

PRIMJENJIVOST EKOLOŠKIH I EKONOMSKIH PARAMETARA MIKROSIMULACIJSKOG PROMETNOG MODELIRANJA U OCJENI RJEŠENJA REKONSTRUKCIJE RASKRIŽJA

THE APPLICABILITY OF ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF MICROSIMULATION TRAFFIC MODELING IN THE EVALUATION OF INTERSECTION RECONSTRUCTION SOLUTIONS

Blaženka Maričević*, Irena Ištoka Otković*

Sažetak

Pred projektante prometne infrastrukture stavlja se zahtjevan zadatak da pomire suprotstavljene ciljeve razvoja prometne infrastrukture prema prometnoj potražnji, a da svojim rješenjima smanje negativne učinke operacionalizacije sustava. Ovaj rad analizira primjenjivost mikrosimulacijskog prometnog modeliranja za analizu ekoloških i ekonomskih parametara koji se, uz funkcionalne parametre, ubrajaju u standardne kriterije ocjene varijantnih rješenja izgradnje i rekonstrukcije prometne infrastrukture. Studija slučaja napravljena je na primjeru rekonstrukcije raskrižju u urbanoj prometnoj mreži grada Osijeka. Rezultati pokazuju primjenjivost mikrosimulacija za ocjenu ekoloških i ekonomskih parametara u ocjeni varijantnih rješenja rekonstrukcije raskrižja, a broječni pokazatelji pokazuju da se poboljšanjem funkcionalnih pokazatelja raskrižja mogu smanjiti i emisije ispušnih plinova od prometa.

Ključne riječi: rekonstrukcija raskrižja, mikrosimulacije, aerozagadenje, potrošnja goriva

Abstract

Transport infrastructure designers are faced with the demanding task of balancing the conflicting goals of transport infrastructure development according to traffic demand and reducing the negative effects of the system operationalization with their solutions. This paper analyzes the applicability of microsimulation traffic modeling for the analysis of ecological and economic parameters, which, along with functional parameters, are included in the standard criteria for the evaluation of various solutions for the construction and reconstruction of traffic infrastructure. The case study was made on the example of the reconstruction of an intersection in the urban traffic network of the city of Osijek. The results show the applicability of microsimulations for the evaluation of ecological and economic parameters in the evaluation of variant solutions for the reconstruction of the intersection, and the numerical indicators show that air pollution from traffic can be reduced by improving the functional indicators of intersections.

Key words: intersection reconstruction, microsimulations, air pollution, fuel consumption

* Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
E-mail: blaza434@gmail.com; iirena@gfos.hr

1. Uvod

Razvoj prometnog sustava generiran je fundamentalnim težnjama društva kao što su pristupačnost i mobilnost, a ispunjavanje njegove funkcije sustavno proširuje horizonte pojedinca i društva u cjelini. Promet je bazična komponenta društvenog i gospodarskog razvoja svake države, ali nepovoljno utječe na okoliš i zdravlje ljudi.

Prema procjenama Svjetske zdravstvene organizacije [1] izloženost zagađenom zraku uzrokuje preranu smrt oko 4,5 milijuna ljudi godišnje na svjetskoj razini. Sumarni rezultati istraživanja i mjerenja su pokazali da je 96 % svjetske populacije koja živi u urbanim sredinama izloženo povećanim koncentracijama zagađivača zraka, osobito koncentraciji zagađujućih čestica „particulate matter (PM)“, koje se dijele na velike - aerodinamičkog dijametra manjeg od 10 μm (PM_{10}) i male - aerodinamičkog dijametra manjeg od 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) [2]. U dokumentu Svjetske zdravstvene organizacije „Globalna strategija zdravlja i klimatskih promjena“ [3], smanjenje zagađenja zraka u gradovima postavlja se kao jedan od vodećih strateških ciljeva budućeg razvoja gradova.

Zagađenje zraka uzrokovano prometom predstavlja stalan izvor zagađenja zraka, osobito emisije dušikovih oksida i zagađujućih čestica, a kvantifikacija utjecaja prometnog sustava na ukupno aerozagađenje predmet je brojnih istraživanja. Konceptualno gledano, istraživanja se mogu podijeliti na dvije grupe: prva grupa istraživanja se fokusirala na kvantifikaciju i modeliranje emisija štetnih plinova i čestica koje se oslobađaju od prometa, dok je druga, veća grupa istraživanja usmjerena na analizu utjecaja zagađenja zraka na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Rezultati prve grupe istraživanja pokazuju značajnu korelaciju između prometnog opterećenja i strukture prometnog toka s koncentracijom zagađujućih lebdećih čestica u urbanim područjima, a druga grupa istraživanja uspostavila je jasnu korelaciju visoke koncentracije lebdećih čestica PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ s bolestima respiratornog i kardiovaskularnog sustava. Rezultati istraživanja pokazuju da je utjecaj zagađenja zraka na zdravlje ljudi velik, a rezultati studije [4] pokazuju utjecaj zagađenja zraka na školska postignuća djece. Djeca koja su u školama izložena povećanom zagađenju zraka (povećane koncentracije $\text{PM}_{2.5}$ i NO_2) pokazuju lošije izvršne funkcije, imaju manju radnu memoriju, a povećane koncentracije PM_{10} utječu na pažnju, zaključivanje i ukupna akademska postignuća [4].

Na temelju brojnih istraživanja koja dokazuju veći utjecaj zagađenja zraka na zdravlje ljudi nego što su to ranije spoznaje pokazale, Svjetska zdravstvena organizacija 2021. godine [5] donosi nove preporuke koncentracije zagađujućih čestica i plinova. Preporuka za smanjenje zagađujućih čestica $\text{PM}_{2.5}$ se promijenila od 10 na 5 $\mu\text{g m}^{-3}$, što prema

istraživanjima [6] u ovom trenutku ne može zadovoljiti više od 90 % svjetske populacije.

Pregledni rad [7] analizira učinkovitost različitih strategija smanjenja zagađenja zraka u nekoliko velikih svjetskih gradova. Preduvjet ocjene učinkovitosti mjera jest ažurna baza podataka monitoringa reprezentativnog uzorka i mjesta mjerenja prije i poslije apliciranja promatranih strategija. Rezultati velikog broja studija potvrđuju da je cestovni promet dominantan izvor dušikovog dioksida i značajan izvor primarnih zagađujućih čestica u gradovima. Takvi zaključci jasno pokazuju značaj Strategija restrikcije emisije ispušnih plinova u gradovima, a rezultati potvrđuju značajno smanjenje ukupnih čestica $PM_{2,5}$ i dušikovih oksida u gradovima koji su proveli Strategije s jakim nadzorom emisije od prometa, kao što su Peking, London, Pariz i Berlin [7].

Ocjena različitih strategija kontrole zagađenja zraka u urbanim sredinama napravljena je za 14 gradova u Italiji u trajanju monitoringa od 10 godina [8] i rezultati su pokazali da gradovi sjeverne Italije, koji su inovirali vozni park za sve kategorije vozila, bilježe pad zagađenja zraka po svim kriterijima usporedbe (PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , CO). Slične rezultate pokazuje studija provedena u Varšavi, Poljska [9]. Računalne simulacije pokazuju smanjenje NO_x koncentracije uzrokovane smanjenjem emisija modernih osobnih automobila, kamiona i kombija te autobusa javnog prijevoza koji uvažavaju dopuštene emisije Euro Normi za nova vozila. Rezultati [9] pokazuju da poboljšanje kvalitete zraka u smislu koncentracije CO ovisi gotovo isključivo o modernizaciji benzinskih vozila.

Studija [10] analizirala je odnos između gustoće prometa i razine onečišćenja zraka u urbanim područjima. Rezultati su pokazali da je gustoća prometa ključni pokazatelj razine onečišćenja zraka te da veće prometno opterećenje dovodi do viših koncentracija onečišćujućih tvari kao što su NO_x , $PM_{2,5}$ i crni ugljik, što je očekivani rezultat. Povećanje koncentracije dušikovih oksida (NO_x) i ugljičnog dioksida (CO_2) pokazuje veću korelaciju s udjelom teretnih vozila i autobusa u strukturi prometnog toka, nego s povećanjem ukupnog prometnog opterećenja.

Istraživanje [11] primjenjuje ITS tehnologiju za preporuku raspoloživih prometnih ruta s ciljem kontrole emisije na rutama koje su dosegle unaprijed postavljene granice emisije. Na temelju ulaznih podatke mjerenja prometnog opterećenja i kvalitete zraka na strateškim lokacijama napravljen je kratkoročni model predikcije koncentracije zagađujućih čestica $PM_{2,5}$ na ključnim prometnim koridorima, a primjenom AI alata generiraju se alternativne rute u realnom vremenu na koje se preusmjeravaju prometni tokovi. Model je razvijen na urbanoj prometnoj mreži grada Madrida.

Značajan je utjecaj okoliša i vremenskih uvjeta na rezultate mjerenja aerozagađenja. Analiza različitih studija [7,8,9,12] pokazuje nepovoljan

utjecaj uskih cesta i visoke okolne izgradnje na rezultate zagađenja zraka, pri čemu su tuneli posebno osjetljivi infrastrukturni objekti po kriteriju zagađenja zraka. Istraživanje [12] analizira utjecaj različitih parametara na izmjerene rezultate emisije ispušnih plinova kao što su blizina ceste mjerenoj stanici, okoliš, vrsta izgrađenosti, zelenilo, vremenski uvjeti, osobito vjetar, blizina vode i veličina, brzina i struktura prometnog toka. Studija jasno pokazuje da je primjena iste metodologije mjerenja i uzimanje okolišnih faktora u razmatranje preduvjet za usporedivost rezultata.

Svjetska zdravstvena organizacija ulaže napore u uvođenju jedinstvene metodologije prikupljanja, analize i prikazivanja podataka zagađenja zraka, da bi rezultati na svjetskoj razini bili usporedivi. Najdalje se u tome otišlo u Europskoj uniji [2] uvođenjem iste metodologije mjerenja, analize podataka i procjene rizika od zagađenja zraka. Procjena rizika temelji se na indeksu kvalitete zraka, čijim se uvođenjem stvara preduvjet usporedbe rezultata i donošenja Strategija smanjenja i kontrole emisija u urbanim sredinama Europske unije. Republika Hrvatska metodologiju Europske unije implementirala je u Zakon o zaštiti zraka, koji je donesen u svibnju 2022. godine [13].

Imajući u vidu veliki problem kvalitete zraka u urbanim sredinama, za planiranje izgradnje i rekonstrukcije prometne infrastrukture važno je ocijeniti utjecaj objekta na okoliš, još u planskoj fazi. Mikrosimulacije prometa koriste modele emisija koji uzimaju u obzir karakteristike vozila, brzinu, opterećenje motora, karakteristike voznog parka i druge parametre. Ovi modeli mogu generirati emisijske profile za svako pojedino vozilo na temelju njegovih karakteristika i ponašanja u simulaciji.

Mikrosimulacijsko prometno modeliranje usmjereno je dominantno na ocjenu funkcionalnih parametara prometnih rješenja, ali je kao rezultat mikrosimulacija moguće dobiti ekološke i ekonomske parametre. Ekološki parametri koji se mogu dobiti mikrosimulacijskim prometnim modelom VISSIM su parametri areozagađenja, točnije emisije ugljikovog monoksida, emisije dušikovih oksida te emisije hlapivih organskih spojeva, a ekonomski parametar je potrošnja goriva.

U okviru ovoga rada, a na primjeru rekonstrukcije raskrižja, analizirana je mogućnost primjene mikrosimulacijskog prometnog modeliranja u procjeni utjecaja varijantnih rješenja na ekološke i ekonomske parametre, uz funkcionalne parametre. Odabrano je raskrižje primarne funkcionalne razine u urbanoj mreži grada Osijeka. U okviru ovoga rada formirana su tri modela za analizu različitih infrastrukturnih rješenja raskrižja u razini: za postojeće stanje – klasično raskrižje i dva modela rekonstrukcije – semaforizirano i kružno raskrižje.

Mikrosimulacije prometa omogućuju procjenu učinka različitih prometnih scenarija na promatrane parametre, pa je za sva tri modela

analiziran utjecaj različite prometne potražnje, za dva izmjerena prometna opterećenja u dva vremenska presjeka i za povećanje prometne potražnje od 50 % i 100 % za sve prometne tokove, uključujući prometne tokove pješaka i biciklista [14]. Mikrosimulacijski prometni model omogućava simuliranje prometnih tokova vozila, pješaka i biciklista. Njihove interakcije u konfliktnim zonama sastavni su dio modela, pa su svi prometni tokovi modelirani za sve promatrane prometne scenarije. Ukupna ocjena varijantnih rješenja napravljena je za postojeću i buduću prometnu potražnju da bi se utvrdilo optimalno varijantno rješenje za funkcionalne i ekološke parametre u postojećim i budućim prometnim uvjetima.

2. Metodologija

2.1 Odabrano urbano raskrižje

Odabrano urbano raskrižje za analizu varijantnih rješenja je raskrižje Vinkovačka cesta – Gacka ulica u Osijeku. Raskrižje je izvedeno kao trokrako raskrižje spoja Gacke ulice (sporedna cesta) na Vinkovačku cestu (glavna cesta). Raskrižje je prije 2021. godine bilo nesemaforizirano, a nakon toga semaforizirano. Promet na dolaznim pravcima je dvosmjernan, dozvoljena brzina je 50 km/h, a raskrižje mora zadovoljiti multimodalne zahtjeve prometnih korisnika – pješačkih tokova i tokova javnog gradskog prijevoza tramvajem. Na Slikama 1 – 3 prikazano je nesemaforizirano raskrižje po privozima.



Slika 1. Vinkovačka cesta (sjever)[15] Slika 2. Gacka ulica (istok) [15]



Slika 3. Vinkovačka cesta (jug) [15]

Geometrijske karakteristike promatranog raskrižja, pješačkih prijelaza i parkirnih mjesta prikazane su na Slici 4.

Kod nesemaforiziranog raskrižja problem je nastajao prilikom skretanja iz istočnog privoza sporednog pravca Gacke ulice u Vinkovačku cestu, pogotovo kod lijevih skretača koji su imali manju preglednost u raskrižju, čime je bila smanjena sigurnost svih sudionika u prometu, te velike vremenske gubitke.

2.1.1 Prometno opterećenje

Prometni podatci u okviru Projekta semaforizacije [15] prikupljeni su brojanjem prometa od 6 do 18 sati, a u okviru Diplomskoga rada [14] snimano je prometno opterećenje video-kamerom u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu. U Tablici 1 prikazana su relevantna vršna jednosatna prometna opterećenja vozila i pješaka mjerena 22. 11. 2019. godine [15] i 1. 6. 2022. godine [14]. Prema rezultatima terenskih mjerenja [14,15] najveće je poslijepodnevno vršno prometno opterećenje od 15 do 16 sati, pa je ono usvojeno kao relevantno. Za potrebe analize moguće buduće prometne potražnje, prometno opterećenje iz 2022. godine povećano je za 50 % i 100 % za sve prometne tokove u raskrižju.

Tablica 1. Izmjerena prometna opterećenja 2019. i 2022. godine i buduća prometna potražnja[14,15]

15 - 16 h	Sjever (voz/h)		Jug (voz/h)		Istok (voz/h)		Ukupno (voz/h)
	R	L	R	D	D	L	
2019.	354	199	518	109	145	45	1370
2022.	854	232	654	88	210	138	2176
+ 50 %	1281	348	981	132	315	207	3264
+ 100 %	1708	464	1308	176	420	276	4352

*prometne struje: R- ravno, L- lijevo, D- desno

15 - 16 h	Pješaci I-Z P6	Pješaci Z-I P6	Pješaci S-J P7	Pješaci J-S P7
2019.	39	64	10	24
2022.	58	86	14	32
+ 50 %	87	129	21	48
+ 100 %	116	172	28	64

*Pješački tokovi obilježeni na Slici 4; I-Z - smjer istok-zapad, Z-I-smjer zapad-istok

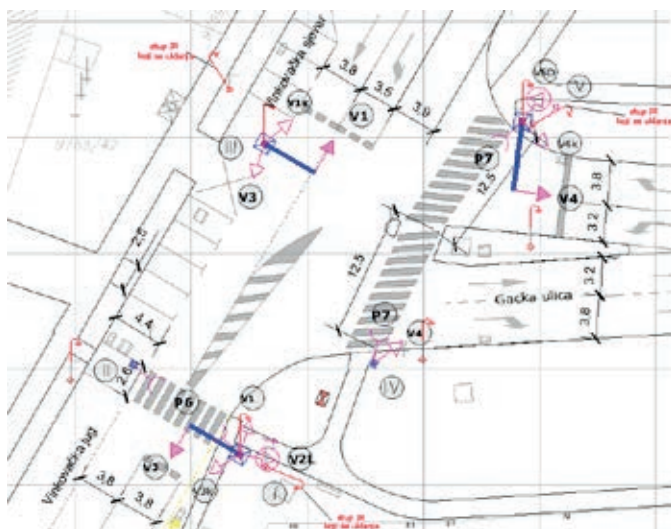
2.2 Varijantna rješenja rekonstrukcije

U okviru ovoga rada analizirana su dva varijantna rješenja rekonstrukcije raskrižja – semaforizacija i kružno raskrižje.

2.2.1 Semaforizacija raskrižja – Varijanta 1

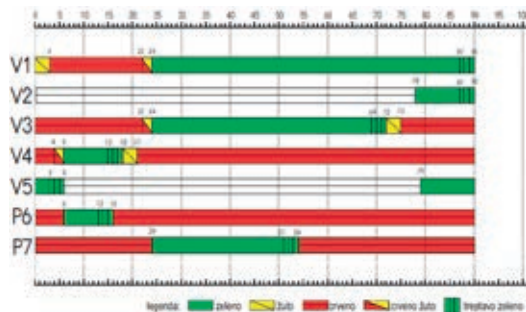
Situacijski plan semaforiziranog raskrižja ostao je isti kao i kod nesemaforiziranog te su postavljena tri konzolno-rasvjetna semaforska stupa na sve prilaze i dva ravna semaforska stupa na istočni i južni provoz. Zbog mogućnosti sinkronizacije rada semafora na potezu glavnog pravca Vinkovačke ceste, rad semaforskog uređaja usklađuje se sa susjednim raskrižjima (raskrižja Vinkovačke s Dunavskom, Savskom i Nertvaskom ulicom) i podijeljen u dvije faze i jednu podfazu.

Na Slici 4. prikazano je semaforizirano raskrižje. Oznake I – V označavaju broj semaforskog stupa, V1 – V5 označavaju signalne grupe za vozila, a P6 – P7 označavaju signalne grupe za pješake.



Slika 4. Semaforizirano raskrižje [15]

Semaforški ciklus projektiran je u okviru Projekta semaforizacije [15] za trajanje od 90 sekundi, a namijenjen je vremenskom programu od 6 do 22 sata svakoga dana (dnevni program).



Slika 5. Plan faza rada semafora [15]

Na Slici 5. prikazan je plan faza rada semafora. Prva faza se sastoji od signalne grupe V1, V3 i P7, podfaza od signalne grupe V1, V2 i V5 te druga faza od signalne grupe V4 i P6. Treptavo zeleno vrijeme traje zadnje tri sekunde ukupnog zelenog vremena [15].

2.2.2 Kružno raskrižje – Varijanta 2

Kružno raskrižje je jednostručno raskrižje vanjskog radijusa 18,5 m i analizirano je kao drugo varijantno rješenje raskrižja u okviru Diplomskog rada [14]. Raskrižje je projektirano za mjerodavno vozilo tegljač s poluprikolicom duljine 16,5 m. Prema preporukama Smjernica za projektiranje kružnih raskrižja [16], dozvoljena brzina unutar kružnog raskrižja je 30 km/h. Kružni kolnik je širine 5,5 m, povozni dio središnjeg otoka za teretno vozilo širine 2,9 m, a radijus središnjeg otoka 10,1 m (Slika 6). Između voznih traka je trokutasti razdjelni otok. Između istočnog i sjevernog privoza izveden je zaseban vozni trak širine 5 m za desne skretače koji ne ulaze u kružno raskrižje. Istočni privoz ima širinu kolničkog traka ulaza 3,5 m, a izlaza 6 m. Južni privoz ima širina kolničkog traka ulaza i izlaza 3,8 m. Sjeverni privoz ima širinu kolničkog traka ulaza i izlaza 3,7 m.

Na Slici 6 prikazano je kružno raskrižje s provjerom provoznosti [14].



Slika 6. Provjera provoznosti [14]

2.3 Modeli prometne simulacije

Simulacijski prometni modeli omogućavaju analizu prometnih tokova još u planskoj fazi infrastrukturnog objekta. Mikrosimulacijski modeli simuliraju kretanje svakog pojedinog vozila, biciklista, pješaka i sl. te u određenim vremenskim intervalima proračunavaju njihove međusobne odnose i položaje. U analizi učinkovitosti varijantnih rješenja najznačajniju ulogu imaju funkcionalni pokazatelji, no mikrosimulacijski modeli ne samo da imaju široku primjenu, nego omogućavaju analizu i drugih pokazatelja, kao što su potrošnja goriva i emisija ispušnih plinova generirana prometom [14]. U okviru ovoga rada modeli su napravljeni u mikrosimulacijskom prometnom modelu VISSIM koji sadrži složene matematičke modele, generatore slučajnih brojeva, raspodjele brzina, ubrzanja i dr. i daje dobre rezultate simulacije u odnosu na izmjerene pokazatelje, pa je jedan od najraširenijih softwera za mikrosimulacijsko modeliranje.

Na Slikama 7 – 9 prikazani su modeli raskrižja formirani u VISSIM-u.



Slika 7. Prikaz nesemaforiziranog raskrižja u VISSIM-u [14]



Slika 8. Prikaz semaforiziranog raskrižja u VISSIM-u [14]



Slika 9. Prikaz kružnog raskrižja u VISSIM-u [14]

Pokazatelji koji su promatrani u okviru ovog rada su funkcionalni, ekološki i ekonomski pokazatelji. Funkcionalni pokazatelji koji su promatrani su maksimalna duljina kolone (m) i kašnjenje vozila (s/voz). Ekološki pokazatelji koji su promatrani su emisija ugljikovog monoksida (g/h), emisija dušikovog oksida (g/h) te emisija hlapivih organskih spojeva (g/h). Promatrani ekonomski pokazatelj je potrošnja goriva (galon/h).

Modeliranje je izvršeno za različitu prometnu potražnju: za prometno opterećenje mjereno 2019. i 2022. godine te za povećanje prometa mjenenog 2022. godine za 50 % i 100 % (Tablica 1) za sve tokove u raskrižju. Da bi se modelirala stohastičnost prometnog sustava analizirano je deset različitih scenarija nailaska vozila, ali je za svako infrastrukturno rješenje raskrižja analizirano istih deset scenarija nailaska vozila kako bi rezultati bili usporedivi.

3. Rezultati ocjene varijantnih rješenja i diskusija

U Diplomskome radu [14] je napravljena analiza minimalnih, srednjih i maksimalnih funkcionalnih pokazatelja i pokazatelja aerozagađenja i potrošnje goriva, ali u ovome radu će biti prikazane samo maksimalne vrijednosti pokazatelja kako bi se analizirali kritični efekti.

3.1 Usporedba odabranih pokazatelja za varijantna rješenja po privozima

U Tablicama 2 – 4 prikazane su maksimalne vrijednosti prometnih pokazatelja ovisno o prometnom opterećenju. Funkcionalni pokazatelji prikazani u tablici su maksimalna dužina kolone vozila (m) koja se pojavila u promatranom vršnom satu i kašnjenja – ukupni vremenski gubitci podijeljeni na broj vozila (sek/voz) za promatrani vršni sat. Emisije CO, NO_x i VOC promatrane su sumarno (g/h) pod nazivom zagađenje zraka.

Tablica 2. Maksimalne vrijednosti pokazatelja za sjeverni privoz ovisno o prometnom opterećenju [14]

Privoz	Vrsta	Parametar	Prometno opterećenje			
			2019.	2022.	+ 50 %	+100 %
SJEVERNI PRIVOZ	Nesemaforizirano	Kolona vozila (m)	44,47	121,06	113,82	114,37
		Kašnjenja (s/voz)	16,18	16,69	66,59	86,49
		Zagađenje zraka (gr/h)	87,961	244,589	484,445	824,412
		Potrošnja goriva (gal/h)	1,258	3,499	6,931	11,794
		Ukupna ocjena	1	2	3	2
	Semaforizirano	Kolona vozila (m)	66,75	72,28	78,09	78,03
		Kašnjenja (s/voz)	27,8	33,65	43,29	93,3
		Zagađenje zraka (gr/h)	162,868	311,23	473,097	868,352
		Potrošnja goriva (gal/h)	2,33	4,453	6,768	12,423
		Ukupna ocjena	2	2	1	3
	Kružno	Kolona vozila (m)	88,11	99,75	97,37	99,83
		Kašnjenja (s/voz)	9,42	24,97	31,85	44,47
		Zagađenje zraka (gr/h)	174,353	548,114	654,317	791,97
		Potrošnja goriva (gal/h)	2,494	7,841	9,361	11,33
		Ukupna ocjena	3	3	3	1

Ocjena 0 označava da raskrižje nije funkcionalno, ocjena 1 označava optimalno rješenje raskrižja u odnosu na promatrane pokazatelje i analizirana varijantna rješenja, ocjena 2 dobro rješenje raskrižja i ocjena 3 rješenje raskrižja koje ima najlošije promatrane pokazatelje u okviru analiziranih varijantnih rješenja. Ukupna ocjena označava relativnu ocjenu (rangiranje) varijantnog rješenja ovisno o promatranim pokazateljima i prometnom opterećenju.

U Tablici 2 prikazane su maksimalne vrijednosti pokazatelja za sjeverni privoz ovisno o prometnom opterećenju. Za prometno opterećenje mjereno 2019. godine optimalno rješenje je nesemaforizirano raskrižje. Za prometno opterećenje mjereno 2022. godine i nesemaforizirano i semaforizirano rješenje su dobra rješenja raskrižja, a kružno raskrižje, iako funkcionalno, ima lošije promatrane pokazatelje u odnosu na ostala varijantna rješenja. Za povećanje prometa od 50 % semaforizirano raskrižje je optimalno rješenje, a za povećanje prometa od 100 % najbolje pokazatelje ima kružno raskrižje.

Tablica 3. Maksimalne vrijednosti pokazatelja za južni privoz ovisno o prometnom opterećenju [14]

Privoz	Vrsta	Parametar	Prometno opterećenje			
			2019.	2022.	+50 %	+100 %
JUŽNI PRIVOZ	Nesemaforizirano	Kolona vozila (m)	40,87	42,31	49,7	46,12
		Kašnjenja (s/voz)	3,48	6,7	7,53	11,83
		Zagađenje zraka (gr/h)	114,505	148,695	289,836	339,809
		Potrošnja goriva (gal/h)	1,638	2,127	4,146	4,861
		Ukupna ocjena	1	1	2	2
	Semaforizirano	Kolona vozila (m)	43,72	45,8	43,58	45,38
		Kašnjenja (s/voz)	21,6	18,97	27,3	26,68
		Zagađenje zraka (gr/h)	230,056	251,046	52,76	324,186
		Potrošnja goriva (gal/h)	3,291	3,592	0,755	4,638
		Ukupna ocjena	2	2	1	1
	Kružno	Kolona vozila (m)	46,5	55,21	55,21	55,1
		Kašnjenja (s/voz)	11,74	29,83	32,19	33,29
		Zagađenje zraka (gr/h)	318,137	451,175	500,61	520
		Potrošnja goriva (gal/h)	4,551	6,455	7,162	7,439
		Ukupna ocjena	3	3	3	3

U Tablici 3 prikazane su maksimalne vrijednosti pokazatelja za južni privoz ovisno o prometnom opterećenju. Za prometno opterećenje mjereno 2019. godine optimalno rješenje je nesemaforizirano raskrižje, a semaforizirano je dobro rješenje. Za prometno opterećenje mjereno 2022. godine optimalno rješenje je nesemaforizirano raskrižje, a dobro rješenje je semaforizirano. Za povećanje prometa od 50 % i 100 % u oba je slučaja optimalno rješenje semaforizirano raskrižje.

U Tablici 4 prikazane su maksimalne vrijednosti pokazatelja za sporedni pravac, za istočni privoz, ovisno o prometnom opterećenju. Za prometno opterećenje mjereno 2019. godine optimalno rješenje je nesemaforizirano raskrižje, a kružno raskrižje je dobro rješenje. Za prometno opterećenje mjereno 2022. godine optimalno rješenje je kružno raskrižje, a dobro rješenje je semaforizirano raskrižje. Za povećanje prometa od 50 % i 100 % nesemaforizirano raskrižje je nefunkcionalno zbog neprihvatljivih kašnjenja, a semaforizirano i kružno raskrižje su, prema promatranim pokazateljima, dobra rješenja u oba slučaja.

Tablica 4. Maksimalne vrijednosti pokazatelja za istočni privoz ovisno o prometnom opterećenju [14]

Privoz	Vrsta	Parametar	Prometno opterećenje			
			2019.	2022.	Poveć. 50 %	Poveć. 100 %
ISTOČNI PRIVOZ	Nesemaforizirano	Kolona vozila (m)	47,03	88,65	81,41*	81,96*
		Kašnjenja (s/voz)	3,93	73,01	2088,56	2381,64
		Zagađenje zraka (gr/h)	48,885	417,864	421,891	333,075
		Potrošnja goriva (gal/h)	0,699	5,978	6,036	4,765
		Ukupna ocjena	1	3	0	0
	Semaforizirano	Kolona vozila (m)	71,38	78,45	78,59	78,75
		Kašnjenja (s/voz)	43,71	76,8	91,46	93,65
		Zagađenje zraka (gr/h)	129,935	342,209	430,791	433,219
		Potrošnja goriva (gal/h)	1,859	4,896	6,163	6,198
		Ukupna ocjena	3	2	2	2
	Kružno	Kolona vozila (m)	35,48	86,53	92,37	95,67
		Kašnjenja (s/voz)	9,72	15,76	20,53	30,19
		Zagađenje zraka (gr/h)	83,585	147,341	265,349	443,915
		Potrošnja goriva (gal/h)	1,196	2,108	3,796	6,351
		Ukupna ocjena	2	1	2	3

* Podatci nisu relevantni; zbog velikih vremenskih gubitaka program prestaje generirati vozila na tom privozu

3.2 Ocjena varijantnih rješenja raskrižja

Tablica 5. prikazuje relativno rangiranje varijantnih rješenja na temelju ocjena privoza prema kriteriju promatranih pokazatelja i za promatrano prometno opterećenje. Ukupna ocjena označava relativno rangiranje varijantnog rješenja raskrižja ovisno o srednjoj ocjeni privoza.

Za prometno opterećenje 2019. godine optimalno rješenje bilo bi nesemaforizirano, a dobro rješenje semaforizirano raskrižje. Kružno raskrižje za promatrano prometno opterećenje ima najveće vremenske gubitke i kolonu vozila, što je očekivano, jer je značajna razlika prometnog opterećenja glavnog i sporednog pravca, a kružno raskrižje ne favorizira niti jedan pristupni pravac. Za prometno opterećenje 2022. godine sva tri raskrižja daju dobre rezultate, ali semaforizirano raskrižje daje svim privozima podjednake ocjene, što bi značilo da su za ovo prometno

opterećenje svi privozi dobro projektirani. Za povećanje prometne potražnje od 50 % nesemaforizirano raskrižje je nefunkcionalno, a semaforizirano raskrižje je optimalno rješenje. Za povećanje prometne potražnje od 100 % nesemaforizirano raskrižje je nefunkcionalno, a semaforizirano i kružno raskrižje su dobra rješenja.

Tablica 5. Ocjena varijantnih rješenja raskrižja [14]

Varijantno rješenje	Privozi	Prometno opterećenje			
		2019.	2022.	+50 %	+ 100 %
Nesemaforizirano raskrižje	Sjeverni privoz	1	2	3	2
	Južni privoz	1	1	2	2
	Istočni privoz	1	3	0	0
	ukupna ocjena	1	2	0	0
Semaforizirano raskrižje	Sjeverni privoz	2	2	1	3
	Južni privoz	2	2	1	1
	Istočni privoz	3	2	2	2
	ukupna ocjena	2	2	1	2
Kružno raskrižje	Sjeverni privoz	3	3	3	1
	Južni privoz	3	3	3	3
	Istočni privoz	2	1	2	3
	ukupna ocjena	3	2	3	2

Prema rezultatima analize mikrosimulacije za tri rješenja raskrižja u razini i za različitu prometnu potražnju, optimalno rješenje je semaforizirano raskrižje. Semaforizacija raskrižja je izvedeno rješenje na promatranoj lokaciji. Nesemaforizirano raskrižje je nefunkcionalno u uvjetima veće prometne potražnje jer nastaju neprihvatljiva kašnjenja na sporednom pravcu, na istočnom privozu. Kružno raskrižje ima raznolike ocjene i iako je za sve uvjete prometne potražnje rješenje funkcionalno, u pojedinim uvjetima prometne potražnje ima lošije funkcionalne pokazatelje u odnosu na ostala varijantna rješenja prema rezultatima mikrosimulacijskog prometnog modeliranja. Problem nastaje zbog velikih vremenskih gubitaka koji nastaju kao posljedica značajne razlike prometnog opterećenje na glavnom i sporednom pravcu. Veliki zastoji na privozima glavnog pravca generiraju veću emisiju ispušnih plinova i veću potrošnja goriva.

4. Zaključak

Prema rezultatima Svjetske zdravstvene organizacije, više od 90 % ukupne populacije ljudi koji žive u urbanim uvjetima izloženo je zagađenju zraka koje je veće od preporuka Svjetske zdravstvene organizacije.

Istraživanja provedena u cijelome svijetu pokazuju da emisije koje proizvode vozila doprinose zagađenju zraka i predstavljaju ozbiljan problem za životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Jedan od načina prevencije povećanja zagađenja zraka od prometa je da se za svako infrastrukturno prometno rješenje napravi analiza njegovog utjecaja na okoliš. Mikrosimulacijsko prometno modeliranje vrlo detaljno, na razini svakog entiteta, simulira kretanje i interakcije entiteta temeljem različitih matematičkih modela i probabilistike za zadano prometno opterećenje svake prometne struje i zadanu strukturu prometa. Pritom koristi karakteristike vozila, snagu motora za odabrani vozni park, koristi raspodjelu brzina, pri čemu su zadane brzine, kao i zadana usporenja i ubrzanja, medijane raspodjele. Ovi modeli mogu generirati emisijske profile za svako pojedino vozilo na temelju njegovih karakteristika i ponašanja u simulaciji. Primjenom mikrosimulacijskog prometnog modeliranja moguće je analizirati neograničeni broj scenarija, pa je moguće analizirati odgovor varijantnih rješenja prometnih objekata na različite prometne zahtjeve, različitu strukturu prometnog toka i različite interakcije prometnih korisnika. Imajući to u vidu, realno je očekivati da će takvo modeliranje dati dobru predikciju utjecaja ispušnih plinova i potrošnje goriva za svako analizirano varijantno rješenje, što je ocjena varijantnih rješenja rekonstrukcije raskrižja ovog rada i pokazala.

U okviru ovog rada analizirana su četiri različita scenarija prometnog opterećenja i odgovor varijantnih rješenja na različitu prometnu potražnju. Ocjena varijantnih rješenja napravljena je analizom funkcionalnih pokazatelja kao što su dužina kolone vozila i vremenski gubitci, ekonomskih pokazatelja kroz potrošnju goriva i ispušnih plinova analizom emisije ugljikovog monoksida, dušikovih oksida te hlapivih organskih spojeva. Projektno rješenje, koje se pokazalo optimalnim po kriteriju funkcionalnih pokazatelja, optimalno je i po kriteriju ekonomskih i ekoloških pokazatelja.

Prilikom interpretacije rezultata mikrosimulacija važno je uzeti u obzir ograničenje mikrosimulacijskog modeliranja koje ne uzima u razmatranje okoliš, okolnu izgradnju i visinu izgrađenih objekata, vremenske uvjete, vjetar i još neke dodatne utjecajne parametre. Rezultati zagađenja zraka dobiveni primjenom mikrosimulacijskog prometnog modeliranja ne mogu se uzeti kao apsolutni pokazatelji. Brojčane pokazatelje treba razmatrati kao relativne vrijednosti koje imaju svoju primjenu u usporedbi varijantnih rješenja izgradnje ili rekonstrukcije infrastrukturnih objekata na istoj lokaciji jer se može uzeti da su svi ostali utjecajni pokazatelji promatrane lokacije isti, a da se za različita infrastrukturna rješenja i različite prometne scenarije analizira samo utjecaj generiran prometom.

Jedan od pravaca daljeg istraživanja je analiza učinkovitosti različitih strategija i primjena mjera koje će smanjiti emisije ne samo za vozila koja

koriste fosilna goriva, nego i za alternativne izvore energije poput električnih vozila. U to se uklapa procjena utjecaja infrastrukturnih prometnih objekata na okoliš, a koju je moguće dobiti još u planskoj fazi primjenom mikrosimulacijskog prometnog modeliranja.

Zahvala. *Autori zahvaljuju na suradnji tvrtki Signal Projekt iz Osijeka koja je prilikom izrade Diplomskoga rada omogućila pristup rezultatima Prometnog elaborata semaforizacije raskrižja Vinkovačke ceste i Gacke ulice iz 2019.*

Literatura

- [1] Ambient Air Pollution Attributable Deaths [website]. In: WHO/Data/The Global Health Observatory. Geneva: World Health Organization; 2022 <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-deaths> (19. 06. 2023.)
- [2] Cromar K, Lazrak N. (2023) Risk Communication of Ambient Air Pollution in the WHO European Region: review of air quality indexes and lessons learned. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-EURO-2023-6885-46651-67825> (20.06. 2023.)
- [3] WHO global strategy on health, environment and climate change: the transformation needed to improve lives and wellbeing sustainably through healthy environments. Geneva: World Health Organization; 2020, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331959> (19. 06. 2023.)
- [4] Gartland, N., Aljofi, H.E., Dienes, K., Munford, L.A., Theakston, A.L., van Tongeren, M. (2022) The Effects of Traffic Air Pollution in and around Schools on Executive Function and Academic Performance in Children: A Rapid Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 749. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020749>
- [5] WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (19. 06. 2023.)
- [6] Pai, S. J., Carter, T. S., Heald, C. L., Kroll, J. H. (2022) Updated World Health Organization Air Quality Guidelines Highlight the Importance of Non-anthropogenic PM_{2.5}, *Environmental Science & Technology Letters* 2022 9 (6), 501-506, doi: 10.1021/acs.estlett.2c00203
- [7] Harrison, R.M., Vu, T.V., Jafar, H., Shi, Z. (2021) More Mileage in Reducing Urban Air Pollution from Road Traffic, *Environment International*, V. 149, 106329, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106329>
- [8] Tomassetti, L., Torre, M., Tratzi, P., Paolini, V., Rizza, V., Segreto, M., Petracchini, F., Tomassetti, L., Torre, M., Tratzi, P., et al. (2020) Evaluation of

- Air Quality and Mobility Policies in 14 Large Italian Cities from 2006 to 2016. *J. Environ. Sci. Health Part A*, 55, 886–902.
- [9] Holnicki, P., Nahorski, Z., Kałuszko, A. (2021) Impact of Vehicle Fleet Modernization on the Traffic-Originated Air Pollution in an Urban Area—A Case Study. *Atmosphere*, 12, 1581. <https://doi.org/10.3390/atmos12121581>
- [10] Font, A., Fuller, G. W. (2016) Did Policies to Abate Atmospheric Emissions from Traffic Have a Positive Effect in London?, *Environmental Pollution*, V. 218, pp. 463-474, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.026>
- [11] Díaz, G., Macià, H., Valero, V. et al. (2020) An Intelligent Transportation System to control air pollution and road traffic in cities integrating CEP and Colored Petri Nets. *Neural Comput & Applic* 32, 405–426. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3850-1>
- [12] Mukherjee, A., McCarthy, M.C., Brown, S. G., Huang, S., Landsberg, K., Eisinger, D. S. (2020) Influence of Roadway Emissions on Near-Road PM_{2.5}: Monitoring data analysis and implications, *Transport. Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 86, 102442, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102442>.
- [13] Zakon o zaštiti zraka, Narodne novine 127/19 i 57/22
- [14] Maričević, B. (2022) Primjenjivost ekoloških i ekonomskih parametara mikrosimulacijskog prometnog modela u ocjeni rješenja rekonstrukcije gradske prometnice, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:877822>
- [15] Projekt: Prometni elaborat semaforizacije raskrižja Vinkovačke ceste i Gacke ulice. 2019. Signal Projekt, projektant: Marko Orkić dipl. ing. građ., projektant suradnik: Martin Gjergja mag. ing. el., i projektant suradnik: Zoran Šelmić dipl. ing. prom.; Investitor: Grad Osijek
- [16] Deluka-Tibljaš, A. Tollazzi, T. i dr: Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama, naručitelj: Hrvatske ceste d.o.o., Rijeka 2014. godine