

Primljen / Received: 9.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 14.8.2018.

Prihvaćen / Accepted: 14.11.2018.

Dostupno online / Available online: 10.3.2019.

Prijedlog vremenskog usklađenja semafora na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima

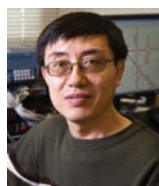
Autori:



Prof.dr.sc. **Yetis Sazi Murat**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Pamukkale, Turska
Građevinski fakultet
ysmurat@pau.edu.tr



Mr.sc. **Ziya Cakici**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Bayburt, Turska
Građevinski fakultet
ziyacakici@bayburt.edu.tr



Prof.dr.sc. **Zong Tian**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Nevadi
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo i ekologiju
zongt@unr.edu

Prethodno priopćenje

Yetis Sazi Murat, Ziya Cakici, Zong Tian

Prijedlog vremenskog usklađenja semafora na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima

U radu se ocjenjuje odnos između količine vozila koja skreću lijevo i prostora za čekanje na semaforiziranim kružnim raskrižjima, te se predlaže postupak za izračun vremenskog ciklusa promjene svjetala na semaforima. Definiraju se i parametri vezani za razne korake razvoja novog izraza/modela. Korištena su četiri različita scenarija promjene svjetala. Rezultati pokazuju da se predloženi izraz može koristiti za projektiranje semaforiziranih kružnih raskrižja.

Ključne riječi:

promet, raskrižje, semaforizirana kružna raskrižja, simulacija, VISSIM

Preliminary note

Yetis Sazi Murat, Ziya Cakici, Zong Tian

A signal timing assignment proposal for urban multi lane signalised roundabouts

The relationship between the left-turning traffic volume and the storage area at signalised roundabouts is investigated, and a calculation procedure for signal timing is proposed in this paper. The parameters associated with the developing stages of a new expression/model are also defined. Four different signal timing scenarios are considered. The results show that the proposed formula can be used for the design of signalised roundabouts.

Key words:

traffic, intersection, signalised roundabouts, simulation, VISSIM

Vorherige Mitteilung

Yetis Sazi Murat, Ziya Cakici, Zong Tian

Vorgeschlagene zeitliche Angleichung der Ampeln an städtischen mehrspurigen Kreisverkehren mit Ampeln

In der Abhandlung wird das Verhältnis zwischen der Menge der linksabbiegenden Fahrzeuge und des Warteraums an Kreisverkehren mit Ampeln beurteilt, und es wird ein Verfahren zur Berechnung des Zeitzyklus der Ampelumschaltung vorgeschlagen. Definiert werden auch die Parameter in Bezug auf verschiedene Entwicklungsschritte des neuen Modells. Verwendet wurden vier unterschiedliche Szenarien der Ampelumschaltung. Die Ergebnisse zeigen, dass der vorgeschlagene Entwurf für die Projektierung von Kreisverkehren mit Ampeln verwendet werden kann.

Schlüsselwörter:

Verkehr, Kreuzung, Kreisverkehr mit Ampel, Simulation, VISSIM

1. Uvod

Stalan porast broja stanovnika na globalnoj razini i sve veći broj automobila uzrok su mnogim poteškoćama s kojima se u današnje vrijeme suočavamo. Gubitak ljudskih života u prometnim nesrećama, česta zagušenja prometa i nepovoljni utjecaji na okoliš, samo su neki od tih problema. Već se desetljećima razmatraju različite metode za reguliranje prometa na raskrižjima kako bi se umanjili negativni utjecaji zagušenja prometa. Smatra se da su kružna raskrižja jedno od rješenja koje bi moglo pridonijeti poboljšanju situacije. Mnoge države poput Kine, Velike Britanije, Francuske, Švedske, Australije, Nizozemske i Turske već koriste semafore na nekim kružnim raskrižjima, osobito u slučajevima intenzivnog pješačkog i motornog prometa. Takva su raskrižja kombinacija semaforiziranih raskrižja i kružnih raskrižja. Općenito primjenjuju se u slučaju porasta prometnog opterećenja kao i u slučaju nepoštivanja prometnih propisa zbog kojih se kapacitet kružnog raskrižja značajno smanjuje te se javljaju zastoji u kružnom raskrižju. Primjena semaforiziranih kružnih raskrižja može umanjiti čekanje/zastoj na raskrižju te povećati razinu prometne sigurnosti [1]. Još jedan značajan razlog za korištenje semaforiziranih kružnih raskrižja jest ponašanje vozača na kružnim raskrižjima bez semafora. U nekim zemljama u razvoju vozači nisu naviknuli na vožnju u kružnim raskrižjima pa se u takvim područjima bilježi znatna tendencija nepoštivanja prometnih propisa. Dakle, regulacija prometa pomoću semafora primjenjuje se na kružnom raskrižju kako bi se smanjio broj prometnih nesreća i istovremeno povećao kapacitet takvih raskrižja.

Iako se u protekla dva desetljeća u čitavom svijetu bilježi značajan porast broja semaforiziranih kružnih raskrižja, znanstvenici koji se bave područjem prometa još uvijek se suočavaju s brojnim pitanjima i nepoznicama u vezi s upravljanjem i projektiranjem semaforiziranih kružnih raskrižja. U odgovarajućoj literaturi se objašnjavaju učinci kapaciteta raskrižja i razine uslužnosti semaforiziranih kružnih raskrižja. Povećanje kapaciteta i razine uslužnosti na semaforiziranim kružnim raskrižjima najvažnija su pitanja vezana uz semaforizirana kružna raskrižja i njihovu primjenu. Svakako su potrebna dodatna istraživanja kako bi se unaprijedilo ovo područje, pri čemu se treba usmjeriti na relevantne ekološke, ekonomske i društvene učinke i utjecaje [2].

Iako je do sada objavljen velik broj studija o semaforiziranim raskrižjima i nesemaforiziranim kružnim raskrižjima, ipak još uvijek nema dovoljno studija o semaforiziranim kružnim raskrižjima [3-11]. Akcelik u svojim studijama uspoređuje kružna raskrižja s prilagodnim semaforima i bez tih semafora. Njegov je zaključak da se u nekim slučajevima učinkovitost kružnih raskrižja može poboljšati primjenom mjernih semafora [12, 13]. Natalizio [14] analizira djelotvornost i svrhovitost mjernih semafora [12, 13]. Brabender i Vereeck [15] navode da su kružna raskrižja značajno alternativno rješenje za smanjenje broja prometnih nesreća. Prema

njihovom istraživanju smanjenje broja prometnih nesreća usko je povezano s ograničenjem brzine na glavnim cestama i obilaznicama. Oni u zaključku navode da semaforizirana kružna raskrižja predstavljaju najsigurniji tip raskrižja. Qian i dr. [16] uspoređuju mjerne semafore na običnim kružnim raskrižjima sa semaforiziranim kružnim raskrižjima i navode da su semaforizirana kružna raskrižja učinkovit način za potpuno rješavanje ili barem smanjenje prometnih zagušenja na raskrižjima sa srednjom ili visokom gustoćom prometa. Maher [17] predlaže novi pristup pitanju optimizacije intervala semafora koji se temelji na metodi unakrsne entropije. Ova solucija doprinosi učinkovitijem rješavanju složenih problema kombinatoričke optimizacije. Bai i dr. [18] istražuju utjecaj promjera semaforiziranih kružnih raskrižja i vremenskih ciklusa na kašnjenje vozila u raskrižju. U svojoj studiji oni primjenjuju numeričke proračune i eksperimentalne pristupe te navode da veći polumjer središnjih otoka dovodi do povećanja prosječnog vremena kašnjenja vozila. Johnnie i dr. [19] pokušavaju odrediti razinu uslužnosti kružnih raskrižja sa semaforom i bez semafora. Oni u zaključku navode da se u slučaju gustog prometa razina uslužnosti može poboljšati primjenom semaforiziranih kružnih raskrižja. Tracz i Chodur [20] istražuju prednosti i nedostatke raznih tipova planova faza koji se primjenjuju na semaforiziranim kružnim raskrižjima. U svojoj su analizi odabrali semaforizirana kružna raskrižja s visokom gustoćom prometa na gradskim arterijama, te predlažu detaljan prikaz projektiranja središnjih otoka. Oni također navode da su kružna raskrižja sa semaforima učinkovitija kod velikog broja lijevih skretanja. Ma i dr. [21] predlažu poboljšanje optimalizacijskog modela uzimajući istovremeno u obzir horizontalnu signalizaciju i intervale izmjene svjetala na semaforiziranim kružnim raskrižjima. U tom smislu predlažu maksimalni kapacitet i minimalne cikluse i vremena prolaska kako bi se postigao optimalan rad semaforiziranih kružnih raskrižja. Gokce i dr. [22] naglasak stavljaju na optimalizaciju izmjene svjetala na semaforiziranim kružnim raskrižjima. U istraživanju oni primjenjuju metodu optimizacije rojem čestica, tj. jedan od metaheurističkih algoritama, a rezultati studije su ohrabrujući. Cheng i dr. [23] predlažu novi model za izračunavanje kapaciteta semaforiziranih kružnih raskrižja. Gardziejczyk i Motylewicz [24] istražuju utjecaj vrste raskrižja na razinu buke u blizini semaforiziranih kružnih raskrižja. Hatami i Aghayan [25] uspoređuju učinkovitost eliptičnih kružnih raskrižja s modernim i turbo kružnim raskrižjima i s kontrolom prometa pomoću semafora. Oni u zaključku studije navode najveće kapacitete modernih i eliptičnih kružnih raskrižja sa semaforom i bez njega.

Predstavljena analiza upućuje na nedovoljan broj studija u kojima se obrađuje učinkovitost i optimalan rad semaforiziranih kružnih raskrižja. U literaturi nije dovoljno ispitan odnos između lijevih skretanja i prostora za čekanje. Iako se semaforizirana kružna raskrižja koriste u mnogim državama, intervali izmjene svjetala još uvijek nisu dobro definirani. Rješavanje tih nedostataka jedan je od bitnih ciljeva ovog rada.

2. Definicija problema i ciljevi

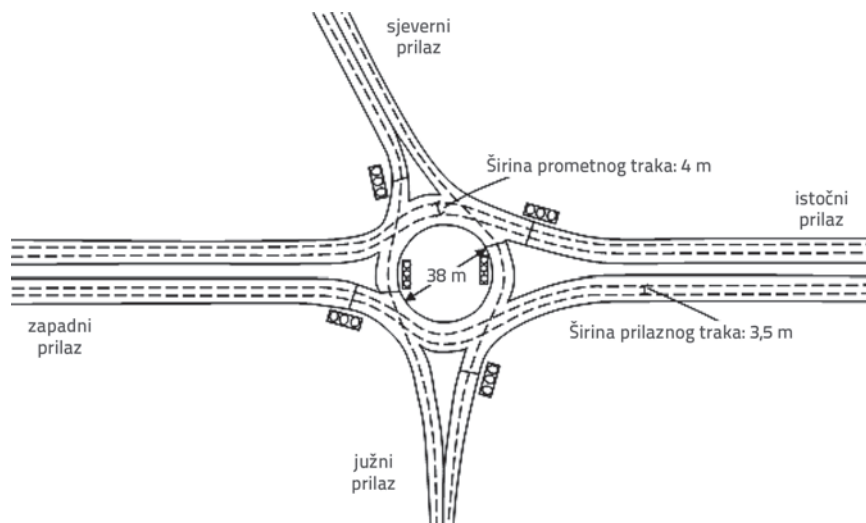
U ovom se radu razmatra problem gradskih višetračnih semaforiziranih kružnih raskrižja s etapnom kontrolom semafora. Etapna kontrola znači da su u prometnom toku predviđena dva zaustavna mjesta: prvo se nalazi na prilazu kružnom toku a drugo uz središnji otok. Tu se javljaju dva pitanja: projektiranje prostora za čekanje koji treba biti dostatan za lijeva skretanja i određivanje vremenskog ciklusa semafora. Ako ciklus semafora nije dobro projektiran, tj. ako nije prilagođen za skretanja ulijevo, prostor za čekanje kod središnjeg otoka može biti zauzet vozilima koja skreću ulijevo pa se suprotstavljeni promet (promet iz drugog smjera) ne može odvijati sve dok se ne završi ciklus skretanja ulijevo ili dok se ne promijeni svjetlo na semaforu, što uzrokuje dodatno usporavanje prometa. U ovom se istraživanju primjenjuje pristup projektiranja kontrolnog sustava, što uključuje i razvoj novog pristupa za proračun semaforškog ciklusa.

Dvasu osnovna cilja ovog istraživanja: prikazati postupak za određivanje semaforškog ciklusa na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima te smanjiti vrijeme kašnjenja vozila. Kako bi se ti ciljevi postigli, provedene su sljedeće mjere:

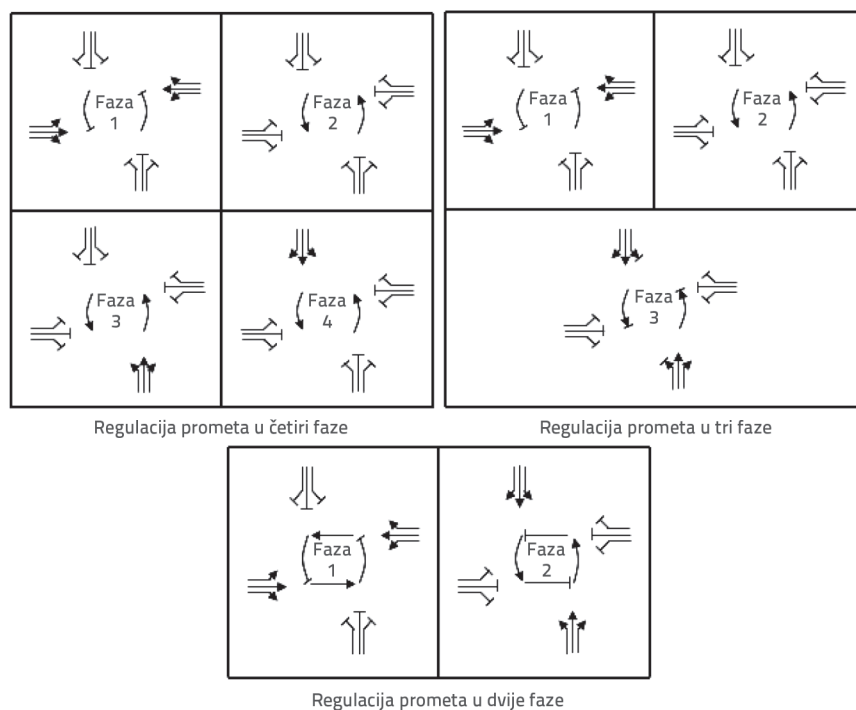
- razvijen je postupak za definiranje semaforških intervala na primjeru gradskih višetračnih semaforiziranih kružnih raskrižja u Turskoj
- razvijen je model za optimalizaciju semaforških intervala prilagođen prostoru za čekanje uz središnji otok
- definirana su četiri scenarija, a analizom je obuhvaćeno dvjesto različitih slučajeva
- za validaciju predloženog modela korišten je računalni program VISSIM, [26]
- provedena je usporedba postignutih rezultata.

3. Semaforizirana kružna raskrižja

Na semaforiziranim kružnim raskrižjima semafori se nalaze na svim krakovima raskrižja i oko središnjeg otoka. Radi se zapravo o spoju raskrižja sa semaforima i klasičnog kružnog raskrižja. Općenito uzevši, takva se raskrižja koriste kada gustoća prometa prijeđe određenu granicu, tj. kako bi se onemogućilo nepoštivanje prometnih propisa, jer neprikladno ponašanje vozača može dovesti do bitnog smanjenja kapaciteta raskrižja



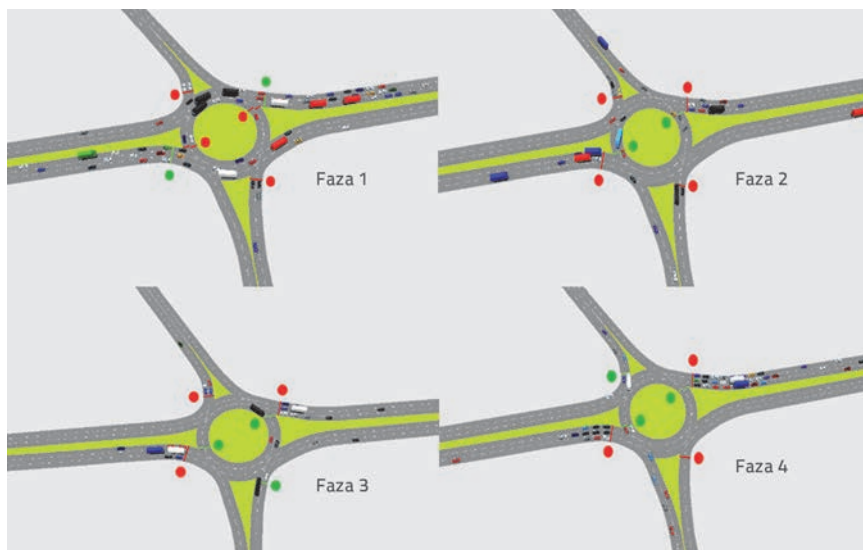
Slika 1. Geometrija raskrižja razmatrana u ovom radu



Slika 2. Plan faza semafora kao primjer za semaforizirana kružna raskrižja

te sporijeg prolaska vozila. U mnogim slučajevima, naročito u satovima vršnog prometa, mogući su veći zastoji na kružnom raskrižju. Osim nepoštivanja prometnih propisa, na kapacitet semaforiziranih kružnih raskrižja negativno utječu i vozila koja skreću ulijevo i sam sastav vozila (postotak teretnih vozila). Kako bi se uklonili ti nedostaci, treba se projektirati odgovarajuća semaforška regulacija prometa. U ovom se radu predlaže analitički pristup za proračunavanje intervala izmjene svjetla na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima. Poseban slučaj razmatran u ovom radu prikazan je na slici 1. Prometni tokovi na semaforiziranim kružnim raskrižjima obično se reguliraju u dvije, tri ili četiri faze. Na slici 2. prikazan

je plan faza semafora na semaforiziranim kružnim raskrižjima. Plan faza semafora bitno utječe na učinkovitost semaforiskog sustava. Plan faza može se definirati na temelju terenskog snimanja prometa i primjenom odgovarajućih analiza. Skretanja ulijevo, pješački promet i sastav vozila (postotak teretnih vozila) smatraju se značajnim parametrima koji se trebaju uzeti u obzir prilikom odabira plana faza. Rezultati mogu biti prilično neobjektivni ako se zanemari bilo koji od spomenutih parametara. Zato projektanti trebaju raspolagati odgovarajućim podacima ili uputama kako bi razvili održiva rješenja za semaforizirane kružne tokove. Kako bi se što bolje razumio primjer plana faza, na slici 3. prikazano je kretanja prometnih tokova kroz četiri faze.



Slika 3. Prometni tokovi za slučaj vođenja prometa u četiri faze

3.1. Parametri

Sljedeći se parametri trebaju uzimati u obzir prilikom projektiranja i korištenja semaforiziranih kružnih tokova:

- geometrijski uvjeti
- projektni elementi
- prometno opterećenje
- udio lijevih skretača
- prostor za čekanje uz središnji otok za vozila koja skreću ulijevo
- vremenski slijed semaforiskih signala.

Ako u fazi projektiranja projektant nema na raspolaganju na terenu utvrđene vrijednosti nekih od gornjih parametara, tada se odgovarajuće vrijednosti trebaju pretpostaviti. Takve pretpostavljene vrijednosti ne moraju odgovarati stvarnim vrijednostima dobivenima na temelju istraživanja na terenu, a to može dovesti do izrade neadekvatnog projekta. S druge strane, na tržištu nisu dostupni programi koji bi pridonijeli boljem projektiranju semaforiziranih kružnih tokova. Dakle,

postoji potreba za uputama ili proračunskim postupkom za projektiranje semaforiziranih kružnih tokova.

3.1.1. Geometrijski uvjeti

Geometrijski uvjeti na kružnom toku znatno utječu na kvalitetu projektiranja. Geometrijski elementi ili komponente kao što su polumjer okretanja, širina traka, polumjer središnjeg otoka itd. trebaju biti u skladu s odgovarajućim normama. Projektiranje raskrižja s nestandardnim elementima može uzrokovati pojavu raznih nedostataka. Neodgovarajuće projektiranje može dovesti i do umanjenog kapaciteta raskrižja.

3.1.2. Prostor za čekanje uz središnji otok za vozila koja skreću ulijevo

Prostor za čekanje uz središnji otok za vozila koja skreću ulijevo treba udovoljavati odgovarajućim uvjetima kako bi se promet odvijao uz minimalne zastoje. Osnovni elementi koji se pritom trebaju uzeti u obzir jesu broj i dimenzije prometnih trakova u kružnom kolniku. Projektant dakle treba voditi računa o tim elementima te prikupiti odgovarajuće podatke s terena kao što su informacije o veličini prostora za vozila koja skreću ulijevo.

3.1.3. Udio lijevih skretača

Uz geometrijske uvjete i veličinu prostora za čekanje, i udio lijevih skretača bitno utječe na projektiranje semaforiziranih kružnih raskrižja. Broj i sastav vozila također su važni za prikladno projektiranje.

Intervali semafora koji reguliraju promet u kružnom kolniku trebaju se odrediti na temelju gustoće prometa, a tu je naročito značajan postotak teških vozila. Također se treba pratiti variranje prometa u vršnim i izvanvršnim razdobljima, te se trebaju bilježiti trendovi tog variranja. Ako se to ne napravi, definirani semaforiski intervali mogu biti nedovoljni za postojeći promet, pa bi neka vozila morala duže čekati u raskrižju. Takvo nepravilno definiranje vremenskih intervala često dovodi i do prometnih zastoja. Pri određivanju gustoće prometa ulijevo, posebno se treba usmjeriti na broj teških vozila. Do zastoja u prometu dolazi ako je broj teških vozila veći od očekivanog. Osim toga, takav sastav vozila može negativno utjecati na izlazak vozila [27, 28]. Dakle, udio teških vozila treba se pratiti i analizirati već u stadiju projektiranja.

3.1.4. Vremenski slijed semaforских signala

Adekvatno projektiranje slijeda semaforских signala uvelike utječe na učinkovitost sustava za kontrolu prometa na raskrižjima. Iako nam je danas na raspolaganju velik broj programa za simuliranje i projektiranje raskrižja, u tim se programima zasebno ne obrađuje pitanje vremenskog slijeda semaforских signala na semaforiziranim kružnim raskrižjima. Neki mikrosimulacijski programi kao što su VISSIM i AIMSUN mogu se koristiti samo za analizu učinkovitosti, tj. u njima se ne analizira pitanje projektiranja vremenskog slijeda semaforских signala. Zbog toga je projektiranje slijeda semaforских signala pravi izazov za projektante, a rezultati mogu biti poprilično različiti ovisno o projektantovu znanju i sposobnostima predviđanja. Kako bi se u tom segmentu stanje popravilo, u radu se predlaže pristup za projektiranje slijeda semaforских signala na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima. Taj je pristup opisan u sljedećem poglavlju.

4. Metoda za određivanje vremenskog slijeda semaforских signala na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima

Prvu metodologiju za određivanje slijeda semaforских signala uveo je Webster prije gotovo sedam desetljeća (tj. 1950. godine). U međuvremenu su razvijene mnoge naprednije metode (HCM, Akcelik, CCG itd.). Semafori su se na kružnim raskrižjima počeli upotrebljavati tek u novije vrijeme. Oni se primjenjuju u slučajevima vrlo gustog prometa ili zbog nepoštivanja prometnih propisa na običnim kružnim raskrižjima. Iako im je cilj kontrola prometnih tokova i sprečavanje prometnih prekršaja, semafori se koriste samo na kružnim raskrižjima kod kojih se primjenjuje etapno aktiviranje semafora (bez prostora za čekanje u kružnom toku). Osnovna novina ovog rada sastoji se u izlaganju nove metode za primjenu gradskih višetračnih

semaforiziranih kružnih raskrižja na kojima se oko središnjeg otoka nalazi prostor za čekanje, a promet se regulira pomoću neke od etapnih intervala prikazanih na slici 2. Predloženi pristup projektiranju vremenskog slijeda semaforских signala objašnjen je dijagramom toka (slika 4.).

Kao što se može uočiti na gornjem dijagramu, u početku se određuje vremenski slijed signala bez razmatranja opcije kružnog raskrižja. U drugom se koraku određuje optimalno trajanje zelenog svjetla i trajanje ciklusa (g_r , C_r). Za ove se potrebe mogu koristiti formule vremena ciklusa i zelenih intervala koje su definirane u HCM-u ili koje je odredio Akcelik. U trećem se koraku određuje broj ciklusa u jednom satu (n_c). Nakon toga se određuje prostor čekanja definiranjem broja redova vozila. U petom se koraku izračunava izgubljeno vrijeme odlaznih vozila u prostoru čekanja (α) i vrijeme slijeda (λ). Zatim se izračunava trajanje zelenog svjetla kod središnjeg otoka (ϕ) uzimajući u obzir koeficijent kalibracije (ε) slijeda signala. U sedmom se koraku izračunava novo vrijeme ciklusa (C_{new}) u svezi s vremenom zelenog svjetla kod središnjeg otoka (ϕ). Koeficijent kalibracije se provjerava te se po potrebi ponovno izračunava vrijeme zelenog signala kod središnjeg otoka (ϕ) i vrijeme ciklusa. Nakon toga se provjerava vrijeme ciklusa. Ako nije u skladu s projektantovim proračunom, postupak se ponavlja od šestog. koraka. Na kraju se provjeravaju vrijednosti stupnja zasićenosti za prometne tokove i raskrižje. Usvojena granična vrijednost stupnja zasićenosti iznosi 0,9, tj. treba biti jednaka ili manja od 0,9. Ako je ovaj korak uspješno proveden, postupak projektiranja je dovršen. Ako to nije slučaj, zadaje se drugo vrijeme ciklusa.

Kao što je objašnjeno u dijagramu toka, zeleno svjetlo kod središnjeg otoka smatra se jednim od najznačajnijih parametara. Taj model objašnjen je izrazom (1) [2, 29]:

$$\phi = \alpha + [(n-1) \cdot \lambda] + \varepsilon \quad (1)$$

gdje je:

ϕ - vrijeme zelenog svjetla kod središnjeg otoka (s)

α - izgubljeno vrijeme odlaznih vozila u prostoru za čekanje (s)

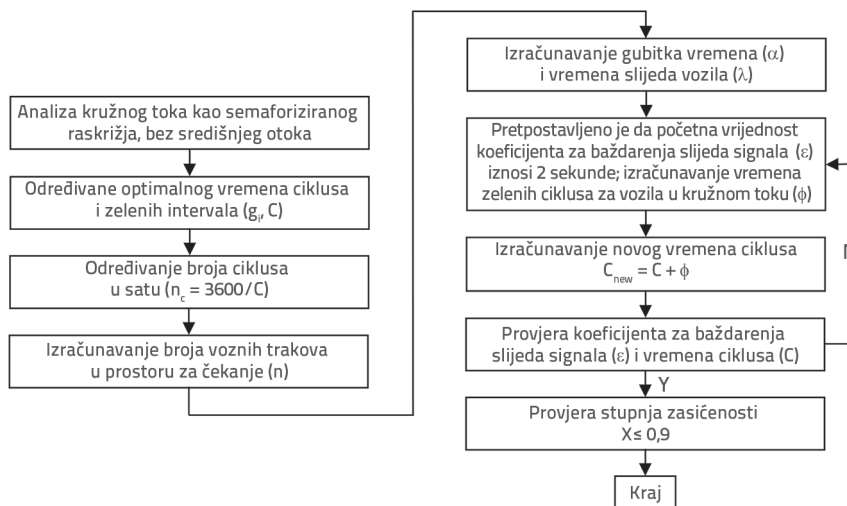
n - broj trakova u prostoru za čekanje

λ - vrijeme slijeda (s)

ε - koeficijent kalibracije slijeda signala
 α ; izgubljeno vrijeme vozila u koloni može se odrediti na temelju terenskih opažanja

n - broj trakova u prostoru za čekanje
o broju traka u prostoru za čekanje i o broju ciklusa u satu.

To se može odrediti pomoću izraza (2) [2, 29]:



Slika 4. Koraci predloženog postupka za definiranje vremenskog slijeda semaforских signala

$$n = \frac{q_L}{(n_c \times n_{SL})} \quad (2)$$

gdje je:

q_L - broj lijevih skretača (voz/sat),

n_c - broj ciklusa u satu ($n_c = 3600/C$),

n_{SL} - broj traka u prostoru za čekanje.

Prostor za čekanje i središnji otok ne razmatraju se prvobitno u proračunu vremenskog ciklusa signala za kružni tok, t. To se ponovno izračunava pomoću izraza (1) i (2). Na taj se način povećava novo vrijeme ciklusa dok se broj ciklusa u satu smanjuje. Zato se i broj trakova u prostoru za čekanje također povećava te je potrebno dodatno vrijeme za odlazna vozila u prostoru za čekanje. Kako bi se udovoljilo tom zahtjevu, koeficijent kalibracije slijeda signala kod središnjeg otoka dodaje se izrazu (1). Na početku proračunskog postupka pretpostavljeno je da vrijednost ϵ iznosi dvije sekunde. To je provjereno nakon ponovnog proračuna pomoću izraza (3). Ako je zadovoljen uvjet dodatnog vremena za odlazna vozila, proračun se nastavlja provedbom sljedećeg koraka. Ako to nije slučaj, proračun se vraća dva koraka unatrag. Postupak za proračun ovog koeficijenta može se izraziti na sljedeći način [2, 29]:

$$\epsilon = \left[\frac{q_L}{t_{Cadd} \times n_{SL}} \right] \times 2 \quad (3)$$

U ovoj izrazu (3) t_{Cadd} predstavlja dodatno vrijeme, a može se izračunati pomoću izraza (4) [2, 29]:

$$t_{Cadd} = \left[\frac{3600}{(C_{new})} - \frac{3600}{(C)} \right] \quad (4)$$

Izrazom (4) iskazuje se proračun potrebnog dodatnog vremena za prometne tokove na kružnom kolniku zbog povećanja vremena ciklusa. Vremenski slijed izračuna pomoću izraza (4) koristi se u izrazu (3), te se dobiva vrijednost koeficijenta kalibracije. Nakon toga se ta vrijednost uspoređuje s početnom vrijednošću (dvije sekunde). Kada je ta vrijednost manja od početne vrijednosti, postupak se nastavlja provođenjem sljedećeg koraka. Ako to nije slučaj, izračunava se novo vrijeme ciklusa te se postupak nastavlja iterativno. Za kalibriranje postupka proračuna predlažu se izrazi (3) i (4).

Predloženi izraz za slijed signala ispituje se razmatranjem različitih slučajeva. Provjera izraza prikazana je u sljedećem poglavlju.

5. Validacija

Validacija je provedena pomoću podataka dobivenih na stvarnom raskrižju (raskrižje Pekdemir) u Denizliju u Turskoj. Na raskrižju Pekdemir križaju se u smjeru istok-zapad dvije glavne ceste, a u smjeru sjever-jug dvije ceste nižeg reda (sekundarne ceste). Glavne ceste imaju po tri traka u svakom smjeru, a ceste nižeg reda imaju dva traka. Raskrižje je kontrolirano kroz četiri faze semafora, kako je to opisano na slici 2.

Terenska istraživanja pokazuju da se večernji vršni sat u radnom danu i jutarnji vršni sat tijekom vikenda mogu definirati kao sati najvećeg prometnog opterećenja na raskrižju Pekdemir. Stoga je odlučeno da se opažanje i brojenje prometa obavi u srijedu između 05:00 i 06:00 popodne za brojenje tijekom tjedna, tj. u subotu između 08:30 i 09:30 ujutro za brojenje tijekom vikenda. Detaljni podaci o prometu (odnos između teretnih i osobnih vozila, polumjer okretanja itd.) dobiveni su primjenom metode brojenja i analize prometa u HCM-u [30]. U okviru terenskih opažanja, na svaki su prilaz raskrižju postavljene videokamere za

Tablica 1. Osnovne vrijednosti potražnje

Vrsta kretanja	Izvorišno-određišni smjerovi	Niska potražnja (osnovne vrijednosti)			Visoka potražnja (osnovne vrijednosti)		
		Osobna vozila [voz/sat]	Teretna vozila [voz/sat]	Ukupno [voz/sat]	Osobna vozila [voz/sat]	Teretna vozila [voz/sat]	Ukupno [voz/sat]
Ravno	Z-I	848	105	953	1015	101	1116
	I-Z	994	86	1080	1293	82	1375
	S-J	182	20	202	231	10	241
	J-S	86	4	90	90	3	93
Desno skretanje	Z-I	11	0	11	20	0	20
	I-Z	66	4	70	157	18	175
	S-J	49	0	49	45	2	47
	J-S	35	0	35	41	1	42
Lijevo skretanje	Z-I	86	21	107	101	25	126
	I-Z	102	26	128	138	34	172
	S-J	22	6	28	26	6	32
	J-S	11	3	14	12	3	15
Ukupno (voz/sat)		2493	274	2767	3169	285	3454

Tablica 2. Primjeri eksperimentalnih slučajeva

Uzorak Br.	Smjer privoza	Stopa variranja gustoće prometa [%]	Udio lijevih skretanja [%]	Uzorak br.	Smjer pristupa	Stopa variranja gustoće prometa [%]	Udio lijevih skretanja [%]
1	I - Z	Smanjenje 50 %	10	29	I - Z	Podaci nedostupni	50
	S - J	Podaci nedostupni	10		S - J	Podaci nedostupni	10
7	I - Z	Smanjenje 50 %	40	34	I - Z	Povećanje 25 %	20
	S - J	Podaci nedostupni	10		S - J	Podaci nedostupni	60
12	I - Z	Smanjenje 25 %	10	37	I - Z	Povećanje 25 %	40
	S - J	Podaci nedostupni	60		S - J	Podaci nedostupni	10
15	I - Z	Smanjenje 25 %	30	42	I - Z	Povećanje 50 %	10
	S - J	Podaci nedostupni	10		S - J	Podaci nedostupni	60
19	I - Z	Smanjenje 25 %	50	47	I - Z	Povećanje 50 %	40
	S - J	Podaci nedostupni	10		S - J	Podaci nedostupni	10
24	I - Z	Podaci nedostupni	20	50	I - Z	Povećanje 50 %	50
	S - J	Podaci nedostupni	60		S - J	Podaci nedostupni	60

praćenje prometa u prije spomenutim vremenskim intervalima. U sljedećem su koraku zabilježene podatke o prometu analizirali prometni inženjeri te su tako utvrđeni detaljni podaci za oba vršna sata. Ukupan broj vozila u satu iznosio je 2767 voz/sat za vršni sat tijekom tjedna i 3454 voz/sat za vršni sat tijekom vikenda. Kao što se može vidjeti u tablici 1., situacija u kojoj je ukupan broj vozila manji od 3000 voz/sat obilježena je kao "niska potražnja" a situacija u kojoj je broj vozila veći od 3000 voz/sat obilježena je kao "visoka potražnja".

Tako su dobivene dvije osnovne vrijednosti potražnje. Na temelju tih osnovnih vrijednosti projektirano je eksperimentalno ispitivanje. Provedena je eksperimentalna izmjena podataka o gustoći prometa na prilazima i u udjelu lijevih skretača. Na taj je način formirano pedeset slučajeva. Primjeri eksperimentalnih slučajeva prikazani su u tablici 2.

Kao što se može vidjeti iz tablica 1. i 2., eksperimentalno su promijenjene osnovne vrijednosti situacija s niskom i visokom potražnjom. Gustoće prometa u smjeru istok-zapad su umanjene i povećane u rasponu od 0 % do 50 %. Vrijednosti za lijeva skretanja varirane su u rasponu od 10 do 60 posto.

5.1. Scenariji

Što se tiče slijeda signala, u obzir su uzeta četiri scenarija, a korišteni su prije opisani podaci. Osnovna namjena tih scenarija jest utvrđivanje najboljeg rješenja za analizirano kružno raskrižje.

U prvom se scenariju slučajevi analiziraju uzimajući u obzir postojeći slijed signala prikazan u tablici 4. i četiri faze semafora na raskrižju Pekdemir. Po završetku analize, VISSIM simulacijom su za svaki pojedini slučaj dobivena prosječna kašnjenja vozila koja označavaju stupanj učinkovitosti semaforiziranih i nesemaforiziranih raskrižja. U drugom se scenariju u obzir uzimaju slučajevi u kojima prosječno vrijeme kašnjenja vozila

iznosi više od 120 sekundi po vozilu. Ti su slučajevi analizirani primjenom istog plana faza (upravljanje u četiri faze) na raskrižju Pekdemir, pri čemu je slijed signala dobiven pomoću predložene formule. Poboļjšani slijed signala i prosječne vrijednosti kašnjenja vozila prikazani su za spomenute slućajevе u tablici 4. U trećem je scenariju naglasak na istraživanju stanja "prostora za čekanje" na semaforiziranim kružnim raskrižjima. U tu su svrhu svi slučajevi analizirani još jednom za situaciju semaforiziranih kružnih raskrižja bez prostora za čekanje. Nakon pomne analize svih slučajeva, ustanovljeno je da je gustoća prometa na prilaznim pravicima sjever-jug prilično niska (manje od 350 vozila na sat). Stoga je pretpostavljeno da se pravo prolaska na ta dva prilaza može omogućiti u istoj fazi. Pravo prolaska za prilaze zapad i istok predviđeno je u zasebnim fazama. U trećem scenariju slučajevi su analizirani za tri faze i za stalno vrijeme ciklusa od 140 s na raskrižju Pekdemir. Sljedovi signala su u svakoj fazi podijeljeni na temelju gustoće prometa na prilazima koristeći računalni program SIDRA Intersection [t]. Zatim su svi slučajevi analizirani u VISSIM-u na temelju sljedova signala dobivenih računalnim programom SIDRA Intersection. Na temelju toga je za svaki pojedini slučaj određeno prosječno vrijeme kašnjenja.

U posljednjem (četvrtom) scenariju svi su slučajevi analizirani za plan od tri faze i za optimalno vrijeme ciklusa. Optimalno vrijeme ciklusa i sljedovi signala dobiveni su za svaku fazu koristeći računalni program SIDRA Intersection na temelju gustoće prometa na prilazima. Zatim su svi slučajevi analizirani u VISSIM-u uzimajući u obzir optimalno vrijeme ciklusa i sljedove signala dobivene programom SIDRA Intersection. Na kraju su za svaki slučaj određena prosječna kašnjenja vozila.

Nakon provedbe ta četiri scenarija, za svaki je scenarij određen broj slučajeva u kojima je prosječno kašnjenje vozila ispod 120 s, i to zasebno za nisku i visoku potražnju.

Tablica 3. Prikaz gustoće prometa

Ogledni slučajevi	Broj trakova u prostoru za čekanje (trak)	Ukupna gustoća prometa [voz/sat]	Istočni prilaz	Zapadni prilaz	Sjeverni prilaz	Južni prilaz
			A.V.-L.T.V* [voz/sat]	A.V.-L.T.V* [voz/sat]	A.V.-L.T.V* [voz/sat]	A.V.-L.T.V* [voz/sat]
1	2	2180	959 - 383	803 - 321	279 - 28	139 - 14
2	2	3354	1598 - 320	1339 - 268	279 - 28	139 - 14
3	2	3354	1598 - 320	1339 - 268	279 - 167	139 - 83
4	2	3942	1917 - 192	1607 - 161	279 - 167	139 - 83
5	2	1962	861 - 431	631 - 316	320 - 32	150 - 15
6	2	2708	1292 - 387	947 - 284	320 - 32	150 - 15
7	2	2708	1292 - 387	947 - 284	320 - 192	150 - 90
8	2	4200	2153 - 215	1578 - 158	320 - 32	150 - 15
9	2	4946	2583 - 258	1893 - 189	320 - 32	150 - 15
10	2	2180	959 - 383	803 - 321	279 - 167	139 - 83
11	2	2180	959 - 479	803 - 402	279 - 28	139 - 14
12	2	2180	959 - 479	803 - 402	279 - 167	139 - 83
13	2	2767	1278 - 383	1071 - 321	279 - 28	139 - 14
14	2	2767	1278 - 383	1071 - 321	279 - 167	139 - 83
15	2	3942	1917 - 192	1607 - 161	279 - 28	139 - 14
16	2	1962	861 - 431	631 - 316	320 - 192	150 - 90
17	2	3454	1722 - 344	1262 - 252	320 - 32	150 - 15
18	2	3454	1722 - 344	1262 - 252	320 - 192	150 - 90
19	2	4200	2153 - 215	1578 - 158	320 - 192	150 - 90
20	3	2180	959 - 383	803 - 321	279 - 167	139 - 83
21	3	2767	1278 - 383	1071 - 321	279 - 28	139 - 14
22	3	3354	1598 - 320	1339 - 268	279 - 167	139 - 83
23	3	3942	1917 - 192	1607 - 161	279 - 167	139 - 83
24	3	1962	861 - 431	631 - 316	320 - 32	150 - 15
25	3	2708	1292 - 387	947 - 284	320 - 192	150 - 90
26	3	3454	1722 - 344	1262 - 252	320 - 192	150 - 90
27	3	4946	2583 - 258	1893 - 189	320 - 32	150 - 15
28	3	4946	2583 - 258	1893 - 189	320 - 192	150 - 90
29	3	2180	959 - 479	803 - 402	279 - 28	139 - 14
30	3	2767	1278 - 383	1071 - 321	279 - 167	139 - 83
31	3	2708	1292 - 387	947 - 284	320 - 32	150 - 15

*A.V.: Gustoća prometa na prilazu (eng. *Approach Volume*), L.T.V.: Gustoća prometa za skretanje ulijevo (eng. *Left Turning Volume*)

Osim tih scenarija, razmatra se i broj trakova za čekanje. Analiziran je slučaj sa dva traka za čekanje te sa tri traka za čekanje. Gustoća prometa korištena u simulaciji prikazana je u tablici 3. Rezultati prvoga i drugoga scenarija uspoređuju se radi kontrole predložene formule. Na taj je način razmotreno ukupno dvjesto različitih slučajeva. Pristup eksperimentalnog projektiranja primjenjen je za određivanje slučajeva koji će služiti za kontrolu.

U tablici 3. prikazane su ogledne gustoće prometa s različitim udjelima lijevih skretača za svaki prilaz i s brojem trakova u

kružnom kolniku. Te su vrijednosti projektirane uzimajući u obzir osnovne vrijednosti zabilježene na raskrižju i definirane u tablicama 1. i 2. Kako se može vidjeti u tablici, smjerovi istok-zapad na kojima se bilježi veći promet odnose se na glavne prometnice. Broj vozila koja skreću ulijevo iz smjera istok-zapad ključan je za raskrižje, a zbog neodgovarajućeg slijeda signala i rasporeda faza za lijevo skretanje, na raskrižju dolazi do prometnih zagušenja i to naročito u satima vršnog prometa.

6. Analiza

6.1. Simulacijska istraživanja i rezultati

Validacija izraza (1) provedena je pomoću simulacije. U tu je svrhu korišten program SIDRA Intersection i mikrosimulacijski

programski paket VISSIM [26, 31]. Kao što je navedeno u poglavlju o metodologiji, kružno raskrižje se najprije razmatra kao semaforizirano raskrižje, a vrijeme ciklusa se izračunava pomoću programa SIDRA Intersection. Zatim se pomoću predložene formule određuje novo vrijeme ciklusa te se učinkovitost formule analizira simulacijom pomoću programa

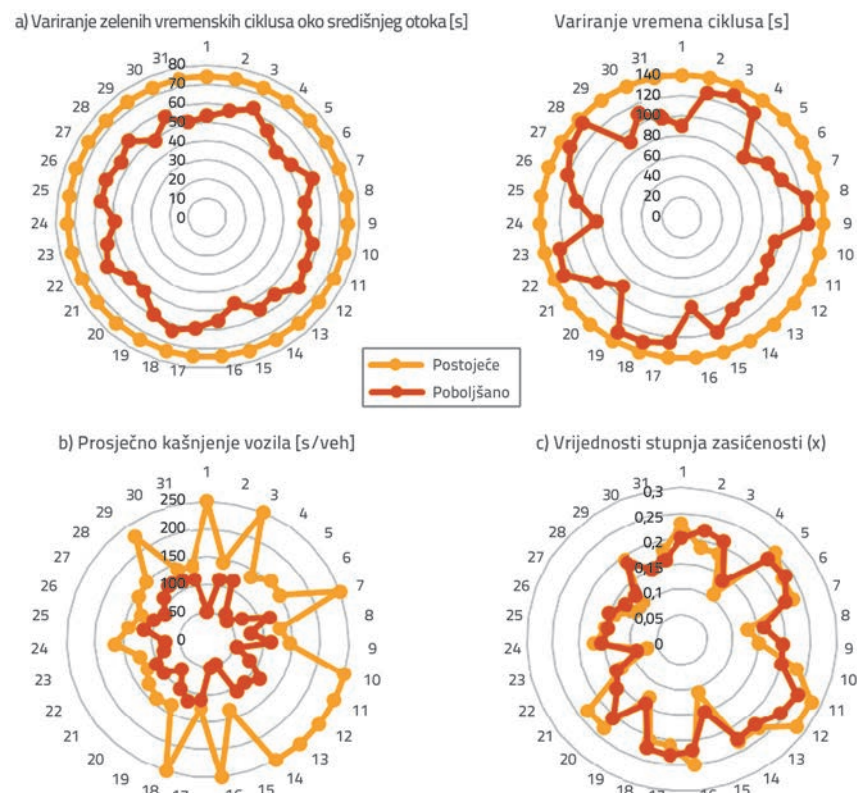
Tablica 4. Usporedba slijeda signala i prosječnih vrijednosti kašnjenja vozila

Ogledni slučajevi	Postojeći slijedovi signala [s]	Poboljšani slijedovi signala [s]				Vrijeme ciklusa [s]		Prosječno kašnjenje vozila [s/voz]		LOS (razina služnosti)	
		Zeleni ciklus zapad-istok [s]	Područje čekanja – zeleni ciklus (s)	Sjever – zeleni ciklus [s]	Jug – zeleni ciklus (s)	Postojeći	Poboljšani	Postojeći	Poboljšani	Postojeći	Poboljšani
1	Zeleni ciklus: 74 Sjever – zeleni ciklus: 20, Jug – zeleni ciklus: 23 Područje čekanja – zeleni ciklus: 40 – 50, Zapad – zeleni ciklus: 20, Jug – zeleni ciklus: 23	17 – 21	53	12	8	140	90	*	51,54	F	D
2		43 – 52	57	15	9	140	125	143,03	111,44	F	F
3		43 – 52	62	18	11	140	130	*	116,66	F	F
4		46 – 54	55	16	11	140	125	136,64	55,96	F	E
5		14 – 19	50	12	9	140	85	154,48	47,72	F	D
6		25 – 32	52	12	8	140	100	151,57	72,27	F	E
7		23 – 30	59	16	11	140	105	*	116,91	F	F
8		42 – 57	52	13	8	140	125	129,81	77,07	F	E
9		43 – 58	51	11	8	140	125	146,07	112,92	F	F
10		18 – 22	57	15	9	140	95	*	55,48	F	E
11		18 – 22	57	12	8	140	95	*	84,68	F	F
12		18 – 23	61	15	9	140	100	*	118,17	F	F
13		26 – 30	54	13	8	140	100	*	101,64	F	F
14		29 – 33	56	14	9	140	105	*	107,91	F	F
15		48 – 56	48	12	8	140	120	133,36	47,12	F	D
16		14 – 19	55	14	10	140	90	*	51,42	F	D
17		40 – 50	59	15	9	140	125	124,57	110,64	F	F
18		41 – 51	63	17	11	140	130	*	117,01	F	F
19		41 – 55	59	17	11	140	130	135,83	101,22	F	F
20		18 – 22	52	13	9	140	90	140,38	71,40	F	E
21		33 – 37	52	12	9	140	105	132,51	98,56	F	F
22		47 – 55	59	16	11	140	130	120,31	102,35	F	F
23		45 – 54	55	16	11	140	125	124,38	81,73	F	F
24		16 – 20	49	10	8	140	85	165,51	76,49	F	E
25		25 – 32	57	15	11	140	105	141,19	114,78	F	F
26		39 – 47	57	15	11	140	120	126,51	102,96	F	F
27		45 – 60	54	14	9	140	130	145,88	88,87	F	F
28		46 – 61	58	16	11	140	135	150,13	109,45	F	F
29		21 – 25	49	10	8	140	90	226,25	119,70	F	F
30		33 – 37	57	15	11	140	110	136,37	114,41	F	F
31		25 – 33	51	12	8	140	100	136,59	110,55	F	F

* Prosječno kašnjenje vozila > 250 s/voz, Ukupno crveno vrijeme: 4+4=8 s, Žuto vrijeme: 2+2=4 s (na početku i kraju svake etape)

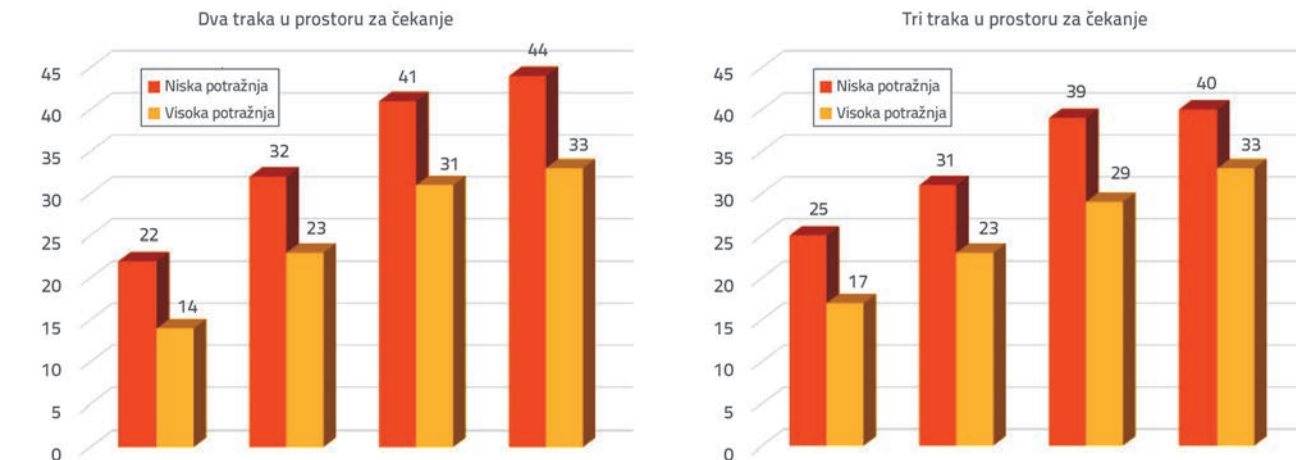
VISSIM. Za simulaciju se koriste postojeći slijed signala i redoslijed faza na raskrižju. Osim postojećih vrijednosti slijeda signala, koriste se i nove vrijednosti slijeda, izračunane pomoću formule. Prosječno kašnjenje vozila na raskrižju u simulacijama se uzima u obzir kao kriterij učinkovitosti. Na ovaj su način ispitani prethodno definirani scenariji. Prosječne vrijednosti kašnjenja vozila (s/voz) i razine uslužnosti uspoređuju se pomoću postojećeg slijeda signala i predloženih podataka o slijedu. Rezultati usporedbe sažeto su prikazani u tablici 4. i na slici 5. Ti rezultati predstavljaju usporedbu između prvoga i drugoga scenarija.

Kao što se može vidjeti u tablici 4. i na slici 5., predloženim se izrazom dobivaju vrijednosti koje su mnogo logičnije od postojećih vrijednosti. Na primjer, vrijeme zelenog svjetla za središnji otok iznosi 74 s za postojeće uvjete, dok se predloženom formulom dobivaju različite vrijednosti u rasponu od 49 s i 62 s. Slični su rezultati dobiveni i za vremena ciklusa. Vremena ciklusa za postojeće uvjete iznose 140 s, a predloženim izrazom dobivaju se različite i niže vrijednosti od postojećih. Sljedovi signala dobiveni formulom uglavnom su niži od postojećih vrijednosti i mogu se uočiti određene uštede u segmentu prosječnog kašnjenja vozila. Simulacije pokazuju da se smanjenje kašnjenja otprilike od 36 % može postići ako se umjesto postojećih slijedova signala koristi predložena formula. Znatno smanjenje prosječnog vremena kašnjenja dovodi do znatnih ušteda u gorivu i do manjih emisija plinova te naravno i do koristi zbog kraćega čekanja. Na slici 5.c prikazana je usporedba za stupanj zasićenosti i to za središnji otok kružnog raskrižja. Rezultati su slični onima koje smo već iznijeli. Vrijednosti stupnja zasićenosti za predloženi slijed signala mnogo su niže od onih za postojeći slijed signala. To navodi na zaključak da se učinkovitost sustava za regulaciju raskrižja može poboljšati primjenom predložene formule za definiranje slijeda signala.



Slika 5. Usporedba slučajeva za: a) slijedove signala; b) prosječna kašnjenja vozila; c) stupnjeve zasićenosti za središnji otok

Za usporedbu scenarija uzimaju se u obzir prosječne vrijednosti kašnjenja u raskrižju. U usporedbama se prosječne vrijednosti kašnjenja manje od 120 s/voz smatraju prihvatljivima. Neke usporedbe slučajeva iz scenarija prikazane su na slici 6. Kao što se vidi na slici, u drugom scenariju se bilježi poboljšanje od otprilike 40 % u odnosu na prvi scenarij, dok taj postotak iznosi



Slika 6. Usporedba brojeva slučajeva kod kojih su prosječne vrijednosti kašnjenja manje od 120 s/voz

gotovo 10 % kada se usporedi sa scenarijima tri i četiri. Te usporedbe potvrđuju pretpostavke ovog istraživanja. Na osnovi tih suporedbi predlaže se primjena predloženog izraza u projektiranju slijeda signala na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima s prostorom za čekanje uz središnji otok, na kojima se provodi regulacija kroz faze slična onima koje su prikazane na slici 2.

7. Rasprava i zaključci

U ovom je istraživanju prikazan prijedlog projektiranja slijeda signala na gradskim višetračnim semaforiziranim kružnim raskrižjima. Semaforizirana kružna raskrižja često se koriste u mnogim državama pa tako i u Turskoj. U radu se predlaže izraz za projektiranje slijedova signala. U predloženom se izrazu u obzir uzima središnji otok kružnog raskrižja i kružni prometni tokovi. Kao cilj se postavlja smanjenje kašnjenja vozila i poboljšanje postupka projektiranja. U radu je projektirano i simulirano dvije stotine različitih slučajeva. Neki od zaključaka mogu se sažeti kako slijedi:

- Za određivanje slijeda signala (i vremena ciklusa) na semaforiziranim kružnim raskrižjima potrebna je odgovarajuća uputa. Za to se može koristiti predloženi izraz koji ujedno može pomoći i u formuliranju boljih projektnih rješenja.
- Predloženi izraz odnosi se na prometovanje po kružnim raskrižjima koja su regulirana u fazama (tj. vrijeme čekanja izmjenjuje se s vremenom kretanja).
- Provjerom predloženog izraza dobiveni su ohrabrujući rezultati. U fazi provjere analizirano je dvije stotine različitih slučajeva (scenariji prometnog toka i kombinacije faza). Postignuta je stopa uspješnosti od 75 %.
- Rezultati upućuju na izuzetnu važnost projektiranja prostora za čekanje oko središnjeg otoka. Slijedovi signala trebaju se definirati ovisno o broju traka u prostoru za čekanje te o broju vozila koja skreću ulijevo.

- Značajni su i rezultati analize ponašanja vozača. Određivanje ili procjena prosječno izgubljenog vremena i vremena slijeda vozila koja kreću iz kružnog toka od presudne je važnosti za učinkovito projektiranje i regulaciju prometa.
- Također je ustanovljeno da na tok prometa bitno utječe sastav vozila, a naročito udio teretnih vozila. I ovaj se utjecaj uzima u obzir u predloženom izrazu. Opažanja i simulacije pokazuju da veći udio teretnih vozila može uzrokovati znatno povećanje vremena kašnjenja vozila te zagušenje prometa.
- Simulacije pokazuju da se predloženim izrazom kašnjenje vozila može smanjiti otprilike za 36 % u odnosu na postojeći slijed signala.
- Jedan od značajnih rezultata ovog istraživanja odnosi se na smanjenje vremena ciklusa. Ustanovljeno je da se vrijeme ciklusa može smanjiti te da uspješnost smanjenja varira od 5 do 50 %. Ovako postignute rezerve u kapacitetu mogu se učinkovito iskoristiti.
- Primjenom predloženog izraza postižu se značajna poboljšanja, a to se očituje ne samo u smanjenju vremena prolaska vozila već i u povećanju razine usluznosti.

U okviru budućih istraživanja očekuje se detaljnija i raznovrsnija analiza parametara koji se koriste u izrazu za definiranje slijeda signala. Slučajevi analizirani u ovom radu mogu se dopuniti analizama drugačijih sastava vozila i geometrija raskrižja.

Zahvala

Istraživanja prvog autora ovog rada podržao je Odjel za znanstvenoistraživačke projekte Sveučilišta Pamukkale i Odbor za znanstvenotehnička istraživanja države Turske (TUBITAK) kad je 2017. boravio na Sveučilištu Nevada u svojstvu gostujućeg profesora. Autori zahvaljuju na podršci i pomoći tvrtke PTV i Akcelik te pridruženih poduzeća što su primijenjene akademske verzije programa.

LITERATURA

- [1] Pilko, H., Mandzuka, S., Baric, D.: Urban Single-Lane Roundabouts: A New Analytical Approach using Multi-Criteria and Simultaneous Multi-Objective Optimization of Geometry Design, Efficiency and Safety, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80 (2017), pp. 257-271, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.04.018>
- [2] Cakici, Z.: The Investigation of Design Principles of Signalised Roundabouts, MSc Thesis, University of Pamukkale (Denizli/TURKEY), Department of Civil Engineering, 2014.
- [3] Sisiopiku, V., Oh, H.: Evaluation of Roundabout Performance using SIDRA, *Journal of Transportation Engineering*, 127 (2001) 2, pp. 143-150.
- [4] Tanyel, S., Yayla, N.: A Discussion on the Parameters of Cowan M3 Distribution for Turkey, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (2003), pp. 129-143, [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00009-5)
- [5] Yang, X., Li, X., Xue, K.: A New Traffic Signal Control for Modern Roundabouts: Method and Application, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5 (2004) 4, pp. 282-287.
- [6] Tanyel, S., Baran, T., Ozuysal, M.: Applicability of Various Capacity Models for Single-Lane Roundabouts in Izmir, Turkey, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 133 (2005) 12, pp. 647-653.
- [7] Coelho, M.C., Farias, T.L., Roupail, N.M.: Effect of Roundabout Operations on Pollutant Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11 (2006) 5, pp. 333-343.
- [8] Mandavilli, S., Rys, M.J., Russell, E.R.: Environmental Impact of Modern Roundabouts, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38 (2008) 2, pp. 135-142.
- [9] Otkovic, I.I., Dadic, I.: Comparison of Delays at Signal Controlled Intersection and Roundabout, *Promet Traffic & Transportation*, 21 (2009) 3, pp. 157-165.

- [10] Gross, F., Lyon, C., Persaud, B., Srinivasan, R.: Safety Effectiveness of Converting Signalised Intersections to Roundabouts, *Accident Analysis & Prevention*, 50 (2013), pp. 234-241.
- [11] Caliskanelli, S.P., Tanyel, S., Aydin, M.M., Utku, S.B.: The Investigation of Heavy Vehicle Effects on Roundabouts, *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 24 (2013) 4, pp. 6479-6504.
- [12] Akcelik, R.: Capacity of Performance Analysis of Roundabout Metering Signals, *TRB National Roundabout Conference*, Vail-Colorado, pp. 1-19, 2005.
- [13] Akcelik, R.: Operating Cost, Fuel Consumption and Pollutant Emission Savings at a Roundabout with Metering Signals, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2006), Istanbul-Turkey, pp. 1-14, 2006.
- [14] Natalizio, E.: Roundabouts with Metering Signals, *Institute of Transportation Engineers 2005 Annual Meeting*, Melbourne-Australia, pp. 1-10, 2006.
- [15] Brabender, B.D., Vereeck, L.: Safety Effects of Roundabouts in Flanders: Signal Type, Speed Limits and Vulnerable Road Users, *Accident Analysis & Prevention*, 39 (2007) 3, pp. 591-599.
- [16] Qian, H., Li, K., Sun, J.: The Development and Enlightenment of Signalised Roundabout, 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (IEEE), Hunan, pp. 538-542, 2008.
- [17] Maher, M.: The Optimization of Signal Settings on a Signalised Roundabout using The Cross-Entropy Method, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23 (2008) 2, pp. 76-85.
- [18] Bai, Y., Chen, W., Xue, K.: Association of Signal-Controlled Method at Roundabout and Delay, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (IEEE), Changsha, pp. 816-820, 2010, <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.510>
- [19] Johnnie, B.E., Ahmed, A., Iman, A.: Extent of Delay and Level of Service at Signalised Roundabout, *International Journal of Engineering & Technology*, 2 (2012) 3, pp. 419-424.
- [20] Tracz, M., Chodur, J.: Performance and Safety of Roundabouts with Traffic Signals, *SIIV-5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures (Procedia – Social and Behavioral Sciences)*, 53 (2012), pp. 788-799.
- [21] Ma, W., Liu, Y., Head, L., Yang, X.: Integrated Optimization of Lane Markings and Timings for Signalised Roundabouts, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36 (2013), pp. 307-323.
- [22] Gokce, M.A., Oner, E., Isik, G.: Traffic Signal Optimization with Particle Swarm Optimization for Signalised Roundabouts, *Simulation: Transactions of the Society for Modelling and Simulation International*, 91 (2015) 5, pp. 456-466.
- [23] Cheng, W., Zhu, X., Song, X.: Research on Capacity Model for Large Signalised Roundabouts, *Procedia Engineering*, 137 (2016), pp. 352-361, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.269>
- [24] Gardziejczyk, W., Motylewicz, M.: Noise Level in the Vicinity of Signalised Roundabouts, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46 (2016), pp. 128-144, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.016>
- [25] Hatami, H., Aghayan, I.: Traffic Efficiency Evaluation of Elliptical Roundabout Compared with Modern and Turbo Roundabouts Considering Traffic Signal Control, *Promet Traffic & Transportation*, 29 (2017) 1, pp. 1-11.
- [26] VISSIM 5.40 Software, PTV AG.
- [27] Murat, Y.S., Gedizlioglu, E.: Investigation of Vehicle Time Headways in Turkey, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 160 (2007) 2, pp. 73-78, <https://doi.org/10.1680/tran.2007.160.2.73>
- [28] Murat, Y.S., Gedizlioglu, E.: A New Approach for Fuzzy Traffic Signal Control, *Proceedings of the XIII Mini-Euro Conference on Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems*, pp. 174-180, 2002.
- [29] Cakici, Z., Murat, Y.S.: A New Calculation Procedure for Signalised Roundabouts and Performance Analysis, *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 27 (2016) 4, pp. 7569-7592.
- [30] Highway Capacity Manual (2000), National Research Council, Washington D. C.
- [31] SIDRA Intersection 5.1 Software – SIDRA Intersection 6.0 Software, Akcelik and Associates Ptd Ltd.