

2. OSNOVNI PARAMETRI SAOBRAĆAJNOG TOKA

Osnovni pokazatelji ili parametri saobraćajnog toka služe za opisivanje saobraćajnih tokova i zakonitosti kretanja motornih vozila, odnosno saobraćajnih tokova na drumskim saobraćajnicama.

Ulogu u opisivanju saobraćajnih tokova tj. zakonitosti kretanja motornih vozila na mreži drumskih saobraćajnica, osnovni parametri ostvaruju na različite načine, i to:

- Preko svojih karakterističnih veličina. U principu, veličina svakog od osnovnih parametara predstavlja inicijalni indikator uslova kretanja vozila na mreži saobraćajnica.
- Preko relacija između osnovnih parametara saobraćajnog toka.
- Preko empirijskih modela za analizu praktičnog kapaciteta i pokazatelja nivoa usluge.

Na današnjem stepenu razvijenosti teorije saobraćajnog toka i praktičnih znanja, koja se koriste pri rešavanju konkretnih zadataka, u osnovne parametre-pokazatelje za opisivanje saobraćajnih tokova najčešće se svrstavaju:

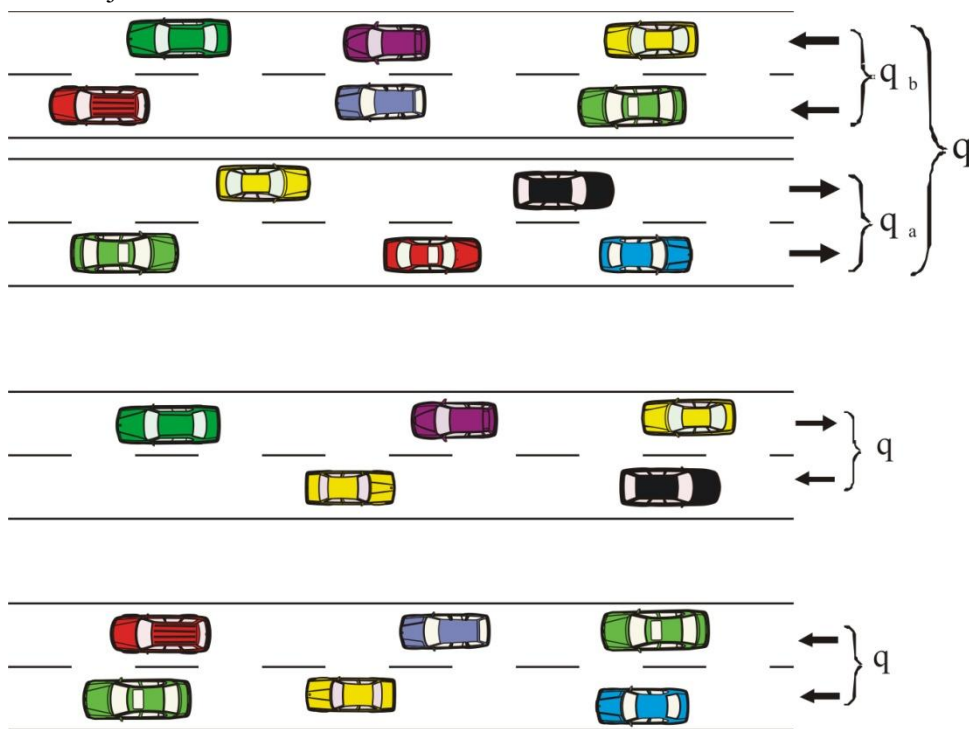
- (1) Protok vozila;
- (2) Gustina toka;
- (3) Brzina toka;
- (4) Vreme putovanja vozila u toku;
- (5) Jedinično vreme putovanja vozila u toku;
- (6) Vremenski interval sleđenja vozila u toku;
- (7) Rastojanje sleđenja vozila u toku.

Pored nabrojanih parametara, u stručnoj literaturi se spominju još: struktura toka, neravnomernost toka, složenost toka, merodavni protok, karakter toka i dr. U ovom radu je prihvaćena sledeća logika:

- Da se u red osnovnih uvrste samo sedam nabrojanih parametara-pokazatelja koji su neophodni za definisanje fundamentalne relacije. Fundamentalnom relacijom definisane su međuzavisnosti između prva tri navedena parametra, koje važe za apstraktno zamišljene teorijski idealne uslove toka.
- Da se struktura toka, neravnomernost toka, merodavni protok i dr. uvrste u karakteristične-značajne osobenosti i tipične veličine saobraćajnog toka neophodne za opisivanje uslova kretanja vozila u praktično idealnim i realnim uslovima saobraćajnog toka.

2.1. PROTOK VOZILA

Posmatrano sa praktičnog aspekta¹, pod pojmom *protok vozila* podrazumeva se broj vozila koja prođu posmatrani presek saobraćajnice u jedinici vremena u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, ili u oba smera za dvosmerne saobraćajnice.

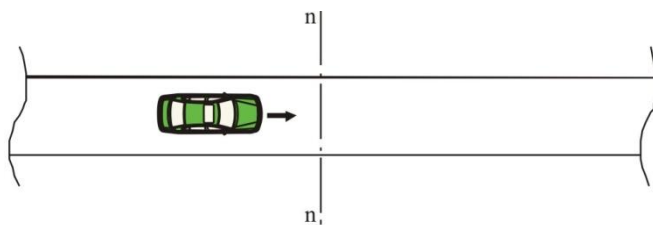


Slika 2-1. Ilustrativni prikaz protoka vozila za jednosmerne i za dvosmerne saobraćajnice

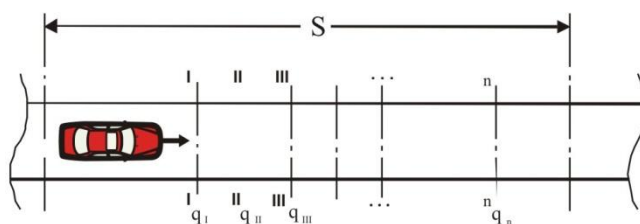
$$q = \frac{N}{\tau} \quad [2-1]$$

Posmatrano sa teorijskog aspekta, tj. sa aspekta fundamentalne relacije definisane u teoriji saobraćajnog toka, pod pojmom **protok vozila** podrazumeva se broj jednakih voznih jedinica u jednom jednosmernom nizu koji prođu kroz posmatrani presek puta u jedinici vremena. Podrazumeva se da za upravljačima jednakih voznih jedinica (najpribližnije PA-putničkih automobila) sede vozači jednakih psiho-fizičkih karakteristika, koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

¹ Permanentno evidentiranje saobraćajnih tokova na mreži-brojanje saobraćaja, analiza kapaciteta i nivoa usluge, saobraćajno tehničko dimenzionisanje mreže, dimenzionisanje kolovozne konstrukcije, upravljanje saobraćajnim tokovima, vrednovanje projekata i dr.



Slika 2-2. Protok vozila na preseku



$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad [2-2]$$

Slika 2-3. Protok vozila na odseku

Za kvantitativno iskazivanje protoka u praksi se koriste termini **veličina toka** i **intenzitet toka**. Osnovna vremenska jedinica za iskazivanje veličine toka je čas (h), pa se tako protok i najčešće iskazuje u jedinici (voz/h). U praksi se koriste i veće vremenske jedinice od jednog časa, kao što su *dan* (24 časa), *radni dan* (16 časova) i period *vršnog saobraćaja* (nekoliko časova). Često se koriste i manje vremenske jedinice od jednog časa, reda jednog ili više minuta, najčešće 15 minuta. Ređe se koriste i vremenske jedinice koje su manje i od 1 minuta, reda sekundi.

Osnovni simbol za označavanje protoka je q . Koriste se i simboli **PGDS**-prosečan godišnji dnevni saobraćaj, zatim **PDS**-prosečan dnevni saobraćaj, i **DS**-dnevni saobraćaj. Za iskazivanje protoka u vremenskim jedinicama manjim od 1 časa, tj. reda minuta, često se koriste simboli: **N**, **X** i dr.

Za iskazivanje protoka u vremenskim jedinicama manjim od 1 minuta tj. reda sekundi, često se koriste simboli: λ (voz/s); x (voz/10s, voz/15s, voz/20s, voz/30s) i dr.

Traba napomenuti da se u literaturi na engleskom protok q označava "v" koja potiče od reči „volume“. Pored toga, u literaturi sa engleskog govornog područja figuršu simboli: *Average Annual Daily Traffic AADT*(PGDS), *Average Daily Traffic ADT*(PDS), *Daily Traffic DT* (DS) itd.

2.1.1 NAČIN PRIKAZIVANJA PROTOKA U INŽENJSKOJ PRAKSI

Protok je parametara saobraćajnog toka koji se najčešće analizira za potrebe projektovanja i planiranja. Na mreži državnih puteva protok se meri u svim evropskim državama, a sve saobraćajne studije podrazumevaju utvrđivanje protoka i vremenskih neravnomernosti protoka koje se javljaju usled različitih društvenih aktivnosti. U zavisnosti od potreba postoje različiti načini prikazivanja analiza protoka. Jedan od načina prikazivanja veličine je tabelaran kao što je prikazana na sledećoj slici.



**REGIONALNA PUTNA MREŽA
AP VOJVODINE**

**PROSEČAN GODIŠNJI DNEVNI SAOBRAĆAJ - PGDS
U 2009. GODINI**

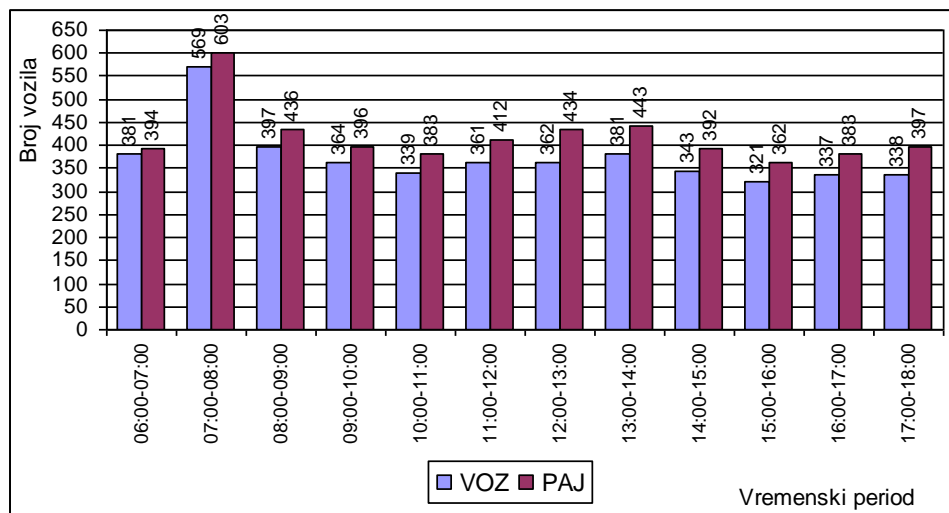
Red. broj	Oznaka deonice	SAOBRAĆAJNA DEONICA	Dužina deonice (km)	P G D S						
				PA	BUS	LT	ST	TT	AV	Ukupno
Broj puta: R - 102										
1	2151	Bačko Novo Selo - Bač	16,4	898	19	60	35	13	84	1 110
2	2152	Bač - Silbaš 2 (Kula)	22,5	1 497	32	100	58	22	141	1 850
3	2153	Silbaš 2 (Kula) - Silbaš 1 (B. Palanka)	0,6	Nema podataka - gradska deonica						
4	2154	Silbaš 2 (Kula) - Rumenka	25,6	5 703	121	383	222	85	536	7 049
5	2155	Rumenka - Novi Sad 1 (B. Petrovac)	7,4	7 734	164	519	301	115	727	9 560
			72,5							
Broj puta: R - 120										
6	2248	Bačko Gradište - Nadalj	7,0	3 207	64	201	162	56	234	3 923
7	2249	Nadalj - Temerin	10,3	3 531	70	221	178	61	258	4 320
8	2250	Temerin - Novi Sad 6 (Temerin)	13,2	8 795	175	551	443	153	642	10 760
9	2251	N. Sad 6 (Temerin) - N. Sad 3 (S. Karlovci)	4,2	Nema podataka - gradska deonica						
			34,7							
Broj puta: R - 122										
10	2254	Senta - Bečej 3 (Senta)	39,7	3 041	62	229	162	64	153	3 712
11	2255	Bečej 3 (Senta) - Bečej 1 (B. Topola)	0,6	Nema podataka - gradska deonica						
29	2036	Bečej 1 (B. Topola) - Bečej 2 (B. Gradište)	2,3	Nema podataka - gradska deonica						
12	2256	Bečej 2 (B. Gradište) - Bačko Gradište	8,7	3 457	70	260	184	73	174	4 220
13	2257	Bačko Gradište - Čurug	6,7	1 163	24	88	62	25	59	1 420
14	2258	Čurug - Žabalj	13,8	1 417	29	107	76	30	71	1 730
15	2259	Žabalj - za Žabalj	2,0	1 598	33	120	85	34	81	1 950
16	2260	za Žabalj - Sajkaš	9,5	1 516	31	114	81	32	76	1 850
			81,0							

LEGENDA:

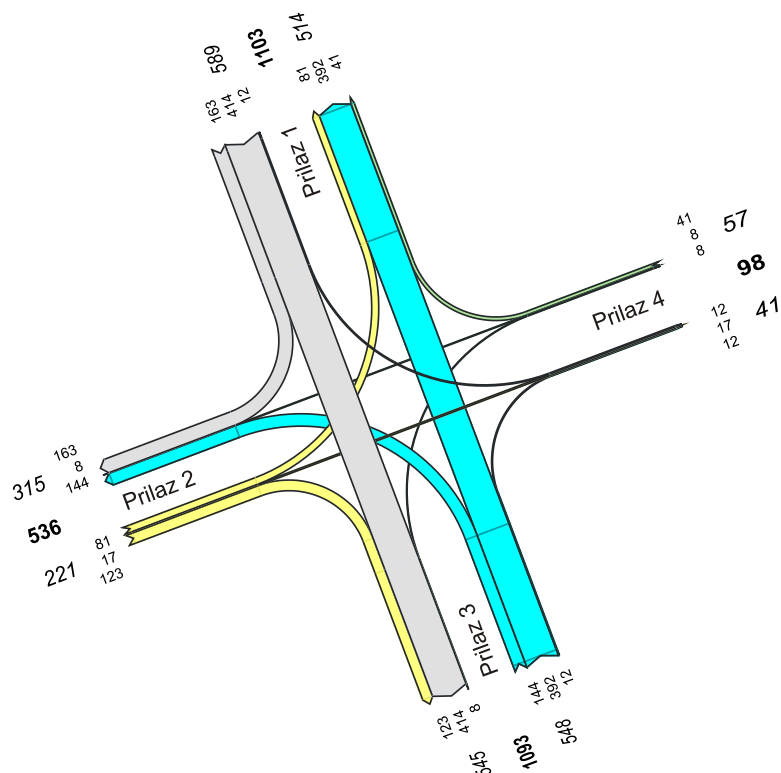
PA	- putnički automobil,
BUS	- autobus,
LT	- lako teretno vozilo,
ST	- srednje teretno vozilo,
TT	- teško teretno vozilo,
AV	- autovoz i teretno vozilo sa prikolicom,
	- deonica u preklupu dva puta.

Slika 2-4. Tabelarno prikazivanje protoka

Pored tabelarnog u inženjerskoj praksi često se koriste grafički i šematski prikazi protoka na presecima puta ili na prilazima raskrsnica.



Slika 2-5. Grafički prikaz časovnog protoka



Slika 2-6. Šematsko prikazivanje protoka po prilazima raskrsnice

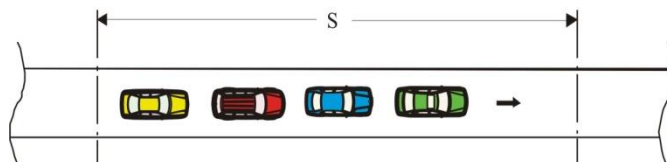
2.2. GUSTINA SAOBRAĆAJNOG TOKA

Posmatrano sa praktičnog aspekta (analiza kapaciteta i nivoa usluge, saobraćajno tehničko dimenzionisanje mreže, i dr.) pod pojmom *gustina toka* podrazumeva se broj vozila na jedinicu dužine saobraćajnice, po saobraćajnoj traci, po smerovima za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u dve trake u oba smera za dvosmerne saobraćajnice. Znači, pojam gustine vezan je prostorno za odsek ili saobraćajnu deonicu, a vremenski za trenutno stanje.

Posmatrano sa teorijskog aspekta, tj. sa aspekta fundamentalne relacije definisane u teoriji saobraćajnog toka, pod pojmom *gustina toka* podrazumeva se broj jednakih voznih jedinica u jednom jednosmernom nizu na jediničnoj dužini u jednom trenutku. Podrazumeva se da za upravljačima jednakih voznih jedinica (najpribližnije PA) sede vozači jednakih psiho-fizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

$$g = \frac{\text{broj vozila}}{S} \quad [2-3]$$

Osnovni simbol za gustinu saobraćajnog toka je: $[g]$. U literaturi iz engleskog govornog područja gustina toka se izražava simbolima D od engleske reči *Density*. Osnovna jedinica dužine za iskazivanje gustine u praksi je kilometar. U teorijskim radovima gustina se izražava i u odnosu na metar.



Slika 2-4. Gustina vozila na odseku

U inženjerskoj praksi, ali i naučnim radovima koji se bave problematikom odnosa u Teoriji saobraćajnog toka, kao oblici gustine analiziraju se i Zauzetost (*Occupancy*) i Koncentracija (*Concentration*)

2.2.1 ZAUZETOST

Zauzetost (*Occupancy*) predstavlja odnos između perioda vremena u kome se vozila nalaze iznad posmatranog preseka puta u odnosu na ukupan vremenski period posmatranja T . Ukoliko se protok meri detektorom, za svako individualno vozilo vreme provedeno iznad detektora zavisi od brzine kretanja vozila V_d njegove dužine

L_i i merne širine koju zauzima detektor d_d . Detektor registruje vreme od momenta prelazak prednjeg kraja vozila preko leve strane idnuktivnog kalema detektora, do momenta kada zadnji branik pređe preko desne strane kalema detektora. U skladu sa prethodno navedenim, zauzetost se može izraziti sledećom matematičkom formulom

$$O = \frac{\sum_i (L_i + d_d) / v_{ti}}{T} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}} + \frac{d}{T} \sum_i \frac{1}{v_{ti}} \quad [2-4]$$

gde su:

- L_i - dužina vozila,
- d_d - dužina zone koju zahvata detektor,
- V_{ti} - srednja vremenska brzina vozila,
- T – period snimanja,

Ukoliko prethodnu jednačinu pomnožimo i podelimo sa brojem vozila N , prethodna jednačina će dobiti sledeći oblik:

$$O = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}} + d \cdot \frac{N}{T} \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_{ti}} \quad [2-5]$$

Uzimajući u obzir relacije za protok srednju prostornu brzinu dobijamo da je.

$$O = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}} + d \cdot \frac{q}{v_s} \quad [2-6]$$

odnosno:

$$O = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}} + d \cdot k \quad [2-7]$$

Ako se zna da period T predstavlja zbir vremenskih intervala sleđenja t_h , množeći prethodnu relaciju sa $\frac{1}{N}$ dobija se:

$$O = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}}}{\frac{1}{N} \sum_i t_{hi}} + d \cdot k \quad [2-8]$$

$$O = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}}}{\bar{h}} + d \cdot k \quad [2-9]$$

Ukoliko se u obzir uzme prosečna dužina vozila L , dobija se:

$$O = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_{ti}}}{\bar{h}} + d \cdot k = \frac{1}{\bar{h}} \cdot L \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_{ti}} + d \cdot k \quad [2-10]$$

Ako se podestimo da je $V_s = \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_{ti}}$, dobijamo da se zauzetost može izraziti kao:

$$O = L \cdot \frac{q}{v_s} + d \cdot k \quad [2-11]$$

Ako se zna da je koncentracija, kao jedan od oblika gustine, $k = \frac{q}{v_s}$ dobijamo da je:

$$O = (L + d) \cdot k \quad [2-12]$$

Ako uzmemo da je širina deketkora d konstanta, a da je L prosečna dužina automobila dobijamo da je:

$$O = c_k \cdot k \quad [2-13]$$

gde je:

- konstanta $c_k = (L + d)$

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, dobijamo da je:

$$\overline{V_s} = \frac{q \cdot c_k}{O} \quad [2-14]$$

Zautetost i protok su parametri koji se relativno lako mogu meriti pa prikazana jednačina može poslužiti za određivanje srednje prostorne brzine, parametra koji se znatno teže može utvrditi neposrednim merenjem.

Prethodne relacije važe i u slučaju kada dužina vozila varira, s tim što to treba uvažiti u postupku proračuna. U slučaju kada je tok heterogen i u kome pored dužine značajno variraju i brzine vozila, iskazani odnos brzine i protoka može biti donekle poremećen.

2.2.2 KONCENTRACIJA

Koncentracija (*Concentration*) je u prošlosti je korišćena kao sinonim za gustinu. Međutim, gustina je u teoriji saobraćajnog toka mera koncentracije vozila na nekom prostoru, a koncentracija kao parametar saobraćajnog toka podrazumeva meru vremenske koncentracije za isti tok vozila.

Gustina može da se meri samo po dužini posmatranog odseka. Ako su dostupna samo merenja sa pojedinih preseka, gustinu treba računati iz zauzetosti ili kao odnos protoka i srednje prostorne brzine na posmatranom odseku.

Engleski naučnik Wardrop, J. G.² istakao je da se saobraćajni tok može smatrati skupom pojedinačnih tokova, u kojima vozila putuju istom brzinom i pojavljuju se slučajno. Posebno je važno napomenuti da se u pojedinačnom toku slučajnost pojave mora odnositi na razmak između vozila, kao i da sva vozila u njemu imaju konstantnu brzinu. Prema tome, na posmatranom odseku se u jednom trenutku

² Wardrop, J. G. (1952) "Some theoretical aspects of road traffic research," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, 1, 325-378

zbog postojanja više različitih pojedinačnih tokova može pojaviti više različitih gustina.

Isto tako, ako protok i brzinu merimo na više različitih preseka posmatranog odseka, rezultati merenja, teorijski mogu biti različiti. Što je udaljenost između mernih tačaka veća, a posmatrani tok ređi, verovatnoća pojave različitih rezultata je veća.

Poznato je da se srednja prostorna brzina može izračunati na osnovu lokalnih merenja, praktično merenja na preseku puta $V_s = \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{t_{ti}}$. U skladu sa tim, koncentracija se može definisati kao odnos protoka i brzine merene na jednom preseku puta.

$$k = \frac{q}{V_s} \quad [2-15]$$

Privremene koncentracije, kao i zauzetost može se meriti samo na kratkom delu odseka, manjem od minimalne dužine vozila, najčešće korišćenjem induktivnog detektora kao mernog uređaja. Na dužim odsecima ovakva merenja, ne bi mogla zadovoljiti potrebnu preiznost, tako da nemaju ni teorijski ni praktični značaj.

Iz tog razloga do 1985. god. koncentracija, pa ni zauzetost, praktično su od strane naučnika ignorisane i nisu imale neko značajnije mesto u teoriji saobraćajnog toka. Iako se meri teže od ostalih parametara toka, gustina je još od tridesetih godina prošlog veka parametar toka koji se koristi za definisanje saobraćajnog toka što je stavlja iznad ostalih parametara koji na donekle sličan način opisuju karakteristike saobraćajnog toka.

2.3. BRZINA SAOBRAĆAJNOG TOKA

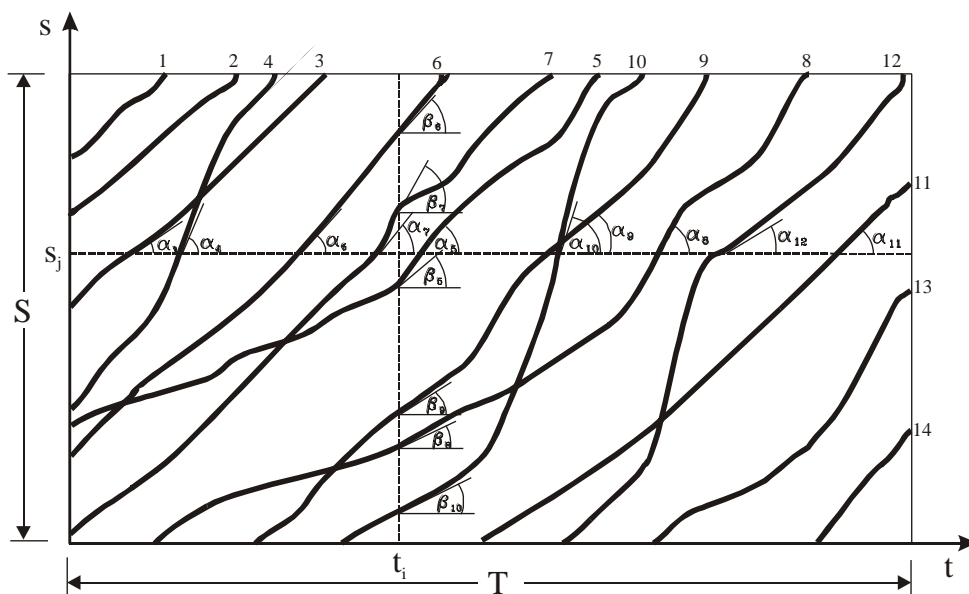
S obzirom da se radi o saobraćajnom toku, znači o istovremenom kretanju više vozila, to se pod pojmom brzine toka misli na određenu SREDNJU VREDNOST brzina svih vozila koja učestvuju u saobraćajnom toku.

Zavisno od načina posmatranja protoka u odnosu na prostor i vreme, a s obzirom i na značenja pojmova za protok vozila i gustinu toka, u teoriji saobraćajnog toka su uspostavljena dva pojma brzine saobraćajnog toka. Ti pojmovi su:

- **SREDNJA PROSTORNA BRZINA TOKA**, koja je prostorno vezana za jedan niz vozila na odseku puta dužine (S), a vremenski za trenutak (t_i).
- **SREDNJA VREMENSKA BRZINA TOKA**, koja je vezana za protok jednog niza vozila na preseku puta (s_j) u vremenskom za periodu osmatranja (T).

U cilju ilustracije razlika u načinu posmatranja brzine saobraćajnog toka, sa gledišta *prostora* i *vremena* prikazane su naredne trajektorije kretanja jednog niza vozila na odseku puta (S) u periodu vremena (T), kao i dva aspekta posmatranja brzina:

- tzv. **trenutno** posmatranje na odseku u trenutku (t_i), i
- tzv. **lokalno** posmatranje na preseku (s_j) u periodu vremena (T).



Slika 2-5. Ilustrativni prikaz trenutnog i lokalnog posmatranja srednje prostorne i srednje vremenske brzine

Trenutno posmatranje na odseku (S) dovodi do srednje prostorne brzine:

$$\bar{V}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \beta_i \quad [2-16]$$

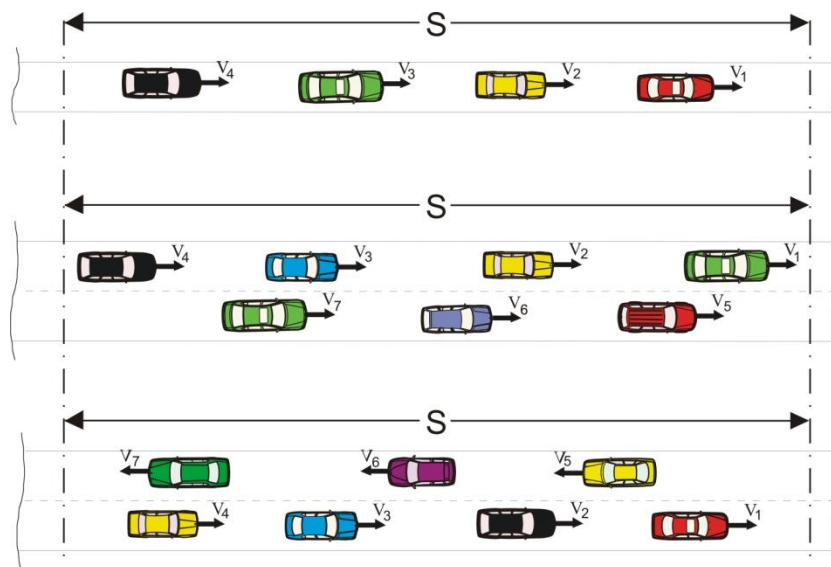
Lokalno posmatranje u vremenu (T) dovodi do srednje vremenske brzine:

$$\bar{V}_t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \operatorname{tg} \alpha_j \quad [2-17]$$

2.3.1. DEFINICIJE BRZINE TOKA

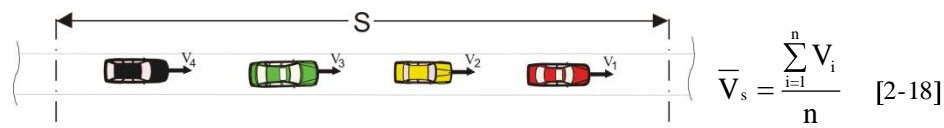
(1) Srednja prostorna brzina saobraćajnog toka

Posmatrano sa praktičnog aspekta srednja prostorna brzina saobraćajnog toka predstavlja aritmetičku sredinu trenutnih brzina svih vozila u saobraćajnom toku u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice ili u oba smera za dvosmerne saobraćajnice na posmatranom odseku puta. Ova brzina se u stručnoj literaturi naziva i srednja trenutna brzina. Znači, srednja prostorna brzina toka, sa gledišta prostornog posmatranja predstavlja brzinu na odseku puta, a sa gledišta vremenskog posmatranja predstavlja trenutnu brzinu toka. U stručnoj literaturi se merenje srednje prostorne brzine često naziva trenutno posmatranje (merenje) na odseku puta.



Slika 2-6. Srednja prostorna brzina saobraćajnog toka posmatrano sa praktičnog aspekta

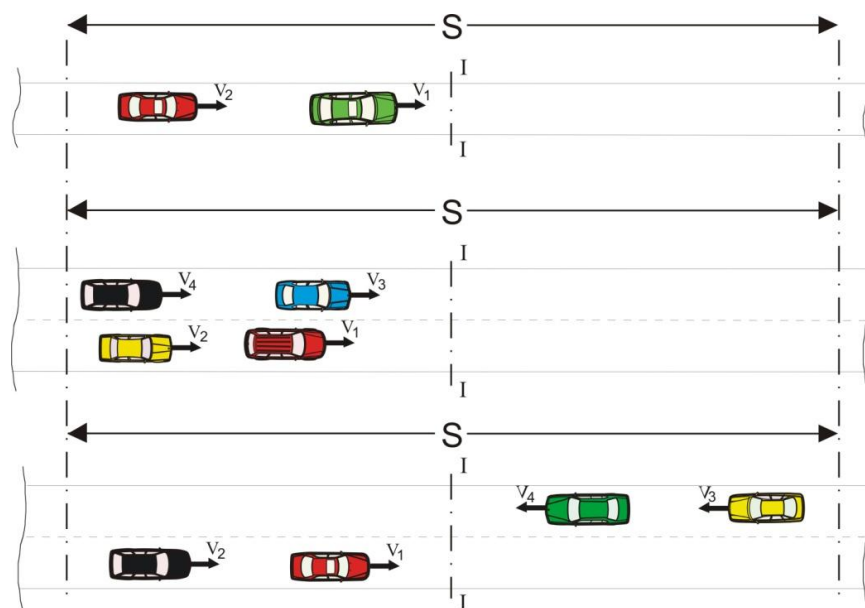
Posmatrano sa aspekta teorije saobraćajnog toka, tj. sa aspekta fundamentalne relacije definisane u teoriji saobraćajnog toka, srednja prostorna brzina saobraćajnog toka predstavlja aritmetičku sredinu brzina svih jednakih voznih jedinica u jednoniznom jednosmernom toku na odseku dužine (S). Podrazumeva se da za upravljačima jednakih voznih jedinica (najpribližnije PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.



Slika 2-7. Srednja prostorna brzina saobraćajnog toka posmatrano sa aspekta teorije saobraćajnog toka

(2) Srednja vremenska brzina saobraćajnog toka

Posmatrano sa praktičnog aspekta srednja vremenska brzina saobraćajnog toka predstavlja aritmetičku sredinu brzina svih vozila u saobraćajnom toku, u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice ili u oba smera za dvosmerne saobraćajnice, koja prolaze posmatrani presek puta, u određenom periodu vremena.



Slika 2-8. Srednja vremenska brzina saobraćajnog toka posmatrano sa praktičnog aspekta

Merenje brzina vozila na posmatranom preseku puta, kao i na toj osnovni utvrđivanje srednje vremenske brzine saobraćajnog toka, u stručnoj literaturi se naziva LOKALNO merenje ili posmatranje.

$$\bar{V}_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i \quad [2-19]$$

Posmatrano sa aspekta teorije saobraćajnog toka tj. sa aspekta fundamentalne relacije definisane u teoriji saobraćajnog toka, srednja vremenska brzina saobraćajnog toka predstavlja aritmetičku sredinu brzina svih jednakih vozniha jedinica u jednom jednosmernom nizu koja prolaze kroz posmatrani presek puta u određenom periodu vremena (T). Podrazumeva se da za upravljačima jednakih vozniha jedinica (najpribližnije PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

2.3.2. BRZINA SAOBRAĆAJNOG TOKA U ZAVISNOSTI OD USLOVA KRETANJA VOZILA U TOKU

U zavisnosti od uslova kretanja vozila u saobraćajnom toku *srednja prostorna* i *srednja vremenska brzina* saobraćajnog toka dobijaju specifične nazive, što je ilustrovano u PETOREŽIMSKOM MODELU pri praktično idealnim uslovima slika 2-9.

(1) Brzina slobodnog toka

Pojam brzine slobodnog toka vezan je za slobodan tok i podrazumeva da sva vozila u saobraćajnom toku na posmatranom odseku imaju uslove kretanja pojedinačnih vozila. Kod brzine slobodnog toka razlikuju se:

- a) srednja prostorna brzina slobodnog toka ($V_{s_{sl}}$),
- b) srednja vremenska brzina slobodnog toka ($V_{t_{sl}}$).

(2) Brzina normalnog toka (stabilan, polustabilan i nestabilan tok)

Pojam brzine normalnog toka vezan je za stabilan, polustabilan i nestabilan saobraćajni tok u kome na uslove kretanja vozila deluje i interakcija između vozila u toku. Kod brzine normalnog toka razlikuju se:

- a) srednja prostorna brzina toka (V_s),
- b) srednja vremenska brzina toka (V_t)

(3) Brzina zasićenog toka, tzv. brzina pri kapacitetu

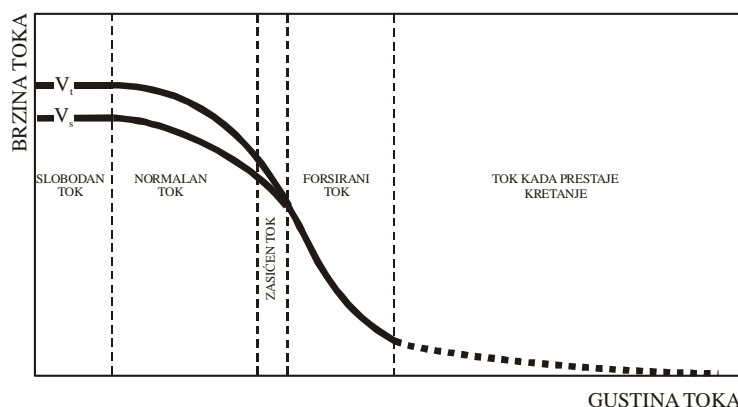
Pojam brzine zasićenog toka vezan je za protok maksimalne veličine i optimalne gustine, u kome se sva vozila kreću uz potpuno delovanje interakcije između vozila u toku. U uslovima zasićenog toka sva vozila se kreću približno istom brzinom (V_{zT}). Što znači da u zasićenom toku ne postoji kvantitativna razlika između srednje prostorne i srednje vremenske brzine saobraćajnog toka. Znači, pri zasićenom toku važi uslov da je:

$$V_{zT} = V_{s_{zT}} = V_{t_{zT}}.$$

(4) Brzina forsiranog (prinudnog) toka

Pojam brzine forsiranog toka vezan je za forsiran-prinudni saobraćajni tok. U

uslovima forsiranog (prinudnog) toka vozila se kreću približno istom brzinom koja, posmatrana u prostoru i vremenu, oscilira između vrednosti V_{ZT} i 0. Znači, pri forsiranom toku važi uslov da je: $V_F < V_{ZT}$.



Slika 2-9. Srednja prostorna i srednja vremenska brzina po režimima toka u okviru "Petorežimskog modela saobraćajnog toka"

2.3.3. POSTUPCI UTVRĐIVANJA SREDNJE PROSTORNE BRZINE

Iz dosadašnjih izlaganja jasno je da nije komplikovano utvrditi srednju vremensku brzinu koja se sprovodi na bazi tzv. lokalnih merenja. Međutim, za utvrđivanje srednje prostorne brzine neophodno je meriti trenutne brzine svih vozila u saobraćajnom toku na posmatranom odseku. Do konkretnih podataka o trenutnim brzinama svih vozila u saobraćajnom toku na posmatranom odseku u određenim vremenskim presecima može se doći merenjima sa zemlje i iz vazduha uz pomoć fototehnike i savremene elektronske opreme. Merenja trenutnih brzina svih vozila u saobraćajnom toku na posmatranom odseku na današnjem nivou nauke i tehnike još uvek predstavlja složen i skup postupak.

S obzirom na iznete praktične probleme u vezi merenja trenutnih brzina svih vozila u saobraćajnom toku na posmatranom odseku puta, prirodno su se nametnule potrebe za iznalaženjem jednostavnijih i jeftinijih načina određivanja (približne) vrednosti srednje prostorne brzine saobraćajnog toka. U red jednostavnijih načina utvrđivanja srednje prostorne brzine, koji su značajni za praktične potrebe, spadaju:

a) Utvrđivanje srednje prostorne brzine saobraćajnog toka na bazi tzv. lokalnih merenja

Istraživanja su pokazala da se, na odseku duž koga znatnije ne osciliraju brzine vozila, srednja prostorna brzina saobraćajnog toka može izračunati kao

harmonijska sredina brzina utvrđenih na bazi tzv. lokalnih merenja na određenom preseku posmatranog odseka. Osnovni obrazac za izračunavanje srednje prostorne brzine iz tzv. lokalnih merenja glasi:

$$V_s = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{V_i}} \quad [2-20]$$

gde je:

- N – broj vozila čija je brzina izmerena na preseku posmatranog odseka u nekom vremenskom periodu posmatranja (T).
- V_i – brzine pojedinih vozila koje su utvrđene na bazi tzv. lokalnih posmatranja na preseku posmatranog odseka puta.

Do prednjeg obrasca se može doći i iz relacije:

$$V_s = \frac{S}{\bar{t}} \quad [2-21]$$

gde je:

- S – dužina odseka,
- \bar{t} – srednje vreme koje je potrebno da sva vozila u posmatranom saobraćajnom toku prođu određeni odsek u određenom periodu osmatranja.

S obzirom da je:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}{N}, \text{ odnosno} \quad [2-22]$$

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \left[\frac{S}{V_{1 \leftarrow 1}} + \frac{S}{V_{2 \leftarrow 1}} + \dots + \frac{S}{V_{N \leftarrow 1}} \right]$$

$$\bar{t} = \frac{S}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{V_{i \leftarrow 1}}$$

dolazi se do sledeće relacije za srednju prostornu brzinu saobraćajnog toka:

$$V_s = \frac{S}{\frac{S}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{V_{i \leftarrow 1}}} \quad [2-23]$$

$$V_s = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{V_{i \leftarrow 1}}} \quad [2-24]$$

b) Utvrđivanje srednje prostorne brzine na osnovu srednje vremenske brzine i standardnog odstupanja brzina vozila u saobraćajnom toku izmerenih na preseku

Pored iznetog postupka izračunavanja srednje prostorne brzine saobraćajnog toka zasnovanog na direktnom korišćenju podataka o brzinama vozila iz merenja na preseku posmatrane deonice puta, do približne vrednosti srednje prostorne brzine može se doći i na bazi srednje vremenske brzine i standardnog odstupanja brzina vozila posmatranog saobraćajnog toka izmerenih na preseku.

Istraživanjima je ustanovljena sledeća relacija:

$$V_s = V_t - \frac{S_v^2}{V_t} \quad [2-25]$$

gde je:

S_v – standardno odstupanje,

V_t – srednja vremenska brzina toka.

c) Relacija između srednje prostorne i srednje vremenske brzine prema istraživanjima vršenim u Rusiji³:

$$V_s = \frac{\bar{V}_t}{1 + k^2} \quad [2-26]$$

k – parametar stanja toka, čije su najčešće vrednosti od 0,2 do 0,25 odnosno čiji je kvadrat $k^2=0,04$ do 0,06:

- za normalni tok koji je blizak slobodnom toku $k = 0,25$,
- za normalni tok koji je blizak zasićenom toku $k = 0,20$,
- za zasićen tok $k = 0,00$,

d) Utvrđivanje srednje prostorne brzine saobraćajnog toka na bazi merenja pomoću pokretnog osmatrača

Ovaj postupak je pogodan za merenje srednje prostorne brzine na gradskim saobraćajnicama za dvosmerni saobraćaj. Postupak se sastoji u tome što se u realni saobraćajni tok na određenom odseku uključuje vozilo pokretni osmatrač, sa zadatkom da sledi jedno vozilo iz realnog saobraćajnog toka kojeg je pokretni osmatrač odabrao procenjujući da je ono reprezentativno sa gledišta sastava toka i sa gledišta brzine kojom se kreće. Za utvrđivanje srednje prostorne brzine ovim

³ Siljanov, V.V. "Teorija transportnih potokov v projektirovaniji dorog i organizacii dvizenija", Transport, Moskva, 1977.

postupkom potrebno je najmanje po jedna vožnja u smeru merenja i u suprotnom smeru. Pre izvođenja merenja preporučljivo je obaviti probne vožnje. Za vožnju u smeru toka čija se brzina istražuje, pokretni osmatrač bira vozilo iz smera realnog toka koje će pratiti. Izbor vozila koje će pratiti i uključivanje pokretnog osmatrača u saobraćajni tok vrši se nešto pre početka odseka, a merenja se vrše od početka do kraja posmatranog odseka.

Pokretni osmatrač od početka do kraja posmatranog odseka u smeru čija se brzina istražuje, prati vozilo iz realnog toka, maksimalno ga oponaša u vožnji i duž posmatranog odseka obavlja sledeće zadatke:

- Beleži vreme na početku posmatranog odseka;
- Beleži vreme na kraju posmatranog odseka;
- Broji vozila koja su pretekla praćeno vozilo i vozilo pokretnog osmatrača;
- Broji vozila koja su pretekuta od strane praćenog vozila i vozila pokretnog osmatrača;
- Meri dužinu posmatranog odseka.

Za vožnju u suprotnom smeru na posmatranom odseku ***pokretni osmatrač*** se takođe uključuje u tok nešto pre kraja (početka) posmatranog odseka, vozi brzinom koju omogućavaju uslovi u saobraćajnom toku i duž posmatranog odseka obavlja sledeće zadatke:

- Beleži vreme na kraju (početku) posmatranog odseka;
- Beleži vreme na početku (kraju) posmatranog odseka;
- Broji vozila iz suprotnog smera za ovu vožnju, inače iz smera za koji se istražuje brzina toka;
- Meri dužinu posmatranog odseka.

Na bazi merenja obavljenih od strane pokretnog osmatrača određuje se približna vrednost srednje prostorne brzine saobraćajnog toka u smeru posmatranog odseka, preko sledećih relacija:

$$q = \frac{x + y}{t_a + t_c} \quad [2-27]$$

$$t = t_c - \frac{y}{q} \quad [2-28]$$

$$V_s = \frac{S}{t} \quad [2-29]$$

gde je:

- t_c – vreme putovanja vozila pokretnog osmatrača u smeru posmatranog toka na posmatranom odseku, (s),

- t_a – vreme putovanja vozila pokretnog osmatrača u suprotnom smeru posmatranog toka na tretiranom odseku, (s),
- x – broj vozila koja se sreću od strane vozila pokretnog osmatrača pri vožnji suprotnim smerom u odnosu na posmatrani tok na tretiranom odseku,
- y – razlika između broja vozila koja su pretekla pokretnog osmatrača i koje je pretekao pokretni osmatrač vozeći u smeru posmatranog toka na tretiranom odseku,
- l – dužina posmatranog odseka, (m).

e) Utvrđivanje srednje prostorne brzine saobraćajnog toka na bazi kvazi-lokalnog merenja

Sprovodi se tako što se na posmatranom putu odredi merni odsek dužine (ΔS) na čijem su početku i kraju instalirani uređaji za utvrđivanje vremena prolaska vozila preko mernog odseka. Utvrđena dužina odseka ΔS je jednaka za sva vozila, a vremena putovanja Δt_i pojedinih vozila mogu biti različita, tako da se za određeni tok može utvrditi srednja vrednost vremena putovanja vozila $\bar{\Delta t}$. Na bazi određene vrednosti ΔS i utvrđene srednje vrednosti vremena $\bar{\Delta t}$, srednja prostorna brzina saobraćajnog toka na posmatranoj deonici dobija se na osnovu relacije:

$$V_s = \frac{\Delta S}{\bar{\Delta t}} \quad [2-30]$$

$$\bar{\Delta t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad [2-31]$$

f) Utvrđivanje srednje prostorne brzine saobraćajnog toka na bazi kvazi-trenutnog merenja

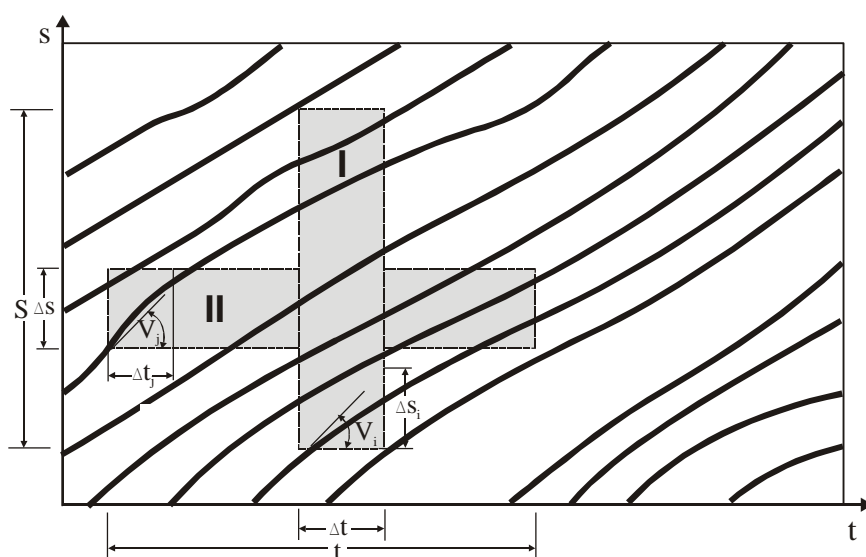
Utvrđuju se na bazi snimanja saobraćajnog toka na posmatranom odseku u tačno određenim vremenskim intervalima Δt . S obzirom da se vozila na posmatranom odseku puta kreću različitom brzinom to za isto vreme Δt pređu različita rastojanja ΔS_i .

Ako se naprave dva snimka u intervalu Δt , moguće je za sva vozila koja su se našla na posmatranom odseku utvrditi pređeni put ΔS_i , a takođe i srednja vrednost $\bar{\Delta S}$.

Na bazi ovako dobijenih podataka može se izračunati srednja prostorna brzina saobraćajnog toka na posmatranom odseku pomoću sledeće relacije:

$$V_s = \frac{\Delta \bar{S}}{\Delta t} \quad [2-32]$$

$$\Delta \bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta s_i \quad [2-33]$$



Slika 2-10. Utvrđivanje srednje prostorne brzine saobraćajnog toka na bazi kvazi-lokalnog (I) i kvazi-trenutnog merenja (II)

2.4. VREME PUTOVANJA

Sa praktičnog aspekta vreme putovanja, kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka, predstavlja srednju vrednost vremena putovanja svih vozila posmatranog saobraćajnog toka u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice preko posmatranog odseka puta. Ovo se može iskazati kroz sledeću relaciju:

$$\bar{t} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q t_i \quad [2-34]$$

gde je:

- \bar{t} – srednja vrednost vremena putovanja svih vozila u određenom saobraćajnom toku (q) preko posmatranog odseka puta,
- t_i – vreme putovanja pojedinih vozila u određenom saobraćajnom toku (q) preko posmatranog odseka puta,
- q – posmatrani saobraćajni tok na posmatranom odseku puta.

Osnovni simbol za iskazivanje vremena putovanja je (t). Osnovna jedinica za iskazivanje vremena putovanja saobraćajnog toka je *minuta*, a takođe se koriste *sekunda* i *čas*.

Sa teorijskog aspekta, tj. sa aspekta teorije saobraćajnog toka, vreme putovanja kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka predstavlja srednju vrednost putovanja svih jednakih vozničkih jedinica u jednoniznom jednosmernom toku duž odseka (S). Podrazumeva se da za upravljačima jednakih vozničkih jedinica (najpribližnijih PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

U uslovima realnog saobraćajnog toka vreme putovanja predstavlja zbir prosečnog vremena vožnje i prosečnih vremenskih gubitaka, odnosno zastoja koji se javljaju na posmatranom dseku puta:

$$\bar{t} = \bar{t}_v + \bar{d} \quad [2-35]$$

gde je:

- \bar{t} – srednja vrednost vremena putovanja svih vozila u određenom saobraćajnom toku (q) preko posmatranog odseka puta,
- \bar{t}_v – vreme vožnje preko posmatranog odseka puta,
- \bar{d} – ukupni vremenski gubici, odnosno ukupni vremenski zastoje na posmatranom odseku.

Vreme vožnje na posmatranom odseku je reprezent uticaja putnih i saobraćajnih karakteristika posmatrane deonice. Sa druge strane prosečan zastoje je reprezent uticaja ometanja koje se javlja u saobraćajnom toku prilikom putovanja vozila posmatranom deonicom.

Vremenski zastoje karakteristični su za povremeno prekinute saobraćajne tokove i složene uslove saobraćajnog toka, odnosno za deonice puteva na kojima postoje raskrsnice.

Procedura proračuna vremenskih gubitaka je veoma složena i zavisna od načina regulisanja saobraćaja, jer je procedura proračuna različita na prioritetnim raskrsnicama u odnosu na raskrsnice na kojima je saobraćaj regulisan semaforima. Pored toga, na veličinu zastoja utiču i oblik i geomstrijske karakteristike raskrsnice vrste manevra za koji se proračun radi i mnogih drugih faktora.

2.5. JEDINIČNO VREME PUTOVANJA

Sa praktičnog aspekta jedinično vreme putovanja, kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka, predstavlja srednju vrednost vremena svih vozila posmatranog saobraćajnog toka koje je potrebno da se pređe jedinica rastojanja, tj. 1-kilometar u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice posmatranog odseka puta. Ovo se može iskazati kroz sledeću relaciju:

$$\bar{t}_m = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q t_{m_i} \quad [2-36]$$

$$\bar{t}_m = \frac{\bar{t}}{s} \quad [2-37]$$

gde je:

- \bar{t}_m – srednja vrednost jediničnog vremena putovanja (t_{m_i}) svih vozila u posmatranom saobraćajnom toku (q) preko posmatranog odseka puta (S),
- t_{m_i} – jedinično vreme putovanja pojedinih vozila u posmatranom saobraćajnom toku (q) preko posmatranog odseka puta (S),
- q – posmatrani saobraćajni tok na posmatranom odseku puta (S),
- \bar{t} – srednja vrednost vremena putovanja toka (q),
- s – dužina odseka u kilometrima.

Osnovni simbol za iskazivanje jediničnog vremena putovanja saobraćajnog toka je (t_{m_i}). Osnovna jedinica za iskazivanje jediničnog vremena putovanja saobraćajnog toka je (min/km), a nisu isključene ni druge jedinice kao (s/m) itd.

Sa teorijskog aspekta, tj. sa aspekta teorije saobraćajnog toka, jedinično vreme putovanja kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka predstavlja srednju vrednost vremena putovanja svih jednakih voznih jedinica, u jednom nizu jednosmernog toka, koji je potreban da se pređe jedinica rastojanja. Podrazumeva se da za upravljačima jednakih voznih jedinica (najpribližnijih PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

2.6. INTERVAL SLEĐENJA VOZILA

Sa praktičnog aspekta interval sleđenja vozila, kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka, predstavlja vreme između prolaska čela dva uzastopna vozila, u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice, kroz zamišljeni presek posmatranog odseka puta.

Sa gledišta realnih saobraćajnih tokova, zavisno od načina posmatranja toka u odnosu na prostor i vreme razlikujemo:

- a) Intervale sleđenja (t_{hi}) pojedinačno za (N) vozila koja u periodu vremena (T) prođu posmatrani presek (odseka ili deonice) puta;
- b) Srednju vrednost intervala sleđenja (t_h) na posmatranom preseku puta za (N) vozila u vremenu (T):

$$\bar{t}_h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{hi} \quad [2-38]$$

Sa aspekta teorije saobraćajnog toka, interval sleđenja kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka predstavlja vreme prolaska čela dve uzastopne jednake vozne jedinice u jednom nizu jednosmernog toka kroz posmatrani poprečni presek puta. Podrazumeva se da za upravljačima jednakih vozničkih jedinica (najpribližnijih PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

Osnovni simbol za iskazivanje jediničnog vremena putovanja saobraćajnog toka je (t_h). Osnovne jedinice za iskazivanje intervala sleđenja vozila su sekunde (s).

Interval sleđenja vozila ima veliki značaj za opisivanje uslova saobraćaja na putevima, i u inženjerskoj praksi kao jedan od repernih indikatora kvaliteta saobraćajnog toka.

2.6.1. KRITIČNI INTERVAL SLEĐENJA VOZILA

Prilikom proračuna kapaciteta raskrsnica jedan od parametara saobraćajnog toka koji u najvećoj meri utiče na kapacitet i nivo usluge je kritični interval sleđenja (*critical gap*) vozila. U teoriji saobraćajnog toka, kritični vremenski interval sleđenja definiše se kao minimalno potrebna veličina intervala sleđenja u glavnom toku koja omogućava jednom vozilu iz sporednog toka prolazak kroz

središte raskrsnice. Vozači koji sa svojim vozilima vrše sporedni manevar (npr. skeću levo sa sporednog prilaza na kome je postavljen saobraćajni znak II-2 („Obavezno zaustavljanje – STOP“) koriste svaki interval sleđenja koji je jednak ili veći od krigičnog da izvrše prolazak kroz središte raskrsnice. Kritični interval sleđenja obeležava se sa t_c ili t_g . Veličinom kritičnog intervala sleđenja bavili su se mnogi naučnici i utvrdili da on zavisi od mnogih faktora, kao što su vrsta i karakter sporednog manevra, veličina toka na glavnom prilazu, broj saobraćajnih traga, uzdužni nagib itd. U sledećoj tabeli date su vrednosti kritičnog intervala sleđenja prema metodu HCM-2000⁴.

Tabela 2.1. Preporuke za kritični interval sleđenja prema HCM-2000.

MANEVAR VOZILA	KRITIČNI INTERVAL SLEĐENJA t_c	
	dvotračna napojna deonica	čtvorotračna napojna deonica
LEVO sa glavnog prilaza	4,1	4,1
DESNO sa sporednog prilaza	6,2	6,9
PRAVO sa sporednog prilaza	6,5	6,5
LEVO sa sporednog prilaza	7,1	7,5

2.6.2. VREME SLEĐENJA VOZILA U SPOREDNOM TOKU

Vreme sleđenja vozila u sporednom toku ili vreme kašnjenja u startu vozila na sporednom prilazu (*follow-up time*), definiše se kao vreme koje protekne od momenta kada prvo vozilo iz reda čekanja sa sporednog prilaza pređe zaustavnu liniju i uđe u središte raskrsnice do momenta kada sledeće vozilo pređe zaustavnu liniju i uđe u središte raskrsnice. Prema tome, vreme sleđenja u sporednom toku ili vreme kašnjenja u startu, predstavlja period između dva uzastopna ulaska vozila u središte raskrsnice iz reda čekanja, a sastoji se od:

- vremena kretanja u redu čekanja i zauzimanja čeonice pozicije
- vremena osmatranja saobraćajne situacije i donošenja odluke od strane vozača o nastavku kretanja kroz skredišete raskrsnice do starka

⁴ HIGHWAY CAPACITY MANUAL, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. 2000.

Ovaj parametar obeležava se sa t_f i njegova veličina značajno utiče na kapacitet prioritetnih raskrsnica. Što je sporedni manevar komplikovaniji, to je vreme osmatranja i donošenja odluke od strane vozača duže, pa je i vremenski interval sleđenja, odnosno kašnjenja u startu, veće. Kao i za kritični interval sleđenja postoje razne preporuke o veličini ovog parametra. U sledećoj tabeli date su vrednosti ovog parametra prema preporukama HCM-2000.

Tabela 2.2. Preporuke za interval sleđenja u sporednom toku prema HCM-2000.

Manevar vozila	Vreme sleđenja t_f [s]
Levo sa glavnog prilaza	2,2
Desno sa sprednog prilaza	3,3
Pravo sa sporednog prilaza	4,0
Levo sa sporednog prilaza	3,5

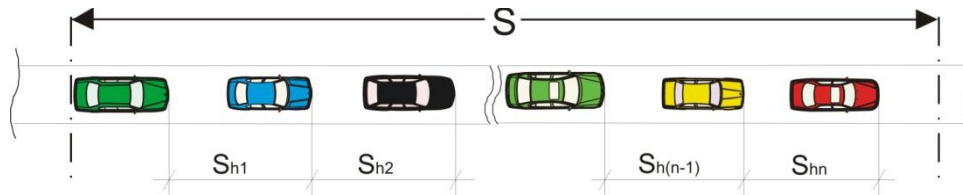
2.7. RASTOJANJE SLEĐENJA VOZILA

Sa praktičnog aspekta rastojanje sleđenja vozila, kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka, predstavlja prostorni razmak između čela dva uzastopna vozila u saobraćajnom toku u jednom smeru za jednosmerne saobraćajnice, odnosno u oba smera za dvosmerne saobraćajnice.

Osnovni simbol za iskazivanje rastojanja sleđenja je (S_h). Osnovna jedinica u kojoj se iskazuje rastojanja sleđenja je metar (m).

Sa gledišta realnih saobraćajnih tokova na odseku puta zavisno od načina posmatranja toka u odnosu na prostor i vreme razlikujemo:

- Pojedinačna rastojanja između uzastopnih vozila u saobraćajnom toku (S_{hi}) koja su se našla u određenom trenutku na posmatranom odseku (s);
- Srednja vrednost trenutnih rastojanja između svih vozila u saobraćajnom toku (\bar{S}_h) koja su se našla u određenom trenutku na posmatranom odseku ili deonici puta (S).



Slika 2-11. Rastojanje sleđenja između vozila u saobraćajnom toku (S_{hi}) u određenom trenutku na odseku (s)

Rastojanje sleđenja kao osnovni parametar saobraćajnog toka pogodan je za dublje razumevanje i opisivanje interakcijskih odnosa vozila u saobraćajnom toku, za prost tok ili za pojedine nizove u okviru složenog toka. Značaj ovog parametra posebno se ogleda u definisanju matematskih modela za opisivanje saobraćajnih tokova.

Sa teorijskog aspekta, tj. sa aspekta teorije saobraćajnog toka, rastojanje sleđenja kao pokazatelj-parametar saobraćajnog toka predstavlja prostorni razmak između čela uzastopnih jednakih vozničkih jedinica u jednom nizu koja se kreću u jednom smeru. Podrazumeva se da za upravljačima jednakih vozničkih jedinica (najpribližnijih PA) sede vozači jednakih psihofizičkih karakteristika koji u svakom trenutku jednako reaguju u vožnji.

2.7.1. RASTOJANJE

U stručnoj terminologiji za dužinu odseka (s) često se kratko kaže rastojanje, što treba razlikovati od rastojanja sleđenja vozila. Preciznije, rastojanje u teoriji saobraćajnog toka predstavlja dužinu odseka na kome se razmatraju uslovi kretanja motornih vozila, odnosno saobraćajnih tokova na mreži drumskih saobraćajnica.

Odsek je deo puta sa homogenim tehničko-eksploatacionim karakteristikama. Odsek je po pravilu manji od saobraćajne deonice, ili jednak sa saobraćajnom deonicom. Odsek puta može biti za jednosmerne saobraćajne tokove sa jednom ili više saobraćajnih traka, kao i za dvosmerni saobraćaj sa 2 ili više saobraćajnih traka. Odsek pravog puta bez uspona sa savremenim ravnim kolovozom dovoljne širine za kretanje jednog niza vozila u jednom smeru odgovara idealnim putnim uslovima. Ako se na ovakvom odseku kreće jednonizni jednosmerni tok putničkih vozila za te uslove se kaže da su praktično idealni uslovi.

Osnovna jedinica za iskazivanje rastojanja u teoriji saobraćajnog toka jeste metar. Nije isključena i veća jedinica tj. kilometar. Osnovni simbol za obeležavanje rastojanja jeste (S), a često se koriste i simboli (L) i (d).