



Optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa ciljem minimiziranja potrošnje goriva

Anica Kocić^a, Nikola Čelar^a, Stamenka Stanković^a, Jelena Kajalić^a

^a Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Vojvode Stepe 305, Beograd, R. Srbija

PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.65.03.03

Stručni rad

Primljen: 17/08/2019.

Prihvaćen: 15/09/2019

Autor za korespondenciju:
a.kocic@sf.bg.ac.rs

Ključne reči:

Potrošnja goriva
Signalisana raskrsnica
Optimizacija parametara rada svetlosnih signala
Genetski algoritam
Upravljanje saobraćajem

REZIME

Nagli porast broja vozila tokom dvadesetog veka je doprineo disbalansu ponude i potražnje saobraćajnog sistema, što za posledicu ima nastanak zagušenja u saobraćaju. Usled pojave zagušenja, neminovno je povećanje vremenskih gubitaka, potrošnje goriva i emisije štetnih materija i buke. Neophodno je delovati na saobraćajnu potražnju i ponudu. Obzirom da su gradske sredine oformljene i često nema prostornih mogućnosti za povećanje kapaciteta, javlja se potreba za upravljanjem saobraćajem svetlosnim signalima. Optimizacijom parametara rada svetlosnih signala se postojećim metodama optimizacije najčešće teži minimiziranju vremenskih gubitaka. Međutim, sa aspekta zaštite životne sredine neophodno je razmotriti i mogućnost minimiziranja potrošnje goriva. U radu je predložena optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa ciljem minimiziranja potrošnje goriva i predstavljeni su rezultati sprovedene optimizacije. Pokazalo se da se predloženom optimizacijom ostvaruju uštede u ukupnoj potrošnji goriva, oko 2% u vršnom periodu i oko 5% u vanvršnom, u odnosu na metodu Webstera.

1. Uvod

Disbalans ponude i potražnje saobraćajnog sistema je nastao usled naglog porasta broja vozila tokom dvadesetog veka koji nije praćen prilagođavanjem ponude saobraćajnog sistema. Sve veći broj saobraćajnih zahteva koje saobraćajni sistem često ne može da opsluži, za posledicu ima nastanak zagušenja u saobraćaju. Usled pojave zagušenja, neminovno je povećanje vremenskih gubitaka, potrošnje goriva i emisije štetnih materija i buke. Tokom vremena su osmišljene brojne mere transportne politike kojima se deluje na transportne zahteve i promenu navika učesnika u saobraćaju. Međutim, neophodno je delovati i na saobraćajnu ponudu. Obzirom da su gradske sredine oformljene i često nema prostornih mogućnosti za povećanje kapaciteta, javlja se potreba za upravljanjem saobraćajem primenom svetlosnih signala.

Upravljanje saobraćajem je jedna od disciplina saobraćajnog inženjerstva koja se može definisati kao skup trenutnih akcija, ili akcija tokom vremena kojima se deluje na saobraćajni sistem radi povećanja efikasnosti i bezbednosti funkcionisanja saobraćaja, ali i smanjenja uticaja na životnu sredinu (Čelar i dr. 2018). Upravljanje saobraćajem na signalisanoj raskrsnici se sprovodi

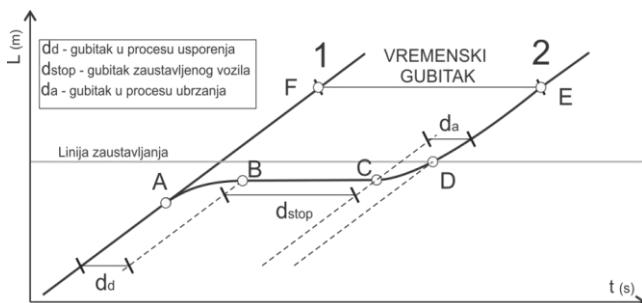
primenom svetlosnih signala, kojima se vrši vremenska preraspodela prava prolaska raskrsnicom, tj. preraspodela raspoloživog kapaciteta raskrsnice po prilazima. Efikasnost saobraćajnog procesa na raskrsnici je posledica izbora načina upravljanja i kriterijuma optimizacije rada svetlosnih signala (Osoba i dr. 1999). Kriterijum optimizacije zavisi od generalnih ciljeva sistema upravljanja, ali i od funkcionalne uloge raskrsnice u sistemu, a može biti minimiziranje vremenskih gubitaka, broja zaustavljanja, vremena putovanja duž koridora, ukupnih troškova korisnika na mreži, maksimalno prihvatljiva dužina reda ili maksimiziranje kapaciteta raskrsnice. Postojećim metodama optimizacije se najčešće teži minimiziranju vremenskih gubitaka i maksimiziranju kapaciteta prilaza raskrsnice.

Konstantan porast broja vozila, znatno doprinosi pogoršanju kvaliteta vazduha u gradskim sredinama. Iako se strategijama upravljanja saobraćajem teži redukciji zagušenja i efikasnijem opsluživanju tokova, ipak na raskrsnicama regulisanim svetlosnim signalima vozila usporavaju, čekaju u redu (prazan hod motora) i ubrzavaju. Ovi režimi rada motornih vozila dodatno povećavaju emisiju štetnih materija i potrošnju goriva (Rouphail, i dr. 2001; Coelho, i dr. 2005).

Pregled rezultata istraživanja na temu uticaja raskrsnica regulisanih svetlosnim signalima na potrošnju goriva i emisiju štetnih materija je ukazao na to da postoji zavisnost potrošnje goriva i emisije štetnih materija od pokazatelja efikasnosti projektovanog upravljanja saobraćajem na raskrsnici (Barth & Boriboonsomsin, 2008; Oda, i dr. 2004). Obzirom da pokazatelji efikasnosti direktno zavise od parametara rada svetlosnih signala, neophodno je razmatrati optimizaciju parametara rada svetlosnih signala sa ciljem minimiziranja potrošnje goriva, tj. sa aspekta zaštite životne sredine. U ovom radu je predstavljena optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa aspekta minimiziranja potrošnje goriva. Primenjen je genetski algoritam kao metoda rešavanja optimizacije.

2. Pregled literature

Primena svetlosnih signala radi regulisanja saobraćaja na raskrsnicama doprinosi efikasnijem i bezbednjem kretanju vozila. Međutim, na signalisanim raskrsnicama svi saobraćajni tokovi imaju vremenske gubitke, jer se u svakom trenutku nekim tokovima prikazuje crveni signalni pojam. Vremenski gubici se na nivou jednog vozila, definišu kao razlika između realno realizovanog vremena putovanja i idealnog vremena putovanja u zoni signalisane raskrsnice (Čelar i dr. 2018), što se grafički može prikazati na slici 1. Vremenski gubici predstavljaju jedan od pokazatelja efikasnosti na raskrsnicama i kriterijum optimizacije parametara rada svetlosnih signala.



Slika 1. Vremenski gubitak pojedinačnog vozila

Izvor: Čelar i dr. 2018

Vremenski gubitak u putanji sa zaustavljanjem (posmatrano na nivou jednog vozila) se sastoji iz tri komponente, gubitak u procesu zaustavljanja d_d , gubitak zaustavljenog vozila d_{stop} i gubitak u procesu ubrzanja d_a (Čelar i dr. 2018). Što znači da zaustavljanje vozila na signalisanoj raskrsnici podrazumeva usporavanje (A - B), stajanje u mestu (prazan hod) (B - C) i ubrzavanje vozila (C - D) nakon promene signalnog pojava i pokretanja reda vozila. Ovi režimi rada motornog vozila su usko povezani sa emisijama štetnih materija i potrošnjom goriva.

Brojni autori su istraživali potrošnju goriva i/ili emisiju štetnih materija u različitim režimima rada pogonskih agregata motornih vozila. Rezultati su pokazali da je najveća potrošnja goriva i emisija štetnih materija tokom ubrzavanja, dok su potrošnja i emisije najmanje

tokom stajanja u mestu (Unal i kolege, 2003; Roushail i kolege, 2001; Tong & Hung, 1999; Kun i Lei, 2007; Oda i kolege, 2004). Isti autori su isticali da minimiziranje samo vremenskih gubitaka ne doprinosi nužno i minimiziranju potrošnje goriva i/ili emisije štetnih materija, već da se minimiziranjem broja zaustavljanja postiže značajnije smanjenje emisije štetnih materija. Dakle, minimiziranjem i vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja postiže se redukcija potrošnje goriva i/ili emisije polutanata. Zaključuje se da je najbolje opslužen saobraćajni tok, sa aspektom potrošnje goriva i emisije štetnih materija, onaj sa najmanjim brojem zaustavljanja, najkraćim vremenskim gubicima i umerenim brzinama tokom putovanja (Barth & Boriboonsomsin, 2008).

Joumard i dr. (1992) su sproveli istraživanje kojim su pokazali da adekvatno upravljanje saobraćajem može značajno smanjiti zagađenje, pri čemu poboljšanje parametara rada signala može smanjiti potrošnju goriva za 5%. Hallmark i dr. (2000) su istraživali uticaj svetlosnih signala na emisije primenom modela MEASURE, pri čemu su utvrdili da je značajna redukcija emisije CO kada se smanje vremenski gubici na signalisanim raskrsnicama. Istraživanjem koje su sproveli Rakha i dr. (2000) pokazalo se da se koordiniranim radom svetlosnih signala može postići 50% smanjenja emisije štetnih materija. Coelho i dr. (2005) su pokazali da se prisustvom svetlosnih signala na raskrsnicama povećava emisija CO za 15%, azot-monoksida NO za 10% i ugljovodonika HC za 40%. Još jedno istraživanje koje su sproveli Chen & Yu (2007) je pokazalo da optimalan rad svetlosnih signala smanjuje emisije različitih polutanata 3 do 15%.

Rezultati različitih istraživanja su pokazali da zamena raskrsnica regulisanih svetlosnim signalima nekim drugim tipom raskrsnice (kružna raskrsnica ili raskrsnica regulisana horizontalnom i vertikalnom signalizacijom) doprinosi smanjenju emisija polutanata i potrošnje goriva (Mustafa, i dr. 1993; Niittymaki & Hoglund, 1999; Varhelyi, 2002; Mandavilli i dr. 2008). Međutim, u pojedinim situacijama primena raskrsnica regulisanih horizontalnom i vertikalnom signalizacijom može znatno povećati vremenske gubitke neprioritetnih tokova. S druge strane, kružne raskrsnice zahtevaju značajan prostor, koji u gradskim sredinama često nije moguće obezbediti. Na osnovu navedenog, ističe se da je na određenim lokacijama jedino rešenje primena svetlosnih signala na raskrsnicama. Iz tog razloga su strategije upravljanja saobraćajem i optimizacija parametara rada svetlosnih signala značajne mere transportne politike. Prilikom optimizacije parametara rada svetlosnih signala, neophodno je, pored osnovnih kriterijuma kojima se teži efikasnijem funkcionisanju saobraćaja, uzeti u obzir i kriterijume kojima se teži smanjenju emisija polutanata i potrošnje goriva na signalisanim raskrsnicama.

2.1. Optimizacije parametara rada светлосних signala sa aspekta zaštite životne sredine

Tradicionalnim metodama optimizacije teži se minimiziranju vremenskih gubitaka vozila i maksimiziranju kapaciteta прilaza raskrsnice, tj. definišu se parametri rada светлосних signala kojima se obezbeđuje efikasnije funkcionisanje saobraćaja na raskrsnicama. Međutim, prethodno je istaknuto da minimiziranje vremenskih gubitaka kao kriterijumske funkcije optimizacije parametara rada signala, nužno ne doprinosi minimiziranju потрошње горива. Obzirom na izražen uticaj parametara rada светлосних signala na emisiju štetnih materija i потрошњу горива, neophodno je razmatrati i применjivati optimizacije parametara rada светлосних signala sa aspekta заštite životne sredine.

Metoda kritičnih tokova (Akçelik, 1981a), jedna od tradicionalnih metoda optimizacije parametara rada светлосних signala, razmatra minimizaciju потрошње горива, kroz definisanu promenljivu koja figuriše u obrascu za proračun dužine ciklusa. Međutim, autor ipak navodi da minimiziranje потрошње горива ima smisla duž gradskih arterija kojima se vozila kreću većim brzinama, a da je u centralnim gradskim sredinama bolje primeniti vrednost promenljive kojom se teži minimiziranju vremenskih gubitaka.

Jedno od најстаријих истражivanja uticaja signalisanih raskrsnica na потрошњу горива и emisiju штетних материја sprovedli su Robertson i dr. (1980) primenom TRANSYT 8. Utvrdili su da se optimizacijom parametara rada светлосних signala sa ciljem minimiziranja ukupne потрошње горива postiže smanjenje потрошње od 3% u odnosu na потрошњu ukoliko je optimizacija izvršena sa ciljem minimiziranja vremenskih gubitaka. Kriterijumska funkcija koja se definiše kao *Performance index* je predstavljala linearnu zavisnost потрошње горива od vremenskih gubitaka, broja zaustavljanja i brzine kretanja vozila na deonici. Ova zavisnost ističe uticaj parametara rada signala na потрошњу горива i emisiju штетних материја, obzirom da od njih zavise broj zaustavljanja i vremenski gubici.

Akçelik (1981b) je definisao zavisnost потрошње горива na deonici od brzine kretanja duž deonice, broja zaustavljanja i prosečnih vremenskih gubitaka na raskrsnici regulisanoj светлосним signalima. Ukoliko posmatramo raskrsnicu, потрошња горива zavisi samo od prosečnih vremenskih gubitaka i prosečnog broja zaustavljanja koji direktno zavise od parametara rada светлосних signala. Predložene su jedinične потрошње горива po jednom zaustavljanju ili jednom satu praznog hoda, za različite strukture тока (putnički automobili, teretna vozila i mešoviti saobraćajni tok). Istaknuto je da потрошња горива, u slučaju optimizacije parametara rada signala sa ciljem minimiziranja потрошње горива može biti manja 5-10%, u odnosu na потрошњу горива u slučaju optimizacije sa nekim drugim ciljem.

Istraživanjima je pokazano da je genetski algoritam dobar метод за optimizaciju parametara rada светлосних signala, čak i bolji u odnosu na druge poznate optimizacione tehnike (Foy i dr. 1992; Kovvali & Messer, 2002; Yun & Park, 2005). U daljem tekstu dat je pregled optimizacija parametara rada светлосних signala, sa aspekta заštite životne sredine, u kojima je применjen genetski algoritam kao метод optimizacije.

Li i dr. (2004) su optimizacijom parametara rada светлосних signala postigli značajne uštede u emisiji штетних materija i потрошњи горива, kao i vremenskim gubicima. Definisali su jednu kriterijumsku funkciju optimizacije parametara rada светлосних signala, kojom se minimiziraju vremenski gubici, потрошња горива i emisija штетних materija na raskrsnicama. Kroz ograničenje je razmotrena i minimalna dužina zelenog signalnog pojma, koja je potrebna pešacima da realizuju prelazak ulice. Za konkretnu raskrsnicu su rezultati pokazali da su vremenski gubici i količina emisija najmanji za dužinu ciklusa 49 s, dok je najmanja потрошња за dužinu ciklusa 130 s. Ovim se potvrđuje da je потрошња najmanja kada je minimalan broj zaustavljanja, dok su emisije najmanje kada su najkraći vremenski gubici.

Određivanje dužine ciklusa i zelenih signalnih pojmove koji minimiziraju emisiju штетних materija primenom genetskog algoritma sprovedli su Zhou i dr. (2008). Predloženi postupak podrazumeva dva nivoa optimizacije. Prvi nivo se odnosi na optimizaciju parametara rada светлосних signala primenom kriterijumske funkcije optimizacije definisanom tako da se poboljša kvalitet saobraćajnog тока i smanje emisije штетних materija. Drugi nivo podrazumeva određivanje raspodele saobraćaja na mreži koja je u skladu sa korisničkim ekvilibrijumom. Rezultati su pokazali da je postupak efektivan za optimizaciju parametara rada светлосних signala.

Stevanović i dr. (2009) su primenili višekriterijumsku optimizaciju parametara rada светлосних signala primenom VASGAOST programa, čija se optimizacija bazira na primeni genetskih algoritama. Cilj je bio smanjenje потрошње горива i emisije штетних материја, pre svega CO₂. Utvrđeno je da primena kriterijumskih funkcija koje minimiziraju vremenske gubitke ili broj zaustavljanja, neće nužno doprineti i minimiziranju потрошње горива. Takođe, primenom kriterijumske funkcije minimiziranja потрошње горива pri optimizaciji parametara rada светлосних signala se postiže statistički značajno smanjenje потрошње за 1,5% u odnosu na kriterijumsku funkciju koja, na primer, minimizira vremenske gubitke.

Optimizaciju dužine ciklusa i raspodele zelenih signalnih pojmove sa aspekta minimiziranja emisije штетних materija razmatrali su i Ma & Nakamura (2010). Pri tome, autori su istakli da se emisija штетних материја posmatra kroz emisiju tokom usporavanja, ubrzavanja, stajanja u mestu i kretanja duž deonice.

Poređenjem rezultata njihove optimizacije, sa optimizacijom sa aspekta minimiziranja vremenskih gubitaka, zaključili su da je njihov model preporučeno primeniti u uslovima većih brzina kretanja i većeg učešća teretnih vozila u toku.

Unapređenjem kapaciteta raskrsnice i smanjenjem emisija štetnih materija kroz višeciljnu optimizaciju parametara rada svetlosnih signala primenom genetskog algoritma i mikrosimulacionog modela bavili su se Zhang i dr. (2010). Kriterijumske funkcije su prosečna brzina vozila i količina emisije CO po jedinici rastojanja, sa težinskim koeficijentima 0,95 i 0,05, respektivno. Ograničenja su vezana za dužinu ciklusa 120s i dužine zelenih signalnih pormova, od 12 do 60s. Simulacijom je pokazano da predloženi model efikasno povećava kapacitet raskrsnice i smanjuje emisiju štetnih materija. Broj vozila koji je prošao kroz raskrsnicu je povećan za 3,4%, prosečna brzina vozila je povećana za 10%. Zabeleženo je malo smanjenje emisije CO obzirom da je veći značaj dat povećanju efikasnosti.

Li i dr. (2011) su se bavili ispitivanjem uticaja rada svetlosnih signala na emisiju štetnih materija. Naime, autori su, definišući tri modela optimizacije, ispitivali uticaj broja zaustavljanja i vremenskih gubitaka na emisije štetnih materija. Kriterijumskom funkcijom prvog modela se teži minimiziranju vremenskih gubitaka, dok se u drugom modelu teži minimiziranju broja zaustavljanja. Treći model je podrazumevao kriterijumsku funkciju minimiziranja vremenskih gubitaka uz ograničenja vrednosti broja zaustavljanja. Autori su istakli da minimiziranje samo broja zaustavljanja vozila ne doprinosi smanjenju emisija štetnih materija, jer su broj zaustavljanja i vremenski gubici u jakoj korelaciji u gradskim uslovima. Smanjenje broja zaustavljanja doprinosi smanjenju emisije CO, ali se primećuje blago povećanje CO₂ i HC. S druge strane, značajno smanjenje broja zaustavljanja doprinosi povećanju CO, CO₂, HC i NO_x.

Kwak i dr. (2012) su predložili optimizaciju parametara rada svetlosnih signala integracijom TRANSMIS simulacionog modela, mikrosimulacionog modela procene emisija i potrošnje goriva (VT-Micro model) i genetskog algoritma. Sa aspekta kvaliteta vazduha, energije i mobilnosti, pokazalo se da je predloženi integrисани metod optimizacije bolji u odnosu na rezultate Synchro modela. Naime, rezultati su pokazali da se optimizacijom parametara rada svetlosnih signala primenom predložene optimizacije postiže 20% uštede u potrošnji goriva na posmatranoj mreži, kao i 8-20% manje emisije polutanata, u odnosu na Synchro rešenja.

Višekriterijumska optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa ciljem istovremenog minimiziranja ukupnih vremenskih gubitaka, ukupnog broja zaustavljanja i prosečne potrošnje goriva je analizirana od strane Robles (2012).

Pri tome je primenjen genetski algoritam, a podaci definisani u genetskom algoritmu su utvrđeni primenom mikrosimulacionog modela VISSIM i CMEM modela za modelovanje emisija. Zaključeno je da je predložena strategija upravljanja saobraćajem doprinela redukciji zagušenja, potrošnje goriva i emisije u odnosu na važeći program rada svetlosnih signala.

Optimizacija parametara rada svetlosnih signala na izolovanoj raskrsnici koja se bavi minimiziranjem uticaja na životnu sredinu primenjena je i od strane Qian i dr. (2013). Autori su kreirali kriterijumsku funkciju kao težinsku sumu pojedinačnih kriterijumskih funkcija za vremenske gubitke, emisiju štetnih materija i kapacitet prilaza raskrsnice. Pokazalo se da optimizacijom parametara rada svetlosnih signala primenom predložene kriterijumske funkcije dolazi do smanjenja vremenskih gubitaka i emisije štetnih materija, kao i do povećanja kapaciteta za od 1 do 15%. Postignuto poboljšanje zavisi od stanja saobraćajnog sistema za koji se kriterijumska funkcija definiše, obzirom da su u zavisnosti od nivoa saobraćajnih zagušenja definisane različite vrednosti težinskih koeficijenata inkorporiranih kriterijumskih funkcija.

Zhang i dr. (2013) su se bavili optimizacijom dužine ciklusa, pomaka početka zelenih signalnih pojmove, raspodele zelenih signalnih pojmove i redosleda faza sa aspekta minimiziranja ukupnih vremenskih gubitaka i izloženosti emisijama štetnih materija. Definisana je kriterijumska funkcija koja obuhvata ukupne vremenske gubitke i izloženost emisijama od saobraćaja. Autori ističu da su razmatrali samo putničke automobile, te bi trebalo razmotriti i mešovit saobraćajni tok.

Optimizacijom parametara rada svetlosnih signala primenom genetskog algoritma sa ciljem minimiziranja emisija štetnih materija, potrošnje goriva i vremenskih gubitaka su se bavili Zhou & Cai (2014). Kriterijumska funkcija optimizacije je predstavljala ukupne troškove, čije su komponente troškovi potrošnje goriva, troškovi emisije štetnih materija i troškovi vremenskih gubitaka na signalisanim raskrsnicama. Primljena optimizacija je doprinela smanjenju ukupnih troškova za 9,27% u odnosu na Websterovu metodu. Obzirom da je svaka komponenta troškova manja, zaključeno je da predložena optimizacija utiče na smanjenje emisija, potrošnje goriva i vremenskih gubitaka vozila.

Stevanović i dr. (2015) su razmotrili višekriterijumsku optimizaciju parametara rada svetlosnih signala sa aspekata mobilnosti, bezbednosti saobraćaja i negativnih uticaja na okruženje. Definisani metod, koji predstavlja balans između mobilnosti, bezbednosti i uticaja na okruženje, primenjen je na segmentu od pet signalisanih raskrsnica. Za optimizaciju je primenjen VASGAOST program, čija se optimizacija bazira na primeni genetskih algoritama.

Утврђено је да на потрошњу горива и емисију полутаната на signalisanim raskrsnicama, утичу показателji efikasnosti као што су број заустављања i prosečni vremenski gubici. Међутим, минимизирање само vremenskih gubitaka ili само броја заустављања не doprinosi nužno минимизирању потрошње горива ili emisije štetnih materija. Naime, резултати navedenih istraživanja su истакли да оптимизација параметара рада светлосних сигналса са циљем минимизирања vremenskih gubitaka, као што је Websterova метода, doprinosi većoj потрошњи горива i/ili emisiji štetnih materija, u односу на оптимизације које минимизирају потрошњу горива i/ili emisiju štetnih materija. Iz tog razloga se nameće потреба за razmatranjem i применом оптимизација параметара рада светлосних сигналса sa аспекта заштите животне средине.

3. Predlog optimizacije parametara rada svetlosnih signala sa ciljem minimiziranja potrošnje goriva

S обзиром на то да је аспект заштите животне средине u управљању saobraćajem често занемарен, ovaj rad se bavi predlogom оптимизације параметара рада светлосних сигналса sa аспекта минимизирања потрошње горива. Predložena je jednokriterijumska оптимизација параметара рада светлосних сигналса sa циљем минимизирања потрошње горива, pri čemu kriterijumska функција razmatra i vremenske gubitke i broj zaustavljanja vozila, jer se definisanom kriterijumskom funkcijom istovremeno минимизирају i vremenski gubici i broj zaustavljanja.

Formulacija kriterijumsке функције je definisana na osnovu predloga zavisnosti потрошње горива od параметара рада светлосних сигналса коју je dao Akçelik (1981b). Iako ova formulacija u svom izvornom obliku sadrži i параметре који se tiču потрошње горива duž deonice, a koja zavisi od brzine kretanja vozila, u ovom radu je akcenat na потрошњи горива која je prouzrokovana radom светлосних сигналса. Opisani model je за primenu u ovom radu, u jednačini (1) prilagođen prema preporuci Čelar i dr. (2018).

Minimizirati:

$$\begin{aligned} P_{gor} &= \sum_{i=1}^m p_{gor_i} \cdot Q_i = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot (\alpha \cdot d_i + (\beta - \alpha \cdot d_{ad_i}) \cdot h_i) \cdot Q_i = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \left(\alpha \cdot 0,43 \cdot \left(\frac{C \cdot (1-\lambda_j)^2}{1-\lambda_j \cdot x_i} + \frac{x_i^2}{q_i \cdot (1-x_i)} \right) + (\beta - \alpha \cdot d_{ad_i}) \cdot 0,9 \cdot \frac{1-\lambda_j}{1-y_i} \right) \cdot Q_i \end{aligned} \quad (1)$$

pri ograničenjima:

$$C_{min} \leq C \leq C_{max} \quad (2)$$

$$Z_j \geq Z_{min_j}, \forall j \in J \quad (3)$$

$$C = \sum_{j=1}^n Z_j + L, j \in J \quad (4)$$

$$x_i < 1, \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (6)$$

gde su:

I - skup signalnih grupa vozila,

i - indeks signalne grupe vozila,

m - број signalnih grupа vozила,

J - skup stanja u kojima se opslužuju tokovi na raskrsnici,

j - indeks stanja,

n - број stanja u kojima se opslužuju tokovi na raskrsnici,

P_{gor} - ukupna потрошња горива svih tokova na raskrsnici [l/h],

p_{gor} - prosečna потрошња горива jednog vozila [l/PAJ-h],

Q_i - saobraćajni захтев signalne grupe *i* [PAJ/h],

q_i - saobraćajni захтев signalne grupe *i* [PAJ/s],

a_{ij} - binarna promenljiva

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko se signalna grupa } i \text{ opslužuje u stanju } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

d_i - prosečni vremenski gubici vozila signalne grupe *i* [h/PAJ],

d_{ad_i} - prosečni vremenski gubici pri usporenu i ubrzavanju vozila signalne grupe *i* [h/PAJ],

h_i - prosečan број заустављања signalne grupe *i* [zaust./PAJ]

α - prosečna потрошња горива u praznom hodу [l/PAJ-h],

β - prosečna потрошња горива pri usporavanju i ubrzavanju [l/zaust.],

C - дужина циклуса [s],

Z_j - дужина зеленог signalnog pojma stanja *j* [s],

L - neiskorišćeno vreme tokom циклуса [s],

$$\lambda_j - udeo zelenog signalnog pojma stanja *j* u ciklusu, \lambda_j = \frac{Z_j}{C} [-],$$

S_i - zasićen saobraćajni tok signalne grupe *i* [PAJ/h],

K_i - kapacitet saobraćajne/ih trake/a signalne grupe *i* [PAJ/h],

y_i - степен iskorišćenja idealnog kapaciteta signalne grupe *i* [-],

x_i - степен iskorišćenja kapaciteta signalne grupe *i* [-].

Jednačinom (1) definisana je kriterijumska функција која predstavlja ukupnu потрошњу горива svih vozačkih tokova na raskrsnici u toku jednog sata. Utvrđuje se na osnovу prosečне потрошње горива po vozilu signalne grupe i broja vozila te signalne grupe. Prosečna потрошња горива po vozilu zavisi od prosečnih vremenskih gubitaka vozila i broja zaustavljanja vozila, kao i prosečnih vremenskih gubitaka pri usporavanju i ubrzavanju vozila *d_{ad}*. Prosečni vremenski gubici *d_{ad}* ne zavise od параметара рада светлосних сигналса, a prema istraživanjima (Richardson, 1979; Akçelik, 1981b; Čelar, 2013; Čelar, i dr. 2018; Stanković, i dr., u štampi) iznose 10 - 13 s. Prema preporuci Čelar i dr. 2018, prosečni vremenski gubici vozila su utvrđeni по modelu Webster & Cobbe, 1966, iako postoji i model proračuna prosečnih vremenskih gubitaka koji je definisao Akçelik (1980). Taj model je kalibriran na домаће uslove (Vukanović, 1980) i dat je formulom (7).

$$d_i = 0,43 \cdot \left(\frac{C \cdot (1-\lambda_j)^2}{1-\lambda_j \cdot x_i} + \frac{x_i^2}{q_i \cdot (1-x_i)} \right) \quad (7)$$

Prosečan број заустављања по vozилу se utvrđuje применом modela Akçelik (1981a), koji se za nezasićena stanja utvrđuje izrazom (8). Faktorom 0,9 se koriguje vrednost prosečног броја заустављања, obziru да постоји određeni број vozила која су имала vremenske gubitke, ali se nisu u potpunosti zaustavila.

$$h_i = 0,9 \cdot \frac{1-\lambda_j}{1-y_i} \quad (8)$$

Saobraćajni zahtev svih signalnih grupa je izražen u jedinicama putničkih automobila (PAJedinice), kako bi se uzela u obzir i struktura saobraćajnog toka. Naime, različite kategorije vozila imaju različite prosečne potrošnje goriva. S druge strane, obzirom da je u pojedinim signalnim grupama značajno učešće vozila javnog prevoza, neophodno je napraviti razliku u značaju tih signalnih grupa sa upravljačkog aspekta. Na taj način se daje veći prioritet signalnim grupama kojima se kreće veći broj vozila, posledično i veći broj putnika. To je, takođe, postignuto izražavanjem saobraćajnog toka u PAJ.

Ograničenje dato nejednačinom (2) se odnosi na maksimalnu i minimalnu dozvoljenu vrednost dužine ciklusa, dok se ograničenje dato nejednačinom (3) odnosi na minimalnu dozvoljenu vrednost zelenog signalnog pojma svake signalne grupe. Ova minimalna vrednost dužine zelenog signalnog pojma je uslovljena minimalnim potrebnim vremenom da pešaci pređu pešački prelaz, a koje se utvrđuje primenom (9), na osnovu dužine pešačkog prelaza L_{pes} i brzine pešaka $V_{pes} = 1,2 \text{ m/s}$ (preporučena vrednost).

$$Z_{min_j} = 6 + \frac{L_{pes}}{V_{pes}} \quad (9)$$

Ograničenjem koje je dato jednačinom (4) se definiše da je dužina ciklusa jednaka zbiru zelenih signalnih pojmove stanja i neiskorišćenog vremena tokom ciklusa. Neiskorišćeno vreme tokom ciklusa (10) zavisi od broja stanja m , neiskorišćenog vremena stanja j w_j (zbir gubitaka na startu a i neiskorišćenog dela žutog b) i dužina zaštitnih vremena između faza Δt_{j-j+1} .

$$L = m \cdot w_j + \sum_{j=1}^m \Delta t_{j-j+1} = m \cdot (a + b) + \sum_{j=1}^m \Delta t_{j-j+1} \quad (10)$$

Jednačina (5) predstavlja ograničenje koje se odnosi na to da stepen zasićenja (11), tj. iskorišćenja kapaciteta signalne grupe i mora biti manji od 1. Na taj način se definiše da parametri rada svetlosnih signala moraju biti takvi da se postigne kapacitet signalnih grupa koji je veći od saobraćajnih zahteva tih signalnih grupa. Ovim ograničenjem se postiže da u saobraćajnim tokovima vladaju nezasićena stanja, za koja je preporučena primena (7) i (8).

$$x_i = \frac{q_i}{K_i} = \frac{q_i}{s_i \cdot \lambda_j} = \frac{q_i}{s_i \cdot \frac{z_j}{c}} = \frac{q_i \cdot c}{s_i \cdot z_j} \quad (11)$$

Jednačinom (6) je definisano ograničenje koje se odnosi na to da jedna signalna grupa može pripadati samo jednom stanju i da signalna grupa mora pripadati bar jednom stanju.

3.1. Predlog metode za rešavanje predložene optimizacije

Pokazano je da se genetski algoritmi često koriste pri optimizaciji parametara rada svetlosnih signala i sa aspekta koji je tema ovog rada. Iz tog razloga je zaključeno da je genetski algoritam odgovarajuća metoda optimizacije parametara rada svetlosnih signala koja je predložena u ovom radu.

Genetski algoritmi spadaju u najpoznatije metaheurističke algoritme, a zasnovani su na Darvinovom principu „preživljavanja najjačeg“. Naime, genetski algoritmi predstavljaju tehnike pretraživanja koje su inspirisane procesima selekcije i evolucije u prirodi (Teodorović & Šelmić, 2012). Ovaj metod optimizacije podrazumeva istovremenu evaluaciju većeg broja rešenja (jedinki), kako bi se izdvojila ona koja imaju bolju vrednost kriterijumske funkcije (veću šansu za preživljavanjem). Primenom odgovarajućih genetskih operatora na izdvojenim rešenjima, kreiraju se nova rešenja (jedinke). Na ovaj način se simulira evolucija, sa ciljem dobijanja sve boljih i boljih rešenja.

Obzirom da se genetski algoritmi zasnivaju na biološkoj evoluciji, podrazumevaju istovremenu evaluaciju većeg broja rešenja (jedinki, individua). U slučaju ovog rada individue (rešenja) su sačinjene od tri hromozoma koja predstavljaju vrednosti parametara rada svetlosnih signala koji se optimiziraju (Z_1, Z_2, C). Prilikom primene genetskih algoritama se najčešće koristi binarno kodiranje (Teodorović & Šelmić, 2012) te se rešenja predstavljaju nizovima 0 i 1.

Prvi korak podrazumeva definisanje inicijalne populacije $P(0) = (x_1, x_2, \dots, x_{60})$ na slučajan način, ali u oblasti dopustivih rešenja koju kreiraju definisana ograničenja. Odabранo je da veličina populacije bude konstantna u svim generacijama i da iznosi 60 individua. Nakon generisanja inicijalne populacije, sprovodi se evaluacija rešenja te populacije, na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije. Rešenja sa većom vrednošću kriterijumske funkcije se uzimaju u dalje razmatranje kao kandidati za reprodukciju i stvaranje naredne generacije $P(1)$.

Primenjena je elitistička selekcija individua za reprodukciju, koja podrazumeva da se prvo bira izvestan broj individua sa najboljim vrednostima kriterijumskih funkcija koje se u nepromenjenom obliku prenose u sledeću generaciju (Teodorović & Šelmić, 2012). Definisano je da taj broj iznosi 5% veličine populacije. Ostale individue se biraju primenom metode selekcije pomoći ruleta, što podrazumeva da svaka individua može biti izabrana sa određenom verovatnoćom koja se predstavlja veličinom udela na rulet točku, a koja se utvrđuje na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije individue (Teodorović & Šelmić, 2012).

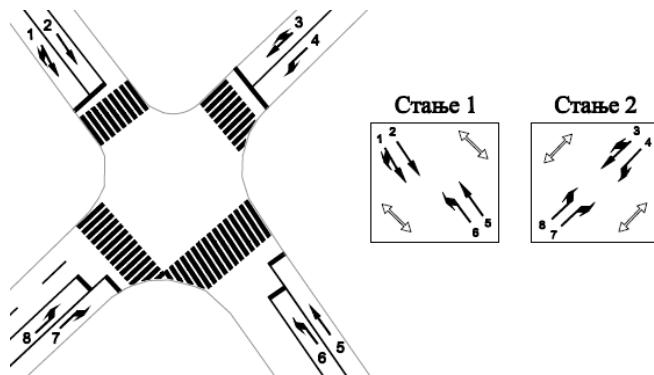
Sledeći korak je primena genetskog operatora razmene genetskog materijala i definisano je da se 80% individua naredne generacije kreira razmenom genetskog materijala, dok je 20% kopija individua iz prethodne generacije. Odabranu je razmenu genetskog materijala 2 tačke, koja podrazumeva slučajan izbor dve tačke u stringu oba roditelja između kojih dolazi do razmene genetskog materijala. Dalje se primenjuje genetski operator mutacije na izabranim individuama roditelja koje nisu bile elitističke selekcije ili razmene genetskog materijala. Teodorović & Šelmić, 2012. definišu da se u slučaju binarnog kodiranja pod mutacijom podrazumeva promena vrednosti jedan u vrednost nula, ili obrnuto.

Opisanim načinom kreiranja članova naredne generacije $P(1)$ stvorena su tri tipa potomaka. Posmatrajmo populaciju od 60 individua. Obzirom da se elitističkom selekcijom bira 5% od 60 jedinki, na ovaj način je izabrano 3 jedinke roditelja koje se prenose u narednu generaciju. Od preostalog broja jedinki koje je potrebno kreirati, a to je $60 - 3 = 57$, 80% se kreira razmenom genetskog materijala, što znači 46 jedinki. Ostali članovi naredne generacije, 11 jedinki, dobijeni su mutacijom gena roditelja koji nisu odabrani elitističkom selekcijom ili selekcijom pomoću ruleta.

Ovako kreirana naredna generacija ponovo prolazi kroz postupak evaluacije, i dalje se primenjuju već definisani postupci izbora, razmene genetskog materijala i mutacije. Navedeni postupak se ponavlja sve dok se ne zadovolji neki od unapred zadatih kriterijuma koji su postizanje broja generacija 100 ili prosečna promena vrednosti kriterijumske funkcije $1e^{-6}$ i vrednosti ograničenja $1e^{-3}$.

4. Primena predložene optimizacije na realnom primeru

Prethodno definisana optimizacija parametara rada svetlosnih signala je primenjena na konkretnom primeru raskrsnice Ugrinovačka - Ivićeva - Vrtlarska - Bežanijska u Beogradu (slika 2).



Slika 2. Predmetna raskrsnica i signalni plan

Predmetna raskrsnica ima 8 vozačkih signalnih grupa, tako da je skup $I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$. Predloženo je opsluživanje navedenih signalnih grupa u 2 stanja, te je skup $J = \{1, 2\}$. Na osnovu predloženog načina opsluživanja svih signalnih grupa utvrđena je vrednost binarne promenljive a_{ij} .

Usvojene vrednosti parametara koji figurišu u kriterijumskoj funkciji i tiču se potrošnje goriva su $\alpha=2,23l/PAJ\cdot h$ i $\beta=0,044l/zaust$. Vrednosti su predložene od strane Akçelik, 1981b za strukturu toka u kojoj je 10% komercijalnih vozila, što je slučaj sa strukturu toka na predmetnoj raskrsnici.

Vremenski gubici prilikom usporavanja i ubrzavanja vozila, kao što je već navedeno, iznose 10 - 12 s, a prilikom izrade ovog rada je usvojeno $d_{ad} = 12$ s po Akçelik (1981b).

	1	2
1	1	0
2	1	0
3	0	1
$a_{ij} =$	4	0
5	1	0
6	1	0
7	0	1
8	0	1

Minimalna i maksimalna vrednost dužine ciklusa iznose $C_{min} = 30$ s i $C_{max} = 120$ s. Minimalna dužina zelenog signalnog pojma je uslovljena minimalnim vremenom potrebnim da pešaci pređu pešачki prelaz i određena je na sledeći način:

$$Z_{min} = 6 + \frac{L_{pes}}{V_{pes}} = 6 + \frac{9}{1,2} = 14 \text{ s}$$

Minimalna dužina zelenog signalnog pojma je ista za sva stanja, tako da je ograničenje (3):

$$Z_j \geq 14 \text{ s}, \forall j \in J$$

Sledeća ulazna veličina neophodna za postupak optimizacije je neiskorišćeno vreme tokom ciklusa i ono je utvrđeno:

$$L = m \cdot w_j + \sum_{j=1}^m \Delta t_{j-j+1} = 2 \cdot 3 + 4 + 4 = 14 \text{ s}$$

Nakon utvrđivanja neiskorišćenog vremena tokom ciklusa može se ograničenje (4) izraziti na sledeći način:

$$C = \sum_{j=1}^n Z_j + L = Z_1 + Z_2 + 14$$

Vrednosti zasićenih saobraćajnih tokova za vozačke signalne grupe su sledeće $S_1 = 1339 \text{ PAJ/h}$, $S_2 = 1472 \text{ PAJ/h}$, $S_3 = 1276 \text{ PAJ/h}$, $S_4 = 709 \text{ PAJ/h}$, $S_5 = 1950 \text{ PAJ/h}$, $S_6 = 669 \text{ PAJ/h}$, $S_7 = 1339 \text{ PAJ/h}$, $S_8 = 763 \text{ PAJ/h}$.

Predložena optimizacija parametara rada svetlosnih signala je sprovedena za vršno i vanvršno saobraćajno opterećenje na predmetnoj raskrsnici, koja su utvrđena istraživanjem i data u tabeli 1.

Tabela 1. Podaci o saobraćajnom opterećenju na raskrsnici

$Q [\text{PAJ/h}]$	Signalna grupa							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Vršni period	279	424	194	102	397	375	250	105
Vanvršni period	98	148	68	36	139	131	88	37

Optimizacija je sprovedena primenom predloženog genetskog algoritma u MATLAB Optimization toolbox 8.1. Ovaj optimizacioni alat omogućava razmatranje prethodno definisane kriterijumske funkcije i ograničenja.

Pored toga, moguće je definisanje i svih neophodnih parametara genetskog algoritma, predstavljenih u poglavljiju 3.1.

5. Rezultati i diskusija

Rezultati optimizacije, tj. parametri rada svetlosnih signala utvrđeni predloženom optimizacijom, su prikazani u tabeli 2, a pored toga su prikazane i vrednosti ukupne potrošnje goriva, za oba perioda analize.

Tabela 2. Rezultati predložene optimizacije parametara rada svetlosnih signala

	Z_1 [s]	Z_2 [s]	C [s]	P_{gor} [l/h]
Vršni period	76	27	117	81,47
Vanvršni period	54	14	82	19,02

Očekivane su veće vrednosti zelenog signalnog pojma za stanje 1, obzirom na to da je veći saobraćajni zahtev signalnih grupa koje se u njemu opslužuju, koji je delimično posledica velikog učešća komercijalnih vozila u saobraćajnom toku. Većim saobraćajnim zahtevima se objašnjavaju i veće vrednosti parametara rada svetlosnih signala u vršnom periodu u odnosu na vanvršni. Rezultati pokazuju veću ukupnu potrošnju goriva u vršnom periodu, što je očekivano obzirom na veći broj vozila u tom periodu. Jasno je da je kriterijum optimizacije u Websterovoj metodi minimiziranje vremenskih gubitaka, a ne potrošnja goriva, međutim to je najčešće primenjivana metoda optimizacije parametara rada svetlosnih signala. Iz tog razloga su poređenja radi, u tabeli 3 prikazani rezultati Websterove metode, kako bi se mogli utvrditi nedostaci primene iste. Naime, ukoliko se uporede rezultati iz tabela 2 i 3, može se uočiti da se primenom optimizacije parametara rada signala sa aspekta životne sredine ostvaruje ušteda u potrošnji goriva, a relativna razlika je data u tabeli 4.

Tabela 3. Rezultati Websterove metode

	Z_1 [s]	Z_2 [s]	C [s]	P_{gor} [l/h]
Vršni period	67	22	103	83,17
Vanvršni period	31	14	59	20,01

Tabela 4. Uporedni prikaz rezultata predložene i Websterove metode optimizacije parametara rada svetlosnih signala

P_{gor} [l/h]	Websterova metoda	Predložena optimizacija	Relativna razlika ΔP_{gor} [l/h]	Razlika ΔP_{gor} [%]
Vršni period	83,17	81,47	- 1,70	- 2,04
Vanvršni period	20,01	19,02	- 0,99	- 4,95

Na osnovu rezultata u tabeli 4, ističe se ušteda u ukupnoj potrošnji goriva u odnosu na Websterovu metodu, 1,70 l/h u vršnom periodu, tj. 2,04% i nešto manje od 1 l/h u vanvršnom periodu, tj. 4,95%. Istaknuti rezultat je veoma značajan sa aspekta zaštite životne sredine, kao i sa ekonomskog aspekta, obzirom na značajne uštede u potrošnji goriva i emisiji štetnih materija koje se mogu ostvariti promenom kriterijuma optimizacije parametara rada signala na nivou cele saobraćajne mreže grada i u dužem vremenskom periodu.

6. Zaključak

Činjenica je da su u gradovima sve češća zagušenja u saobraćaju, usled rasta broja vozila na saobraćajnoj mreži. Posledice takvog stanja saobraćajnog sistema, ali i generalno velikog broja vozila čiji pogonski agregati koriste fosilna goriva, doprinose povećanoj emisiji štetnih materija, čime se pogoršava kvalitet vazduha u gradskim sredinama. Treba istaći i da emisije štetnih materija doprinose efektu staklene bašte i utiču na zdravlje ljudi. Sa ekonomskog aspekta, zagušenja u saobraćaju utiču na povećanu potrošnju goriva.

Među kriterijumima optimizacije parametara rada svetlosnih signala se, pored efikasnijeg i bezbednijeg funkcionisanja saobraćajnog sistema, nalazi i kriterijum minimiziranja negativnih uticaja na životnu sredinu. Međutim, tradicionalne metode optimizacije parametara rada svetlosnih signala uglavnom razmatraju samo aspekt minimiziranja vremenskih gubitaka tokova na raskrsnici. Ovakav pristup nije adekvatan, obzirom na utvrđene zavisnosti potrošnje goriva i emisije štetnih materija i parametara rada svetlosnih signala.

Prethodno istaknut zaključak je bio osnova za definisanje optimizacije parametara rada svetlosnih signala sa aspekta minimiziranja potrošnje goriva. S obzirom na to da primena metaheurističkih algoritama omogućava definisanje jedne ili više kriterijumske funkcije, kao i veći broj ograničenja, odlučeno je da u ovom radu bude primenjen genetski algoritam. U radu su definisani i parametri genetskog algoritma, kao predložene metode optimizacije parametara rada svetlosnih signala.

Predložena je optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa kriterijumskom funkcijom kojom se minimizira ukupna potrošnja goriva. Parametri rada svetlosnih signala optimizovani na ovaj način su doprineli tome da su uštede u ukupnoj potrošnji goriva, oko 2% u vršnom periodu i oko 5% u vanvršnom, u odnosu na najčešće primenjivanu metodu Webstera. Ovaj rezultat je značajan sa ekonomskog aspekta i aspekta zaštite životne sredine. Može se izvesti zaključak da bi primena definisane optimizacije parametara rada svetlosnih signala na nivou grada u dužem vremenskom periodu doprinela značajnim uštedama u potrošnji goriva i emisijama štetnih materija. Pokazano je da je genetski algoritam adekvatna metoda optimizacije parametara rada svetlosnih signala, posebno u situacijama kada se razmatra veći broj ograničenja. Optimalna vrednost kriterijumske funkcije je uvek postignuta pre dostizanja maksimalnog broja generacija, kao kriterijuma završetka postupka rešavanja problema, tako da je postupak uvek završen na osnovu prosečne promene vrednosti kriterijumske funkcije manje od unapred definisane.

Обзиром на чинjenicu da je sve veće zagađenje od motornog saobraćaja što direktno utiče na pogoršanje kvaliteta vazduha u gradskim sredinama, neophodno je u budućnosti se baviti optimizacijom parametara rada svetlosnih signalata sa ciljem minimiziranja tih uticaja motornog saobraćaja. U daljem radu, trebalo bi sprovesti predloženu optimizaciju parametara rada signalata na koridoru, u zoni ili čak na čitavoj mreži grada, uz vrednovanje efekata takvog načina optimizacije. Pored pokazatelja koji se tiču potrošnje goriva i količine emitovanih štetnih materija, treba uzeti u obzir i pokazatelje efikasnosti, koji su do sada bili primarni kriterijumi optimizacije. Pri čemu treba istaći da predložena kriterijumska funkcija predstavlja linearnu zavisnost ukupne potrošnje goriva od vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja vozačkih tokova, te na taj način nisu zanemareni ni ovi pokazatelji efikasnosti. U daljem radu svakako je potrebno baviti se i višekriterijumskim optimizacijama parametara rada svetlosnih signalata, posebno na raskrsnicama koje su kritične sa određenog aspekta, a klasičnim metodama optimizacije ti aspekti nisu razmatrani.

Zahvale

Rad je sastavni deo naučnoistraživačkog projekta "Uticaj globalnih izazova na planiranje saobraćaja i upravljanje saobraćajem u gradovima", evidencijski broj TR36021, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Signal timing optimization to minimize fuel consumption

Anica Kocić, M.Sc. T.E.

Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, nana.anica.kocic@gmail.com

Nikola Čelar, Ph.D. T.E.

Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, n.celar@sf.bg.ac.rs

Stamenka Stanković, M.Sc. T.E.

Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Jelena Kajalić, M.Sc. T.E.

Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Abstract: Traffic congestion has been caused by sudden increase in the number of vehicles during the 20th century and disbalance of traffic system supply and demand. Consequently, congestion contributes to the increase in delays, fuel consumption, pollution and noise emissions. It is necessary to consider transport supply changes. In general there is no space for street capacity increase because urban areas are formed, so there is a need for use of traffic signals. Traditional signal timing optimization methods only consider delay minimization. However, fuel consumption minimization has to be considered because of bad air quality in urban areas. Signal timing optimization to minimize fuel consumption is proposed and results are showed in this paper. Results show that fuel consumption is reduced for about 2% in peak hour, and about 5% in off-peak hour for proposed signal timing optimization than for Webster's method.

Keywords: fuel consumption, signalized intersection, signal timing optimization, genetic algorithm, traffic management

Literatura

- [1] Akçelik R. (1980). Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals. Internal Report AIR 367-1, Australian Road Research Board, Vermont South, Australia.
- [2] Akçelik R. (1981a). Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis: Research report ARR No. 123 (7th reprint: 1998). Australian Road Research Board, Melbourne, Australia.
- [3] Akçelik R. (1981b). Fuel efficiency and other objectives in traffic system management. Traffic Engineering and Control 22 (2), 54-65.
- [4] Barth, M. J., Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. In Transportation Research Record 2058: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 163–171.
- [5] Čelar, N. (2013). Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici: doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [6] Čelar, N., Stanković, S., Kajalić, J. (2018). Osnove upravljanja svetlosnim signalima. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [7] Čelar, N., Stanković, S., Kajalić, J., Stepanović, N. (2018). Methodology for Control Delay Estimation Using New Algorithm for Critical Points Identification. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems 144 (2).
- [8] Chen, K., Yu, L. (2007). Microscopic traffic-emission simulation and case study for evaluation of traffic control strategies. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology 7. 93–99.
- [9] Coelho, M.C., Farias, T.L., Routhail, N.M. (2005). Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions. Transportation Research Part D 10, 323-340.
- [10] Foy, M.D., Benekohal, R.F., Goldberg, D.E., (1992). Signal timing determination using genetic algorithms. Transportation Research Record 1365: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, 108–115.
- [11] Hallmark, S.L., Fomunung, I., Guensler, R., Bachman, W. (2000). Assessing impacts of improved signal timing and transportation control measure using an activity-specific modeling approach. Transportation Research Record 1738: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, 49-55.
- [12] Jourard, R., Hickman, A.J., Nemerlin, J., Hassel, D., (1992). Modelling of Emissions and Consumption in Urban Areas-Final Report. DRIVE Project V1053, INRETS Report LEN9213, Bron.

- [13] Kovvali, V., Messer, C. (2002). Sensitivity analysis of genetic algorithm parameters in traffic signal optimization. In: Presented at the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- [14] Kwak, J., Park, B., Lee, J. (2012). Evaluating the impacts of urban corridor traffic signal optimization on vehicle emissions and fuel consumption. *Transportation Planning and Technology* 35, 145–160.
- [15] Li, X., Li, G., Pang, S.-S., Yang, X., Tian, J., (2004). Signal timing of intersections using integrated optimization of traffic quality, emissions and fuel consumption: a note. *Transportation Research Part D: Transp. Environ.* 9, 401–407.
- [16] Ma, D., Nakamura, H. (2010). Cycle length optimization at isolated signalized intersections from the viewpoint of emission. *Seventh International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS) 2010*, 275–284.
- [17] Mandavilli, S., Rys, M.J., Russel, E.R. (2008). Impact of modern roundabouts on vehicular emissions. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38, 135–142.
- [18] Mustafa, S., Mohammed, A., Vougias, S. (1993). Analysis of Pollutant Emissions and Concentrations at Urban Intersections. Institute of Transportation Engineers, Compendium of Technical Papers, Washington, D.C.
- [19] Niittymaki, J., Hoglund, P.G. (1999). Estimating vehicle emissions and air pollution related to driving patterns and traffic calming. In: Paper for the Conference on Urban Transport Systems, Lund.
- [20] Oda, T., Kuwahara, M., Niikura, S. (2004). Traffic Signal Control for Reducing Vehicle Carbon Dioxide Emissions on an Urban Road Network. In Proceedings of the 11th World Congress on ITS, Nagoya, Japan.
- [21] Osoba, M., Vukanović, S., Stanić, B. (1999). Upravljanje saobraćajem pomoću svetlosnih signala I deo, Beograd, Saobraćajni fakultet.
- [22] Qian, R., Lun, Z., Wenchen, Y., Meng, Z. (2013). A traffic emission-saving signal timing model for urban isolated intersections. *Procedia-Social Behavioral Sciences* 96, 2404–2413.
- [23] Rakha, H., Aerde, M.V., Ahn, K., Trani, A., (2000). Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emission based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record* 1738: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 56–67.
- [24] Richardson, A.J. (1979). Measurement of the Performance of Signalized Intersections, *Transportation Research Record* 699: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 49–60.
- [25] Robertson, D., Lucas, C., Baker, R. (1980). Coordinating Traffic Signals to Reduce Fuel Consumption. TRL report LR934, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire United Kingdom
- [26] Robles, D. (2012). Optimal Signal Control with Multiple Objectives in Traffic Mobility and Environmental Impacts: M. Sc. Diss., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- [27] Roushail, N.M., Frey, H.C., Colyar, J.D., Unal, A. (2001). Vehicle emissions and traffic measures: exploratory analysis of field observations at signalised arterials. In: Proceedings of the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [28] Stevanovic, A., Stevanovic, J., So, J., Ostojic, M. (2015). Multi-criteria optimization of traffic signals: Mobility, safety, and environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 55, 46–68.
- [29] Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., Batterman, S. (2009). Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions: integrated approach of VISSIM, CMEM, and VISGAOST. *Transportation Research Record* 1707, 105–113.
- [30] Stanković, S., Čelar, N., Kajalić, J., Vukićević-Biševac, I. (u štampi). Micro and macro approach to modeling relationship between control and stopped delay at signalized intersections. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*.
- [31] Teodorović, D., Šelmić, M. (2012). Računarska inteligencija u saobraćaju. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [32] Varhelyi, A. (2002). The Effects of Small Roundabouts on Emissions and Fuel Consumption: A Case Study. Elsevier Science Ltd., Amsterdam.
- [33] Vukanović, S. (1980). Vremenski gubici, potrošnja goriva i kapacitet kao kriterijumi za upravljanje saobraćajem putem svetlosnih signala: magistarska teza. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [34] Webster, F. V., Cobbe B. M. (1966). *Traffic signals*. Her Majesty's Stationery Office, London, United Kingdom.
- [35] Yun, I., Park, B., 2005. Stochastic Optimization Method for Coordinated Actuated Signal Systems. Center for Transportation Studies, University of Virginia.
- [36] Zhang, B., Shang, L., Chen, D. (2010). Traffic Intersection Signal-planning Multi-object Optimization Based on Genetic Algorithm. 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, China, 150–155.
- [37] Zhang, L., Yin, Y., Chen, S., (2013). Robust signal timing optimization with environmental concerns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 29, 55–71.
- [38] Zhou, S., Yan, X., Wu, C. (2008). Optimization model for traffic signal control with environmental objectives. In: Presented at the Natural Computation, 2008. ICNC'08. Fourth International Conference on, IEEE, 530–534
- [39] Zhou, Z., Cai M. (2014). Intersection signal control multi-objective optimization based on genetic algorithm. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 1 (2), 153–158.