



PD 9538



003078833

COBISS #

**UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Mr Ing MIHAILO MALETIN**

**PRILOG METODOLOGIJI VREDNOVANJA  
IDEJNIH PROJEKATA AUTOPUTEVA  
SA STANOVIŠTA PROPUSNE MOĆI  
I NIVOVA USLUGE**

**.doktorska disertacija.**

**BEOGRAD — 1982.**



PD 9538

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRADJEVINSKI FAKULTET

Mr Ing MIHAILO MALETIN

PRILOG METODOLOGIJI VREDNOVANJA  
IDEJNIH PROJEKATA AUTOPUTEVA  
SA STANOVIŠTA PROPUSNE MOĆI  
I NIVOA USLUGE

.doktorska disertacija.

BEOGRAD - 1982.

48833



## SADRŽAJ

UVOD	3
1. OSNOVNE POSTAVKE	6
1.1 METOD MONTE KARLO	7
1.2 SIMULACIJA	9
1.3 SLUČAJNI BROJEVI	10
1.4 KIBERNETIČKI SISTEM VOZAČ-VOZILO-OKOLINA	12
1.5 MODELI VOŽNJE	15
2. ELEMENTI	19
2.1 VOZAČ	19
2.1.1 Vreme reakcije	20
2.1.2 Slobodna vožnja	22
2.1.3 Vožnja u koloni	25
2.2 VOZILO	37
2.2.1 Modelsko putničko vozilo (PA)	37
2.2.2 Modelsko teretno vozilo (TV)	40
2.2.3 Modelsko teško teretno vozilo (TTV)	43
2.3 VOZAČ-VOZILO	46
2.3.1 Medjuzavisnosti vozač-vozilo PA	47
2.3.2 Medjuzavisnosti vozač-vozilo TV	58
2.3.3 Medjuzavisnosti vozač-vozilo TTV	62
2.4 OKOLINA	66
2.4.1 Projektni elementi	67
2.4.2 Zakonitosti saobraćajnog toka	75
2.4.3 Struktura saobraćajnog toka	80
2.4.4 Kretanje vozila	82
2.4.5 Promena saobraćajne trake	89



3. PROCES SIMULACIJE I REZULTATI PRIMENE	94
3.1 OSNOVE	94
3.1.1 Vreme-prostor	94
3.1.2 Parametri ulaznog saobraćajnog toka	98
3.1.3 Postupci i ulazni podaci	105
3.2 PROGRAMSKI SISTEM	111
3.2.1 Vodjenje podataka	111
3.2.2 Struktura programa	112
3.2.3 Izlazni rezultati	115
3.3 REZULTATI PRIMENE	120
3.3.1 Saobraćajno opterećenje i struktura saobraćajnog toka	120
3.3.2 Uticaj podužnog nagiba	127
3.3.3 Parametri vrednovanja varijantnih rešenja	143
4. ZAKLJUČAK	154
5. LITERATURA	156

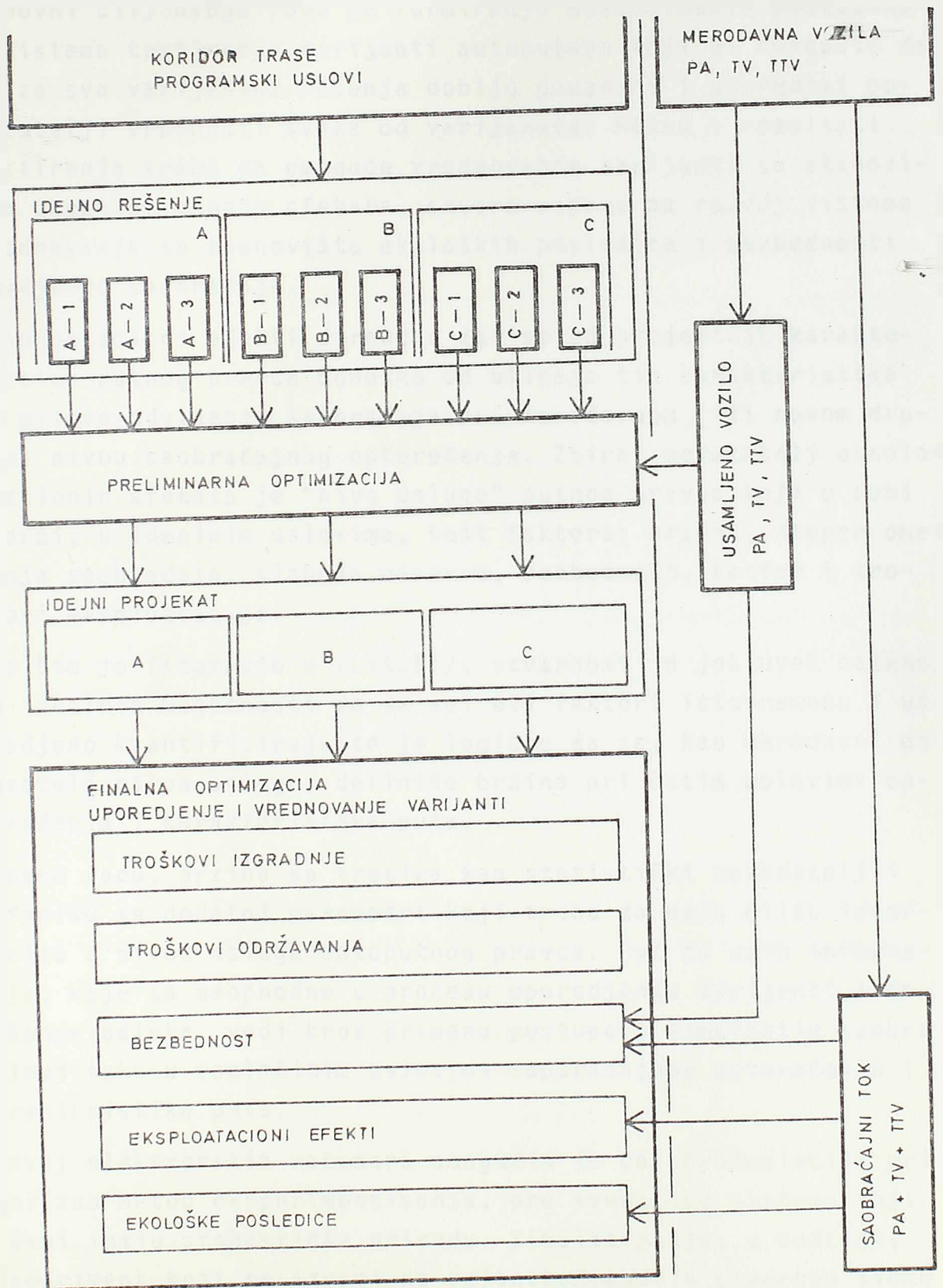
## UVOD

Projektovanje puteva je iterativni proces optimizacije po nizu kriterijuma. Osnovna projektantska faza je izrada idejnog projekta puta u kojoj se, na osnovu definisanog koridora i programskih uslova iz generalnog projekta, proveravaju fizičke mogućnosti izgradnje varijanata i odredjuju posledice sa stanovišta društveno-ekonomskih, ekoloških, tehničkih i estetskih zahteva. Izrada idejnog projekta sastoji se iz dve faze: u prvoj fazi se vrši provera varijanata sa stanovišta geometrije, vozne dinamike i optike trase, a u drugoj fazi se vrši analiza saobraćajno-ekonomskih, gradjevinsko-tehničkih i ekoloških pokazatelja.

Navedene faze izrade idejnog projekta imaju suštinski različite zadatke te stoga zasnivaju na bitno različitim nivoima analize. U prvoj fazi (preliminarna optimizacija) vrše se vozno-dinamičke analize pri ekstremnom slučaju usamljenog vozila na projektovanom putu sa ciljem da se trasa puta prilagodi zahtevima sigurne i udobne vožnje.

Druga faza izrade idejnog projekta podrazumeva formiranje pouzdanih i uporedivih parametara za vrednovanje varijanata sa širih stanovišta ukupnih troškova i efekata putnog pravca. Stoga se pokazatelji moraju definisati za merodavno saobraćajno opterećenje i na osnovu toga odrediti efekte izgradnje svake od varijanata.

Ključni koraci u procesu projektovanja puteva su donošenje odluka i u tim fazama je neophodno "racionalno i dokumentovano odlučivanje zasnovano na kvalitativnom vrednovanju numeričkih pokazatelja alternativnih rešenja koje mora zameniti intuitivno odlučivanje. Za intuiciju ima dovoljno prostora u procesu grafičkog projektovanja; vrednovanje je kreativni proces koji zasniva na analizi i sintezi. Intuitivno donesene odluke ne daju trajnije pozitivne efekte, vrlo često ih razvoj događaja na putnoj mreži brzo demantuje kada je, obično, već akumuliran niz negativnih efekata" /Lit.3/.



Šematski prikaz procesa izrade idejnog projekta puta



Osnovni cilj ovoga rada je formiranje metodoloških postupaka i sistema testiranja varijanti autoputeva koji bi omogućio da se za sva varijantna rešenja dobiju pouzdani i uporedivi pokazatelji vrednosti svake od varijanata. Metod i rezultati testiranja treba da omoguće vrednovanje varijanti sa stanovišta eksploatacionih efekata, stvore osnovu za razvoj sistema vrednovanja sa stanovišta ekoloških posledica i bezbednosti odvijanja saobraćaja.

Eksploatacioni efekti direktno zavise od projektnih karakteristika putnog pravca odnosno od uticaja tih karakteristika na uslove odvijanja saobraćaja pri merodavnom (ili nekom drugom) nivou saobraćajnog opterećenja. Zbirni pokazatelj eksploatacionih efekata je "nivo usluge" putnog pravca koji u sebi sadrži, u idealnim uslovima, šest faktora: brzina, stepen ometanja saobraćaja, sloboda manevra, bezbednost, komfor i troškovi eksploatacije.

Kao što je istaknuto u /Lit.51/, stvarnost je još uvek daleko od idealnih mogućnosti da se svi ovi faktori istovremeno i uskladjeno kvantificiraju te je logično da se, kao merodavni pokazatelj nivoa usluge, definiše brzina pri datim uslovima opterećenja i karakteristika puta.

U ovom radu, brzina se tretira kao statistički pokazatelj i definišu se dodatni parametri koji treba da daju bližu informaciju o nivou usluge autoputnog pravca. Put do ovih informacija, koje su neophodne u procesu uporedjenja varijanti i donošenja odluka, vodi kroz primenu postupaka simulacije saobraćajnog toka u različitim uslovima saobraćajnog opterećenja i karakteristika puta.

Razvoj elektronskih računara omogućio je da se simulacija primeni kao metod eksperimentisanja, pre svega kod sistema koji u sebi imaju stohastičku prirodu. Simulacija je, u suštini, eksperiment koji se izvodi na veštačkom modelu stvarnog sistema /Lit.61/. Za primenu simulacije saobraćajnog toka postoji niz razloga od kojih, kao najbitnije, treba izdvojiti:

- Potreba da se ispita odredjeni sistem pre njegove realizaci-

je; izgradnja novog sistema zahteva velika materijalna sredstva i/ili duži period vremena.

- Eksperimentisanje sa stvarnim sistemom je veoma skupo, uključuje i određene rizike (npr. saobraćajne nesreće), veoma je teško ponoviti identičnu situaciju u dva vremenska preseka, mnogi saobraćajni odnosi neće se ni javiti u sistemu tokom ispitivanja iako je neophodno da se ispituju.
- Neophodnost testiranja alternativnih sistema pri identičnim uslovima; u realnosti je nemoguće da se potpuno tačno reprodukuju specifični odnosi u saobraćaju dok je u procesu simulacije potpuno uobičajeno da se identični saobraćajni uslovi ponove na više alternativnih projektnih rešenja.

## 1. OSNOVNE POSTAVKE

Veoma često uspostavljanje zakonitosti određenih pojava rezultuje u nizu jednačina koje nije moguće rešiti klasičnim matematičkim pristupom. U takvim situacijama po pravilu je efikasnije konstruisati analogni stohastički model problema tako da je proces proračuna potpuno numerički i sprovodi se uvođenjem slučajnih brojeva u sistem i odgovarajućim numeričkim postupkom dobijaju se rešenja,

Zakonitosti kretanja vozila pri, određenim uslovima okoline i karakteristikama učesnika u saobraćaju, mogu se definisati na osnovu dva vida pristupa:

- makroskopski - zasniva na posmatranju saobraćajnog toka kao celine što posledično zahteva određene pretpostavke o uniformnosti svih učesnika u saobraćaju. U ovakvom pristupu teoretske mogućnosti leže u analogiji saobraćajnog toka sa drugim vrstama tokova (npr. hidrodinamička pretpostavka)
- mikroskopski - zasniva na posmatranju kretanja svakog učesnika u saobraćaju. Zbir rezultata posmatranja pojedinačnih elemenata toka daje osnovu za uspostavljanje zakonitosti za celoviti saobraćajni tok pri datim uslovima.

Nema sumnje da mikroskopski pristup analizi saobraćajnog toka

daje mogućnosti da se uvede niz uticajnih parametara koji ističu realnu činjenicu da je po pravilu saobraćajni tok nehomogen iako je, u odredjenim uslovima, (npr. zasićen tok) pretpostavka o homogenosti toka bliska stvarnim odnosima.

S druge strane, mikroskopski pristup otvara mogućnost da se formira analogni stohastički model u kome će se pojedinačna vozila kretati u prostoru i vremenu tako da njihovo kretanje odgovara stvarnim situacijama na putnom pravcu. Budući da se u takvom postupku mora obaviti veoma veliki broj numeričkih operacija očigledno da je to jedino moguće primenom digitalnih računara.

### 1.1 METOD MONTE KARLO

Jedan od prvih metoda koji je primenio princip analognog stohastičkog modela je metod Monte Karlo čiji nastanak, iako su osnove bile poznate od ranije, treba vezivati za 1950 god. tj. početak šire primene računara. Ova metoda je u suštini numerička metoda kojom se, modeliranjem slučajnih promenljivih, rešavaju različiti matematički zadaci.

Princip je u svojoj biti jednostavan i može se ilustrovati klasičnim primerom proračuna odredjenog integrala (sl.1.)

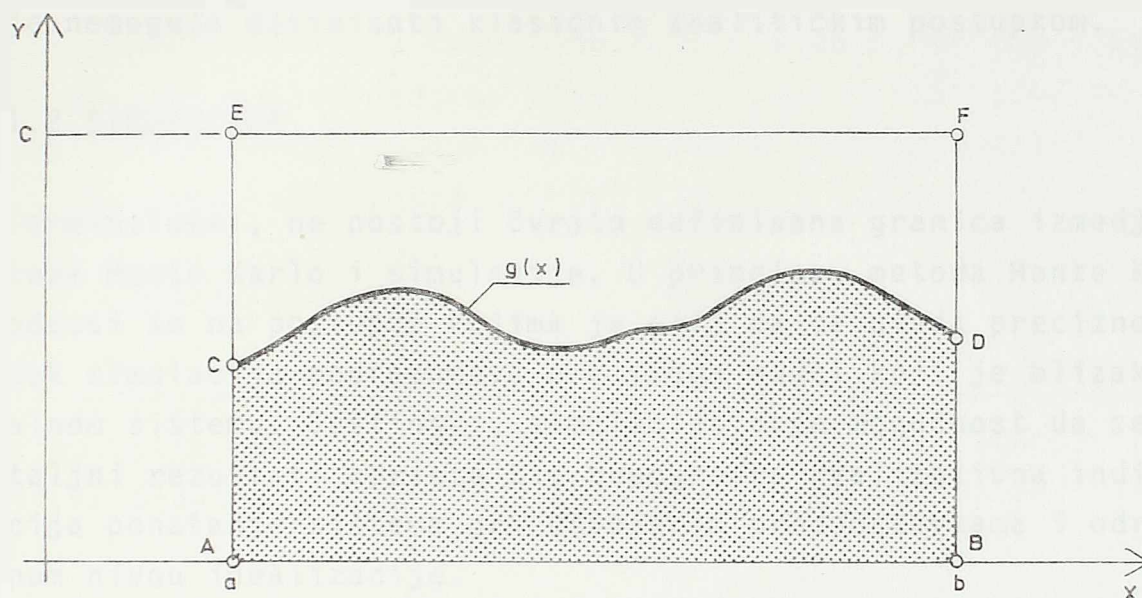
Ovaj primer nije slučajan, naime, u velikom broju zadataka primenom metode Monte Karlo treba izračunati matematička očekivanja slučajnih veličina koja su najčešće odredjeni integrali. Budući da se izračunavanje odredjenih integrala može svesti na odredjivanje površine, izneti primer na sl. 1 služi kao osnova za sledeći postupak.

Ako je zadatak da se približno odredi:

$$I = \int_a^b g(x).dx$$

i da je  $0 \leq g(x) \leq c$  i tačka  $(X,Y)$ , slučajna tačka u pravougaoniku  $ABEF = \left\{ (x,y) : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq c \right\}$ . Sledi da je gustina raspodele verovatnoće  $f(x,y)$  jednaka:

$$f(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{c(b-a)} & \text{za } (x,y) \in ABEF \\ 0 & \text{za } (x,y) \notin ABEF \end{cases}$$



sl.1.

Izračunavanje određenog integrala primenom metoda Monte Karlo

Odredjeni broj ( $N$ ) slučajnih tačaka koje pripadaju pravougao-  
niku ABEF sa odgovarajućim koordinatama  $(x_1, y_1)(x_2, y_2) \dots$   
 $(x_n, y_n)$  može se dobiti pomoću slučajne promenljive SB preko  
koordinata slučajne tačke  $(X, Y)$  kao:

$$X = a + SB(b-a) \quad \text{i} \quad Y = SB \cdot c$$

U skladu sa sl.1, sledi da, ako se  $N_1$  tačaka nalazi ispod kri-  
ve  $g(x)$  odnos površina može biti:

$$ABCD:ABEF = N_1:N \quad \text{ili:} \quad \int_a^b \frac{g(x)dx}{c(b-a)} = \frac{N_1}{N}$$

Iz prethodnog izraza može se približno izračunati određeni in-  
tegral. Ovaj pristup može se primeniti na višedimenzionalne in-  
tegrale i tačnost je proporcionalna  $n^{1/d}$  gde je  $n$  - broj slu-  
čajnih tačaka a  $d$  - broj dimenzija.

Drugim rečima, metoda zasniva na slučajnom uzorku svih tačaka koje pripadaju odredjenom prostoru i na osnovu karakteristika tog uzorka definiše se ukupna populacija. Ovaj relativno jednostavan koncept je otvorio, zajedno sa razvojem digitalnih računara, velike mogućnosti da se analiziraju zakonitosti koje je nemoguće definisati klasičnim analitičkim postupkom.

## 1.2 SIMULACIJA

Terminološki, ne postoji čvrsto definisana granica između metode Monte Karlo i simulacije. U principu, metoda Monte Karlo odnosi se na postupke kojima je cilj da se uveća preciznost dok simulacija podrazumeva pre svega model koji je blizak realnom sistemu. Suštinski, simulacija daje mogućnost da se detaljni rezultati koriste kao neposredna kvalitativna indikacija ponašanja sistema pri usvojenim prepostavkama i odredjenom nivou idealizacije.

Razvoj metoda simulacije svakako da zasniva na metodi Monte Karlo, međutim, još jedan faktor je bitno uticao u tom pogledu - razvoj matematičke statistike. U samom početku, statistika je korišćena za prikupljanje i prikazivanje podataka u numeričkom i/ili grafičkom obliku i najbitnija transformacija statistike je započeta onog trenutka kada je zapaženo da se raspodela opažanja može objasniti primenom teorije verovatnoće.

Naime, dok se raspodela verovatnoća odnosi na beskonačni broj elemenata dotle se raspodela opažanja, po svojoj prirodi, uvek odnosi na konačni broj vrednosti. Drugim rečima, može se smatrati da je histogram u suštini uzorak odredjene teorijske raspodele verovatnoća.

Nije teško uočiti da postoje situacije u kojima je praktično nemoguće uzeti stvaran uzorak ili je to isuviše skupo. Jedna od takvih situacija je i saobraćajni tok u kome je praktično nemoguće uzeti uzorak vozača i ispitati njihove karakteristike u trenutku odvijanja saobraćaja. U takvim situacijama, dragocene informacije se mogu prikupiti simuliranim uzimanjem uzorka.

U suštini, stvarnost se zamenjuje teorijskim zakonitostima i osnovna populacija je reprezentovana nekom pretpostavljenom raspodelom verovatnoća i iz takve teoretske populacije uzima se uzorak primenom slučajnih brojeva.

Ovaj postupak rezultuje u nizu obrada koje se podvrgavaju statističkim postupcima kao da se radi o stvarno uzetom uzorku.

U ovim postavkama procesa simulacije leži i razlog da se simulacija kao proces naziva još i "statističko-imitacioni model", "simulirano ispitivanje uzorka" i sl.

### 1.3 SLUČAJNI BROJEVI

Generisanje slučajnih brojeva je osnovni postupak u procesu simulacije. Ovaj problem je rešavan na nekoliko načina, počevši od elektronskog ruleta ili sličnih uređaja do definisanja niza metoda za generisanje tzv. "pseudoslučajnih brojeva". Zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti najčešće se primenjuje metod stepenog ostatka.

Dva broja A i B koji daju isti ostatak kada se podele sa C nazivaju se kongruentnim brojevima tj.

$$A = B \text{ mod } C$$

Imajući u vidu izneto, sledi da je:

$$\frac{|A - B|}{C} = D$$

gde D mora biti celobrojna. Ova činjenica omogućila je stvaranje algoritma za generisanje pseudoslučajnih brojeva prema:

$$R_m = pR_{m-1} \text{ Mod } b^n$$

gde je:

$R_m$  - slučajni broj m

p - konstanta

n - broj znakova u reči računara

b - brojna osnova računara

Mod  $b^n$  - komanda da se za slučajni broj koristi jedna polovina cifara proizvoda ( $2n$  cifara)

$R_{m-1}$  - slučajni broj m-1

$R_0$  - početni slučajni broj (za m = 0).

Za najveći broj računara već su razvijeni odgovarajući podprogrami koji generišu pseudoslučajne brojeve ravnomerne raspodele (0,1) sa različitim periodama pre ponavljanja (npr. za IBM 360 podprogram RANDU koji generiše  $2^{29}$  slučajnih brojeva pre ponavljanja). Budući da računar DEC-20 ima drugačije karakteristike ( $b = 2^{35}$ ,  $n = 11$ ) za potrebe ovog rada izradjen je podprogram SBRR koji generiše ravnomerno rasporedjene slučajne brojeve (0,1) sa periodom  $2^{33}$  doslednom primenom koncepcije podprograma RANDU.

Poseban značaj imaju i slučajni brojevi normalne raspodele kojima se može opisati najveći broj pojedinačnih karakteristika sistema. Na osnovu centralne granične teoreme /Lit.58/ prema kojoj zbir od (n) nezavisnih slučajnih promenljivih koje imaju različite raspodele teži normalnoj raspodeli kada (n) teži beskonačnosti, razvijen je niz podprograma za generisanje slučajnih brojeva normalne raspodele. U ovom radu primenjen je podprogram razvijen za IBM-360 prema /Lit.65/:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^k X_i - \frac{k}{2}}{\sqrt{k/12}}$$

gde je:

Y - slučajni broj približno normalne raspodele

$X_i$  - slučajni broj ravnomerne raspodele  $0 \leq X_i \leq 1$

k - broj primenjenih  $X_i$

Vrednost Y se asimptotski približava stvarnoj normalnoj raspodeli kako se (k) približava beskonačnosti. Kada se (k) usvoji  $k=12$  vreme trajanja podprograma se bitno skraćuje i:

$$Y = \sum_{i=1}^{12} X_i - 6,0$$

Potreban slučajni broj normalne raspodele dobija se prema:

$$Y' = Y \cdot \sigma + \mu$$

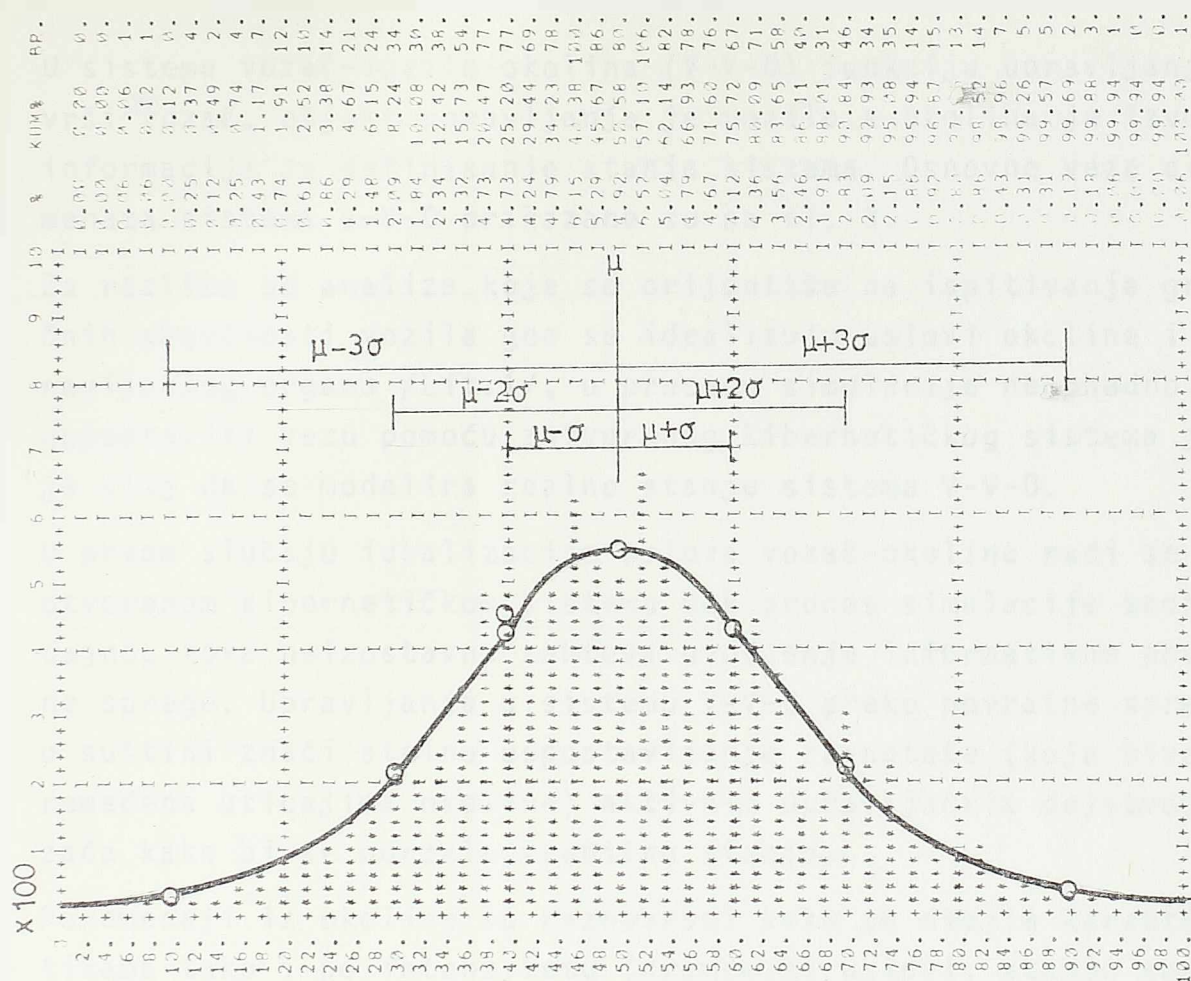
gde je:

Y' - slučajni broj normalne raspodele

$\sigma$  - željena standardna devijacija

$\mu$  - željena srednja vrednost

Primenom ovog podprograma generišu se slučajni brojevi normalneraspodele i primer je prikazan na sl. 2 za polazne vrednosti



BROJ PODATKA=1627. SPANJ. DEVIJACIJA= 14.47  
P15= 35.56 P50= 49.75 P85= 55.12

sl.2.

Raspodela slučajnih brojeva - podprogram SBNR

#### 1.4 KIBERNETIČKI SISTEM VOZAČ-VOZILO-OKOLINA

Zadatak simulacije saobraćajnog toka je da modelira realno kretanje saobraćaja na jednom putnom pravcu. U suštini, ovaj zadatak je moguć samo ako se modelira niz sistema vozač-vozilo-okolina u svakom vremenskom preseku postupka simulacije i na svakom elementu deonice puta. Stoga je neophodno razmotriti pojedinačne zakonitosti vozača, vozila i okoline i uspostaviti međuzakonitosti. Drugim rečima, ovaj postupak je stvaranje teorijskih osnova za opisivanje kretanja vozila iz čega će se, postupkom uzimanja uzorka, izvršiti obrada i analiza pokazatelja.



U sistemu vozač-vozilo-okolina (V-V-0) funkciju upravljanja vrši vozač, objekt upravljanja je vozilo a okolina je izvor informacija za definisanje stanja sistema. Osnovne veze elemenata sistema V-V-0 prikazane su na sl. 3.

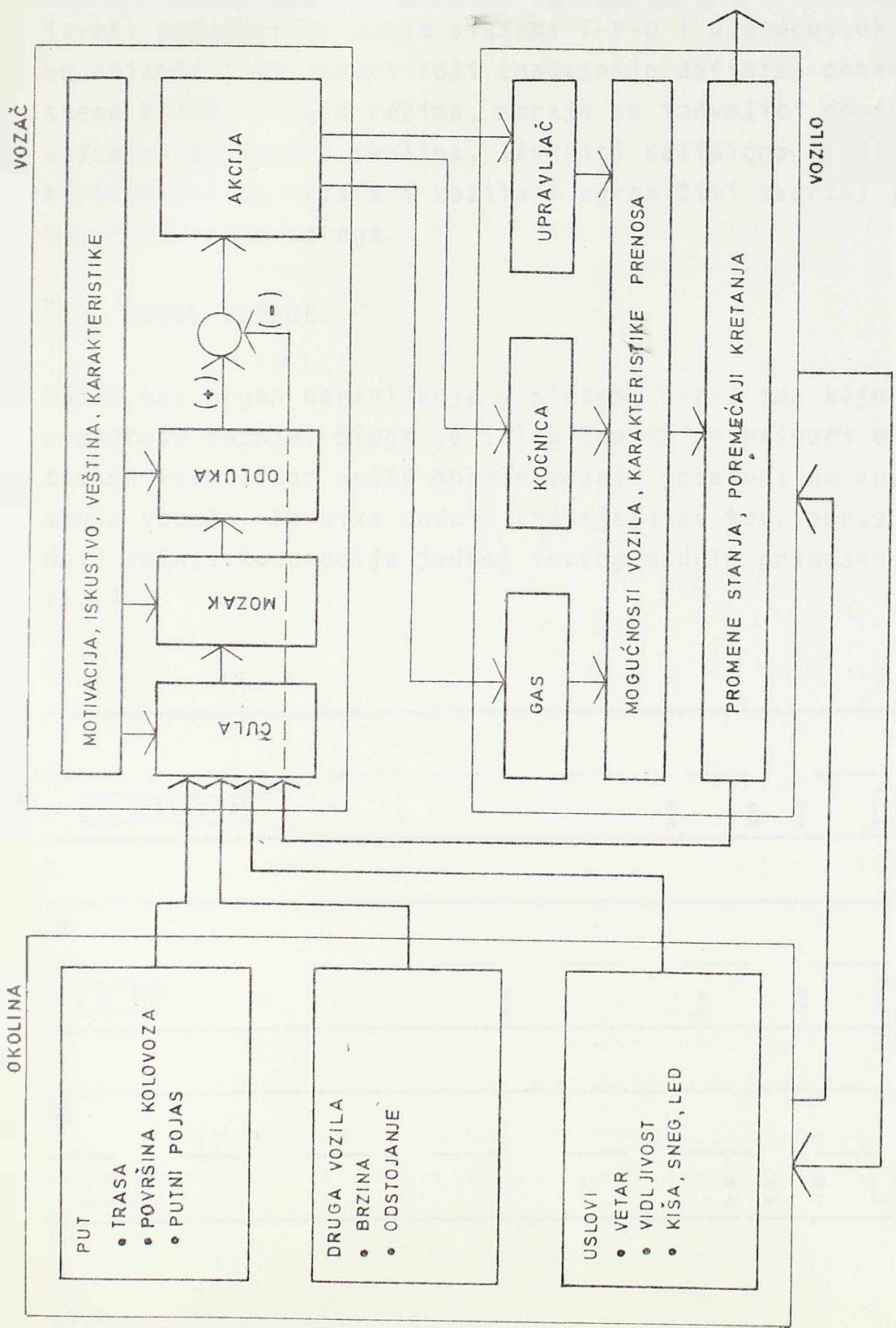
Za razliku od analiza koje se orijentišu na ispitivanje graničnih mogućnosti vozila gde se idealizuju uslovi okoline i upravljačkog organa /Lit.1/, u procesu simulacije neophodno je uspostaviti vezu pomoću zatvorenog kibernetičkog sistema jer je cilj da se modelira realno stanje sistema V-V-0.

U prvom slučaju idealizacije uslova vozač-okolina radi se o otvorenom kibernetičkom sistemu dok proces simulacije saobraćajnog toka neizostavno zahteva uvodjenje informativne povratne sprege. Upravljanje u sistemu V-V-0 preko povratne sprege u suštini znači stalno uspostavljanje ravnoteže (koja biva poremećena uticajima okoline) aktivnim upravljačkim dejstvom vozača kako bi se održalo stabilno stanje.

Poremećaji iz okoline su raznovrsni kako po svojim karakteristikama tako i po intenzitetu (vremenski uslovi, stanje saobraćajnog toka, struktura saobraćajnog toka, elementi puta u planu i profili i tsl.). S druge strane, potrebne informacije vozača na osnovu kojih bi vršio svoju upravljačku funkciju razlikuju se, i po obimu i po kvalitetu, u zavisnosti od vrste upravljačke akcije koju treba preduzeti (npr. kočiti, ubrzati, skrenuti levo ili desno, promeniti saobraćajnu traku, preticati i sl.).

Nema sumnje da vozač, kao element upravljanja sistema V-V-0 predstavlja najbitniju komponentu u procesu kretanja vozila. Medjutim, on je istovremeno i najveća nepoznata u sistemu, jer ne samo da se mnoštvo vozača razlikuje medjusobno po nekim karakteristikama već i isti vozač u različitim ili čak istim situacijama može različito reagovati.

Tipičan primer je reagovanje istog vozača na potpuno identičnu situaciju u uslovima kada je odmoran i kada je umoran ili pod dejstvom alkohola.

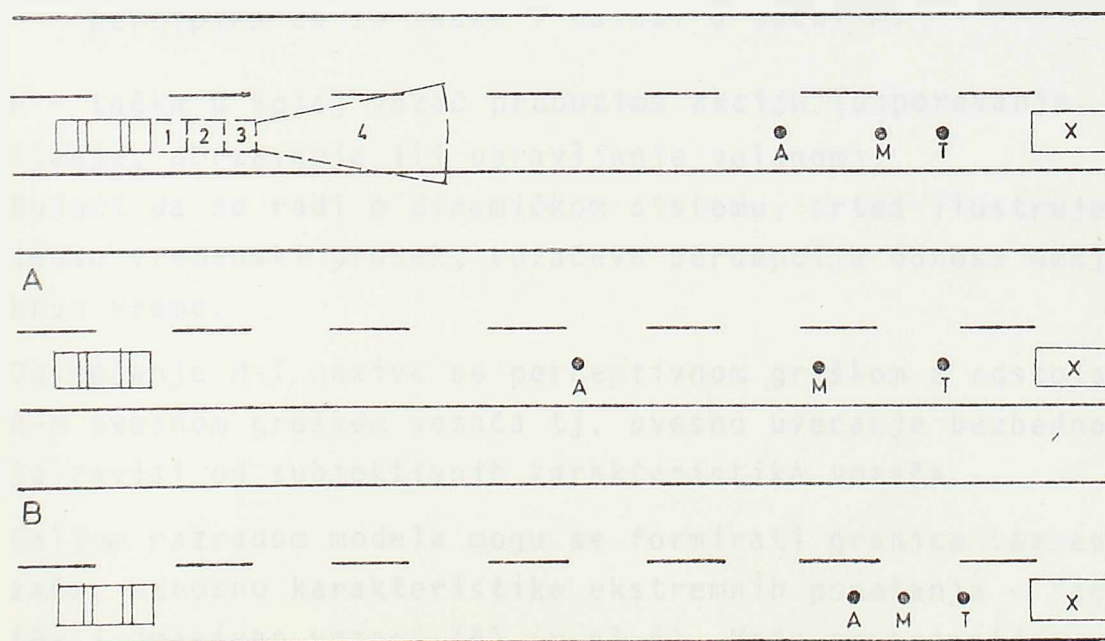


sl.3. Kibernetički sistem vozač-vozilo-okolina

Svi izneti stavovi opravdavaju da se za potrebe simulacije izvrši pojednostavljenje sistema V-V-0 i u proces uključe samo uticaji i parametri koji značajnije definišu ponašanje sistema V-V-0. Drugim rečima, moraju se izdvojiti dominantni uticajni parametri okoline, izvršiti delimično idealizovanje karakteristika vozača i vozila i ograničiti sadržaj informativne povratne sprege.

### 1.5 MODEL VOŽNJE

Vozač kao organ upravljanja u sistemu V-V-0 ima ključnu ulogu u procesu vožnje. Stoga je i logično da je najveći broj istraživača formulisao opšte modele vožnje polazeći od analize ponašanja vozača. Iz niza modela izdvajaju se tzv. perceptivni modeli vožnje. Konceptcija jednog takvog modela prikazana je na sl. 4.



sl.4.  
 Ilustrativni prikaz koncepcije perceptivnog modela vožnje

Osnovnu postavku čini postojanje tzv. "prihvaćene zone kretanja" koja se sastoji od 4 segmenta (v.sl.4):

1. Put koji vozilo predje za vreme percepcije vozača
2. Put koji vozilo predje za vreme koje je potrebno za donošenje odluke
3. Put koji vozilo predje za vreme procene i sprovođenja odluke
4. Zaustavni put vozila koji zavisi od brzine, stanja kočnica, trenja kolovoz-pneumatik i spremnosti vozača da prihvati određena usporavanja i podužni udar.

Ako se sa X označi prepreka (npr. zaustavljeno vozilo, vozilo koje usporava ili ubrzava, pešak, suženje puta, uliv, izliv i tsl.) po ovom modelu postoje tri područja, koja su zbog jednostavnosti prikazana kao tačke A,M,T koje reprezentuju:

T - tačka na kojoj mora početi kočenje da se izbegne sudar. Odstojanje T-X zavisi od karakteristika vozača (prihvaćena zona kretanja) i fizičkih zakona (kočenje).

M - tačka mentalne predstave položaja tačke T kod vozača tj. percipira da se tačka T nalazi u tački M.

A - tačka u kojoj vozač preduzima akciju (usporavanje, zaustavljanje, ubrzavanje ili upravljanje volanom).

Budući da se radi o dinamičkom sistemu, crtež ilustruje samo jedan vremenski presek, vozačeva percepcija odnosa menja se kroz vreme.

Odstojanje M-T naziva se perceptivnom greškom a odstojanje A-M svesnom greškom vozača tj. svesno uvećanje bezbednosti koje zavisi od subjektivnih karakteristika vozača.

Daljom razradom modela mogu se formirati granice bezbednih vozača, odnosno karakteristike ekstremnih ponašanja - "agresivan" (B) i "pasivan vozač" (A) (v.sl.4). Može se primetiti da tačka T u oba slučaja (A i B) relativno malo odstupa kao posledica razlika u dužini prihvaćene zone kretanja (dužine 1 - 4 na sl. 4). Najveća odstupanja se javljaju u dužinama A-X i M-X koje su isključivo zavisne od perceptivnih karakteristika vozača i njegovog psihološkog stava prema vožnji.

Kod najvećeg broja vozača u svim situacijama je ispunjen uslov bezbedne vožnje:

$$A-X > M-X > T-X \quad \text{odnosno} \quad A-M > 0 \quad \text{i} \quad M-T > 0$$

Bezbedna vožnja se takodje javlja i u uslovima negativne perceptivne grepke tj.

$$A-X > T-X > M-X \quad \text{odnosno} \quad A-M > 0 \quad \text{i} \quad M-T < 0$$

gde velika vrednost  $A-X$  kompenzira negativnu perceptivnu grešku. Uslov bezbedne vožnje je ispunjen ako je  $A-X > T-X$  odnosno ako se tačka preduzimanja akcije (A) nalazi ispred tačke (T) u kojoj se akcija mora preduzeti.

Po ovom modelu, saobraćajne nesreće nastaju u uslovima kada je:

$$T-X > A-X > M-X \quad \text{odnosno} \quad A-M < 0 \quad \text{i} \quad M-T < 0$$

Kao što je ranije naglašeno, osnovne karakteristike vozača manifestuju se kroz dužinu prihvaćene zone kretanja i zaustavni put vozila kao i dužine koje odgovaraju perceptivnoj greški ( $M-T$ ) i svesnoj greški ( $A-M$ ).

Drugi model reagovanja vozača u odredjenim situacijama /Lit. 11/ zasniva na promeni vizuelnog ugla  $\theta$  gde je, kod malih uglova,  $\text{tg } \theta = \frac{c}{x}$ .

$$\text{tg } \theta = \frac{c}{x} = \theta$$

U ovaj model se mora uključiti i brzina kretanja vozila kao osnovni pokazatelj:

$$x = \text{cotg } \theta \cdot c$$

diferenciranjem po vremenu ( $t$ ) dobija se:

$$\frac{dx}{dt} = c \cdot \text{cosec} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

odnosno:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v \cdot c}{c^2 + x^2}$$

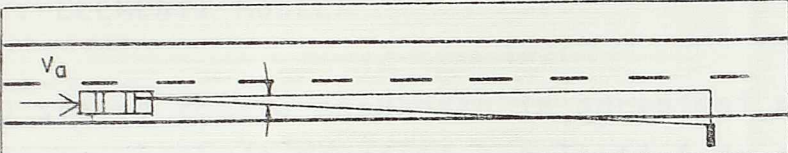
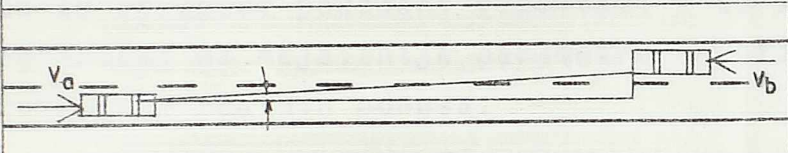
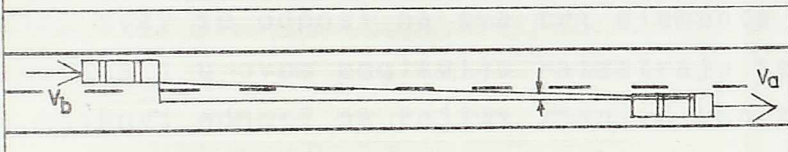
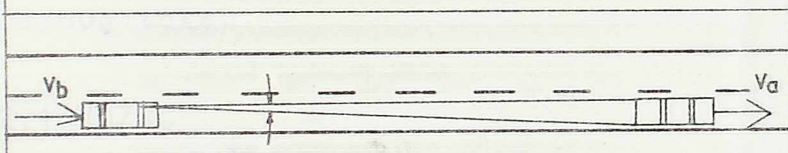
gde je:

$\frac{d\theta}{dt}$  - brzina promene vizuelnog ugla vozača

$v$  - brzina kretanja vozila

$c$  - širina prepreke, ili bočno odstojanje od prepreke

Zavisno od saobraćajne situacije vrednost brzine ( $v$ ) je različita kao što je prikazano na sl.5.

	BOČNA SMETNJA $V = V_a$
	VOZILO U SUPROTNOM SMERU $V = V_a + V_b$
	PROMENA $t_s$ $V = V_a - V_b$
	VOŽNJA U KOLONI $V = V_a - V_b$

sl.5.

Promena vizuelnog ugla kao osnovni parametar modela ponašanja vozača - merodavne brzine

Na prvi pogled različiti modeli u suštini imaju veoma mnogo dodirnih tačaka. Naime, postoji utvrđena zakonitost da svi vozači ne reaguju na iste vrednosti promene vizuelnog ugla i da postoje tzv. prazne vrednosti promene vizuelnog ugla /Lit. 66/ koje se kreću u rasponu od:

$$3 \cdot 10^{-4} \text{ [rad/sec]} < \frac{d\theta}{dt} < 10 \cdot 10^{-4} \text{ [rad/sec]}$$

Imajući u vidu da je širina ( $c$ ) obično daleko manja od odstojanja ( $x$ ) nema sumnje da oba modela mogu dati slične rezultate iako se razlikuju u vrsti nadržaja (odstojanje, ugao).

Nezavisno od prihvaćenog modela, očigledno da osnovnu zakonitost ponašanja vozača određuju brzina i odstojanje i svi parametri koji indirektno utiču na gornje vrednosti. Medjuzavisnosti brzina-odstojanje u suštini određuju i osnovne mikro-zakone saobraćajnog toka koje imaju direktnog uticaja na fundamentalni odnos gustina-brzina-protok.

## 2. ELEMENTI MODELA

U svakom modelu neophodan je određen nivo idealizacije tako da se obezbede pouzdani rezultati i da se istovremeno model ograniči na najbitnije parametre od uticaja na verodostojnost predstave realnih odnosa.

Ovaj stav se odnosi na sva tri elementa sistema vozač - vozilo - okolina i u ovom poglavlju razmatraju se pojedinačni elementi i njihovi odnosi na kojima zasniva koncept simulacije saobraćajnog toka.

### 2.1 VOZAČ

Osnovna pretpostavka ugrađena u ovaj model je da se jednom vrednošću može definisati ceo skup uticajnih parametara na vozačevo ponašanje u vožnji. Ova vrednost, koja se generiše preko slučajnih brojeva normalne raspodele, važi za parametre koji su posledica psihološkog stava vozača prema vožnji tj. za parametre koji bi opisivali vozača prema perceptivnom modelu vožnje (v. pogl. 1.5).

Numerički pokazatelji karakteristika vozača treba da utiče na parametre kao što su: vreme reakcije vozača, maksimalna usporjenja i ubrzanja, odstojanja pri  $v=0$  i stepen korišćenja vučno-brzinskih karakteristika vozila. Ovom vrednošću iskazuje se "stepen agresivnosti" vozača koji ima direktnog uticaja na njegovo ponašanje.

Medjutim, treba istaći da veoma malo vozača mogu reprezentovati prosečne vozače po svim parametrima. Čak i kad se, naprimer, analiziraju samo tri parametra (vreme reakcije, visina očiju i izoštrena vizura preglednosti) može se ustanoviti da, po ovim kriterijumima, veoma mali broj vozača predstavlja "prosečne". Naime, po teoremi o složenoj verovatnoći, verovatnoća da će

vozač po sva tri parametra biti prosečan jednaka je proizvodu verovatnoća da će biti prosečan po svakom od parametara. Ova teorema važi za medjusobno nezavisne pokazatelje tj. ne postoji korelacija izmedju pokazatelja što je stvarno slučaj u iznetom primeru.

$$P(T_r, H_o, L_a) = P(T_r) \cdot P(H_o) \cdot P(L_a)$$

Ako u svakom skupu opažanja parametara  $(T_r, H_o, L_a)$  uzmemo samo srednju trećinu opažanja odnosno  $P(T_r) = 1/3$ ,  $P(H_o) = 1/3$  i  $P(L_a) = 1/3$ , verovatnoća da će vozač biti "prosečan" po sva tri parametra iznosi  $P(T_r, H_o, L_a) = 1/3 \cdot 1/3 \cdot 1/3 = 1/27$ . Drugim rečima, manje od 4% svih vozača mogu pripadati srednjoj trećini opažanja po sva tri kriterijuma.

Budući da sa povećanjem broja parametra koji opisuju karakteristike vozača složena verovatnoća veoma brzo opada, neophodno je u procesu simulacije izvući samo dominantne karakteristike vozača i svesno ograničiti broj parametara.

### 2.1.1 Vreme reakcije

Kao što je ranije istaknuto, bitan pokazatelj karakteristika vozača je vreme reakcije koje se sastoji iz kontinuiranog niza događaja:

⊗ Percepcija - uočavanje spoljnog nadražaja. Nema sumnje da je u procesu vožnje najbitnija vizuelna percepcija. Ljudsko oko može primiti informacije brzinom od max  $4,6 \cdot 10^6$  bita/sec dok mozak može preradjivati informacije max brzinom od 25-35 bita u sekundi. Stoga je vozač prinudjen da uvek filtrira obilje informacija koje prima vizuelnim putem i koncentriše se na one vizuelne informacije koje utiču na njegovu bezbednost u kretanju. Vreme percepcije sadrži trajanje procesa usmeravanja i izoštravanja vizure na objekat koji predstavlja potencijalnu opasnost. Prosečno trajanje oko 0.1 sec.

⊗ Identifikacija - izdvajanje kritičnog detalja i shvatanje nivoa opasnosti. Ovaj proces uključuje preradu vizuelnih informacija u ljudskom mozgu kako bi vozač mogao da protumači zna-

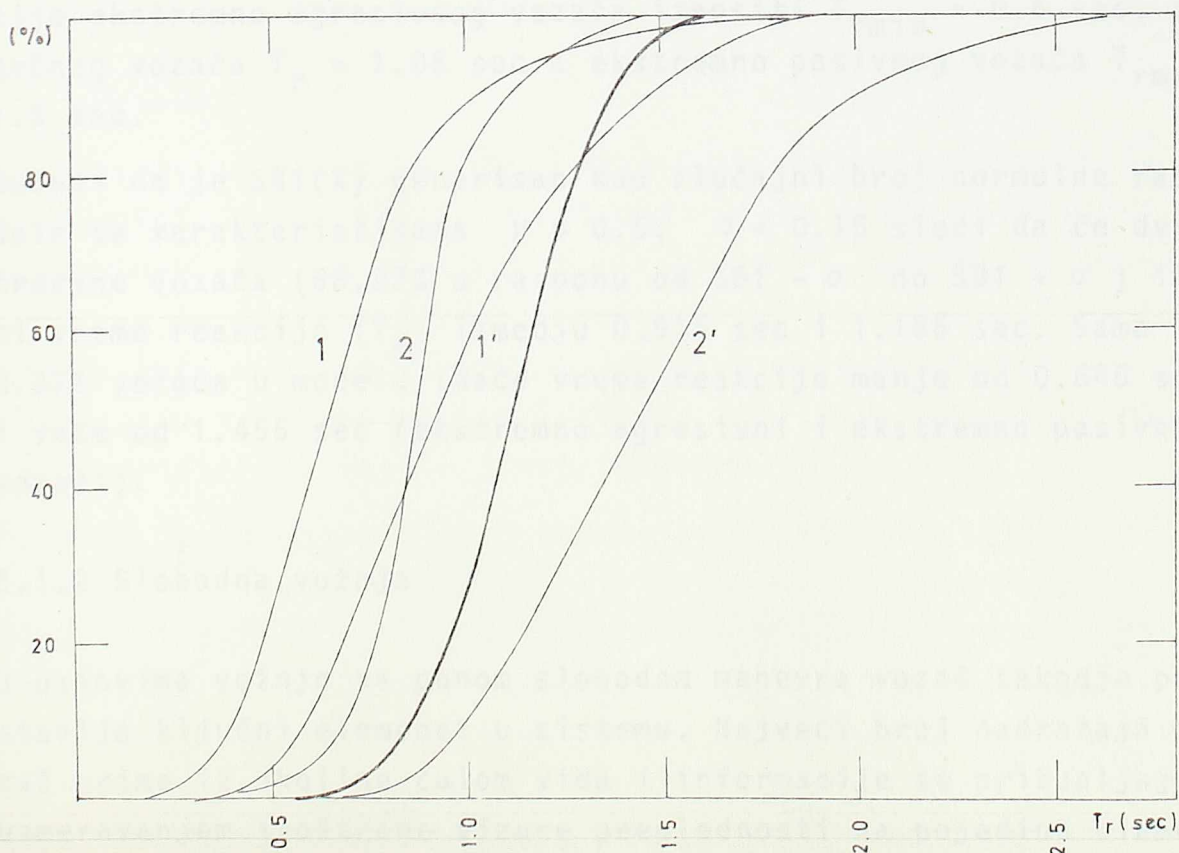


ćenje vizuelnog nadražaja. Brzina prerade informacija uslovljava da se ovo vreme kreće oko 0.3 sec.

④ Procena - donošenje odluke za akciju upravljanja. Na osnovu prethodnog procesa vozač procenjuje situaciju i donosi odluku o vrsti akcije (kočiti, ubrzati, skrenuti, itd.). Ovaj proces je od najbitnijeg uticaja na ukupno trajanje vremena reakcije i njegovo trajanje najviše zavisi od psihofizičkih karakteristika vozača. Posledično, trajanje ovog procesa pokazuje najveću disperziju rezultata i, zavisno od situacije i karakteristika vozača, može se kretati od 0.2 do 1.0 sec.

⑤ Sprovođenje - proces realizacije donetih odluka. Trajanje ovog procesa ne zavisi samo od vozača već i od rasporeda komandi u vozilu i prosečno se kreće oko 0.2 sec.

Budući da je faza procene kritična, eksperimentalno se dobijaju različiti rezultati ako je nadražaj očekivan ili pak ako je iznenađan. Po pravilu vreme reakcije mereno u laboratorijskim uslovima je skoro dva puta kraće od vremena reakcije u realnim uslovima odvijanja saobraćaja. Rezultati ispitivanja /Lit. 4, Lit. 45/ u stvarnim uslovima odvijanja saobraćaja prikazani su na sl. 6.



sl.6.

Vreme reakcije vozača na očekivani (1,2 ) i neočekivani (1',2') nadražaj

Može se zapaziti bitna razlika u merenim vrednostima u SAD i SSSR koje su nesumnjivo posledica drugačijih nivoa iskustva, obučenosti i motivacije vozača koji su testirani, kao i razlike metodoloških postupaka u izvodjenju eksperimenta.

Za potrebe simulacije saobraćajnog toka usvojene su srednje vrednosti očekivani-iznenadni nadražaj i to relativno bliže vrednostima izmerenim u SSSR budući da je prosečno vozačko iskustvo u našoj zemlji daleko kraće nego u SAD.

Vreme reakcije ( $T_r$ ) vozača X u modelu definisano je kao:

$$T_r(X) = T_{rmin} + (T_{rmax} - T_{rmin}) \cdot (1 - SB1(X))$$

gde je:

$T_r(X)$  - vreme reakcije vozača (X)

$T_{rmin}$  - minimalno vreme reakcije - ekstremno agresivan vozač

$T_{rmax}$  - maksimalno vreme reakcije - ekstremno pasivan vozač

$SB1(X)$  - slučajni broj normalne raspodele (0,1) koji definiše karakteristike vozača

Po primenjenom modelu, ekstremno agresivan vozač odredjen je pri  $SB1(X) = 1$ , ekstremno pasivan vozač pri  $SB1(X) = 0$ , a prosečan vozač pri  $SB1(X) = 0.5$ . Usvojeno je da će vreme reakcije ekstremno agresivnog vozača iznositi  $T_{rmin} = 0.6$  sec, prosečnog vozača  $T_r = 1.05$  sec a ekstremno pasivnog vozača  $T_{rmax} = 1.5$  sec.

Budući da je  $SB1(X)$  generisan kao slučajni broj normalne raspodele sa karakteristikama  $\mu = 0.5$ ,  $\sigma = 0.15$  sledi da će dve trećine vozača (68,27% u rasponu od  $SB1 - \sigma$  do  $SB1 + \sigma$ ) imati vreme reakcije ( $T_r$ ) izmedju 0,915 sec i 1.185 sec. Samo 0.37% vozača u modelu imaće vreme reakcije manje od 0.645 sec i veće od 1.455 sec (ekstremno agresivni i ekstremno pasivni vozači).

### 2.1.2 Slobodna vožnja

U uslovima vožnje sa punom slobodom manevra vozač takodje predstavlja ključni elemenat u sistemu. Najveći broj nadražaja vozač prima iz okoline čulom vida i informacije se prikupljaju usmeravanjem izoštrene vizure preglednosti na pojedine elemente okoline pre svega na ivice kolovoza na koje se usmerava skoro 80% svih vizura vozača. /Lit. 1/.

Uslovi slobodne vožnje i brzine koje se u takvoj situaciji definišu merodavne su za dimenzionisanje elemenata putne geometrije i analiza ovih zakonitosti je predmet posebnih istraživanja. Budući da u procesu simulacije treba očekivati pojavu tzv. "slobodnih vozila" njihovo kretanje podleže drugim zakonitostima i ne zavise od karakteristika kretanja vozila koje se nalaze neposredno ispred analiziranog vozila.

Nezavisno od modela vožnje koji se usvoji, očigledno da postoje granični uslovi kada vozač svoje reakcije u vožnji podešava prema svojim perceptivnim informacijama o ponašanju vozila koje je neposredno ispred njegovog u saobraćajnom toku. Postoji više modela koji definišu ovu granicu i, zbog jednostavnosti analize prilikom opažanja saobraćajnog toka, povezuju se sa pokazateljima vremenskih intervala ( $\Delta t$ ) i odnosima brzina vozila ( $n$ ) i ( $n+1$ ). Najpoznatiji modeli su:

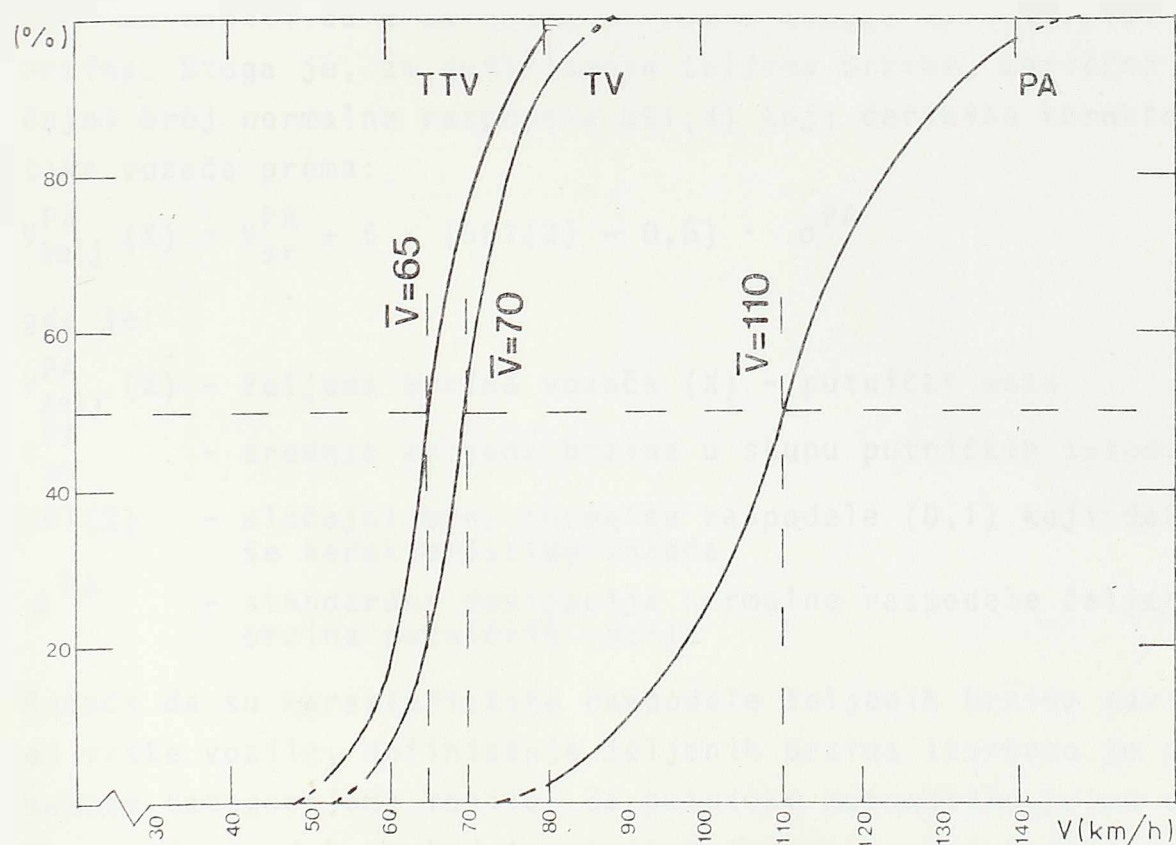
1.  $\Delta t_{n,n+1} \geq 5 \text{ sec}$  ,  $|V_n - V_{n+1}| \geq 0.1 V_n$
2.  $\Delta t_{n,n+1} \geq 5 \text{ sec}$  ,  $|V_{n+1} - V_n| \geq 10 \text{ km/h}$
3.  $\Delta t_{n,n+1} \geq 7 \text{ sec}$  ,  $\Delta t_{n+1,n+2} \geq 4 \text{ sec}$
4.  $\Delta t_{n,n+1} \geq 8 \text{ sec}$  ,

U uslovima slobodne vožnje, osnovne informacije okoline su putni elementi prema kojima vozač uskladjuje svoje ponašanje. Kod autoputeva, gde su elementi horizontalne i vertikalne projekcije trase po pravilu daleko iznad minimalnih i gde uslovi jednosmerne vožnje bitno olakšavaju zadatak vozača, brzine koje se javljaju u uslovima slobodne vožnje pre svega su uslovljene karakteristikama vozača i mogućnostima vozila.

Poznato je da najveći broj vozača po pravilu ne iskorišćava maksimalne mogućnosti vozila kao i da postoji ograničenje maksimalne brzine na autoputevima. S druge strane, poznato je da psihološko opterećenje vozača raste sa brzinom kretanja vozila. Ovo opterećenje se meri preko pulsa ili galvanskih struja na koži i optimalne brzine po ovim kriterijumima kreću se između 55-85 km/h. /Lit. 45/.

Logično je predpostaviti da za svakog vozača postoji neka brzina koja je prihvatljiva u uslovima slobodne vožnje, tj. ne zahteva izuzetno naprezanje vozača. Ova brzina se naziva željenom brzinom budući da se javlja u idealnim neometanim uslovima vožnje a njena vrednost je iznad svega funkcija psiholoških karakteristika vozača i njegovog stava prema vožnji.

Imajući u vidu karakteristike vozila i maksimalno dozvoljenu brzinu na autoputevima (120 km/h), za potrebe simulacije saobraćajnog toka u našim uslovima usvojena je raspodela željenih brzina prikazana na sl. 7.



sl.7.  
Željene brzine u zavisnosti od vrste vozila

Može se zapaziti da se u modelu predviđa postojanje jednog broja vozača koji će svesno prelaziti dozvoljenu maksimalnu brzinu od 120 km/h. Karakteristike raspodele željenih brzina date su prema:

$$PA \quad V_{sr}^{PA} = 110 \text{ km/h}, \quad \sigma^{PA} = 15,4 \text{ km/h}, \quad \sigma^{PA}/V_{sr}^{PA} = 0,14$$

$$TV \quad V_{sr}^{TV} = 70 \text{ km/h}, \quad \sigma^{TV} = 7,0 \text{ km/h}, \quad \sigma^{TV}/V_{sr}^{TV} = 0,10$$

$$TTV \quad V_{sr}^{TTV} = 65 \text{ km/h}, \quad \sigma^{TTV} = 6,5 \text{ km/h}, \quad \sigma^{TTV}/V_{sr}^{TTV} = 0,10$$

U uslovima slobodne vožnje, kretanje vozila se simulira sa željenim brzinama ili, ako se vozilo kreće brzinom  $V < V_{želj}$ , primenjuju se maksimalna ubrzanja koja su moguća u sistemu vozač-vozilo (v.pogl.2.3).

željena brzina zavisi od karakteristika vozača; agresivniji vozači će težiti da u uslovima slobodne vožnje koriste viši nivo brzina. Stoga je, za definisanje željene brzine, korišćen slučajni broj normalne raspodele  $SB1(X)$  koji definiše karakteristike vozača prema:

$$V_{želj}^{PA}(X) = V_{sr}^{PA} + 6 \cdot (SB1(X) - 0,5) \cdot \sigma^{PA}$$

gde je:

$V_{želj}^{PA}(X)$  - željena brzina vozača (X) - putnički auto

$V_{sr}^{PA}$  - srednja željena brzina u skupu putničkih automobila

$SB1(X)$  - slučajni broj normalne raspodele (0,1) koji definiše karakteristike vozača

$\sigma^{PA}$  - standardna devijacija normalne raspodele željenih brzina putničkih vozila

Budući da su karakteristike raspodele željenih brzina zavisne od vrste vozila, definisanje željenih brzina izvršeno je po posebnim kategorijama vozila. Za putničke automobile prema navedenom odnosu dok se kod teretnih automobila, kod kojih je brzina kretanja u slobodnim uslovima vožnje pre svega zavisna od opterećenja (v.pogl.2,3), raspodela željenih brzina vrši preko slučajnih brojeva koji se nezavisno generišu.

### 2.1.3 Vožnja u koloni

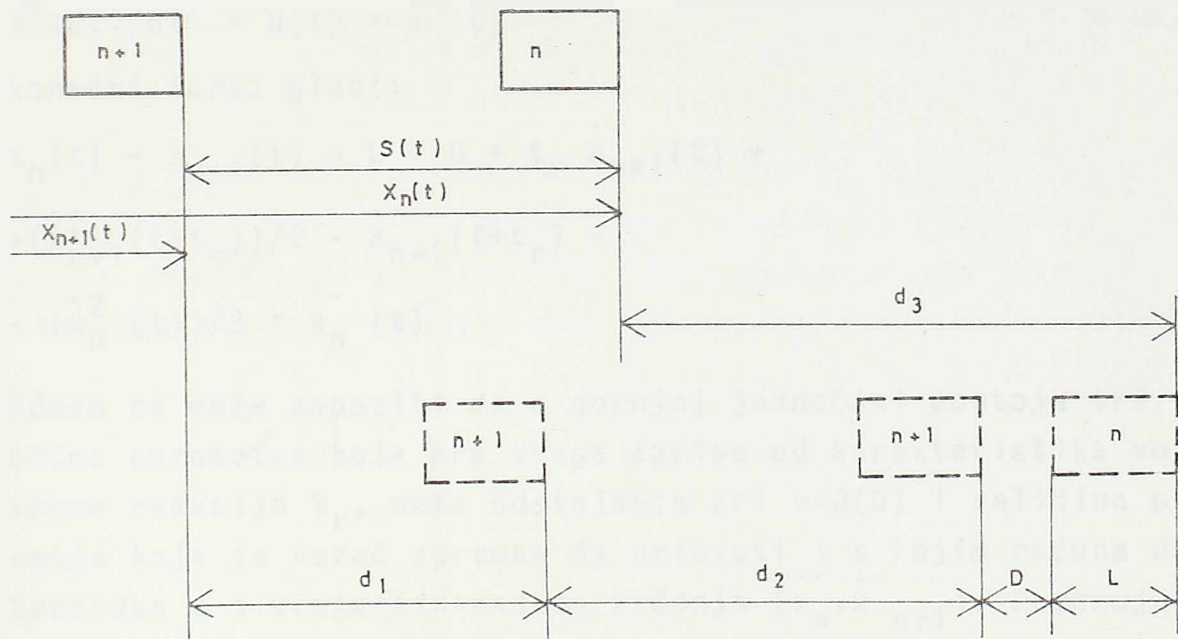
Česta situacija, čak i pri malim saobraćajnim opterećenjima, je sledjenje vozila ili vožnja u koloni kada vozač svoje upravljačke aktivnosti uskladjuje prema odnosima sa vozilom koje

prati. Ponašanje vozača u takvim uslovima je predmet niza istraživanja u svetu i ovde će biti izložene samo osnovne postavke takvih modela.

Modeli vožnje u koloni zasniyaju na osnovnoj zakonitosti da je reakcija vozača srazmerna nadražajima koji dolaze od vozila ispred i dešavaju se za zakašnjenjem u trajanju ( $t_r$ ), tj.

Reakcija ( $t+t_r$ ) = osetljivost · nadražaj ( $t$ )

Budući da se radi o vožnji u koloni, vozač obično reaguje ubrzanjem ili usporenjem. Najjednostavniji oblik modela je linearni model koji je razvijen na postavkama prikazanim na sl. 8.



sl. 8.

Ilustrativni prikaz koncepcije linearnog modela vožnje u koloni

Željeno odstojanje u vremenu ( $t$ ) je takvo da vozač ( $n+1$ ) bude siguran da neće doći do sudara u slučaju iznenadnog kočenja vozača ( $n$ ), tj.

$$s(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) = d_1 + d_2 + L + D - d_3$$

gde je:

$s(t)$  - odstojanje vozila u vremenskom preseku ( $t$ ), tj.

$$x_n(t) - x_{n+1}(t)$$

- $d_1$  - dužina koju predje vozilo (n+1) u zavisnosti od vremena reakcije  $d_1 = t_r \cdot v_{n+1}(t)$   
 $d_2$  - dužina koju predje vozilo (n+1) tokom manevra kočenja  
 $d_2 = -(v_{n+1}(t+t_r))^2 / 2 \cdot u_{n+1}(t+t_r)$   
 $L$  - dužina vozila (n)  
 $D$  - neto odstojanje vozila (n) i (n+1) pri  $v = 0$   
 $d_3$  - dužina koju predje vozilo (n) tokom manevra kočenja  
 $d_3 = (v_n(t))^2 / 2 \cdot u_n(t)$

Zamenom odgovarajućih vrednosti i smenom

$$dx(t)/dt = v(t) = \dot{x}(t)$$

$$d^2x(t)/dt^2 = u(t) = \ddot{x}(t)$$

konačni izraz glasi:

$$x_n(t) - x_{n+1}(t) = L + D + t_r \dot{x}_{n+1}(t) +$$

$$+ (\dot{x}_{n+1}(t+t_r))^2 / 2 \cdot \ddot{x}_{n+1}(t+t_r) -$$

$$- (\dot{x}_n(t))^2 / 2 \cdot \ddot{x}_n(t)$$

Odmah se može zapaziti da u gornjoj jednačini postoje tri vrlo bitna parametra koja pre svega zavise od karakteristika vozača: vreme reakcije  $t_r$ , neto odstojanje pri  $v=0(D)$  i veličina usporenja koje je vozač spreman da prihvati i s kojim računa da je bezbedan u slučaju iznenadnog kočenja ( $\ddot{x}_n, \ddot{x}_{n+1}$ ). Povezujući prethodni izraz sa perceptivnim modelom vožnje (pogl.1.4) može se ustanoviti da model u ovakvom obliku ne odražava sve karakteristike vozača. Stoga je u ovom radu izvršena modifikacija modela uvodjenjem parametra koji definiše karakteristike vozača kao što je prikazano u pogl.2.1.1.

Osnovni parametar je slučajni broj  $SBI(X)$  koji određuje stepen "agresivnosti" vozača odnosno "agresivan" vozač će računati sa kraćim vremenom reakcije ( $t_r \Rightarrow T_{rmin}$ ), manjim neto odstojanjem pri  $v=0$  ( $D \Rightarrow D_{min}$ ) i većim usporenjima pri kočenju ( $U \Rightarrow U_{max}$ ). Uvodjenjem ovih postavki linearni model vožnje u koloni dobija

konačan oblik kao funkcija karakteristika vozača:

$$S_p(X,t) = L + D(X) + T_r(X) \cdot v_{n+1}(t) + \\ v_{n+1}^2(t+T_r)/2U(X,t+T_r) - v_n^2(t)/2U(X,t)$$

gde je:

$S_p(X,t)$  - željeno odstojanje vozača (X) u vremenskom preseku (t)

L - dužina vozila (n)

D(X) - odstojanje vozača (X) u vozilu (n+1) od vozila (n) pri  $v = 0$

$T_r(X)$  - vreme reakcije vozača (X) (v.čl.2.1.1)

$v_{n+1}(t+T_r)$  - brzina vozila (n+1) u vremenskom preseku (t+ $T_r$ )

U(X,t) - usporenje u zavisnosti od karakteristika vozača (X) sa kojim računa u slučaju iznenadnog kočenja

$v_n(t)$  - brzina vozila (n) u vrem.preseku (t)

Uvodeći slučajni broj SB1(X) koji definiše karakteristike vozača vreme reakcije je primenjeno kao što je prikazano u pogl. 2.1.1. Odstojanja pri  $v=0$  (tj. pri zagušenju gde je gustina saobraćajnog toka jednaka maksimalnoj gustini) definisana su prema:

$$D(X) = D_{\min} + (D_{\max} - D_{\min}) \cdot (1 - SB1(X))$$

gde je:

D(X) - neto odstojanje koje prihvata vozač (X) pri  $v=0$

$D_{\min}$  - minimalno neto odstojanje pri  $v=0$

$D_{\max}$  - maksimalno neto odstojanje pri  $v=0$

SB1(X) - slučajni broj normalne raspodele (0,1) koji definiše karakteristike vozača (X)

Obradom aerofotogrametrijskih snimaka centralne zone Beograda na kojima se može definisati odstojanje vozila koja stoje na svetlosnom signalu, ustanovljeno je da srednje neto odstojanje iznosi 1,7 metara sa odstupanjem koje se kreće u granicama od + 20 - 40%. Imajući na umu da je zaustavljanje pred svetlosnim signalom u gradskim uslovima donja granica vrednosti D u van-gradskim uslovima, usvojeno je  $D_{\min} = 1$  m.  $\bar{D} = 3,5$  m.  $D_{\max} = 6$  m. Pri ovakvim vrednostima maksimalna gustina pri zagušenju ( $v=0$ ) iznosi prosečno za putnička vozila Z-101:

$$G_{\max} = 1000 / (L + \bar{D}) = 1000 / (3,9 + 3,5) = 135 \text{ voz/km}$$



Usporenja u uslovima vožnje u koloni sa kojima računa vozač (X) definisana su prema:

$$U(X) = U_{\min} + (U_{\max} - U_{\min}) \cdot SB1(X)$$

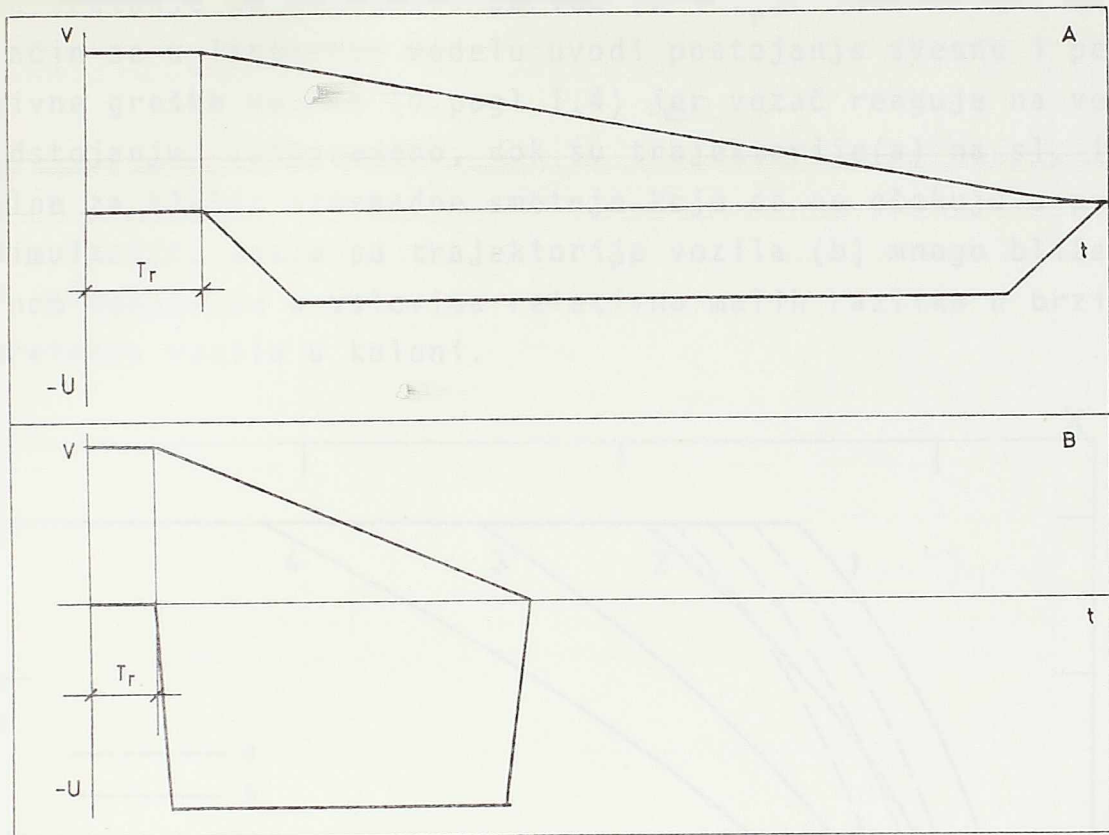
Kao granični uslovi za vrednost  $U(X)$  usvojeno je da ekstremno pasivni vozač ima usporenja  $U_{\min} = 2 \text{ m/sec}^2 \approx 0,2 \cdot g$  što je i za vozača i za putnike udobno. Prosečan vozač će računati sa usporenjima od  $3,50 \text{ m/sec}^2 \approx 0,35 \cdot g$  a agresivan vozač sa usporenjima od  $5 \text{ m/sec}^2 \approx 0,51 \cdot g$  što je granica koja se primenjuje samo u slučaju izuzetne opasnosti.

Treba naglasiti da su navedena usporenja  $U(X)$  u suštini usporenja sa kojima računa vozač (X) kada prati vozilo koje je ispred njegovog u slučaju da prednje vozilo počne da koči. U suštini, takva usporenja se u normalnim uslovima vožnje neće ni realizovati već isključivo služe za određivanje odstojanja između vozila u zavisnosti od karakteristika vozača i brzina oba vozila.

Iznete vrednosti  $U(X)$  odgovaraju vrednostima usporenja sa kojima se računa dužina vizure zaustavne preglednosti ( $0,25 \cdot g - 0,45 \cdot g$ ) /Lit. 50/. S druge strane, budući da je  $u = g \cdot (f_t + w_k + i)$ , može se zaključiti da npr. pri brzini od 100 km/h prema usvojenom modelu, prosečan vozač računa sa iskorišćenjem koeficijenta trenja ( $f_t$ ) od 0,35 što je približno jednako normiranim vrednostima  $f_t$  u uslovima mokrog kolovoza i pri brzini od 100 km/h.

Zaustavni put ekstremno pasivnog i ekstremno agresivnog vozača u slučaju iznenadnog kočenja prema usvojenim parametrima modela prikazan je na sl. 9.

Budući da je  $SB1(X)$  slučajni broj normalne raspodele ( $\mu = 0,5$ ,  $\sigma = 0,15$ ) sledi da će u procesu simulacije 68,27% vozača računati sa usporenjima između  $3,95 \text{ m/sec}^2$  i  $3,05 \text{ m/sec}^2$  dok će samo 0,27% vozača računati sa  $U(X) > 4,85 \text{ m/sec}^2$  ili sa  $U(X) < 2,15 \text{ m/sec}^2$ , u slučaju iznenadnog kočenja.



sl. 9.

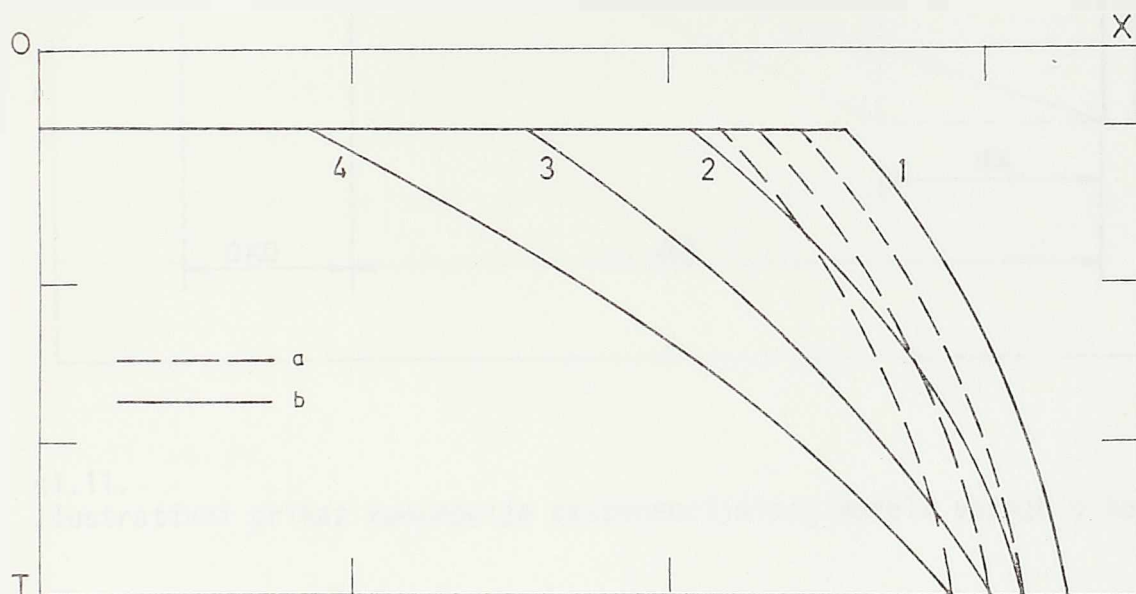
Zaustavni put ekstremno "pasivnog" i ekstremno "agresivnog" vozača u slučaju iznenadnog kočenja

Formulacija linearnog modela zahteva dalja pojednostavljenja, naime, ako se usvoji da su vrednosti  $v_{n+1}$  i  $U_{n+1}$  vezane za vremenski presek  $(t+T_r)$  mogućnosti su ili da se interval simulacije  $(\Delta t)$  izjednači sa vremenom reakcije  $(T_r)$  čime bi se izgubila mogućnost uvođenja različitog  $T_r$  u zavisnosti od karakteristika vozača ili pak da se zadržavanjem vrednosti za oba vremenska preseka  $(t, t+T_r)$  višestruko uveća potrebna memorija računara. Stoga je usvojeno da se vrednosti  $v_{n+1}$ ,  $U_{n+1}$  odnose samo na vremenski presek  $(t)$ .

Posledica ovakvog postupka prikazana je na sl. 10.

Sledi da je izostavljanjem uticaja vremena reakcije usporeenje relativno smanjeno i njegova promena je daleko blaža (v.sl.10) nego kada bi se dozvolilo da vozila bez smanjenja brzine nasta-

ve kretanje za vremenski period ( $t = T_r$ ). Indirektno, na taj način se u linearnom modelu uvodi postojanje svesne i perceptivne greške vozača (v.pogl.1.4) jer vozač reaguje na većem odstojanju. Istovremeno, dok su trajektorije (a) na sl. 10 realne za slučaj iznenadne smetnje koje se ne očekuju u procesu simulacije, dotle su trajektorije vozila (b) mnogo bliže stvarnom ponašanju u uslovima relativno malih razlika u brzini kretanja vozila u koloni.



sl.10.  
Trajektorije usporavanja kolone vozila

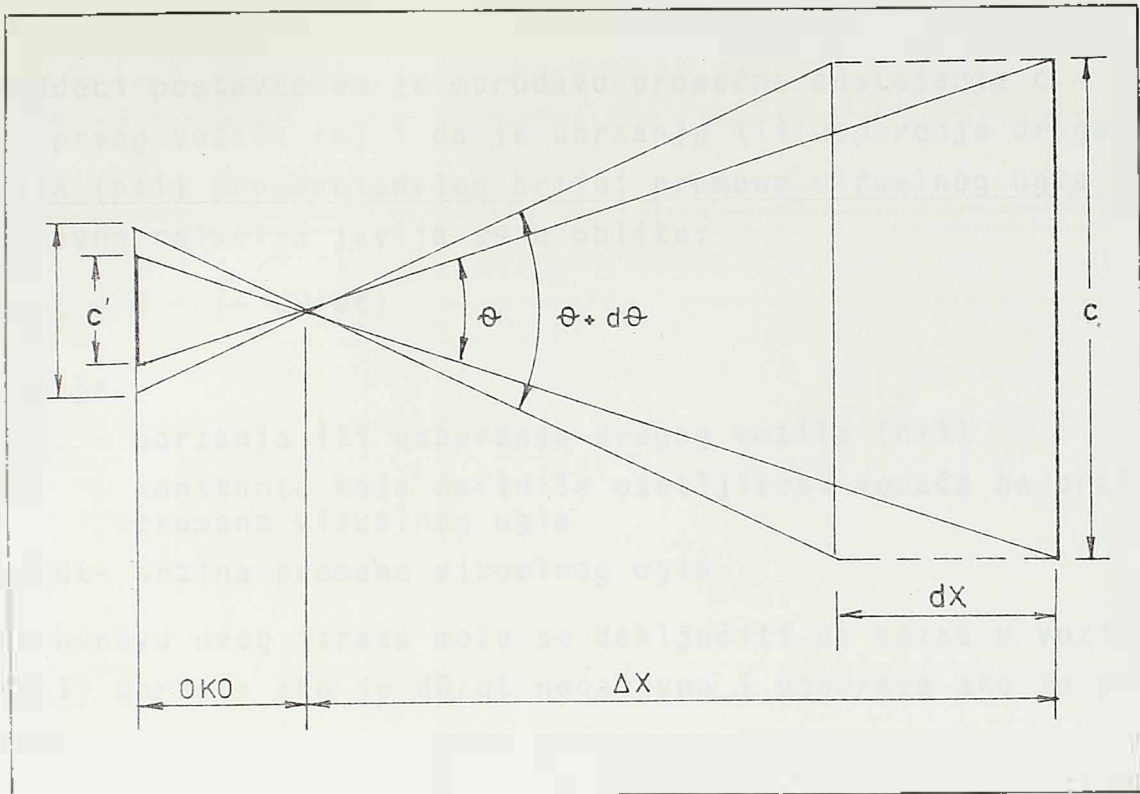
Polazeći od modela ponašanja vozača koji zasniva na promeni vizuelnog ugla ( $\theta$ ) može se formirati osnovni grafički prikaz iz koga se definiše ponašanje vozača koji prati prednje vozilo (sl. 11).

Polazeći od osnovne zakonitosti:

$$\theta = \text{tg}\theta = \frac{c}{\Delta x}$$

pri relativnoj promeni odstojanja sledi da je promena vizuelnog ugla:

$$\theta + d\theta = \frac{c}{\Delta x - dx}$$



sl. 11.

Ilustrativni prikaz koncepcije eksponencijalnog modela vožnje u koloni

te sledi:

$$d\theta = \frac{c}{\Delta x - dx} - \frac{c}{\Delta x} = \frac{c \cdot dx}{x^2 - \Delta x \cdot dx}$$

Uvodeći odnos relativne promene odstojanja ( $x$ ) kao:

$$dx = dv \cdot dt$$

sledi da je promena vizuelnog ugla  $d\theta$ :

$$d\theta = \frac{c \cdot dv \cdot dt}{\Delta x^2 - \Delta x \cdot dv \cdot dt}$$

Brzina promene vizuelnog ugla je:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{c \cdot dv}{x^2 - x \cdot dv \cdot dt}$$

Budući da je u normalnim saobraćajnim situacijama ( $dv$ ) daleko manje od ( $\Delta x$ ) može se takodje napisati:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{c \cdot dv}{\Delta x^2}$$

Uvodeći postavke da je merodavo prosečno odstojanje  $c =$  širini prvog vozila ( $n$ ) i da je ubrzanje ili usporenje drugog vozila ( $n+1$ ) proporcionalno brzini promene vizuelnog ugla ( $d\theta/dt$ ) osnovna relacija javlja se u obliku:

$$\ddot{x}_{n+1} = C \cdot (-d\theta/dt)$$

gde je:

$\ddot{x}_{n+1}$  - ubrzanje ili usporenje drugog vozila ( $n+1$ )

$C$  - konstanta koja definiše osetljivost vozača na brzinu promene vizuelnog ugla

$d\theta/dt$  - brzina promene vizuelnog ugla

Na osnovu ovog izraza može se zaključiti da vozač u vozilu ( $n+1$ ) ubrzava ako je  $d\theta/dt$  negativno i usporava ako je pozitivno.

Uvodeći da je  $\Delta x = x_n - x_{n+1}$  i  $dv = \dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$

sledi da je:

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{C \cdot c (\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})}{(x_n - x_{n+1})^2}$$

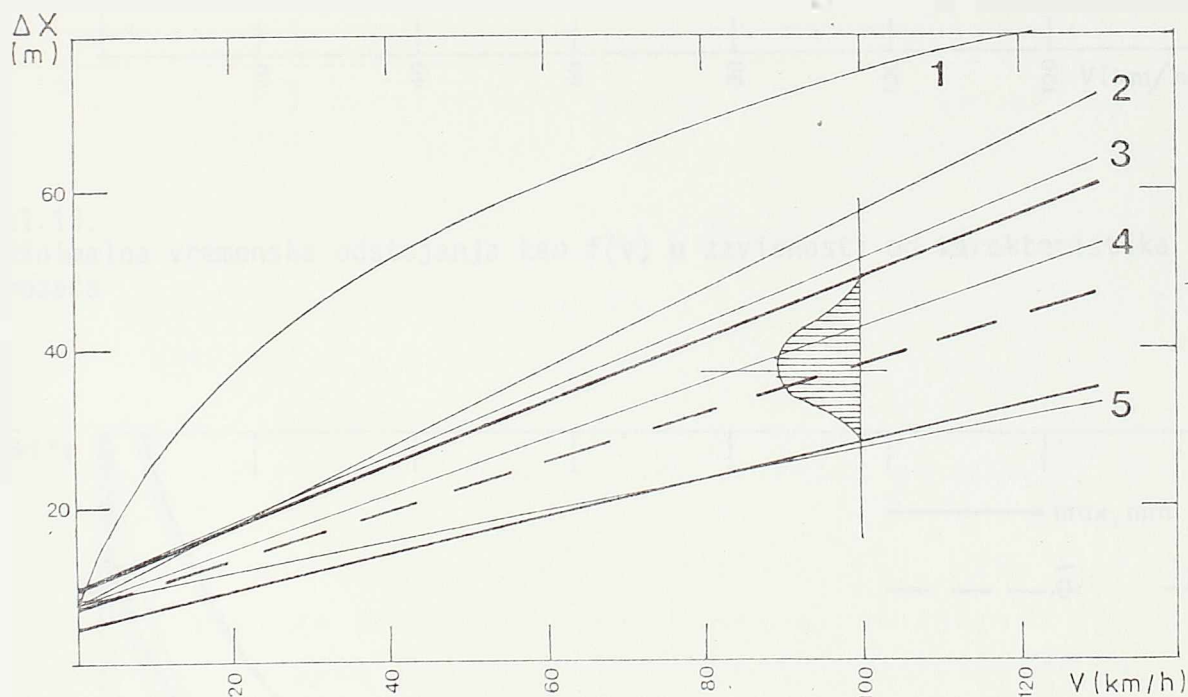
Iz prethodne formulacije modela vožnje u koloni mogu se uočiti bitne karakteristike: ubrzanje vozila ( $n+1$ ) je jednako nuli ako su brzine oba vozila jednake nezavisno od odstojanja vozila. Očigledno da ovaj stav nije realan te se mora uvesti granični uslov kada vozač počinje da reaguje na promenu vizuelnog ugla tj. prazna vrednost  $d\theta/dt$  (v.pogl.1.4) koja odgovara konstanti  $C$ .

S druge strane, za razliku od linearnog modela kod koga se jasno izdvaja minimalno odstojanje koje je prihvatljivo pri jednakim brzinama vozila, ovaj model takodje zahteva uvodjenje donje granice odstojanja (ili max vizuelnog ugla) prihvatljivog za vozača pratećeg vozila.

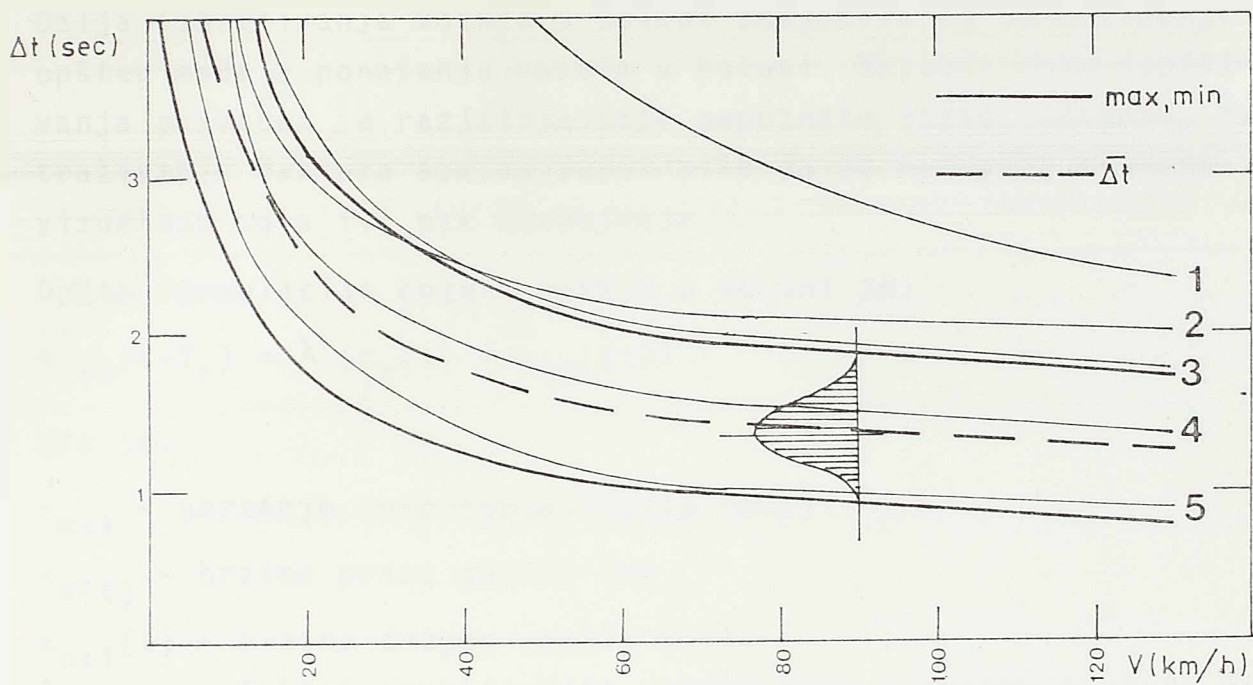
Oba modela vožnje u koloni mogu se, za uslove  $v_n = v_{n+1}$  kombinovati i uspostaviti veza izmedju vizuelnog ugla ( $\theta$ ) i odstojanja ( $\Delta x$ ) ili pak preko vremenskih intervala ( $\Delta t$ ). Zakonitosti su izražene kao funkcija brzine kretanja oba vozila,

$f(v_n)$  i, na osnovu linearnog modela, konstruisani su dijagrami koji pokazuju raspon vrednosti koji će se javiti u procesu simulacije saobraćajnog toka (sl.12 - sl.14).

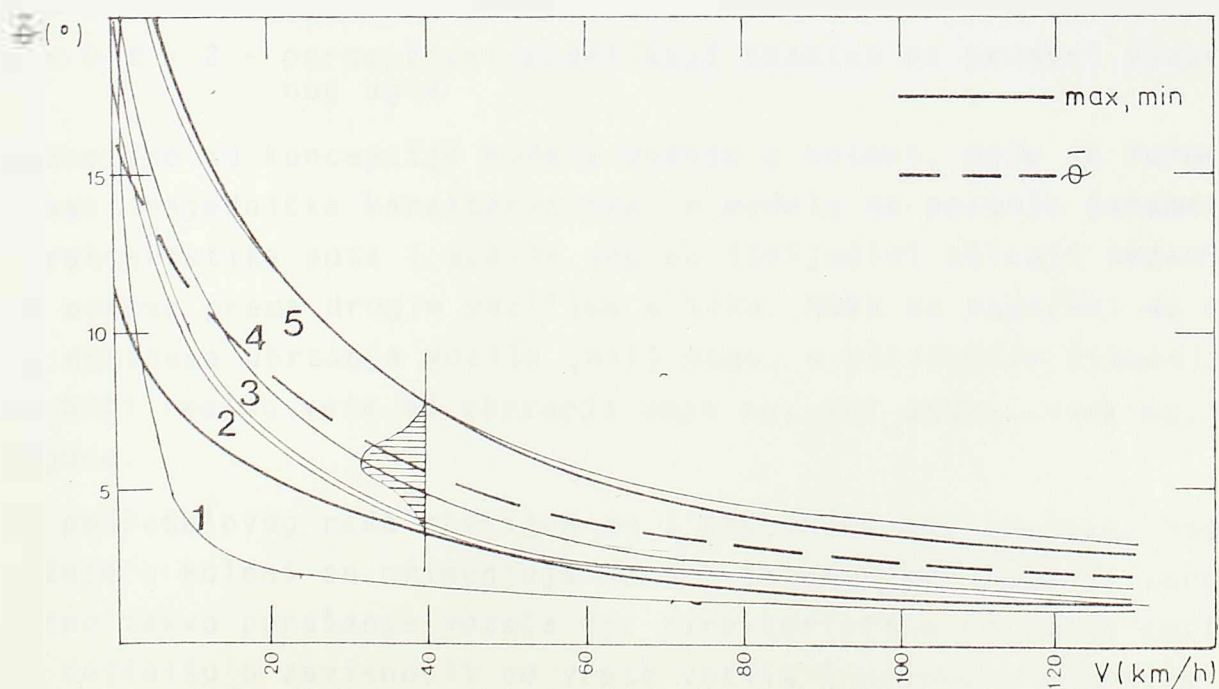
Na sl.12 - sl.14 prikazane su i zakonitosti ustanovljene merenjima na autoputevima (1-Lit.46,2 - Lit.56,3 - Lit. 61,4 - Lit.30,5- Lit.56). Kriva (1) predstavlja teoriski model pri uslovima maksimalne bezbednosti koji se u realnosti obično javlja pri izuzetno malim saobraćajnim opterećenjima  $Q_{mer} < 500$  voz/h/smer.



sl.12.  
Minimalna odstojanja vozila kao  $f(v)$  u zavisnosti od karakteristika vozača



sl.13.  
Minimalna vremenska odstojanja kao  $f(v)$  u zavisnosti od karakteristika vozača



sl.14.  
Maksimalni vizuelni ugao kao  $f(v)$  u zavisnosti od karakteristika vozača

Dalja istraživanja vožnje u koloni omogućila su formulisanje opšteg modela ponašanja vozača u koloni. Najveći obim ispitivanja posvećen je razjašnjavanju nepoznate vozač, odnosno, istraživanju faktora osetljivosti bilo da je nadražaj promena vizuelnog ugla ili pak odstojanje.

Opšta formulacija modela vožnje u koloni je:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T_r) = \lambda (\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t))$$

gde je:

$\ddot{x}_{n+1}$  - ubrzanje (usporenje vozila (n+1))

$\dot{x}_n(t)$  - brzina prvog vozila (n)

$\dot{x}_{n+1}(t)$  - brzina drugog vozila (n+1)

$\lambda$  - faktor osetljivosti vozača koji u opštem slučaju ima oblik:

$$\lambda = \alpha (\dot{x}_{n+1}^m(t+T_r) / (x_n(t) - x_{n+1}(t))^{\epsilon})$$

U zavisnosti od vrednosti faktora  $m$  i  $\epsilon$  dobijaju se različiti modeli, npr.

$m = 0, \epsilon = 0$  - linearni model

$m = 0, \epsilon = 2$  - perceptivni model koji zasniva na promeni vizuelnog ugla

Nezavisno od koncepcije modela vožnje u koloni, može se formulirati zajednička karakteristika: u modelu ne postoje parametri karakteristika puta i vozila već su isključivi uticaji vezani za odnose prema drugim vozilima u toku. Može se zapaziti da ova-ko dobijena ubrzanja vozila (n+1) mogu, u odredjenim situacijama biti realno veća od ubrzanja koja su, pri datim uslovima, i moguća.

Za potrebe ovog rada razvijen je i suštinski nov koncept, model vožnje u koloni se primenjuje samo u situacijama kada je verovatno takvo ponašanje vozača tj. karakteristike kretanja vozila se definišu u zavisnosti od vrste vozila i uslova kretanja u svakom vremenskom preseku (slobodna vožnja ili vožnja u koloni). U uslovima slobodne vožnje od presudnog uticaja su i vozno-dinamičke karakteristike vozila.



## 2.2. VOZILO

U cilju jedinstvenog pristupa modeliranju saobraćajnog toka pri različitim karakteristikama putnog pravca neophodno je usvojiti vozila koja će, po svojim vozno-dinamičkim i statičkim karakteristikama, biti merodavna za primenu u matematičkom modelu. Budući da merodavno vozilo predstavlja tipsko vozilo određene klase, sa stanovišta vozno-dinamičkih karakteristika, bitno se razlikuju dve kategorije: putnička i teretna vozila. Statičke i vozno-dinamičke karakteristike uslovljavaju dalju podelu kategorije teretnih vozila.

Za potrebe simulacije saobraćajnog toka usvojene su tri vrste modelskih vozila:

- ⊗ putničko vozilo (PA)
- ⊗ teretno vozilo (TV)
- ⊗ teško teretno vozilo (TTV)

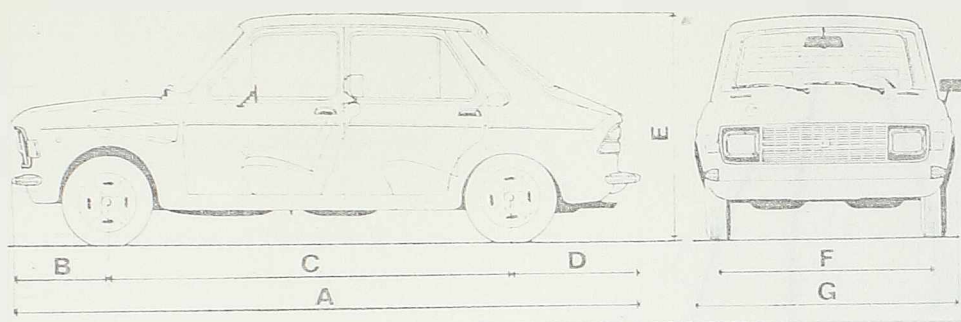
Ova kategorizacija odgovara realnom stanju u putnom saobraćaju s tim što nije uključena kategorija autobusa. Autobusi su indirektno prikazani kroz kategoriju teretnih vozila (iste statičke karakteristike) sa boljim vozno-dinamičkim parametrima.

Pri izboru merodavnog vozila bitno je izabrati takav tip vozila koji je najzastupljeniji u saobraćajnom toku u okviru kategorije koju reprezentuje.

### 2.2.1 Modelsko putničko vozilo

Kao što je istaknuto u radu V. Andjusa /Lit. 1/ ZASTAVA-101 u potpunosti zadovoljava kriterijume izbora merodavnog modelskog putničkog vozila. Ovo vozilo, po svojim karakteristikama u potpunosti zadovoljava uslove za vozno-dinamičke analize trase (uslovi neometane vožnje). S druge strane, mogućnosti ubrzanja Z-101 odgovaraju rasponima ubrzanja  $u=f(V)$  koje treba očekivati pri različitim gustinama saobraćajnog toka ( $Q_{mer} = 500-3500$  voz/čas/smer).

Statičke karakteristike Z-101 koje imaju uticaja na formulaciju matematičkog modela prikazane su na sl. 15.



A	3836
B	611
C	2449
D	776
E	1372
F	1304
G	1590

sl. 15.

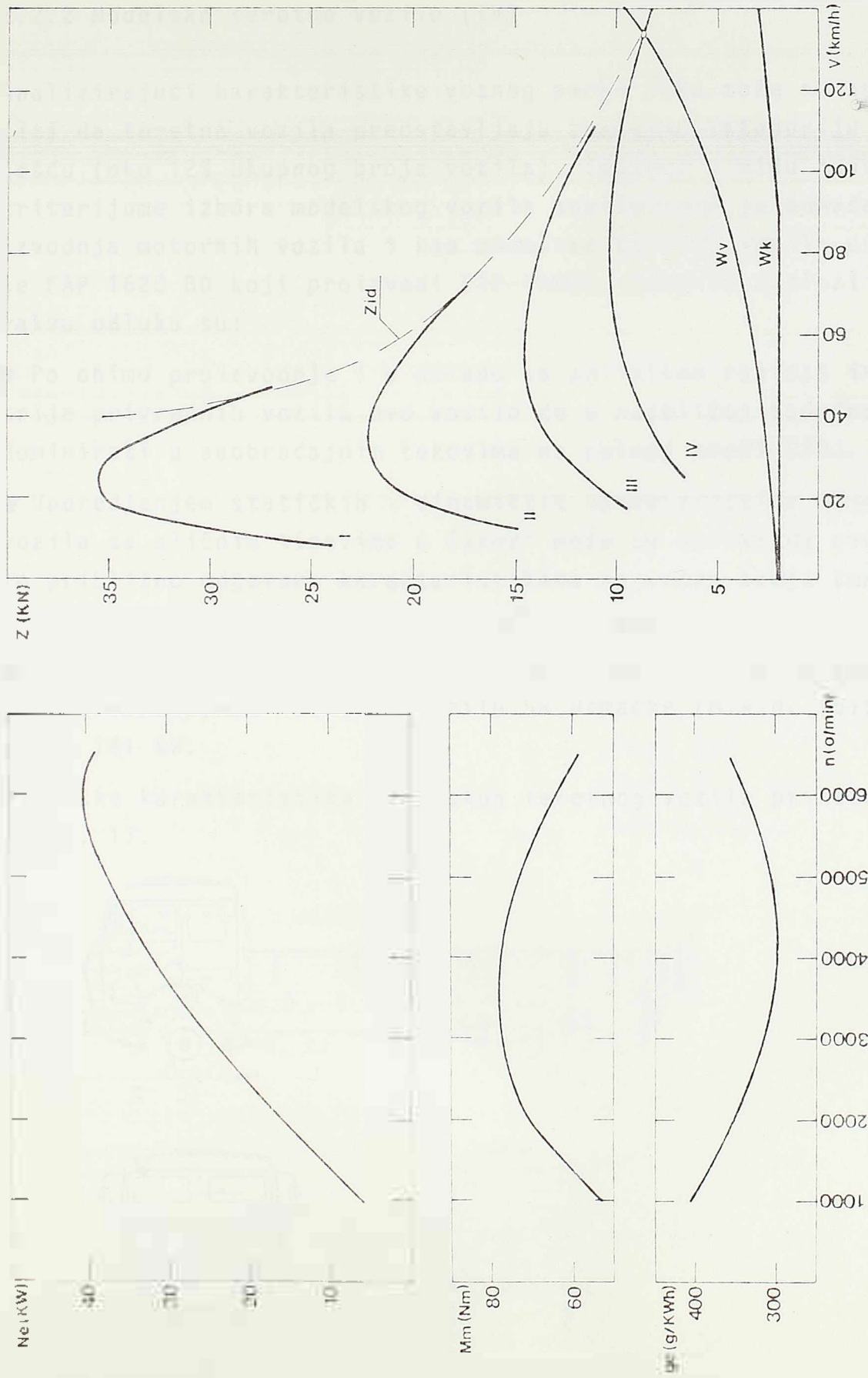
Statičke karakteristike modelskog vozila PA (Z-101)

Težina vozila spremnog za vožnju iznosi  $G = 8.19$  kN korisna nosivost (5 lica + 0.49 kN)  $P = 3.88$  kN, što daje ukupnu dozvoljenu težinu  $\max Q = 12.07$  kN.

Dinamičke karakteristike modelskog putničkog vozila prikazane su u sledećoj tabeli:

Dinamički poluprečnik	$r_d$	0.274 m
čeona površina	A	1.68 m <sup>2</sup>
Koef. otpora vazduha	$C_r$	0.435
Prenosni odnos - difer.	$i_o$	4.077
Prenosni odnos - menjač	$i_{mi}$	
I brzinski spoj	$i_{mI}$	3.583
II brzinski spoj	$i_{mII}$	2.235
III brzinski spoj	$i_{mIII}$	1.454
IV brzinski spoj	$i_{mIV}$	1.037
hod nazad	$i_{mhn}$	3.714
Koef. iskorišćenja	$\eta$	0.855
Radna zapremina	V	1116 cm <sup>3</sup>
Max broj obrtaja	n	6600 o/min
Broj obrtaja pri $N_{\max}$	$n_{N_{\max}}$	6000 o/min
Maksimalna snaga	$N_{\max}$	40.45 kW

Na sl. 16 prikazana je promena snage ( $N_e$ ), obrtnog momenta ( $M_m$ ) i specifične potrošnje goriva ( $g_e$ ) u zavisnosti od broja obrtaja /Lit, 1/. Na osnovu fabričkih podataka proračunate su vučno-brzinske karakteristike koje će se primeniti kao osnovni parametri vozila u procesu simulacije saobraćajnog toka. Dijagram vučnog bilansa modelskog PA prikazan je na sl. 16.



sl. 16. Karakteristične krive motora modelskog putničkog automobila i dijagram vučnog bilansa



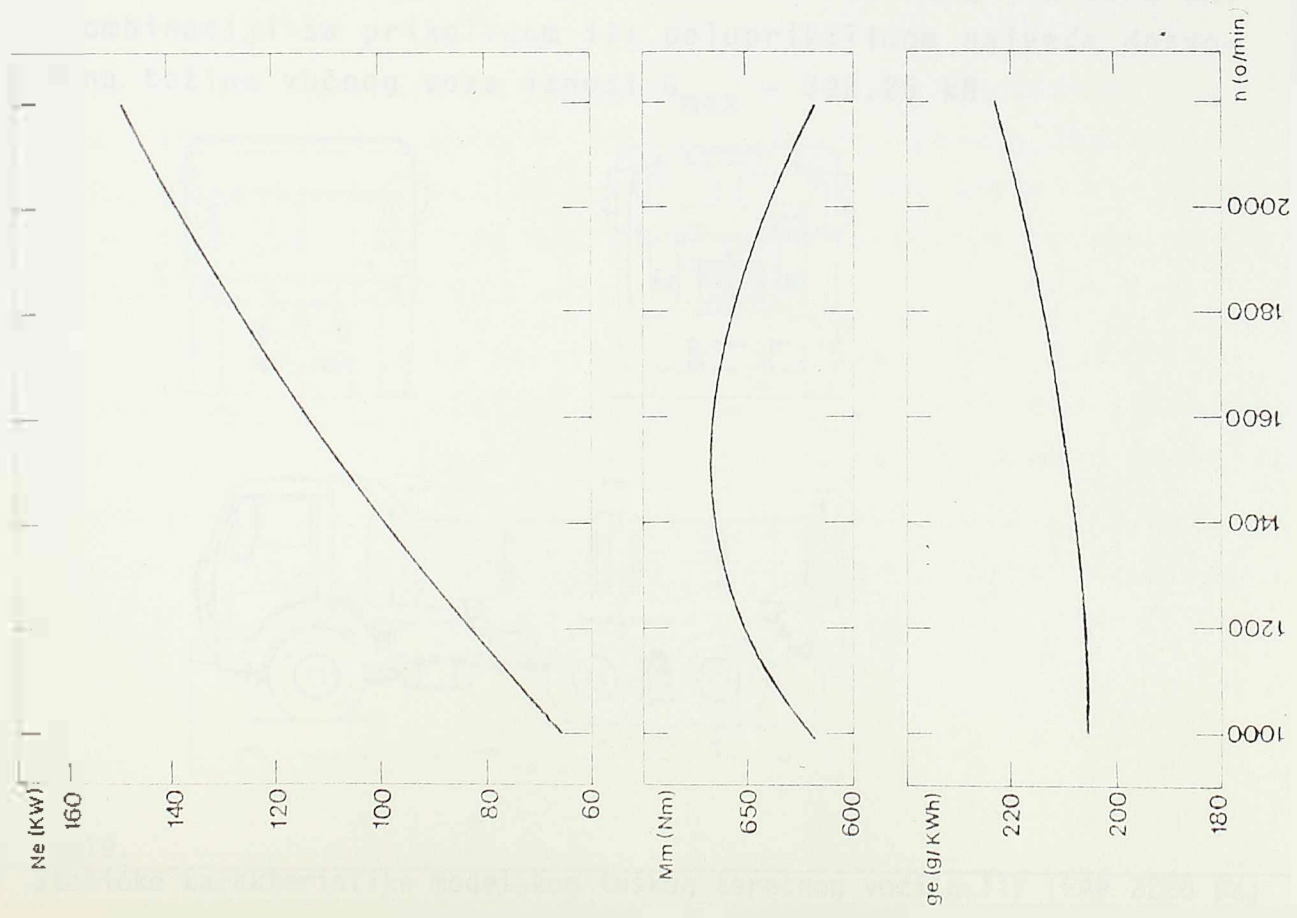
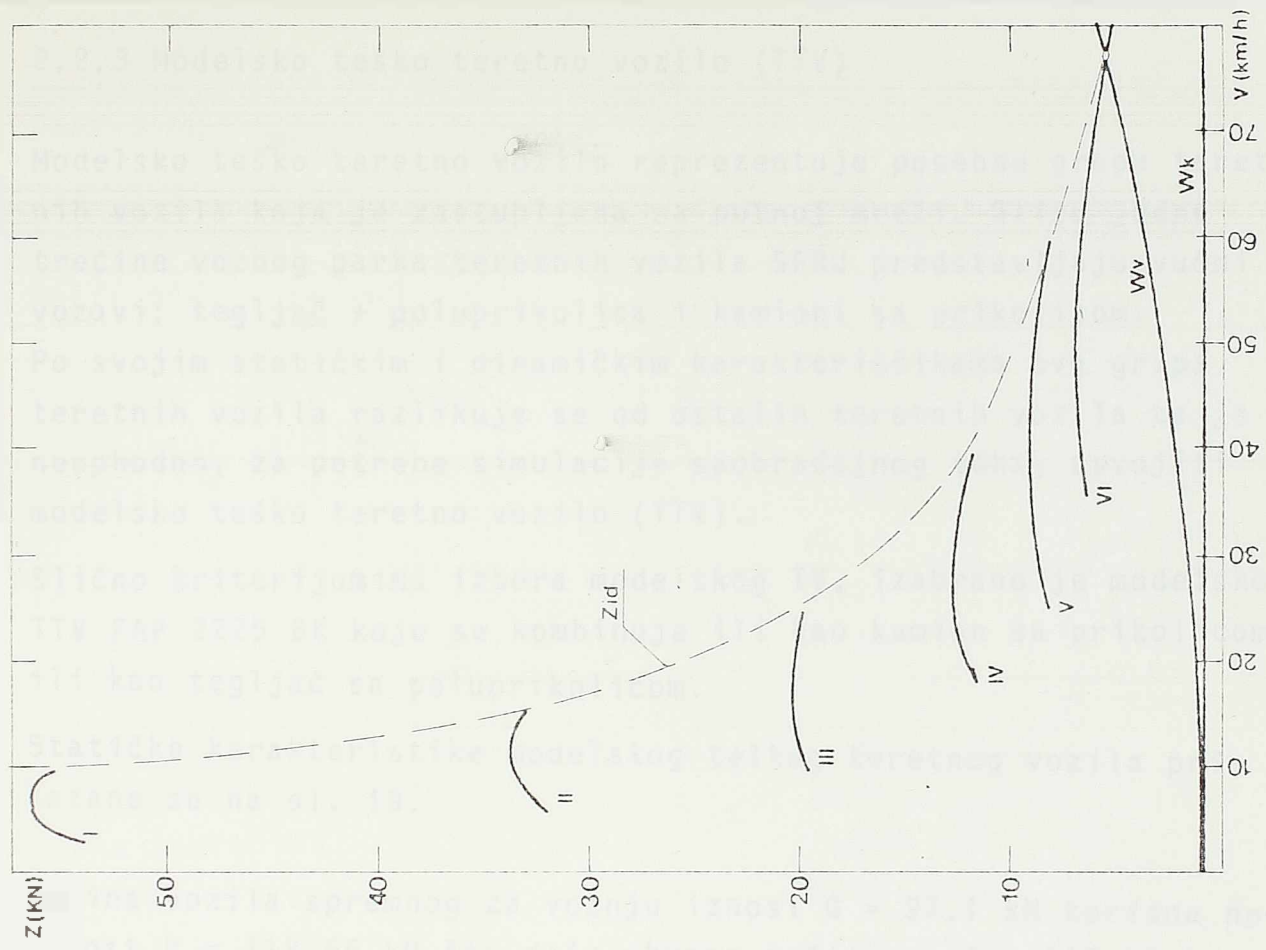
Težina vozila spremnog za vožnju iznosi  $G = 71.58$  kN korisna nosivost  $P = 85.32$  kN što daje ukupnu težinu od 156.90 kN.

Dinamičke karakteristike modelskog teretnog vozila prikazane su u sledećoj tabeli:

Dinamički poluprečnik	$r_d$	0.51	m
čeona površina	A	8.30	m <sup>2</sup>
Koef. otpora vazduha	$C_r$	1.20	
Prenosni odnos - difer.	$i_o$	7.76	
Prenosni odnos - menjač	$i_{mi}$		
I brzinski spoj	$i_{mI}$	6.70	
II brzinski spoj	$i_{mII}$	3.86	
III brzinski spoj	$i_{mIII}$	2.34	
IV brzinski spoj	$i_{mIV}$	1.44	
V brzinski spoj	$i_{mV}$	1.00	
VI brzinski spoj	$i_{mVI}$	0.73	
Hod nazad	$i_{hn}$	6.31	
Koef. iskorišćenja	$\eta$	0.86	
Radna zapremina	V	11040	cm <sup>3</sup>
Max broj obrtaja	n	2200	o/min
Broj obrtaja pri $N_{max}$	$n_{Nmax}$	2200	o/min
Maksimalna snaga	$N_{max}$	147	kW

Uporedjenjem sa merodavnim teretnim vozilom SR Nemačke (M.A.N. 15192F) može se zapaziti da usvojeno modelsko vozilo ima približno istu osnovnu karakteristiku (odnos snaga/težina) tj. M.A.N. 1.35 kW/kN a FAP 1.29 kW/kN pri iskorišćenju korisne nosivosti od 50%.

Na sl. 18 prikazane su karakteristične krive motora 2F 112B - odnosno promena snage ( $N_e$ ), obrtnog momenta ( $M_m$ ) i specifične potrošnje goriva ( $g_e$ ) u zavisnosti od broja obrtaja. Na osnovu iznetih pokazatelja izvršen je proračun vučno-brzinskih karakteristika modelskog teretnog vozila. Dijagram vučnog bilansa prikazan je na sl. 18.



sl. 18. Karakteristične krive motora modelskog teretnog vozila i dijagram vučnog bilansa

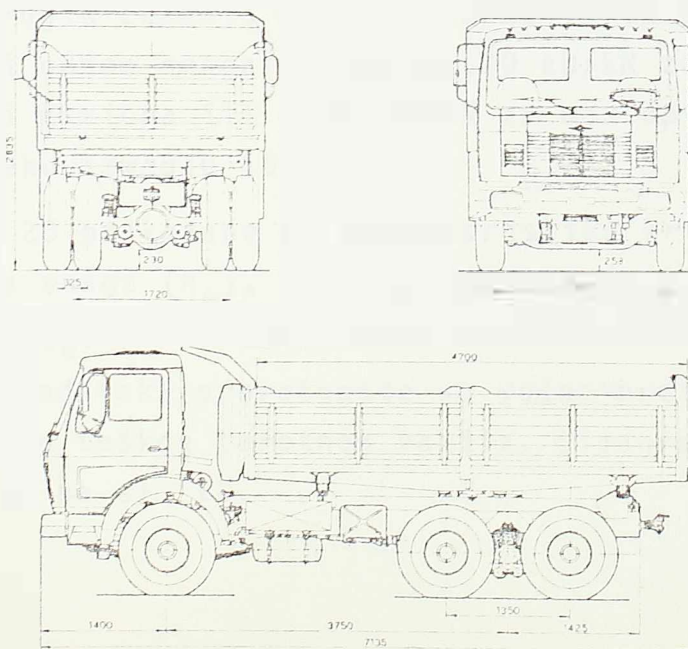
### 2.2.3 Modelsko teško teretno vozilo (TTV)

Modelsko teško teretno vozilo reprezentuje posebnu grupu teretnih vozila koja je zastupljena na putnoj mreži. Blizu jedne trećine voznog parka teretnih vozila SFRJ predstavljaju vučni vozovi; tegljač + poluprikolica i kamioni sa prikolicom. Po svojim statičkim i dinamičkim karakteristikama ova grupa teretnih vozila razlikuje se od ostalih teretnih vozila te je neophodno, za potrebe simulacije saobraćajnog toka, usvojiti modelsko teško teretno vozilo (TTV).

Slično kriterijumima izbora modelskog TV, izabrano je modelsko TTV FAP 2225 BK koje se kombinuje ili kao kamion sa prikolicom ili kao tegljač sa poluprikolicom.

Statičke karakteristike modelskog teškog teretnog vozila prikazane su na sl. 19.

Težina vozila spremnog za vožnju iznosi  $G = 97.1$  kN korisna nosivost  $P = 118.66$  kN što daje ukupnu težinu  $maxQ = 215.76$  kN. U kombinaciji sa prikolicom ili poluprikolicom najveća dozvoljena težina vučnog voza iznosi  $G_{max} = 392.26$  kN.



sl.19.

Statičke karakteristike modelskog teškog teretnog vozila TTV (FAP 2225 BK)

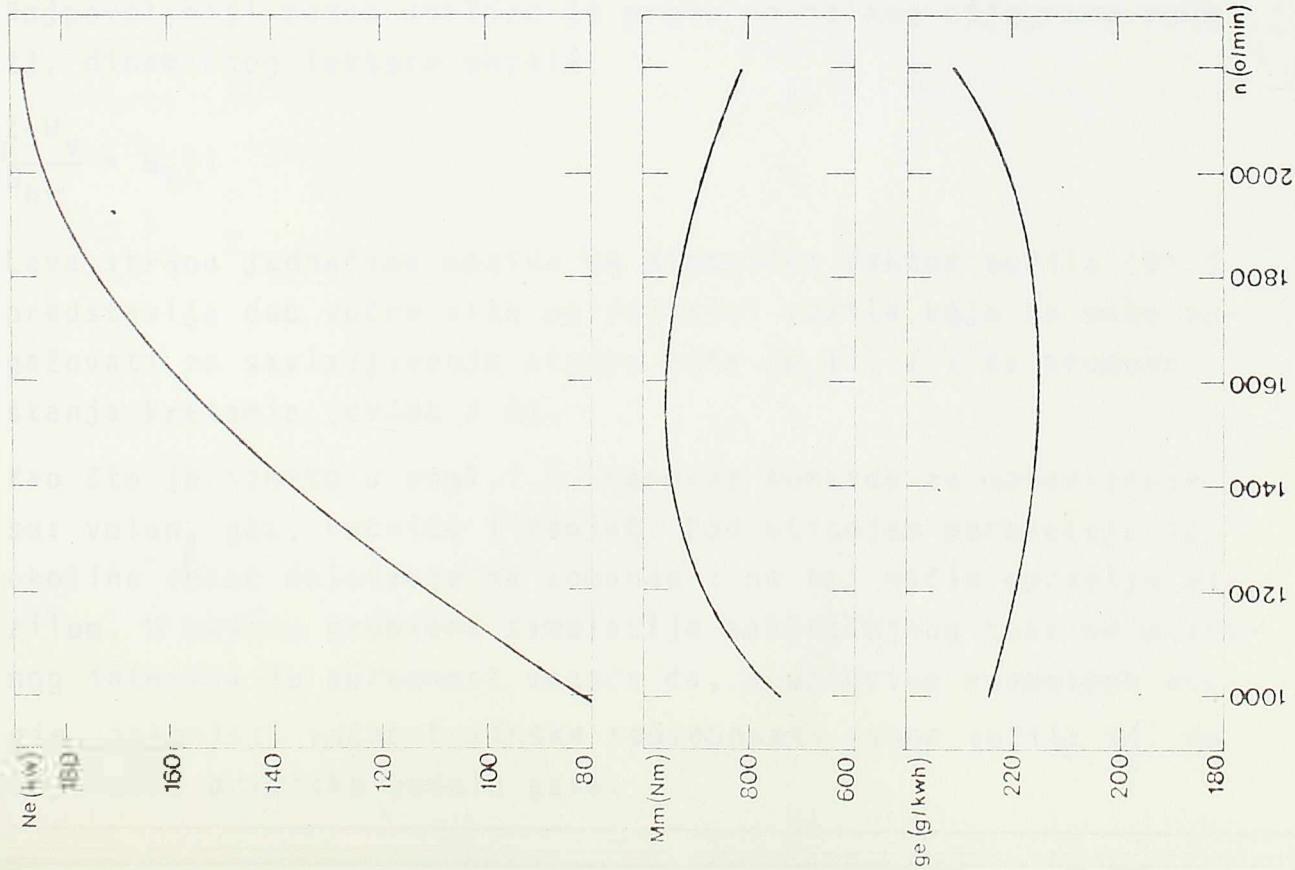
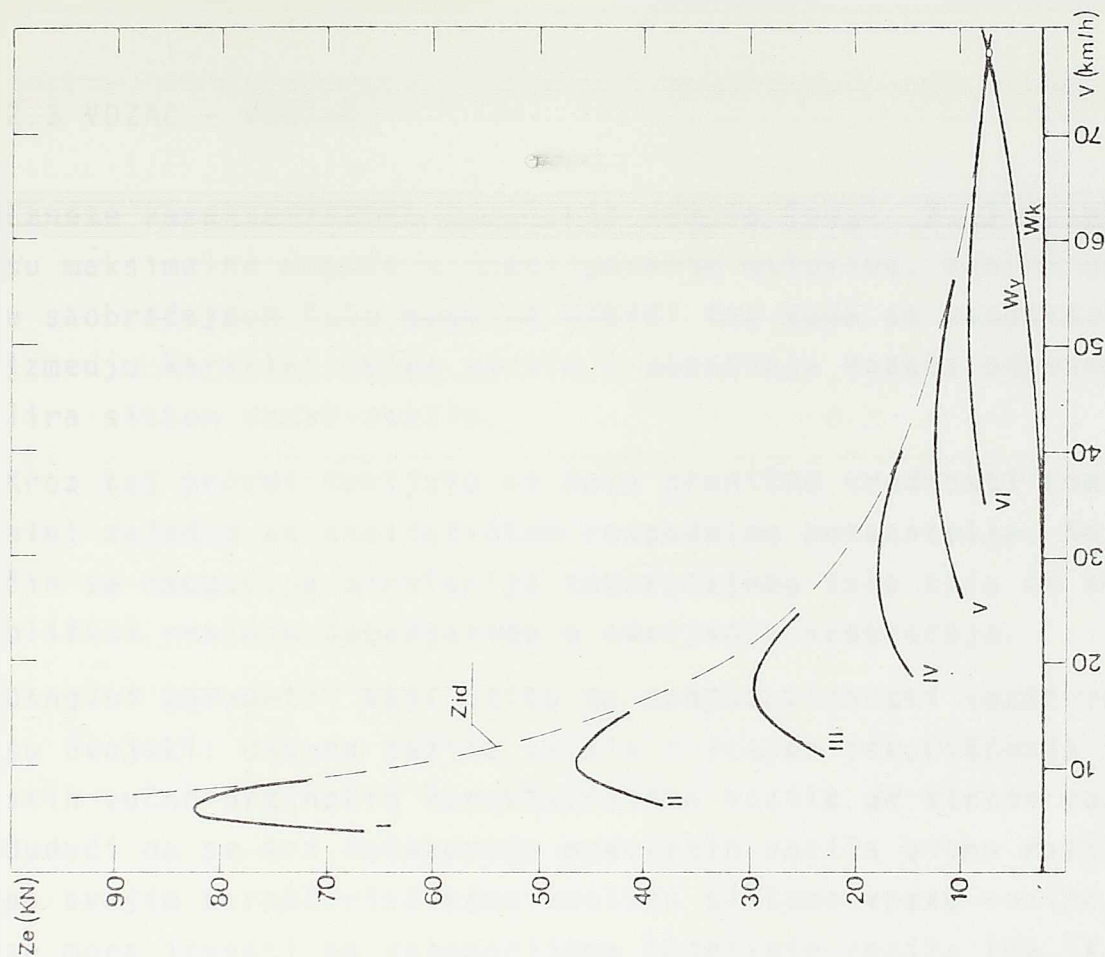
Dinamičke karakteristike modelskog teškog teretnog vozila prikazane su u sledećoj tabeli:

Dinamički poluprečnik	$r_d$	0.51 m
Čeona površina	A	8.30 m
Koef. otpora vazduha	$C_r$	1.20
Prenosni odnos - difer.	$i_o$	8.335 (7.65)
Prenosni odnos - menjač	$i_{mi}$	
I brzinski spoj	$i_{mI}$	6.70
II brzinski spoj	$i_{mII}$	3.86
III brzinski spoj	$i_{mIII}$	2.34
IV brzinski spoj	$i_{mIV}$	1.44
V brzinski spoj	$i_{mV}$	1.00
VI brzinski spoj	$i_{mVI}$	0.73
Hod nazad	$i_{hn}$	6.31
Koeficijent iskorišćenja	$\eta$	0.86
Radna zapremina	V	11040 cm <sup>3</sup>
max broj obrtaja	n	2200 o/min
Broj obrtaja pri $N_{max}$	$n_{Nmax}$	2200 o/min
Maksimalna snaga	$N_{max}$	188 kW

Upoređujući karakteristike modelskog TTV sa merodavnim vozilima drugih zemalja može se zapaziti da ovo vozilo ima nešto slabiji odnos snaga/težina (1.20 kW/kN za 50% iskorišćenja nosivosti kamiona ili 0.48 kW/kN za max opterećenje vučnog voza) u proseku između 10 do 20%.

Na sl. 20 prikazane su karakteristike krive motora 2FP 117B - promena snage ( $N_e$ ), obrtnog momenta ( $M_m$ ) i specifične potrošnje goriva ( $g_e$ ) u funkciji broja obrtaja motora. Na osnovu ovih fabričkih podataka proračunate su vučno-brzinske karakteristike modelskog teškog teretnog vozila. Dijagram vučnog bilansa prikazan je na sl. 20.





sl.20. Karakteristične krive motora modelskog teškog teretnog vozila i dijagram vučnog bilansa

### 2.3 VOZAČ - VOZILO

Iznete karakteristike modelskih vozila (pogl. 2.2) u suštini su maksimalne moguće u idealizovanim uslovima. Realni odnosi u saobraćajnom toku mogu se dobiti tek kada se uspostavi veza između karakteristika vozila i ponašanja vozača odnosno modela sistema vozač-vozilo.

Kroz taj proces dobijaju se nove granične vrednosti (max pros. min) zajedno sa statističkom raspodelom pokazatelja. Na taj način se omogućuje simulacija saobraćajnog toka koja će se približiti realnim događajima u odvijanju saobraćaja.

Osnovni parametri koji utiču na međuzavisnosti vozač-vozilo su dvojaki: ukupna težina vozila i stepen iskorišćenja teorijskih vučno-brzinskih karakteristika vozila od strane vozača. Budući da se tri kategorije modelskih vozila bitno razlikuju po svojim karakteristikama analiza sistema vozač-vozilo takodje se mora izvesti po kategorijama modelskih vozila (PA,TV,TTV). Najpovoljniji metod analize je preko normalnog dijagrama vuče tj. dinamičkog faktora vozila:

$$\frac{Z-W_v}{G_{pr}} = w_{k+i}$$

Leva strana jednačine naziva se dinamički faktor vozila (D) i predstavlja deo vučne sile po jedinici vozila koja se može angažovati za savladjivanje otpora puta ( $w_{k+i}$ ) ili za promenu stanja kretanja ( $dv/dt \neq 0$ ).

Kao što je izneto u pogl.1.3, osnovne komande za upravljanje su: volan, gas, kočnica i menjač. Pod uticajem poremećaja iz okoline vozač dejstvuje na komande i na taj način upravlja vozilom. U okviru problema simulacije saobraćajnog toka od posebnog interesa je spremnost vozača da, u uslovima neometane vožnje, iskoristi vučno-brzinske sposobnosti svoga vozila tj. do koje mere pritiska pedalu gasa.

### 2.3.1 Medjuzavisnosti vozač-vozilo (PA)

Iskorišćenje korisne nosivosti PA zavisi od niza parametara od kojih je najdominantniji svrha putovanja. Po pravilu, u uslovima gradske vožnje iskorišćenje korisne nosivosti je niže nego u uslovima medjugradskih kretanja. Prema podacima ankete saobraćaja u Beogradu, prosečna popunjenost PA za unutar gradska kretanja iznosi 1,48 putnika po vozilu dok se na spoljnom kordonu isti pokazatelj kreće oko vrednosti 2,21.

Logično je pretpostaviti da u saobraćajnom toku učestvuju vozila različitog stepena iskorišćenja korisne nosivosti što ima direktnog uticaja na dinamički faktor vozila, tj. na mogućnosti ubrzanja i savladjivanja otpora puta. Predpostavljajući normalnu raspodelu  $G_{br}$  proračunat je normalni dijagram vuče za minimum, srednju vrednost i maksimum  $G_{br}$  i prikazan na sl. 21.

Može se primetiti da sa promenom  $G_{br}$  dolazi do promene maksimalne brzine  $V_{max}$  u rasponu od  $V'_{max} = 127 \text{ km/h}$  ( $G_{brmax}$ ),  $V''_{max} = 134 \text{ km/h}$  ( $G_{brsr}$ ) i  $V_{max} = 140 \text{ km/h}$  ( $G_{brmin}$ ) pri nagibu 0%.

Dinamički faktor u ovom obliku je nepodesan za primenu u procesu simulacije tako da je primenjena zakonitost  $D_g = f(V)$  kao neprekinuta funkcija:

$$D_g = 0,9 \cdot \frac{Z_{id} - W_v}{G_{min} + (G_{max} - G_{min}) \cdot SBN_g}; V > 30 \text{ km/h}$$

gde je:

$Z_{id}$  - obimna sila  $f(V)$

$W_v$  - otpor vazduha  $f(V)$

$G_{min}$  - minimalna težina vozila (8,82 kN)

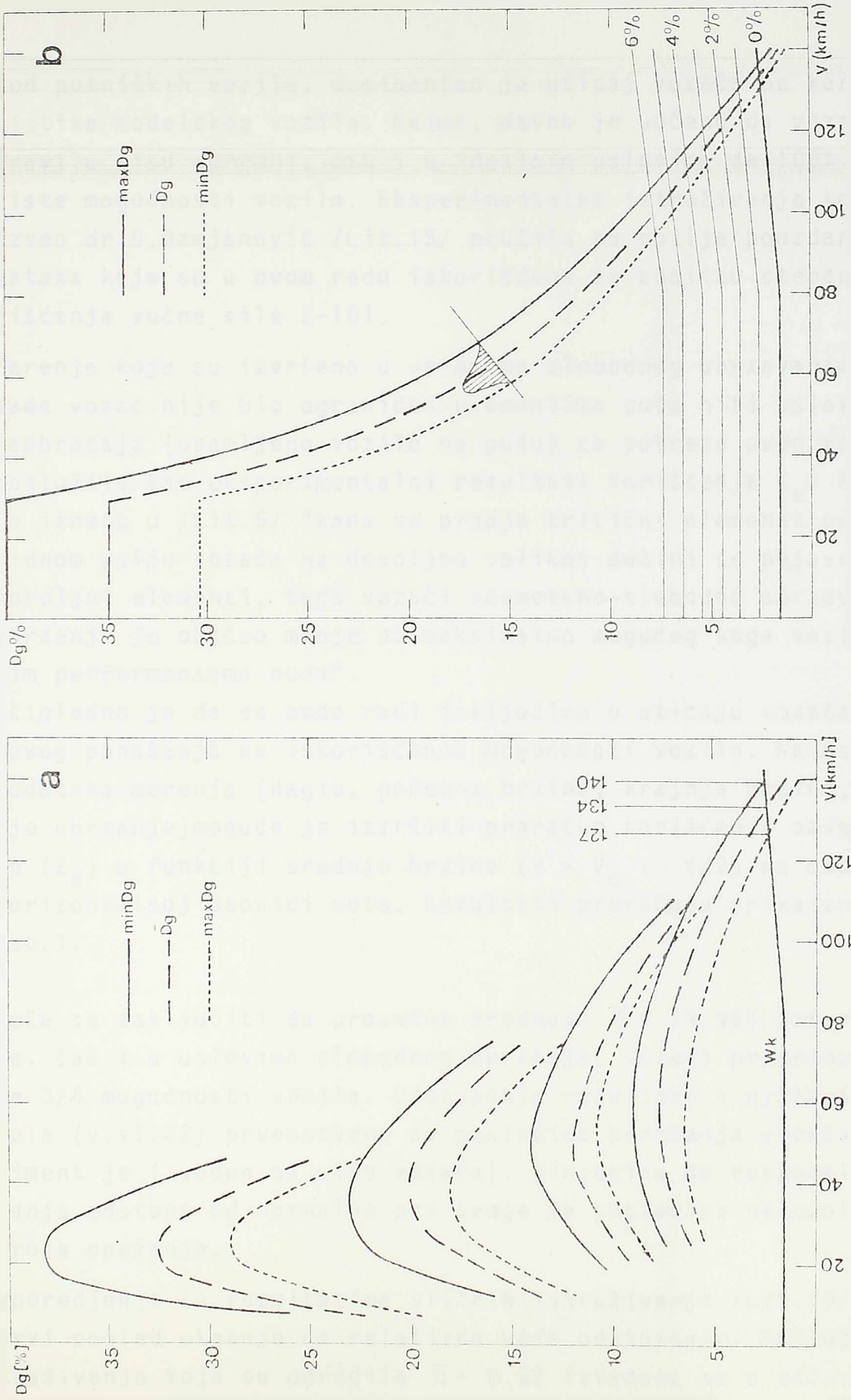
$G_{max}$  - maksimalna težina vozila (12,07 kN)

$SBN_g$  - slučajni broj normalne raspodele izmedju 0 i 1,  $\mu = 0,5$ ,

$\sigma = 0,15$ .

Za brzine  $V < 30 \text{ km/h}$   $D_g = \text{const}$ , odnosno vrednosti  $D_g$  za brzinu  $V = 30 \text{ km/h}$ .

Grafik funkcije  $D_g = f(V)$  prikazan je na sl. 21.b.



sl.21. Promena dinamičkog faktora u funkciji brzine a. uticaj težine vozila na normalni dijagram vuče b. promena i rasponi idealizovanog dinamičkog faktora

Kod putničkih vozila, dominantan je uticaj vozača na karakteristike modelskog vozila. Naime, davno je uočeno da vozači po pravilu nisu spremni, čak i u idealnim uslovima da 100% iskoriste mogućnosti vozila. Eksperimentalna istraživanja koja je izveo dr D. Damjanović /Lit.15/ pružila su obilje pouzdanih podataka koja su u ovom radu iskorišćena za analizu stepena korišćenja vučne sile  $Z_{101}$ .

Merenja koja su izvršena u uslovima slobodnog ubrzavanja, tj. kada vozač nije bio ograničen elementima puta niti uslovima saobraćaja (usamljeno vozilo na putu) za potrebe ovog rada su poslužila kao eksperimentalni rezultati korišćenja  $Z_e$ . Kao što je izneto u /Lit.5/ "kada se prodje kritični elemenat puta i u vidnom polju vozača na dovoljno velikoj dužini se pojave vrlo povoljni elementi, tada vozači neometano-slobodno ubrzavaju... ubrzanje je obično manje od maksimalno mogućeg koga vozilo svojim performansama nudi".

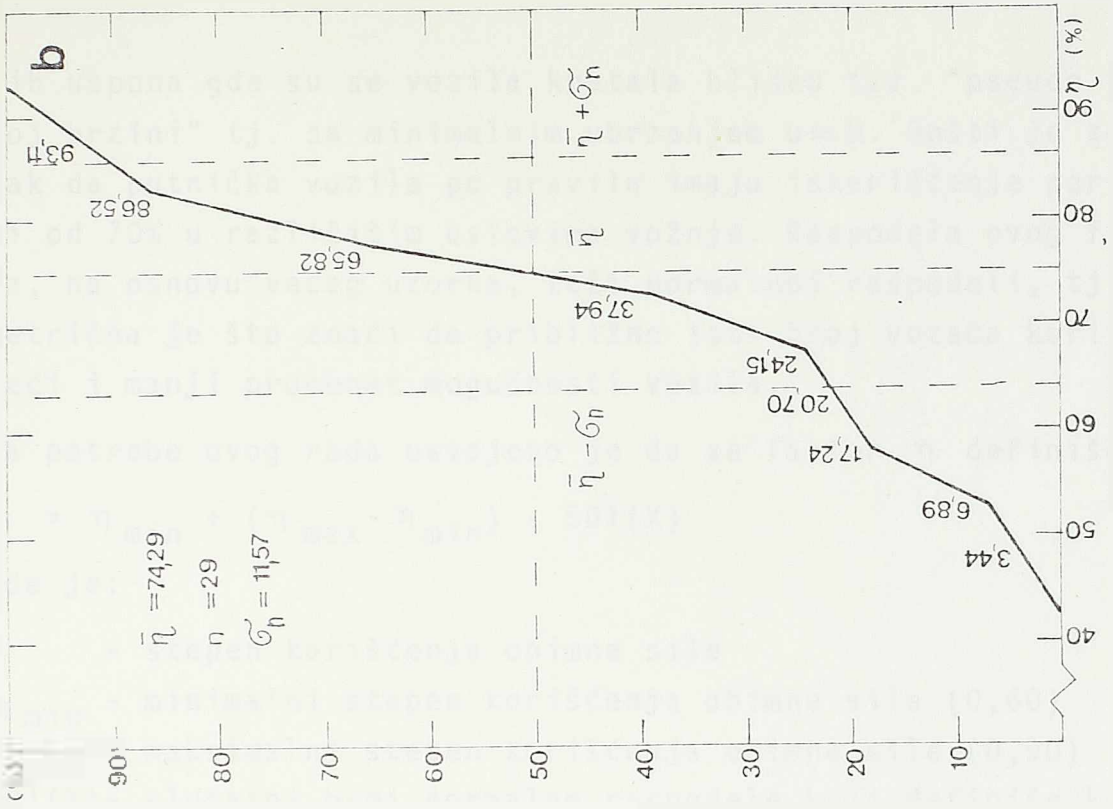
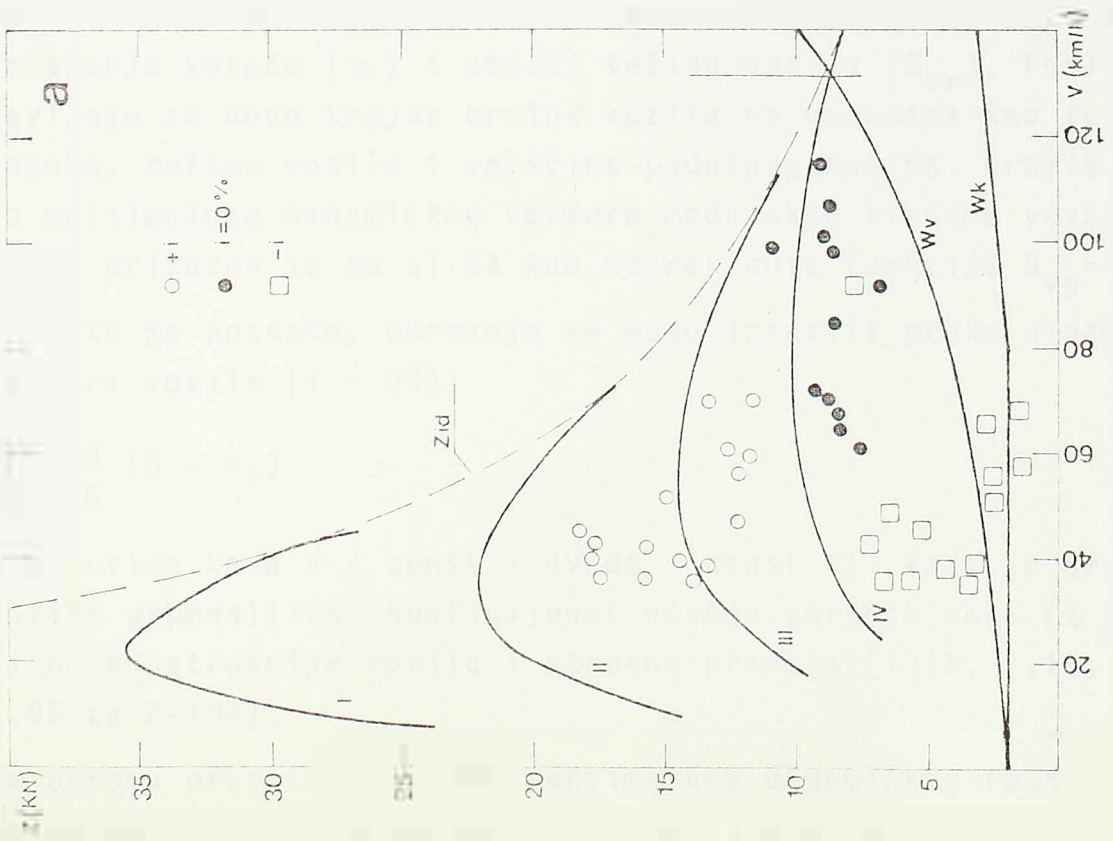
Očigledno je da se ovde radi isključivo o uticaju vozača i njegovog ponašanja na iskorišćenje mogućnosti vozila. Na osnovu podataka merenja (nagib, početna brzina, krajnja brzina, srednje ubrzanje) moguće je izvršiti proračun korišćenja obimne sile ( $Z_e$ ) u funkciji srednje brzine ( $V = V_0 + V/2$ ) na usponima i horizontalnoj deonici puta. Rezultati proračuna prikazani su u tab.1.

Može se zaključiti da prosečna vrednost  $\bar{\eta} = 74.98\%$  potvrđuje da, čak i u uslovima slobodnog ubrzanja, vozači prosečno koriste 3/4 mogućnosti vozila. Odstupanja rezultata i njihova raspodela (v.sl.22) prvenstveno su posledica ponašanja vozača (eksperiment je izveden sa više vozača). Činjenica da raspodela opažanja odstupa od normalne pre svega je posledica nedovoljnog broja opažanja.

Uporedjenje sa rezultatima sličnih istraživanja /Lit.35/ na prvi pogled ukazuju na relativno veća odstupanja. Medjutim, istraživanja koja su odredila  $\bar{\eta} = 0.67$  izvedena su u uslovima du-

$+i$	$V_o$	$\Delta V$	$V$	$\bar{u}$	$W_V$	$Z_e - W_V$	$Z_{st} - W_V$	$\eta$
%	km/h	km/h	km/h	m/s <sup>2</sup>	N	N	N	%
4	26	20	36	9.90	45	2171	1714	76.93
4	30	24	42	0.74	61	2116	1518	68.95
5.5	54	10	59	0.23	120	1311	1052	76.89
3.6	30	16	38	0.56	50	2146	1245	54.39
3.6	28	17	36.5	0.63	46	2172	1340	58.05
7	50	6	53	0.33	97	2028	1337	58.64
6.5	30	20	40	0.75	54	2142	1805	82.73
5	24	24	36	0.74	45	2141	1628	72.59
1	60	19	69.5	0.59	166	1226	994	77.60
6.4	58	6	61	0.22	128	1303	1139	85.26
4	10	15	47.5	0.42	78	1314	1126	83.27
5.5	10	12	56	0.30	108	1323	1098	81.56
4.2	37	11	42.5	0.89	62	2115	1724	79.69
3.6	32	14	39	0.65	52	2164	1364	59.47
7	32	26	45	0.66	69	1846	1748	94.08
3.5	63	13	69.5	0.50	166	1226	1159	93.53
0	92	13	98.5	0.46	334	882	761	81.44
0	65	10	70	0.45	169	831	716	82.06
0	90	5	92.5	0.15	295	686	414	41.88
0	71	10	76	0.43	199	821	685	78.48
0	105	5	107.5	0.22	398	564	493	77.60
0	112	6	115	0.19	456	486	456	86.84
0	66	10	71	0.46	174	826	727	84.43
0	57	8	61	0.36	128	853	608	63.05
0	60	10	65	0.41	145	841	668	73.43
0	62	10	67	0.42	155	835	680	75.96
0	96	4	98	0.26	331	639	529	73.75
0	80	10	85	0.36	249	741	595	73.11
0	98	6	101	0.26	351	610	532	78.92

tab.1. Stepen iskorišćenja obimne sile ( $\eta$ ) prema merenjima izvršenim u /Lit.5/



sl.22. Stepen korišćenja obimne sile u uslovima slobodnog ubrzavanja i statistički prikaz promene parametra (%)

žih uspona gde su se vozila kretala blisko tzv. "pseudo trajnoj brzini" tj. sa minimalnim ubrzanjem  $u \approx 0$ . Opšti je zaključak da putnička vozila po pravilu imaju iskorišćenje performansi od 70% u različitim uslovima vožnje. Raspodela ovog faktora, na osnovu većeg uzorka, teži normalnoj raspodeli, tj. simetrična je što znači da približno isti broj vozača koristi veći i manji procenat mogućnosti vozila.

Za potrebe ovog rada usvojeno je da se faktor  $\eta$  definiše kao:

$$\eta = \eta_{\min} + (\eta_{\max} - \eta_{\min}) \cdot SB1(X)$$

gde je:

$\eta$  - stepen korišćenja obimne sile

$\eta_{\min}$  - minimalni stepen korišćenja obimne sile (0,60)

$\eta_{\max}$  - maksimalni stepen korišćenja obimne sile (0,90)

SB1(X) - slučajni broj normalne raspodele koji definiše karakteristike vozača (0-1,  $\mu = 0,5$ ,  $\sigma = 0,15$ ) (v. pogl. 2.1).

Primenom ovakvog koncepta, moguće je konstruisati grafik tzv. "pseudo maksimalnog dinamičkog faktora" koji uključuje uticaj ponašanja vozača ( $\eta$ ) i uticaj težine vozila ( $G_{br}$ ). Posledično, javljaju se nove trajne brzine vozila na usponima kao funkcija vozača, težine vozila i veličine podužnog nagiba. Grafik pseudo maksimalnog dinamičkog faktora modelskog sistema vozač-vozilo PA prikazan je na sl. 23 kao neprekinuta funkcija  $D_{vg} = f(V)$ .

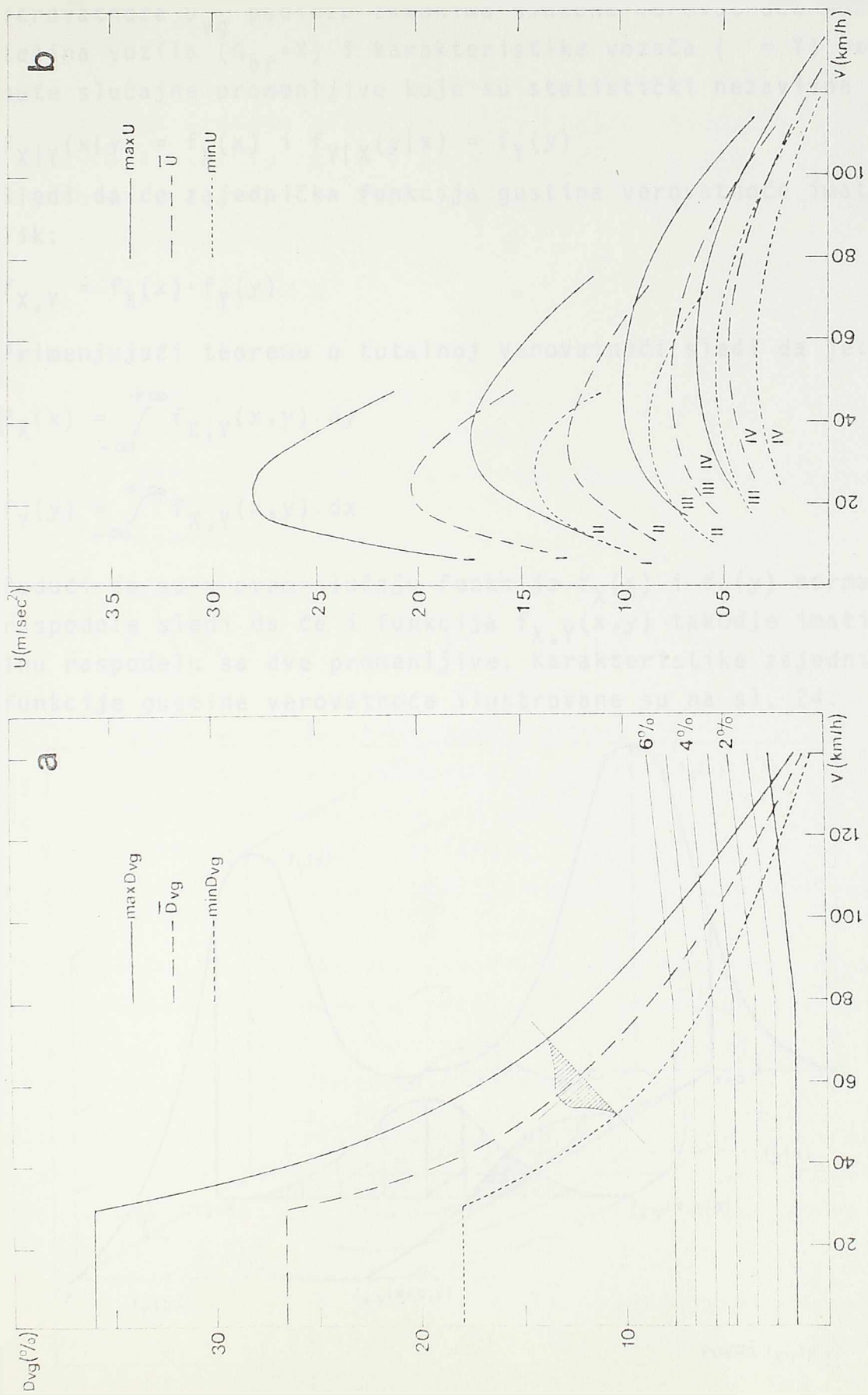
Kao što je poznato, ubrzanja se mogu izraziti preko dinamičkog faktora vozila ( $i = 0\%$ ):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta} (D - w_k)$$

u uslovima kada  $V \neq \text{const}$  i  $dv/dt = \text{const}$  tj. kada je brzina vozila promenljiva. Koeficijent učešća obrtnih masa ( $\delta$ ) zavisi od konstrukcije vozila i stepena prenosa (1,15, 1,10, 1,08, 1,05 za Z-101).

Na osnovu proračuna pseudo-maksimalnog dinamičkog faktora i primenom odgovarajućeg koeficijenta ( $\delta$ ) može se konstruisati grafik pseudo-maksimalnih ubrzanja sistema vozač-vozilo PA na horizontalnom putu ( $i=0\%$ ) koji je prikazan na sl. 23.





sl.23. Pseudomaksimalni dinamički faktor ( $D_{vg}$ ) i pseudomaksimalna ubrzanja ( $u_{vg}$ ) sistema vozač-vozilo PA na horizontalnom putu

Verovatnoća  $D_{vg}$  podleže zakonima složene verovatnoće pošto su težina vozila ( $G_{br}=X$ ) i karakteristike vozača ( $= Y$ ) neprekidne slučajne promenljive koje su statistički nezavisne tj.

$$f_{X|Y}(x|y) = f_X(x) \text{ i } f_{Y|X}(y|x) = f_Y(y)$$

Sledi da će zajednička funkcija gustina verovatnoće imati oblik:

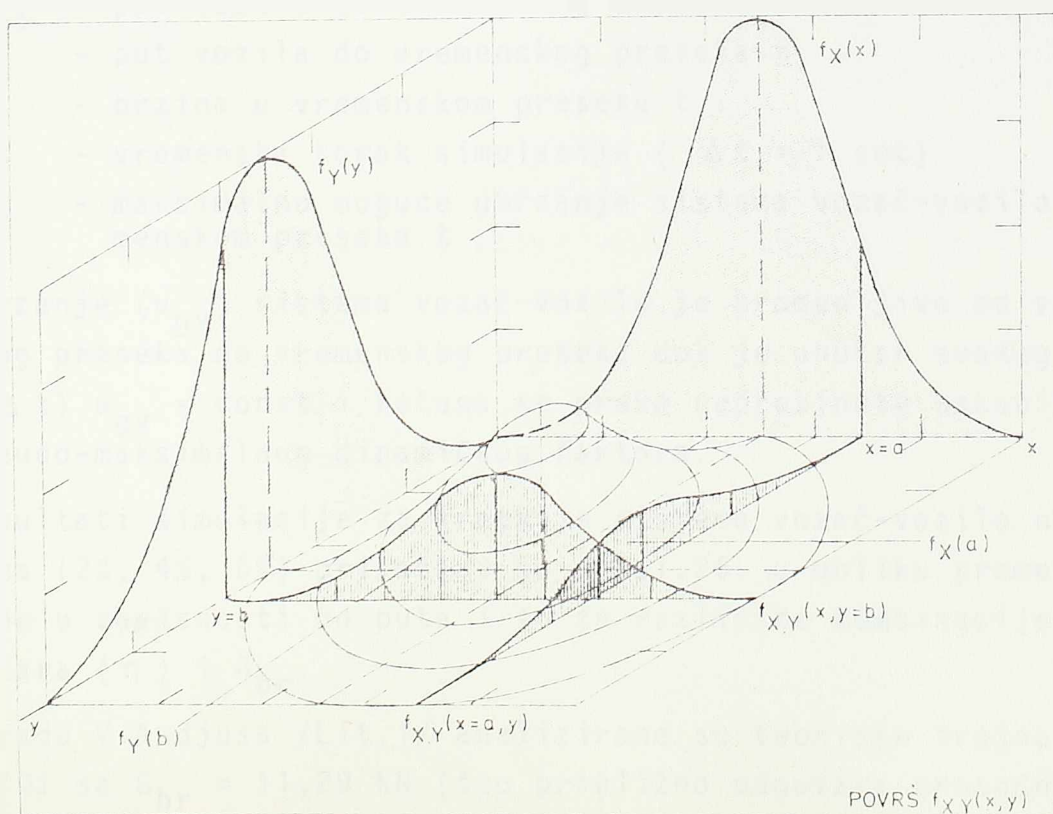
$$f_{X,Y} = f_X(x) \cdot f_Y(y)$$

Primenjujući teoremu o totalnoj verovatnoći sledi da je:

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y}(x,y) \cdot dy$$

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y}(x,y) \cdot dx$$

Budući da su u ovom slučaju funkcije  $f_X(x)$  i  $f_Y(y)$  normalne raspodele sledi da će i funkcija  $f_{X,Y}(x,y)$  takodje imati normalnu raspodelu sa dve promenljive. Karakteristike zajedničke funkcije gustine verovatnoće ilustrovane su na sl. 24.



sl.24.

Ilustrativni prikaz raspodele gustina verovatnoće za dve statički nezavisne promenljive normalne raspodele

Sa iznetim polaznim pretpostavkama, izvršena je simulacija kretanja usamljenog PA na usponima (2%, 4%, 6%) sa polaznom brzinom ( $V_0$ ) od 120 km/h i vremenskim korakom  $t=1$  sec. U svakom vremenskom preseku proračunata je brzina, dinamički faktor sistema vozač-vozilo ( $D_{vg}$ ) i na osnovu  $D_{vg}$  i otpora ( $w_{k+i}$ ) određeno ubrzanje ( $u_{gv}$ ). Nova brzina u sledećem vremenskom preseku računata je kao:

$$V_{t+1} = V_t + u_{gv} \cdot \Delta t$$

gde je:

$V_{t+1}$  - brzina u vremenskom preseku t+1

$V_t$  - brzina u vremenskom preseku t

$u_{gv}$  - maksimalno ubrzanje sistema vozač-vozilo u vremenskom preseku t

$\Delta t$  - vremenski korak simulacije ( $\Delta t = 1$  sec).

put je takodje računat kao  $s = f(t)$  odnosno:

$$S_{t+1} = S_t + V_t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot u_{gv}$$

$S_{t+1}$  - put vozila do vremenskog preseka t+1

$S_t$  - put vozila do vremenskog preseka t

$V_t$  - brzina u vremenskom preseku t

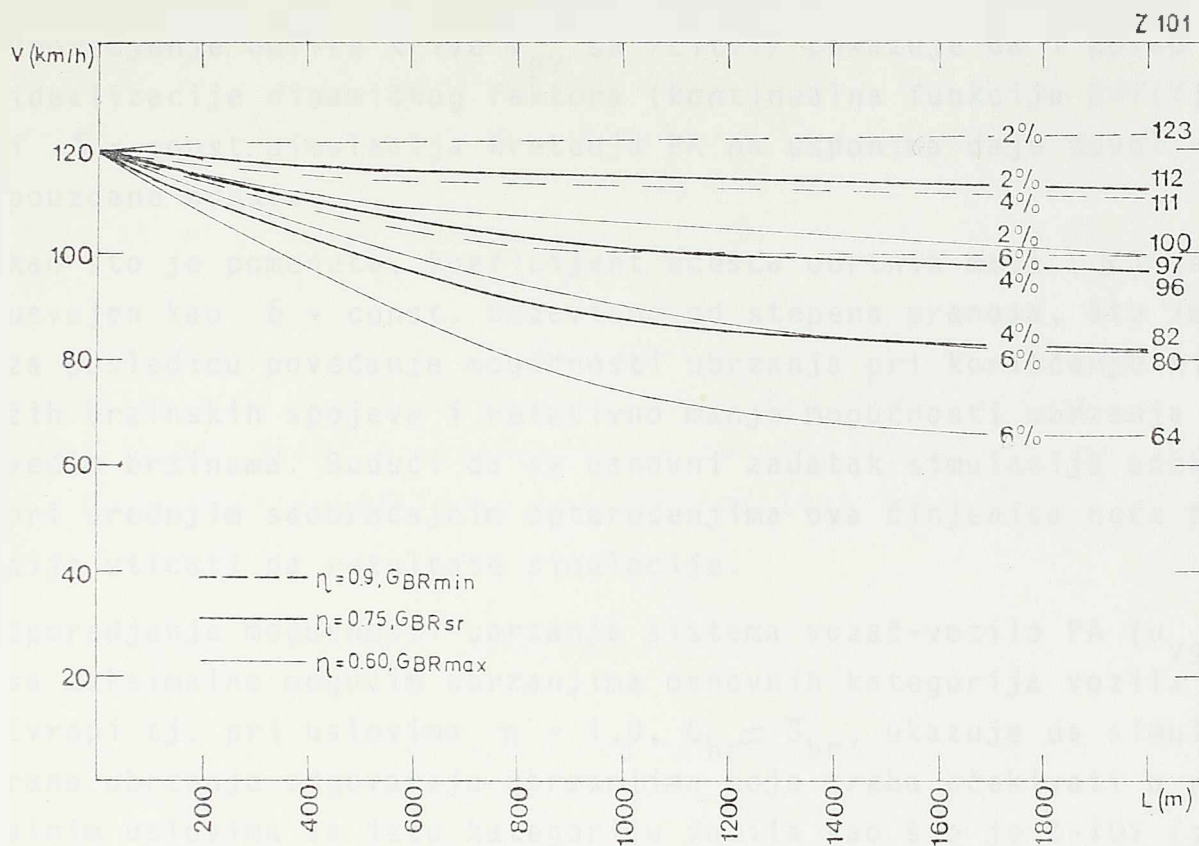
$\Delta t$  - vremenski korak simulacije ( $\Delta t = 1$  sec)

$u_{gv}$  - maksimalno moguće ubrzanje sistema vozač-vozilo u vremenskom preseku t

Ubrzanje ( $u_{gv}$ ) sistema vozač-vozilo je promenljivo od vremenskog preseka do vremenskog preseka dok je unutar svakog koraka ( $\Delta t$ )  $u_{gv} = \text{const.}$  i računa se preko neprekinute zakonitosti pseudo-maksimalnog dinamičkog faktora.

Rezultati simulacije za kretanje sistema vozač-vozilo na usponima (2%, 4%, 6%) prikazani su na sl.25. u obliku promene brzine u zavisnosti od puta i to za različite kombinacije parametara ( $\eta$ ) i  $G_{br}$ .

U radu V.Andjusa /Lit.1/ analizirane su teoriske trajne brzine Z-101 sa  $G_{br} = 11,29$  kN (što približno odgovara prosečnom  $G_{br} = 10,13$  kN primenjenom u ovom radu) bez uticaja vozača, tj. sa iskorišćenjem obimne sile  $Z_e$  od 100%. Rešenje je traženo preko linearizovanog dinamičkog faktora i primenom metode Runge-Kutta sa korakom proračuna  $v = F(x)$  pri  $h = \Delta x = 5$  m.



sl.25.

Promena brzine modelskog sistema vozač-vozilo PA na usponima i pseudo-trajne brzine

Uvodjenje faktora  $\eta$  koji reprezentuje uticaj vozača i težine  $G_{br}$  tj. stvaranjem odnosa vozač-vozilo, dobijaju se nove vrednosti tzv. pseudo trajnih brzina  $V_{gv} = F(G_{br}, \eta, i, x)$  prikazane u tab.2.

nagib %	max $V_{gv}$ km/h	$\bar{V}_{gv}$ km/h	min $V_{gv}$ km/h	teoriska $V_{tr}$ km/h
+ 2%	123	112	97	117
+ 4%	111	96	80	110
+ 6%	100	82	64	96

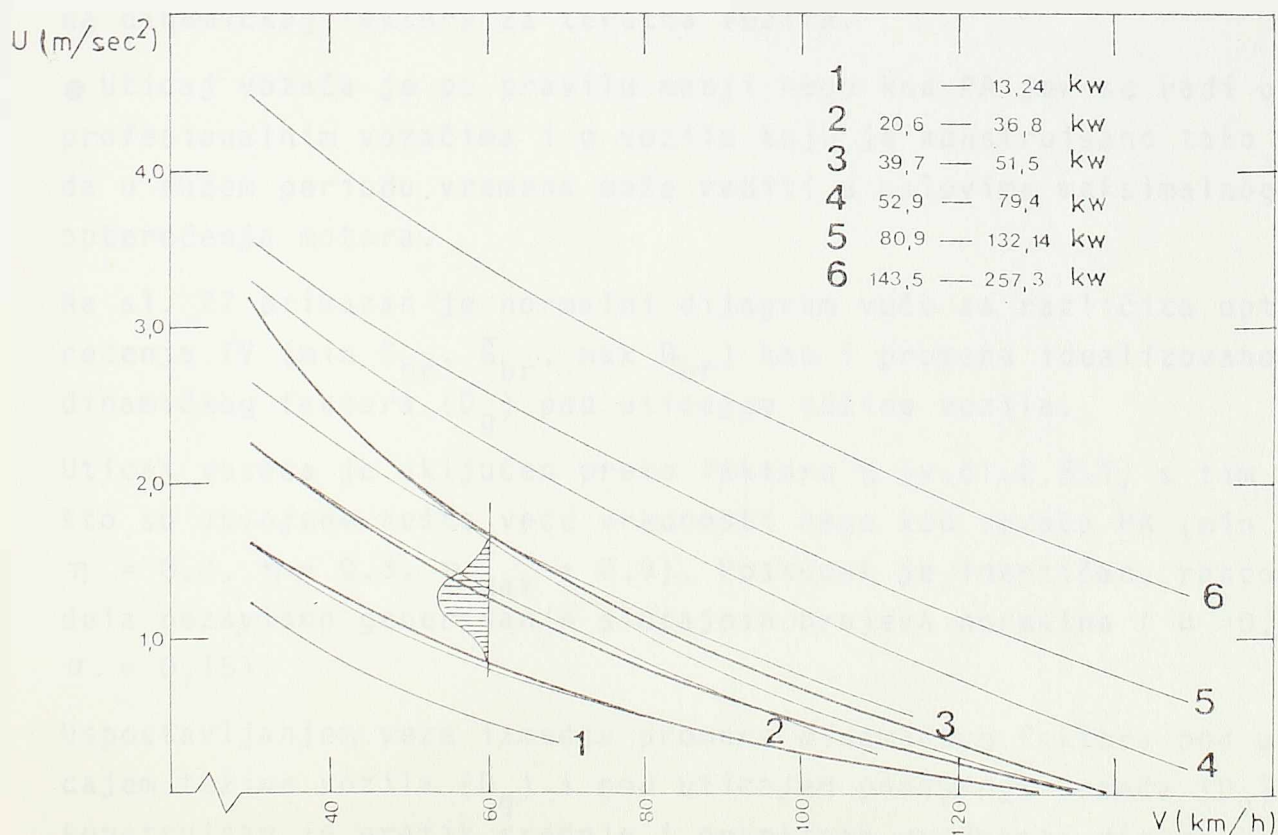
○ max  $V_{gv}$  pri  $\eta = 0,9, \min G_{br}$   
 $\bar{V}_{gv}$  pri  $\eta = 0,75, G_{br}$   
 min  $V_{gv}$  pri  $\eta = 0,6, \max G_{br}$

tab.2. Pseudo trajne brzine modela sistema vozač-vozilo PA

Uporedjenje oblika krive  $V_{gv}$  sa /Lit.1/ pokazuje da i pored idealizacije dinamičkog faktora (kontinualna funkcija  $D=f(V)$ ) i  $\delta = \text{const.}$  simulacija kretanja PA na usponima daje dovoljno pouzdane odnose.

Kao što je pomenuto, koeficijent učešća obrtnih masa ( $\delta$ ) je usvojen kao  $\delta = \text{const.}$  nezavisno od stepena prenosa, što ima za posledicu povećanje mogućnosti ubrzanja pri korišćenju nižih brzinskih spojeva i relativno manje mogućnosti ubrzanja pri većim brzinama. Budući da se osnovni zadatak simulacije očekuje pri srednjim saobraćajnim opterećenjima ova činjenica neće bitnije uticati na rezultate simulacije.

Uporedjenje mogućnosti ubrzanja sistema vozač-vozilo PA ( $u_{vg}$ ) sa maksimalno mogućim ubrzanjima osnovnih kategorija vozila u Evropi tj. pri uslovima  $\eta = 1,0$ ,  $G_{br} = \bar{G}_{br}$  ukazuje da simulirana ubrzanja odgovaraju ubrzanjima koja treba očekivati u realnim uslovima za istu kategoriju vozila kao što je Z-101 (sl. 26).



sl.26.  
Simulirana ubrzanja ( $u_{vg}$ ) i maksimalna ubrzanja pojedinih klasa evropskih vozila

S druge strane, eksperimentalna merenja ubrzanja u stvarnim uslovima slobodne vožnje daje relativno niske vrednosti  $u_{vg}$  /Lit.5/ koje retko prelaze  $1,0 \text{ m/sec}^2$  čak i pri vrlo niskim brzinama i idealnim uslovima. Budući da je cilj ovog rada da se simuliraju i određeni manevri (npr. promena saobraćajne trake) koji se po pravilu izvode sa većim ubrzanjima, logično je predpostaviti nešto više vrednosti  $u_{vg}$ .

Upoređenjem simuliranih vrednosti  $u_{vg} = f(V)$  za  $i=0\%$  sa nizom zakonitosti  $u = f(V)$  koji je ustanovljen istraživanjima u svetu /Lit.66/ može se ustanoviti da rasponi vrednosti (max-min  $u_{vg}$ ) obuhvataju praktično sve ustanovljene zakonitosti u području  $V > 30 \text{ km/h}$ .

### 2.3.2 Medjuzavisnosti vozač-vozilo (TV)

Primenom istog metoda kao i kod PA (čl.2,3,1) definisane su medjuzavisnosti vozač-vozilo TV. Medjutim, kao posledica statičkih i dinamičkih karakteristika, javljaju se i osnovne razlike:

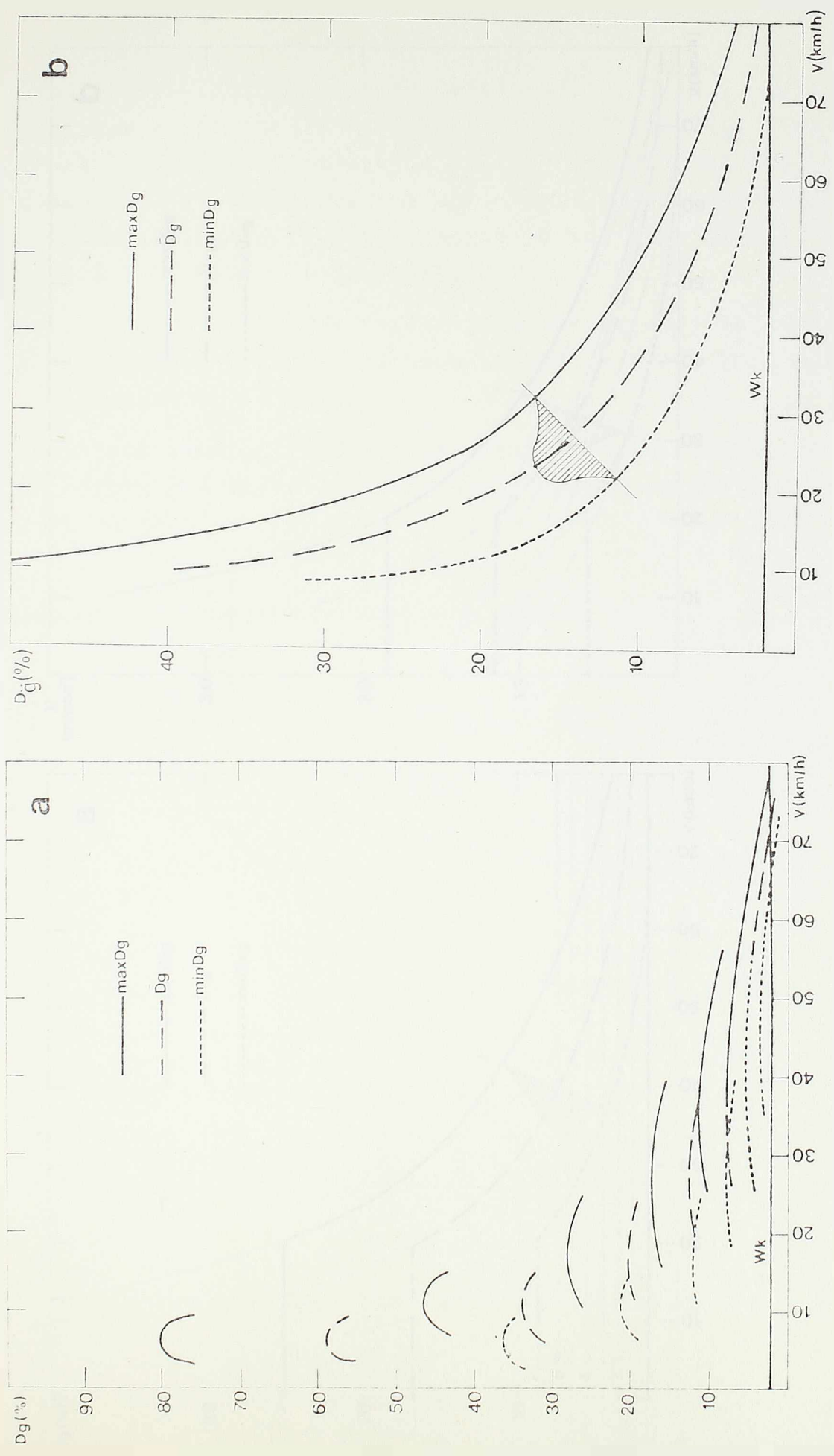
- Uticaj težine vozila ( $G_{br}$ ) je daleko značajniji kod proračuna dinamičkog faktora za teretna vozila.

- Uticaj vozača je po pravilu manji nego kod PA jer se radi o profesionalnim vozačima i o vozilu koje je konstruisano tako da u dužem periodu vremena može raditi u uslovima maksimalnog opterećenja motora.

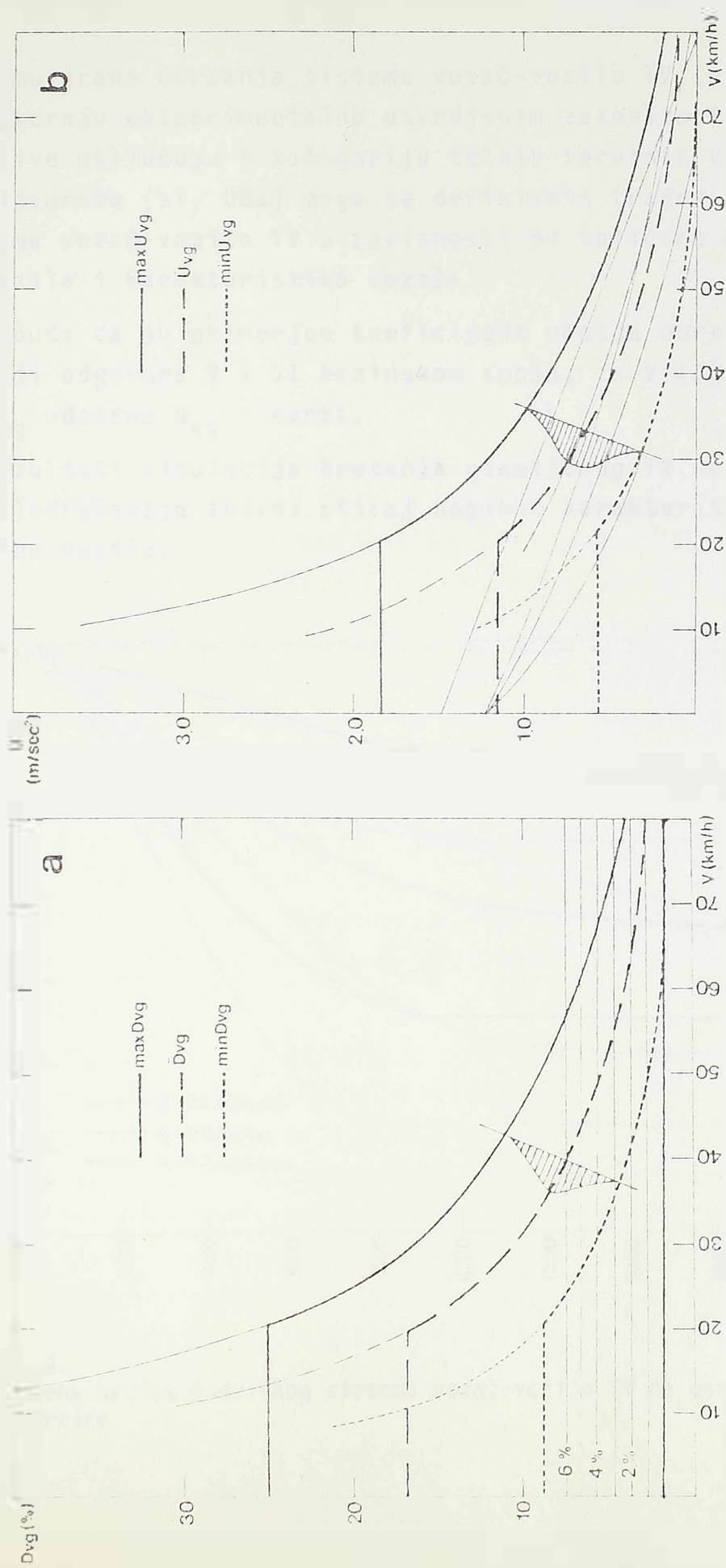
Na sl. 27 prikazan je normalni dijagram vuče za različita opterećenja TV ( $\min G_{br}$ ,  $G_{br}$ ,  $\max G_{br}$ ) kao i promena idealizovanog dinamičkog faktora ( $D_g$ ) pod uticajem težine vozila.

Uticaj vozača je uključen preko faktora  $\eta$  (v.čl.2.5.1) s tim što su usvojene nešto veće vrednosti nego kod vozača PA ( $\min \eta = 0,7$ ,  $\eta = 0,8$ ,  $\eta_{\max} = 0,9$ ). Postupak je identičan, raspodela nezavisno generisanih slučajnih brojeva normalna ( $\mu = 0,5$ ,  $\sigma = 0,15$ ).

Uspostavljanjem veze izmedju promene dinamičkog faktora pod uticajem težine vozila ( $D_g$ ) i pod uticajem ponašanja vozača ( $D_v$ ) konstruisan je grafik srednje i graničnih vrednosti dinamičkog faktora sistema vozač-vozilo TV (v.sl. 28). Na osnovu ove zakonitosti proračunat je dijagram ubrzanja ( $u_{vg}$ ) za teretna vozila i prikazan na sl. 28.



s1.27. Promena dinamičkog faktora u funkciji brzine a. uticaj težine vozila na normalni dijagram vuče b. promena i rasponi idealizovanog dinamičkog faktora



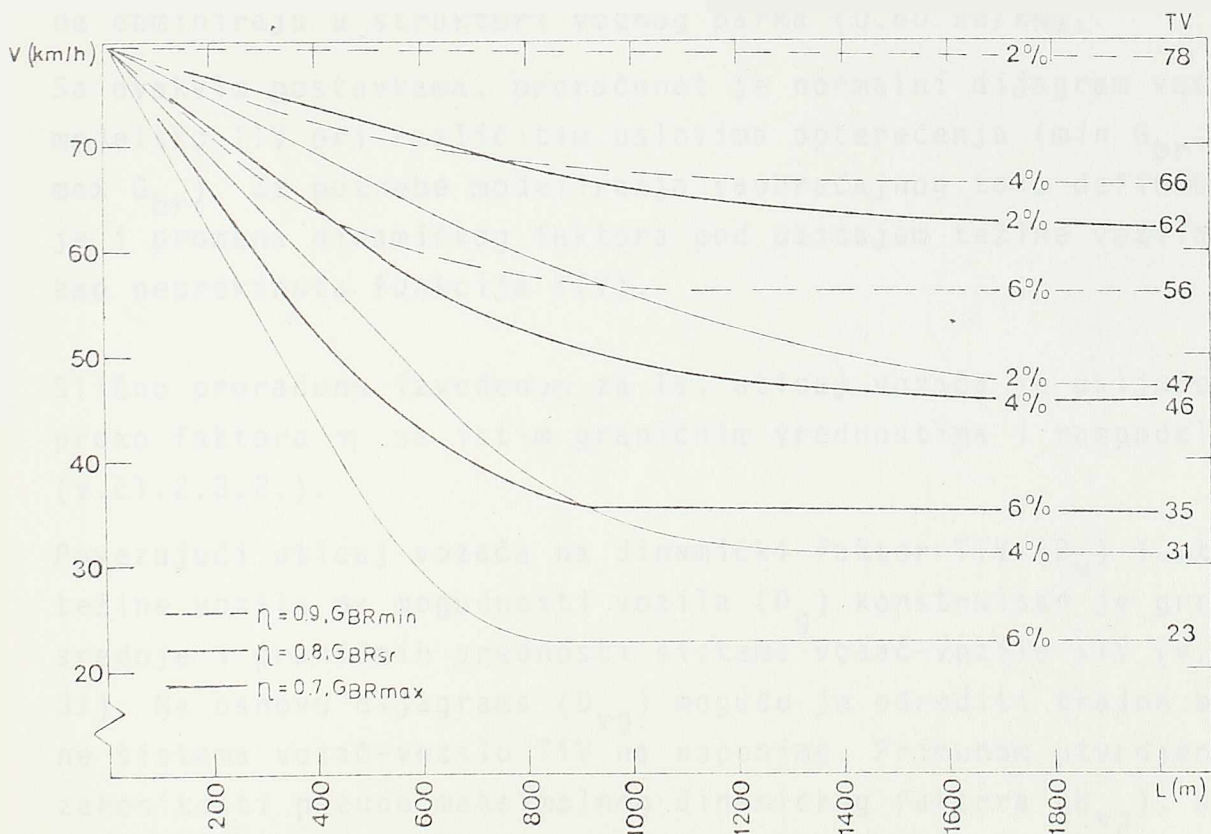
sl.28. Pseudomaksimalni dinamički faktor ( $D_{vg}$ ) i pseudomaksimalna ubrzanja ( $u_{vg}$ ) sistema vozač-vozilo TV na horizontalnom putu



Simulirana ubrzanja sistema vozač-vozilo TV ( $u_{vg}$ ) relativno odgovaraju eksperimentalno utvrđenim zakonitostima (prikazane krive uključuju i kategoriju teških teretnih vozila). Na osnovu dijagrama (sl. 28a) mogu se definisati trajne brzine ( $V_{\epsilon r}$ ) sistema vozač-vozilo TV u zavisnosti od veličine uspona, težine vozila i karakteristika vozača.

Budući da je primenjen koeficijent učešća obrtnih masa  $\delta = \text{const.}$  koji odgovara V i VI brzinskom spoju, za  $V < 20$  km/h usvojen je  $D_{vg}$  odnosno  $u_{vg} = \text{const.}$

Rezultati simulacije kretanja usamljenog TV na usponima (v.sl. 29) odražavaju zbirni uticaj nagiba, karakteristika vozača i težine vozila.



sl.29.

Promena brzine modelskog sistema vozač-vozilo TV na usponima i pseudotrajne brzine

### 2.3.3 Medjuzavisnosti vozač-vozilo (TTV)

Za razliku od modelskog vozila TV, modelsko vozilo TTV ima motor veće snage i veću ukupnu težinu. Budući da se modelsko TTV vozilo proizvodi u različitim kombinacijama (tegljač + poluprikolica, kamion sa prikolicom) za potrebe ovog rada usvojeno je da se, uz iste vučno-brzinske karakteristike, ukupna težina kreće u sledećim granicama:

min $G_{br}$	- prazno vozilo	- 137.29 kN
$G_{br}$	- 50% nosivosti	- 225.55 kN
max $G_{br}$	- 100% nosivosti	- 313.81 kN

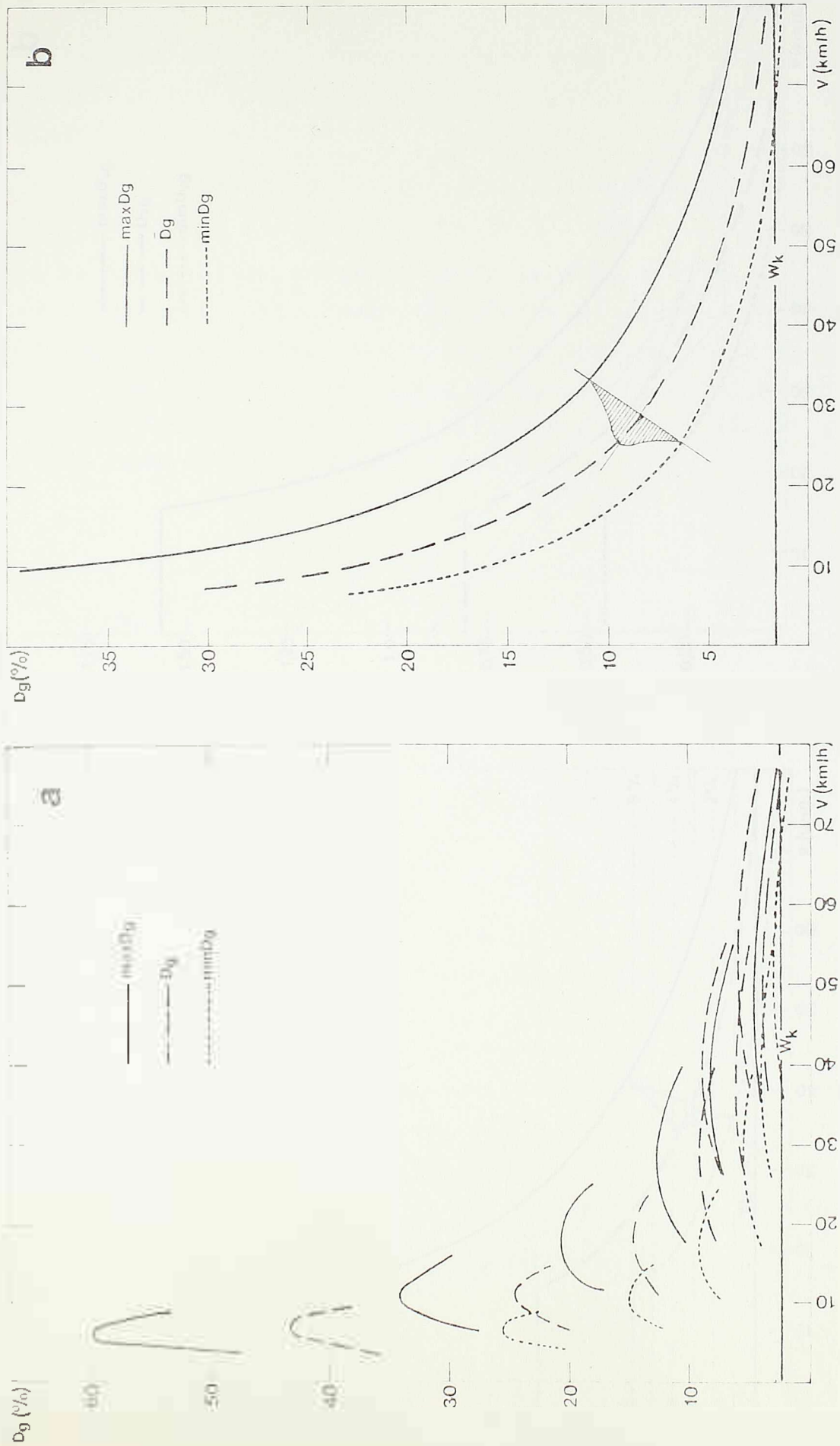
Na taj način se indirektno dobijaju nešto bolje performanse TTV koje se približavaju novim evropskim vozilima koja počinju da dominiraju u strukturi voznog parka (0.60 kW/kN).

Sa ovakvim postavkama, proračunat je normalni dijagram vuče za modelsko TTV pri različitim uslovima opterećenja ( $\min G_{br}$ ,  $G_{br}$ ,  $\max G_{br}$ ). Za potrebe modeliranja saobraćajnog toka definisana je i promena dinamičkog faktora pod uticajem težine vozila ( $D_g$ ) kao neprekinuta funkcija  $f(V)$ .

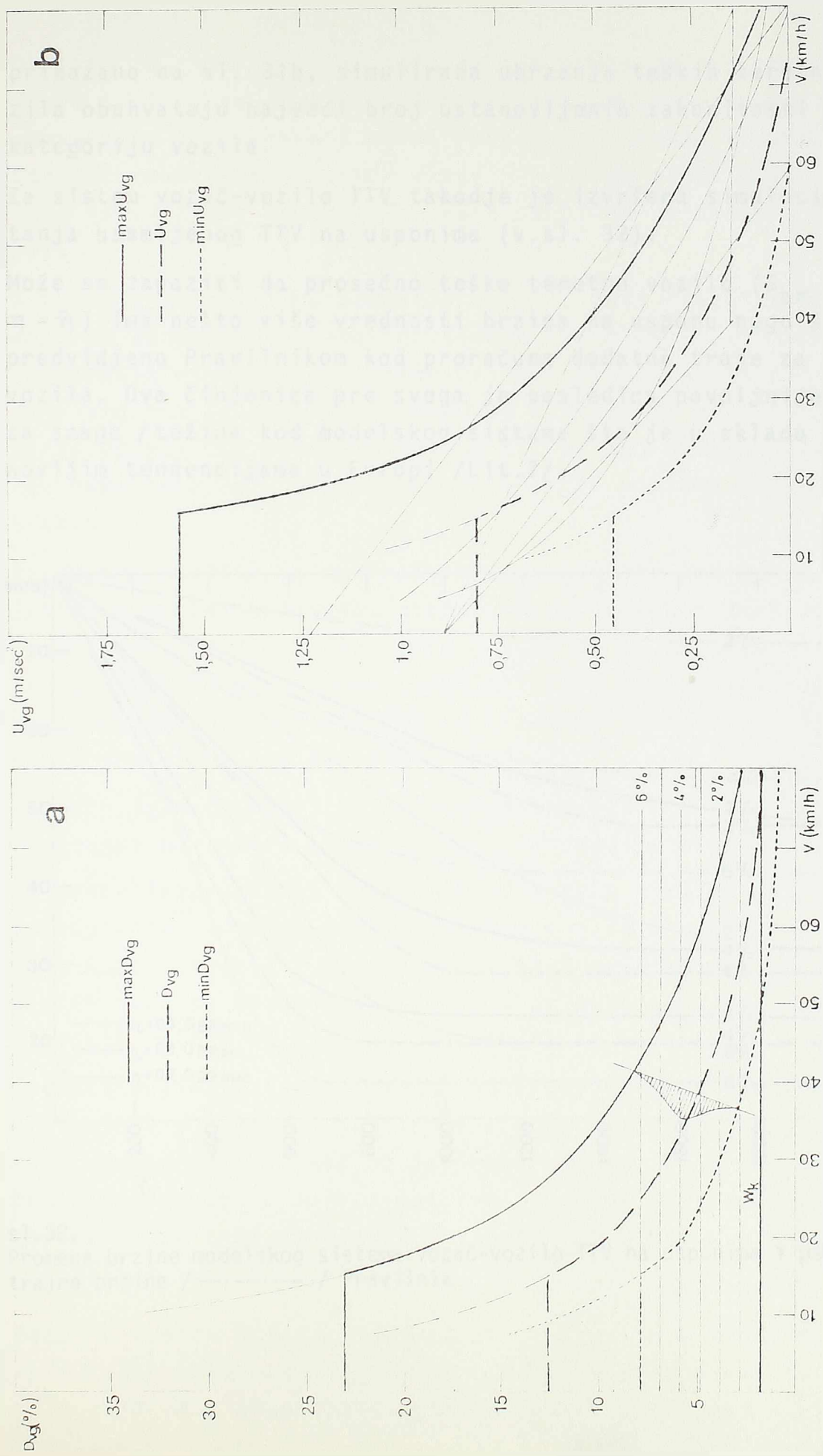
Slično proračunu izvedenom za TV, uticaj vozača je uključen preko faktora  $\eta$  sa istim graničnim vrednostima i raspodelom (v.čl.2.3.2.).

Povezujući uticaj vozača na dinamički faktor TTV ( $D_v$ ) i uticaj težine vozila na mogućnosti vozila ( $D_g$ ) konstruisan je grafik srednje i graničnih vrednosti sistema vozač-vozilo TTV (v.sl. 31). Na osnovu dijagrama ( $D_{vg}$ ) moguće je odrediti trajne brzine sistema vozač-vozilo TTV na usponima. Primenom utvrđene zakonitosti pseudo maksimalnog dinamičkog faktora ( $D_{vg}$ ), uz neophodnu idealizaciju koeficijenta učešća obrtnih masa ( $\delta$ ), proračunate su vrednosti ubrzanja sistema vozač-vozilo TTV ( $u_{vg}$ ) i prikazane na sl. 31.

U skladu sa ranije iznetim postavkama (v.čl. 2.3.2) za brzine  $V < 15$  km/h usvojeno je  $D_{vg} = \text{const.}$  odnosno  $u_{vg} = \text{const.}$  Upoređenjem sa inostranim iskustvima /Lit. 66, Lit. 35/ kao što je



sl.30. Promena dinamičkog faktora u funkciji brzine a. uticaj težine vozila na normalni dijagram vuče b. promena rasponi idealizovanog dinamičkog faktora

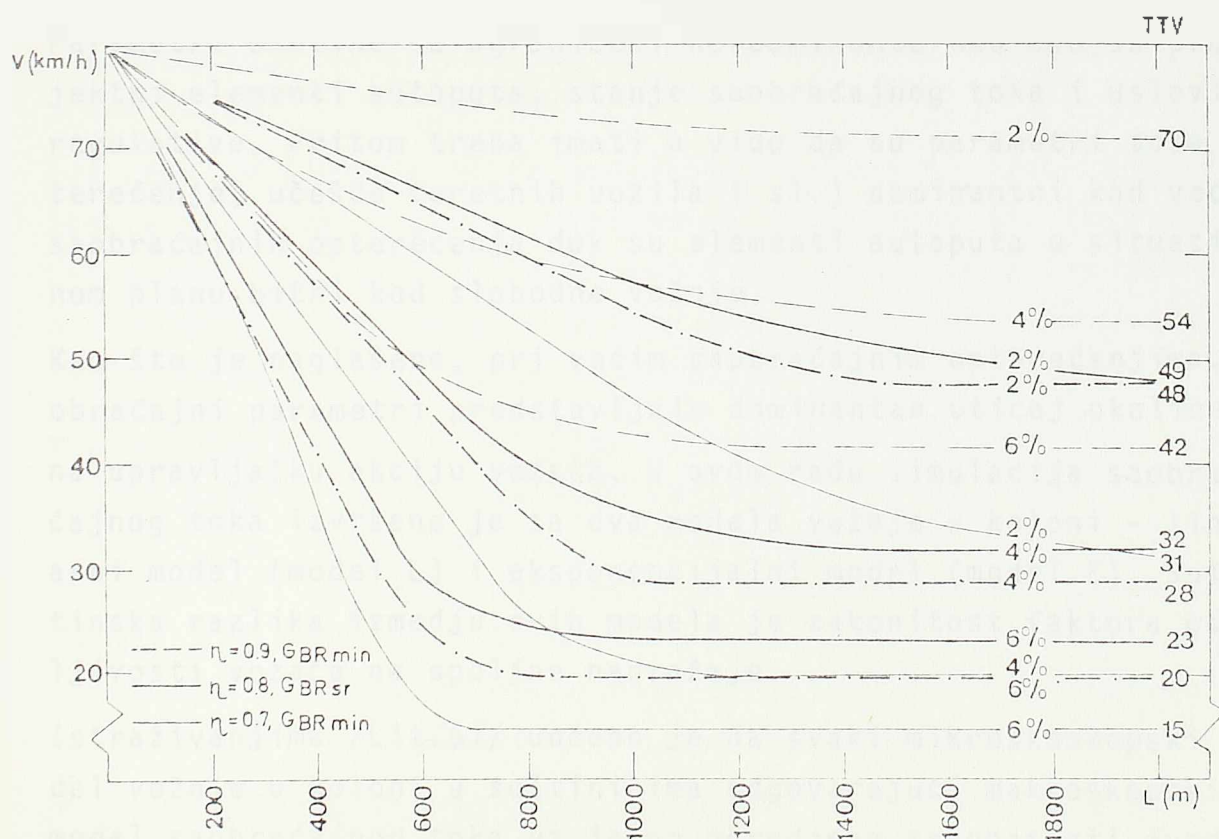


sl.31. Pseudomaksimalni dinamički faktor ( $D_{vg}$ ) i pseudomaksimalna ubrzanja ( $u_{vg}$ ) sistema vozač-vozilo TTV na horizontalnom putu

prikazano na sl. 31b, simulirana ubrzanja teških teretnih vozila obuhvataju najveći broj ustanovljenih zakonitosti za ovu kategoriju vozila.

Za sistem vozač-vozilo TTV takodje je izvršena simulacija kretanja usamljenog TTV na usponima (v.sl. 32).

Može se zapaziti da prosečno teško teretno vozilo ( $G_{br} = \bar{G}_{br}$ ,  $\eta = \bar{\eta}$ ) ima nešto više vrednosti brzina na usponu nego što je predvidjeno Pravilnikom kod proračuna dodatne trake za spora vozila. Ova činjenica pre svega je posledica povoljnijeg odnosa snaga / težina kod modelskog sistema što je u skladu sa najnovijim tendencijama u Evropi /Lit.7/.



sl.32.

Promena brzine modelskog sistema vozač-vozilo TTV na usponima i pseudo-trajne brzine /—·—·—·/ Pravilnik

## 2.4 OKOLINA

Okolina je osnovni izvor informacija prema kojima vozač usklađuje svoje upravljačke aktivnosti pokušavajući da neutrališe poremećaje iz okoline i održi ravnotežno stanje sistema. Obilje informacija koje prima vizuelnim putem vozač stalno filtrira i izdvaja one informacije koje su bitne za njegovu bezbednost.

U procesu simulacije, memorija i vreme rada računara uslovljavaju da se parametri okoline svesno ograniče i koncentrišu na najbitnije uticaje. Na primer, zbog karakteristika percepcije boja sigurno je da boja prethodnog vozila ima uticaja na ponašanje vozača kod vožnje u koloni ali je taj uticaj daleko nižeg reda nego npr. odstojanje vozila ili razlika u brzinama kretanja.

Parametri okoline su ograničeni na dominante kao što su projektni elementi autoputa, stanje saobraćajnog toka i uslovi regulative. Pritom treba imati u vidu da su parametri toka (opterećenje, učešće teretnih vozila i sl.) dominantni kod većih saobraćajnih opterećenja dok su elementi autoputa u situacionom planu bitni kod slobodne vožnje.

Kao što je naglašeno, pri većim saobraćajnim opterećenjima, saobraćajni parametri predstavljaju dominantan uticaj okoline na upravljačku akciju vozača. U ovom radu simulacija saobraćajnog toka izvršena je sa dva modela vožnje u koloni - linearni model (model L) i eksponencijalni model (model E). Suštinska razlika između ovih modela je zakonitost faktora osetljivosti vozača na spoljne nadražaje.

Istraživanjima /Lit.61/ uočeno je da svaki mikroskopski model vožnje u koloni u suštini ima odgovarajući makroskopski model saobraćajnog toka uz jasno određene zakonitosti fundamentalnog odnosa brzina - gustina - protok. Makroskopski model saobraćajnog toka dobija se integracijom mikroskopskog modela u uslovima stabilnog toka.

Bitan element uticaja saobraćaja je struktura saobraćajnog toka (učešće teretnih vozila) sa modelskim sistemima vozač - vozilo koji se u identičnim uslovima puta i saobraćaja različito ponašaju.

### 2.4.1 Projektni elementi

U uslovima slobodne vožnje, projektni elementi autoputa (poprečni profil, situacioni plan i podužni profil) su osnovni uzroci poremećaja u sistemu vozač-vozilo-okolina i prema njima vozač uskladjuje svoje upravljačke akcije. S druge strane, u svim analizama i studijama kapaciteta i nivoa usluge izdvajaju se sledeći bitni faktori projektne geometrije:

- uticaj poprečnog profila - širina saobraćajnih traka, bočna smetanja
- elementi situacionog plana - kod autoputeva imaju sekundaran značaj kod definisanja nivoa usluge i kapaciteta i uključuju se indirektno kroz brzinu u slobodnom toku
- podužni profil - najbitniji uticaj elemenata autoputa koji se povezuje sa strukturom saobraćajnog toka (učešće teretnih vozila).

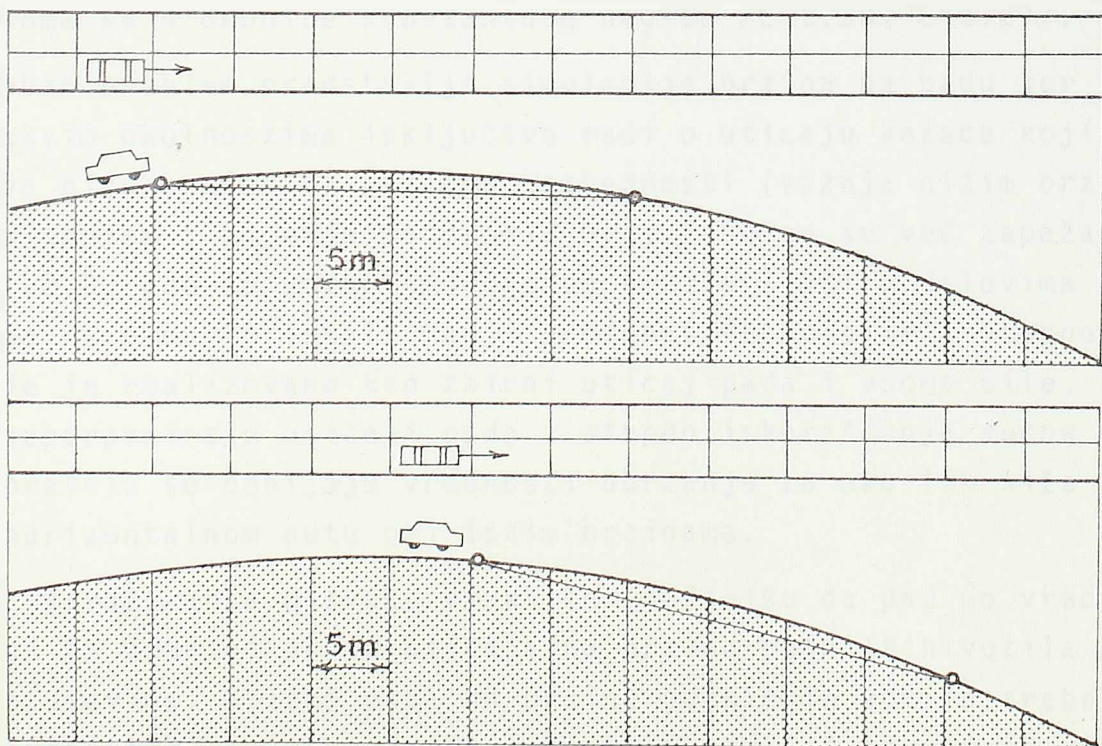
Sve analize ukazuju da je dominantni uticaj na nivo usluge posledica podužnog profila (zajedno sa strukturom saobraćajnog opterećenja) autoputa. U ovom radu u procesu simulacije saobraćajnog toka uključen je samo uticaj podužnog nagiba. Osnovni razlog za eliminisanje uticaja druge dve projekcije je:

- elementi poprečnog profila imaju sekundaran uticaj na nivo usluge autoputa, pri najtežim uslovima (širina saobraćajne trake 3,0 m. obostrana bočna smetanja udaljena 0,0 m.) ovaj uticaj iznosi oko 15%. Očigledno da se ovako teški uslovi neće javiti u normalnim okolnostima u našoj zemlji jer Pravilnik predviđa i propisuje kao minimalne uslove širinu saobraćajne trake 3,5 m. i udaljenost bočne smetnje min 0,9 m.
- elementi situacionog plana utiču na brzinu vozila u slobodnom toku. Sa porastom saobraćajnog opterećenja učešće slobodnih vozila brzo opada tako da npr. pri opterećenju od 2000 voz/h/smeru iznosi oko 18%. S druge strane, već pri prosečnom poluprečniku  $R = 450$  m. i zakrivljenosti  $0-150$  ( $^{\circ}/\text{km}$ ) brzine u krivinama se kreću od 100-105 km/h što je blisko maksimalno dopuštenim brzinama na autoputevima (120 km/h). Budući da se kod autoputeva (izuzev u teškim terenskim uslovima) po pravilu radi o prosečnim poluprečnicima reda veličine oko 1000 m, imaju-

ći u vidu i činjenicu da elementi situacionog plana utiču samo na slobodna vozila u saobraćajnom toku, logično je u simulaciji saobraćajnog toka na autoputevima izostaviti uticaj elementa situacionog plana.

Uticaj podužnog nagiba na uslove kretanja vozila uveden je preko dinamičkog faktora vozila kao što je objašnjeno u poglavlju 2.3. Na odgovarajućim dijagramima dinamičkog faktora za različite vrste modelskih vozila (PA, TV, TTV) unete su vrednosti podužnih nagiba i na osnovu ovih odnosa mogu se definisati trajne brzine vozila na usponu. Istovremeno, simulacijom kretanja slobodnih vozila na usponu (PA - S1.25, TV - S1.29, TTV - S1.32) jasno se uočava dominantni uticaj podužnog nagiba na brzinu kretanja vozila.

Poseban problem predstavljaju deonice kod kojih podužni nagib  $i \neq \text{const}$ , odnosno deonice na kojima se vrši zaobljenje preloma nivelete. Budući da je ispitivana deonica podeljena u module veličine 5 m, x t<sub>s</sub> (v.pogl.3.2), uticaj promene podužnog nagiba uključen je u model kao što je prikazano na sl.33.



sl.33.

Model simulacije podužnih nagiba na deonicama vertikalnih krivina



Iako je jasno da bi dužina tetive koja odražava prosečni nagib kojim se vozilo kreće tokom jednog vremenskog koraka ( $\Delta t = 1 \text{ sec}$ ) morala biti funkcija trenutne brzine ( $v_t$ ) u ovom modelu je usvojena konstantna dužina koja odgovara dužini 6 modula (30 m) tj.  $v_t = 108 \text{ km/h}$ . Razlog za ovakvu postavku je tehničke prirode jer se bitno skraćuje vreme rada računara i potrebna memorija. Činjenica da se obično radi o velikim vrednostima poluprečnika ( $R_v$ ) i relativno malim oštrinama preloma ( $\Delta i$ ) podržava ovako uprošćavanje i uverenje da neće bitnije uticati na vrednosti brzina pri srednjim i većim saobraćajnim opterećenjima.

S druge strane, teretna vozila se po pravilu kreću manjim brzinama tako da bi za ovu vrstu vozila tetiva iznosila oko 15-20 m. Ispitivanjem je utvrđeno da veličina tetive bitnije ne utiče na rezultate simulacije (skraćenje tetive na 3 modula, tj. 15 m. uslovljava promenu brzine saobraćajnog toka pri identičnim uslovima za manje od 1 km/h). Verodostojni rezultati se dobijaju čak i u uslovima aproksimacije nivelete u području preloma sa 4 deonice konstantnog nagiba /Lit.30, Lit.27/.

Poseban problem predstavlja simulacija brzina na padu jer se u takvim okolnostima isključivo radi o uticaju vozača koji održava nižu brzinu iz razloga bezbednosti (vožnja nižim brzin-skim spojem i kočenje motorom). Ovaj fenomen se već zapaža u pogl.2.3, gde su vozači modelskog vozila Z-101 u uslovima ubrzanja na padu koristili manji procenat vučne sile i ukupno ubrzanje je realizovano kao zbirni uticaj pada i vučne sile, kada se superponiraju uticaji pada i stepen iskorišćenja vučne sile po pravilu se dobijaju vrednosti ubrzanja za oko 15% niže nego na horizontalnom putu pri istim brzinama.

Sva istraživanja u svetu praktično definišu da pad do vrednosti od 4% nema nikakvog uticaja na brzinu putničkih vozila na autoputevima. Uticaj pada na brzinu putničkih vozila treba očekivati tek preko vrednosti od -4% s tim što se pad od -4% izjednačava sa vrednošću 0% (pad -4% je relativna nula) a svi ostali padovi  $< -4\%$  izjednačavaju sa ekvivalentnim usponom prema:

$$-i\% = +i\% = -1 \cdot (-i + 4) \quad \forall -i\% < -4\%$$

Ovaj odnos je potvrđen i eksperimentalnim opažanjima /Lit.35/ i usvojen u propisima niza zemalja za primenu u procesu proračuna kapaciteta i nivoa usluge.

Na osnovu postavki iznetih u čl.2.3.1 koji obradjuje medjuzavisnosti vozač-vozilo PA, može se konstruisati dijagram trajnih brzina na usponima ( $V=f(i)$ ) kojima sistem vozač-vozilo PA može da se kreće ukoliko se radi o slobodnom vozilu (čl.2.1.2). Imajući u vidu prethodni stav o uticaju pada ( $-i$ ) na brzinu kretanja slobodnih vozila PA, grafik  $V_{s1} = f(+i)$  prikazan je na sl. 34-a.

Može se zapaziti da su ove brzine veće od  $V_{max}^R$  tj. brzine koja je dozvoljena regulativnim merama na autoputevima ( $V_{max}^R = 120$  km/h) i to na manjim usponima i padovima. Uvodjenjem pojma željene brzine u slobodnoj vožnji (v.pogl.2.1.2) ublažava se nesklad izmedju mogućnosti sistema vozač-vozilo PA i mera regulative (v.sl. 34-b). Prikazana zavisnost  $V = f(+i)$  relativno dobro odgovara vrednostima ustanovljenim merenjima brzina PA pri slobodnoj vožnji na autoputevima sa dve saobraćajne trake po smeru u SR Nemačkoj /Lit.27/.

Kretanje teretnih vozila na padu predstavlja posebnu temu i dosadašnja istraživanja daju različite rezultate koji zavise od karakteristika voznog parka i profesionalnih vozača. U SR Nemačkoj /Lit.27/ srednja brzina kretanja teretnih vozila na padu i usponu definisana je kao:

$$V_{50}^{TV} = 87 - 3 e^{0,578 s}$$

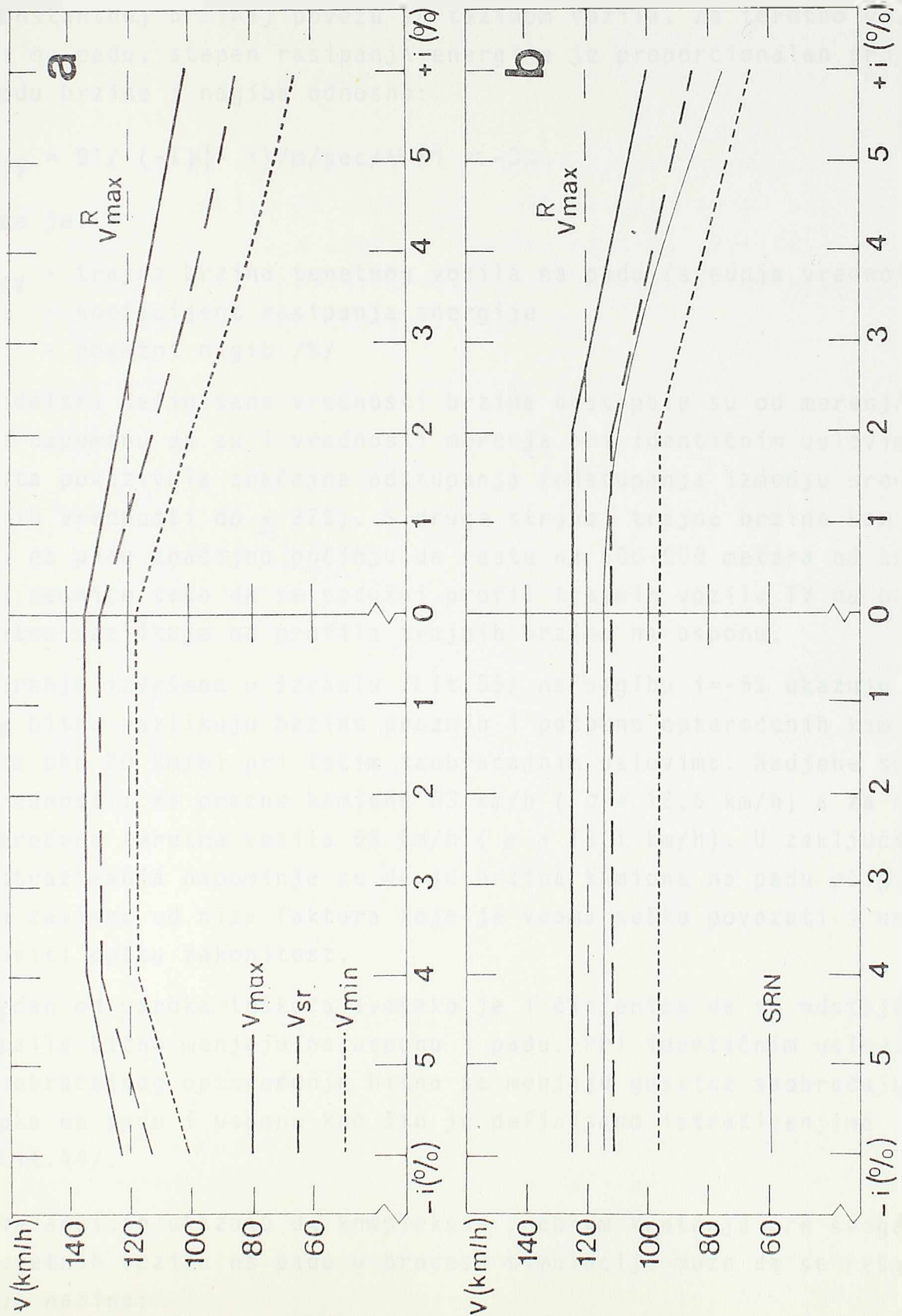
gde je:

$V_{50}^{TV}$  - osnovna brzina teretnih vozila /km/h/

$s$  - podužni nagib

Prema iznetoj formulaciji, u uslovima pada, dolazi do relativnog porasta brzine u odnosu na deonicu sa  $i=0\%$  (npr. na  $i = -4\%$  brzina teretnih vozila je veća za 2,7 km/h nego na horizontalnoj deonici).

Jedan od modela koji je primenjen u SAD /Lit.35/ zasniva na postavci da se mogućnosti košenja (izražene preko maksimalno



sl.34.

Zakonitost promene brzine u slobodnom toku u zavisnosti od podužnog nagiba - vozač-vozilo PA a. mogućnosti modelskog sistema b. korigovane vrednosti uvođenjem željenih brzina

dozvoljenog rasipanja energije kroz duži period vremena pri konstantnoj brzini) povežu sa težinom vozila. Za teretno vozilo na padu, stepen rasipanja energije je proporcionalan proizvodu brzine i nagiba odnosno:

$$\bar{V}_{TV} = 91 / (-1) \cdot (-i) / \text{m/sec} / \forall -i < -3\%$$

gde je:

$\bar{V}_{TV}$  - trajna brzina teretnog vozila na padu (srednja vrednost)  
 91 - koeficijent rasipanja energije  
 i - podužni nagib %/

Modelski definisane vrednosti brzina odstupale su od merenja uz napomenu da su i vrednosti merenja pri identičnim uslovima puta pokazivala značajna odstupanja (odstupanja izmedju srednjih vrednosti do  $\pm 27\%$ ). S druge strane, trajne brzine kamiona na padu značajno počinju da rastu na 600-900 metara od kraja deonice tako da se podužni profil trajnih vozila TV na padu bitno razlikuje od profila trajnih brzina na usponu.

Merenja izvršena u Izraelu /Lit.55/ na nagibu  $i = -5\%$  ukazuju da se bitno razlikuju brzine praznih i potpuno opterećenih kamiona (za oko 20 km/h) pri istim saobraćajnim uslovima. Nadjene su vrednosti: za prazne kamione 83 km/h ( $\sigma = 12,6$  km/h) a za opterećena teretna vozila 63 km/h ( $\sigma = 13,1$  km/h). U zaključku istraživanja napominje se da je brzina kamiona na padu očigledno zavisna od niza faktora koje je veoma teško povezati i ustanoviti opštu zakonitost.

Jedan od uzroka teškoća svakako je i činjenica da se odstojanja vozila bitno menjaju na usponu i padu. Pri identičnim uslovima saobraćajnog opterećenja bitno se menjaju gustine saobraćajnog toka na padu i usponu kao što je definisano istraživanjima /Lit.44/.

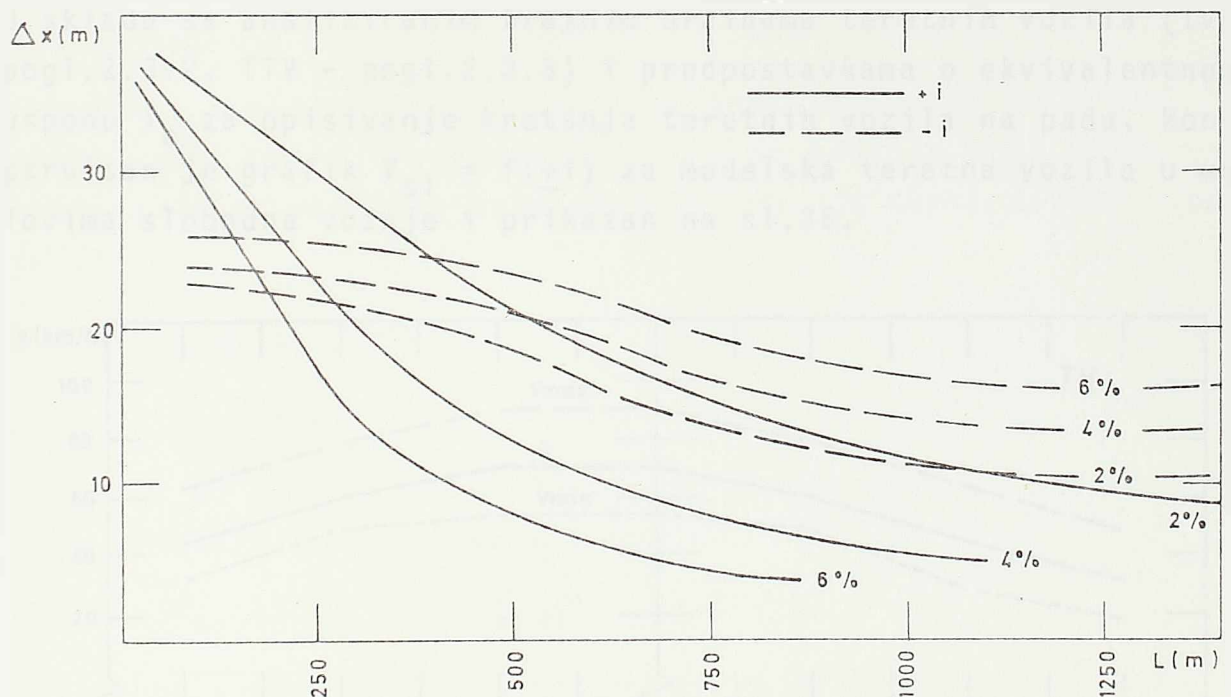
Sve analize ukazuju da kompleksan problem kretanja pre svega teretnih vozila na padu u procesu simulacije može da se reši na dva načina:

- da se u skladu sa uočenim promenama odstojanja vozila na us-

ponu i padu definiše različiti faktor osetljivosti u modelu vožnje u koloni kao funkcija vrednosti nagiba i dužine

• da se pad definiše preko ekvivalentnog uspona slično metodologiji koja je primenjena za putnička vozila usvajanjem relativnog nultog nagiba.

Prvi pristup bi zahtevao bitno uvećanje potrebne memorije računara uz činjenicu da bi faktor osetljivosti morao zavisiti od trenutnog položaja vozila u odnosu na kraj deonice, vrednosti nagiba i karakteristika vozača sa izuzetnim teškoćama da se kalibriše u svakom konkretnom slučaju.



sl.35.

Minimalna odstojanja izmedju vozila na padu i usponu

Drugi pristup u suštini ima nedostatak što je neophodno odrediti relativni nulti nagib u odnosu na koji bi se računao ekvivalentni uspon. Koliko je kod putničkih vozila usaglašen stav o vrednosti pada koji je ekvivalentan horizontalnoj deonici, toliko je neusaglašen u slučaju teretnih vozila. Analizirajući karakteristike modelskih sistema vozač-vozilo TV ili TTV i iskustva drugih zemalja /Lit.6/ usvojena je vrednost od -2% kao

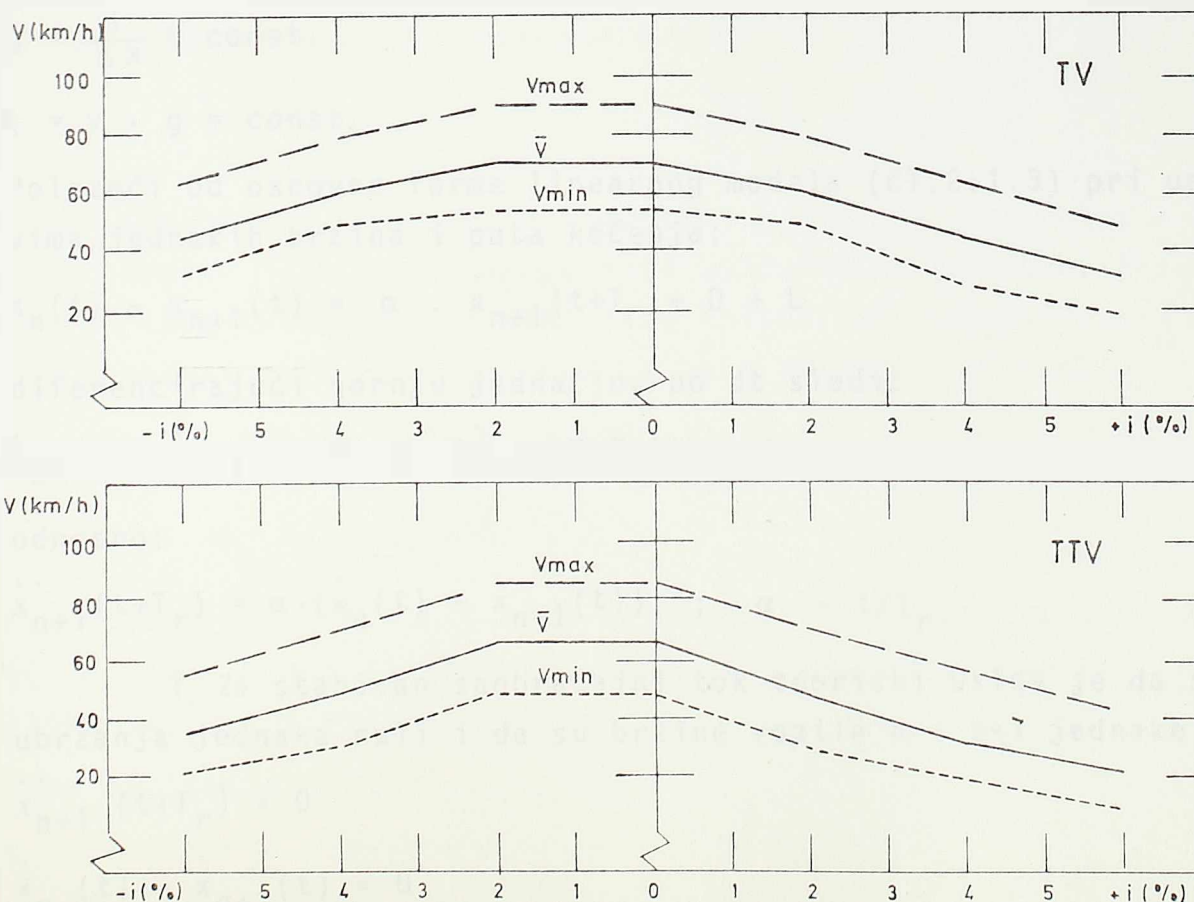
granična vrednost pri kojoj važe odnosi kao na horizontalnom putu, tj.

$$-i\% = +i\% = -1 \cdot (-i + 2) \forall -i\% < -2\%$$

Na taj način bi vrednosti pseudo trajnih brzina teretnih vozila na padu od  $-4\%$  imale sledeće karakteristike:

	TV	TTV
max $D_{vg}$	78 km/h	70 km/h
$\bar{D}_{vg}$	62 km/h	49 km/h
min $D_{vg}$	47 km/h	31 km/h

U skladu sa analiziranim trajnim brzinama teretnih vozila (TV- pogl.2.3.2, TTV - pogl.2.3.3) i pretpostavkama o ekvivalentnom usponu  $i_e$  za opisivanje kretanja teretnih vozila na padu, konstruisan je grafik  $V_{s1} = f(+i)$  za modelska teretna vozila u uslovima slobodne vožnje i prikazan na sl.36.



sl.36.

Zakornost  $V_{s1} = f(+i)$  za sisteme vozač-vozilo TV i TTV

## 2.4.2 Zakonitosti saobraćajnog toka

Polazeći od opšte formulacije modela vožnje u koloni (v. čl. 2.1.3) može se zaključiti da, u zavisnosti od vrednosti parametara  $\epsilon$  i  $m$  (tj. faktora osetljivosti vozača  $\lambda$ ), postoje sledeće osnovne grupe modela gde je  $\lambda$  :

- konstanta  $\lambda = \text{const.}$   $m = 0, \epsilon = 0$
- funkcija  $\lambda = f(\Delta x)$  odstojanja vozila  $m = 0, \epsilon \neq 0$
- funkcija  $\lambda = f(v_{n+1})$  brzine pratećeg vozila  $m \neq 0, \epsilon = 0$
- funkcija brzine pratećeg vozila i odstojanja  $\lambda = f(\Delta x, v_{n+1})$   $m \neq 0, \epsilon \neq 0$

Teoriski, stabilan saobraćajni tok podrazumeva da se brzina ( $V=\dot{X}$ ) svih vozila i odstojanje  $\Delta X$  ne menjaju kroz vreme odnosno kada su ubrzanja svih vozila  $u \approx 0$ . Za takve uslove sledi da je:

$$g = \frac{1}{\Delta x} = \text{const.}$$

$$q = v \cdot g = \text{const.}$$

Polazeći od osnovne forme linearnog modela (čl. 2.1.3) pri uslovima jednakih brzina i puta kočenja:

$$x_n(t) - x_{n+1}(t) = \alpha \cdot \ddot{x}_{n+1}(t+T_r) + D + L$$

diferencirajući gornju jednačinu po  $dt$  sledi:

$$\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) = \alpha \cdot (\ddot{x}_{n+1}(t+T_r))$$

odnosno:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T_r) = \frac{1}{\alpha} (\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)) ; \quad \alpha = 1/T_r$$

Za stabilan saobraćajni tok teoriski uslov je da su ubrzanja jednaka nuli i da su brzine vozila  $n$  i  $n+1$  jednake, tj.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T_r) = 0$$

$$\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) = 0$$

Integracijom jednačine linearnog modela koja definiše ubrzanja

vozila, brzina vozila  $n+1$  je istovremeno i brzina saobraćajnog toka:

$$\dot{x}_{n+1}(t+T_r) dt = \alpha (\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t))$$

sledi:

$$\dot{x} = \Delta x + C$$

odnosno  $g = 1/\Delta x$

$$v = \frac{1}{g} + C$$

Granični uslov je da kada se postigne gustina pri zagušenju ( $g_{\max} = 1/\Delta x_{\min}$ ) brzina je jednaka nuli ( $v=0$ ) tako da konstanta  $C$  mora biti:

$$C = -\frac{\alpha}{g_{\max}}$$

odnosno:

$$v = \alpha (1/g - 1/g_{\max})$$

uvodeći fundamentalni odnos  $q = v \cdot g$

sledi:

$$q = \alpha (1 - g/g_{\max})$$

Prema prethodnoj postavci, pri gustini  $g = g_{\min} = 0$  protok  $q = q_{\max}$  odnosno nije ispunjen polazni uslov da pri gustini bliskoj nuli protok takodje mora biti nula. Sledi da linearni model vožnje u koloni nije realan model za male gustine saobraćaja.

Integracija opšteg modela je komplikovanija i daje rešenje u obliku:

$$f_m(v) = -\alpha_0 f_e(\Delta x) + \beta$$

Funkcije  $f_m(v)$  i  $f_e(\Delta x)$  mogu se povezati u jedan izraz  $f_p(z)$  gde  $p$  zamenjuje  $m$  ili  $e$  a  $z$  zamenjuje  $v$  ili  $\Delta x$ . Ako je  $p = m$  sledi da je  $z = v$  i za  $p = e$   $z = \Delta x$ .

Tada se dobija:

$$f_p(z) = z^{e-p} \quad \text{za } p \neq 1$$

$$f_p(z) = \ln z \quad \text{za } p = 1$$

Takodje je definisana i integraciona konstanta  $\beta$ :



$$\beta = f_m(v_{s1})$$

za  $m > 1, \epsilon \neq 1$ za  $m = 1, \epsilon > 1$  $v_{s1}$  - brzina u slobodnoj vožnji

$$\beta = \alpha_0 f_\epsilon(\Delta x_{\min})$$

za sve kombinacije  $\epsilon$  i  $m$  osim  $m=1, \epsilon < 1$  $(\Delta x_{\min})$  minimalno odstojanje vozila pri zagušenju  $(1/g_{\max})$ 

Integracija opšte formulacije modela vožnje u koloni /Lit.43, Lit.61, Lit.20/ daje sledeće zakonitosti saobraćajnog toka u obliku  $v=f(g)$  prikazane u tabeli:

$\epsilon \backslash m$	$m < 1$	$m = 1$	$m > 1$
$\epsilon < 1$	$v^{1-m} = c g^{\epsilon-1} - c g_{\max}^{\epsilon-1}$ $c = \alpha \frac{1-m}{1-\epsilon} ; \epsilon > m$	$\ln v = \alpha \frac{g^{\epsilon-1}}{1-\epsilon} + C_4$	$v^{1-m} = \alpha \frac{1-m}{1-\epsilon} g^{\epsilon-1} + C_3$
granični uslovi nisu zadovoljeni			
$\epsilon = 1$	$v^{1-m} = (1-m) \ln\left(\frac{g_{\max}}{g}\right)$	$\ln v = \alpha \ln\left(\frac{C_1}{g}\right)$	$v^{1-m} = (1-m) \alpha \cdot \ln\left(\frac{1}{g}\right) + C_2$
$\epsilon > 1$	$v^{1-m} = v_{s1}^{1-m} \left[1 - \left(\frac{g}{g_{\max}}\right)^{\epsilon-1}\right]$	$\ln v = \ln v_{s1} + \frac{\alpha}{1-\epsilon} g^{\epsilon-1}$	$v^{1-m} = v_{s1}^{1-m} + c g^{\epsilon-1}$ $c = \alpha \frac{1-m}{1-\epsilon} ; \epsilon > m$

tab.3. Matrica zakonitosti saobraćajnog toka u zavisnosti od vrednosti parametara modela vožnje u koloni ( $m$  i  $\epsilon$ )

U matrici se mogu ograničiti četiri osnovna područja:

I - ( $\epsilon \geq 1, m \geq 1$ ) - granični uslovi nisu zadovoljeni

II - ( $\epsilon \leq 1, m < 1$ ) - brzina u slobodnom toku  $v_{s1} \rightarrow \infty$

III - ( $\epsilon < 1, m \geq 1$ ) - gustina pri zagušenju  $g_{\max} \rightarrow \infty$

IV - ( $\epsilon > 1, m < 1$ ) - ispunjava sve granične uslove

Prema /Lit.20/ fundamentalnom odnosu  $g-v$  moguć je dvojadi pristup: jednom zakonitošću definisati ovaj odnos za ceo raspon vrednosti  $g-v$  (područje IV) ili pak uspostaviti različite zakonitosti za  $g < g_{\text{optimalno}}$  i za  $g > g_{\text{optimalno}}$  odnosno, predpostaviti prekid funkcije pri protoku koji je maksimalan  $q = q_{\max} = g_{\text{opt}} \cdot v_{\text{opt}}$  (područje III ili IV za  $g < g_{\text{opt}}$  i područje II ili

IV za  $g > g_{opt}$ ).

Budući da se u ovom radu očekuje analiza odvijanja saobraćaja na autopucevima pri  $q < q_{max}$  usvojena je zakonitost iz područja III koja važi za uslove  $v > v_{opt}$  tj.  $g < g_{opt}$ .

Osnovna zakonitost u tom slučaju glasi:

$$\ln v = \ln v_{s1} + (\alpha / (1 - \epsilon)) \cdot g^{\epsilon - 1}$$

pri  $m=1$ ,  $\epsilon > 1$ .

gde je:

$v$  - brzina  $f(g)$

$v_{s1}$  - brzina u slobodnoj vožnji

$g$  - gustina

$\alpha$  - parametar mikroskopskog modela

Na osnovu ovog modela može se uspostaviti veza izmedju parametara mikroskopskog modela ( $\alpha, \epsilon$ ) i parametara saobraćajnog toka ( $v_{s1}$  - brzina u slobodnoj vožnji,  $v_0$  - optimalna brzina tj. brzina pri kapacitetu,  $g_0$  - optimalna gustina saobraćajnog toka). Uvodeći odnos:

$$q = v \cdot g$$

sledi:

$$q = f(g) = g \cdot e^{\ln v_{s1}} + (\alpha / (\epsilon - 1)) g^{\epsilon - 1}$$

odnosno u obliku  $q = f(v)$ :

$$\ln (v/v_{s1}) = (\alpha / (\epsilon - 1)) \cdot g^{\epsilon - 1}$$

$$g^{\epsilon - 1} = ((1 - \epsilon) / \alpha) \cdot \ln(v/v_{s1})$$

Budući da je  $q^{\epsilon - 1} = v^{\epsilon - 1} \cdot g^{\epsilon - 1}$  sledi:

$$q^{\epsilon - 1} = ((1 - \epsilon) / \alpha) \cdot \ln(v/v_{s1}) \cdot v^{\epsilon - 1}$$

Granični uslov da je pri  $q = q_{max}$   $g = g_0$  tj. pri maksimalnom protoku  $dq/dg = 0$ , omogućuje da se diferenciranjem prethodne jednačine odredi parametar  $\epsilon$ . Uvodjenjem smena  $p = g_0 \cdot e^{\ln v_{s1}}$

$z = e^u$  i  $u = (\alpha / (1 - \epsilon)) g_0^{\epsilon - 1}$  sledi:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dg}(p \cdot z) &= e^{\ln v_{s1}} \cdot e^{(\alpha / (1 - \epsilon)) g_0^{\epsilon - 1}} + \\ &+ e^{(\alpha / (1 - \epsilon)) g_0^{\epsilon - 1}} \cdot (\alpha / (1 - \epsilon)) \cdot (\epsilon - 1) \cdot \\ &\cdot g_0^{\epsilon - 2} \cdot g_0 e^{\ln v_{s1}} = 0 \end{aligned}$$

odnosno:

$$e^{\ln v_{s1}} \cdot e^{(\alpha / (1-e)) \cdot (1 + (\alpha / (1-e)) \cdot (e-1) \cdot g_0^{e-1})} = 0$$

Prethodni izraz može biti jednak nuli ako je:

$$1 + (\alpha / (1-e)) \cdot (e-1) \cdot g_0^{e-1} = 0 \quad \text{tj.}$$

$$\alpha = 1/g_0^{e-1}$$

Pored toga, pri maksimalnom protoku  $dq/dv = 0$  a  $v = v_0$ . Koristeći ovaj odnos diferenciranjem jednačine uz pomoć zamene  $p = \ln(v_0/v_{s1})$  i  $z = ((1-e)/\alpha) \cdot v_0^{e-1}$  sledi:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dv} (p \cdot z) &= ((1-e)/\alpha) v_0^{e-1} \cdot 1/v_0 + \\ &+ \ln(v_0/v_{s1}) \cdot ((1-e)/\alpha) \cdot (e-1) \cdot v_0^{e-2} = 0 \end{aligned}$$

odnosno:

$$((1-e)/\alpha) \cdot v_0^{e-2} \cdot (1 + \ln(v_0/v_{s1}) \cdot (e-1)) = 0$$

Uslov  $dq/dv = 0$  je ispunjen ako je:

$$1 + \ln(v_0/v_{s1}) \cdot (e-1) = 0$$

odnosno:

$$\ln(v_0/v_{s1}) = -1/(e-1)$$

što daje sledeći odnos:

$$v_0/v_{s1} = e^{-1/(e-1)}$$

Uporedjenjem prethodne jednačine i rešenjem po parametru  $e$  uspostavlja se odnos  $e = f(v_0, v_{s1})$ :

$$e = 1 - (1/\ln(v_0/v_{s1}))$$

Može se zaključiti da se parametri mikroskopskog modela određuju u funkciji pokazatelja saobraćajnog toka tj.  $m=1$ ,  $e = f(v_0, v_{s1})$ ,  $\alpha = f(g_0)$ . Budući da merenja koja su obavljena na autoputevima u našim uslovima /Lit.40/ po pravilu definišu pokazatelje  $v_0$  i  $v_{s1}$  i to  $v_0 \approx 60$  km/h i  $v_{s1} = 105 - 110$  km/h sledi da bi parametar  $e$  mikroskopskog modela za naše uslove iznosio  $e = 2.64$ . Pritom treba imati u vidu da su prikazane

vrednosti srednje vrednosti brzina u saobraćajnom toku.

Parametar  $\alpha$  u mikroskopskom modelu je funkcija optimalne gustine  $\alpha = f(g_0)$ . Ova činjenica je logična posledica koncepta u kome je parametar  $\alpha$  i faktor osetljivosti vozača na promenu odnosa pri vožnji u koloni. U uslovima saobraćajnog toka  $g=g_0$  treba imati na umu da je  $g = 1/\Delta x$  gde je  $\Delta x$  odstojanje vozila. Kao što je pokazano, odstojanja vozila bitno se razlikuju u zavisnosti od karakteristika vozača te sledi da se karakteristike vozača mogu uneti u mikroskopski model samo preko parametra  $\alpha$ . Ako se u uslovima većih gustina saobraćajnog toka oslonimo na linearni model vožnje u koloni, srednja gustina  $g_0$  iznosila bi 38, vozila PA/km pri idealnim uslovima i  $v_0 = 60$  km/h. Takav odnos bi uslovio maksimalni protok od  $q_{max} = 2280$  PA/čas/saobr. traci pri idealnim uslovima što su nešto više vrednosti od ustanovljenih /Lit.29/.

Dosledno sprovodeći koncept o različitim karakteristikama vozača koje su definisane slučajnim brojem normalne raspodele  $SB1(X)$  ( $\sigma = 0,15$ ,  $\mu = 0,5$ ) u eksponencijalnom modelu vožnje u koloni (model E) usvojeno je da parametar  $\alpha_{-}$  za usporenja ima istu raspodelu kao i  $SB1(X)$ . Za ubrzanja, kao što je definisano u /Lit.61/, treba očekivati da  $\alpha_{+}$  bude nešto niže nego kod usporenja što znači da se podrazumeva manja osetljivost vozača  $(n+1)$  pri  $v_n > v_{n+1}$  nego pri  $v_n < v_{n+1}$ . Prema rezultatima istraživanja, ovaj odnos se kreće u granicama 1,05 do 1,20 te je za svrhe ovog rada usvojen odnos:

$$\alpha_{-} / \alpha_{+} = 1,15$$

#### 2.4.3 Struktura saobraćajnog toka

Unutrašnja struktura saobraćajnog toka utiče na karakteristike toka višestruko:

- teretna vozila po svojim statičkim karakteristikama bitno se razlikuju od putničkih vozila. Pre svega, radi se o dužini vozila koja je po pravilu najmanje dva do tri puta veća od dužine putničkih vozila.

• vučno-brzinske karakteristike teretnih vozila bitno se razlikuju od karakteristika putničkih vozila pre svega kroz ukupnu težinu, otpor vazduha, vučnu silu i, posledično, preko maksimalne brzine i mogućnosti ubrzanja.

• uticaj elemenata puta (podužni nagibi) višestruko je uvećan kod teretnih vozila i u takvim uslovima razlika između mogućnosti PA i TV ili TTV je još značajnija.

Dosadašnja istraživanja uslova saobraćajnog toka pri promeni strukture (učešće teretnih vozila u toku) odražavaju činjenicu da je ovaj pokazatelj veoma bitan mada se stavovi o veličini uticaja razlikuju. Analize se obično usmeravaju na definisanje ekvivalentnog odnosa TV prema osnovnoj jedinici PA.

U priloženoj tabeli dat je prikaz uticaja strukture saobraćajnog toka na brzinu saobraćajnog toka na horizontalnom putu prema istraživanjima različitih autora. Ovaj uticaj je izražen za dva preseka saobraćajnog opterećenja ( $Q = 1000$  voz/h/smer i  $Q = 2500$  voz/h/smer) na autoputu sa dve saobraćajne trake kroz promenu brzine pod uticajem učešća teretnih vozila (% teretnih vozila 15-20%)

	Q = 1000 voz/h/smer			Q = 2500 voz/h/smer			
	$V_{PA}$	$V_{PA+TV}$	$\Delta V$	$V_{PA}$	$V_{PA+TV}$	$\Delta V$	
1	118	98	-20	90	70	-20	/Lit.54/
2	108	103	- 5	93	87	- 6	/Lit.54/
3	97	91	- 6	95	90	- 5	/Lit.54/
4	87	84	- 3	71	66	- 5	/Lit.29/
5	94	90	- 4	77	69	- 3	/Lit.36/
6	90	80	-10	78	59	-19	/Lit.25/
7	113	97	-16	92	74	-18	/Lit.66/

tab.4 Uticaj strukture saobraćajnog toka na brzinu (horizontalna deonica)

Kao posledica različitih vučno-brzinskih karakteristika, na usponima uticaj strukture saobraćaja je najdominantniji. U tabeli 5 je prikazan uticaj strukture na usponima od 4% pri istim polaznim vrednostima kao u prethodnoj tabeli.

	Q = 1000 voz/h/smer			Q = 2500 voz/h/smer			
	V <sub>PA</sub>	V <sub>PA+TV</sub>	ΔV	V <sub>PA</sub>	V <sub>PA+TV</sub>	ΔV	
1	105	84	-21	77	62	-15	//Lit.54/
2	77	62	-15	45	n.	n.	/Lit.54/
3	97	91	-6	90	85	-5	/Lit.54/
4	87	67	-20	71	n.	n.	/Lit.29/
5	88	87	-1	63	62	-1	/Lit.36/

napomena n. - Q je veće od kapaciteta

tab.5. Uticaj strukture saobraćajnog toka na brzinu (uspon + 4%)

Zbirni uticaj strukture saobraćaja i uspona u odnosu na tok putničkih vozila na horizontalnom putu prikazan je u tab.6.

	Q = 1000 voz/h/smer			Q = 2500 voz/h/smer			
	i=0%	i=4%	ΔV	i=0%	i=4%	ΔV	
	V <sub>PA</sub>	V <sub>PA+TV</sub>		V <sub>PA</sub>	V <sub>PA+TV</sub>		
1	118	84	-34	90	62	-28	/Lit.54/
2	108	62	-44	93	n.	n.	/Lit.54/
3	97	91	-6	95	85	-10	/Lit.54/
4	87	67	-20	71	n.	n.	/Lit.29/
5	94	87	-7	77	62	-15	/Lit.36/

tab.6. Zbirni uticaj strukture saobraćajnog toka i uspona na brzinu

Izloženi podaci ukazuju da je brzina saobraćajnog toka funkcija opterećenja i učešća teretnih vozila u toku iako se relativni uticaj ovih parametara bitno razlikuje u zavisnosti od izbora podataka.

#### 2.4.4 Kretanje vozila

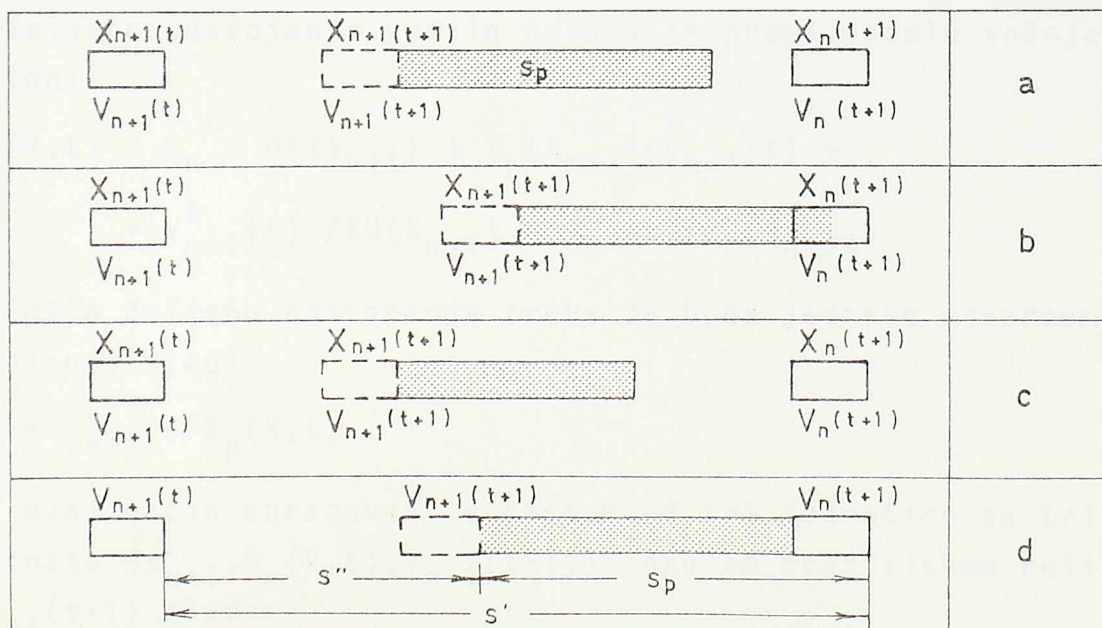
U zavisnosti od usvojenog modela vožnje u koloni (čl.2.1.3) simulira se kretanje vozila u saobraćajnom toku. Bitno je da redosled vozila bude takav da vozilo neposredno ispred vozila koje se analizira bude obradjeno i pripada drugom vremenskom preseku ( $t = t' + \Delta t$ ) dok posmatrano vozilo pripada vremenskom preseku ( $t=t$ ). O ovoj činjenici se mora voditi računa prilikom

proračuna međusobnog odstojanja ( $\Delta x$ ).

Kretanje vozila po modelu L simulira se primenom tzv. željenog odstojanja ( $s_p(X,t)$ ) i stvarnog odstojanja između vozila. ( $\Delta x(t)$ ). U procesu simulacije kretanja prvi korak je da se vozilo koje se analizira ( $n+1$ ) pomeri za vrednost  $v_{n+1}(t) \cdot \Delta t$  tj. za vrednost trenutne brzine umnožene veličinom simulacionog koraka ( $\Delta t = 1 \text{ sec}$ ). Kao što je pomenuto (pogl.1.4) svaki vozač ima definisani prostor koji je, u datim uslovima, prihvatljiv za kretanje, tj. u uslovima vožnje u koloni tzv. željeno odstojanje (v.sl.37a). Ako nema konflikta, tj. ako je stvarno odstojanje veće od željenog odstojanja (v.sl.37a) vozilo se kreće trenutnom brzinom  $v_t = v_{t+1}$  (ako je  $v_t = v_{s1}$ ) ili pak ubrzava u skladu sa karakteristikama sistema vozač-vozilo (ako je  $v_t < v_{s1}$ ). Nova brzina se računa prema pretpostavci da je  $dv/dt = \text{const.}$  tokom jednog simulacionog koraka tj.

$$v_{n+1}(t+1) = v_{n+1}(t) + u_{vg}$$

gde je:  $u_{vg}$  - odgovarajuće maksimalno ubrzanje vozila u smislu pogl.2.3.



sl.37.

Princip obrade vozila u saobraćajnom toku

Položaj vozila u vremenskom preseku (t+1) računa se prema:

$$x_{n+1}(t+1) = x_{n+1}(t) + (v_{n+1}(t) + v_{n+1}(t+1))/2$$

Medjutim, po pravilu će se u saobraćajnom toku javiti situacije kada brže vozilo sustiže sporije vozilo i nema mogućnosti promene saobraćajne trake. Kada se vozilo (n+1) pomeri za odgovarajuću vrednost trenutne brzine ( $v_{n+1}(t)$ ) (vremenski korak simulacije  $\Delta t = 1$  sec) doći će do odnosa prikazanih na sl.37b. kada je odstojanje manje od željenog odstojanja. U sledećem koraku, vozilo (n+1) se maksimalno usporava ( $U(X)$ ) zbog dvostruke promene i stvarnog odstojanja i željenog odstojanja ( $s_p = f(X, v_n, v_{n+1})$ ) dobija se situacija kao na sl.37c. Logično sledi da postoji brzina  $v_{n+1}(t+1)$  pri kojoj bi željeno odstojanje bilo jednako stvarnom odstojanju. (sl.37d).

Proračun brzine  $v_{n+1}(t+1)$  koja zadovoljava uslove prikazane na sl.37d izvršena je prema sledećem postupku:

- put vozila (n+1) u vremenu  $t \rightarrow t+1$  je definisan prema ( $\Delta t = 1$  sec):

$$s_{n+1}' = \frac{v_{n+1}(t) + v_{n+1}(t+1)}{2} \cdot 1$$

- željeno odstojanje vozila nalazi se prema modelu vožnje u koloni:

$$S_p(X, t) = L_n + D(X)_{n+1} + T_r(X)_{n+1} \cdot v_{n+1}(t) + \\ + v_{n+1}^2(t) / 2U(X)_{n+1} - v_n^2(t) / 2U(X)_{n+1}$$

- Pošto željeno odstojanje treba da bude jednako stvarnom odstojanju sledi:

$$s' = s_{n+1}'' + S_p(X, t)$$

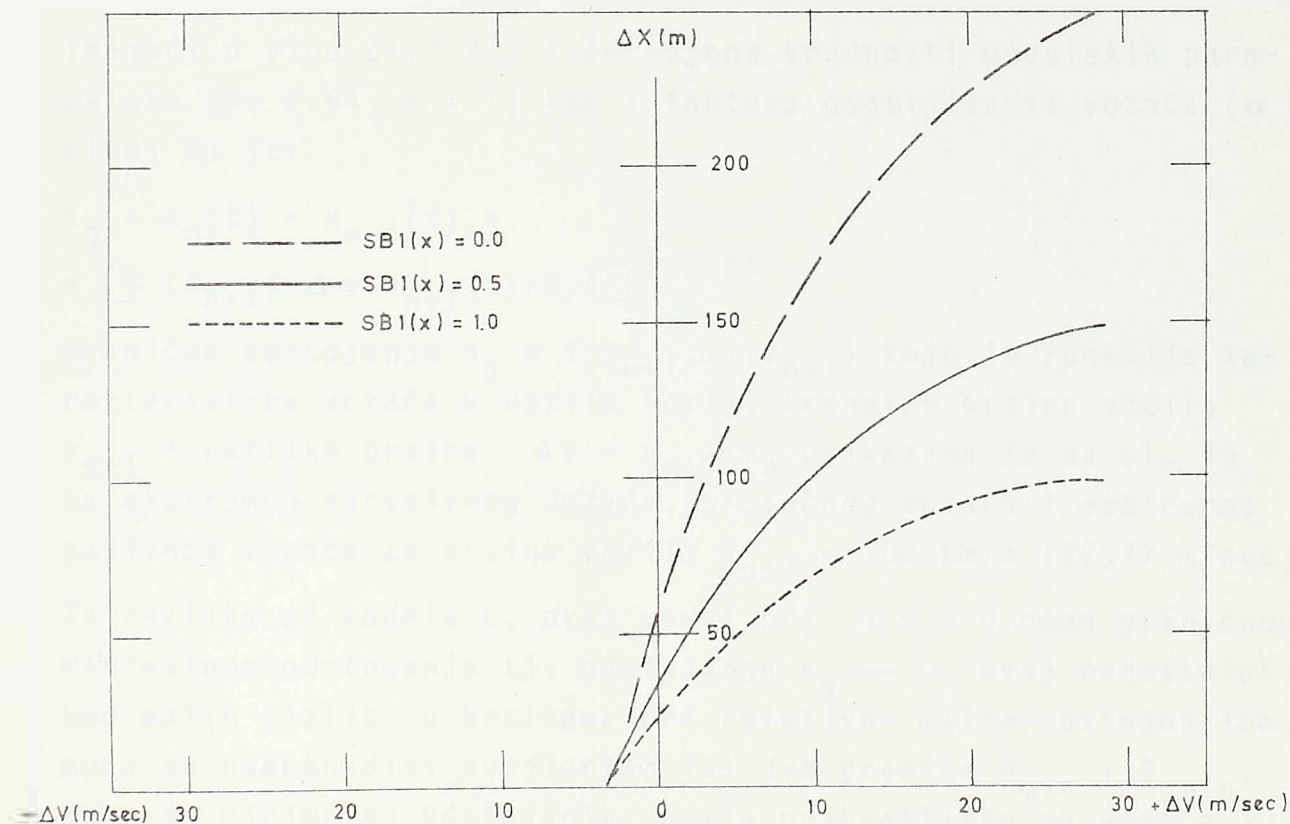
Na ovaj način obrazovan je sistem od tri jednačine sa tri nepoznate ( $s_{n+1}'', S_p(X, t), v_{n+1}(t+1)$ ). Ako se ovaj sistem reši po  $v_{n+1}(t+1)$  sledi:

$$v_{n+1}(t+1) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ -U(X)_{n+1} \cdot (1 + 2 T_r(X)_{n+1}) \right] + \right. \\ + \left[ (U(X)_{n+1} (1 + 2 T_r(X)_{n+1}))^2 + 8 U(X)_{n+1} (s' - (L_n + D(X)_{n+1}) - \right. \\ \left. \left. - 4 U(X)_{n+1} v_{n+1}(t) \cdot 1 + 4 v_n(t)^2) \right]^{1/2} \right\}$$



Kada je poznata brzina  $v_{n+1}(t+1)$  onda se novi položaj vozila (n+1) može naći preko izraza za  $s_{n+1}''$ .

Ako se bliže analiziraju uslovi koji proizilaze iz ovakvog postupka, može se zapaziti da postoji granica iznad koje se vozač ponaša kao slobodan tj. kao da je sam na putu (slobodna vožnja). Ova granica je, prema izloženim odnosima funkcija karakteristika vozača ( $X_{n+1}$ ), brzina kretanja vozila ( $v_{n+1}, v_n$ ) i izražava se kao granično odstojanje za slobodnu vožnju i vožnju u koloni. Na sl. 38 prikazano je granično odstojanje za slobodnu vožnju i vožnju u koloni prema usvojenim elementima modela simulacije.



sl.38.

Granično odstojanje slobodna vožnja - vožnja u koloni pri  $V_n = V_{n+1} = 100$  km/h (model L)

Kod modela E principi obrade su isti dok se uslovi kretanja vozila (slobodna vožnja - vožnja u koloni) nešto drugačije definišu. Imajući u vidu da postoje granične promene odnosa tzv.

prazne vrednosti, kod modela E ustanovljeno je da praznu vrednost čini, pri pozitivnim razlikama brzina ( $v_{n+1} > v_n$ ), usporenje od  $0.4 \text{ m/sec}^2$ . Ova vrednost približno odgovara praznim vrednostima promene vizuelnog ugla (v.pogl.1.4). Pri takvim postavkama i u skladu sa čl.2.1.2. sledi da se granično odstojanje, pri kojem se uslovi slobodne vožnje menjaju u uslove vožnje u koloni, može sračunati kao:

$$0.4 = \lambda (\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t))$$

gde je:

$$\lambda = \alpha (\dot{x}_{n+1}^m(t+T_r) / (x_n(t) - x_{n+1}(t))^c$$

Imajući u vidu čl.2.4.2 i odredjene vrednosti modelskih parametara ( $c = 2.64$ ,  $m = 1$ ) kao i faktora osetljivosti vozača ( $\alpha$ ) sledi da je:

$$s_g = x_n(t) - x_{n+1}(t) = \\ = [\alpha (x_{n+1}) \cdot \Delta v \cdot v_{n+1}(t) / 0.4]^{1/2.64}$$

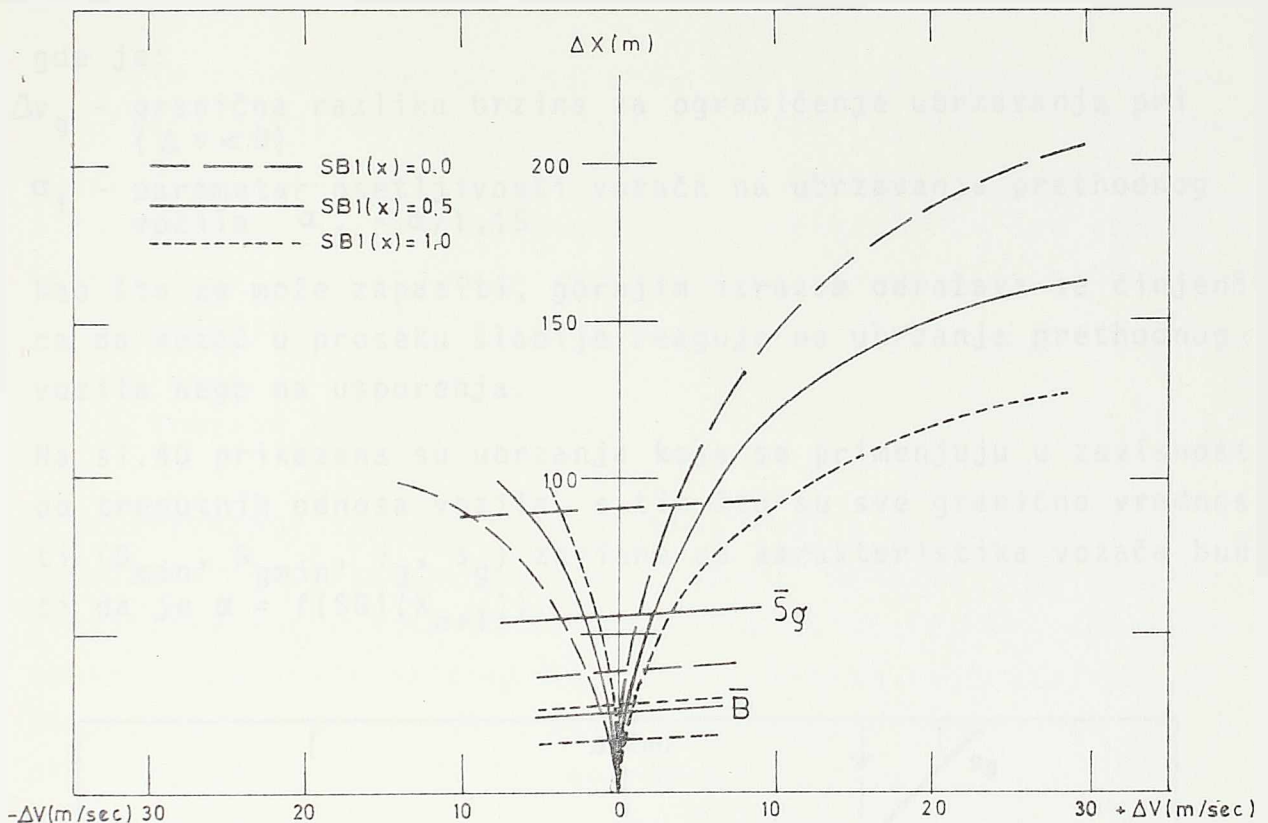
Granično odstojanje  $s_g = f(x_{n+1}, \Delta v, v_{n+1})$  koje je funkcija karakteristika vozača u vozilu (n+1), trenutne brzine vozila  $v_{n+1}$  i razlike brzina  $\Delta v = v_{n+1} - v_n$  prikazano je na sl. 39 za ekstremno agresivnog vozača, prosečnog vozača i ekstremno pasivnog vozača za brzinu vozila  $v_{n+1} = 100 \text{ km/h}$  ( $27.77 \text{ m/sec}$ ).

Za razliku od modela L, ovaj model pri  $\Delta v = 0$  nema graničnog minimalnog odstojanja tj. odstojanja  $s_g \rightarrow 0$ . Ovaj nedostatak, kod malih razlika u brzinama pri relativno malim rastojanjima, mora se nadoknaditi uvodjenjem još dve granice  $B_{\min}$  i  $S_{g\min}$ .  $B_{\min}$  je minimalno odstojanje vozila prihvatljivo za vozača i ako je odstojanje manje od  $B_{\min}$  vozač bi koristio maksimalne mogućnosti usporenja (forsirano kočenje). Odstojanje  $B_{\min}$  definisano je kao:

$$B_{\min}(X_{n+1}) = L_n + D(X_{n+1}) + T_r(X_{n+1}) \cdot v_{n+1} \\ + T_r(X_{n+1}) \cdot (v_{n+1} - v_n)$$

Može se zapaziti da je  $B_{\min}$  linearna funkcija razlike brzina što, budući da se ova vrednost koristi pri malim razlikama u

brzini, neće bitnije uticati na realne odnose ( $B_{min}$  je obično eksponencijalna funkcija  $\Delta v$ ).



sl.39.

Granični uslovi slobodne vožnje i vožnje u koloni pri  $V_n = V_{n+1} = 100$  km/h (Model E)

Uvodjenje dodatne granice  $S_{gmin}$  je neophodno jer bi, pri malim razlikama brzina i malim odstojanjima, vozilo  $(n+1)$  iznenadno ulazilo u područje gde je predviđeno forsirano kočenje

( $S_g < (x_n - x_{n+1}) < B_{min}$ ) što sigurno ne odgovara realnosti. Dodatna granica  $S_{gmin}$  je usvojena prema:

$$S_{gmin}(X_{n+1}) = (1,5 + 0,5(1 - SBI(X_{n+1})) \cdot B_{min}(X_{n+1})$$

odnosno, 1,5 do 2 puta veće odstojanje od minimalno prihvatljivog odstojanja ( $B_{min}$ ) /Lit.68/. S druge strane, pri malim razlikama brzina koje su manje od nule ( $\Delta v < 0$ ) uočeno je takodje da vozači ne reaguju na svaku promenu brzine vozila ispred njihovog. Stoga je uvedena i granica reakcije na ubrzanja vozila

ispred prema:

$$\Delta v_g = (x_n(t) - x_{n+1}(t))^{2,64} \cdot 0,4 / \alpha_1 \cdot v_{n+1}(t)$$

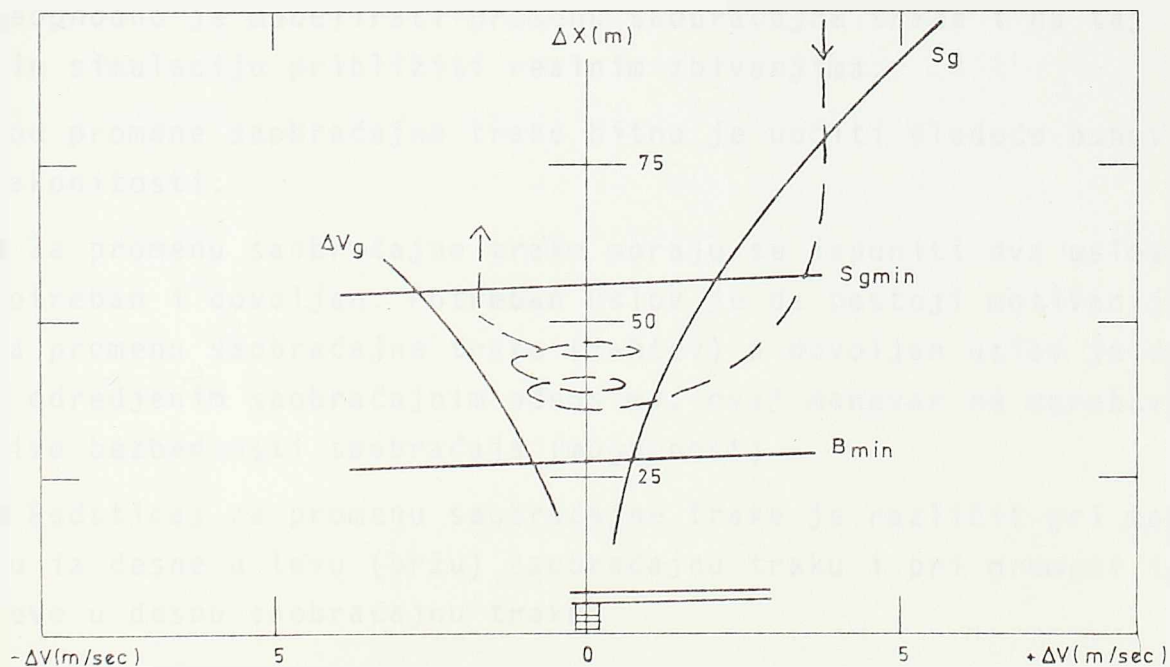
gde je:

$\Delta v_g$  - granična razlika brzina za ograničenje ubrzavanja pri ( $\Delta v < 0$ )

$\alpha_1$  - parametar osetljivosti vozača na ubrzavanja prethodnog vozila  $\alpha_1 = \alpha / 1,15$

Kao što se može zapaziti, gornjim izrazom odražava se činjenica da vozač u proseku slabije reaguje na ubrzanja prethodnog vozila nego na usporenja.

Na sl.40 prikazana su ubrzanja koja se primenjuju u zavisnosti od trenutnih odnosa vozila, s tim što su sve granične vrednosti ( $B_{min}$ ,  $S_{gmin}$ ,  $v_g$ ,  $s_g$ ) zavisne od karakteristika vozača budući da je  $\alpha = f(SB1(X_{n+1}))$ .



sl.40.

Granični uslovi proračuna ubrzanja u zavisnosti od odnosa vozila ( $\Delta v, \Delta x$ )

U zoni praćenja vozila sa malim razlikama brzina i odstojanja ubrzanja ili usporenja (zavisno da li je  $\Delta v$  veće ili manje od nule) definišu se kao:

$$\pm U = \pm 0,2 \cdot (1 + SB1(X_{n+1}))$$

U takvim situacijama bliskog praćenja vozila ubrzanje varira-ti u zavisnosti od karakteristika vozača izmedju 0 i  $0,4 \text{ m/sec}^2$  a usporenja izmedju 0 i  $-0,4 \text{ m/sec}^2$ . Promena ubrzanja za vo-zilo koje iz uslova slobodne vožnje prelazi u uslove vožnje u koloni i bliskog praćenja vozila prikazana je na sl.40 u koor-dinatnom sistemu  $\Delta v$  i  $\Delta x$ .

#### 2.4.5 Promena saobraćajne trake

U saobraćajnom toku na autoputevima vozila često menjaju saob-raćajnu traku, što je, po svom značaju, manevar koji odgovara preticanju kod puteva sa dve saobraćajne trake. Pošto ovaj ma-nevar bitno utiče na osnovne karakteristike saobraćajnog toka neophodno je modelirati promenu saobraćajne trake i na taj na-čin simulaciju približiti realnim zbivanjima.

Kod promene saobraćajne trake bitno je uočiti sledeće osnovne zakonitosti:

- Za promenu saobraćajne trake moraju se ispuniti dva uslova: potreban i dovoljan. Potreban uslov je da postoji motivacija za promenu saobraćajne trake (zahtev) a dovoljan uslov je da, u odredjenim saobraćajnim odnosima, ovaj manevar ne ugrožava nivo bezbednosti saobraćaja (mogućnost).
- Podsticaj za promenu saobraćajne trake je različit pri mane-vru iz desne u levu (bržu) saobraćajnu traku i pri promeni iz leve u desnu saobraćajnu traku.

Model zasniva na predpostavci da ako nije ispunjen potreban u-slov vozilo ostaje u saobraćajnoj traci kojom se kretalo u vremenskom preseku:

$$t = t_n - 1$$

Promena saobraćajne trake je manevar koji je izazvan poremeća-jem ravnotežnog stanja u sistemu vozač-vozilo-okolina. Težnja

je svih vozača da voze kao slobodno vozilo ili pak, ako voze u koloni, da brzina kojom se kreću ne odstupa mnogo od željene brzine. Ova činjenica iskorišćena je za modeliranje promene saobraćajne trake s tim što su postavljena dva potrebna uslova prema vrsti manevra.

Za promenu desne u levu (bržu) saobraćajnu traku podsticaj je odnos brzina i mogućnosti ubrzanja jer se ovaj manevar skoro po pravilu izvodi sa korišćenjem ubrzanja:

$$1. V_{s1}(i) - V_t(i) \geq 5 + (1 - SB1(X)) \cdot 5 \text{ /km/h/}$$

$$2. dV_t(i)/dt > 0$$

gde je:

$V_{s1}(i)$  - željena brzina vozila (i) u desnoj saobr. traci

$V_t(i)$  - trenutna brzina vozila (i) u vremenskom preseku (t)

$dV_t(i)/dt$  - mogućnosti ubrzanja vozila (i) u vremenskom preseku (t)

U slučaju da oba potrebna uslova nisu ispunjena vozilo (i) ostaje u desnoj saobraćajnoj traci u vremenskom preseku  $t' = t + \Delta t$  tj. u sledećem koraku simulacije ( $\Delta t = 1 \text{ sec}$ ).

Pri promeni saobraćajne trake iz leve u desnu mogu se javiti dva slučaja: slobodan manevar promene kada su uslovi kretanja u desnoj saobraćajnoj traci povoljniji i iznudjeni manevar kao posledica sustizanja vozila. Za slobodni manevar podsticaj je ograničen na uslov:

$$1. V_{s1}(j) - V_t(j) \geq 5 + (1 - SB1(X)) \cdot 5 \text{ /km/h/}$$

odnosno, promena iz leve u desnu saobraćajnu traku vrši se i pri ubrzanjima manjim od nule.

Ako bi se model ograničio samo na ovaj uslov, u levoj saobraćajnoj traci bi se zadržavala i vozila sa nižim željenim brzinama ( $V_{s1}$ ) tako da bi se dobio približno isti nivo brzina u levoj i desnoj saobraćajnoj traci. Poznato je iz niza istraživanja da po pravilu u levoj saobraćajnoj traci preovladjuju putnička vozila sa višim nivoom brzina. Ova razlika brzina po saobraćajnim trakama ( $V_{lts} - V_{dts}$ ) kreće se, u zavisnosti od

saobraćajnog opterećenja ( $Q$ ), od 60 do 10 km/h /Lit.59/.

Stoga je za promenu saobraćajne trake iz leve u desnu uveden još jedan nadražaj koji je motiv za izvodjenje ovog manevra. Naime, nadražaj može biti vozilo ( $j-1$ ) koje pristiže vozilo ( $j$ ) odnosno ( $V_{j-1} > V_j$ ) i "pritiska" vozača  $X_j$  da se skloni u desnu saobraćajnu traku. Ako se uoči da jedan od modela za definisanje slobodnog vozila u saobraćajnom toku (čl.2.1.2) sadrži i kriterijum vremenske praznine nazad ( $\Delta t_{j,j-1} > 4$  sec) onda se čini logičnim da se granični uslov za iznudjeni manevar promene saobraćajne trake (leva  $\rightarrow$  desna) zasniva na relativnom odstojanju ( $\Delta x_{j,j-1}$ ) i razlici brzina ( $V_{j-1} - V_j$ ). Kao što kod vožnje u koloni /v.čl.2.1.3/ željeno odstojanje napred ( $s_p(X,t)$ ) zavisi od karakteristika vozača sigurno je da i željeno odstojanje nazad takodje zavisi od karakteristika vozača. Za modeliranje ovog procesa usvojen je odnos:

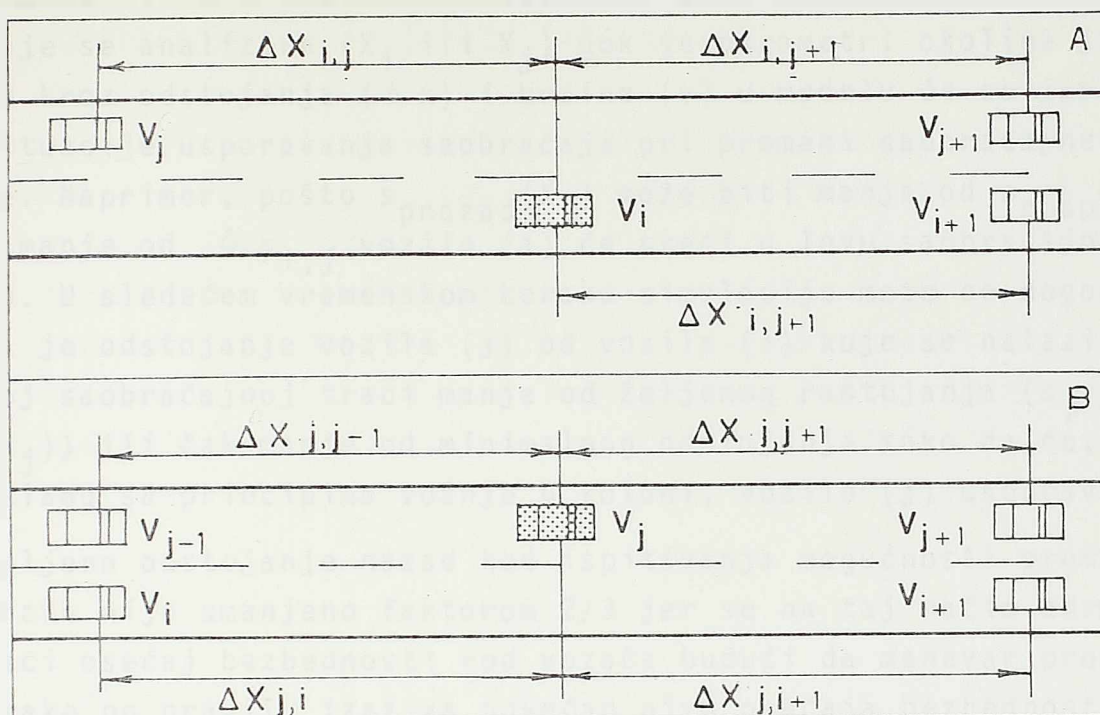
$$\Delta x_{j,j+1} \leq s_{pnazad} = 2/3 s_p(X,t)$$

Željeno odstojanje nazad proračunava se na osnovu karakteristika vozača u vozilu ( $j$ ) i brzina vozila ( $V_j$  i  $V_{j-1}$ ), odnosno, fiktivno se vozač ( $X_j$ ) premešta u vozilo ( $j-1$ ), tj.:

$$s_{pnazad} = 2/3 \left[ L_j + D(X_j) + T_r(X_j) \cdot v_{j-1} + v_{j-1}^2 / 2 \cdot U(X_j) - v_j^2 / 2 \cdot U(X_j) \right]$$

Može se zapaziti da na veličinu  $s_{pnazad}$  ne utiču karakteristike vozača  $X_{j-1}$  odnosno, vozač analiziranog vozila ( $X_j$ ) ne prihvata odstojanja nazad koja su manja od 2/3 odstojanja napred kada bi se on nalazio u vozilu ( $j-1$ ). Na sl. 41 prikazani su uslovi iznudjenog manevra promene saobraćajne trake (leva  $\rightarrow$  desna).

Da li će željeni manevar (ili iznudjeni) biti i realizovan u vremenskom preseku  $t = t' + \Delta t$  zavisi od uslova okoline, tj. da li je manevar moguć (dovoljan uslov). Uslovi okoline za izvodjenje manevra prikazani su na sl. 41.



sl.41.

Ilustrativni prikaz uslova za promenu saobraćajne trake

Promena saobraćajne trake se može izvesti ako su istovremeno zadovoljena oba navedena uslova:

desna ts  $\rightarrow$  leva ts

$$1. \Delta x_{i,j} > \frac{2}{3} \cdot (L_i + D(X_i) + T_r(X_i) \cdot v_j + v_j^2/2U(X_i) - v_i^2/2U(X_i))$$

$$2. \Delta x_{i,j+1} > (L_{i+1} + D(X_i) + T_r(X_i) \cdot v_i + v_i^2/2U(X_i) - v_{j+1}^2/2U(X_i))$$

A

leva ts  $\rightarrow$  desna ts

$$1. \Delta x_{j,i} > \frac{2}{3} (L_j + D(X_j) + T_r(X_j) \cdot v_i + v_i^2/2U(X_j) - v_j^2/2U(X_j))$$

$$2. \Delta x_{j,i+1} > (L_{i+1} + D(X_j) + T_r(X_j) \cdot v_j + v_j^2/2U(X_j) - v_{i+1}^2/2U(X_j))$$

B



Budući da se u oba uslova javljaju samo karakteristike vozača koje se analizira ( $X_i$  ili  $X_j$ ) dok se parametri okoline javljaju kroz odstojanja ( $\Delta x$ ) i brzine ( $v$ ) u modelu će se javiti situacije usporavanja saobraćaja pri promeni saobraćajne trake. Naprimer, pošto  $s_{pnazad}(X_i)$  može biti manje od  $s_{pnapred}(X_j)$  i manje od  $\Delta x_{i,j}$  vozilo (i) će preći u levu saobraćajnu traku. U sledećem vremenskom koraku simulacije može se dogoditi da je odstojanje vozila (j) od vozila (i) koje se nalazi u istoj saobraćajnoj traci manje od željenog rastojanja ( $s_p(X_j)$ ) ili čak manje od minimalnog odstojanja tako da će, u skladu sa principima vožnje u koloni, vozilo (j) usporavati.

Željeno odstojanje nazad kod ispitivanja mogućnosti promene trake nije umanjeno faktorom 2/3 jer se na taj način odražava veći osećaj bezbednosti kod vozača budući da manevar promene trake po pravilu izaziva povećan nivo osećaja bezbednosti.

Analizom modeliranog procesa, može se zaključiti da sa porastom gustine saobraćajnog toka podsticaji za promenu saobraćajne trake rastu; javlja se veći broj iznudjenih promena trake (leva  $t_s$  — desna  $t_s$ ) a istovremeno mogućnosti za promenu saobraćajne trake opadaju.

Pri malim saobraćajnim opterećenjima sledi da je:

$$q \rightarrow q_{\min} \rightarrow 0 \quad v_t \rightarrow v_{s1} \quad p_{ts} \rightarrow 0$$

tako da podsticaji za promenu trake teže nuli a mogućnosti su praktično neograničene tj. nema promena trake ( $p_{ts} = 0$ ).

Pri velikim gustinama saobraćajnog toka, mogućnosti ne postoje iako su istovremeno zahtevi za promenom trake maksimalni:

$$q \rightarrow q_{\max} \quad v_t \rightarrow v_{\min} \ll v_{s1} \quad p_{ts} \rightarrow 0$$

i u takvim uslovima takodje nema promena saobraćajne trake zbog gustine ( $g \rightarrow g_{\max}$ ).

Logično sledi da broj promena saobraćajne trake u zavisnosti od opterećenja  $p_{ts} = f(Q)$  mora imati svoj maksimum kada su zahtevi i mogućnosti saobraćajne trake uravnoteženi. Istraživanjima su potvrđene ove pretpostavke /Lit.66/ i najveći broj promena saobraćajnih traka događa se u području opterećenja  $Q = 2000$  voz/h/smer i kreće se od 400-800 promena/čas/km.

### 3. PROCES SIMULACIJE I REZULTATI PRIMENE

Elementi modela se povezuju u celinu kroz izradu programskog sistema simulacije u skladu sa principima iznetim u prethodnim poglavljima. Budući da se radi o nizu specifičnih zakonitosti koje nije moguće obuhvatiti klasičnim postupcima analize, neophodno je varirati najbitnije ulazne parametre i analizirati posledice tj. da li usvojeni model logično odražava promene polaznih parametara kao što su saobraćajno opterećenje, projektni elementi autoputa, struktura saobraćajnog toka i sl.

#### 3.1 OSNOVE

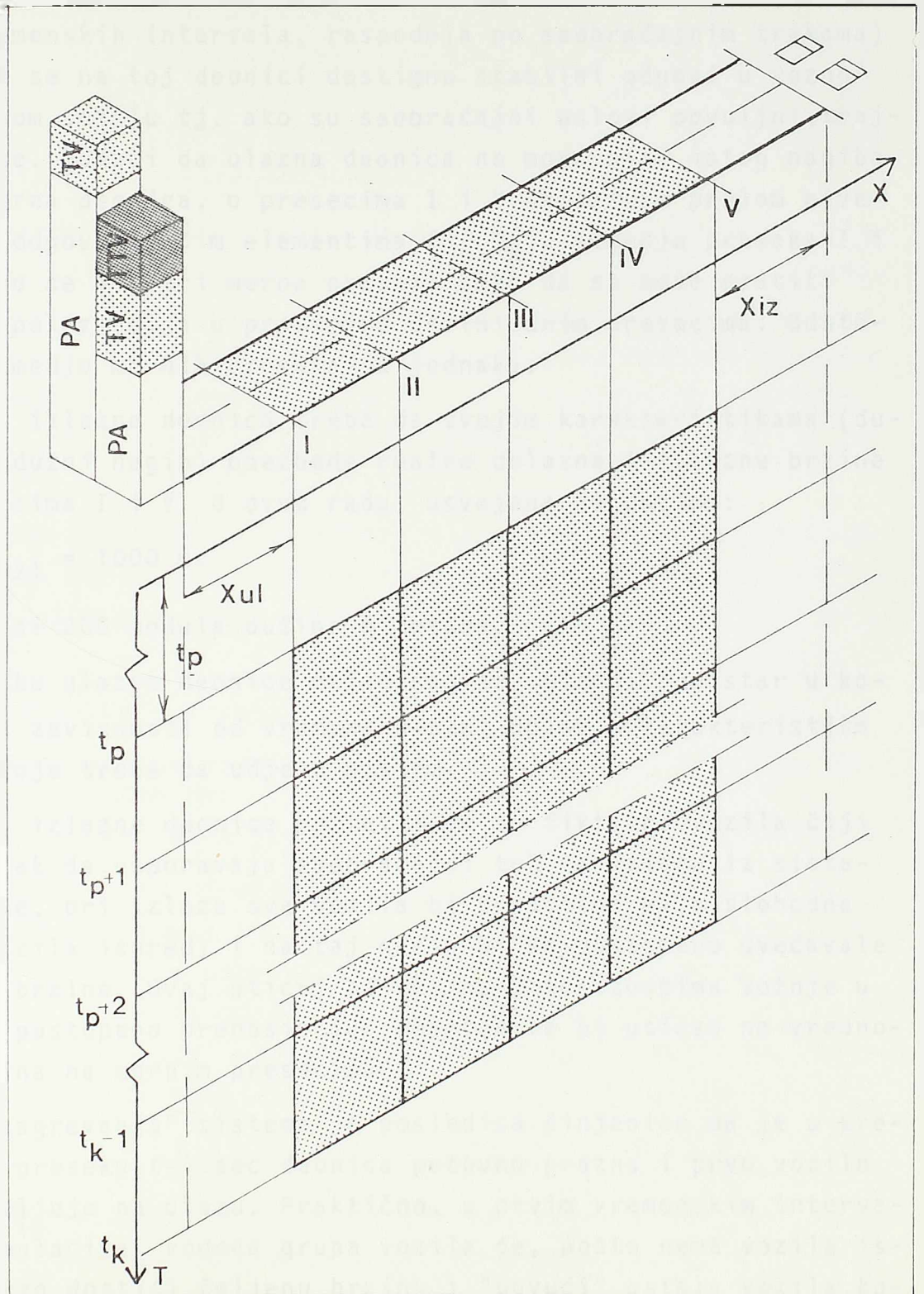
U procesu simulacije saobraćajnog toka izdvaja se nekoliko značajnih koraka kao što su: priprema ulaznih podataka, način vođenja podataka, unutarnja organizacija programa i tsl. Od uspešnog rešenja ovih problema pre svega zavisi efikasnost programa za elektronski računar kao i nivo pouzdanosti dobijenih rezultata.

Kao što je naglašeno, nivo tačnosti i obim parametara koji će biti uključeni u proces simulacije su rezultat kompromisa između potrebnog nivoa tačnosti i ograničenja koji su posledica tehničkih i ekonomskih mogućnosti. S druge strane, programi za računar ne treba da budu kraj celog procesa već samo sredstvo kojim se ostvaruje postavljeni cilj sa mogućnošću dalje razrade i primene u drugim oblastima istraživanja saobraćaja, procesa planiranja i projektovanja puteva.

##### 3.1.1 Vreme - prostor

Princip formiranja modela simulacije u vremenu i prostoru prikazan je na sl. 42.

Po vremenu, postupci simulacije dele se na vreme "zagrevanja" ( $t_p$ ) i vreme opažanja kretanja vozila ( $t_k - t_p$ ). U prostornom smislu, razlikuju se tri deonice, ulazna deonica ( $x_{u1}$ ), deonica koja se ispituje i izlazna deonica ( $x_{i2}$ ).



sl.42.  
šematski prikaz procesa simulacije u prostoru i vremenu

Ulazna deonica ima za osnovni zadatak da ublaži uticaj polaznih parametara saobraćajnog toka u procesu simulacije (npr. raspodela vremenskih intervala, raspodela po saobraćajnim trakama) kao i da se na toj deonici dostignu stabilni odnosi u vozno-dinamičkom smislu tj. ako su saobraćajni uslovi povoljni, trajne brzine. Budući da ulazna deonica ne mora biti istog nagiba kao i merna deonica, u presecima I i V nalazi se prelom nivo-lete sa odgovarajućim elementima ( $R_v, T_g$ ). Izmedju preseka I i V ubacuju se još tri merna preseka tako da se može pratiti promena pokazatelja u prostorno definisanim presecima. Odstojanja izmedju mernih preseka su jednaka.

Ulazna i izlazna deonica treba da svojim karakteristikama (dužina, podužni nagib) obezbede realne dolazne i izlazne brzine na presecima I i V. U ovom radu, usvojena je dužina:

$$x_{u1} = x_{i21} = 1000 \text{ m.}$$

što iznosi 200 modula dužine 5 metara.

Na početku ulazne deonice definisan je ulazni registar u koji se, u zavisnosti od vremena ulaza, upisuju karakteristike vozila koje treba da udje u sistem.

Na kraju izlazne deonice postavljena su fiktivna vozila čiji je zadatak da usporavaju saobraćajni tok na izlazu iz sistema. Naime, pri izlazu sva vozila bi praktično bila slobodna (nema vozila ispred) i na taj način bi se postepeno uvećavale izlazne brzine. Ovaj uticaj bi se, po zakonitostima vožnje u koloni, postepeno prenosio duž deonice te bi uticao na vrednosti brzina na mernim presecima.

Vreme "zagrevanja" sistema je posledica činjenice da je u vremenskom preseku  $t=1$  sec deonica potpuno prazna i prvo vozilo se pojavljuje na ulazu. Praktično, u prvim vremenskim intervalima simulacije, vodeća grupa vozila će, pošto nema vozila ispred, brzo dostići željenu brzinu i "povući" ostala vozila koja slede. Vreme zagrevanja treba da obezbedi uspostavljanje ravnoteže unutar toka, kako u smislu brzina tako i u pogledu strukture (teretna vozila su sporija i postojaće tendencija njihovog grupisanja).

Vremenski presek kada se postiže stabilan saobraćajni tok u procesu simulacije je nepoznata koju je nemoguće odrediti nekim egzaktnijim zakonitostima. Uticajni faktori su raznovrsni i mnogobrojni (npr. dužina deonice, podužni nagib, dolazne brzine, protok, struktura saobraćajnog toka i sl.). Ovaj problem je prevaziđen sledećim postupkom:

- vreme merenja ( $t_k - t_p$ ) treba da bude dovoljno dugo da, u slučaju da određena vrednost  $t_p$  nije vreme stabilnog toka (odnosno kraće je od stvarnog), ukupan broj opažanja (broj vozila) garantuje da uzorak koji je opažan u uslovima nestabilnog toka nije presudan za vrednosti pokazatelja. Usvojeno je da vreme merenja ( $t_k - t_p$ ) treba da obezbedi opažanja na skupu vozila koji broji min. 300 do 500 prolazaka.

- vreme zagrevanja ( $t_p$ ) izraženo je kao funkcija dva pokazatelja: ukupne dužine deonice (merna deonica + ulazna deonica + izlazna deonica) i očekivane srednje brzine saobraćajnog toka prema:

$$t_p = D / \bar{v}_i + 300 \quad /sec/$$

gde je:  $D$  - dužina deonice zajedno sa ulaznom i izlaznom deonicom /m/

$\bar{v}_i$  - očekivana srednja brzina saobraćajnog toka /m/sec/

Osnovni problem je određivanje  $\bar{v}_i$ , jer su u tom trenutku poznati samo ulazni podaci kao što su saobraćajno opterećenje, nagib deonice i struktura saobraćajnog toka. Imajući u vidu da ova brzina služi samo za određivanje vremena zagrevanja ( $t_p$ ) i da postoji još i dodatni vremenski period stabilizacije od 300 sec. usvojeno je da se očekivana srednja brzina odredi prema:

$$\bar{v}_i = (\bar{v}_{s1} - 12,5 (Q_{mer}/1000) - 5 \cdot P_{TV+TTV} - i_m \cdot 5) / 3,6$$

gde je:  $\bar{v}_i$  - očekivana srednja brzina saobraćajnog toka /m/sec/

$\bar{v}_{s1}$  - srednja brzina slobodne vožnje /km/h/

$Q_{mer}$  - saobraćajno opterećenje /voz/h/

$P_{TV+TTV}$  - procenat teretnih vozila /%/

$i_m$  - podužni nagib merne deonice za  $i > 0$ , za  $i < 0$   $i_m = 0$ .

Može se zapaziti da navedeni odnos, koji je proveren nizom testiranja pri variranju polaznih uslova, u suštini približno odgovara stavu da se stabilan tok postiže 300 sec. posle prolaska prvog TTV kroz krajnju tačku deonice pod uslovom da se kreće trajnom brzinom.

Budući da se u programskom sistemu predviđa i opažanje zakonitosti protok-brzina-gustina usvojeno je da se ovakva opažanja izvršavaju tokom jednog minuta na deonici od 500 m. koja je locirana u sredini merne deonice. Ako je merna deonica kraća od 500 m. opažanja se odnose na deonicu između preseka I i V.

Vremenski presek opažanja odnosa protok-brzina-gustina definisan je kao:

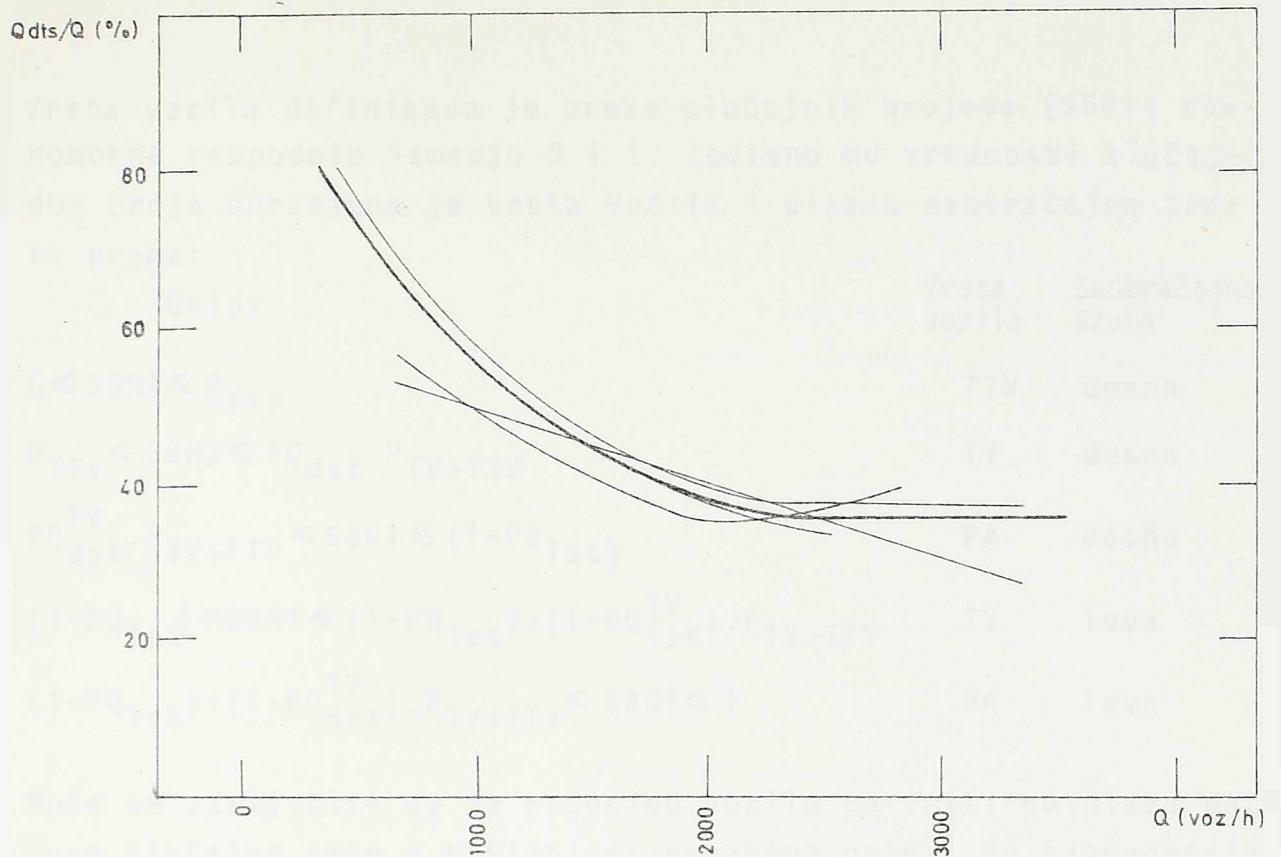
$$t_p + (t_k - t_p)/2 < t < t_p + (t_k - t_p)/2 + 60$$

Brzina je izražena kao srednja brzina svih vozila koja se nalaze unutar deonice dužine 500 m, dok se odgovarajući protok definiše osnovnom zakonitošću  $q = \text{gustina} \cdot \text{brzina}$ .

### 3.1.2 Parametri ulaznog saobraćajnog toka

Na rezultate simulacije saobraćajnog toka utiču i polazne pretpostavke o saobraćajnom toku na ulazu u deonicu koja se ispituje. Iako je uticaj ovih parametara umanjen postojanjem ulazne deonice dužine 1000 m, na kojoj se ne osmatraju karakteristike vozila u kretanju i na kojoj se kretanje vozila simulira kao i na ispitivanoj deonici kao i da postoji vremenski period zagrevanja sistema, ulazni parametri ipak imaju značajnu ulogu u procesu simulacije saobraćajnog toka.

Raspodela saobraćaja po saobraćajnim trakama autoputa funkcija je saobraćajnog opterećenja. Na sl. 43 prikazan je niz ustanovljenih zakonitosti raspodele na levu i desnu saobraćajnu traku kao  $f(Q)$ .



sl.43.

Raspodela vozila po saobraćajnim trakama u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja

Analizirajući rezultate istraživanja može se zapaziti da po ovom parametru nema bitnijih odstupanja ( $Q = 1000 - 2200$  voz/h/ smer) tako da je, za potrebe ovog rada usvojen sledeći odnos:

$$PQ_{1st} = -147,97 + 63,78 \log Q \quad Q < 2200 \text{ voz/h/smer}$$

$$PQ_{1st} = \text{const.} = 65,21 \quad Q \geq 2200 \text{ voz/h/smer}$$

gde je:

$PQ_{1st}$  - % vozila u levoj saobraćajnoj traci

Budući da se radi o simulaciji koja uključuje različitu strukturu vozila (PA,TV,TTV) usvojena je raspodela teretnih vozila po saobraćajnim trakama prema /Lit.62/:

$$PQ_{1st}^{TV} = 65 + 11,11 \left( \frac{2000 - Q}{1000} \right)^2$$

uz uslov da se sva teška teretna vozila nalaze u desnoj saobraćajnoj traci tj.  $PQ_{dst}^{TTV} = 100\%$ . Ova pretpostavka uslovljava da granični procenat TTV iznosi 65% svih teretnih vozila što u realnim uslovima sigurno zadovoljava.

Ovim postupkom stvorene su osnove za sledeće proračune: definisanje vrste vozila i njihov redosled kao i proračun vremenskih intervala nailaska na ulaznom preseku.

Vrsta vozila definisana je preko slučajnih brojeva (SBN1) ravnomerne raspodele izmedju 0 i 1. Zavisno od vrednosti slučajnog broja odredjena je vrsta vozila i ulazna saobraćajna traka prema:

Uslov	Vrsta vozila	Saobraćajna traka
$0 \leq SBN1 \leq P_{TTV}$	TTV	desna
$P_{TTV} < SBN1 \leq PQ_{dst} \cdot P_{TV+TTV}$	TV	desna
$PQ_{dst}^{TV} \cdot P_{TV+TTV} < SBN1 \leq (1 - PQ_{1st})$	PA	desna
$(1 - PQ_{1st}) < SBN1 \leq (1 - PQ_{1st}) + (1 - PQ_{1st}^{TV}) \cdot P_{TV+TTV}$	TV	leva
$(1 - PQ_{1st}) + (1 - PQ_{dst}^{TV}) \cdot P_{TV+TTV} < SBN1 \leq 1$	PA	leva

Može se zaključiti da je redosled vozila po vrsti na ulazu potpuno slučajan iako u suštini na nagibima dolazi do segregacije saobraćajnog toka i redosleda koji nije slučajan. Osnovnu ulogu za prevazilaženje ovog problema treba da odigra ulazna deonica ( $L=1000$  m) na kojoj bi se, kroz simulaciju, odrazili uticaji koji dovode do neslučajne raspodele saobraćajnog toka tako da se na mernim presecima redosled vozila približi realnom stanju.

Vreme ulaska vozila u sistem je jedan od osnovnih ulaznih parametara i definiše se preko vremenskih intervala nailaska vozila. Dayno je uočeno da raspodela vremenskih intervala direktno zavisi od saobraćajnog opterećenja i razvijen je niz matematičkih modela koji simuliraju ovu raspodelu (Puasonova raspodela, Erlang, Pirson III, Šul, Hiperlang i sl.). Statistička pouzdanost navedenih raspodela ispitivana je od strane više autora i prema /Lit.11/ osnovni problem je pouzdanost verovatnoće pojave vremenskih intervala manjih od 3 sec.

Izbor odgovarajuće raspodele u suštini je kompromis izmedju pouzdanosti koju matematička formulacija obezbedjuje kao i kompleksnosti i trajanja proračuna. Pošto se radi o ulaznim parametrima koji će, simulacijom na ulaznoj deonici, biti značajno promenjeni, u ovom radu je usvojena kombinovana raspodela prema /Lit.61/.



U uslovima saobraćaja sa dve i više saobraćajnih traka po smeru, saobraćajni tok se sastoji iz dve grupe vozila: slobodna vozila i vozila u koloni. Kombinovani model zasniva na raspodeli koja se različito formuliše za slobodna vozila (eksponencijalna raspodela) i vozila u koloni (pomerena eksponencijalna raspodela) prema:

$$p(h < t) = (1 - \alpha) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_1}}\right) + \alpha \cdot \left(1 - e^{-\frac{t - \tau}{\delta_2 - \tau}}\right)$$

gde je:

$p(h < t)$  - verovatnoća pojave intervala  $h < t$

$\alpha$  - procenat vozila u koloni

$\delta_1$  - srednji vremenski interval za slobodna vozila

$\delta_2$  - srednji vremenski interval za vozila u koloni

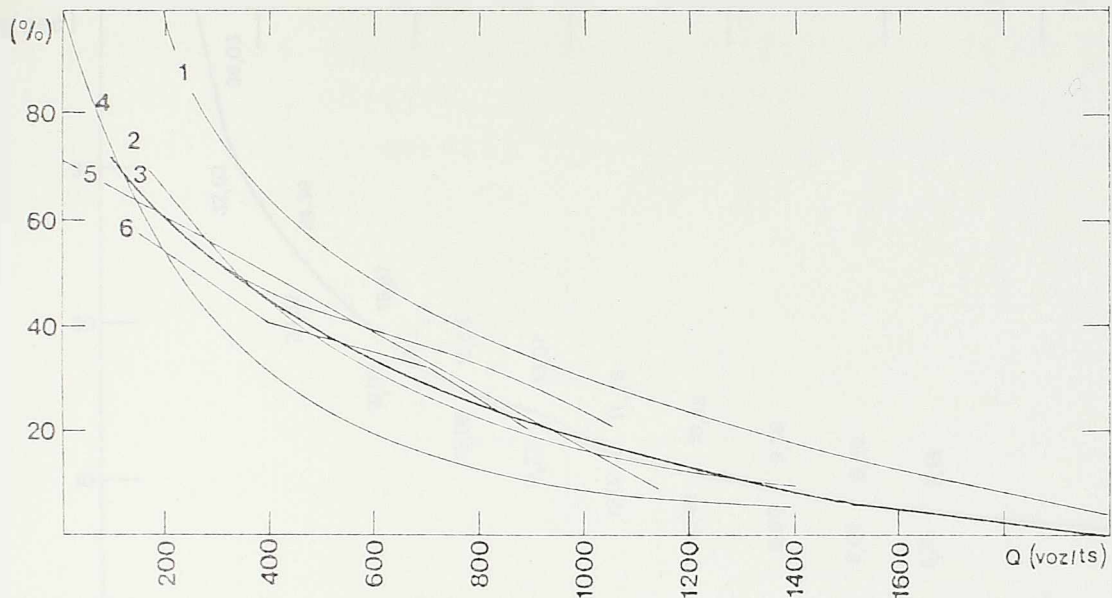
$\tau$  - pomeranje eksponencijalne raspodele odnosno minimalni interval vozila u koloni.

Istraživanjima je utvrđen niz zakonitosti po kojima se mogu odrediti parametri navedene raspodele kao  $f(Q)$  /Lit.12/. Minimalni interval za vozila u koloni ( $\tau$ ) po pravilu se kreće oko 1 sec. i verovatnoća pojave intervala manjeg od 1 sec. opada sa porastom saobraćajnog opterećenja (npr. za  $Q = 500$  voz/ts  $p(h < 1) = 0.02$ ). Usvajanjem vrednosti  $\tau = 1$  sec. istovremeno se minimalni interval vozila uskladjuje sa vremenskim korakom simulacije ( $\Delta t = 1$  sec).

Zavisno od modela koji se usvoji za slobodnu vožnju (čl.2.1.2) dobijaju se različiti rezultati za faktor  $\alpha = f(Q)$  tj. procenat slobodnih vozila u saobraćajnom toku. Treba istaći da se u ovom slučaju, kod autoputeva, opterećenje izražava kao  $Q$  /voz/čas/saobr.traci/.

Na osnovu istraživanja niza autora ustanovljena je nelinearna zakonitost  $\alpha = f(Q)$  a odstupanja su posledica primene različitih graničnih uslova za slobodnu vožnju (npr. kriva 4 na sl.44 zasniva na graničnoj vremenskoj praznini od  $\Delta t \geq 8$  sec).

Usvojena funkcija  $\alpha = f(Q)$  određena je indirektnim postupkom. Naime, kada se usvoji raspodela intervala u saobraćajnom toku, opterećenje se praktično podrazumeva jer je:



sl.44.

Procenat slobodnih vozila u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja

$$Q = 3600 / ((1-\alpha) \cdot \delta_1 + \alpha \cdot \delta_2)$$

Budući da je  $Q$  poznato jer je opterećenje po saobraćajnoj traci (raspodela po trakama) prethodno proračunato (npr.  $Q_{1st} = PQ_{1st} \cdot Q_{mer}$ ) i da je  $\delta_1 = f(Q_{ts})$  i  $\delta_2 = f(Q_{ts})$  odlučeno je da se parametar definiše indirektno prema prethodnoj jednačini.

Istraživanjima /Lit.12/ ustanovljena je funkcionalna zavisnost parametara  $\delta_1$  - srednji interval slobodnih vozila i  $\delta_2$  - srednji interval za vozila u koloni kao  $f(Q)$ . Rezultati su prikazani na sl. 45 i sl. 46.

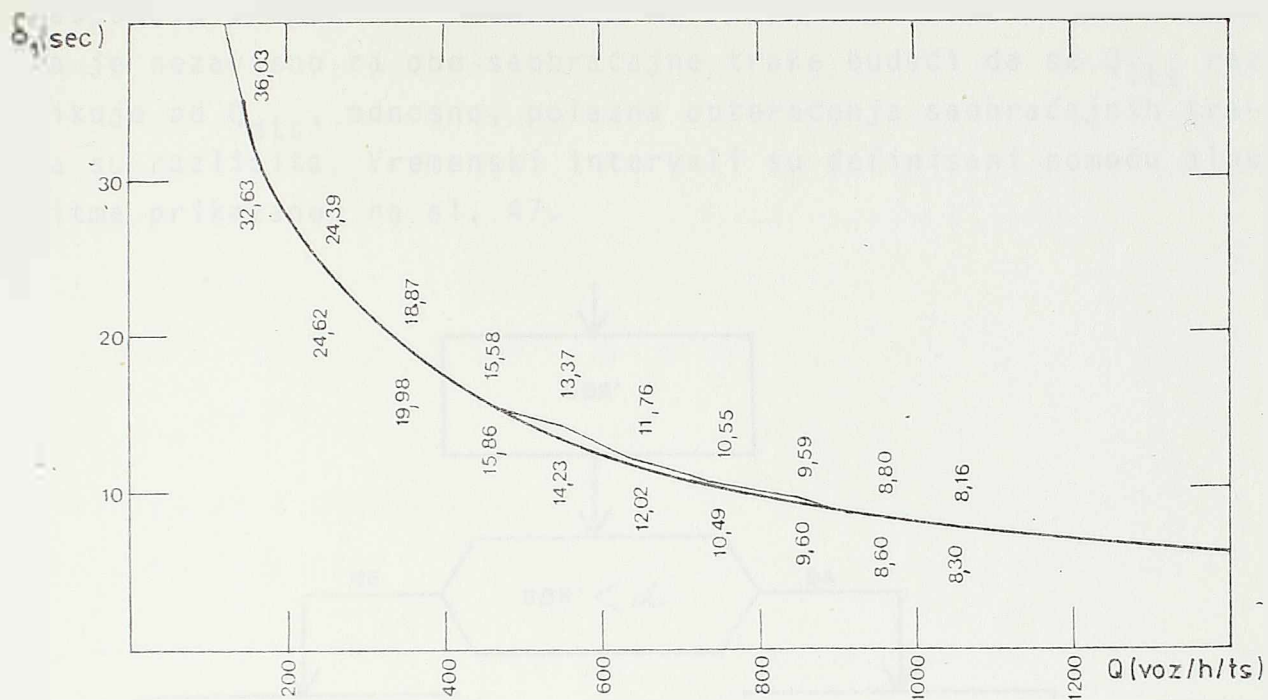
Za potrebe ovog rada usvojene su sledeće funkcionalne zavisnosti:

$$\log \delta_1 = 3,217 - 0,763 \log Q_{ts} \quad \text{za } \forall Q_{ts}$$

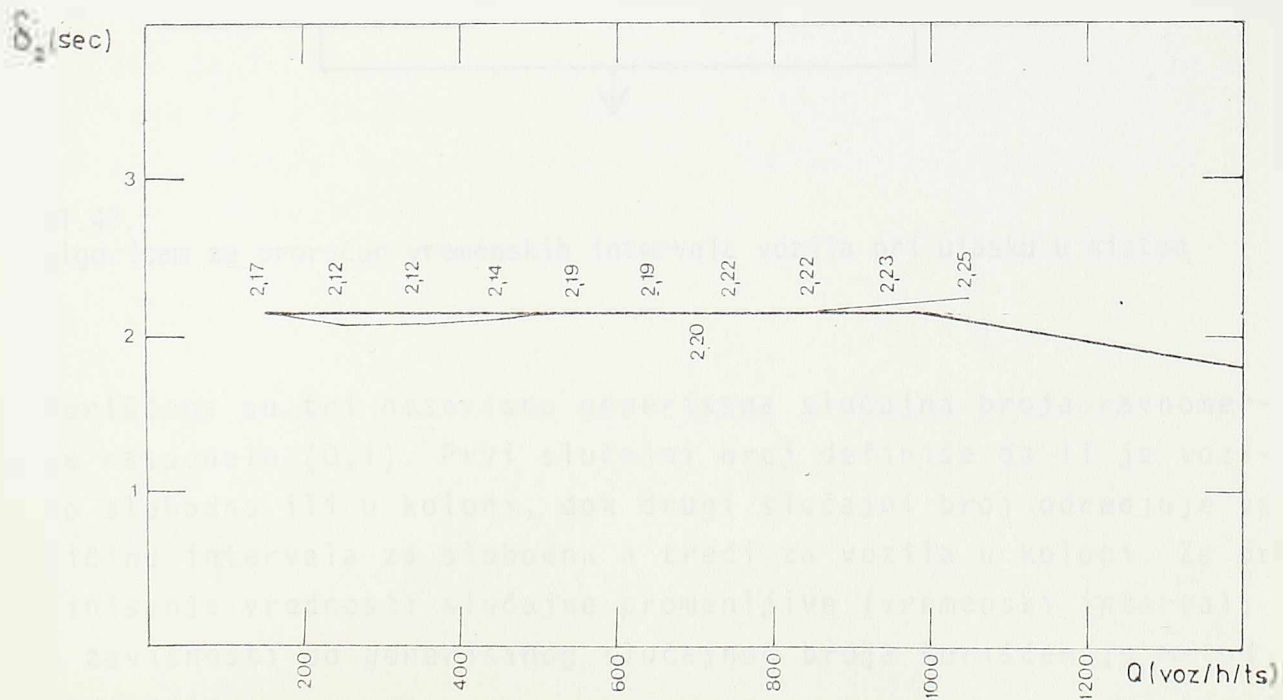
$$\delta_2 = \text{const} = 2,20 \quad \text{za } Q_{ts} \leq 1000$$

$$\delta_2 = 2,20 - 0,000433 (Q_{ts} - 1000) \quad \text{za } Q_{ts} > 1000$$

Zakornitost  $\delta_1 = f(Q_{ts})$  definisana je metodom najmanjih kvadrata i može se zapaziti da pri  $Q_{ts} = Q_{tsmax} \approx 2000$  voz/h/ts  $\delta_1$  iznosi 5 sec. što je granični vremenski interval za slobodna vozila u saobraćajnom toku.

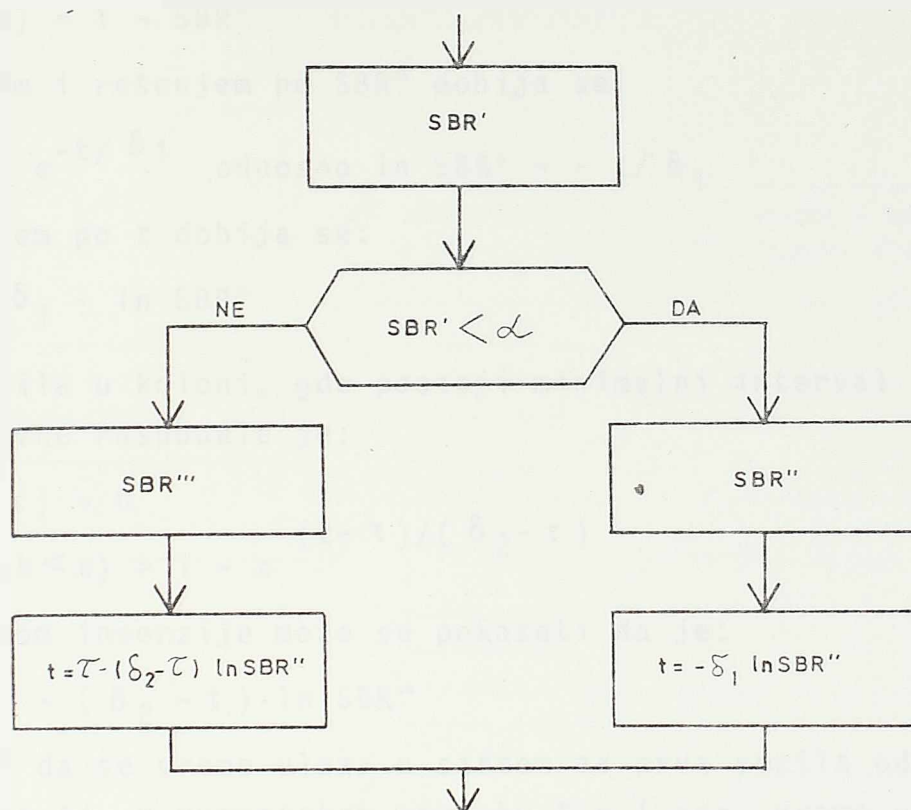


sl.45.  
Srednji interval slobodnih vozila  $\delta_1 = f(Q_{ts})$



sl.46.  
Srednji interval za vozila u koloni  $\delta_2 = f(Q_{ts})$

Raspodela vremenskih intervala nailaska vozila na ulazu izvršena je nezavisno za obe saobraćajne trake budući da se  $Q_1 t_s$  razlikuje od  $Q_{dts}$ , odnosno, polazna opterećenja saobraćajnih traka su različita. Vremenski intervali su definisani pomoću algoritma prikazanog na sl. 47.



sl.47.

Algoritam za proračun vremenskih intervala vozila pri ulasku u sistem

Korišćena su tri nezavisno generisana slučajna broja ravnomerne raspodele (0,1). Prvi slučajni broj definiše da li je vozilo slobodno ili u koloni, dok drugi slučajni broj određuje veličinu intervala za slobodna a treći za vozila u koloni. Za definisanje vrednosti slučajne promenljive (vremenski interval) u zavisnosti od generisanog slučajnog broja korišćen je metod inverzije.

Za slobodna vozila važi zakonitost:

$$p(h < t) = 1 - e^{-t / \delta_1}$$

Pošto je  $SBR''$  ravnomerno rasporedjen slučajni broj  $0 \leq SBR'' \leq 1$  sledi da i  $(1-SBR'')$  takodje mora biti ravnomerno rasporedjen broj  $0 \leq (1-SBR'') \leq 1$ . Pošto je i  $p(h < t)$  takodje ravnomerno rasporedjena slučajna promenljiva  $0 < p(h \leq t) \leq 1$  sledi:

$$p(h < t) = 1 - SBR''$$

Zamenom i rešenjem po  $SBR''$  dobija se:

$$SBR'' = e^{-t/\delta_1} \quad \text{odnosno} \quad \ln SBR'' = -t/\delta_1$$

Rešenjem po  $t$  dobija se:

$$t = -\delta_1 \cdot \ln SBR''$$

Za vozila u koloni, gde postoji minimalni interval  $\tau$  kriva kumulativne raspodele je:

$$p(h < \tau) = 0$$

$$p(\tau < h < t) = 1 - e^{-(t-\tau)/(\delta_2-\tau)}$$

Primenom inverzije može se pokazati da je:

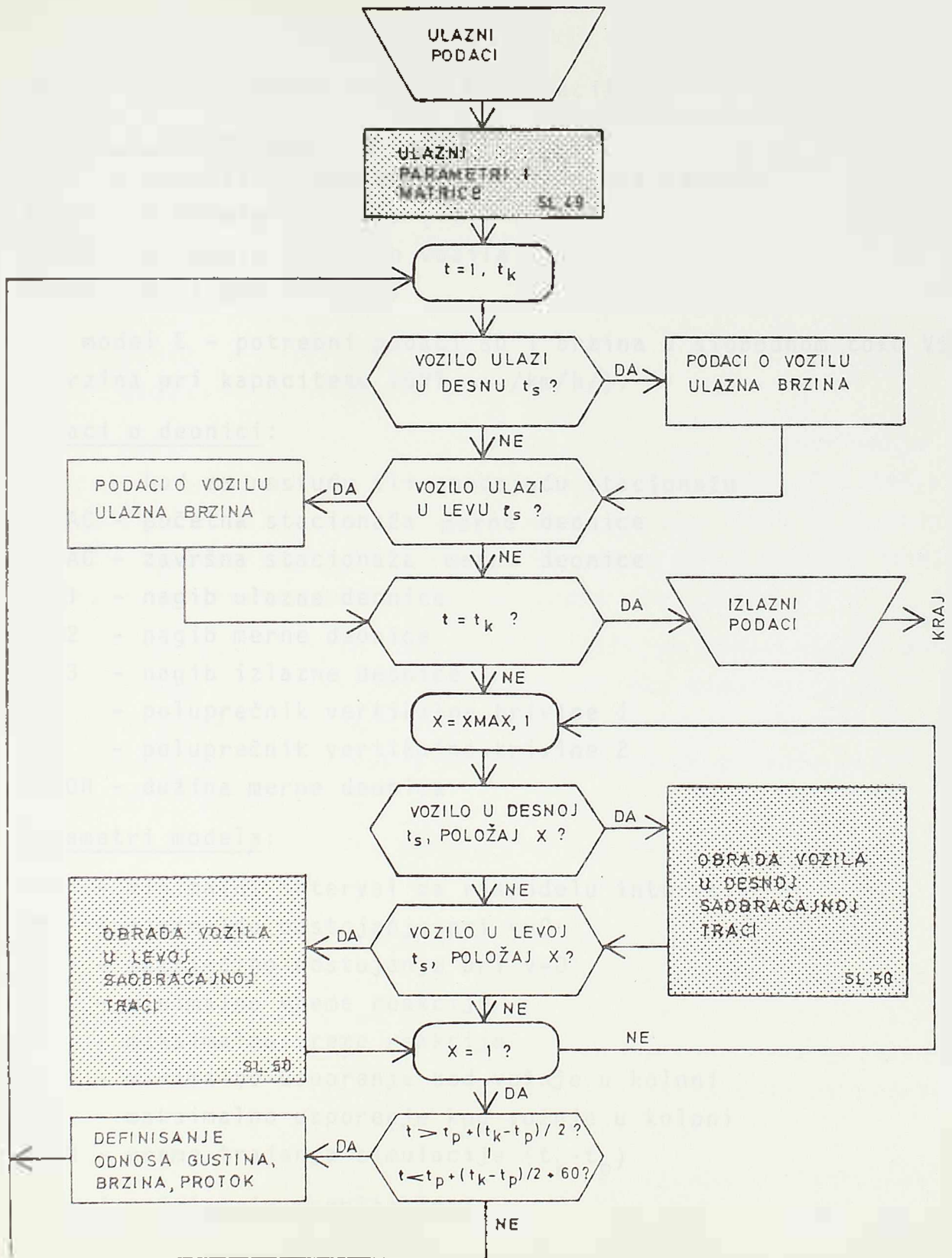
$$t = \tau - (\delta_2 - \tau) \cdot \ln SBR''$$

Budući da se vreme ulaza u sistem za prva vozila odredjuje nezavisno tj. u vremenskom preseku  $t = 1$  sec, vreme ulaska svih ostalih vozila koja slede dobijaju se sabiranjem odgovarajućih vremenskih intervala izmedju vozila.

### 3.1.3 Postupci i ulazni podaci

Proces simulacije sadrži četiri bitna koraka: (v.sl. 48.)

- ulazni podaci, priprema ulaznih matrica i proračun osnovnih parametara
- osnovni iterativni ciklus tj. dva koncentrična DO ciklusa po vremenu  $t$  sa korakom  $\Delta t = 1$  sec i po prostoru  $X$  sa korakom  $\Delta X = 1$  što odgovara prostornom modulu dužine 5 m.
- priprema izlaznih podataka (brzine, vreme, gustine, protok, statistički pokazatelji i sl.)
- štampanje izlaznih podataka u obliku tabela, histograma i dijagrama.



sl.48.  
Osnovni algoritam procesa simulacije

Ulazni podaci sadrže sledeće informacije:

Podaci o saobraćaju:

QMER - merodavno saobraćajno opterećenje /voz/h/

PKAM1 - % teretnih vozila (TV)

PKAM2 - % teških teretnih vozila (TTV)

PKAM3 - % ukupno TV + TTV

(za model E - potrebni podaci su i brzina u slobodnom toku VSL i brzina pri kapacitetu VOPT - /km/h/).

Podaci o deonici:

IST - kod za rastuću ili opadajuću stacionažu

PSTAC - početna stacionaža merne deonice

ZSTAC - završna stacionaža merne deonice

PAD1 - nagib ulazne deonice

PAD2 - nagib merne deonice

PAD3 - nagib izlazne deonice

RV1 - poluprečnik vertikalne krivine 1

RV2 - poluprečnik vertikalne krivine 2

LDEON - dužina merne deonice

Parametri modela:

TAU - minimalni interval za raspodelu intervala

DM - minimalno odstojanje pri  $v=0$

DR - maksimalno odstojanje pri  $v=0$

TM - minimalno vreme reakcije

TR - maksimalno vreme reakcije

UM - minimalno usporenje kod vožnje u koloni

UR - maksimalno usporenje kod vožnje u koloni

KSIM - vreme trajanja simulacije ( $t_k - t_p$ )

Podaci o izlaznim rezultatima:

VINTV - veličina intervala za grupisanje podataka o brzinama vozila

VINTT - veličina intervala za grupisanje podataka o vremenu zadržavanja

IHST - vrsta histograma na izlazu

IRAZ - razmera za histogram

Parametri raspodele slučajnih brojeva normalne raspodele (0,1) dati su parovima vrednosti u obliku (SB<sub>i</sub>, SIG<sub>i</sub>) gde je SB<sub>i</sub> odgovarajuća srednja vrednost ( $\mu$ ) SIG<sub>i</sub> standardna devijacija ( $\sigma$ ). U skladu sa potrebama generisanja nezavisnih nizova slučajnih brojeva ulazni podaci su:

- (SB11, SIG11) - karakteristike vozača PA
- (SB12, SIG12) - karakteristike vozača TV+TTV
- (SB21, SIG21) - opterećenje PA
- (SB22, SIG22) - opterećenje TV
- (SB23, SIG23) - opterećenje TTV

Za odredjivanje brzina u slobodnom toku ( $V_{s1}$ ) i generisanje slučajnih brojeva normalne raspodele (0,1) za proračun željeznih brzina (v.čl.2.1.2) ulazni podaci su (za svaku kategoriju vozila posebno): ( $V_{sr}, V_{min}, V_{max}, SD$ ) tj. srednja brzina, minimalna i maksimalna brzina i standardna devijacija.

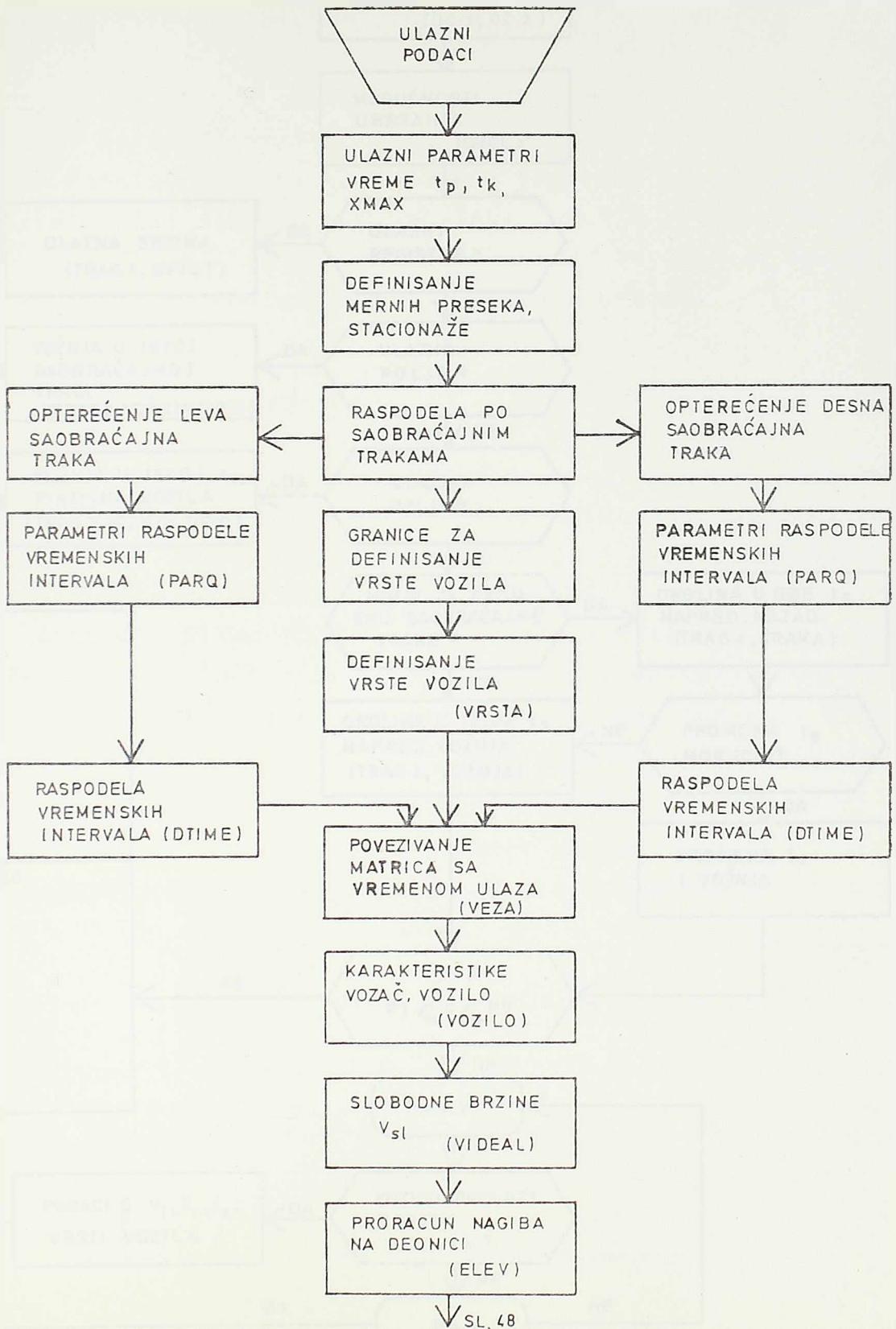
Na osnovu ovih ulaznih podataka definišu se odgovarajući pokazatelji kao što su ukupno trajanje procesa simulacije ( $t_k$ ), vreme zagrevanja sistema ( $t_p$ ), granica matrice prostora ( $x_{max}$ ), stacionaže mernih preseka, kriterijumi za grupisanje podataka merenja ( $f(VINTV)$ ) i sl.

Proces pripreme ulaznih parametara i matrica prikazan je na sl.49.

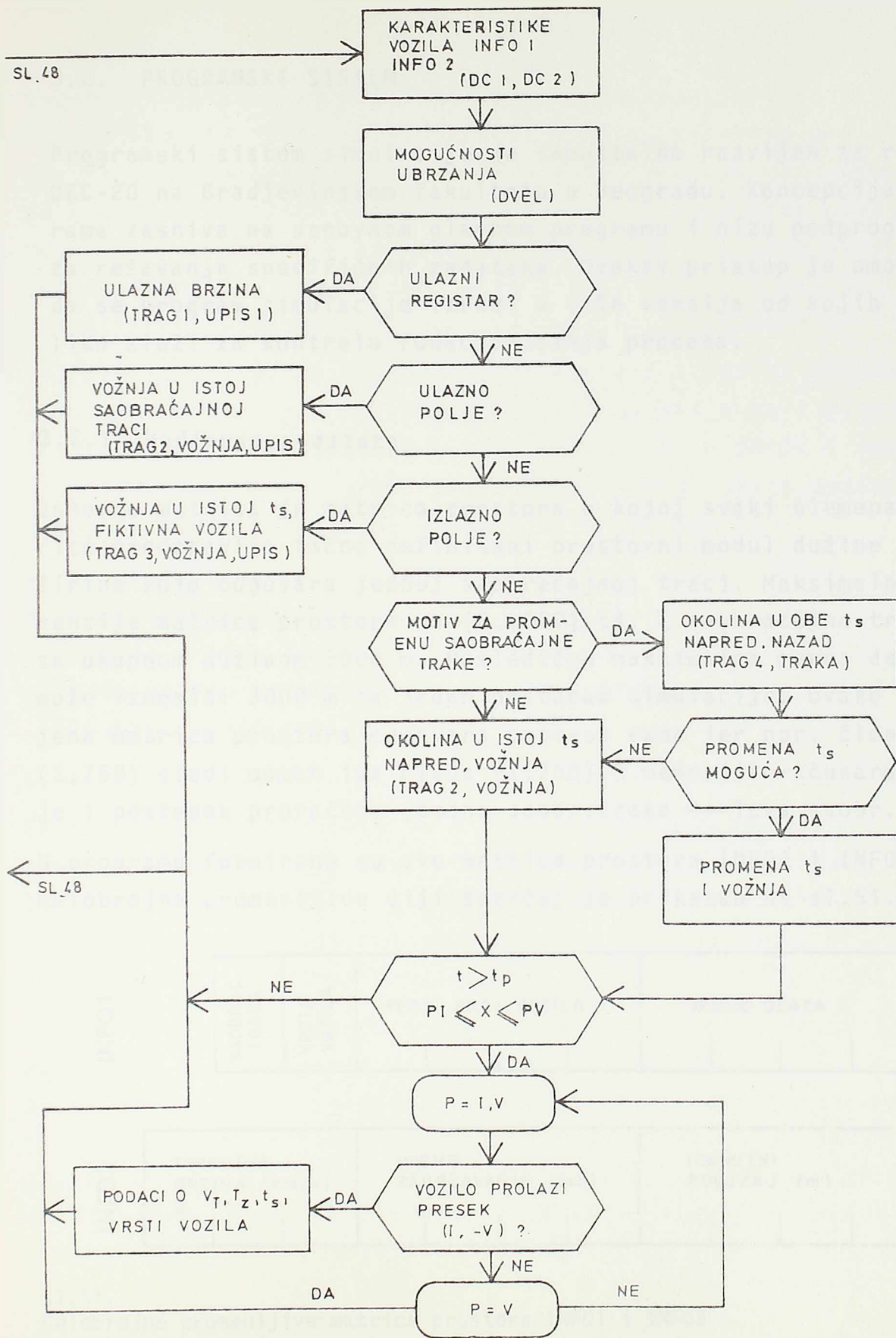
Kao što je ranije istaknuto, u procesu simulacije saobraćajnog toka ključni korak je obrada pojedinačnih vozila u uslovima okoline u odgovarajućem vremenskom preseku. U skladu sa iznetim stavovima (v.čl.2.4.4) opšti algoritam ovog procesa prikazan je na sl.50 i u principu se ne razlikuje u zavisnosti od primenjenog modela vožnje u koloni (model L ili model E).

U ulaznoj zoni, ako se vozilo locira u ulaznom registru, po pravilu se definiše samo ulazna brzina i vozilo se ne pomera u tom vremenskom preseku. Takodje, u prvih 100 m. ulazne deonice, zbog uslova programa za promenu saobraćajne trake, nije dozvoljena promena saobraćajne trake. Imajući u vidu iznete stavove o uslovima izlaza vozila iz sistema, na zadnjih 250 m. izlazne deonice takodje nije dozvoljena promena trake.





sl.49.  
Proces pripreme ulaznih podataka i matrica



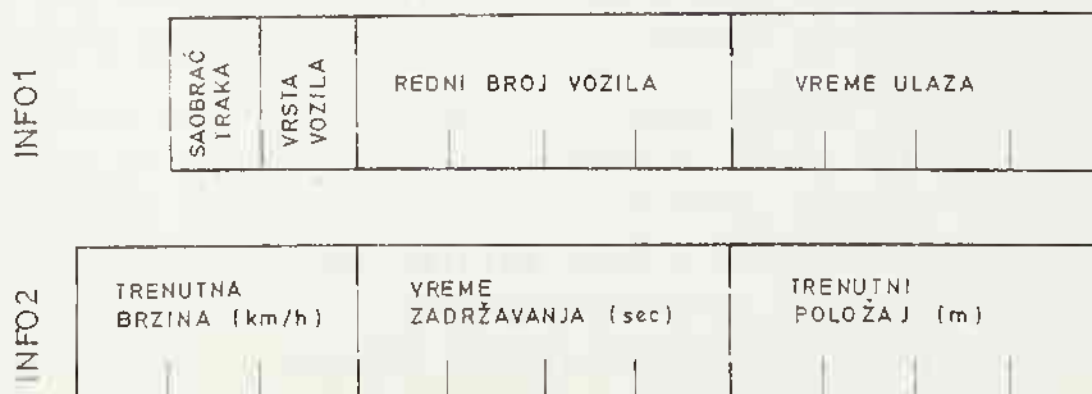
sl.50.  
Postupci obrade

### 3.2. PROGRAMSKI SISTEM

Programski sistem simulacije je samostalno razvijen za računar DEC-20 na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu. Konceptcija programa zasniva na osnovnom glavnom programu i nizu podprograma za rešavanje specifičnih zadataka. Ovakav pristup je omogućio da se program simulacije izradi u više verzija od kojih nekoliko služi za kontrolu funkcionisanja procesa.

#### 3.2.1 Vodjenje podataka

Osnovna matrica je matrica prostora u kojoj svaki element matrice predstavlja tačno definisani prostorni modul dužine 5 m i širine koja odgovara jednoj saobraćajnoj traci. Maksimalne dimenzije matrice prostora su (2,1000) tj. 2 saobraćajne trake sa ukupnom dužinom 5000 m. Posledično maksimalna merna deonica može iznositi 3000 m za jedan postupak simulacije. Ovako usvojena matrica prostora odgovara procesu rada jer npr. član (2,768) sledi odmah iza člana (1,768) u memoriji računara što je i postupak proračuna (desna saobr.traka → leva saobr.traka). U programu formirane su dve matrice prostora INFO1 i INFO2 kao celobrojne promenljive čiji sadržaj je prikazan na sl.51.



sl.51.  
Celobrojne promenljive matrice prostora INFO1 i INFO2

U cilju manjeg opterećenja memorije računara, celobrojne promenljive INFO1 i INFO2 su u suštini kombinovane iz niza podataka. Odmah se može zapaziti da se sadržaj INFO1 ne menja kroz

vreme dok je sadržaj INFO2 podložen promenama jer sadrži informacije kao što je trenutni položaj vozila, trenutna brzina i sl. Celobrojna promenljiva INFO1 u suštini služi kao informacija o vozilu i vozaču i predstavlja vezu sa datotekom podataka koji se vode u drugom sistemu. Osnovu druge datoteke čini saobraćajna traka ulaza i redni broj vozila što predstavlja vezu sa matricama podataka koji opisuju vozilo i vozača.

Niz matrica, koje se vode u drugom sistemu i sadrže podatke o vozilu i vozaču, jednom kada se oformi ne menja se i služi kao informaciona baza. Dekomponovanjem promenljive INFO1 i dodavanjem podataka saobr. traka ulaza i redni broj ulaza uvode se u proračun podaci o sistemu vozač-vozilo kao što su:

- karakteristike vozača ( $SB1(X)$ )
- iskorišćenje kapaciteta vozila ( $SB1(V)$ )
- željena brzina u slobodnom toku ( $V_{s1}$ )
- redosled tj. vreme ulaska u sistem, traka-ulaska, redni broj ulaska i vrsta vozila.

Element matrica INFO1 i INFO2 može imati sledeće vrednosti:

$INFO1(i,j) = 0$   $INFO2(i,j) = 0$  tj. u prostornom modlu saobr. traka (i) položaj (j) nema vozila u vremenskom preseku (t)

$INFO1(i,j) \neq 0$   $INFO2(i,j) \neq 0$  tj. u prostornom modulu saobr. traka (i) položaj (j) nalazi se vozilo čije su karakteristike sadržane u celobrojnoj promenljivoj  $INFO1(i,j)$  i  $INFO2(i,j)$ .

Posledično, pri kretanju vozila u svakom koraku simulacije, neophodno je u element matrice INFO1 i INFO2, koji se određuje na osnovu novog položaja vozila ( $t=t+1$ ), upisati odgovarajuće vrednosti a element matrica INFO1 i INFO2 koji odgovara starom položaju vozila ( $t=t'$ ) upisati nule. U trenutku prolaska vozila kroz merne preseke izdvajaju se odgovarajući podaci u posebne matrice opažanja.

### 3.2.2 Struktura programa

Ceo program razvijan je po nezavisnim modulima - podprogramima. Razlog za ovakav pristup leži u nizu prednosti:

- testira se podprogram po podprogram uz pomoć kratkih glavnih programa i na taj način ispravljaju eventualne greške.
- omogućena je izrada više verzija intervencijom samo u nekim podprogramima (npr. model L i model E zahtevaju intervencije u podprogramima za kretanje vozila i promenu saobraćajne trake).
- svaka dalja nadgradnja je pojednostavljena jer se može izvesti drugačijom kombinacijom podprograma i/ili promenama unutar podprograma i/ili dodavanjem i isključivanjem pojedinih podprograma iz sistema.

Program simulacije saobraćajnog toka izradjen je u sledećim osnovnim verzijama:

- SIMSTL - program simulacije sa linearnim modelom vožnje u koloni (pogl.2.1.3)
- SIMSTE - program simulacije saobraćajnog toka sa eksponencijalnim modelom vožnje u koloni (pogl.2.1.3)
- SIMSTX - program simulacije sa izlazom u obliku X-T dijagrama za analizirana vozila - služi za kontrolu kretanja pojedinačnih vozila
- SIMSTP - program simulacije sa izlazom u obliku matrice prostora - položaj i karakteristike vozila u prostoru za niz određenih vremenskih preseka.

Osnovni programski sistemi su SIMSTL i SIMSTE koji se, kao što je istaknuto, razlikuju samo po modelu vožnje u koloni. Struktura ovih programa je identična i sastoji se iz kombinacije niza podprograma. Listu podprograma čine:

- PARQ - podprogram za definisanje parametara raspodele vremenskih intervala na ulazu u sistem (pogl.3.1.2)
- DTIME - podprogram za raspodelu vremenskih intervala ulaza u sistem i definisanje vremena ulaska (pogl.3.1.2)
- VRSTA - podprogram za određivanje vrste vozila na osnovu uspostavljenih granica raspodele po saobraćajnim trakama i generisanih slučajnih brojeva ravnomerne raspodele (pogl.3.1.2)
- VEZA - podprogram za povezivanje matrica u jedinstvenu matricu sa pokazateljima koji odgovaraju sadržaju celobrojne

- promenljive INFO1 (pogl.3.1.2)
- VOZIL0 - podprogram za definisanje karakteristika vozača i opterećenja vozila na osnovu generisanih slučajnih brojeva normalne raspodele tj. karakteristike sistema vozač-vozilo (pogl.2.1.2.2)
- VIDEAL - podprogram za definisanje maksimalnih brzina u slobodnoj vožnji ( $v_{s1}$ ) za sva vozila koja udju u sistem. (pogl.2.1.2)
- ELEV - podprogram za proračun matrice nagiba na deonicama u padu i na deonicama u zoni vertikalne krivine (pogl. 2.4.1)
- DVEL - podprogram za proračun dinamičkog faktora sistema vozač-vozilo i mogućnosti maksimalnih ubrzanja (pogl. 2.3)
- TRAG1 - uslovi okoline za vozilo u ulaznom registru - vozilo napred
- UPIS1 - podprogram za formiranje celobrojne INFO2 za vozilo u ulaznom registru
- TRAG2 - okolina za vozilo koje se kreće bez promene saobraćajne trake - vozilo napred
- VOŽNJA - podprogram za proračun brzine, ubrzanja, novog položaja i vremena zadržavanja u zavisnosti od uslova okoline (vozilo napred, mogućnosti sistema vozač-vozilo - pogl. 2.1.2, 2.1.3, 2.4.4).
- TRAG3 - okolina u izlaznom području vozilo napred uvođenje fiktivnih vozila u sistem
- UPIS - podprogram za upisivanje celobrojne u matricu INFO1 i INFO2 u zavisnosti od rezultata izlaza podprograma VOŽNJA
- TRAG4 - okolina u uslovima postojanja motiva za promenu saobraćajne trake - oba vozila napred i natrag (pogl.2.4.5)
- TRAKA - podprogram za ispitivanje mogućnosti promene saobraćajne trake, realizacija promene i upisivanje u matrice INFO1 i INFO2 u zavisnosti od rezultata proračuna (pogl.2.4.5)
- SBRR - podprogram za generisanje brojeva ravnomerne raspodele (0,1)

- GVQ - podprogram za proračun zakonitosti brzina-gustina-protok i izradu dijagrama na štampaču
- SBNR - podprogram za generisanje slučajnih brojeva normalne raspodele (0,1) za zadatim parametrima ( $\mu$ ,  $\sigma$ )
- HIST - podprogram za izradu histograma na štampaču i proračun statističkih pokazatelja
- DC1 - podprogram za izdvajanje podataka iz celobrojne INF01
- DC2 - podprogram za izdvajanje podataka iz celobrojne INF02
- DC3 - podprogram za sastavljanje nove celobrojne INF02.

### 3.2.3 Izlazni rezultati

Izlazni rezultati sadrže sledeće informacije:

- Pokazatelji ulaznih podataka za proces simulacije.
- Raspodela vozila po saobraćajnim trakama za sve merne preseke (I-V).
- Raspodela opažanja brzina po presecima (histogram i/ili kumulativni histogram) sa pokazateljima - broj opažanja, srednja vrednost, standardna devijacija,  $V_{15\%}$  -  $V_{50\%}$  -  $V_{85\%}$ .
- Raspodela opažanja vremena zadržavanja  $T_z$  po presecima sa istim mogućnostima kao za brzine.
- Opažanja gustina-protok-brzina - prikaz opažanja tokom 60 sec. u obliku dijagrama gustina-brzina, brzina-protok, gustina-brzina za svaku saobraćajnu traku.

Raspodela opažanja po presecima (I-V) kako za brzine tako i za vreme zadržavanja dobija se za skup putničkih vozila u toku (PA), skup teretnih i teških teretnih vozila (TV+TTV) i ukupno za sva vozila. Primeri izlaznih rezultata programa simulacije prikazani su na sl.51 do sl.55.

PRESEK-STACIONAZA 1375.00  
PUTNIČKA VOZILA - BRZINA

Brzina	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	%	KUMΣ	BRZINA
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	10
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	15
20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	20
25	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	25
30	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	30
35	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	35
40	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	40
45	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	45
50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	50
55	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	55
60	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	60
65	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	65
70	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	70
75	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	75
80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	3.09	3.09	80
85	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	7.72	7.72	85
90	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	13.51	13.51	90
95	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	26.25	26.25	95
100	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	40.54	40.54	100
105	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	60.23	60.23	105
110	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	76.06	76.06	110
115	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	86.49	86.49	115
120	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	91.51	91.51	120
125	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	94.98	94.98	125
130	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	97.30	97.30	130
135	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100.00	100.00	135
140	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100.00	100.00	140
145	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100.00	100.00	145
150	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100.00	100.00	150

sl.52.

Primer grafičkog izlaza - raspodela brzina



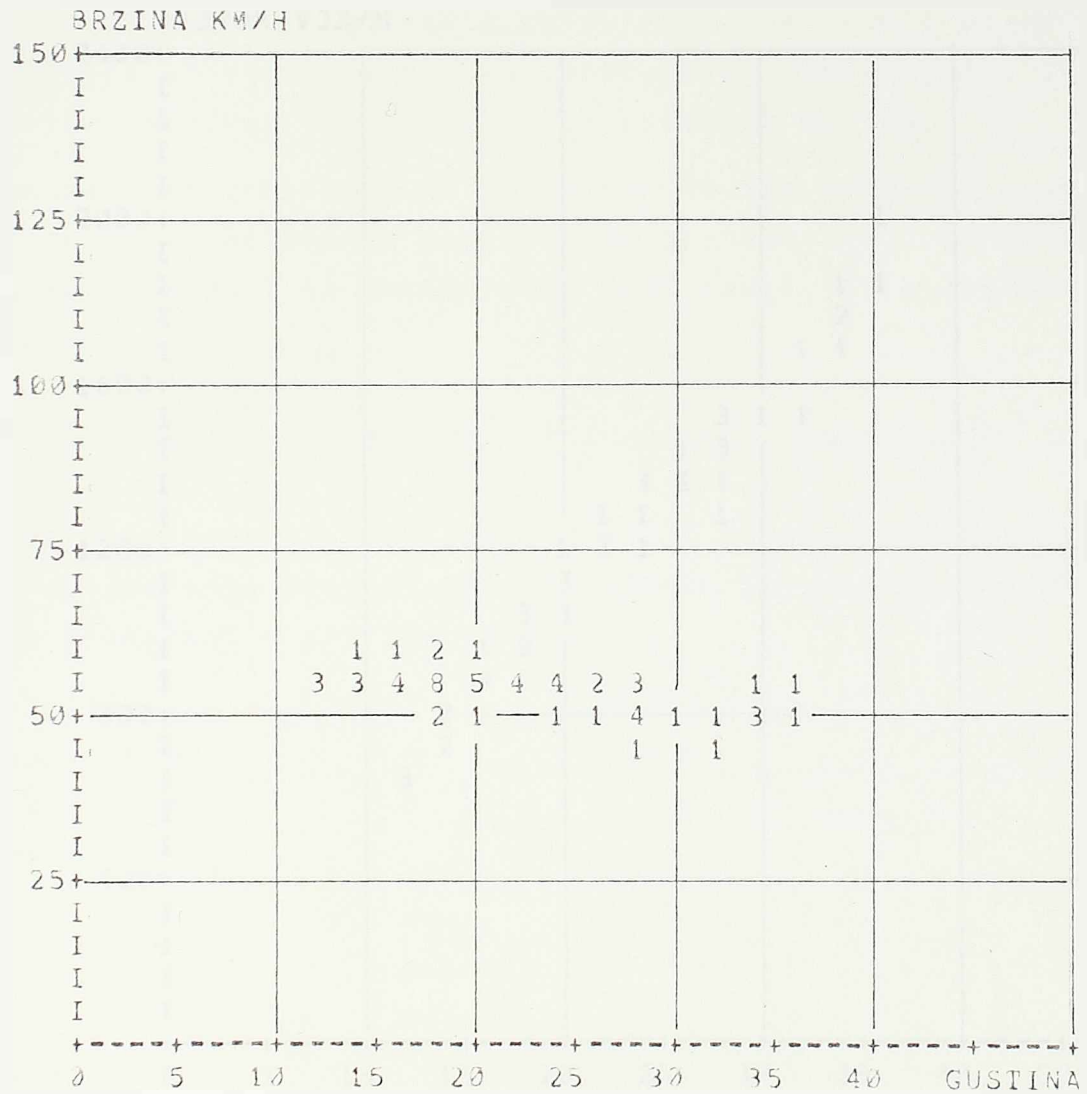
PRESEK-STACIONAZA 1000.00  
PUTNICKA VOZILA - BRZINA

BR.	0	10	20	30	40	50	50	50	70	80	90	100	%	KUM%	BR.
5.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
10.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
15.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
20.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
25.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
30.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
35.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
40.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	0.00	0.
45.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1.27	1.27	6.
50.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1.27	2.55	6.
55.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.76	5.31	13.
60.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	13.59	18.90	64.
65.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	20.59	39.49	97.
70.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	18.68	58.17	88.
75.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	9.13	67.30	43.
80.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	6.16	73.46	29.
85.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	7.22	80.68	34.
90.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11.68	92.36	55.
95.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.97	95.33	14.
100.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	3.40	98.73	16.
105.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.42	99.15	2.
110.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.64	99.79	3.
115.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.21	100.00	1.
120.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
125.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
130.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
135.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
140.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
145.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.
150.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.00	100.00	0.

sl.53.

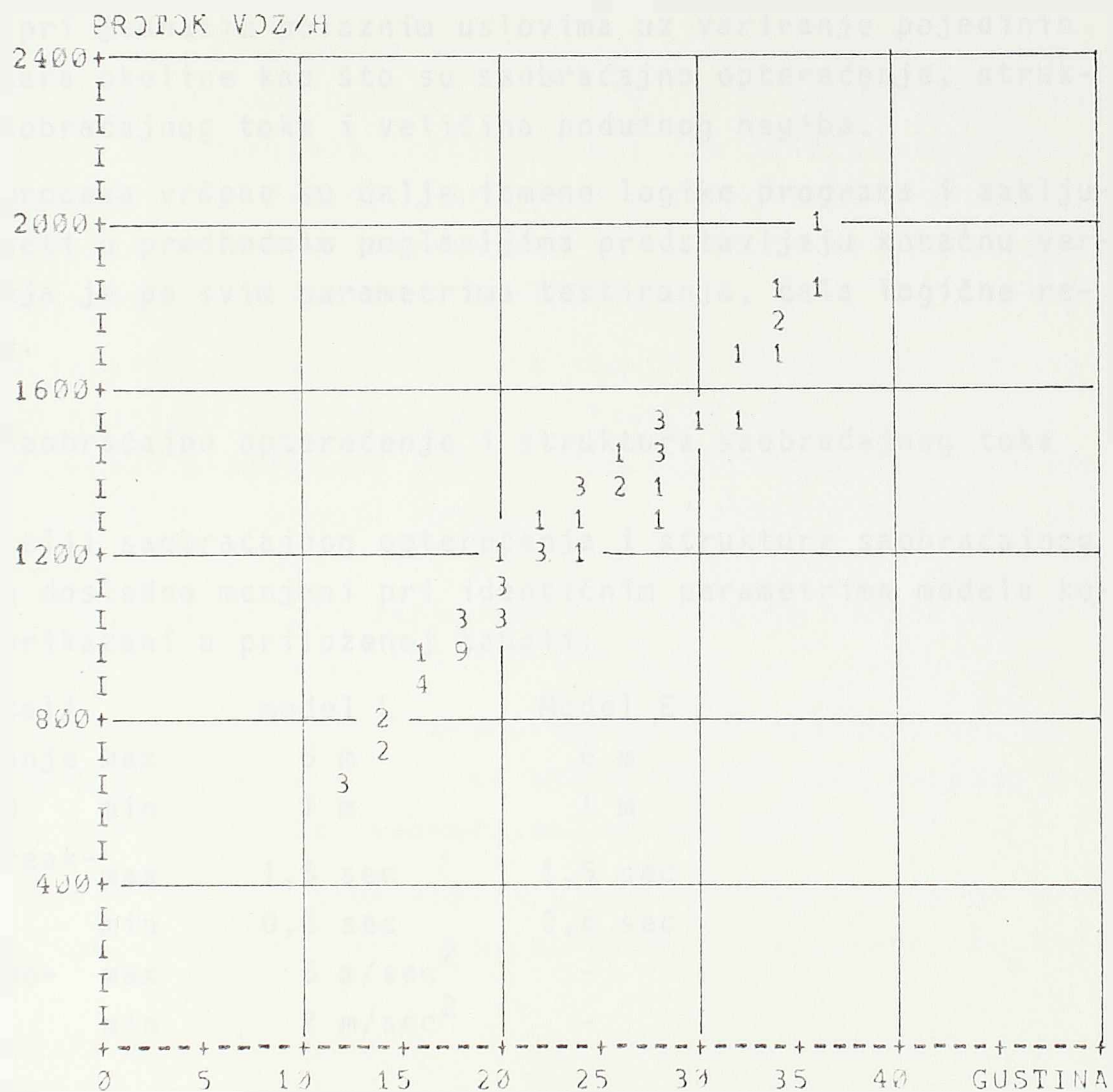
Primer grafičkog izlaza - kumulativna raspodela brzina

GUSTINA-BRZINA-PROTOK SAJBR. TRAKA= 2



sl.54.  
Grafčki prikaz odnosa gustina-brzina

GUSTINA-BRZINA-PROTOK SA 3 BR. TRAKA = 2



sl.55.  
Grafčki prikaz odnosa gustina-protok

### 3.3 REZULTATI PRIMENE

Prvi korak posle formalnog prečišćavanja programskog sistema je ispitivanje logičnosti programskih rezultata. U tom cilju izveden je obiman program testiranja oba modela (model L i model E) pri jednakim polaznim uslovima uz variranje pojedinih parametara okoline kao što su saobraćajno opterećenje, struktura saobraćajnog toka i veličina podužnog nagiba.

Tokom procesa vršene su dalje izmene logike programa i zaključci izneti u predhodnim poglavljima predstavljaju konačnu verziju koja je po svim parametrima testiranja, dala logične rezultate.

#### 3.3.1 Saobraćajno opterećenje i struktura saobraćajnog toka

Pokazatelji saobraćajnog opterećenja i strukture saobraćajnog toka su dosledno menjani pri identičnim parametrima modela koji su prikazani u priloženoj tabeli:

pokazatelj		model L	Model E
Odstojanje	max	6 m	6 m
	min	1 m	1 m
Vreme reakcije	max	1,5 sec	1,5 sec
	min	0,6 sec	0,6 sec
Max. usporjenja	max	5 m/sec <sup>2</sup>	-
	min	2 m/sec <sup>2</sup>	-
Brzina sl. vozila		-	110 km/h
Optimalna brzina		-	60 km/h

Parametri raspodele slučajnih brojeva (v.pogl.3.1.3) koji definišu karakteristike vozača i opterećenje vozila dati su kao  $\mu = 0,5$  i  $\sigma = 0,15$ . Parametri raspodele slobodnih brzina primenjeni su kao što je izneto u poglavlju 2.1.2.

Ispitivanje je izvršeno pri sledećim uslovima: podužni nagib ulazne, merne i izlazne deonice  $i=0\%$ , dužina merne deonice 500 m, vreme simulacije  $t_s$  obezbedjuje uzorak od oko 250 vo-

zila na svakom preseku, saobraćajno opterećenje od 1000 do 3500 voz/h/smer sa korakom od 500 voz/h. Cela serija testiranja je izvršena za idealne uslove (0% teretnih vozila) i za 20% teretnih vozila u saobraćajnom toku (17% TV i 3% TTV).

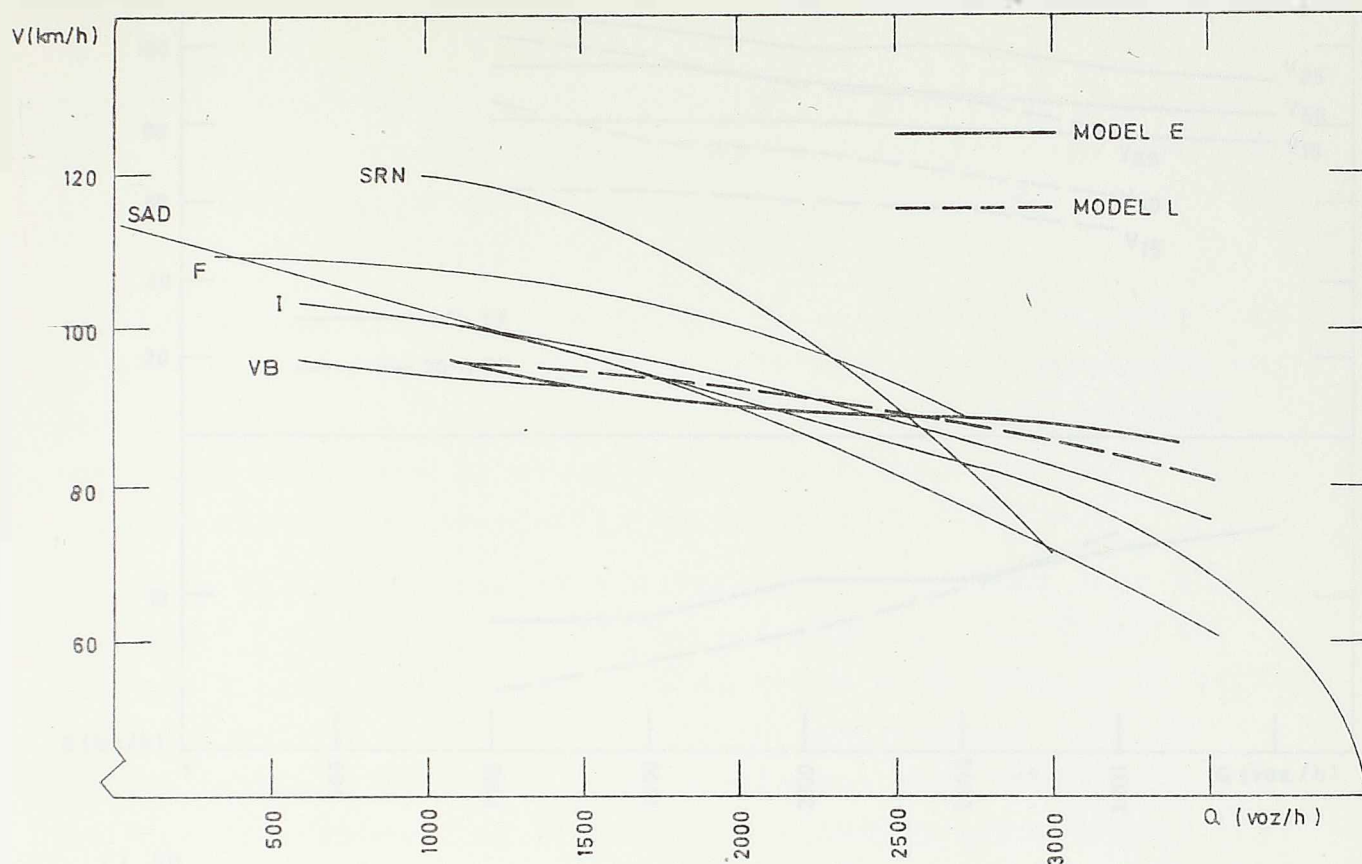
Uporedni prikaz promene  $V_{sr}$  za sva vozila u saobraćajnom toku na preseku III (stacionaža 0+250,00 od ulaznog preseka) pod uticajem saobraćajnog opterećenja prikazan je na sl.56 za idealne uslove (0% teretnih vozila) i pri 20% teretnih vozila u saobraćajnom toku. (Sl.57). Simulirane zakonitosti relativno dobro odražavaju opšte zakonitosti pri sličnim uslovima koje su definisane u nizu zemalja /Lit.54/.

Može se zapaziti da je u uslovima učešća 20% teretnih vozila dobijeno granično opterećenje (tj. ekspanzirani broj vozila koji je prošao preseke od I do V) oko 3000 voz/h/smer. Za dobijanje većih opterećenja neophodna je promena parametara vremena reakcije u modelu L ili odnosa  $V_{sl}/V_{opt}$  u modelu E na osnovu kojeg se određuje parametar osetljivosti vozača na uslove vožnje u koloni (v.pogl.2.1.3 i 2.4.2).

Istraživanja u svetu i niz eksperimentalnih opažanja brzina na autoputevima ustanovila su neke opšte zakonitosti raspodele brzina u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja:

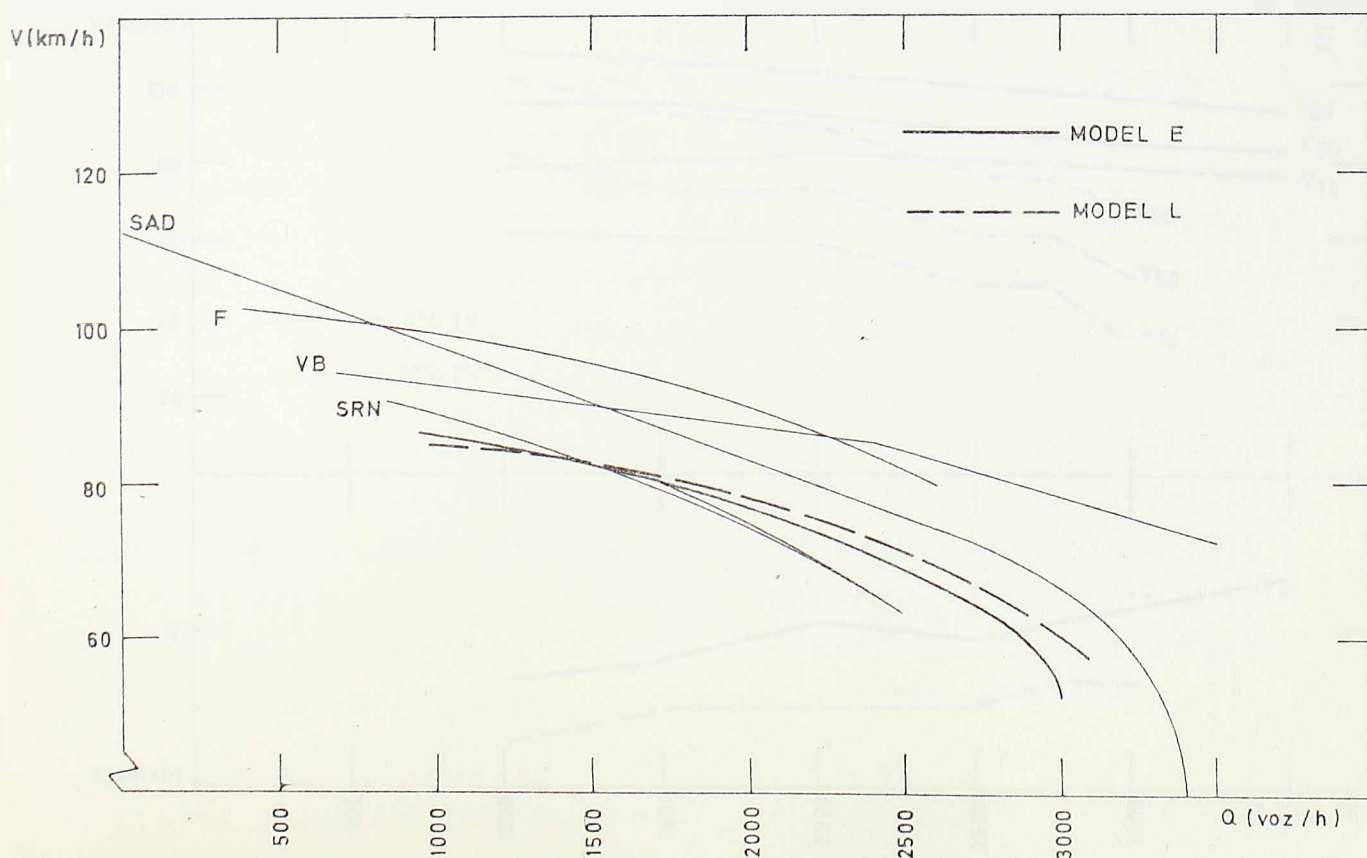
- po pravilu, sa porastom saobraćajnog opterećenja opada brzina saobraćajnog toka i istovremeno opada i standardna devijacija
- empiriska kriva raspodele u najvećem broju slučajeva odgovara normalnoj raspodeli
- pri većem učešću teretnih vozila u saobraćajnom toku srednje brzine opadaju značajnije sa porastom saobraćajnog opterećenja i po pravilu, standardna devijacija je veća nego pri idealnim uslovima (0% teretnih vozila).

Statistički pokazatelji brzina ( $V_{15}, V_{50}, V_{85}$  i standardna devijacija  $s$ ) odražavaju navedene zakonitosti nezavisno od primenjenog modela. Može se zapaziti da, pri usvojenim polaznim parametrima, model E ima izrazitiju promenu  $V$  i  $s$ . (sl.58 i sl.59). Pri idealnim uslovima saobraćajnog toka standardna devi-



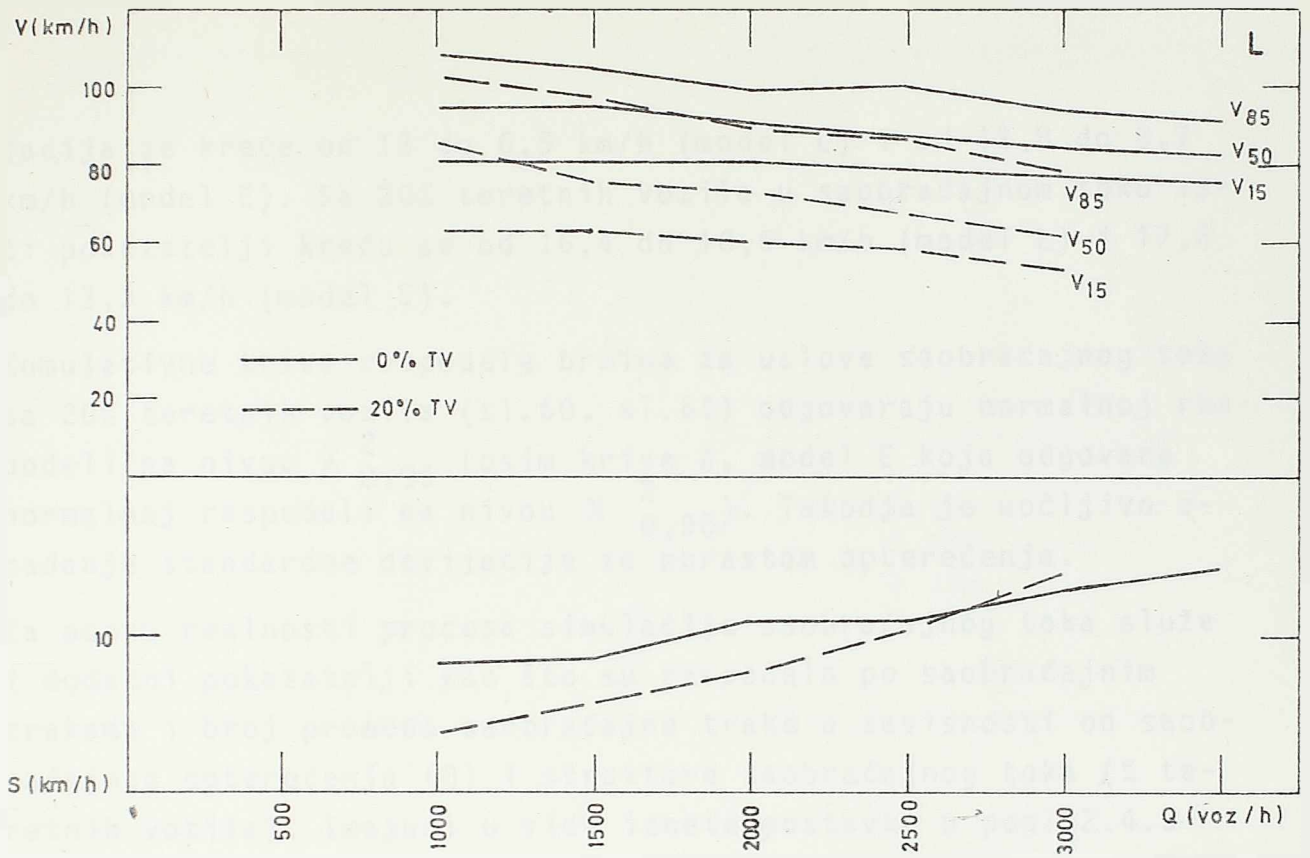
sl.56.

Srednja brzina saobraćajnog toka kao  $f(Q)$  pri idealnim uslovima  
(0% TV+TTV,  $i=0\%$ )

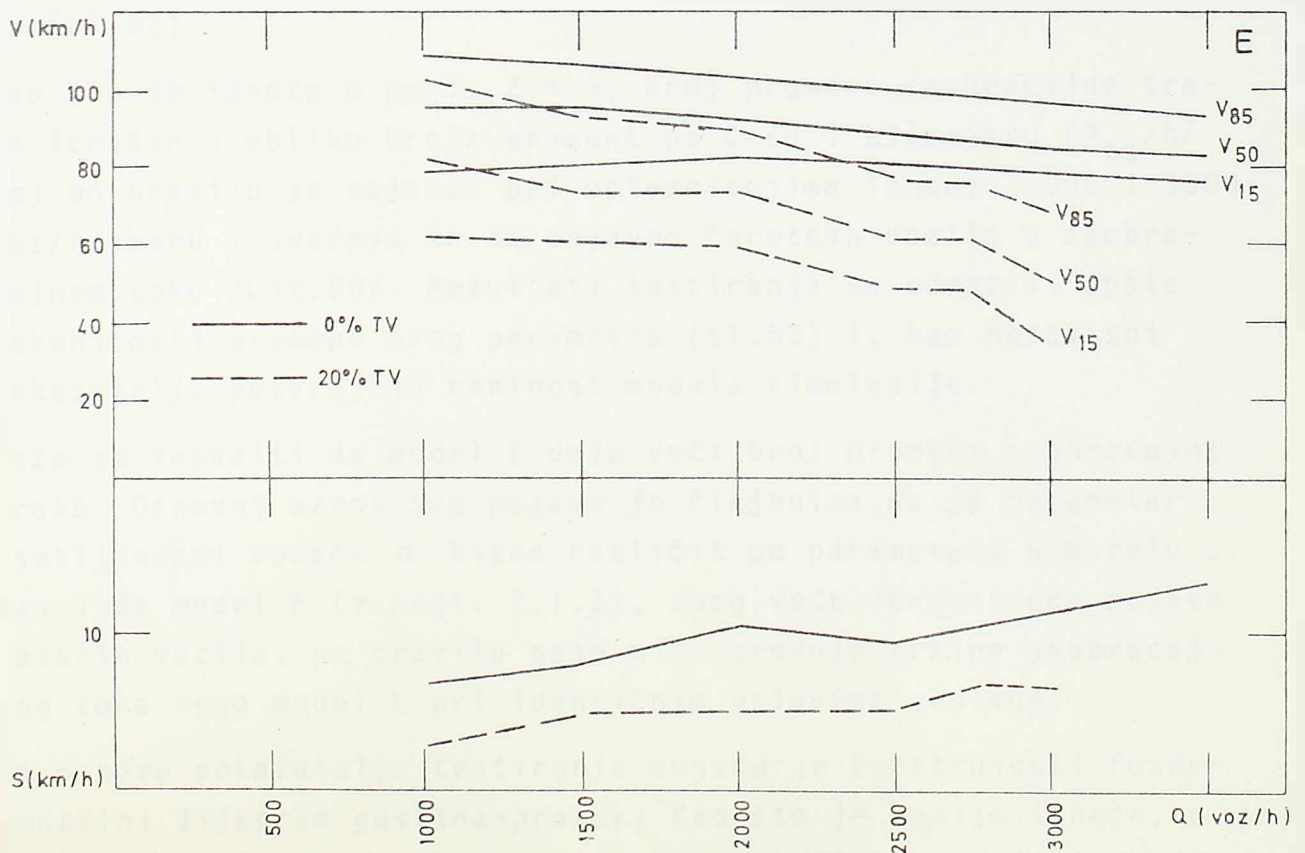


sl.57.

Srednja brzina saobraćajnog toka kao  $f(Q)$  sa 20% teretnih vozila  $i=0\%$



sl.58.  
Statistički pokazatelji raspodele brzina (model L)



sl.59.  
Statistički pokazatelji raspodele brzina (model E)

jacija se kreće od 13 do 6,5 km/h (model L) i od 12,8 do 8,7 km/h (model E). Sa 20% teretnih vozila u saobraćajnom toku isti pokazatelji kreću se od 16,4 do 10,6 km/h (model L) i 17,6 do 13,3 km/h (model E).

Kumulativne krive raspodele brzina za uslove saobraćajnog toka sa 20% teretnih vozila (sl.60, sl.61) odgovaraju normalnoj raspodeli na nivou  $X_{0,95}^2$  (osim krive 2, model E koja odgovara normalnoj raspodeli na nivou  $X_{0,90}^2$ ). Takodje je uočljivo opadanje standardne devijacije sa porastom opterećenja.

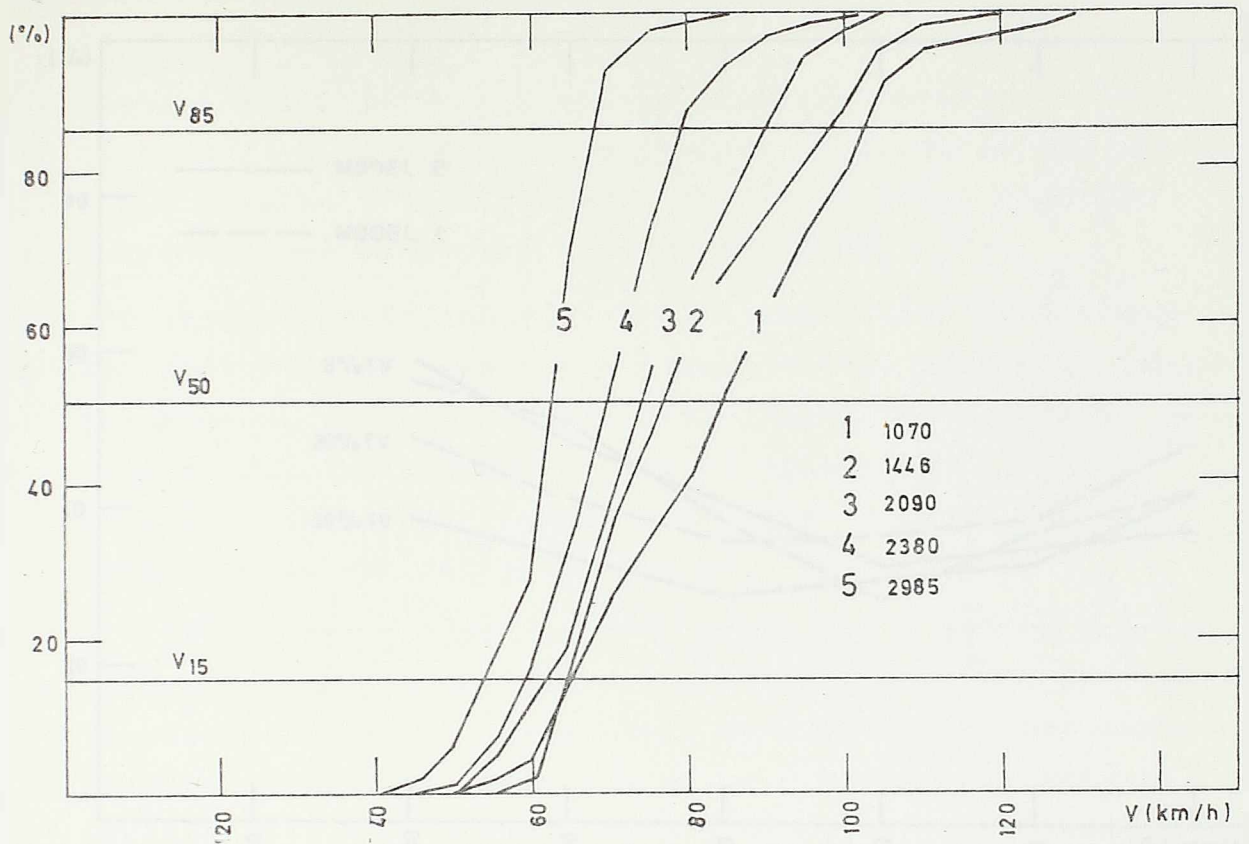
Za ocenu realnosti procesa simulacije saobraćajnog toka služe i dodatni pokazatelji kao što su raspodela po saobraćajnim trakama i broj promena saobraćajne trake u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja (Q) i strukture saobraćajnog toka (% teretnih vozila). Imajući u vidu iznete postavke u pogl.2.4.5 logično je očekivati da broj vozila u desnoj saobraćajnoj traci opada sa porastom učešća teretnih vozila u saobraćajnom toku. Ova zakonitost potvrđjena je nizom eksperimentalnih istraživanja /Lit.5/ i rezultati testa takodje odražavaju ovu pojavu (sl.62).

Kao što je izneto u pogl. 2.4.5, broj promena saobraćajne trake izražen u obliku broja promena po času i kilometru ( $P_{ts}/h/km$ ) po pravilu je najveći pri opterećenjima između 2000 i 3000 voz/h/smeru i uvećava se sa pojavom teretnih vozila u saobraćajnom toku /Lit.59/. Rezultati testiranja su odrazili opšte zakonitosti promene ovog parametra (sl.63) i, kao nezavisni pokazatelj, potvrđuju realnost modela simulacije.

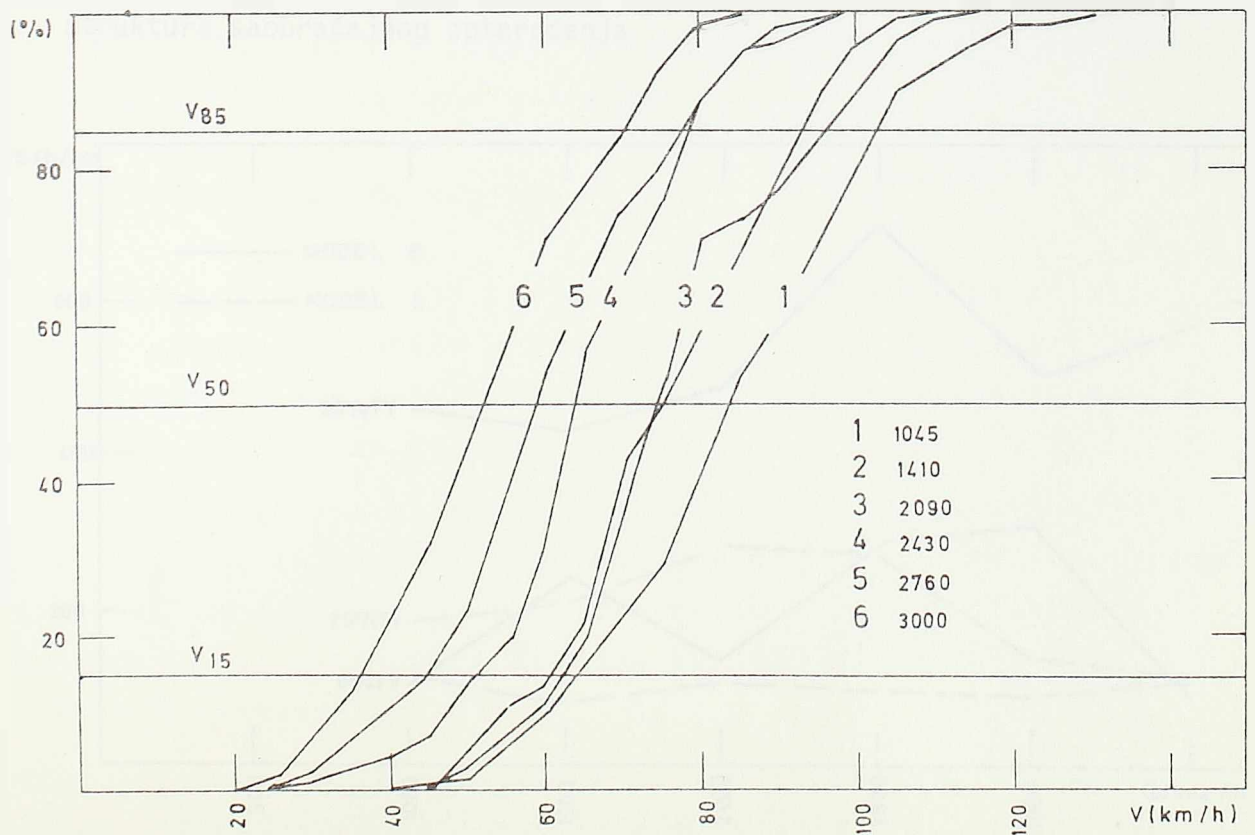
Može se zapaziti da model E daje veći broj promena saobraćajne trake. Osnovni uzrok ove pojave je činjenica da je parametar osetljivosti vozača  $\alpha$  bitno različit od parametara u modelu L kao i da model E (v.pogl. 2.1.3), zbog veće verovatnoće pojave vezanih vozila, po pravilu daje niže srednje brzine saobraćajnog toka nego model L pri identičnim uslovima okoline.

Na osnovu pokazatelja testiranja moguće je konstruisati fundamentalni dijagram gustina-protok. Kao što je ranije izneto, tokom jednog minuta, koji je vremenski odredjen u sredini trajanja

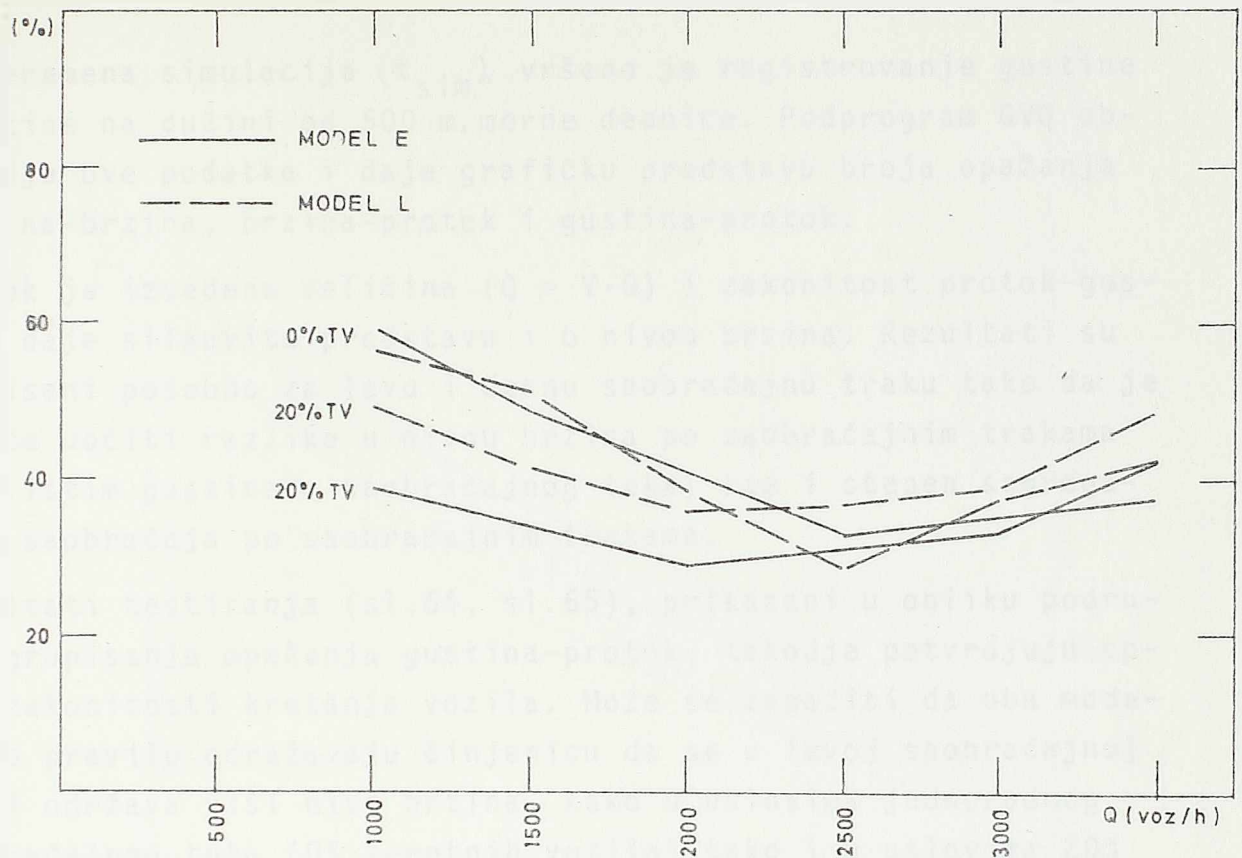




sl.60.  
 Raspodela brzina kao  $f(Q)$  (model L, 20% teretnih vozila,  $i=0\%$ )

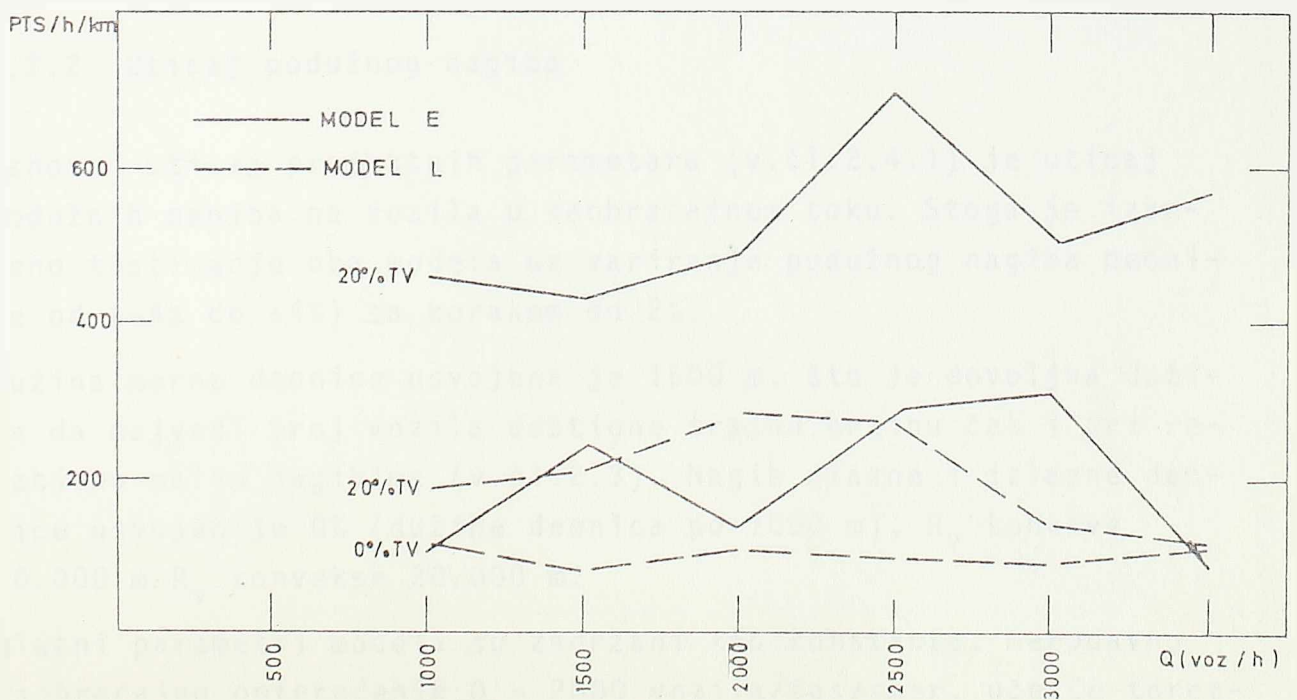


sl.61.  
 Raspodela brzina kao  $f(Q)$  (model E, 20% teretnih vozila,  $i=0\%$ )



sl.62.

Raspodela vozila po saobraćajnim trakama u zavisnosti od veličine i strukture saobraćajnog opterećenja



sl.63.

Broj promena saobraćajne trake u zavisnosti od veličine i strukture saobraćajnog opterećenja

nja vremena simulacije ( $t_{sim}$ ), vršeno je registrovanje gustine i brzine na dužini od 500 m. merne deonice. Podprogram GVQ obradjuje ove podatke i daje grafičku predstavu broja opažanja gustina-brzina, brzina-protok i gustina-protok.

Protok je izvedena veličina ( $Q = V \cdot G$ ) i zakonitost protok-gustina daje slikovitu predstavu i o nivou brzina. Rezultati su grupisani posebno za levu i desnu saobraćajnu traku tako da je moguće uočiti razlike u nivou brzina po saobraćajnim trakama (pri istim gustinama saobraćajnog toka) kao i stepen segregacije saobraćaja po saobraćajnim trakama.

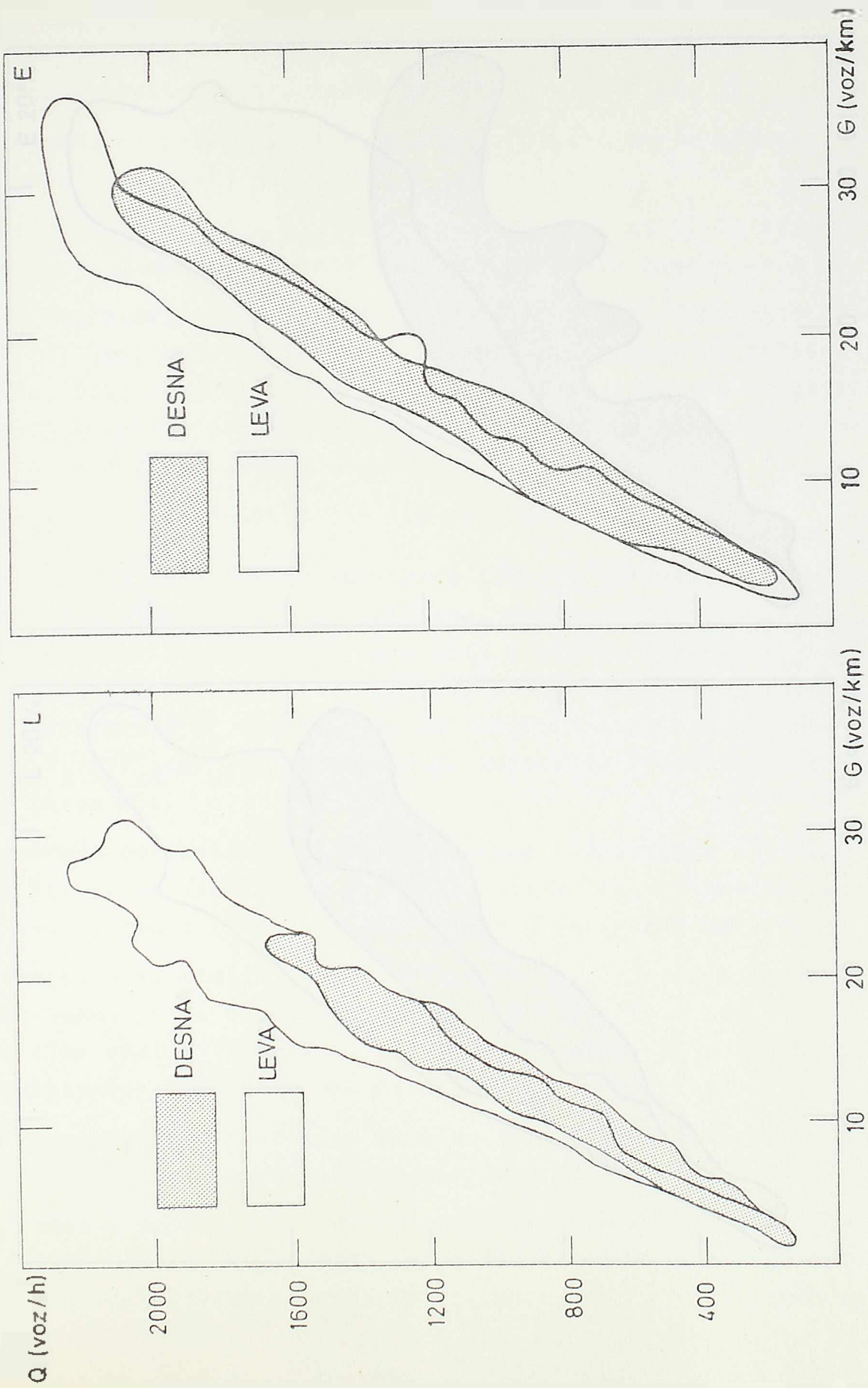
Rezultati testiranja (sl.64, sl.65), prikazani u obliku područja grupisanja opažanja gustina-protok, takodje potvrđuju opšte zakonitosti kretanja vozila. Može se zapaziti da oba modela po pravilu odražavaju činjenicu da se u levoj saobraćajnoj traci održava viši nivo brzina, kako u uslovima jednorodnog saobraćajnog toka (0% teretnih vozila) tako i u uslovima 20% učešća teretnih vozila. Razlika brzina leva ts-desna ts je značajnija sa porastom saobraćajnog opterećenja i učešća teretnih vozila. Maksimalni protoci u levoj saobraćajnoj traci dostižu 2300 voz/h u idealnim uslovima,

### 3.3.2 Uticaj podužnog nagiba

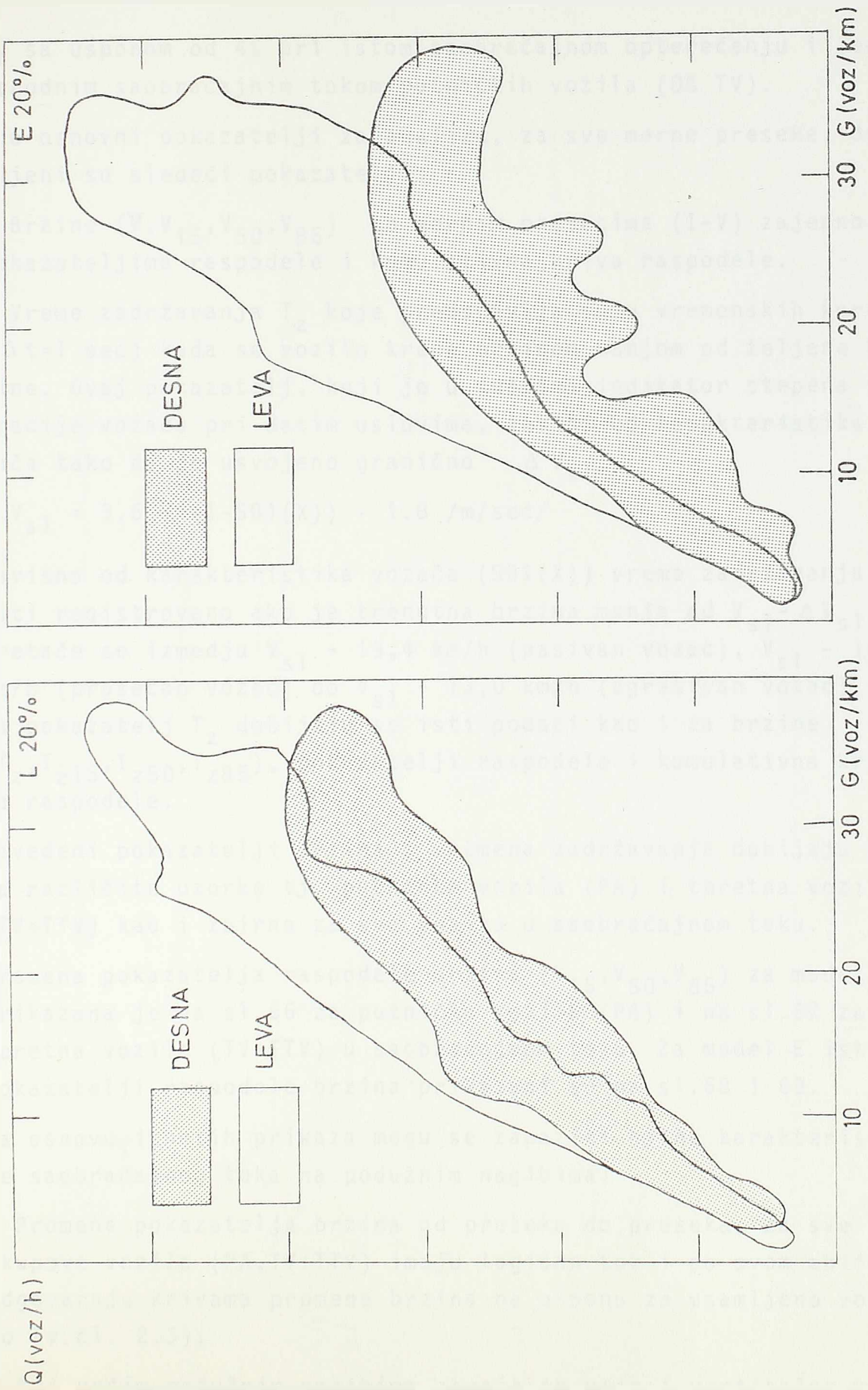
Osnovni uticaj projektnih parametara (v.čl.2.4.1) je uticaj podužnih nagiba na vozila u saobraćajnom toku. Stoga je izvršeno testiranje oba modela uz variranje podužnog nagiba deonice od (-4% do +4%) sa korakom od 2%.

Dužina merne deonice usvojena je 1500 m, što je dovoljna dužina da najveći broj vozila dostigne trajnu brzinu čak i pri relativno malim nagibima (v.čl.2.3). Nagib ulazne i izlazne deonice usvojen je 0% (dužine deonica po 1000 m),  $R_v$  konkave 10.000 m.  $R_v$  konvekse 20.000 m.

Ulazni parametri modela su zadržani kao konstante, merodavno saobraćajno opterećenje  $Q = 2000$  vozila/čas/smer, učešće teretnih vozila 20% (15% TV i 5% TTV). Kao osnova za uporedjenje uticaja teretnih vozila u saobraćajnom toku testirana je deoni-



sl.64. Zakonitost gustina-protok po saobraćajnim trakama autoputa - idealni uslovi



sl.65. Zakonitost gustina-protok po saobraćajnim trakama autoputa - 20% teretnih vozila,  $i=0\%$ .

ca sa usponom od 4% pri istom saobraćajnom opterećenju i jednorodnim saobraćajnim tokom putničkih vozila (0% TV).

Kao osnovni pokazatelji za analizu, za sve merne preseke, dobijeni su sledeći pokazatelji:

- Brzine ( $\bar{V}, V_{15}, V_{50}, V_{85}$ ) po mernim presecima (I-V) zajedno sa pokazateljima raspodele i kumulativna kriva raspodele.
- Vreme zadržavanja  $T_z$  koje predstavlja sumu vremenskih koraka ( $\Delta t=1$  sec) kada se vozilo kreće brzinom manjom od željene brzine. Ovaj pokazatelj, koji je u suštini indikator stepena frustracije vozača pri datim uslovima, zavisi od karakteristika vozača tako da je usvojeno granično  $\Delta V_{s1}$ :

$$\Delta V_{s1} = 3.6 + (1-SB1(X)) \cdot 1.8 \text{ /m/sec/}$$

Zavisno od karakteristika vozača ( $SB1(X)$ ) vreme zadržavanja će biti registrovano ako je trenutna brzina manja od  $V_{s1} - \Delta V_{s1}$  tj. kretaće se izmedju  $V_{s1} - 19,4$  km/h (pasivan vozač),  $V_{s1} - 16,2$  km/h (prosečan vozač) do  $V_{s1} - 13,0$  km/h (agresivan vozač).

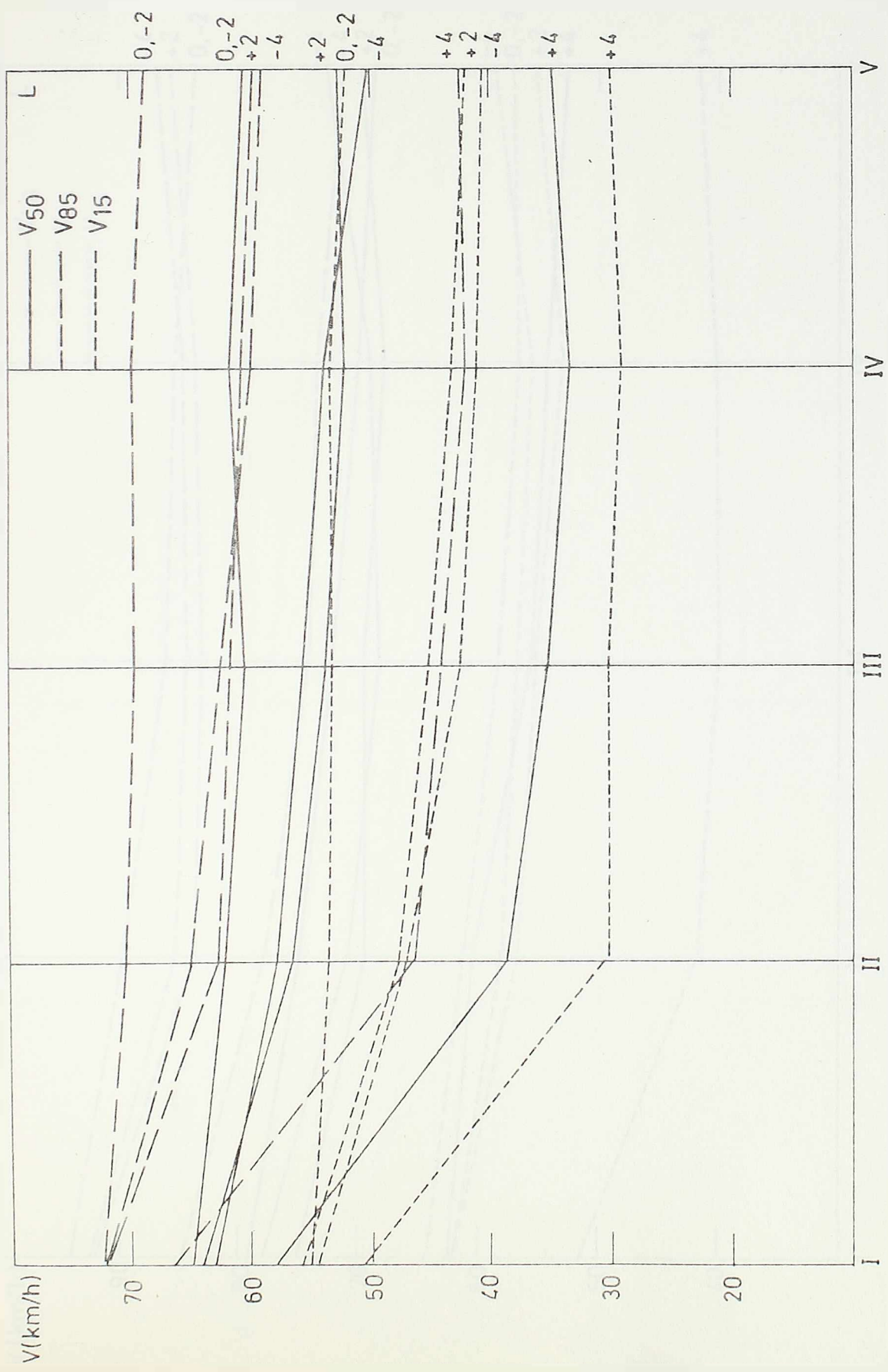
Za pokazatelj  $T_z$  dobijaju se isti podaci kao i za brzine ( $T_z, T_{z15}, T_{z50}, T_{z85}$ ), pokazatelji raspodele i kumulativna kriva raspodele.

Navedeni pokazatelji brzina i vremena zadržavanja dobijaju se za različite uzorke tj. putnička vozila (PA) i teretna vozila (TV+TTV) kao i zbirno za sva vozila u saobraćajnom toku.

Promena pokazatelja raspodele brzina ( $V_{15}, V_{50}, V_{85}$ ) za model L prikazana je na sl.66 za putnička vozila (PA) i na sl.67 za teretna vozila (TV+TTV) u saobraćajnom toku. Za model E isti pokazatelji raspodele brzina prikazani su na sl.68 i 69.

Na osnovu iznetih prikaza mogu se zapaziti bitne karakteristike saobraćajnog toka na podužnim nagibima:

- Promene pokazatelja brzina od preseka do preseka, za sve skupove vozila (PA, TV+TTV) imaju logičan tok i po svom obliku odgovaraju krivama promene brzina na usponu za usamljeno vozilo (v.čl. 2.3).
- Pri većim podužnim nagibima zapaža se uticaj vertikalne kri-

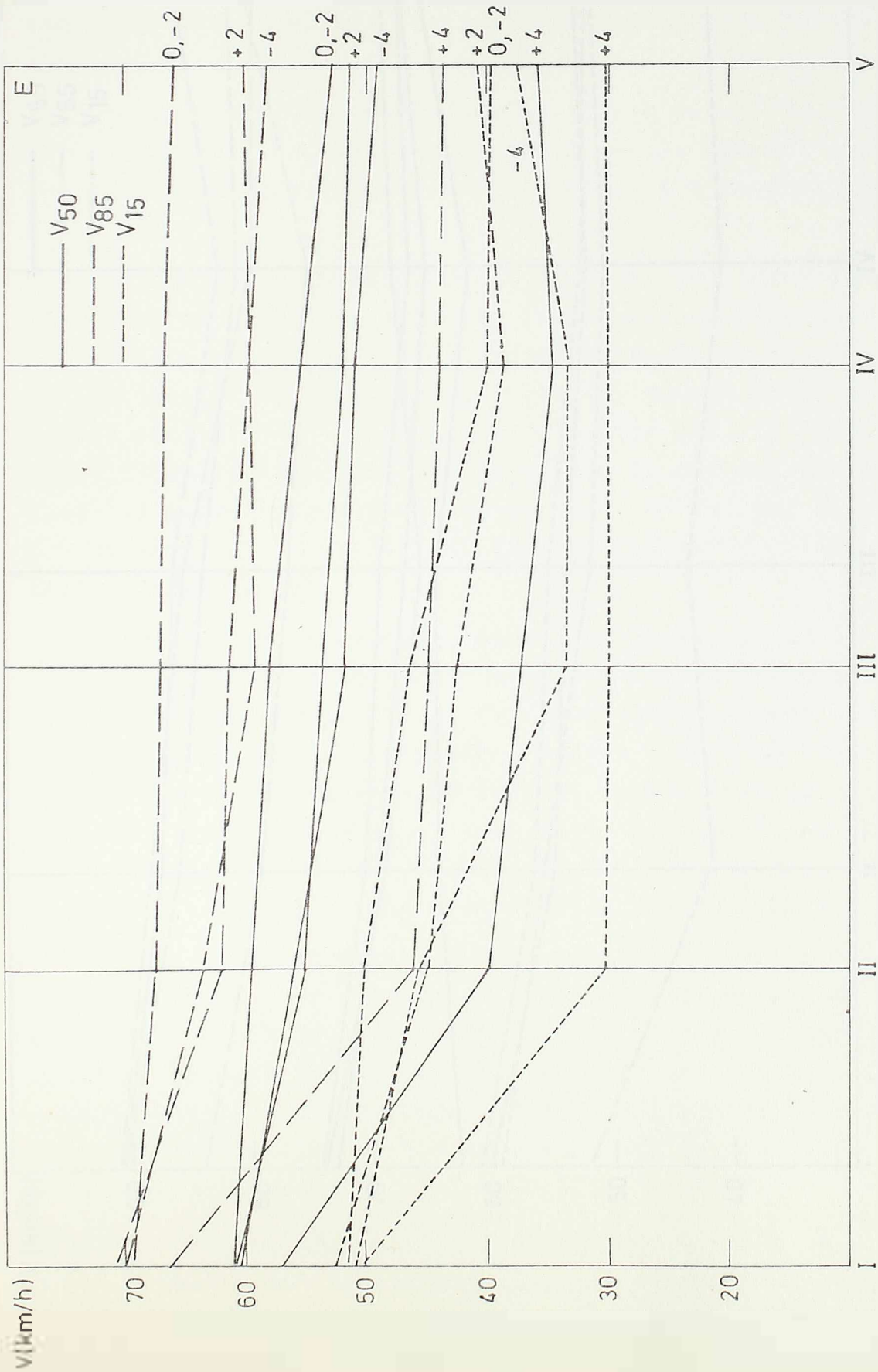


sl.66. Promena statističkih pokazatelja brzina po preseccima - uticaj podužnog nagiba - putničkih automobila PA - model L

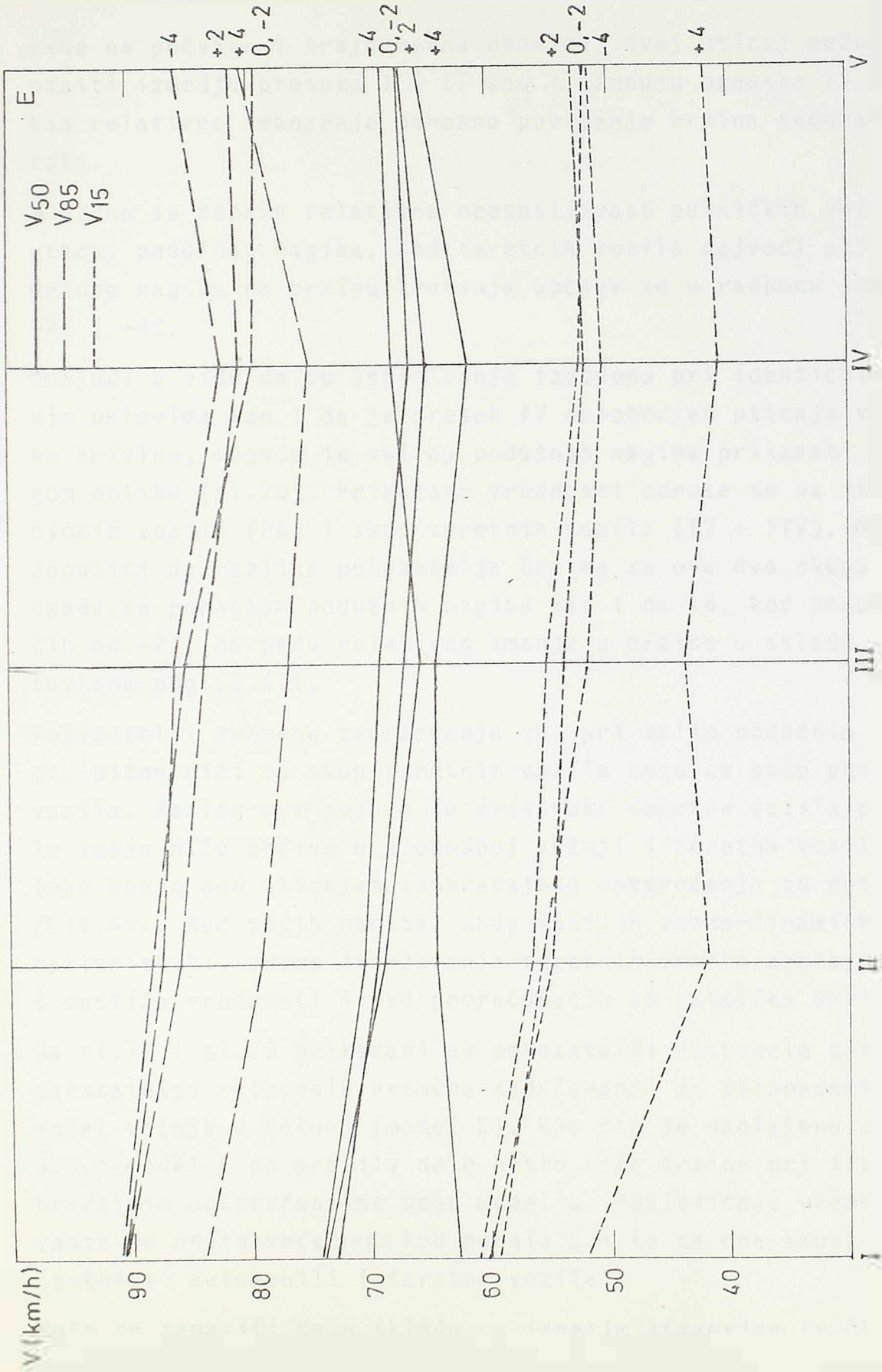


sl.67.  
Promena statističkih pokazatelja brzina po preseccima - uticaj podužnog nagiba - teretna vozila IV+IV - model L





sl.68. Promena statističkih pokazatelja brzina po presecima - uticaj podužnog nagiba - putnička vozila PA - Model E



sl.69. Promena statističkih pokazatelja brzina po presečina - uticaj podužnog nagiba - teretna vozila TV+TVV - model E

vine na početku i kraju merne deonice. Ovaj uticaj može se zapaziti izmedju preseka I i II kao i izmedju preseka IV i V. kao relativno smanjenje odnosno povećanje brzina saobraćajnog toka.

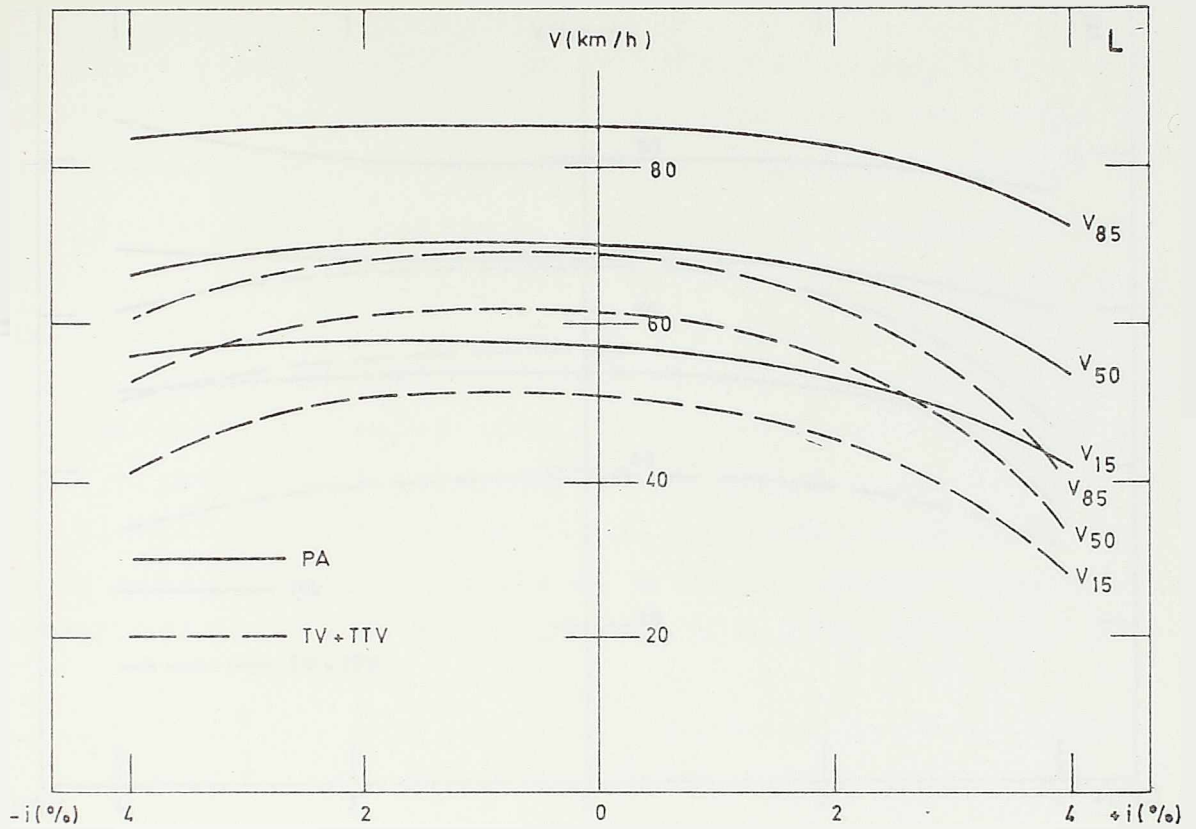
● Jasno se zapaža relativna neosetljivost putničkih vozila na uticaj podužnog nagiba. Kod teretnih vozila najveći uticaj podužnog nagiba na brzinu kretanja uočava se u rasponu izmedju +2% i +4%.

Imajući u vidu da su ispitivanja izvedena pri identičnim polaznim uslovima kao i da je presek IV oslobođen uticaja vertikalne krivine, moguće je uticaj podužnih nagiba prikazati i u drugom obliku (sl.70). Prikazane vrednosti odnose se na skup putničkih vozila (PA) i skup teretnih vozila (TV + TTV). Može se zapaziti da razlika pokazatelja brzina za ova dva skupa vozila opada sa porastom podužnih nagiba kao i da se, kod padova većih od -2%, na padu relativno smanjuju brzine u skladu sa postavkama pogl.2.4.1.

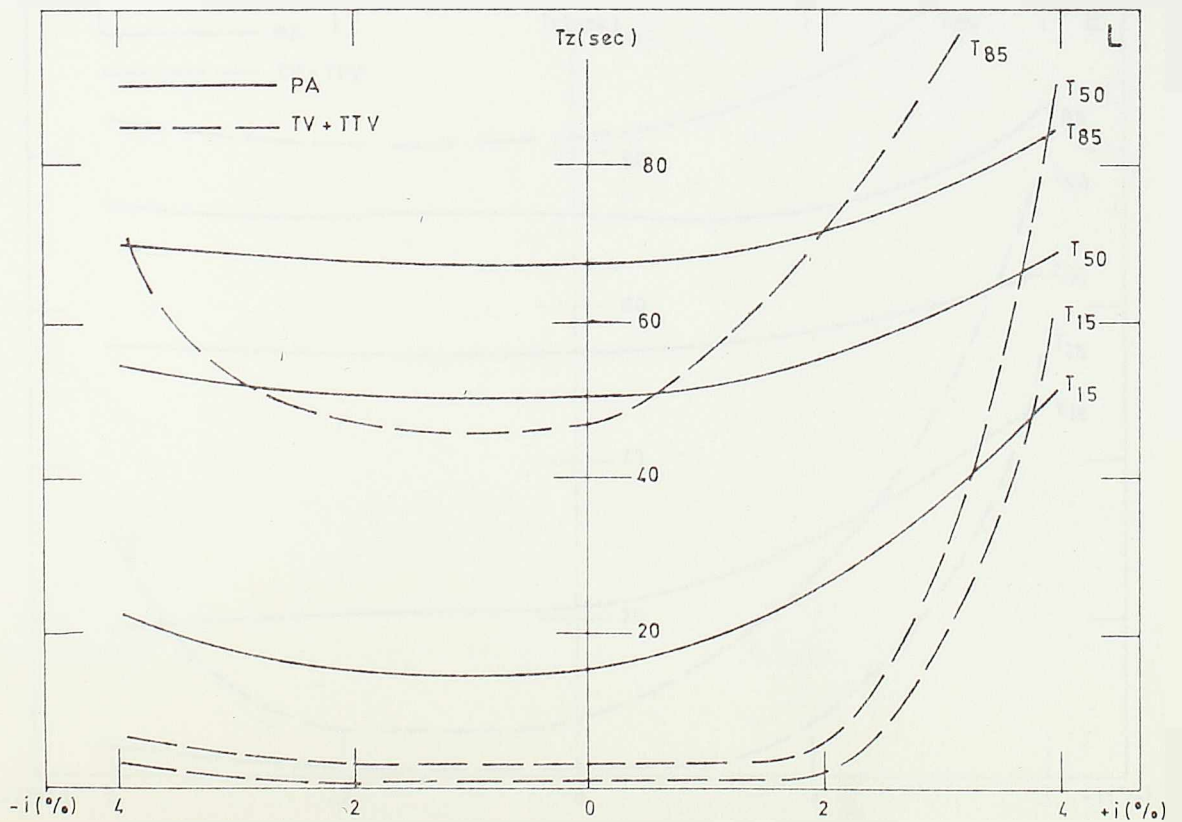
Pokazatelji vremena zadržavanja su, pri malim podužnim nagibima, bitno niži za skup teretnih vozila nego za skup putničkih vozila. Razlog ove pojave je dvostruk: teretna vozila po pravilu imaju niže brzine u slobodnoj vožnji i teretna vozila su daleko manje pod uticajem saobraćajnog opterećenja od putničkih /Lit.44/. Kod većih nagiba, zbog lošijih vozno-dinamičkih karakteristika, vreme zadržavanja teretnih vozila značajno raste i dostiže vrednosti iznad proračunatih za putnička vozila.

Na sl.72 i sl.73 prikazani su pokazatelji raspodele brzina i pokazatelji raspodele vremena zadržavanja za eksponencijalni model vožnje u koloni (model E). Kao što je naglašeno u pogl. 3.3.1 model E po pravilu daje nešto niže brzine pri istim saobraćajnim opterećenjima nego model L. Posledično, vreme zadržavanja je nešto veće nego kod modela L i to za oba skupa vozila (putnički automobili i teretna vozila).

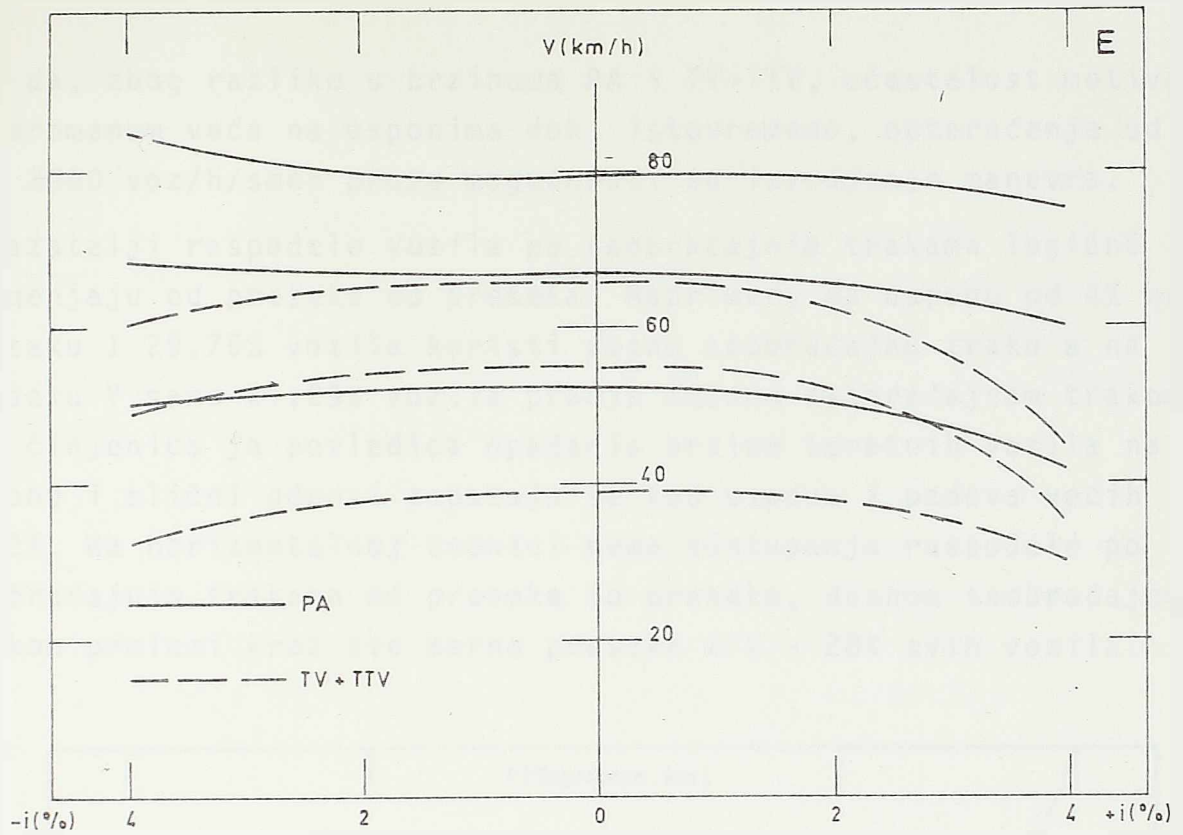
Može se zapaziti da, u skladu sa iznetim stavovima (v.čl.3.3.1), model E daje bitno veće vrednosti ovog pokazatelja kao i da npr. pri nagibu +4% broj promena saobraćajnih traka je veći za 2 do 2,5 puta nego na horizontalnoj deonici autoputa. Nema sum-



sl.70.  
Pokazatelji raspodele brzina na preseku IV u zavisnosti od podužnog nagiba (model L)

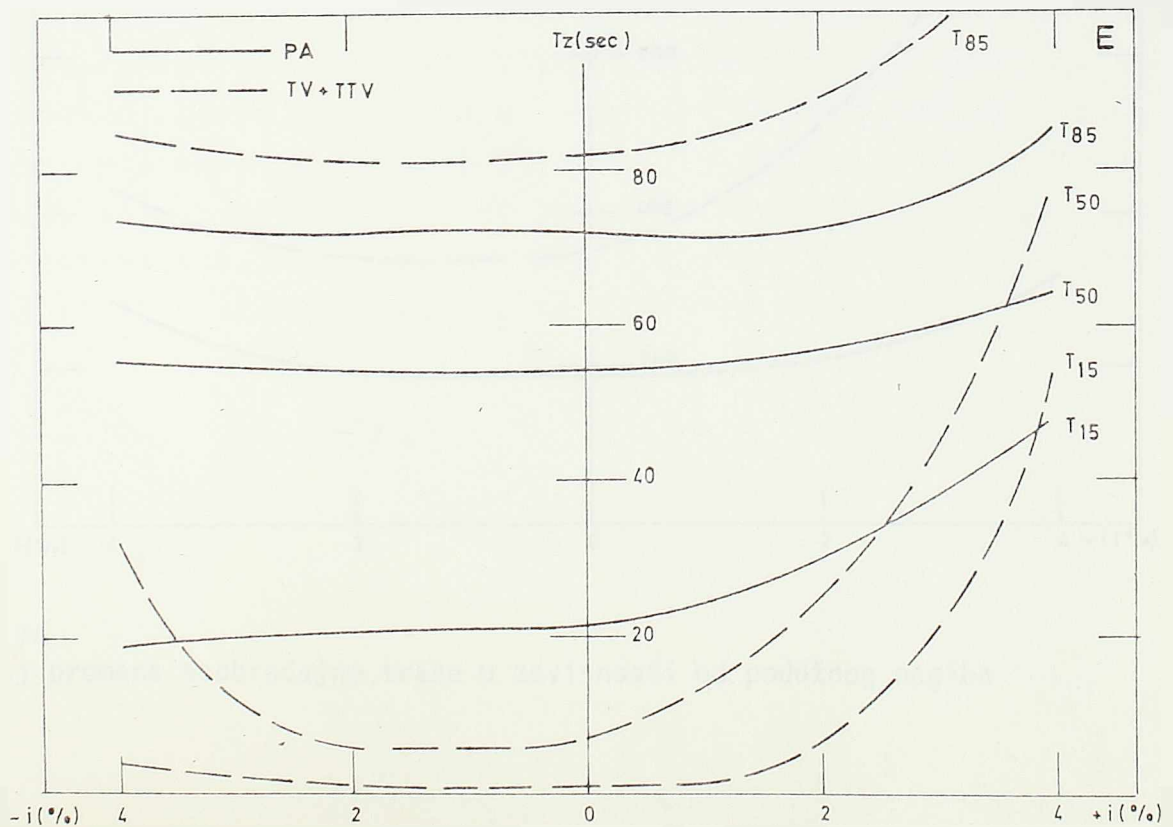


sl.71.  
Pokazatelji raspodele vremena zadržavanja u zavisnosti od podužnog nagiba (model L)



sl.73.

Pokazatelji raspodele vremena zadržavanja u zavisnosti od podužnog nagiba (model E)

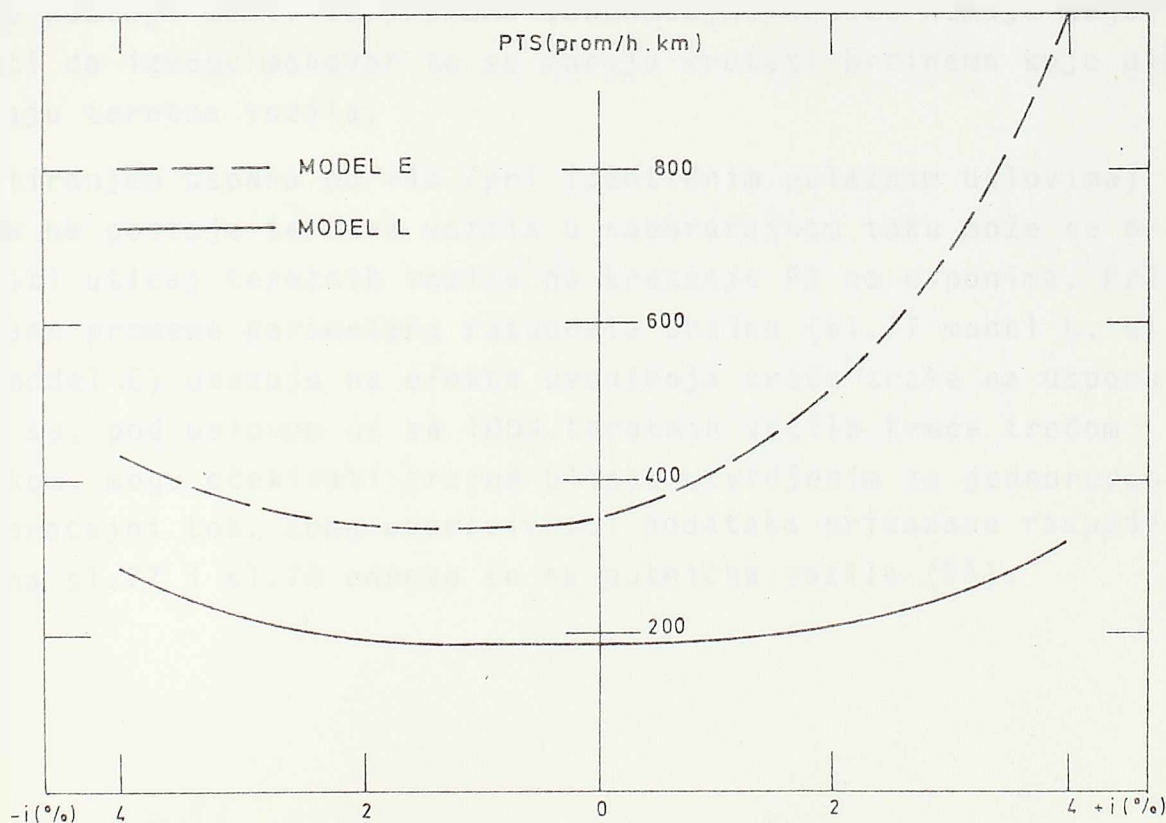


sl.72.

Pokazatelji raspodele brzina na preseku IV u zavisnosti od podužnog nagiba (model E)

nje da, zbog razlike u brzinama PA i TV+TTV, učestalost motiva za promenom veća na usponima dok, istovremeno, opterećenje od  $Q = 2000$  voz/h/smer pruža mogućnosti za izvodjenje manevra.

Pokazatelji raspodele vozila po saobraćajnim trakama logično se menjaju od preseka do preseka. Naprimer, na usponu od 4% na preseku I 29,75% vozila koristi desnu saobraćajnu traku a na preseku V samo 21,29% vozila prodje desnom saobraćajnom trakom. Ova činjenica je posledica opadanja brzine teretnih vozila na usponu i slični odnosi zapažaju se kod uspona i padova većih od 2%. Na horizontalnoj deonici nema odstupanja raspodele po saobraćajnim trakama od preseka do preseka, desnom saobraćajnom trakom prolazi kroz sve merne preseke 27% - 28% svih vozila.



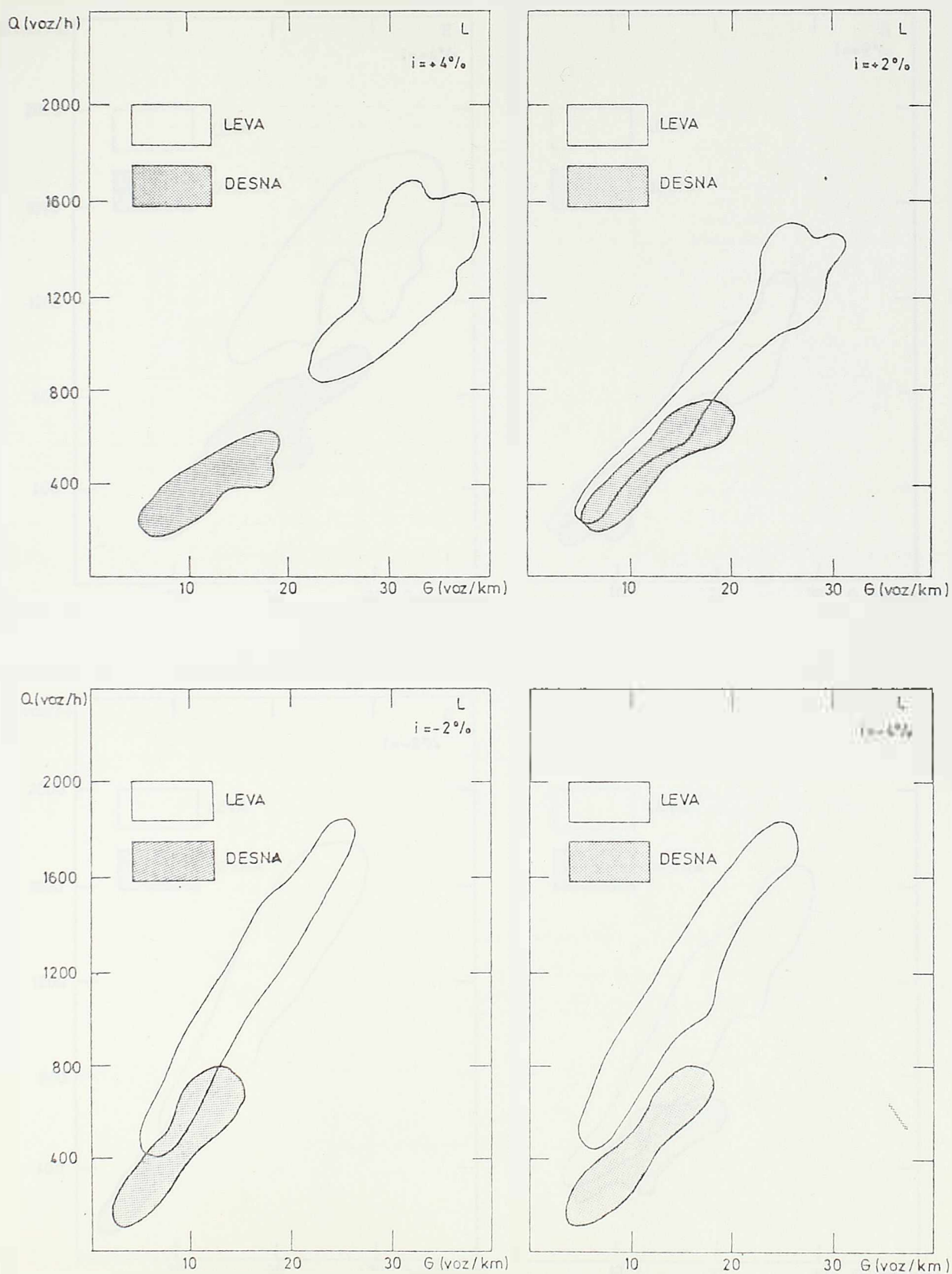
sl.74.

Broj promena saobraćajne trake u zavisnosti od podužnog nagiba

Odnos brzina-gustina-protok odražava različito ponašanje vozača na usponima i padovima pri istom saobraćajnom opterećenju. Fundamentalni dijagram (gustina-protok) za model L prikazan je na sl.75 a za model E na sl.76. Podužni nagib dovodi do veće segregacije saobraćaja po saobraćajnim trakama pri povećanju uspona odnosno pada. Može se zapaziti i razlika u srednjim brzinama vozila u levoj i desnoj saobraćajnoj traci koja raste pri većim podužnim nagibima.

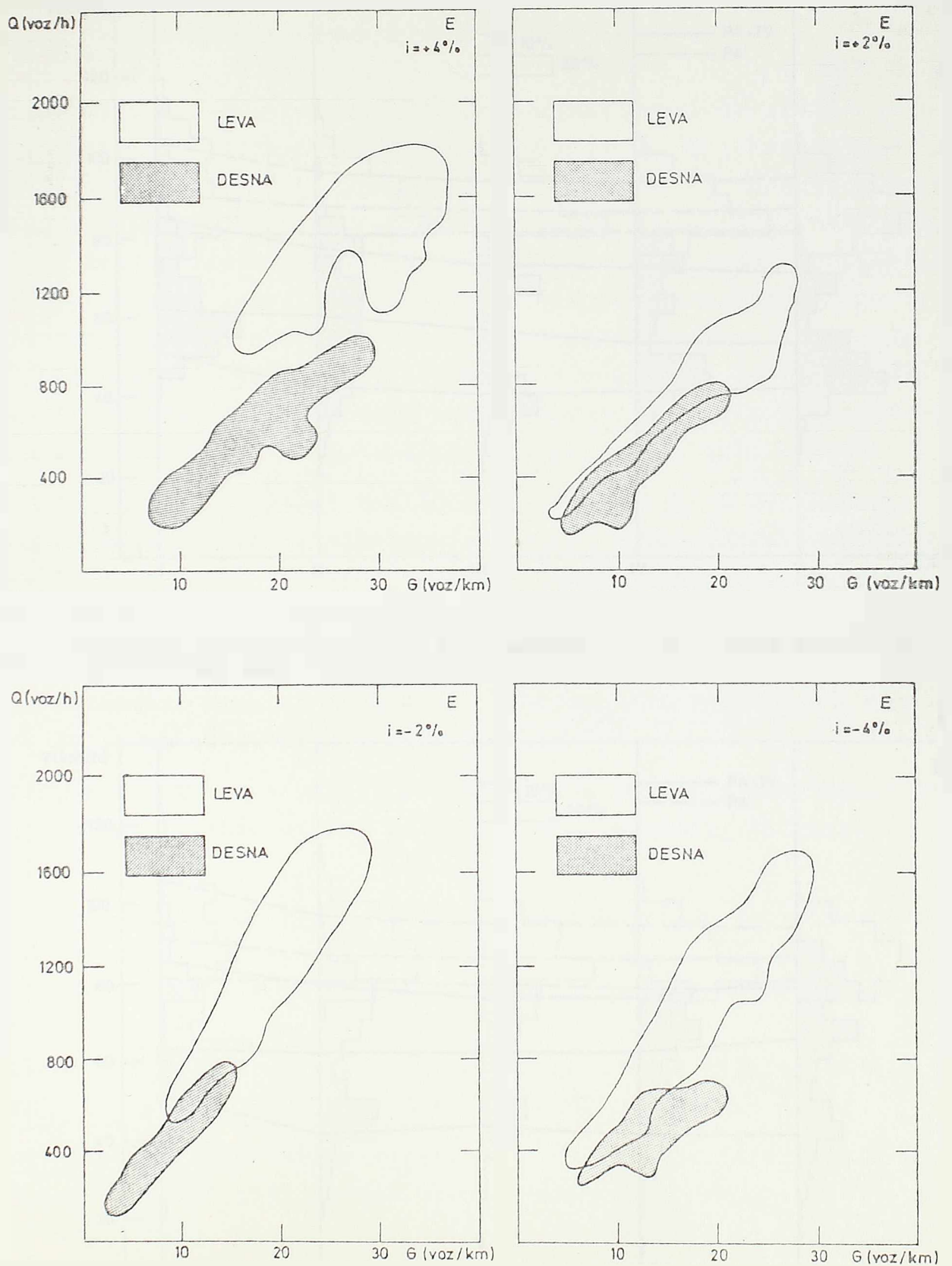
U levoj saobraćajnoj traci dominiraju putnička vozila dok u desnoj saobraćajnoj traci dominiraju teretna vozila. U ovom pogledu ne zapaža se bitnija razlika između modela vožnje u koloni. Pored teretnih vozila, u desnoj saobraćajnoj traci nalazi se između 5% i 15% vezanih putničkih automobila koji, iako postoji motiv za promenu saobraćajne trake, nemaju mogućnosti da izvedu manevar te se moraju kretati brzinama koje diktiraju teretna vozila.

Testiranjem uspona od +4% (pri identičnim polaznim uslovima) kada ne postoje teretna vozila u saobraćajnom toku može se oceniti uticaj teretnih vozila na kretanje PA na usponima. Prikazane promene parametara raspodele brzina (sl.77 model L, sl. 78 model E) ukazuju na efekte uvodjenja treće trake na usponu jer se, pod uslovom da se 100% teretnih vozila kreće trećom trakom, mogu očekivati brzine bliske utvrđenim za jednorodan saobraćajni tok. Zbog uporedivosti podataka prikazane raspodele na sl.77 i sl.78 odnose se na putnička vozila (PA).



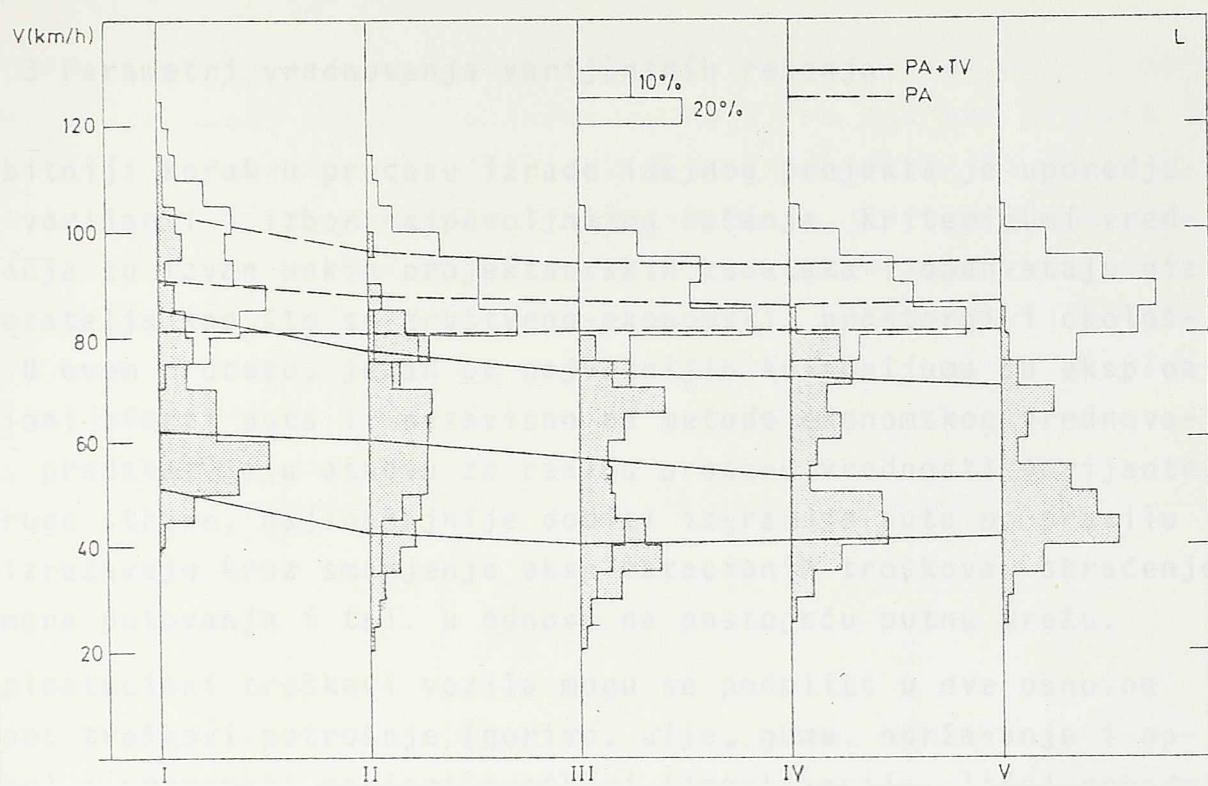
sl.75.  
Područje opažanja odnosa gustina-protok pri različitim podužnim nagibima  
- model L





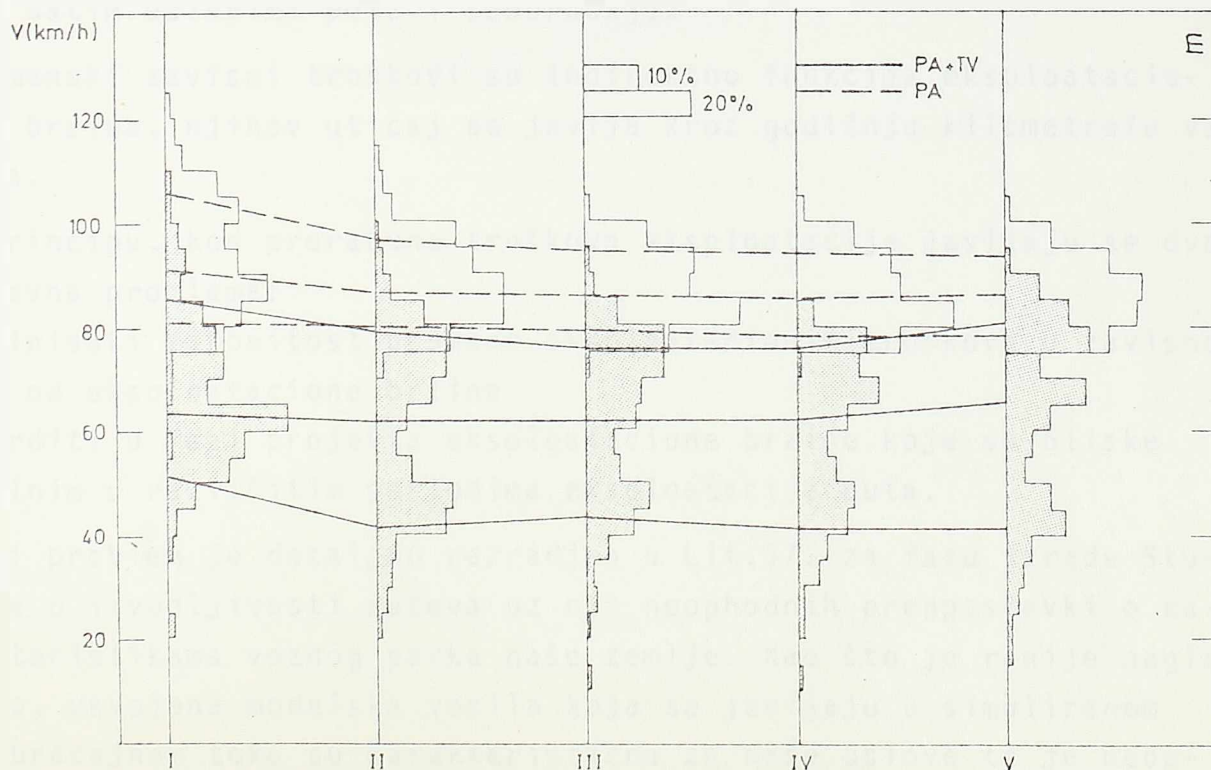
sl.76.

Područje opažanja odnosa gustina-protok pri različitim podužnim nagibima  
- model E



sl.77.

Raspodela opažanja brzina PA po presecima pri različitim strukturama saobraćajnog toka -  $i=+4\%$  (PA-100%, PA, PA+TV-80% PA)



sl.78.

Raspodela opažanja brzina PA po presecima pri različitim strukturama saobraćajnog toka -  $i=+4\%$  (PA-100%, PA, PA+TV-80% PA)

### 3.3.3 Parametri vrednovanja varijantnih rešenja

Najbitniji korak u procesu izrade idejnog projekta je uporedjenje varijanti i izbor najpovoljnijeg rešenja. Kriterijumi vrednovanja su izvan uskih projektantskih zadataka i obuhvataju niz pokazatelja kao što su društveno-ekonomski, prostorni i ekološki. U ovom procesu, jedan od najvažnijih kriterijuma su eksploatacioni efekti puta i, nezavisno od metode ekonomskog vrednovanja, predstavljaju osnovu za realnu procenu vrednosti varijante. S druge strane, najznačajnije dobiti izgradnje puta po pravilu se izražavaju kroz smanjenje eksploatacionih troškova, skraćenje vremena putovanja i tsl. u odnosu na postojeću putnu mrežu.

Eksploatacioni troškovi vozila mogu se podeliti u dve osnovne grupe: troškovi potrošnje (gorivo, ulje, gume, održavanje i opravke) i vremenski zavisni troškovi (amortizacija, lični dohodci vozača i uprave, osiguranje, registracija i tsl.).

Troškovi potrošnje vozila isključivo su funkcija "stvarnih uslova eksploatacije vozila" /Lit.47./, odnosno, eksploatacionih brzina pri datim uslovima puta i saobraćaja.

Vremenski zavisni troškovi su indirektno funkcija eksploatacionih brzina, njihov uticaj se javlja kroz godišnju kilometražu vozila.

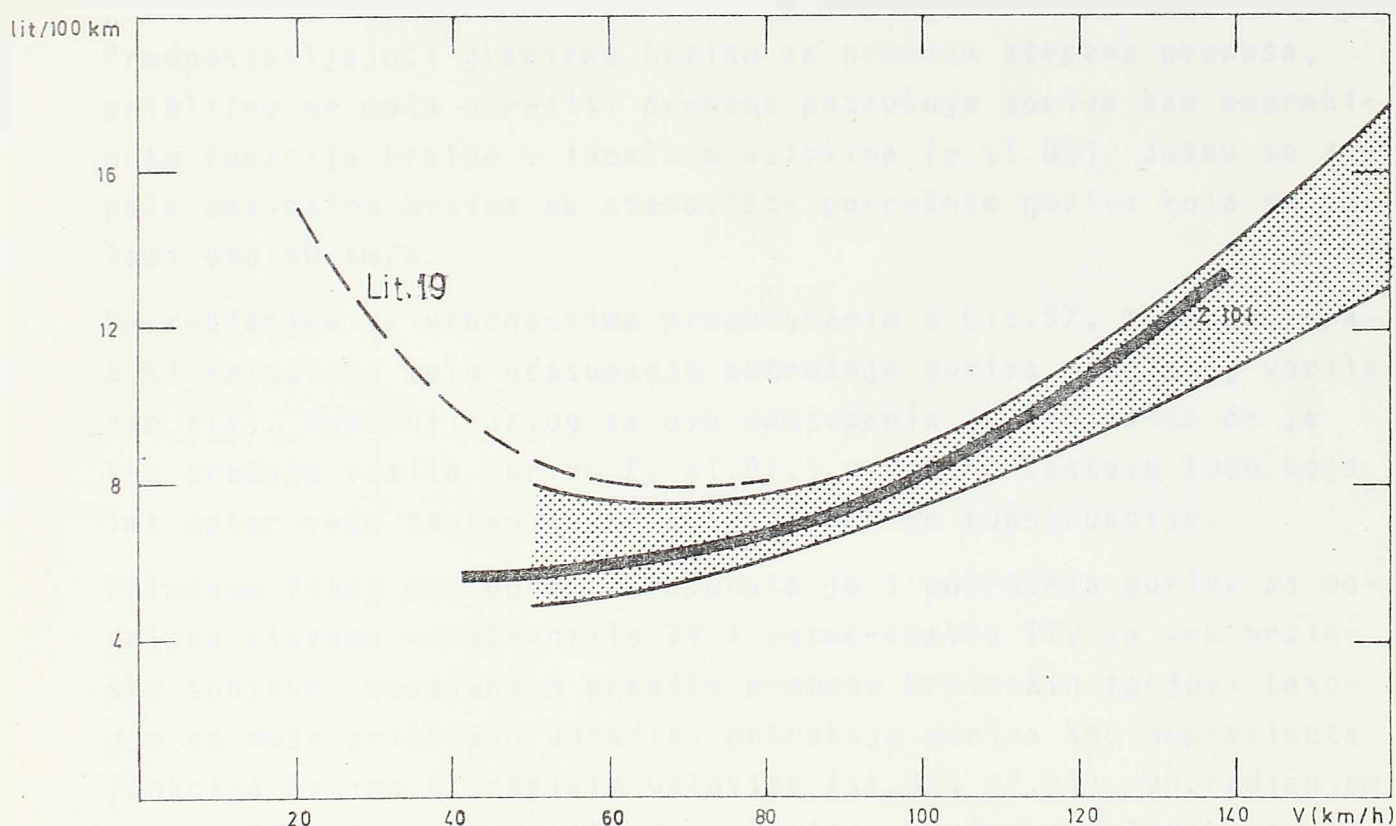
U principu, kod proračuna troškova eksploatacije javljaju se dva osnovna problema:

- definisati zakonitost promene eksploatacionih troškova u zavisnosti od eksploatacione brzine
- utvrditi u fazi projekta eksploatacione brzine koje su bliske realnim u različitim periodima eksploatacije puta.

Prvi problem je detaljno razradjen u Lit.57. za fazu izrade Studije o izvodljivosti puteva uz niz neophodnih pretpostavki o karakteristikama voznog parka naše zemlje. Kao što je ranije naglašeno, usvojena modelska vozila koja se javljaju u simuliranom saobraćajnom toku su karakteristična za naše uslove te je neophodno proveriti osnovne parametre potrošnje.

Dominantni uticaj u tom pogledu ima potrošnja goriva.

Na osnovu podataka za modelsko putničko vozilo (pogl.2.2.1) može se proračunati potrošnja goriva u najvišem stepenu prenosa i uporediti sa podacima za najveći broj evropskih vozila (v.sl.79). Može se zapaziti da se modelsko vozilo PA uklapa u granice potrošnje evropskih tipova vozila. Medjutim, kod promene stepena prenosa iz višeg u niži, potrošnja goriva se bitno menja što je utvrđeno u eksperimentalnim merenjima /Lit.19./ za vozila sličnih karakteristika.



sl.79.

Potrošnja goriva modelskog PA u najvišem stepenu prenosa na horizontalnom putu u idealnim uslovima

Osnovna potrošnja goriva meri se pri ravnom i pravom putu u neometanim uslovima saobraćaja (slobodna vožnja) što su u suštini idealni uslovi tako da je neophodno definisati i potrošnju goriva u nižim stepenima prenosa. Na osnovu karakteristika motora Z-101, za prosečnog vozača i prosečno opterećeno vozilo potrošnja goriva u svakom stepenu prenosa proračunava se za idealne uslove puta ( $i=0\%$ ) i saobraćaja (slobodna vožnja) u uslovima

konstantne brzine kretanja ( $u = 0, v = \text{const.}$ ) odnosno kada je:

$$Z_e = \bar{G}_{br} \cdot w_k + W_v$$

gde je:

$Z_e$  - obimna sila

$\bar{G}_{br}$  - srednja ukupna težina vozila

$w_k$  - otpor kotrljanja

$W_v$  - otpor vazduha

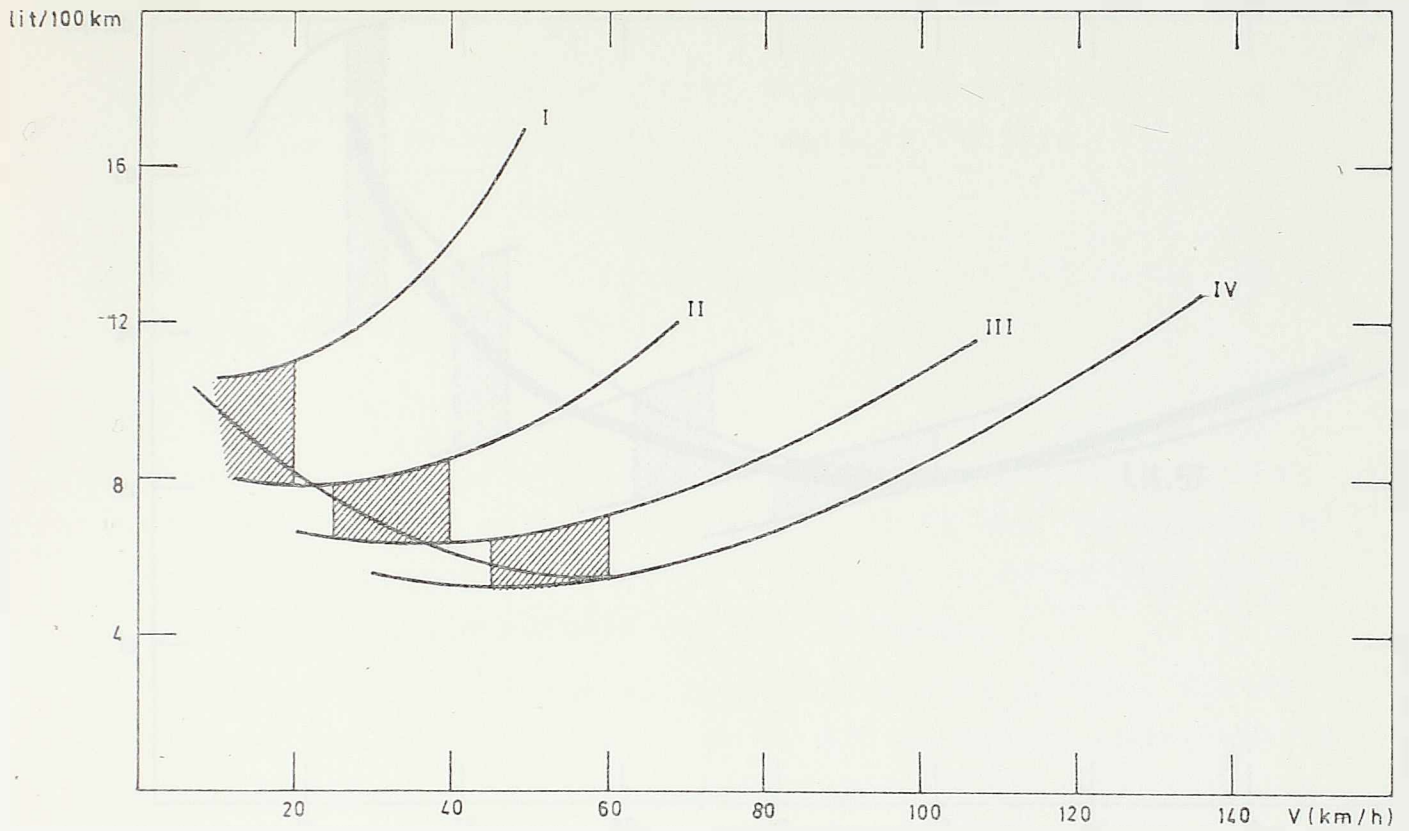
Rezultati proračuna prikazani su na sl.80.

Predpostavljajući granične brzine za promenu stepena prenosa, približno se može odrediti promena potrošnje goriva kao neprekidna funkcija brzine u idealnim uslovima (v.sl.80). Jasno se zapazila optimalna brzina sa stanovišta potrošnje goriva koja se nalazi oko 60 km/h.

Uporedjenjem sa vrednostima preporučenim u Lit.57, može se zapaziti relativno malo odstupanje potrošnje goriva modelskog vozila kao  $f(v)$ . Osnovni razlog za ova odstupanja je činjenica da je kao srednje vozilo (kriva 2, sl.81.) usvojena Zastava 1300 koja ima motor veće zapremine relativno starije konstrukcije.

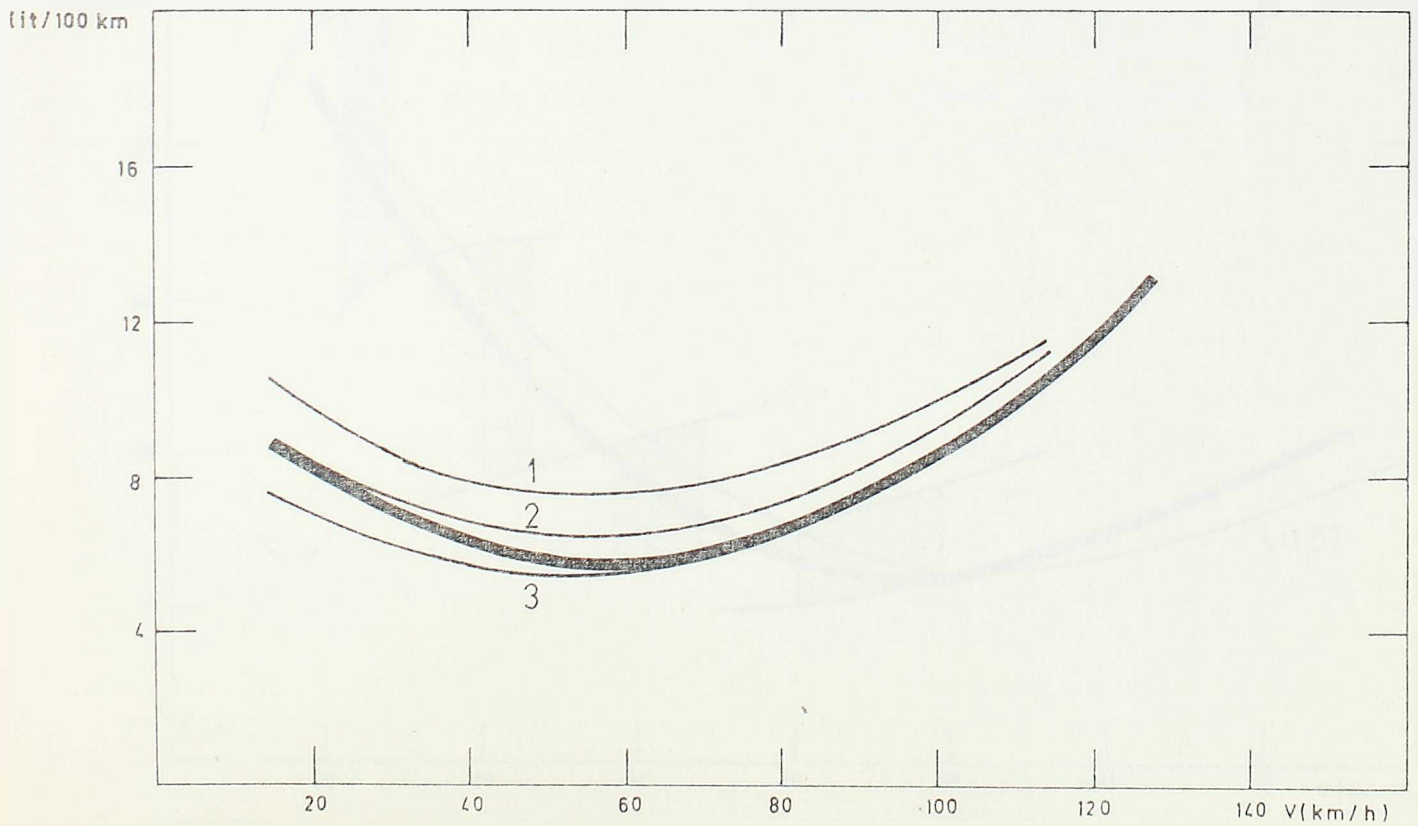
Primenom istog postupka proračunata je i potrošnja goriva za modelske sisteme vozač-vozilo TV i vozač-vozilo TTV za sve brzinske spojeve. Usvajanjem granica promene brzinskih spojeva takođe se može približno odrediti potrošnja goriva kao neprekinuta funkcija brzine u idealnim uslovima (sl.82, sl.83). Uporedjenjem sa Lit.57 može se zapaziti da potrošnja goriva modelskih vozila TV i TTV ne pokazuje bitnija odstupanja.

Nema sumnje da su eksperimentalna ispitivanja potrošnje goriva za različite kategorije vozila u realnim uslovima saobraćaja jedan od budućih istraživačkih zadataka koji, po obimu i značaju, predstavlja posebnu temu. U nedostatku takvih istraživanja, zakonitosti formulisane u Lit.57. ili pak izvedene zakonitosti promene potrošnje goriva kao  $f(v)$  predstavljaju dovoljno pouzdanu osnovu za vrednovanje varijanata sa stanovišta eksploatacijskih troškova. Kako se idealni uslovi eksploatacije retko javlja-



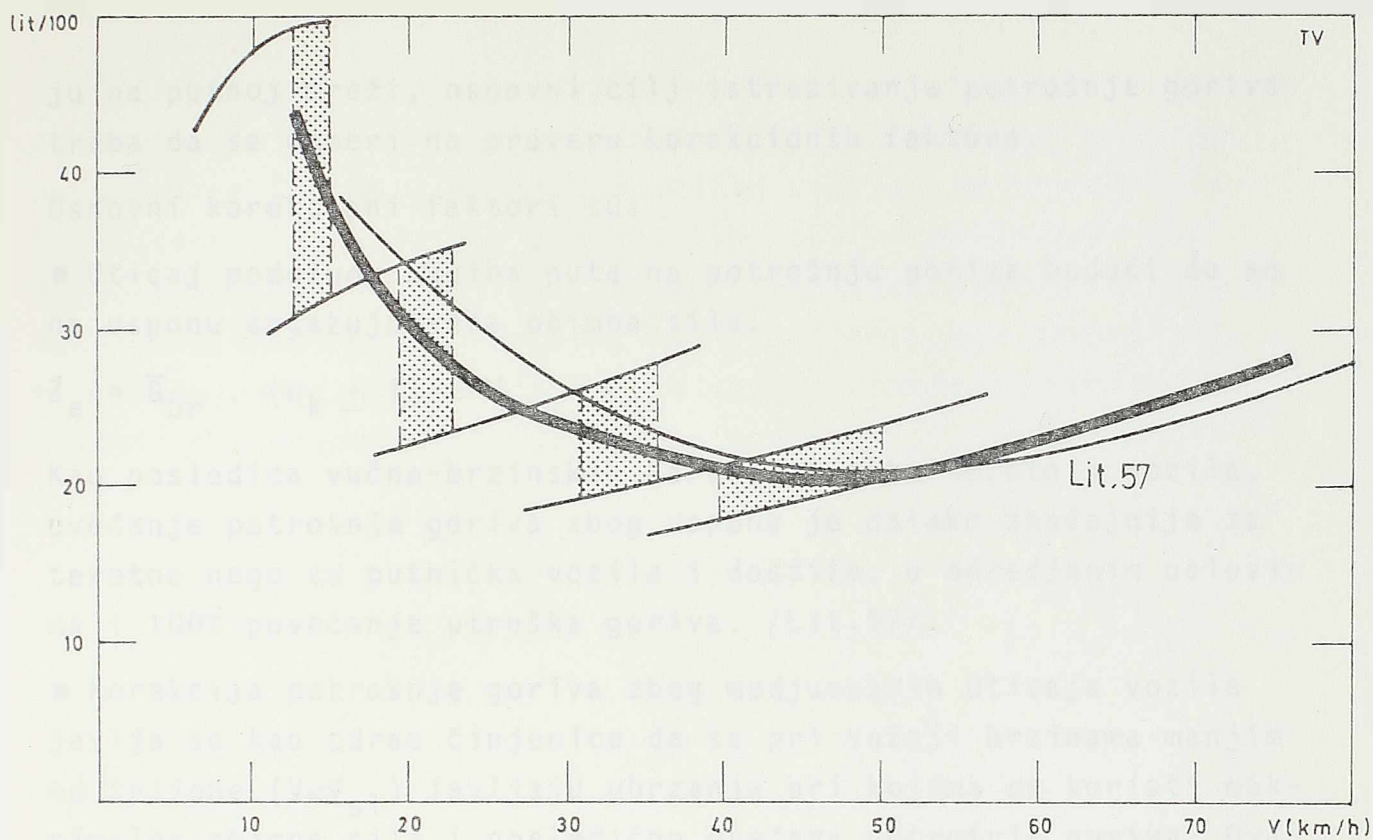
sl.80.

Promena potrošnje goriva za modelsko PA u zavisnosti od brzine -  
idealni uslovi

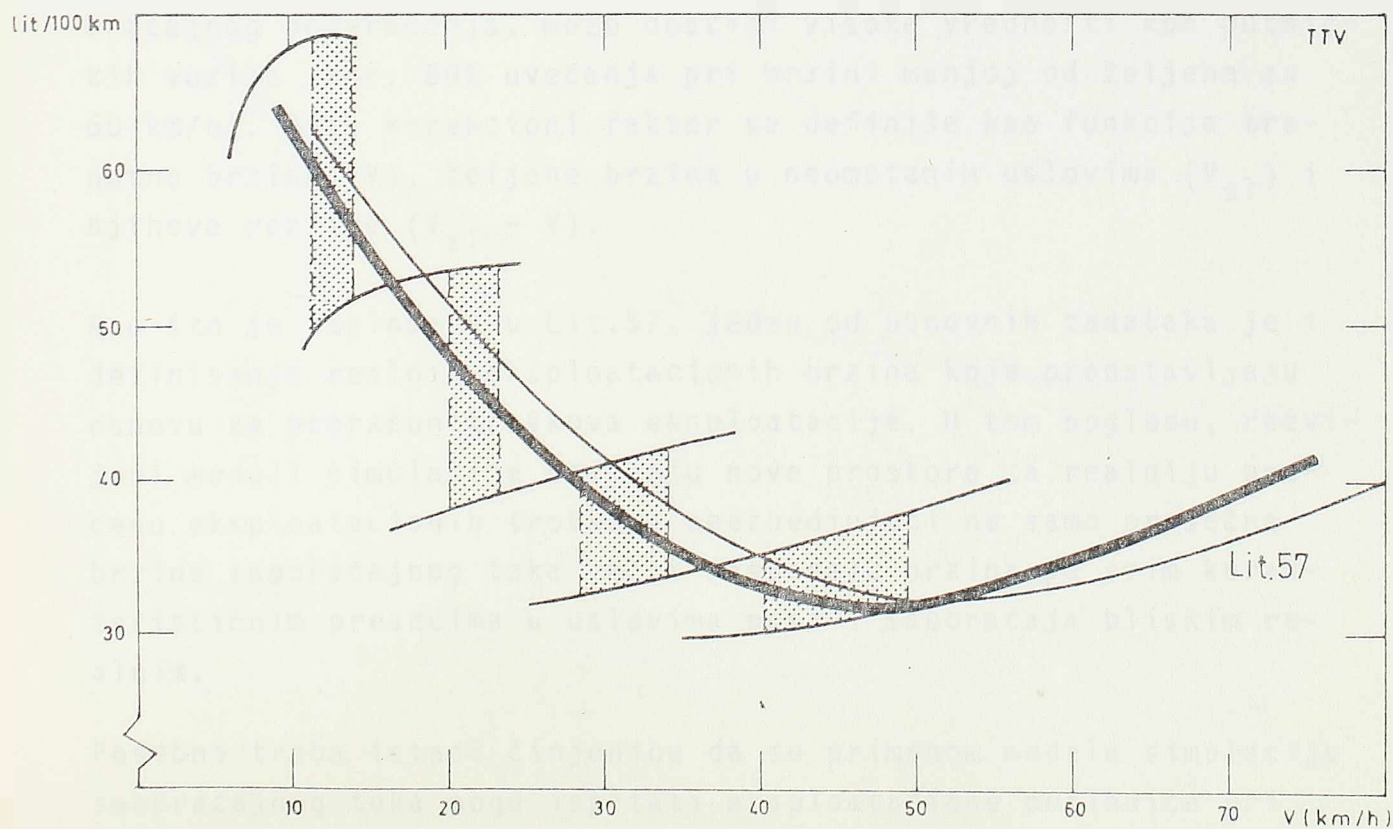


sl.81.

Promena potrošnje goriva za modelsko PA i vrednosti prema Lit.57  
(1-veliko, 2-srednje, 3-malo putničko vozilo)



sl.82.  
Promena potrošnje goriva za modelsko TV u zavisnosti od brzine -  
idealni uslovi



sl.83.  
Promena potrošnje goriva za modelsko TTV u zavisnosti od brzine -  
idealni uslovi

ju na putnoj mreži, osnovni cilj istraživanja potrošnje goriva treba da se usmeri na proveru korekcionih faktora.

Osnovni korekcionni faktori su:

- Uticaj podužnog nagiba puta na potrošnju goriva budući da se na usponu angažuje veća obimna sila:

$$Z_e = \bar{w}_{br} \cdot (w_k \pm i) + W_v$$

Kao posledica vučno-brzinskih karakteristika teretnih vozila, uvećanje potrošnje goriva zbog uspona je daleko značajnije za teretna nego za putnička vozila i dostiže, u odredjenim uslovima i 100% povećanje utroška goriva. /Lit.57/.

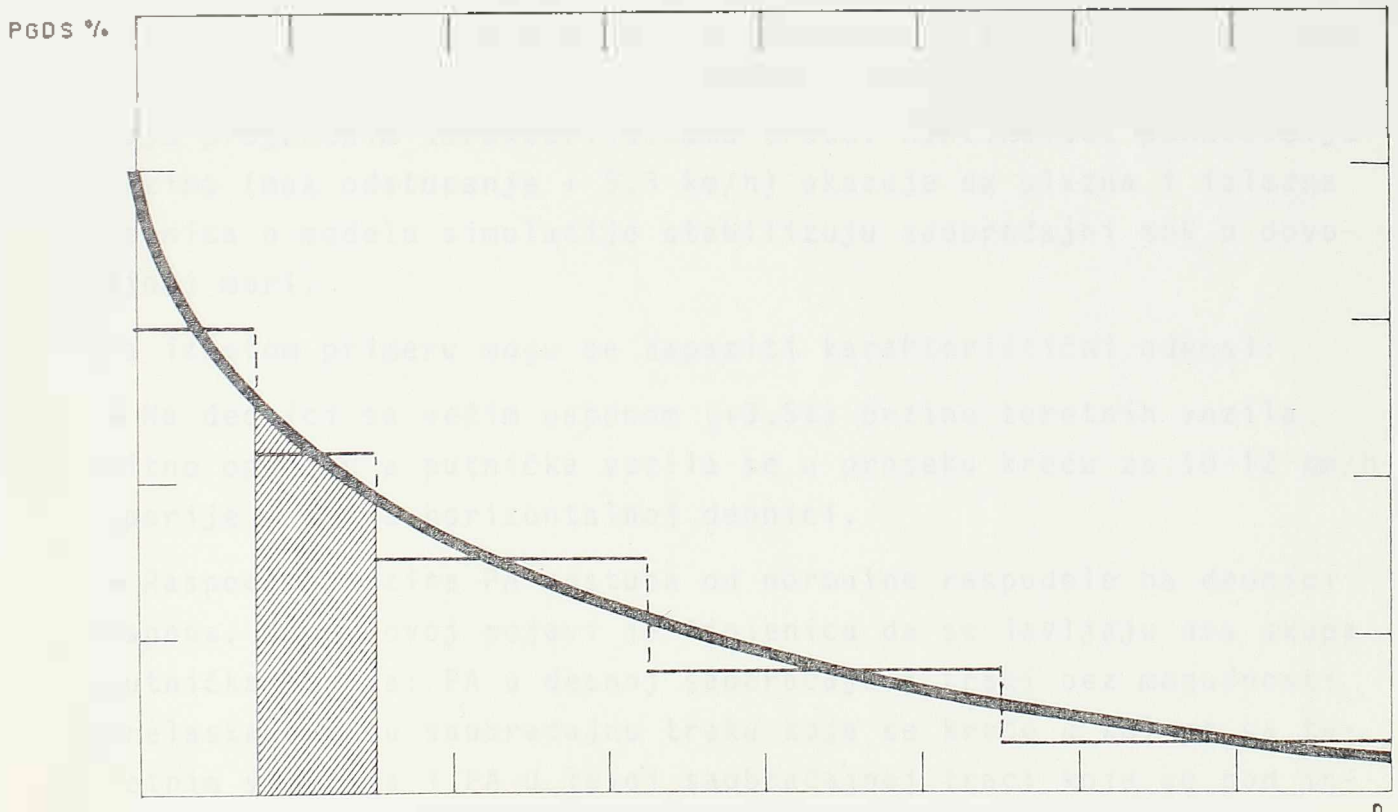
- Korekcija potrošnje goriva zbog medjusobnih uticaja vozila javlja se kao odraz činjenice da se pri vožnji brzinama manjim od željene ( $V < V_{s1}$ ) javljaju ubrzanja pri kojima se koristi maksimalna obimna sila i posledično uvećava potrošnja goriva. Ova korekcija, kao posledica karakteristika sistema vozač-vozilo PA i činjenice da su teretna vozila daleko manje pod uticajem saobraćajnog opterećenja, može dostići visoke vrednosti kod putničkih vozila (npr. 80% uvećanja pri brzini manjoj od željene za 60 km/h). Ovaj korekcionni faktor se definiše kao funkcija trenutne brzine ( $V$ ), željene brzine u neometanim uslovima ( $V_{s1}$ ) i njihove razlike ( $V_{s1} - V$ ).

Kao što je naglašeno u Lit.57, jedan od osnovnih zadataka je i definisanje realnih eksploatacionih brzina koje predstavljaju osnovu za proračun troškova eksploatacije. U tom pogledu, razvijeni modeli simulacije otvaraju nove prostore za realniju procenu eksploatacionih troškova obezbeđujući ne samo prosečne brzine saobraćajnog toka već i raspodelu brzina po svim karakterističnim presecima u uslovima puta i saobraćaja bliskim realnim.

Posebno treba istaći činjenicu da se primenom modela simulacije saobraćajnog toka mogu ispitati eksploatacione posledice pri



različitim uslovima saobraćajnog opterećenja. Imajući u vidu zakonitosti časovne neravnomernosti protoka vozila u periodu cele godine (sl.84.), primenom modela simulacije pri različitim nivoima saobraćajnog opterećenja mogu se definisati godišnji eksploatacioni troškovi, izvršiti analiza posledica usvajanja odredjenog merodavnog časa za dimenzionisanje projektnih elemenata, odraziti specifične posledice promene zakonitosti časovne neravnomernosti tokom cele godine u planskom periodu i sl.



sl.84.

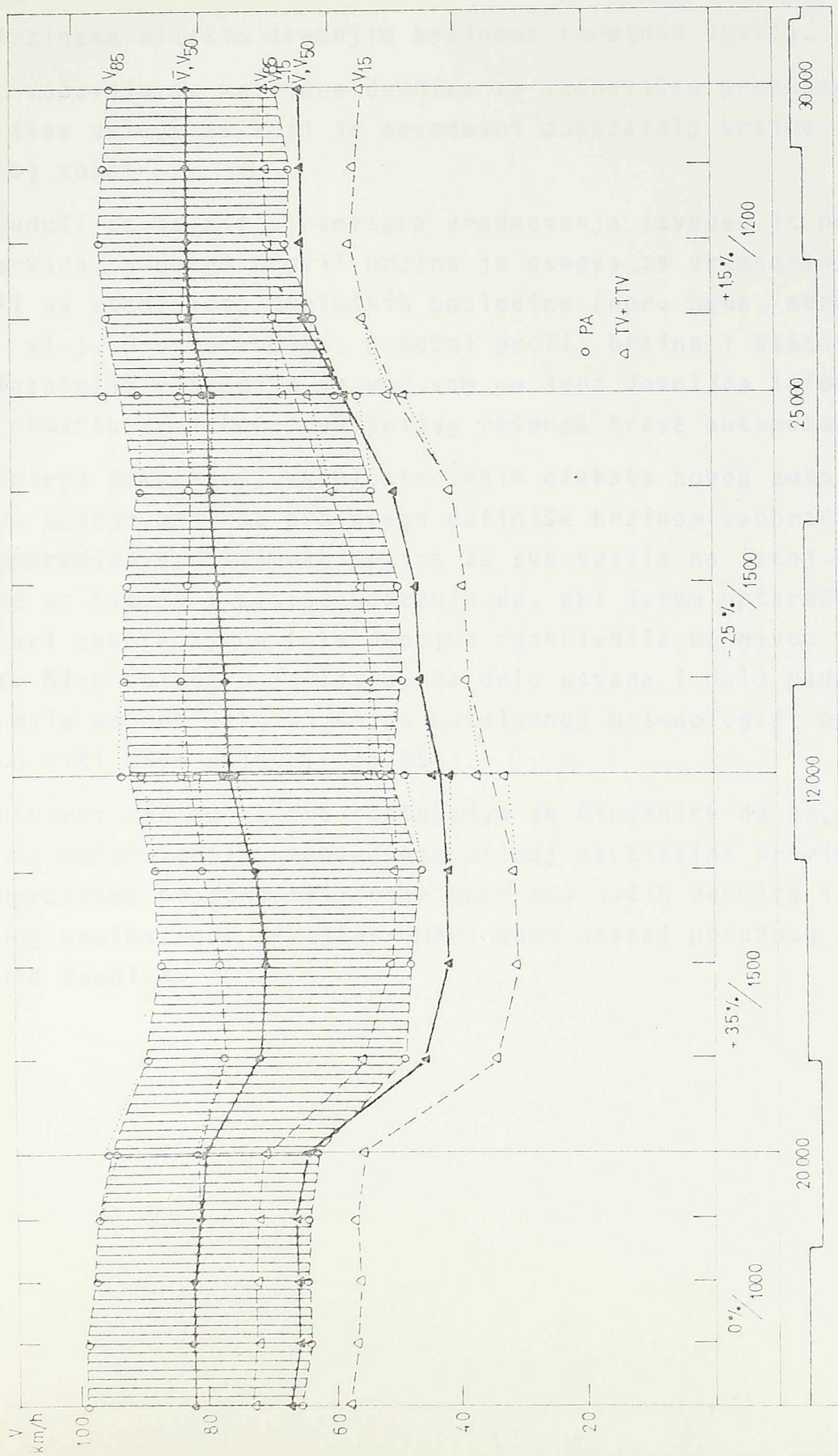
Časovna neravnomernost protoka tokom godine i saobraćajna opterećenja kao ulazni parametri modela

Osnovni podatak za vrednovanje varijanti je podužni profil brzina ( $V_{15}, V_{50}, V_{85}, \bar{V}$ ) dobijen doslednom primenom modela simulacije pri identičnim polaznim uslovima saobraćaja (saobraćajno opterećenje i struktura saobraćajnog toka) i primenjenim projektnim elementima (podužni profil). Na svakom preseku proračunata je i raspodela brzina i statistički pokazatelji raspodele za putnička i teretna vozila tako da se proračunati eksploatacioni troškovi bitno približavaju realnim.

Podužni profil brzina prikazan na sl.85 dobijen je testiranjem deonice u skladu sa postavkama modela i primenom razvijenih programa. Saobraćajno opterećenje je 2000 voz/h/smeru sa 12% teretnih i 3% teških teretnih vozila. Deonice su testirane nezavisno s tim što su ulazna i izlazna deonica imale nagibe koji odgovaraju projektnim karakteristikama trase. Kontinuitet pokazatelja brzina (max odstupanje + 5,3 km/h) ukazuje da ulazna i izlazna deonica u modelu simulacije stabilizuju saobraćajni tok u dovoljnoj meri.

Na iznetom primeru mogu se zapaziti karakteristični odnosi:

- Na deonici sa većim usponom (+3,5%) brzine teretnih vozila bitno opadaju a putnička vozila se u proseku kreću za 10-12 km/h sporije nego na horizontalnoj deonici.
- Raspodela brzina PA odstupa od normalne raspodele na deonici uspona. Uzrok ovoj pojavi je činjenica da se javljaju dva skupa putnička vozila: PA u desnoj saobraćajnoj traci bez mogućnosti prelaska u levu saobraćajnu traku koja se kreće u koloni sa teretnim vozilima i PA u levoj saobraćajnoj traci koja su pod indirektnim uticajem teretnih vozila u saobraćajnom toku.
- Kao posledica deonice većeg uspona, saobraćajni tok na padu (-2,5%) i blagom usponu (+1,5%) se postepeno ubrzava, raspodela brzina PA se približava normalnoj raspodeli i tok se stabilizuje sa karakteristikama bliskim horizontalnoj deonici.
- Pokazatelj  $V_{15}$  za putnička vozila pokazuje najveće promene koje su posledica postojanja vezanih putničkih vozila u desnoj saobraćajnoj traci. Po pravilu, 15% putničkih vozila kreće se



sl.85.  
 Podužni profil brzina za putnička i teretna vozila ( $Q = 2000$  voz/h/smer, 15% TV + TTV)

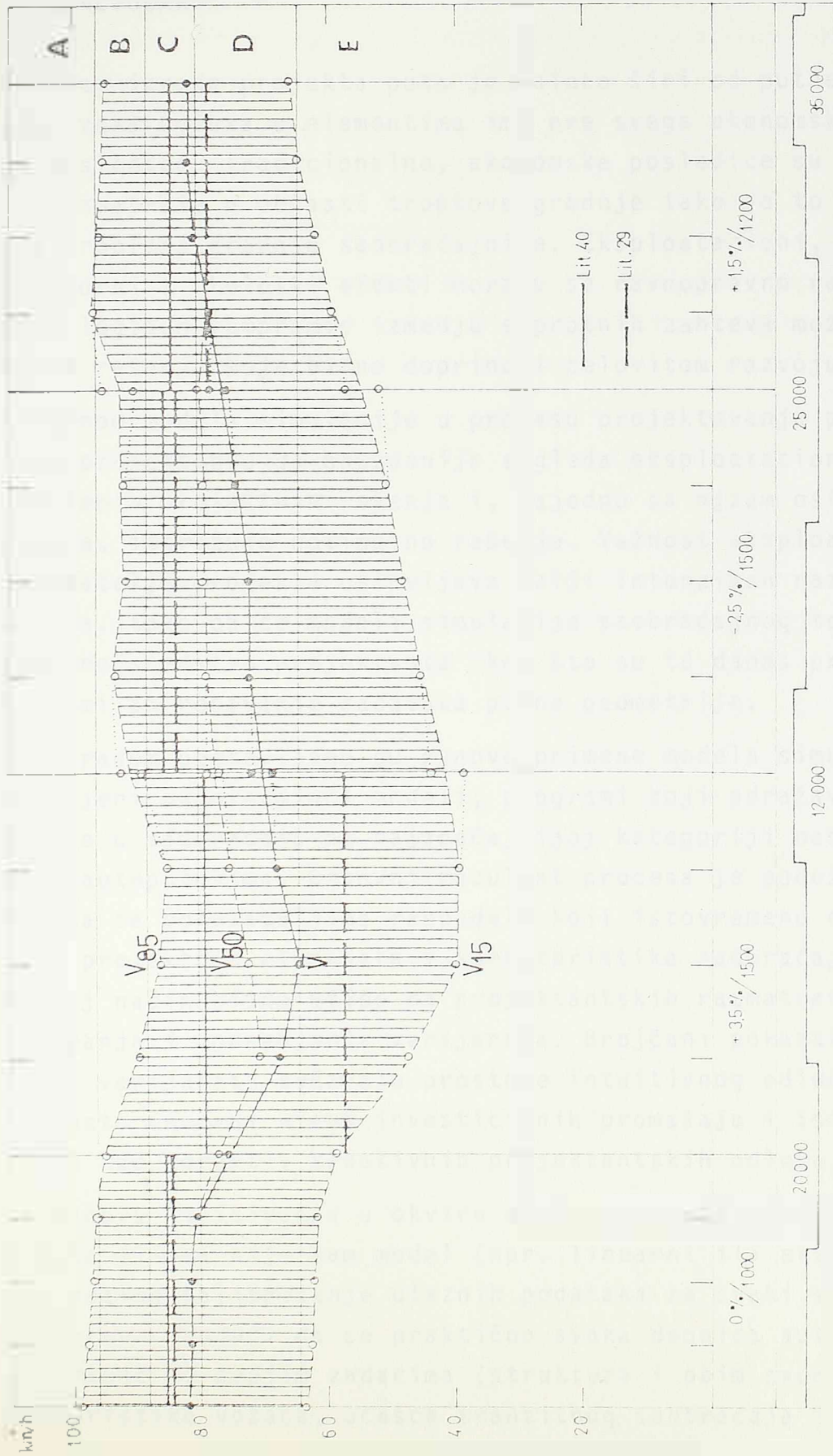
brzinama bliskim srednjim brzinama teretnih vozila.

• Uočavaju se kritične deonice sa stanovišta propusne moći i nivoa usluge za koji je merodavni pokazatelj brzina saobraćajnog toka.

Budući da je niz parametara vrednovanja izveden iz pokazatelja brzina, podužni profil brzina je osnova za vrednovanje varijanti sa stanovišta ekoloških posledica (npr. buka, aerozagadjenja i sl.). Drugim rečima, podužni profil brzina i statističkih pokazatelja raspodele je već sam po sebi dovoljna informacija projektantu za izbor povoljnijeg rešenja trase autoputa.

Zbirni pokazatelj eksploatacionih efekata novog autoputa je nivo usluge koji se pre svega definiše brzinom saobraćajnog toka. Uporedjenje dobijenih brzina za sva vozila na istoj deonici trase sa Lit.29 i Lit.40 pokazuje da, pri datom opterećenju i strukturi saobraćajnog toka deonica funkcioniše na nivou usluge D i C. Nivo usluge D javlja se na delu uspona i delu pada neposredno posle uspona iako bi se po ustaljenoj metodologiji očekivao nešto viši nivo usluge. (sl.86.).

Osnovni razlog za ova odstupanja je činjenica da se, po ustaljenoj metodologiji, zanemaruje uticaj vertikalne krivine, što je opravdano pojednostavljenje samo kod dužih deonica istog podužnog nagiba, gde se istovremeno gubi uticaj podužnog nagiba susednih deonica.



sl. 86.  
 Podužni profil brzina za sva vozila ( $Q = 2000$  voz/h/smer, 15% TV + TTV) i nivoi usluge (Lit. 40, Lit. 29)

#### 4. ZAKLJUČAK

Problem izrade projekta puta je daleko širi od putne geometrije, svaka odluka o elementima ima pre svega ekonomske i ekološke posledice. Tradicionalno, ekonomske posledice su se detaljno razmatrale u oblasti troškova gradnje iako je to samo jedan deo problema gradnje saobraćajnice. Eksploatacioni, društveni, prostorni i ekološki efekti moraju se ravnopravno razmatrati i samo logičan kompromis između suprotnih zahteva može predstavljati rešenje koje bitno doprinosi celovitom razvoju društva.

Primenom modela simulacije u procesu projektovanja puteva omogućava projektantu da pouzdanije sagleda eksploatacione posledice usvojenih projektnih rešenja i, zajedno sa njom ostalim kriterijuma, istražuje optimalno rešenje. Važnost eksploatacionih pokazatelja projekta uslovljava dalji intenzivan razvoj sličnih metoda, tako da će modeli simulacije saobraćajnog toka postati pomoćno sredstvo projektanta kao što su to danas programski sistemi za rešavanje zadataka putne geometrije.

Ovim radom postavljene su osnove primene modela simulacije i razvijeni odgovarajući modeli; programi koji odražavaju realne odnose u saobraćaju na najznačajnijoj kategoriji naše putne mreže - autoputevima. Osnovni rezultat procesa je podužni profil brzina sa pokazateljima raspodele koji istovremeno odražava uticaje projektnih elemenata i karakteristika saobraćajnog toka i na taj način bitno utiče na projektantskih razmatranja u fazi stvaranja i uporedjenja varijanata. Brojčani pokazatelji vrednosti varijanata sužavaju prostore intuitivnog odlučivanja koje je često osnovni uzrok investicionih promašaja i istovremeno, služe kao korektiv kreativnih projektantskih odluka.

Na osnovu ispitivanja u okviru ovog rada može se tvrditi da suštinska dilema nije sam model (npr. linearni ili eksponencijalni) već realno kalibrisanje ulaznih podataka za svaki specifični putni pravac budući da se praktično svaka deonica autoputa bitno razlikuje po svojim zadacima (struktura i obim saobraćaja, karakteristike vozača, učešće tranzitnog saobraćaja i sl.). Razvi-

jeni programi otvaraju mogućnost nebrojenih varijacija osnovnih parametara uz stalni i dosledno izdavanje uporedivih rezultata za proveru polaznih pretpostavki.

Ovim radom otvoreni su i putevi dalje nadogradnje i u metodološkom i u projektantskom pogledu kao što su:

- . Razvoj metoda i programa za dvotračne puteve
- . Razvoj metoda i programa za analizu ekoloških posledica izgradnje za niz oblasti (npr. buka, aerozagadjenja) razvijeni modeli simulacije su polazna osnova.
- . Istraživanje i razvoj niza posebnih programa simulacije u specifičnim uslovima gradskih saobraćajnica.

Navedeni zadaci su obimni i kompleksni stoga je ovaj rad pojedinačni doprinos stvaranju celovite metodologije najodgovornijeg i najšireg koraka u procesu projektovanja puteva - uporedjenja i vrednovanja varijanti.



## LITERATURA

- 1 ANDJUS V. ITERATIVNI POSTUPAK U PROJEKTOVANJU  
PUTEVA PRIMENOM VOZNODINAMIČKIH KRIT-  
RIJUMA  
Mg. Gradjevinski fakultet  
BEOGRAD - 1978
- 2 ANG A.S. PROBABILITY CONCEPTS IN ENGINEERING  
TANG W.H. PLANNING AND DESIGN  
NEW YORK - 1975
- 3 ANDJUS V., METODOLOŠKI POSTUPCI SAVREMENOG PROCESA  
MALETIN M. PROJEKTOVANJA PUTEVA  
Put i saobraćaj 11-12/80
- 4 BAERWALD J.E. TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK  
Institute of Traffic Engineers  
WASHINGTON - 1965
- 5 BRANSTON D. SOME FACTORS AFFECTING THE CAPACITY  
OF MOTORWAYS  
Traffic Engineering + Control 4/78
- 6 BOPPART E., GESCHWINNDIGKEIT IN STEIGUNGEN UND  
LINDEMANN H.P., GEFALLEN  
RANFT B. Institut für Verkehrsplanung und  
Transporttechnik - ETH  
ZÜRICH - 1979
- 7 BRANNOLTE U. VORSCHLAG FÜR EINEN NEUEN BEMESSUNGS  
Strassen Verkehrstechnik 3/80
- 8 BAKER R.F. HANDBOOK OF HIGHWAY ENGINEERING  
NEW YORK - 1975
- 9 CVETANOVIĆ L., OSNOVI TEORIJE SAOBRAĆAJNOG TOKA  
JOVANOVIĆ G. ZAGREB - 1979
- 10 DILLING J. CHARAKTERISTIK DES VERKEHRSABLAUFS  
AUF EINEM AUTOBAHNABSCHNITT  
Institut für Verkehrswesen  
KARISRUHE - 1970
- 11 DREW D.R. TRAFFIC FLOW THEORY AND CONTROL  
NEW YORK - 1968



- 12 DAWSON R.F. THE HYPERLANG PROBABILITY DISTRIBUTION  
Straseenbau und Strassenverkehrstechnik  
KARSSRUHE - 1968
- 13 DUNCAN N.C. A METHOD OF ESTIMATING THE DISTRIBUTION  
OF SPEEDS OF CARS ON A MOTORWAY  
Transport and Road Research Laboratory  
LONDON - 1973
- 14 DURTH W. EIN BEITRAG ZUR ERWEITERUNG DESMODELIS  
FUR FAHRER, FAHRZEUG UND STRASSE IN DER  
STAASSENPLANNUNG  
BONN - 1974
- 15 DAMJANOVIĆ D. UTICAJ ELEMENATA PUTA NA BRZINU VOZILA  
U SLOBODNOM TOKU  
Diss. Gradjevinski fakultet  
NIŠ - 1981
- 16 DUNCAN N.C. RURAL SPEED FLOW RELATIONS  
Transport and Road Research Laboratory  
LONDON - 1974
- 17 DIEWALD W.J. INCORPORATING HIGHWAY SAFETY INTO  
LEVEL OF SERVICE  
Transportation Engineering Journal ASCE  
NEW YORK - 1974
- 18 EMSHOFF, J.R., DESIGN AND USE OF COMPUTER SIMULATION  
SISSON R.L. MODELS  
NEW YORK - 1970
- 19 EVERALL P.F. THE EFFECT OF ROAD AND TRAFFIC CONDI-  
TIONS ON FUEL CONSUMPTION  
Road Research Laboratory  
LONDON - 1968
- 20 EASA S.M., GENERALIZED PROCEDURE FOR ESTIMATING  
MAY A.D. SINGLE AND MULTI REGIME TRAFFIC FLOW  
MODELS  
Transportation Research Board  
WASHINGTON - 1980

- 21 ERNST R.,  
GLEUE A.W.,  
i dr. AUSWIRKUNGEN EINER RICHTGESCHWINDIG-  
KEIT IM VERGLEICH ZU EINER HOCHST-  
GESCHWINDIGKEIT VON 130 km/h AUF  
AUTOBAHNEN  
Bundesanstalt für Strassenwesen  
KOLN - 1977
- 22 FOX P.,  
LEHMANN F.G. A DIGITAL SIMULATION OF CAR FOLLOW-  
ING AND OVERTAKING  
Highway Research Board -  
WASHINGTON - 1967
- 23 FORBES T.W. HUMAN FACTORS IN TRAFFIC SAFETY RESEARCH  
NEW YORK - 1972
- 24 FISHER R.A. STATISTICAL METHODS FOR RESEARCH WORKERS  
LONDON - 1958
- 25 FARTHING D.W. SOME FACTORS AFFECTING RURAL SPEED  
FLOW RELATIONS  
Traffic Engineering + Control 1/77
- 26 GAZIS D.C. TRAFFIC SCIENCE  
NEW YORK - 1974
- 27 GERZ U.,  
MEEWES V. VERKEHRSABLAUF AUF STRASSEN MIT UND  
OHNE RICHTUNGSTERNNUNG  
Strassen Verkehrstechnik 1/77
- 28 GORDON D.A. PERCEPTUAL BASIS OF VECHNICULAR GUIDANCE  
Public Roads - Vol.34  
WASHINGTON - 1966
- 29 HRB HIGHWAY CAPACITY MANUAL  
Highway Research Board  
WASHINGTON - 1965
- 30 HOFFMANN G. DIE AUSWIRKUNGEN VON STEIGUNGSSTRECKEN  
AUF DEN VERKEHRSABLAUF AUF AUTOBAHNEN  
Strassenbau und Strassenverkehrstechnik
- 31 HABERMAN R. MATHEMATICAL MODELS  
LONDON - 1977
- 32 HEIDEMANN D.,  
HOTOP R. AUSWERTUNG VON FUNDAMENTALDIGRAMMEN  
AN BUNDESAUTOBAHNEN  
Strassen Verkehrstechnik 1/79

- 33 HERZ R.,  
SCHLICHTER H.G.,  
SIEGENER W. ANGEWANDTE STATISTIK FÜR VERKEHRS  
UND REGIONALPLANER  
DUSSELDORF - 1977
- 34 IVKOVIĆ Z. MATEMATIČKA STATISTIKA  
BEOGRAD - 1976
- 35 JOHN A.D.,  
KOBETT D.R. GRADE EFFECTS ON TRAFFIC FLOW STABILITY  
AND CAPACITY  
Transportation Research Board  
WASHINGTON - 1978
- 36 KUZOVIĆ Lj. TEORIJA SAOBRAĆAJNOG TOKA  
BEOGRAD - 1980
- 37 KOFFLER T.,  
METZGER W. UNTERSUCHUNG ÜBER ZWECKMASSIGE ZEIT  
UND WEGEABSCHNITTE ZUR ERFASSUNG DES  
VERKEHRSABLAUFS  
Forschung Strassenbau und Strassenverkehr-  
stechnik  
BONN - 1980
- 38 HELLER H.,  
HAMPE H. VERKEHRSABLAUF BEI RICHTGESCHWINDIGKEIT  
130 km/h AUF NEUN BUNDESAUTOBAHNABSCH-  
NITTEN  
Strasse und Autobahn 4/81
- 39 KHASNABIS S.,  
HEIMBACH C.L. TRAFFIC SIMULATION AS HIGHWAY DESIGN  
TOOL  
Transportation engineering Journal ASCE  
NEW YORK - 1977
- 40 KUZOVIĆ Lj. DEFINISANJE POSTUPKA PRORAČUNA EKSPLOA-  
TACIONIH BRZINA SAOBRAĆAJNIH TOKOVA NA  
PUTEVIMA U DELOVIMA VELIKIH GUSTINA  
SAOBRAĆAJA  
Put i Saobraćaj 11-12/1979
- 41 KNOFLAHER H. GESCHWINDIGKEITSVERHALTEN UND UNFALL-  
GESCHEHEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN  
AUSBAUELEMENTEN  
Strassen Verkehrstechnik 4/80
- 42 LEUTZBACH W.,  
SPARMANN U. SPURWECHELVORGÄNGE AUF RICHTUNGSFAHRBAHNEN  
Institut für Verkehrswesen  
KARLSRUHE - 1977

- 43 LEUTZBACH W. EINFUHRUNG IN DIE THEORIE DES VERKEHRS-  
FLUSSES  
BERLIN-HEIDELBERG - NEW YORK - 1972
- 44 LOBANOV E.M.,  
SILJANOV V.V.,  
i dr. PROPUSNAJA SPOSOBNOST AVTOMOBILNIH  
DOROG  
MOSKVA - 1970
- 45 LOBANOV E.M. PROEKTIROVANIE DOROG I ORGANIZACIA  
DVIŽENIA S UČETOM PSIHOFIZIOLOGII  
VODITELJ  
MOSKVA - 1980
- 46 LENZ K.,  
BREITENSTEIN J.,  
i dr. FAHRZEUGPULKS UND VERKEHRSSTAU  
Strassen Verkehrstechnik 1/80
- 47 MAY A.D.,  
KELLER E.M. NONINTEGER CARFOLLOWING MODELS  
Highway Research Board  
WASHINGTON - 1967
- 48 MAY A.D.,  
KELLER E.M. EVALUATION OF SINGLE AND MULTIREGIME  
TRAFFIC FLOW MODELS  
Strassenbau und Strassenverkehrstechnik  
KARISRUHE - 1968
- 49 MICHAELS R.M. PERCEPTUAL FACTORS IN CAR FOLOWING  
OECD - PARIS - 1965
- 50 OECD DRIVER BEHAVIOUR  
PARIS - 1970
- 51 OECD TWO LANE RURAL ROADS - DESIGN AND  
TRAFFIC FLOW  
PARIS - 1972
- 52 PIPES L.A. CAR FOLLOWING MODELS AND THE FUNDAMENTAL  
DIAGRAM OF ROAD TRAFFIC  
Transportation Research  
NEW YORK - 1967
- 53 PIPES L.A.,  
WOJCIK C.K. A CONTRIBUTION TO THEORY OF TRAFFIC FLOW  
Traffic Flow Symposium  
DETROIT - 1968
- 54 PIARC TECHNICAL COMMITTEE REPORT ON INTERURBAN  
ROADS  
XVIth World Road Congress  
VIENNA - 1979

- 55 POLUS A. NATIONAL REPORT ISRAEL  
XVith World Road Congress  
VIENNA - 1979
- 56 STOROST R. SIMULATION DES VERKEHRSABLAUFES AN  
AUTOBAHNAUSFAHRTEN IM HINBLICK AUF  
DIE BEMESSUNG DER ZUSATZSPUR  
Diss. TH DARMSTADT - 1971
- 57 SOP UPUTSTVA ZA IZRADU STUDIJA O IZVODLJI-  
VOSTI PUTEVA  
SOP LJUBLJANA - 1974
- 58 SPIEGEL M.R. THEORY AND PROBLEMS OF STATISTICS  
NEW YORK - 1972
- 59 SPARMANN U. THE IMPORTANCE OF LANE CHANGING ON  
MOTORWAYS  
Traffic Engineering + Control 6/79
- 60 SAGEN R. TRAFFIC SIMULATION  
Strassenbau und Strassenverkehrstechnik  
BONN - 1969
- 61 TRB TRAFFIC FLOW THEORY  
Transportation Research Board  
WASHINGTON - 1975
- 62 TRB INTERIM MATERIAL ON HIGHWAY CAPACITY  
Transportation Research Board  
WASHINGTON - 1980
- 63 VRANIĆ V. VJEROJATNOST I STATISTIKA  
ZAGREB - 1970
- 64 VUKADINOVIĆ S. ELEMENTI TEORIJE VEROVATNOĆE I  
MATEMATIČKE STATISTIKE  
BEOGRAD - 1978
- 65 VUKADINOVIĆ S., METODA MONTE KARLO  
POPOVIĆ S., BEOGRAD - 1977

- 66 WETTERLING K. MEHRSPURIGER RICHTUNGSVERKEHR  
BEI UNTERSCHIEDLICHEN FARHRVOR-  
SCHRIFTEN  
Forschung Strassenbau und Strassen-  
verkehrstechnik - BONN - 1980
- 67 WEISSKOPF W. BEURTEILUNG VERSCHIEDENER ZUSTAND-  
FORMEN DES VERKEHRSFLUSSES UND DES-  
SEN BEWERTUNG DURCH DEN LEVEL OF  
SERVICE  
Forschung Strassenbau und Strassen-  
verkehrstechnik - BONN - 1980
- 68 WIEDEMANN R. SIMULATION DES STRASSENVERKEHRSFLUSSES  
Hab. Institut fur Strassenwesen  
KARLSRUHE - 1974
- 69 WOHL M., TRAFIC SYSTEM ANALYSIS FOR ENGINEERS  
MARTIN B. AND PLANNERS  
NEW YORK - 1967



