

Dr Radomir S. Gordić,  
dipl. inž.

## MODELIRANJE KRETANJA AUTOMOBILSKIH JEDINICA REALNIM VOJNIM SAOBRAĆAJNIM TOKOM U KOLONI

UDC: 355.691.1 : 656.13

*Rezime:*

*U radu je prikazan model za ocenu efikasnosti i optimizaciju kretanja organizovanog vojnog saobraćajnog toka u koloni. Razrađeni i usavršeni model obezbeđuje brzu i jednostavnu realizaciju istraživanja motorizovanih kolona različitih karakteristika. Prikazani su model, metodologija i rezultati imitacionog modeliranja realnog organizovanog vojnog saobraćajnog toka automobilskih jedinica u koloni. Rad predstavlja originalan doprinos istraživanju realnog vojnog saobraćajnog toka u koloni.*

*Ključne reči: kolona, model, saobraćajni tok, dinamičko odstojanje, masovno opsluživanje.*

---

### MOVEMENT MODELING OF REAL MILITARY COLUMN TRAFFIC AUTOMOBILE UNITS

*Summary:*

*Target of this research was appraisal efficiency and optimization developments of organized column traffic. Elaborated and perfected model provides quick and simple target research realization for the motorized columns with different characteristics. In this work, model, methodology and results of imitation modeling, for real organized column traffic, have been shown. Work represents an original contribution to effective military column traffic.*

*Key words: column, model, traffic flow, dynamic distance, queueing.*

---

#### Uvod

Saobraćajna podrška borbenih zadataka vojske može se unaprediti povećanjem efikasnosti i optimizacijom kretanja. U realizaciji borbenih zadataka, vojska se najčešće kreće u organizovanom saobraćajnom toku u koloni. Da bi izvršili istraživanje efikasnosti i optimizaciju kretanja organizovanog vojnog toka u koloni, izvršeno je njegovo modeliranje. Razrađen je i usavršen model za simulaciju kretanja automobilskih jedinica (atj) realnim (stvarnim) vojnim saobraćajnim tokom u koloni [1], koji je razvijen u istraživanjima [2, 3].

Saobraćajni tok, sa svom svojom raznovrsnošću, predstavlja masovni proces, čije su osnovne karakteristike: protok, struktura (sastav) i srednja brzina. Karakteristike toka i njihova promena zavise od velikog broja faktora, pa se zato tok vozila može posmatrati kao niz slučajnih događaja. Osnovne karakteristike saobraćajnog toka važe i za kretanja u koloni.

Zbog tih karakteristika saobraćajnog toka u koloni i sistema vozač–vozilo–put–okolina–organizacija (V–V–P–O–O), u istraživanju efikasnosti i optimizaciji kolone može se efikasno koristiti teorija masovnog opsluživanja (TMO), a kretanje kolone na putu može se posmatrati

kao sistem za masovno opsluživanje (SMO). Za takvo istraživanje neophodno je razmotriti terminologiju i osnovne pojmove koji se koriste u radu.

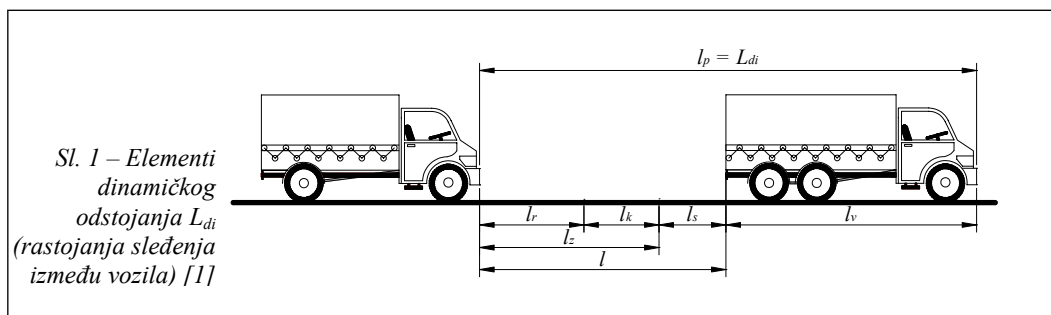
### Osnovni pojmovi i pretpostavke teorije masovnog opsluživanja primenjene na kretanje vozila

Saobraćajna traka predstavlja kanal opsluživanja. Zahtev za opsluživanje izražava se kroz nailazak dinamičkog odstojanja<sup>1</sup> (gabarita) automobila  $L_d$  na određeni, poprečni presek puta (saobraćajne trake).

Pod dinamičkim odstojanjem  $L_{di}$  [m] podrazumeva se bezbedno rastojanje koje obezbeđuje kočenje i potpuno zaustavljanje vozila pred preprekom [4].

Elementi dinamičkog odstojanja  $L_{di}$  – rastojanja sledenja vozila u saobraćajnom toku, šematski su prikazani na slici 1, a analitički opisani izrazom (2).

$$L_{di} = l_r + l_k + l_s + l_v = l_z + l_s + l_v = \frac{V_i \cdot t_r}{3,6} + \frac{V_i^2 \cdot k_e}{254,3 (f + \mu + r \pm i)} + l_s + l_v \quad [m] \quad (2)$$



Opsluživanje je propuštanje dinamičkog odstojanja automobila kroz određeni poprečni presek puta (saobraćajne trake).

Kod tako usvojenih pojmova ispunjen je osnovni zahtev za rad kanala – da se u njemu kod opsluživanja nalazi samo jedan zahtev, tj. druga vozila ne dolaze na poprečni presek dok on ne bude slobodan.

Vreme opsluživanja je vremenski interval u toku koga vozilo pređe put jednak dinamičkom odstojanju,

$$t_{oi} = \frac{L_{di}}{V_i} \quad [s] \quad (1)$$

<sup>1</sup> U našoj literaturi koristi se pojam „bruto odstojanje“, a u ruskoj „dinamički gabarit“. Najpogodnijim smatram izraz „dinamičko odstojanje“, koji se i koristi u ovom radu, jer je to odstojanje funkcija brzine i drugih dinamičkih karakteristika saobraćajnog toka u koloni.

gde su:

$l_r$  – dužina puta reagovanja (vozača i vozila) m,

$l_k$  – dužina čistog puta kočenja m,

$l_s$  – dužina sigurnosnog (dinamičkog –  $l_d$ ) odstojanja m,

$l_v$  – dužina vozila m,

$l_z$  – dužina zaustavnog puta ( $l_r + l_k$ ) m,

$l$  – odstojanje<sup>2</sup> između vozila m,

$l_p = L_{di}$  – proračunsko odstojanje, dinamički gabarit ili bruto odstojanje<sup>3</sup> m,

<sup>2</sup> U Teoriji saobraćajnog toka, umesto ovog, koristi se izraz „rastojanje“. U vojnom saobraćaju ovaj termin preuzet je iz taktike, jer označava meru za raspored jedinice po dubini. U taktici se prostori između jedinica po dubini nazivaju „odstojanja“, a po frontu „rastojanja“.

<sup>3</sup> U literaturi ima i drugačijih shvatanja, B. M. Кисляков и сог., pod ovim pojmom podrazumeva zaustavni put vozila. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобильной и пешеходов, Транспорт, Москва, 1979, стр. 33.

$V_i$  – brzina kretanja vozila ( $V_u$  na uskom grlu) – merodavna brzina km/h,  
 $t_r$  – vreme reagovanja vozača i vozila (uzima se najviše 1 s),  
 $k_e$  – koeficijent eksploatacionog stanja kočnica (samo ako nisu kočeni svi točkovi),  
 $f$  – koeficijent otpora vazdušne sredine (do  $V = 60$  km/h uzima se 0),  
 $m$  – koeficijent uzdužnog prijanjanja točkova s kolovozom,  
 $r(\omega)$  – koeficijent otpora kotrljanja,  
 $i$  – uzdužni nagib puta (+ za uspon, – za pad) u decimalnom obliku (tangens  $a$ ).

Izraz (2) u putogradnji predstavlja kriterijum za određivanje preglednosti<sup>4</sup> pri kočenju. Kod izračunavanja  $L_{di}$ , za  $t_r$ ,  $\mu$  i  $k_e$  uzimaju se prosečne a ne računске vrednosti.

Parametar toka (potoka)<sup>5</sup>  $\lambda$  je broj vozila koji se pojavljuje na poprečnom preseku puta u jedinici vremena (u jednoj sekundi) [5],

$$\lambda = \frac{Q}{3600} \quad [\text{voz/s}] \quad (3)$$

gde su:

$Q$  – protok saobraćajnog toka po desnoj saobraćajnoj traci voz/h,

$\lambda$  – intenzitet ulaznog (neopsluženog) protoka – potoka automobila voz/s.

U zavisnosti od mogućnosti nesmetanog prolaska po traci (kanalu opsluživanja), mogu nastati različite situacije koje uslovljavaju kvalitet funkcionisanja (rada) sistema. U osnovne pokazatelje koji karakterišu rad ovog sistema, kod kretanja u koloni,

<sup>4</sup> Preglednost predstavlja mogućnost sagledavanja smetnje koja zahteva kočenje. *Pravilnik o tehničkim normativima i osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati s gledišta sigurnosti prometa*, SL SFRJ, 11, 1980.

<sup>5</sup> U TMO koristi se izraz potok – protok klijenata – događaja – vozila, a u Teoriji saobraćajnog toka tok vozila.

spadaju: vreme ometanja, brzina toka, verovatnoća ometanja i broj ometanih vozila.

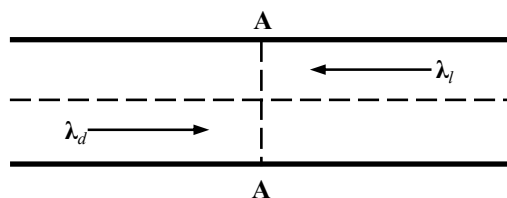
Verovatnoća ometanja predstavlja događaj koji se javlja kada dinamičko odstojanje  $i$ -tog vozila, na datom poprečnom preseku, preklopi dinamičko odstojanje vozila ispred sebe ( $i-1$ ). Kod vojnih kretanja u koloni zabranjeno je preticanje, pa je neophodno da  $i$ -to vozilo smanji brzinu da bi održavalo minimalno bezbedno odstojanje, zbog čega dolazi do smetnji u toku (kretanju), pa se to može smatrati verovatnoćom ometanja.

Vreme ometanja  $\gamma_i$  je vremenski interval u toku koga je vozilo, koje zatekne presek puta zauzet dinamičkim odstojanjima drugih vozila, prinuđeno da čeka opsluživanje na desnoj traci.

Srednja brzina toka je funkcija promenljivog parametra, a predstavlja brzinu opsluženog toka. Ona zavisi od zadate brzine i kvaliteta rada SMO.

Ometano vozilo je ono koje je prinuđeno da smanjuje brzinu kretanja na posmatranom preseku puta. Broj ometanih vozila zavisi od: protoka, njegove strukture, brzine i gustine, od stanja i karakteristika puta, vozila i okoline.

Ovi pojmovi omogućavaju da se primenom osnovnih postavki TMO analizira interakcija automobila u toku i opišu osnovne zakonitosti saobraćajnih tokova radi ocene rada motorizovane kolone u različitim putnim, vremenskim i organizacionim uslovima.



Sl. 2 – Jednokanalna šema SMO sa zadržkom [4]

Za opisivanje zakonitosti kretanja vojnih tokova u koloni, od većeg broja šema TMO, najefikasnija je jednokanalna šema sa zadržkom (sl. 2).

U slučaju kada je presek A–A zauzet, vozilo iz toka  $\lambda_d$  ne može da pređe na traku suprotnog smera i prinuđeno je da ide iza vozila koje zadržava. Glavni pokazatelj funkcionisanja sistema u tom slučaju je vreme ometanja  $\gamma_i$ .

### Osnovne karakteristike kretanja kolone kao sistema masovnog opsluživanja

Srednje vreme opsluživanja dinamičkog odstojanja na preseku A–A kod prikazane šeme SMO (sl. 2) kada nema ometanja biće:

$$\bar{t}_o = \frac{\bar{L}_d}{\bar{V}_o} \quad (4)$$

gde su:

$\bar{V}_o$  – srednja brzina ometanog kretanja ulaznog toka,

$\bar{L}_d$  – srednja vrednost dinamičkog odstojanja ulaznog potoka.

Za određeni protok  $Q_d$  vozila u saobraćajnom toku, srednje vreme zauzetosti preseka A–A dinamičkim odstojanjima je:

$$\bar{t} = Q_d \cdot \bar{t}_o \quad (5)$$

Ako se to svede na jedan sat, dobiće se relativno srednje vreme (u odnosu na 3600 [s]) zauzetosti preseka A–A:

$$\bar{t}_r = \frac{Q_d \cdot \bar{t}_o}{3600} = \lambda_d \cdot \bar{t}_{oi} \quad (6)$$

To je verovatnoća ometanja. Kod kretanja u koloni, to je, u stvari, verovatnoća da će naredno  $L_{di}$  zahtevati opsluživanje pre nego što prethodno  $L_{d(i-1)}$  bude opsluženo. Zbog nemogućnosti preticanja, naredno dinamičko odstojanje prinuđeno je da smanjuje brzinu kretanja zbog prethodnog odstojanja. Kada se određena vozila nađu u toj situaciji, smatra se da su ometana u slobodnom kretanju od vozila ispred sebe. Verovatnoća tog događaja označava se sa:

$$p_i = \lambda_d \cdot \bar{t}_{oi} \quad (7)$$

Sa stanovišta kretanja, za kretanje kolona vojnih vozila karakteristične su maksimalna brzina  $V_{max}$  i srednja brzina  $\bar{V}_o$ . Maksimalna brzina ne služi za kretanje kolone, već da pojedinačna vozila, koja zaostanu iz bilo kojih razloga, nadoknade vreme izgubljeno pri kretanju brzinama manjim od srednje brzine. Kretanje kolone planira se srednjom brzinom. Stvarna brzina kretanja razlikuje se zbog interakcija u toku. Merilo kvaliteta kretanja (efikasnosti) kolone na putu je stvarna brzina, jer ona odražava realne uslove kretanja vozila u toku sa zadatim protokom i strukturom.

Srednja brzina odražava kretanje kada nema smetnji (nema vozila koja usporavaju i zaostaju), pa se može smatrati da odgovara brzini slobodnog kretanja (toka).

Stvarna brzina kretanja zavisi od:

- a) srednje brzine kretanja  $\bar{V}_o$  (brzina slobodnog kretanja – toka) i
- b) disperzije brzine slobodnog toka, koja odražava uslove kretanja i kvalitet organizacije.

Pretpostavimo da je brzina kretanja motornih vozila koja su prinuđena da smanjuju brzinu jednaka brzini ometanih vozila. Brzina vozila koja nisu prinuđena da smanjuju brzinu i čekaju opsluživanje zavisi od disperzije brzine i iznosi:

$$V = (1 - p_i) \cdot V_{si} \text{ [km/h]} \quad (8)$$

gde su:

$V$  – komponenta brzine vozila koja nisu prinuđena da smanjuju brzinu kretanja,

$p_i = 1 - p_i$  – verovatnoća da vozila neće biti ometana u kretanju i

$V_{si}$  – stvarna brzina kretanja vozila koja ne smanjuju brzinu.

Prema tome, brzina posmatranog vozila kroz presek A–A pri zadanom protoku jednaka je:

$$V(Q) = p_i \cdot \bar{V}_o + (1 - p_i) \cdot V_{si} \text{ [km/h]} \quad (9)$$

Osnovni faktor koji utiče na  $p_i$ ,  $V_{si}$  i  $V(Q)$  je minimalno bezbedno odstojanje  $L_{bi}$ , koje je veće ili jednako  $L_{di}$ ,

$$L_{bi} \geq L_{di} \quad (10)$$

Ako je  $L_{di}$  dinamičko odstojanje posmatranog vozila, onda će kod slobodnog kretanja (kad nema ometanja) vozilo preći  $L_{di}$  za vreme:

$$t_i = \frac{L_{di}}{\bar{V}_o} \quad (11)$$

Kod velikog protoka, na brzinu vozila utiču i drugi automobili toka, pa je:

$$V(Q) \leq \bar{V}_{si}$$

U tom slučaju vreme kretanja vozila na putu dužine  $L_{di}$  povećava se za interval vremena  $\gamma_i$ ,

$$V_{si} = \frac{L_{di}}{t_i + \gamma_i} = \bar{V}_o \frac{t_i}{t_i + \gamma_i} \text{ [km/h]} \quad (12)$$

Kada se to uzme u obzir, onda izraz (9) ima oblik:

$$V(Q) = \bar{V}_o \left\{ p_i + (1 - p_i) \frac{t_i}{t_i + \gamma_i} \right\} \text{ [km/h]} \quad (13)$$

Na ovaj način, ako se zna  $\gamma_i$ , može se odrediti stvarna brzina svakog vozila. Prema izrazu (13) može se odrediti brzina u funkciji bilo kog parametra saobraćajnog toka, ili podsistema V–V–P–O–O, koji se na ulazu zadaje kao promenljiva veličina.

Za određivanje  $\gamma_i$ , razmatra se prelaz od slobodnog kretanja na zgusnuti tok nekog potoka. Kod malog protoka  $Q \rightarrow 0$ , brzine kretanja kroz presek A–A odgovaraju brzinama slobodnog kretanja. Ako se poveća protok  $Q$ , dolazi do smanjenja brzine, odnosno prelazi se od slobodnog na zgusnuti tok. Ako se poveća  $Q$ , a zadrži brzina slobodnog kretanja  $V_o$ , potrebno je dozvoliti međusobnu nezavisnost kretanja vozila (dozvoliti preticanje). Takav tok može se smatrati stihijskim i neorganizovanim. Delovanje vozača u toku kretanja potčinjeno je zahtevu efikasnog i bezbednog kretanja, pa je zbog toga saobraćajni tok u koloni organizovan i determinisan.

Sa stanovišta TMO, stihijski i neorganizovani tok je protok klijenata koji dolaze (ulaze) u SMO; stvarni tok automobila je izlazni (opsluženi) potok.

Izlazni protok karakteriše se računskim protokom  $Q_d$ , brzinom slobodnog kretanja  $\bar{V}_o$  i nezavisnom raspodelom intervala između vozila.

Smatra se da je opsluživanje prolazak vozila dinamičkim odstojanjem  $L_{di}$  kroz presek A–A. Vreme opsluživanja je:

$$t_i = \frac{L_{di}}{V_i} \quad [s] \quad (14)$$

Smatra se da je u nekom momentu presek A–A zauzet ako se na njemu nalazi dinamičko odstojanje bilo kog vozila. Presek je prosečno zauzet u toku:

$$\bar{t}_o = \frac{L_o}{V_o} \quad [s] \quad (15)$$

gde su:

$L_o = L_{di}$  – srednja vrednost dinamičkog odstojanja,

$V_o = V_{oi}$  – srednja vrednost brzine slobodnog kretanja.

Za vreme  $t_o$ , na presek A–A može doći iz ulaznog toka (potoka): 0, 1, 2, ... vozila. Svako vozilo, zbog potrebe da održava minimalno bezbedno odstojanje od vozila ispred sebe, prinuđeno je da čeka dok se presek ne oslobodi. Zbog toga se javlja zastoje u opsluživanju – kretanju vozila, odnosno vreme kretanja vozila kroz presek A–A se povećava za  $\gamma_i$ .

Predmet interesovanja je brzina određenog vozila. Tada se u momentu prilaska posmatranog vozila preseku A–A, ispred njega nalazi  $j - 1$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ) vozila. Izdvajaju se sledeće dve situacije:

1. zbog održavanja minimalnog bezbednog odstojanja, prvo vozilo u redu (i sledeća) treba da čeka dok se presek A–A ne oslobodi dinamičkog odstojanja vozila ispred njega;

2. poslednje posmatrano vozilo iz reda treba da čeka dok kroz presek A–A prođu sva vozila sa minimalnim bezbednim intervalima odstojanja. U tom slučaju, veličinu  $\gamma_i$  čine dva sabirka:

$$\gamma_i = \tau_i + T_i \quad [s] \quad (16)$$

gde su:

$\tau_i$  – komponenta  $\gamma_i$ , koja održava situaciju 1,

$T_i$  – komponenta  $\gamma_i$ , koja održava situaciju 2.

$$\gamma_i = \frac{1}{2} \lambda_d \cdot t_o \left(1 - \frac{\sigma_o^2}{V_o^2}\right) \cdot \left\{ \frac{L_{di}}{V_o} + \frac{\lambda_u \cdot t_o^2}{1 - \lambda_u \cdot t_o} \right\} \quad [s] \quad (17)$$

gde su:

$\sigma_o^2$  – disperzija brzine ometanih vozila, u ovom slučaju srednje brzine,

$V_o$  – brzina slobodnog (ometanog) kretanja vozila na datoj deonici,

$Q_d$  – protok direktnog (desnog) i  $Q_l$  – protok susretnog (levog) toka,

$\sigma$  – struktura toka koja omogućava da se odredi disperzija brzine slobodnog kretanja po formuli:

$$\sigma_o^2 = \sum_i p_i [\sigma_i^2 + (V_o - V_i)^2] \quad (18)$$

### Funkcionisanje kolone kao sistema u prostoru i vremenu

Kolona<sup>6</sup> je složen organizacioni, dinamički sistem, kibernetičkih svojstava, koji se sastoji od elemenata–podistema, koji su

<sup>6</sup> Pod pojmom „kolona“ podrazumeva se vojna motorizovana kolona (kolona vojnih motornih vozila).

po svojim karakteristikama, takođe, složeni [1]. To je specifičan oblik saobraćajnog toka stohastičko-determinističkih svojstava, čiji se rad proučava kao rad SMO korišćenjem principa i postavki TMO. Rad sistema odvija se na sledeći način.

Na poprečni presek puta A–A (sl. 2), koji ima po jednu saobraćajnu traku za kretanje u oba smera, u slučajnim momentima vremena T nailaze motorna vozila ( $m/v$ ). Brzina kretanja  $m/v$ ,  $V$  [km/h], je slučajna veličina. Vreme opsluživanja  $m/v$ ,  $t_{oi}$  [s], takođe je slučajno.

Prethodnim istraživanjima utvrđeno je da:

- vreme opsluživanja  $t_{oi}$  [s] dinamičkog odstojanja vozila  $L_{di}$  [m] zavisi od organizacije i stanja sistema V–V–P–O–O i na njega utiče više faktora, pa se njihov uticaj ne može jednoznačno i jednostavno odrediti korišćenjem analitičkih metoda [3];

- vremenski interval  $t_i$  [s] između nailaska dva uzastopna vozila ima eksponencijalnu raspodelu [4, 5, 6], a intenzitet ulaznog potoka<sup>7</sup> vozila je  $\lambda$  [voz/s];

- brzina kretanja ima normalnu raspodelu [4, 5], sa matematičkim očekivanjem  $\mu_v$  i standardnim odstupanjem  $\sigma_v$ , koje se razlikuje za pojedine organizacione oblike kolone.

Put neprekidno „radi“ u toku dana na sledeći način: vozilo koje dođe na opsluživanje u trenutku  $t_i$ , ako je presek A–A slobodan, opslužuje se propuštanjem njegovog dinamičkog odstojanja kroz presek A–A, a ako je presek A–A zauzet dinamičkim odstojanjem prethodnog vo-

zila, vozilo smanjuje brzinu kretanja i čeka da prethodno dinamičko odstojanje bude opsluženo, pa se onda ono prima na opsluživanje.

Na osnovu ovih podataka i uvedenih ograničenja potrebno je razraditi algoritam za imitiranje kretanja kolone vojnih vozila, napisati program za njegovu realizaciju na računaru i za  $i = 1, 2, \dots, r$  realizacija odrediti numeričke karakteristike rada sistema.

Da bi se moglo pristupiti rešavanju postavljenog problema, pored opisanih karakteristika sistema, neophodno je poznavati: organizacionu (marševsku) strukturu, način grupisanja vozila u vojnim kolonama i specifičnosti reprezentativnih saobraćajnih tokova u koloni.

Kretanja u koloni, bez obzira što sadrže elemente određenosti, zbog velikog broja uticajnih faktora, koji su promenljivi u prostoru i vremenu, stohastički su procesi i ima smisla proučavati ih primenom TMO i teorije verovatnoće.

Stohastička priroda vojnog saobraćajnog toka u znatnoj meri uslovljena je delovanjem vozača, koji upravlja vozilom donoseći različite odluke na osnovu informacija koje „prima“ od puta, okoline i mernih uređaja na vozilu, a koje su takođe promenljive. Pored toga, put i putna situacija, kao i delovanje ostalih vozila u toku, doprinose stohastičkom karakteru sistema. Vozilo sa svojim uređajima, elementima nadgradnje, stanjem tovara i tereta, bez obzira na propisane normative, u interakciji sa ostalim elementima sistema, takođe doprinosi njegovom stohastičkom karakteru. Elementi okoline promenljivi su u prostoru i vremenu i zavise od

<sup>7</sup> U TMO je uobičajeno da se kaže ulazni ili izlazni potok (klijenata, događaja i sl.). U ovom slučaju, to je saobraćajni tok–potok vozila određenih karakteristika (intenzitet, sastav–struktura i brzina).

mnogo faktora. Organizacione mere zavise od stanja sistema i delovanja okruženja, ali i od subjektivnih karakteristika lica koja ih sprovode, pa one nisu ni strogo određene. Zbog toga se istraživani sistem može simulirati sa određenim elementima slučajnosti.

### Organizaciona (marševska) struktura reprezentativnog saobraćajnog toka u koloni

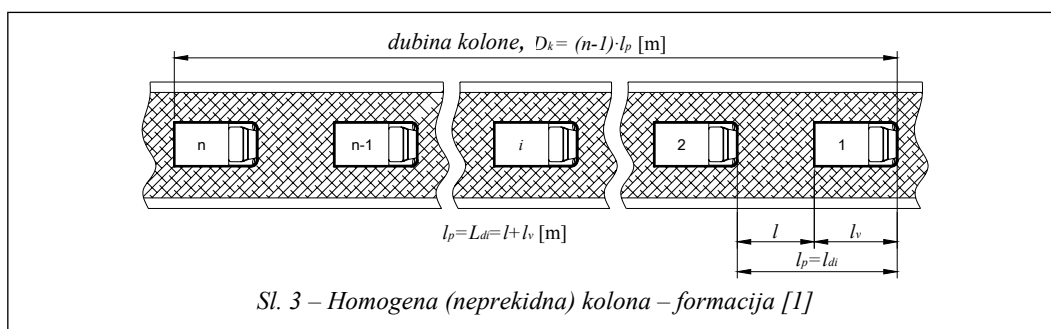
Organizaciona struktura vojnih kolona opisana je u [7, 8], a sistemski je analizirana u [1] (str. 53–66, tačka III 1). U zavisnosti od broja vozila u jedinici, gustine saobraćaja, doba dana i načina kretanja, kolona se organizuje kao: homogena (neprekidna) i nehomogena (isprekidana).

Homogena kolona je neprekidni niz vozila na proračunskim odstojanjima (sl. 3). Primenjuje se za jedinice sa manjim brojem vozila (najviše 15–20 m/v).

formaciji, postoje dva sistema organizovanja nehomogenih kolona – formacijski i grupni. U praksi je moguć, a i u literaturi se pominje i treći, kombinovani sistem.

Formacijski sistem grupisanja vozila unutar nehomogene kolone je grupisanje vozila i homogenih kolona – formacija prema formacijskoj strukturi jedinice. Suština ovog sistema je da se vozila grupišu prema pripadnosti jedinicama. Vozila koja pripadaju jednoj jedinici, bez obzira na dinamičke karakteristike, grupišu se u jednu homogenu kolonu – formaciju, a ona se uključuje u više nehomogene kolone – formacije. U zavisnosti od formacijske strukture i broja vozila, grupisanje homogenih formacija unutar nehomogene kolone može biti: jednostepeno, dvostepeno i trostepeno (sl. 4).

Kod jednostepene formacijske strukture kolone, vozila se grupišu po homogenim formacijama, koje se obič-

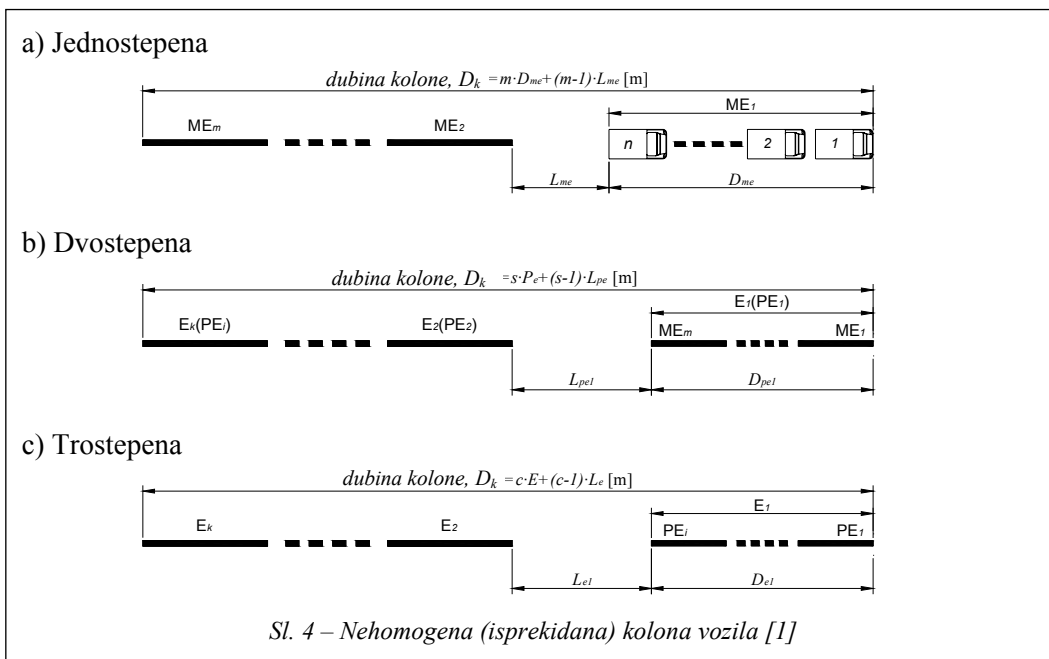


Nehomogena kolona je skup više homogenih formacija<sup>8</sup> (kolona) u okviru jedne kolone (sl. 4). Primenjuje se za jedinice sa većim brojem vozila. U zavisnosti od načina grupisanja homogenih formacija u koloni, sastava i broja vozila u homogenoj

no nazivaju marševskim elementima (ME). Na primer, ako automobilski vod (atv) predstavlja kolonu, ME su automobilska odeljenja (ato). Prema tome, kod jednostepene nehomogene kolone postoje samo ME, koji se kreću na određenim odstojanjima,  $L_{ME}$  (sl. 4. pod „a“).

<sup>8</sup> Pojam „formacija“ ima više značenja. Potiče od latinske reči „formatio“, što u konkretnom slučaju znači sastav, uređenje (vojske).





Kod dvostepene formacijske strukture kolone, pored grupisanja vozila u ME (kao homogene formacije), postoji i grupisanje ME u ešelone (E) (sl. 4 b). Na primer, u koloni automobilske čete (atč), ato predstavlja ME (prvi stepen grupisanja), a atv E (drugi stepen grupisanja). Odstojanja između E (atv)  $L_E$  veća su od odstojanja između ME (ato).

Kod trostepene formacijske strukture kolone, marševski elementi (ME) grupišu se u podešelone (PE), a podešeloni u ešelone (E) (sl. 4c). Na primer: atč u koloni atb predstavljaju E, atv unutar atč čine podešelone (PE) a ato unutar atv ME.

Nehomogene kolone su hijerarhijski organizovane (sl. 4), a po sastavu mogu biti jednoobrazne i nejednoobrazne. Kod jednoobrazne kolone svaki hijerarhijski element sadrži isti broj nižih hijerarhijskih elemenata (podsistema), a kod nejednoobrazne broj podsistema razlikuje se na pojedinim hijerarhijskim nivoima.

Broj vozila u koloni jednoobrazne hijerarhijske strukture dobija se prema izrazu:

$$N = k \cdot i \cdot m \cdot n \quad (19)$$

gde su:

- N – broj vozila u koloni,
- k – broj ešelona u koloni,
- i – broj podešelona u ešelonu,
- m – broj marševskih elemenata – grupa u podešelonu i
- n – broj vozila u marševskom elementu – grupi.

U nejednoobraznoj hijerarhijskoj organizaciji broj vozila određuje se prema izrazu:

$$N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (20)$$

gde su:

- i – broj marševskih elemenata,
- j – broj vozila u marševskom elementu.

Odstojanje između formacija unutar kolone (ME, PE i E) računa se od zadnje ivice vozila na začelju prethodne, do prednje ivice čelnog vozila sledeće formacije (sl. 4). U zavisnosti od uslova i načina kretanja kolone, odstojanja između formacija su normirana [7, 8, 9] i iznose:

- između marševskih elemenata, ME (unutar PE i E)  $L_{me} = 0,2 - 0,5$  km,
- između podešelona, PE (unutar E)  $L_{pe} = 0,5 - 1,0$  km i
- između podešelona, PE i E (unutar kolone)  $L_e (L_{pe}) = \text{oko } 2,0$  km.

Za formacijski sistem grupisanja vozila u koloni karakteristično je da je brzina kolone uslovljena brzinom najsporijeg vozila sredstva u koloni.

Grupni sistem organizovanja nehomogene kolone je grupisanje vozila samo u jednom stepenu, sa relativno malim brojem vozila u pojedinim ME (grupama), od 3 do 5 vozila. Vozila se, u načelu, grupišu prema dinamičkim karakteristikama. Određenu grupu čine vozila istih ili sličnih dinamičkih osobina. Kod grupnog sistema veća su proračunska odstojanja između vozila, dok su odstojanja između pojedinih ME-grupa relativno mala.

Za modeliranje kretanja kolone, potrebno je sagledati karakteristike reprezentativnog saobraćajnog toka u koloni koji se istražuje. U istraživanju je simuliran realni (stvarni) saobraćajni tok – kolona automobilskih jedinica<sup>9</sup> (atj), po školskoj formaciji. Ovom formacijom ustanovljene su sledeće atj:

1. ato – automobilsko odeljenje, sastava 6 m/v – teretnih od 3 t,
2. atv – automobilski vod, sastava 3 ato sa po 6 m/v – teretnih od 3 t,

<sup>9</sup> Organizaciona struktura i sastav saobraćajnog toka u koloni atj prikazani su u [1] (str. 96, tačka IV 1).

3. atč – automobilska četa, sastava: 3 atv i komanda atč; ukupno 57 m/v i

4. atb – automobilski bataljon, sastava: 3 atč i komanda atb; ukupno 187 m/v.

Brzina kolone je propisana [7, 9], a određuje se u zavisnosti od uslova kretanja, zadatka jedinice i stanja sistema. Vozačima se zadaje deonična brzina  $V_d$  km/h (planirana–naređena).

Odstojanje između vozila u koloni određuje se prema izrazu (2) (sl. 1), a odstojanja između formacija su fiksna i određuju se u skladu sa propisanim normativima [7, 8, 9]. Dinamičko-sigurnosno odstojanje  $l_{di} - l_{si}$  određuje se prema uvedenim analitičkim modelima. Model simulacije kolone prilagođen je tako da može uzeti u obzir specifičnosti saobraćajnog toka u koloni, kada treba povećati odstojanje, npr. u ratu, ili kada se prevoze specifični tereti, u skladu sa taktičkim kriterijumima i propisanim normativima. Tako dobijena dinamička odstojanja vozila  $L_{di}$  [m] izražavaju se u vremenskim jedinicama, pa se simuliraju vremenski intervali sleđenja vozila  $t_i$  [s] na presek puta A–A (sl. 2). Simulacija intervala sleđenja i brzina vozila u koloni prikazane su u [1] (str. 99–101, tačka IV 1).

### **Analitički modeli za simulaciju kretanja kolone**

Kod modeliranja saobraćajnog toka u koloni (sl. 3. i 4), postavlja se pitanje kako da se odredi  $l_s^{10}$ , odnosno  $l_d$  (sl. 1). U literaturi se, kao odgovor na ovo pitanje, nude različite mogućnosti:

<sup>10</sup> U literaturi se koristi pojam „dinamičko odstojanje“ (ako se izražava u funkciji brzine), a ako je fiksno koristi se izraz „sigurnosno odstojanje“ ili [11] „rezervno bezbedno rastojanje vozila“.

$$-l_s = 0^{11} \quad (21.1)$$

$$-l_s = l_v \quad (21.2)$$

$$-l_s = \frac{V_u}{10} \quad (21.3)$$

$$-l_s = f(v) = 0,5(l_r + l_k) = 0,5 \cdot l_z \quad (21.4)$$

Smatra se da je osnovna karakteristika vojnog saobraćajnog toka u koloni brzina, pa je logično da ona presudno utiče na ovaj element modela, odnosno da se  $l_s$  određuje na osnovu brzine. Sa analitičkog aspekta, moguća su tri modela saobraćajnog toka u koloni.

*Model apsolutnog bezbednog rastojanja (odstojanja) sleđenja*

Ovaj model podrazumeva da vozilo nailazi na trenutnu nepokretnu prepreku na putu, odnosno da se vozilo ispred njega trenutno zaustavlja.

Model se matematički može prikazati izrazom:

$$L_{di} = l_v + \left( \frac{V_u \cdot t_r}{3,6} + \frac{V_u^2}{254,3(\mu \pm i)} \right) \cdot 1,5 \quad (22)$$

Ovakva pretpostavka garantuje potpunu – apsolutnu bezbednost, jer se dinamičko odstojanje narednog vozila  $L_{di+1}$  nikada ne može preklopiti sa odstojanjem prethodnog vozila  $L_{di}$ . Model je u praksi neverovatan – nemoguć i karakterišu ga veliki i nepotrebni gubici kapaciteta. Ovaj model sadrži sve elemente prikazane izrazom (2) i smatra se reprezentativnim za vojne saobraćajne tokove u koloni. Sigurnosno odstojanje  $l_s$  je funkcija brzine i iznosi:

$$l_s = f(v) = 0,5 \cdot l_z.$$

<sup>11</sup> Neki autori [6] uzimaju da je ovo rastojanje  $l_s = 0$ , što se u vojnom saobraćaju ne može prihvatiti, jer bi u ekstremnim situacijama bezbednost saobraćaja bila narušena.

*Model realnog bezbednog rastojanja (odstojanja) sleđenja*

Ovaj model matematički se može prikazati izrazom:

$$L_{di} = l_r + \Delta l_k + l_s + l_v \quad (23)$$

Model predstavlja realnu situaciju u saobraćaju – sadrži deo puta kočenja  $\Delta l_k$ , jer su moguće dve situacije:

– brzina prethodnog vozila  $V_i \geq V_{i+1}$ , pa je  $\Delta l_k = 0$  i

–  $V_i < V_{i+1}$ , pa je  $\Delta l_k = \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{254,3(\mu \pm i)}$ , jer

je  $l_{ki} < l_{ki+1}$ , pa dolazi do preklapanja dinamičkih odstojanja.

*Model relativnog bezbednog rastojanja (odstojanja) sleđenja*

Ovaj model obezbeđuje relativnu bezbednost. Zasniva se na pretpostavci da su sva vozila u koloni i imaju približno iste karakteristike (sve mase kočnice, sva imaju hidrovakuum ili hidraulične kočnice) i da vozači u proseku imaju približno jednako vreme reaganovanja  $t_r$ .

Teorijski je moguće više oblika modela:

$$L_{di} = l_r + l_k + l_s + l_v; \text{ gde je } l_s = \frac{V_u}{10} \quad (24.1)$$

$$L_{di} = l_r + l_s + l_v; \text{ gde je } l_s = \frac{V_u}{10}, \text{ ili } l_s = l_v \quad (24.2)$$

$$L_{di} = l_r + l_k + l_v; \text{ gde je } l_s = 0 \quad (24.3)$$

Ovaj model<sup>12</sup> ima teorijski, a u vojsci (u ratu npr.) i praktični značaj. Model ima smisla koristiti ako je sastav saobraćajnog toka jednorodan (isti tipovi vozila), ako je mala brzina kretanja i ograničen kapacitet puta, ako je kraće rastojanje kretanja (kraći put), te ako su vozači (vojnici) odmorni i istih godina.

### Razrada algoritma i programa za simulaciju kretanja kolone

Postavljeni zadatak spada u klasu zadataka TMO. To je jednokanalni SMO sa ograničenim čekanjem (ograničenje je specifično), gde vozač ne raspolaže vremenom čekanja, jer je ono određeno stanjem SMO i interakcijama između vozila u sistemu. Protok vozila koji pristupa u sistem radi opsluživanja je stacionaran, sa eksponencijalnom raspodelom intervala dolaska vozila na opsluživanje. Raspodela vremena opsluživanja nije poznata, pa se ne može utvrditi da li je proces markovski ili ne, pa će zbog toga za njegovo rešavanje biti primenjena metoda statističkog modeliranja [12] (metoda Monte-Karlo).

Metoda Monte-Karlo je numerička metoda rešavanja različitih zadataka, koja se bazira na korišćenju slučajnih brojeva za simuliranje različitih pojava i procesa. Matematička osnova ove metode je Čebiševljev zakon velikih brojeva, po kojem se kod velikog broja eksperimenata frekvencija događaja neograničeno približava verovatnoći događaja, a aritmetička sredina matematičkom očekivanju slučajne veličine. Ovaj princip korišćen je kod razrade algoritma simulacije. Kao jednu realizaciju

<sup>12</sup> U modelu treba koristiti  $l_{vmax}$ , a ne  $\bar{l}_v$ .

eksperimenta uzima se jedna realizacija imitacionog modela, odnosno propuštanje kolone određenog sastava i zadatih karakteristika kroz presek puta A–A (kanal opsluživanja). Vreme rada nije ograničeno,  $t \rightarrow \infty$ , pa će sistem posle dovoljno dugog vremena preći u stacionarni režim rada. Pored ove osobine, sistem poseduje ergodično svojstvo, tj. po isteku dovoljno dugog vremena stanje sistema ne zavisi od početnih uslova. Jednom realizacijom algoritma dobijaju se vrednosti traženih karakteristika sistema. Nakon  $r$  ponavljanja (realizacija) dobija se dovoljno broj uzorak za određivanje statističkih vrednosti traženih numeričkih karakteristika.

Nakon identifikacije postavljenog problema, utvrđene su osnovne matematičke relacije između parametara koji učestvuju u simulaciji, uočene su interakcije između vozila u koloni, razrađen je sistemski dijagram i napisan program za simulaciju kolone na računaru. Program za simulaciju kretanja kolone, na osnovu ulaznih parametara koji se zadaju na početku programa, simulira kretanje kolone nekim od opisanih analitičkih modela.

Osnovu modela čini imitaciono modeliranje, tzv. dinamičkog gabarita–odstojanja  $L_{di}$  (m) [4], koji se u literaturi [8,10] naziva bruto odstojanje, ili [9] proračunsko odstojanje, a predstavlja rastojanje sleđenja vozila<sup>13</sup> u saobraćajnom toku [11]. U ovom radu koristi se izraz dinamičko odstojanje, kao najprikladniji, jer se  $L_{di}$  izračunava na osnovu dinamičkih karakteristika sistema.

<sup>13</sup> To je rastojanje između čela dva uzastopna vozila u toku. U stručnoj literaturi, kao sinonim za ovaj pojam koristi se izraz „prostorni interval sleđenja“, a ako se izražava u vremenskim jedinicama – „vremenski interval sleđenja“. U teoriji saobraćajnog toka [11] naziva se i „bezbedno rastojanje sleđenja“.

## Sadržaj ulaznih podataka, koji se iterativno zadaju na ulazu u model

U L A Z N I P O D A C I :  
=====

Protok po desnoj saobraćajnoj traci je  $Q1=300$  [voz/h].

Protok po levoj saobraćajnoj traci je  $Q2=300$  [voz/h].

Kolona je organizovana kao **HOMOGENA** formacija.

U koloni se kreće **187** vozila.

Prosečna brzina kretanja kolone je  $V=45$  [km/h].

Vreme reagovanja vozača je  $tr=0.878$  [sec].

Koeficijent prijanjanja pneumatika s kolovozom je  $\mu=0.75$

Uzdužni nagib puta iznosi  $i=0$  (%).

Srednja dužina motornog vozila je  $lv=7$  [m].

U programu se simulira **1000** realizacija (kolona).

Rezultati se ispisuju za prvih **11** vozila i za prvih **5** realizacija (kolona).

Menja se protok po desnoj traci u granicama od **300** do **1600** [voz/h], sa korakom **10**.

Podaci se simuliraju po modelu **REALNOG** bezbednog odstojanja.

Tabela 1

Primer izlaznih rezultata modeliranja saobraćajnog toka u koloni po modelu REALNOG bezbednog odstojanja sleđenja vozila

PROTOK PO DESNOJ SAOBRAĆAJNOJ TRACI JE  $Q1 = 300$  [voz/h].

Osnovne karakteristike rada puta kao sistema masovnog opsluživanja

Red. broj mv. u ME	Vreme (s)		Vreme (s)		Vreme (s)		Brzina (km/h)		Broj m. voz.		Verov. ometanja	
	ulaska m.v. u SMO	ometanja (zadrž.) (očekiv.)	čekanja SMO	opsluži- vanja m. voz.	osloba- danja SMO	potpune zauzet. SMO	slobod- nog toka paramet.	u funk. promen.	ometa- nih	neome- tanih	i-tog motor. vozila	kolone do i-tog m. voz.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	10	0.000	10.000	2.280	12.280	2.280	43.201	43.201	0	1	0.0000	0.0000
2	20	0.000	7.720	2.305	22.305	4.585	23.628	23.628	0	2	0.0000	0.0000
3	42	0.000	19.695	2.144	44.144	6.728	44.495	44.495	0	3	0.0000	0.0000
4	46	0.000	1.856	1.829	47.829	8.557	42.646	42.646	0	4	0.0000	0.0000
5	48	0.000	0.171	1.843	49.843	10.400	41.654	41.654	0	5	0.0000	0.0000
6	73	0.000	23.157	1.970	74.970	12.370	57.876	57.876	0	6	0.0000	0.0000
7	87	0.000	12.030	1.721	88.721	14.091	52.152	52.152	0	7	0.0000	0.0000
8	93	0.000	4.279	1.921	94.921	16.012	69.311	69.311	0	8	0.0000	0.0000
9	115	0.000	20.079	1.954	116.954	17.966	35.174	35.174	0	9	0.0000	0.0000
10	118	0.000	1.046	2.011	120.011	19.977	50.081	50.081	0	10	0.0000	0.0000
11	132	0.000	11.989	1.889	133.889	21.866	63.430	63.430	0	11	0.0000	0.0000
.....												
187	2230	0.000	5.955	1.747	2231.747	372.757	49.499	49.499	20	167	0.0000	0.0175
1	prosek	0.150	11.132	1.993	2231.747	372.757	42.676	42.311	20	167	0.0009	0.0175
2	prosek	0.139	12.699	1.983	2517.041	370.899	43.840	43.528	18	169	0.0009	0.0164
3	prosek	0.169	11.895	1.954	2363.808	365.375	45.475	45.123	19	168	0.0009	0.0167
4	prosek	0.155	11.445	2.000	2273.928	374.007	43.735	43.330	21	166	0.0009	0.0186
5	prosek	0.122	12.619	1.985	2465.851	371.173	43.558	43.262	21	166	0.0009	0.0186
.....												
1000	prosek	0.133	13.002	1.971	2487.948	368.604	45.386	44.973	24	163	0.0009	0.0206
SREDNJA	VR.	0.142	11.847	1.972	2335.650	368.724	44.617	44.249	21	166	0.0009	0.0183

Tabela 2

Primer izlaznih rezultata srednjih vrednosti osnovnih karakteristika rada puta kao SMO, po modelu REALNOG bezbednog odstojanja sleđenja vozila

Srednje vrednosti osnovnih karakteristika rada puta kao SMO za 1000 simulacija kolone.

Kolona atb sa 187 m/v organizovana je kao HOMOGENA formacija.

Promen- ljivi fak- tor Q1	Vreme (s)	Vreme (s)		Vreme (s)		Brzina (km/h)		Broj. m. voz.		Verov. ometanja	
	ometanja (zadrž.) (očekiv.)	čekanja SMO	opsluži- vanja m. voz.	oslobađa- nja SMO	potpune zauzet. SMO	slobod- nog toka	u funk. promen. paramet.	ometanih	neometanih	i-tog motor. vozila	kolone do i-tog m. voz.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
300	0.142	11.847	1.972	2335.650	368.724	44.617	44.249	21	166	0.0009	0.0183
310	0.148	11.469	1.972	2262.530	368.741	44.661	44.261	22	165	0.0009	0.0198
320	0.157	11.156	1.974	2203.784	369.216	44.611	44.179	23	164	0.0009	0.0211
330	0.167	10.817	1.975	2138.723	369.395	44.679	44.207	23	164	0.0010	0.0226
340	0.173	10.474	1.977	2075.686	369.634	44.656	44.151	24	163	0.0010	0.0239
350	0.181	10.149	1.979	2015.957	370.068	44.651	44.110	25	162	0.0010	0.0253
360	0.189	9.882	1.980	1964.063	370.302	44.673	44.090	26	161	0.0010	0.0270
370	0.200	9.609	1.984	1912.109	370.994	44.641	44.008	27	160	0.0011	0.0287
380	0.211	9.344	1.986	1863.455	371.328	44.655	43.977	27	160	0.0011	0.0303
390	0.221	9.140	1.989	1826.325	371.871	44.626	43.904	28	159	0.0011	0.0317
400	0.231	8.900	1.991	1780.739	372.310	44.658	43.885	29	158	0.0012	0.0335
410	0.239	8.685	1.994	1737.872	372.854	44.617	43.789	30	157	0.0012	0.0356
420	0.250	8.466	1.995	1701.893	373.104	44.630	43.766	30	157	0.0012	0.0368
430	0.258	8.270	1.999	1661.871	373.814	44.611	43.689	31	156	0.0013	0.0392
440	0.273	8.103	2.001	1631.273	374.277	44.659	43.674	32	155	0.0013	0.0408
450	0.285	7.896	2.005	1592.499	374.981	44.635	43.581	33	154	0.0013	0.0430
460	0.297	7.718	2.009	1556.334	375.642	44.670	43.546	34	153	0.0013	0.0456
470	0.311	7.513	2.013	1522.397	376.340	44.649	43.467	34	153	0.0014	0.0472
480	0.323	7.388	2.015	1500.623	376.818	44.655	43.419	35	152	0.0014	0.0488
490	0.336	7.242	2.019	1469.938	377.644	44.686	43.363	36	151	0.0014	0.0516
500	0.355	7.089	2.026	1441.431	378.877	44.638	43.237	37	150	0.0015	0.0541
510	0.366	6.912	2.029	1410.399	379.383	44.703	43.228	38	149	0.0015	0.0562
520	0.387	6.853	2.036	1397.020	380.722	44.655	43.088	39	148	0.0015	0.0586
.....											
.....											
.....											
1600	10.128	2.623	11.956	2241.703	2235.748	45.620	7.703	185	2	0.0047	0.8583

Programski je određeno da se brzina i intervali nailaska vozila modeliraju kao stohastičko-determinističke veličine. Vreme reagovanja sistema V-V može se zadavati, a može se modelirati sa određenim parametrima normalne raspodele, koji se zadaju na ulazu.

Za ostale parametre saobraćajnog toka u koloni i sistema V-V-P-O na ulazu se zadaju početne vrednosti, koje se u toku modeliranja menjaju sa određenim korakom na intervalima koji su navedeni u literaturi ili su dobijeni istraživanjem.

Kao izlazne veličine dobijaju se tabelirani podaci (tabela 1) karakteristični za SMO. Ovi podaci čuvaju se u datoteci, koja se programski otvara, ako nije unapred kreirana,<sup>14</sup> a na izlaznom uređaju ispisuju se po uređenom formatu, u obliku tabela kojih ima onoliko koliko ima koraka promenljivog parametra. Radi lakše i brže obrade podataka, napisan je program za čitanje i ispis srednjih vrednosti rezultata modeliranja (tabela 2).

<sup>14</sup> Ime datoteke može biti zadato na ulazu, kao ulazni podatak. Ako to korisnik ne uradi, programski se otvara serijska datoteka za smeštaj i čuvanje podataka.

Na osnovu vrednosti tih podataka, posebnim programom dobijaju se parametri za planiranje kretanja kolone i kriterijumi za ocenu efikasnosti kretanja. Na taj način mogu se optimizirati vrednosti merodavnog (odabranog) kriterijuma efikasnosti, pa se tako može doći do normativa pojedinih parametara, od kojih zavisi efikasnost kretanja kolone.

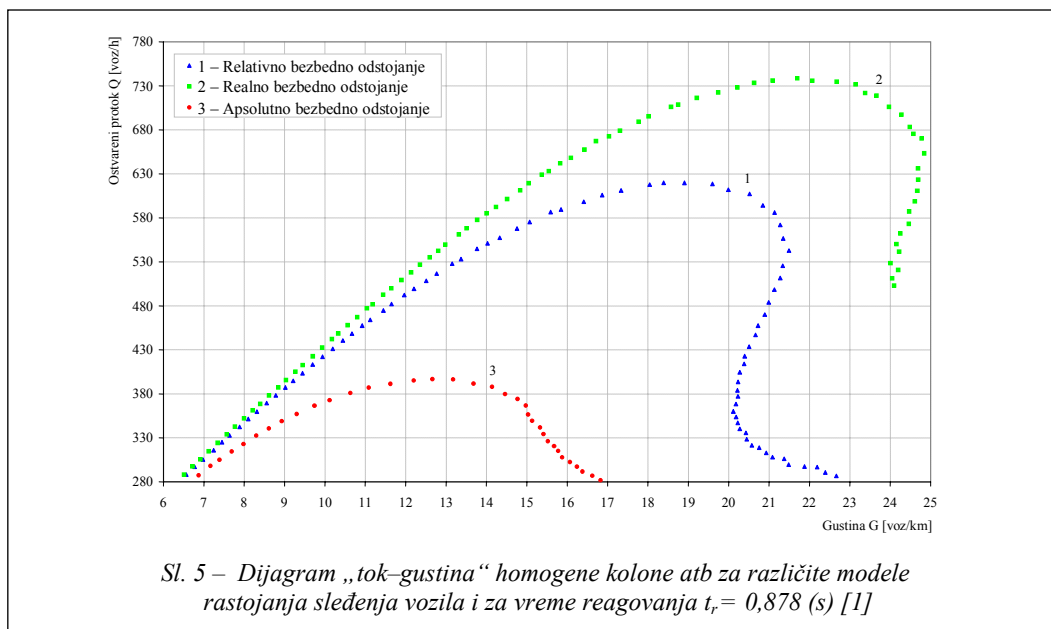
### Uporedna analiza rezultata modeliranja kretanja kolone

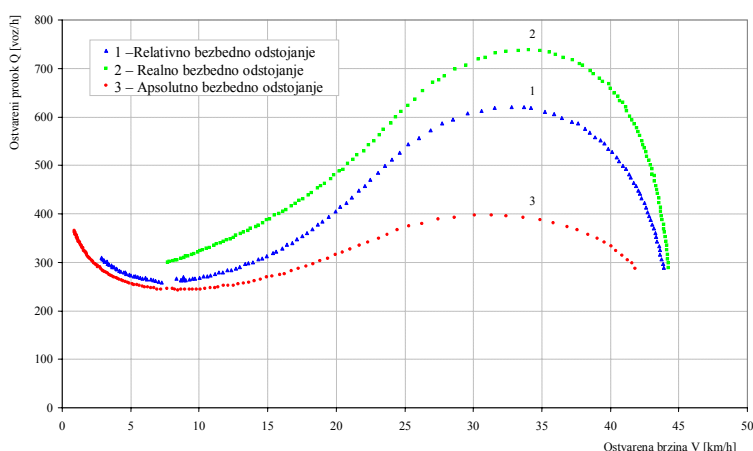
U svim analizama i proučavanjima vojnog saobraćaja i saobraćajnog toka koristi se model apsolutnog bezbednog odstojanja sleđenja vozila. Bez obzira na brojne nedostatke, primena ovog modela opravdava se razlozima bezbednosti saobraćaja. Smatra se da ovaj model garantuje bezbednost u toku kretanja, kompenzujući propuste vozača i nedostatke vozila i puta, a da su ostali modeli nepovolj-

niji. Pri tom se zanemaruje činjenica da bezbednost saobraćaja zavisi od mnogo faktora, a ne samo od dužine odstojanja sleđenja.

Upravljanje saobraćajem, posebno funkcija planiranja, zasniva se na ovom modelu. Zbog nedostataka modela, u realizaciji planova generišu se teškoće, koje su opisane u [1] (str. 153–167, tačka V 2).

Da bi sagledali uticaj analitičkih modela na rezultate kretanja kolonskog toka, izvršena je simulacija kretanja kolone atb prema analitičkim modelima. Funkcionalna zavisnost parametara opsluženog kolonskog toka od primenjenog analitičkog modela za homogenu kolonu atb prikazana je na slikama 5 i 6. Analiziranjem ovih grafičkih prikaza uočava se da parametri opsluženog saobraćajnog toka u koloni značajno zavise od primenjenog modela sleđenja vozila u koloni. Razlike su značajne za sve organizacione strukture kolona i za sve atj.





Sl. 6 – Dijagram „brzina–tok“ homogene kolone atb za različite modele rastojanja sleđenja vozila i za vreme reagovanja  $t_r = 0,878$  (s) [1]

Na osnovnom dijagramu saobraćajnog toka (sl. 5) vidi se da je maksimalni protok opsluženog saobraćajnog toka u koloni, za model apsolutnog bezbednog odstojanja sleđenja, oko 400 (395) voz/h, a maksimalna gustina saobraćaja 17 voz/km. Za model relativnog odstojanja sleđenja, maksimalni opsluženi protok je 620 voz/h, a gustina oko 23 voz/km. Kod realnog modela sleđenja, maksimalni opsluženi protok je oko 740 (739) voz/h, a gustina oko 25 voz/km.

Sa dijagrama „brzina–tok“ (sl. 6) vidi se da brzina stalno opada za sve modele odstojanja sleđenja. Za model apsolutnog bezbednog odstojanja, brzina opsluženog toka opada od 42 do 1<sup>15</sup> km/h na intervalu protoka 290 do 400 voz/h, a pri maksimalnom protoku je 31 km/h. Za relativno odstojanje sleđenja, brzina je u intervalu od 44 do 3 km/h, u oblasti protoka od 290 do 630 voz/h, a pri maksimalnom protoku iznosi 34 km/h. Kod realnog odstojanja sleđenja brzina opada od 42 do 8 km/h, u oblasti protoka od 290 do 740 voz/h, a pri maksimalnom protoku je 34 km/h.

<sup>15</sup> Brzinu manju od 10 km/h nema smisla analizirati jer se savremena vojna vozila ne mogu kretati tako malom brzinom, pa rezultati imaju teorijski značaj.

## Zaključak

Teorija masovnog opsluživanja koristi se u istraživanju i optimizaciji svih logističkih poslova u vojsci, koje karakterišu neodređenost i stohastički procesi. Brojni su praktični i teorijski radovi koji ukazuju na primenu TMO u vojsci. Primena metoda TMO pogodna je za rešavanje različitih zadataka SbPo.

Imitaciono modeliranje, kao metoda TMO, može se efikasno koristiti u istraživanju i optimizaciji organizovanog vojnog saobraćajnog toka u koloni. Ovaj rad predstavlja teorijsko i aplikativno unapređenje u oblasti optimizacije i istraživanja kretanja u koloni. Razrađeni i usavršeni model solidna je osnova za automatizaciju planiranja, kao inicijalne funkcije upravljanja vojnim saobraćajem, a posebno saobraćajnim tokovima u koloni, istraživanje kriterijuma efikasnosti saobraćajnog toka u koloni, višekriterijumsko rangiranje rešenja i ocenu efikasnosti kretanja u realnom vremenu u svrhu upravljanja.

Osnovne veličine za opisivanje saobraćajnog toka u koloni (brzina, gustina,



protok i dijagrami „BRZINA–TOK“, „TOK–GUSTINA“ i „BRZINA–GUSTINA“) pokazali su potpunu saglasnost sa teorijskim zakonima koji vladaju u saobraćajnom toku [1, 11], uz uvažavanje specifičnosti i ograničenja saobraćajnog toka u koloni. Tako je potvrđena ispravnost modela i izvršena verifikacija rezultata dobijenih imitacionim modeliranjem. Primenom teorije masovnog opsluživanja i imitacionog modeliranja dokazano je da brzina, gustina i protok kod saobraćajnog toka u koloni značajno zavise od strukture kolone i primenjenog modela organizacije kretanja.

Uparednom analizom rezultata dobijenih imitacionim modeliranjem kretanja automobilskih jedinica realnim saobraćajnim tokom u koloni, moguće je zaključiti da najbolje rezultate pokazuje kolona koja se kreće na realnom odstojanju sleđenja vozila. Ovaj model sleđenja vozila u saobraćajnom toku u koloni obezbeđuje najpovoljnije upravljanje kretanjem kolone, jer su poremećaji u saobraćajnom toku najmanji. Time su stvoreni preduslovi za bezbedno kretanje, pod uslovom da su obezbeđeni ciljevi, zadaci i kriterijumi kvaliteta upravljanja kretanjem.

Primenom teorije masovnog opsluživanja i imitacionim modeliranjem, dokazano je da su funkcionalne zavisnosti između ulaznih veličina i karakteristika opsluženog saobraćajnog toka u koloni (izlazne veličine iz SMO) značajne. Te zavisnosti ne mogu se zanemariti u praksi, jer od njih zavisi efikasnost kretanja kolone.

Raspoložive resurse puta (kapacitet, propusna moć i dozvoljena brzina), kod kretanja u koloni nije moguće u potpunosti iskoristiti, pa su gubici ovih resursa neminovni, kao posledica organizacije i interak-

cija između pojedinih sistema V–V–P–O–O, njihovih elemenata i okruženja. Imitacionim modeliranjem može se proceniti efikasnost saobraćajnog toka u koloni za različite oblike organizacije kolona i modele sleđenja vozila,<sup>16</sup> pa se tako mogu smanjiti gubici resursa puta, što je svrha i cilj upravljanja vojnim saobraćajem.

Organizaciona struktura kolone, kao element podsistema organizacije vojnog saobraćaja, odlučujuće utiče na meritelje rada i efikasnost kretanja kolone, sa veoma visokim koeficijentom korelacije. Ona se ne može generalno optimizirati jer zavisi od kriterijuma efikasnosti [1].

#### Literatura:

- [1] Gordić, S. R.: Efikasnost organizovanog vojnog kolonskog saobraćajnog toka, doktorska disertacija, Vojna akademija, Škola nacionalne odbrane, Beograd, 2005.
- [2] Gordić, S. R.: Izračunavanje osnovnih karakteristika rada puta kao sistema masovnog opsluživanja, seminarski rad iz predmeta „Operaciona istraživanja I“, TVA KoV JNA, Zagreb, 1983.
- [3] Gordić, S. R.: Analiza kretanja organizovanog kolonskog saobraćajnog toka i kriterijuma njegove efikasnosti, magistrski rad, TVA KoV JNA, Zagreb, 1983. godine.
- [4] Калужский, А. J. и сот.: Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог, Транспорт, Москва, 1969.
- [5] Vukadinović, V. S.: Elementi teorije masovnog opsluživanja, Naučna knjiga, Beograd, 1975.
- [6] Силянв, В. В.: Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организация движения, Транспорт, Москва, 1977.
- [7] Pravilo saobraćajne službe oružanih snaga, SSNO, Saobraćajna uprava, VIZ, Beograd, 1985.
- [8] Dozet, S. i sar.: Saobraćajno obezbeđenje oružanih snaga, VINC, Beograd, 1988.
- [9] Belić, S.: Organizacija putnog saobraćaja (vojni deo), TŠC KoV JNA, Zagreb, 1974.
- [10] Jovanović, G.: Saobraćajni tokovi, CVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1988.
- [11] Kuzović, Lj. i sar.: Kapacitet drumskih saobraćajnica, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1989.
- [12] Vukadinović, V. S. i sar.: Metoda Monte-Karlo, skripta, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1977.

<sup>16</sup> Optimizacija se može vršiti prema svim karakteristikama saobraćajnog toka u uslovima i dinamičkog odstojanja sleđenja, koje se zadaju kao ulazne veličine, prema različitim kriterijumima efikasnosti.

