	660	786	60%	76%
Prolazak na crveno	61	94	6%	9%
Ukupno	1090	1039	100%	100%

U ukupnom broju slučajeva najveći procenat registrovanih slučajeva se odnosi na situaciju prolazak na žuto, 60% kada je primenjen TZ i čak 76% kada nije. Najveća razlika u reakcijama vozača primećuje se pri zaustavljanju na žuto - 31% ili 333 vozila se zaustavlja na žuto kada je TZ primenjen, i samo 15% (159 vozila) kada nije primenjen. Važno je napomenuti, da je u slučaju kada je TZ primenjen, 36 vozača potcenilo preostalu dužinu trajanja zelenog, tj. zaustavilo se na raskrsnici kada je još uvek bio dozvoljen prolaz. U slučaju kada TZ nije primenjen ovakve situacije se nisu dogodile, jer vozači nemaju informaciju da će se zeleno uskoro završiti. Kada se uporedi ponašanje vozača na početku crvenog signalnog pojma, jasno se primećuje da u slučaju kada ne postoji TZ veći broj vozača prolazi liniju zaustavljanja na crveni signalni pojam, 94 vozač u odnosu na 61 kada je primenjen TZ.

Tabela 2 predstavlja statističku analizu sva četiri parametra za oba načina rada signala, sa i bez TZ. Za svaki parametar prikazane su minimalna i maksimalna vrednost, medijana, prosečna vrednost i njeno standardno odstupanje. Prosečna vrednost neiskorišćenog dela zelenog, za vozila koja su potcenila dužinu preostalog zelenog

vremena (koja su se zaustavila na zeleno) iznosi 0,48 s sa standardnim odstupanjem od 0,33 s. Kao što je već rečeno, ovakve reakcije vozača su registrovane samo u slučaju kada je primenjeno TZ. Iako se u proseku radi o veoma maloj vrednosti neiskorišćenog dela zelenog, njegova maksimalna vrednost od 1,32 s sa aspekta efikasnosti predstavlja značajan gubitak, ali i reakciju koju ostali vozači na raskrsnici svakako ne mogu očekivati, pa može značajno uticati i na bezbednost saobraćaja.

Tabela 2. Deskriptivna statistika za sva četiri parametra na nivou raskrsnice

Parametar	Neiskorišćeni deo zelenog (s)		Neiskorišćeni deo žutog (s)		Iskorišćeni deo žutog (s)		Iskorišćeni deo crvenog (s)	
	Sa TZ	Bez TZ	Sa TZ	Bez TZ	Sa TZ	Bez TZ	Sa TZ	Bez TZ
Način rada signala								
Broj slučajeva/vozila	36	0	333	159	660	786	61	94
Min	0,07	-	0,06	0,02	0,01	0,05	0,04	0,01
Max	1,32	-	2,99	2,26	3,00	3,00	3,91	5,60
Prosek	0,48	-	1,22	0,57	1,37	1,73	0,68	0,58
Medijana	0,37	-	1,10	0,47	1,29	1,72	0,39	0,40
Stand. odstupanje	0,33	-	0,68	0,44	0,77	0,71	0,77	0,73

Kad se posmatra neiskorišćeni deo žutog, značajno veća prosečna vrednost ovog parametra se ostvaruje u slučaju kada je primenjeno TZ (1,22 s) u odnosu na situaciju kada nije primenjeno (0,57 s). Kada je TZ primenjeno maksimalna vrednost ovog parametra je približno 3 s, odnosno deo vozača se zaustavlja na samu pojavu žutog pri čemu su usporenje morali započeti u toku trajanja TZ. U slučaju kada TZ nije primenjeno, maksimalna vrednost neiskorišćenog dela žutog iznosi 2,26 s i to samo jednoj situaciji i značajno odstupa od prosečne.

U slučaju kada je primenjeno TZ, vozači koji su prošli na crveni signalni pojam, u proseku su to činili 0,68 sekundi nakon njegovog početka, bez obzira što su zabeležene situacije prolaska i posle skoro 4 sekunde trajanja crvenog. Kada TZ nije primenjeno ove vrednosti iznose 0,58 s i 5,6 s respektivno. Dobijeni rezultat da je u proseku iskorišćeni deo crvenog veći za 0,1 s u slučaju kada je primenjeno trepćuće zeleno, mora se posmatrati sa rezervom jer se radi o manjem broju vozača (61 u odnosu na 94 vozača) i o gotovo zanemarivoj razlici.

Jedan od osnovnih pokazatelja efikasnosti na signalisanoj raskrsnici je njen kapacitet, koji zavisi od efektivnog zelenog. Može se pretpostaviti da je ponašanje vozača na početku zelenog signalnog pojma identično u slučaju sa i bez TZ na kraju, te efektivno zeleno zavisi isključivo od ponašanja vozača na kraju zelenog pojma, odnosno od iskorišćenja žutog. Iskorišćenje žutog u upravljačkom smislu predstavlja ne samo deo žutog koji se koristi, već mora uzeti u obzir sva četiri definisana parametra u istraživanjima, i neiskorišćeni deo zelenog i žutog, kao i iskorišćeni deo crvenog. Imajući u vidu vrednosti ovih parametara i broj registrovanih slučajeva (tabela 2) može se utvrditi prosečno iskorišćenje žutog za situaciju sa i bez TZ:

$$b = \frac{Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2 - Q_3 \cdot t_3 - Q_4 \cdot t_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (1)$$

Gde je:

$b$  - iskorišćenje žutog signalnog pojma (s)

$Q_1$  - broj slučajeva/vozila koja su prošla na žuti signalni pojam (voz/dan)

$Q_2$  - broj slučajeva/vozila koja su prošla na crveni signalni pojam (voz/dan)

$Q_3$  - broj slučajeva/vozila koja su se zaustavila na zeleni signalni pojam (voz/dan)

$Q_4$  - broj slučajeva/vozila koja su se zaustavila na žuti signalni pojam (voz/dan)

$t_1$  - prosečna vrednost iskorišćenja žutog za vozila koja su prošla na žuto (s)

$t_2$  - prosečna vrednost iskorišćenja žutog za vozila koja su prošla na crveno, i  $t_2 = 3 +$  prosečna vrednost iskorišćenog dela crvenog, jer su ova vozila realno iskoristila celokupno žuto (3 s) i dodatno deo crvenog (s)

$t_3$  - prosečna vrednost neiskorišćenog dela zelenog,  $t_3 = 3 +$  prosečna vrednost neiskorišćenog dela zelenog, jer ova vozila nisu iskoristila celokupno žuto (3 s) i dodatno deo zelenog (s)

$t_4$  - prosečna vrednost neiskorišćenog dela žutog za vozila koja su se zaustavila na žuto (s)

Primenom formule (1) mogu se dobiti odgovarajuće vrednosti iskorišćenja žutog za slučaj sa ( $b_{s.t.}$ ) i bez TZ ( $b_{b.t.}$ ):

$$b_{s.t.} = \frac{660 \cdot 1.37 + 61 \cdot (3 + 0.68) - 36 \cdot (3 + 0.48) - 333 \cdot 1.22}{660 + 61 + 36 + 333} = 0.55 \text{ s} \quad (2)$$

$$b_{b.t.} = \frac{786 \cdot 1.73 + 94 \cdot (3 + 0.58) - 0 \cdot (3 + 0) - 159 \cdot 0.57}{786 + 94 + 0 + 159} = 1.55 \text{ s} \quad (3)$$

Može se primetiti da je u slučaju kada TZ nije primenjeno efektivno zeleno za jednu sekundu duže u odnosu na slučaj kada je TZ primenjeno. Samim tim, može se zaključiti da primena TZ dovodi do smanjanja kapaciteta raskrsnice uz nejasne prednosti po pitanju bezbednosti iste, ukoliko se imaju u vidu rezultati ovih istraživanja kao i rezultati drugih istraživača iz literature (povećan broj naletanja od pozadi).

#### 4. ZAKLJUČAK

Primenom trepćućeg zelenog dolazi do značajnog povećanja broja vozila koja se zaustavljaju na žuti signalni pojam, u odnosu kada TZ nije primenjeno. Takođe, u slučaju primene TZ u 3% slučajeva došlo je do zaustavljanja čak i na zeleni signalni pojam. Na ovaj način, u radu je pokazano da dolazi do smanjenja efektivnog zelenog vremena za 1 s, a time, proporcionalno dužini zelenog, i samog kapaciteta. Ovaj uticaj može biti značajan naročito kod kratkih zelenih vremena, kao i na raskrsnicama koje funkcionišu pri kapacitetu. Dobijeni rezultati mogu predstavljati jedan od osnova za odlučivanje u inženjerskoj praksi o primeni TZ. Buduća istraživanja bi trebalo da obuhvate veći broj raskrsnica sa različitim geometrijskim i saobraćajnim karakteristikama, kako bi se utvrdio uticaj istih na ponašanje vozača na kraju zelenog signalnog pojma. Takođe, zbog jasno utvrđenog uticaja na dužinu efektivnog zelenog vremena, značajno bi bilo utvrditi uticaj dužine zelenog signalnog pojma na ponašanje vozača. Na taj način bi mogle biti definisane inicijalne preporuke i kriterijumi za primenu TZ, koji bi mogli koristiti inženjerima pri odluci u kojim situacijama primeniti TZ.

#### LITERATURA

- [1] Pravilnik o saobraćajnoj signalizaciji. Službeni glasnik Republike Srbije, broj 85/17
- [2] Köll, H., Bader, M., Axhausen, K. W. (2004). Driver behaviour during flashing green before amber: a comparative study. Accident Analysis & Prevention 36 (2), 273 - 280.
- [3] Tang, K., Xu, Y., Wang, F., Oguchi, T. (2016). Exploring stop-go decision zones at rural high-speed intersections with flashing green signal and insufficient yellow time in China. Accident Analysis & Prevention 95, 470 - 478

