

## Procena emisije zagađujućih materija od saobraćaja primenom mikrosimulacionih modela

STAMENKA R. STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Saobraćajni fakultet, Beograd  
VLADIMIR D. ĐORIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Saobraćajni fakultet, Beograd  
JELENA N. KAJALIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Saobraćajni fakultet, Beograd

Originalni naučni rad  
UDC: 504.5:621.43.068  
DOI: 10.5937/tehnika2106801S

*Tradicionalne metode upravljanja saobraćajem uglavnom su orijentisane na optimizaciju vremena putovanja, odnosno minimiziranje vremenskih gubitaka. Savremeni pristup sve češće akcenat stavlja na minimizaciju negativnih uticaja saobraćaja na životnu sredinu. Stoga je značajno omogućiti vrednovanje različitih strategija upravljanja saobraćajem i sa aspekta emisije zagađujućih materija. Mikroskopski simulacioni modeli omogućavaju detaljnu reprezentaciju saobraćajnog toka (second-by-second), čime je stvoren preduslov da se njihovom integracijom sa emisionim modelima omogući ovaj aspekt vrednovanja različitih upravljačkih strategija. U radu je prikazana mogućnost integracije mikroskopskog simulacionog modela VISSIM i emisionog modela MOVES. Zaključeno je da se ovom integracijom omogućava poređenje različitih upravljačkih strategija sa aspekta emisije zagađujućih materija.*

**Ključne reči:** mikroskopski saobraćajni modeli, emisioni modeli, VISSIM, MOVES

### 1. UVOD

Prema izveštaju European Environment Agency (EEA), u periodu od 2007. do 2013. god. u evropskom sektoru transporta emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte (*en.* GHG) su se smanjivale, dok nakon tog perioda dolazi do njihovog ponovnog porasta. Sektor transporta je jedini ekonomski sektor u Evropi u kom se nivo emisija povećava, u poređenju sa nivoom iz 1990. god. U 2017. godini (poslednji dostupan izveštaj) u EU-28 čak 27% ukupnih emisija GHG potiče iz sektora transporta, od čega 82% isključivo od drumskog saobraćaja. Takođe, 44,3% emisija u drumskom saobraćaju potiče od putničkih automobila [1].

Zagađujuće materije koje čine emisije u saobraćaju oslobađaju se ili kao gasovi ili kao čestice. Dva najčešće korišćena goriva (dizel i benzin) generišu različite mešavine zagađujućih materija: benzinska vozila su uglavnom odgovorna za emisije ugljen-monoksida

(CO), isparljivih organskih komponenti (VOC), amonijaka (NH<sub>3</sub>) i teških metala; dizel vozila proizvode većinu suspendovanih čestica veličine od 2,5 mikrona i manje (PM<sub>2,5</sub>) i okside azota (NO<sub>x</sub>) [2]. Pored toga, za efekat globalnog zagrevanja značajne su i emisije ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>). Međutim, dok noviji automobili oslobađaju manje zagađujućih materija, očekivano smanjenje emisija ostvariće se samo ako se pravilno održava sistem za kontrolu emisija [3].

Generalno, u literaturi se izdvajaju sledeći najbitniji polutanti koje emituju drumska vozila [4]:

- prekursori ozona, odnosno supstance koje doprinose stvaranju prizemnog ozona (CO, NO<sub>x</sub>, NM-VOC);
- GHG (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O);
- zakiseljavajući gasovi (NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>);
- suspendovane čestice (PM);
- kancerogene materije (PAHs – policiklični aromatični ugljovodonici i POPs – dugotrajni organski zagađivači);
- toksične supstance (dioksini i furani);
- teški metali.

Sada već standardni pristup u proceni emisija saobraćajnih tokova se bazira na modeliranju saobraćaja i

---

Adresa autora: Stamenka Stanković, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

e-mailo: s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Rad primljen: 09.12.2021.

Rad prihvaćen: 13.12.2021.

upotrebi emisionih modela. Modelski pristup je moguće realizovati na različitim nivoima [4][5]:

- makroskopski nivo - koji podrazumeva procenu na nivou većih prostornih jedinica (država, region, grad) upotrebom grubljih modela (zasnovani npr. samo na transportnom radu);
- mikroskopski nivo - koji podrazumeva procenu na nivou pojedinačne raskrsnice (ili niza raskrsnica ili zone) upotrebom preciznijih modela (zasnovani na preciznim emisijama pojedinačnih vozila u svakoj sekundi);
- mezoskopski nivo - koji podrazumeva pristup između mikroskopskog i mezoskopskog pa se procena odnosi na prostore gradova ali sa većim nivoom preciznosti modela ili većeg broja raskrsnica (u odnosu na mikroskopske modele) ali sa manjih nivou detaljnosti.

U narednim poglavljima će biti reči o opštim aspektima modeliranja emisija sa akcentom na mikroskopsko modeliranje i na mogućnosti integracije saobraćajnih i emisionih modela.

## 2. MODELIRANJE EMISIJA

Transportni modeli mogu biti kreirani sa različitim nivoom detaljnosti, na makroskopskom ili mikroskopskom nivou i u odnosu na to se mogu uzimati različiti ključni parametri koji su potrebni za proračun emisije.

Tabela 1. Klasifikaciju modela za estimaciju emisija zagađujućih materija [4], [6]

Klasa emisionog modela	Parametar	Emisije
Makroskopski	Prosečna brzina	Emisije na nivou regiona ili grada (veći prostori)
Mezoskopski	Ubrzanje, brzina i stepen zasićenja na tipu infrastrukture	Emisije cele mreže u zavisnosti od tipa infrastrukture
Mikroskopski	Oprativni mod vozila u sekundi	Emisije vozila u svakoj sekundi

Imajući u vidu tip vozila, veličinu, gorivo, način održavanja i način vožnje istog, svako vozilo pa i njegovi emisioni faktori se mogu smatrati jedinstvenim. Jasno je da je nemoguće da se svako vozilo u emisionom modelu bude tretirano individualno. Stoga je osnovni zadatak emisionih modela upravo klasifikacija vozila. Pored klasifikacije kategoriji vozila, osnovnu karakteristiku predstavlja njegov emisioni standard a time i starost vozila. Dalje podkategorije vozila uzimaju u obzir vrstu goriva, kao i neku meru veličine vozila (kapacitet motora, težinu vozila, itd.) [7]. Većina emisionih modela, pored klasifikacije vozila, uzima u

obzir i operativne parametre vozila koji su posledica uslova u saobraćajnom toku, karakteristika puta, načina upravljanja saobraćajem i terena, ali se nivo detaljnosti ovih parametara značajno razlikuje.

U najprostijim modelima prepoznaju se tri operativna moda vozila, gradski, vangradski i autoputski. Takođe, veliki broj modela za procenu emisije koristi prosečnu brzinu vozila kao karakteristiku njegovog operativnog moda. Za detaljan opis operativnog moda vozila određeni modeli najčešće koriste kombinaciju parametara, a najčešće težinu vozila i trenutnu brzinu i ubrzanje. Takođe, brojni modeli uzimaju u obzir i dodatne parametre kao što su uzdužni nagib, nadmorska visina, stanje sistema kontrole izduvnih gasova, temperatura, upotrebu rashladnih uređaja, itd. Iako je poznat uticaj ovih dodatnih faktora na emisiju izduvnih gasova, on je u modelima retko kvantifikovan. Tabela 1. prikazuje generalnu klasifikaciju modela za estimaciju emisija zagađujućih materija.

U ranijem periodu, makroskopski modeli zasnovani na prosečnoj brzini vozila na linku, odnosno deonici bili su najčešće korišćena metodologija za estimaciju emisija. Na primer, u Evropi se za utvrđivanje emisionih faktora na nivou voznog parka ili grada i dalje koristi COPERT metodologija razvijena u okviru evropskog MEET projekta. Ovi makroskopski modeli razvijeni su uz brojna pojednostavljenja samih fizičkih procesa koji dovode do emisija zagađujućih materija [4]. Važan nedostatak makroskopskih modela je to što ovi modeli vrše proračun emisije po kilometru pređenog puta vozila, koristeći uglavnom prosečnu brzinu vozila kao primarni ili čak jedini uticajni faktor [8]. Iako je prosečna brzina vozila značajan uticajni faktor, značajan uticaj imaju i varijacije trenutne brzine vozila, koje su naročito česte u gradskim uslovima. Za istu vrednost prosečne brzine, vozila mogu imati potpuno različite profile brzine i ubrzanja, što rezultira značajno različitim nivoom emisije [4][9].

S druge strane, precizniji modeli emisija (mezo i mikroskopski) obično sadrže niz pod-modela, od kojih svaki generiše ulazne podatke za sledeći. Prvi model podrazumeva kreiranje voznog parka i generisanje putovanja, zatim raspodele saobraćaja odnosno transportni ili simulacioni model, model emisije i konačno model disperzije emisija.

U ovom radu će fokus biti na mikroskopskim modelima. Mikroskopski modeli saobraćaja (Aimsun, VISSIM, TRANSIMS, MITSIMLab, PARAMSICS, itd.) tretiraju individualna vozila na nivou svake sekunde (second-by-second). Ovakvi modeli omogućavaju dobijanje podataka o trenutnoj brzini i ubrzanju svakog pojedinačnog vozila, što značajno povećava preciznost procene emisija, jer se iste značajno menjaju odstupanjem od ravnomerne, odnosno prosečne brzine [10].

Poznato je da su emisije vozila u jakoj korelaciji sa ponašanjem vozača, odnosno stilom vožnje. De Vlieger je pokazao da agresivan način vožnje rezultira značajnim povećanjem potrošnje goriva a time i emisija u odnosu na normalan stil: emisija CO se povećava do čak 8 puta, VOC u rangu 15-400% a NOx od 20-150% [11]. Takođe, istraživanja su pokazala da većina vozača provede oko 2% vremena putovanja u agresivnom stilu vožnje, što doprinosi sa oko 40% u ukupnoj emisiji [12].

U skorije vreme, razne strategije upravljanja saobraćajem (optimizacija rada signala, dinamičko rutiranje/vođenje saobraćaja, harmonizacija brzina u toku, itd.), pokušavajući prevashodno da smanje zagašenja i povećaju efikasnost saobraćajne mreže, posredno utiču i na emisije zagađujućih materija. Zbog jednostavnije interpretacije, različite optimizacije saobraćajnog toka sa aspekta uticaja na životnu sredinu, najčešće su se oslanjale na potrošnju goriva [13]. Analiza uticaja na životnu sredinu bilo koje strategije upravljanja saobraćajem je složeno pitanje i zahteva detaljnu analizu ne samo uticaja na prosečnu brzinu već i drugih aspekata rada vozila kao što su ubrzanje i usporenje [8]. S tim u vezi, značajan broj autora je razvijao modele za procenu emisija u uslovima primene neke od strategija upravljanja saobraćajem u realnom vremenu [8]. Za primenu u realnim uslovima neophodno je da ovi modeli uzimaju u obzir način rada vozila, odnosno trenutnu brzinu i ubrzanje. Joumard (1995) je dokazao da je emisija zavisila od trenutne brzine i proizvoda brzine i ubrzanja, odnosno da stope emisije rastu ne samo sa porastom brzine već i sa porastom stepena ubrzanja [14]. Najveći emisioni faktori pojavljuju se pri brzinama manjim od 30 km/h zbog neefikasnog rada motora, koji je primarna posledica uslova vožnje u forsiranom toku (kreni-stani vožnja) i čestog ubrzanja i praznog hoda motora [15]. Veliki broj radova je posvećen razvoju modela koji uzimaju u obzir trenutne promene brzine, kao što je CMEM model (Comprehensive Modal Emission Model) razvijen na Univerzitetu u Kaliforniji.

Mikrosimulacioni modeli se upravo zasnivaju na preciznoj reprezentaciji ponašanja vozača (modeli sleđenja vozila, modeli promene trake, itd.) koji za rezultat imaju trajektorije individualnih vozila u simulaciji. Na taj način mikrosimulacioni modeli obezbeđuju trenutne brzine i ubrzanja vozila (second-by-second) koji su neophodni kao ulazni parametri u mikroskopskim emisionim modelima.

Marsden (2001) je razvio mikroskopski model CO emisija zasnovan na brzini vozila i klasifikaciji istih na osnovu ubrzanja, tipu motora i stanju sistema za kontrolu izduvnih gasova [16]. Boriboonsomsin i Barth (2009) su istraživali uticaj uzdužnog nagiba na potrošnju goriva a time i na emisiju CO<sub>2</sub>, pri čemu su

zaključili da isti nema značajan uticaj kada su u pitanju putnički automobili [17].

Papson (2012) je integrisao mikrosimulacioni model SYNCHRO sa MOVES emisionim modelom i proračunao emisije na raskrsnici u uslovima sa i bez zagašenja koristeći „time-in-mode“ (TIM) metodologiju koja kombinuje emisione faktore za svaki mod rada vozila (npr. ubrzanje, usporenje, vožnja, prazan hod motora) sa ukupnim vremenom koje vozilo provede u datom modu [18]. Pandian (2009) je analizirao uticaj različitih saobraćajnih karakteristika (saobraćajni tok, put i vozila) na emisije u zoni raskrsnice, čime je pokazao da se simulacioni i emisioni modeli mogu kombinovati kako bi se bolje procenile emisije na raskrsnicama [19].

### 3. MOGUĆNOSTI PROCENE EMISIJA INTEGRISANJEM SAOBRAĆAJNOG I EMISIONOG MODELA

U narednom delu teksta biće predstavljena procedura za povezivanje VISSIM saobraćajnog simulacionog modela i MOVES emisionog modela.

#### 3.1. VISSIM - ulazni i izlazni podaci

U ovom radu je korišćen VISSIM 11 mikroskopski simulacioni model koji je zasnovan na psiho-fizičkom modelu sleđenja vozila i predstavlja često korišćen alat za evaluaciju alternativnih rešenja. Podaci o emisiji dostupni su direktno u VISSIM-u preko evaluacije čvora (Node Evaluation: CO, NOx, VOC i potrošnja goriva). Osnovu za proračun ovih emisija čine standardne jednačine za potrošnju goriva [20] kao i podaci o emisijama dobijeni od Oak Ridge National Laboratory of the U.S. Department of Energy. Podaci predstavljaju tipičan vozni park u SAD i ne razlikuju tipove vozila tako da se ovaj tip evaluacije može koristiti isključivo za poređenje različitih rešenja a ne i za dobijanje preciznih podataka o emisijama. S druge strane, VISSIM može da generiše veliki broj podataka za svako pojedinačno vozilo na mreži u svakoj sekundi simulacije, i to onih podataka koji su neophodni za estimaciju emisija, kao što su profili brzine i ubrzanja na nivou svake sekunde, karakteristike mreže kao i ostale parametre pojedinačnih vozila.

Osnovni elementi koje je neophodno definisati u VISSIM-u su [21]:

Definisanje linkova mreže, sa ili bez uzdužnog nagiba; Definisanje čvorova na mreži, odnosno prioriteta za nesignalisane (Priority Rule) i rada signala za signalisane raskrsnice (Signal Control);

Definisanje tipova vozila (Vehicle Types) sa pripadajućim karakteristikama odnosno raspodelama maksimalnog i željenog ubrzanja i usporenja, za putničke automobile, ako i raspodele težine i snage samo za teretna vozila; Sve potrebne raspodele je neophodno

prethodno kreirati u okviru osnovnih podataka o vozilima (Base Data – Functions i Distributions). Preporuka za definisanje željene brzine je da se definiše sa određenom raspodelom oko ograničenja brzine, dok se raspodela usporenja i ubrzanja može definisati na osnovu domaćih i stranih istraživanja;

Saobraćajno opterećenje za svaku tačku ulaska vozila u mrežu (Vehicle Inputs) ili jedinstveno za celu mrežu (u zavisnosti od željenog nivoa detaljnosti) neophodno je kreirati strukturu toka (Vehicle Compositions) sa relativnim učešćem svakog od prethodno definisanih tipova vozila;

Za svako saobraćajno opterećenje neophodno je definisati i raspodelu saobraćaja na mreži, ukoliko je potrebno i pojedinačno za svaku od kategorija vozila u mreži (ukoliko nije ista raspodela putničkih i teretnih vozila).

Zbog svoje direktne fizičke interpretacije i jake korelacije sa emisijama, *VSP* je postao široko rasprostranjen pristup za procenu emisija, imajući u vidu da se ovaj podatak može jednostavno dobiti kao izlazni rezultat mikroskopske simulacije [22].

Najbitniji korak u povezivanju VISSIM-a sa MOVES emisionim modelom jeste proračun specifične snage vozila (*VSP*) koji se može biti direktan izlazni rezultat simulacije. Takođe, pored proračuna *VSP* neophodni su i podaci o trenutnoj brzini, ubrzanju/usporenju i tipu vozila. Težina vozila može biti izlazni rezultat samo za ona vozila koja su u VISSIM-u definisana kao teretna (HGV). Nakon simulacije svi definisani podaci dobijaju se kao izlazni fajl koji sadrži sve definisane parametre za sva vozila na mreži u svakoj sekundi simulacije.

### 3.2. MOVES - ulazni i izlazni podaci

Postoji mali broj javno dostupnih mikroskopskih emisionih modela. Motor Vehicle Emissions Simulator (MOVES) je emisioni model razvijen od strane US Environmental Protection Agency (EPA), a kreiran za upotrebu na različitim nivoima modeliranja: nacionalni – makro, državni – mezo, i projektni – mikro-nivo. Model ima mogućnosti procene emisija preko 100 polutanata na putnoj i uličnoj mreži, i na terminalima (parkirališta, robno-transportni terminali, itd.). Procene emisija uključuju i emisije isparavanja goriva, kočenja i habanja guma. MOVES model je sveobuhvatan, obezbeđuje detaljna uputstva i široko je primenjen.

Emisioni faktori u MOVES modelu su direktno zavisni od *VSP*, veličine koja se pokazala da ima bolju korelaciju sa emisijama od prosečne brzine vozila, pri čemu korisnik može uneti lokalne specifičnosti raspodele *VSP*. *VSP* predstavlja potrebnu snagu vozila pri različitim brzinama. Drugim rečima, operativni mod vozila je mera stanja motora u datom trenutku.

Osnovni ulazni podaci za MOVES (mikro-nivo)

Izlazni rezultati VISSIM modela koriste se kao ulazni u MOVES model. Prvi korak u MOVES modelu je kreiranje seta osnovnih podataka (baza podataka za mikro-nivo). Ulazni podaci uključuju meteorološke podatke, strukturu toka i procenat teretnih vozila, dužinu mreže, protok, prosečnu brzinu i uzdužni nagib, raspodelu starosti vozila, raspodelu operativnih modova vozila, tipove vožnje za deonice, i informacije o gorivima (benzin i dizel). Na ovom nivou karakteristike kretanja vozila se definišu preko raspodele operativnih modova vozila (OPMODE) dobijenih indirektno putem simulacije u VISSIM-u i obradom u Excel-u.

Specifična snaga vozila (Vehicle Specific Power - *VSP*)

MOVES model procenjuje ukupne emisije proračunom prosečne emisije za pojedinačan operativni mod vozila. *VSP* se koristi u slučaju putničkih (light-duty) vozila (sourceTypeID 11, 21, 31, i 32) dok se skalirana vučna snaga (Scaled Tractive Power - *STP*) koristi za teretna (heavy-duty) vozila (sourceTypeID 41–62). Oba parametra se izračunavaju na osnovu brzine i ubrzanja vozila, ali se razlikuje način njihovog skaliranja. U MOVES modelu, napravljena je razlika između putničkih i teretnih tipova vozila jer su njihovi operativni modovi razvijeni na različit način u odnosu na brzinu i potrebnu snagu. *VSP* zavisi od mase vozila, dok je *STP* skaliran za fiksni faktor mase teretnih vozila jer emisioni faktori ovih vozila imaju bolju korelaciju sa apsolutnom snagom vozila nego sa specifičnom.

$$VSP = \left(\frac{A}{M}\right)v + \left(\frac{B}{M}\right)v^2 + \left(\frac{C}{M}\right)v^3 + (a + g \sin \theta)v \quad (1)$$

$$STP = \frac{Av + Bv^2 + Cv^3 + Mva}{f_{scale}} \quad (2)$$

gde je:

*VSP* – specifična snaga vozila (kw/t),

*STP* – skalirana vučna snaga (kw/t),

*M* – masa vozila (t)

*A* – koeficijent za otpor kotrljanja (kw-s/m),

*B* – koeficijent za otpor rotiranja (kw-s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>),

*C* – koeficijent za aerodinamički otpor (kw-s<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),

*v* – trenutna brzina vozila (m/s),

*a* – trenutno ubrzanje vozila (m/s<sup>2</sup>),

*g* – gravitaciono ubrzanje (*g*=9,81 m/s<sup>2</sup>),

*sinθ* – uzdužni nagib,

*f* – fiksni faktor mase vozila.

Kategorije vozila (Source Types) u MOVES modelu predstavlja grupu vozila sa sličnim aktivnostima i

načinima korišćenja [23]. U narednoj tabeli date su kategorije vozila u MOVES2014.

Za svaku od navedenih kategorija, MOVES2014 daje vrednosti svih fizičkih parametara neophodnih za proračun VSP i STP, koeficijente A, B i C kao i masu

vozila i fiksni faktor mase vozila (tabela 3). Nakon proračun VSP i STP u VISSIM simulaciji mogu se koristiti preporučene vrednosti za svaku kategoriju vozila, ili se iste mogu kalibrisati kako bi oslikavale lokalne karakteristike voznog parka.

Tabela 2. MOVES2014 kategorije vozila

Source TypeID	Source Type Name	HPMSV TypeID	Opis
11	Motorcycles	10	Motocikli
21	Passenger Cars	25	Putnički automobili (LTV)
31	Passenger Trucks (personal use)	25	Privatna teretna vozila (LTV)
32	Light Commercial Trucks (non-personal use)	25	Laka teretna vozila (LTV)
41	Intercity Buses (non-school, non-transit)	40	Prigradski autobusi
42	Transit Buses	40	Autobusi javnog prevoza
43	School Buses	40	Školski autobusi
51	Refuse Trucks	50	Teretna vozila za snabdevanje
52	Single Unit Short-haul Trucks	50	Solo teretna vozila za kratke distance
53	Single Unit Long-haul Trucks	50	Solo teretna vozila za duge distance
54	Motor Homes	50	Kamperi
61	Combination Short-haul Trucks	60	Autovozovi za kratke distance
62	Combination Long-haul Trucks	60	Autovozovi za duge distance

Nakon utvrđivanja VSP na bazi simulacije neophodno je utvrditi za svako vozilo u svakoj sekundi u kom se operativnom modu nalazi (OpMode Bin) kako bi se konačno utvrdila raspodela operativnih modova vozila, odnosno procenat vremena putovanja koje vozilo (ili saobraćajni tok) provede u svakom modu. Ova raspodela se može utvrditi za svako vozilo pojedinačno, kao i na nivou svake deonice.

Ova procedura sprovedena je primenom Excel-a na bazi date Tabele 4, vodeći računa da su vrednosti u

tabeli date u različitim jedinicama u odnosu na rezultate simulacije. Da bi se izbegle česte varijacije operativnih modova moguće je izvršiti i naknadno podešavanje (smoothing) VSP vrednosti primenom neke od metoda (npr. weighted-centered moving average) po narednoj formuli:

$$VSP_{wcm,t} = \frac{1}{4}VSP_{t-1} + \frac{1}{2}VSP_t + \frac{1}{4}VSP_{t+1},$$

$$VSP \neq 0 \quad (3)$$

Tabela 3. Fizički parametri po kategorijama vozila

sourceType ID	Prva god.	Poslednja god.	Koef. kotrljanja A (kW-s/m)	Koef. rotiranja B (kW-s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Koef. aerodin. C (kW-s <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Masa (t)	Fiksni faktor mase (t)
11	1960	2050	0,0251	0	0,0003	0,2850	0,2850
21	1960	2050	0,1565	0,0020	0,0005	1,4788	1,4788
31	1960	2050	0,2211	0,0028	0,0007	1,8669	1,8669
32	1960	2050	0,2350	0,0030	0,0007	2,0598	2,0598
41	1960	2013	1,2952	0	0,0037	19,5937	17,1
	2014	2050	1,2304	0	0,0037	19,5937	17,1
42	1960	2013	1,0944	0	0,0036	16,5560	17,1
	2014	2050	1,0397	0	0,0036	16,5560	17,1
43	1960	2013	0,7467	0	0,0022	9,0699	17,1
	2014	2050	0,7094	0	0,0022	9,0699	17,1
51	1960	2013	1,5835	0	0,0036	23,1135	17,1
	2014	2050	1,5043	0	0,0036	23,1135	17,1

sourceType ID	Prva god.	Poslednja god.	Koef. kotrljanja A (kW-s/m)	Koef. rotiranja B (kW-s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Koef. aerodin. C (kW-s <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Masa (t)	Fiksni faktor mase (t)
52	1960	2013	0,6279	0	0,0016	8,5390	17,1
	2014	2050	0,5965	0	0,0016	8,5390	17,1
53	1960	2013	0,5573	0	0,0015	6,9845	17,1
	2014	2050	0,5294	0	0,0015	6,9845	17,1
54	1960	2013	0,6899	0	0,0021	7,5257	17,1
	2014	2050	0,6554	0	0,0021	7,5257	17,1
61	1960	2013	1,5382	0	0,0040	22,9745	17,1
	2014	2050	1,4305	0	0,0038	22,8289	17,1
62	1960	2013	1,6304	0	0,0042	24,6010	17,1
	2014	2050	1,4739	0	0,0037	24,4196	17,1

Tabela 4. Definisiranje operativnih modova vozila

OpMode Bin ID	VSP (kW/t)	Brzina, v (mph)	OpMode Bin ID	VSP (kW/t)	Brzina, v (mph)
1		$-1 \leq v < 1$	25	$9 \leq VSP < 12$	$25 \leq v < 50$
11	$VSP < 0$	$1 \leq v < 25$	27	$12 \leq VSP < 18$	$25 \leq v < 50$
12	$0 \leq VSP < 3$	$1 \leq v < 25$	28	$18 \leq VSP < 24$	$25 \leq v < 50$
13	$3 \leq VSP < 6$	$1 \leq v < 25$	29	$24 \leq VSP < 30$	$25 \leq v < 50$
14	$6 \leq VSP < 9$	$1 \leq v < 25$	30	$30 \leq VSP$	$25 \leq v < 50$
15	$9 \leq VSP < 12$	$1 \leq v < 25$	33	$VSP < 6$	$50 \leq v$
16	$12 \leq VSP$	$1 \leq v < 25$	35	$6 \leq VSP < 12$	$50 \leq v$
21	$VSP < 0$	$25 \leq v < 50$	37	$12 \leq VSP < 18$	$50 \leq v$
22	$0 \leq VSP < 3$	$25 \leq v < 50$	38	$18 \leq VSP < 24$	$50 \leq v$
23	$3 \leq VSP < 6$	$25 \leq v < 50$	39	$24 \leq VSP < 30$	$50 \leq v$
24	$6 \leq VSP < 9$	$25 \leq v < 50$	40	$30 \leq VSP$	$50 \leq v$
0	Zavisno od ubrzanja $a$ : $a_t \leq -2$ ili ( $a_t < -1$ i $a_{t-1} < -1$ i $a_{t-2} < -1$ )				

#### 4. PROCEDURA MODELIRANJA U MOVES-U

- Softver MOVES2014b radi u tandemu sa MySQL softverom zasnovanim na Java, koji služi za obradu izlaznih rezultata. Neophodno je da pre pokretanja MOVES modela startuje i MySQL. Meni nazvan „Schemas“ omogućava pristup postojećoj bazi podataka za MOVES (movesdb20141021-cb6v2).
- Nakon uvezivanja MySQL sa MOVES bazom, može se preći na direktno korišćenje MOVES modela, koji se sastoji od 11 osnovnih koraka (svrstanih u pod menije):
- Description: Opis konkretnog zadatka (modeliranja).
- Scale: Odabir nivoa analize – makro (National), mezo (Country) i mikro nivo (Project Level), kao i tipa izlaznih podataka, ukupne emisije po periodima vremena ili po aktivnosti.

- Time Spans: definisanje perioda za koji se radi analiza koji uglavnom utiče na meteorološke postavke ali ne i na izlazne rezultate.
- Geographic Bounds: Mora se definisati zemlja za koju se radi analiza (neka od SAD) kada je reč o mikro-nivou analize i mora se odabrati baza iz/u kojoj se skladište podaci.
- Vehicles/Equipment – On road Vehicle equipment: Definišu se tipovi vozila i goriva (pri tome nisu sve kombinacije moguće).
- Road Type: Može se izabrati više kategorija mreže puteva, vezano za specifične aktivnosti na određenim tipovima puta.
- Pollutants and Processes: Izbor polutanata koji će se analizirati.
- Manage Input Data Sets: Korisnik mora da kreira i imenuje praznu MySQL bazu podataka koja će biti popunjena ulaznim podacima za metodologiju proračuna, u trenutku kada se završi analiza.

- Strategies: ukoliko se odabere ovo polje analizira se stanja da nije usvojen Zakon o čistom vazduhu (Clean Air Act 1993).
- Output – General Output: Odabir baze podataka u koju se upisuju izlazni rezultati procene, pri čemu se biraju i merne jedinice.
- Output – Output Emissions Detail: Bira se nivo detaljnosti analize.
- Advanced Performance Features: Omogućava se čuvanje određenih podešavanja u nekom drugom fajlu kako bi se ubrzala procedura kada je potrebno obavljati veći broj analiza.

Za svaki od neophodnih podataka moguće je kreirati Excel šablon koji se popunjava u zavisnosti od dostupnosti lokalnih podataka. Ukoliko podaci u lokalnim uslovima nisu dostupni moguće je iskoristiti postojeće baze.

## 5. ZAKLJUČAK

Autori koji su prethodno integrisali VISSIM i MOVES u proceni emisija zaključili su da ulazni podaci (brzina i ubrzanje) koji su kreirani u VISSIM-u značajno variraju [24]. U kontekstu ovog zaključka važno je napomenuti da autori nisu sprovedli kalibraciju VISSIM modela na osnovu istraživanja na terenu. Takođe je zaključeno da se primenom VISSIM modela dobijaju veće VSP vrednosti u odnosu na realne podatke [25]. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je za adekvatnu procenu emisija, pored adekvatnih emisionih faktora, neophodno i detaljno kalibrisanje načina ponašanja vozila u simulacionim modelima. Pored neophodnih podešavanja VISSIM modela, MOVES model je moguće koristiti u lokalnim uslovima samo ukoliko je poznat značajan obim podataka, kao što je struktura toka, fizičke karakteristike svakog tipa vozila, starosna struktura po tipovima vozila, meteorološki podaci, itd. Neophodno je istaći i da se procena emisija bazira na emisionim faktorima koji su utvrđeni za vozni park SAD, što treba imati na umu pri korišćenju u Srbiji.

Na osnovu prethodnog, apsolutne vrednosti procene emisija moraju se posmatrati sa rezervom, dok je pristup u potpunosti primenjiv za poređenje različitih scenarija upravljanja saobraćajem.

## LITERATURA

- [1] European Environment Agency. Progress of EU transport sector towards its environment and climate objectives. *Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) Progress*, 1–13, 2018.
- [2] Smit R. *Australian Motor Vehicle Emission Inventory for the National Pollutant Inventory (NPI)*, 2014.
- [3] Marquez L, Salim V. Assessing impacts of urban freight measures on air toxic emissions in Inner Sydney, *Environmental Modelling and Software*, 22(4), 515–525, 2007.
- [4] Đorić V. *Istraživanje i modeliranje emisija vozila u funkciji modeliranja saobraćajnih tokova na uličnoj mreži*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, 2013.
- [5] Đorić V. Istraživanje trenutnih emisija izduvnih gasova vozila na uličnoj mreži, *Tehnika - Saobraćaj*, 69 (1), 107-114, 2014.
- [6] Wang H, Wen H, You F, Xu J, Kui H. Motor vehicle emission modeling and software simulation computing for roundabout in Urban City, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- [7] Latham S, Petley LJ, Hickman AJ, Cloke J. *A review of available road traffic emission models/Prepared for Charging and Local Transport Division*, Transport Research Laboratory Great Britain, 2000.
- [8] Int Panis L, Broekx S, Liu R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits, *Science of the Total Environment*, 371(1–3), 270–285, 2006.
- [9] Jovic J, Djoric V. Traffic and Environmental Street Network Modelling: Belgrade Case Study, *Transport* 25 (2), 155-162, 2010.
- [10] Austroads. *The use and application of microsimulation traffic models AP-R286/06*, 2006. Dostupno na: [www.austroads.com.au](http://www.austroads.com.au).
- [11] De Vlieger I, De Keukeleere D, Kretschmar JG. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars, *Atmospheric Environment*, 34(27), 4649–4655, 2000.
- [12] Samuel S, Austin L, Morrey D. Automotive test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels - A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 216(7), 555–564, 2002.
- [13] Kocić A, Čelar N, Stanković S, Kajalić J. Optimizacija parametara rada svetlosnih signala sa ciljem minimiziranja potrošnje goriva, *Put i saobraćaj*, 65(3), 19-28, 2019.
- [14] Joumard R, Jost P, Hickman J, Hassel D. Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration, *Science of the Total Environment*, 169(1–3), 167–174, 1995.
- [15] Abou-Senna H, Radwan E, Westerlund K, Cooper CD. Using a traffic simulation model (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions

- from vehicles on a limited-access highway, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 63(7), 819–831, 2013.
- [16] Marsden G, Bell M, Reynolds S. Towards a real-time microscopic emissions model, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(1), 37–60, 2001.
- [17] Boriboonsomsin K, Barth M. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems, *Transportation Research Record*, 2139, 21–30, 2009.
- [18] Papson A, Hartley S, Kuo KL. Analysis of emissions at congested and uncongested intersections with motor vehicle emission simulation 2010, *Transportation Research Record*, 2270, 124–131, 2012.
- [19] Pandian S, Gokhale S, Ghoshal AK. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 180–196, 2009.
- [20] Čelar N, Stanković S, Kajalić J. *Osnove upravljanja svetlosnim signalima*, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, 2018.
- [21] Đorić V, Čelar N, Ivanović I, Kajalić J, Petrović D, Stanković S. Integrisani pristup u projektima planiranja i upravljanja saobraćajem korišćenjem makro i mikro simulacije, *Tehnika – Saobraćaj*, 70 (6), 1015–1020, 2015.
- [22] Fontes T, Fernandes P, Rodrigues H, Bandeira JM, Pereira SR, Khattak AJ, Coelho MC. Are HOV/ecolanes a sustainable option to reducing emissions in a medium-sized European city? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 63, 93–106, 2014.
- [23] U.S. Environmental Protection Agency. *Population and Activity of On - road Vehicles in MOVES2014 Draft Report*. U.S. Environmental Protection Agency, 131, 2015.
- [24] Den Braven K, Abdel-rahim A, Battles A. Modeling Vehicle Fuel Consumption and Emissions at Signalized Intersection Approaches: Integrating Field-Collected Data Into Microscopic Simulation. July, 59. (2012).
- [25] Stevanović A, Stevanović J, Zhang K, Batterman S. Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions: Integrated approach with VISSIM, CMEM, and VISGAOST, *Transportation Research Record*, 2128, 105–113, 2009.

## SUMMARY

### ESTIMATION OF POLLUTANT EMISSIONS FROM TRAFFIC USING MICROSIMULATION MODELS

*Traditional traffic management methods are mainly focused on travel time optimization, ie minimizing control delay. The modern approach is increasingly emphasizing the minimization of negative impacts of traffic on the environment. Therefore, it is important to enable the evaluation of different traffic management strategies from the aspect of pollutant emissions. Microscopic simulation models enable detailed (second-by-second) representation of traffic flow, which creates a precondition for integration with emission models to enable this aspect of evaluating different management strategies. The paper presents the possibility of integrating the microscopic simulation model VISSIM and the emission model MOVES. It was concluded that this integration enables the comparison of different management strategies from the aspect of emissions of various pollutants.*

**Key Words:** *microscopic traffic models, emission models, VISSIM, MOVES*