

5. SAOBRAĆAJNI MODELI

Oblikovanje i korišćenje modela predstavlja suštinu i najosetljiviju fazu procesa planiranja transportnog sistema. To je vrlo složen proces koji u svojoj krajnjoj konsekvenci može, ukoliko nije pravilno sproveden, da obezvređi čitav trud i sredstva uložena u rešavanje problema. Na sreću danas postoji čitav niz tehnika i softverskih paketa zasnovanih na dugogodišnjem iskustvu, koji omogućuju da se sa dosta izvesnosti u povoljan ishod planeri upuste u ovu proceduru.

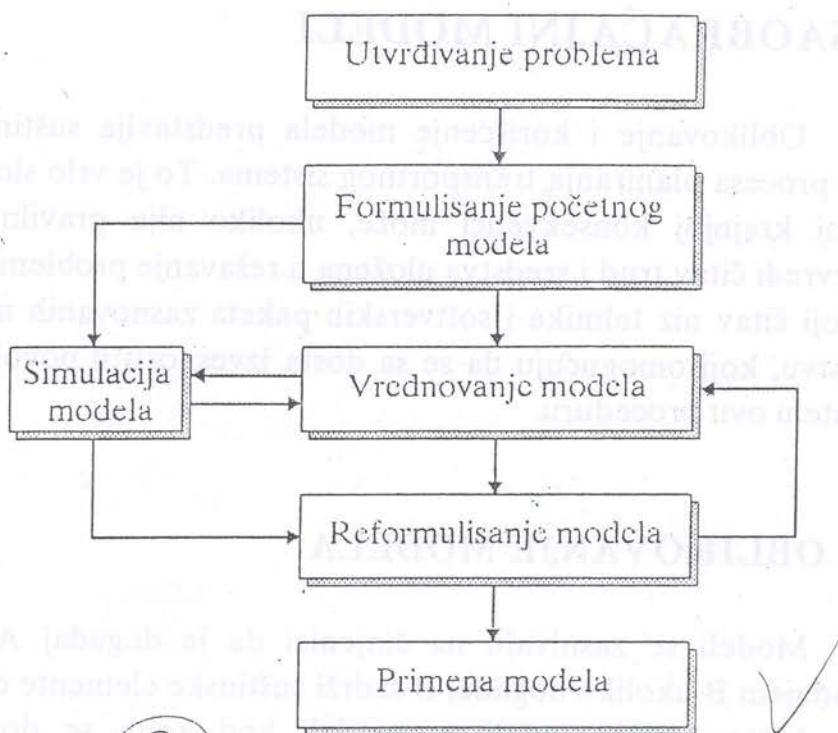
5.1. OBLIKOVANJE MODELA

Modeli se zasnivaju na činjenici da je događaj A moguće opisati događajem B ukoliko događaj B sadrži suštinske elemente događaja A.

Matematički modeli su modeli kod kojih se događaj A opisuje događajem B koji je definisan određenom matematičkom formom. Matematički modeli pripadaju grupi tzv. homomorfnih modela koji približno odgovaraju stanju sistema čiji su model.

Oblici matematičkih modela mogu da budu raznovrsni: jednačine, tabele ili grafikoni, grafovi itd.

Prema Hamiltonu i autorima [9] razvoj matematičkih modela se odvija u pet faza od kojih je poslednja – peta, faza primene modela.



Slika 17. Iterativni proces razvoja modela[9]

Kao što se vidi na sl. 17 postupak ima cikličan karakter koji treba da omogući da se struktura modela tokom ponavljanja unapređuje do trenutka kada najviše odgovara pojavi koju opisuje.

Kao i obično prilikom rešavanja određenog zadatka, oblikovanje simulacionog modela treba da započne definisanjem problema koji treba rešiti i utvrđivanjem ciljeva zadatka. Precizno definisan cilj omogućuje da se uspostavi hipoteza koja daje okvir za formulisanje početnog – inicijalnog modela.

Formulisanje početnog modela zavisi od promenljivih koje će se obuhvatiti, nivoa njihove agregacije i klasifikacije i tretmana vremenske komponente modela.

Po osnovnoj definiciji model treba da ima sposobnost da "odslika" pojavu koju simulira, pa prema tome treba da obuhvati one promenljive koje su referentne za problem o kome je reč. Osim toga prilikom izbora nezavisnih promenljivih treba imati u vidu one koje će biti na raspolaganju i za neko buduće stanje za koje se očekuje da bude reprodukovano modelom.

Nivo agregacije promenljivih takođe zavisi od pojave koja se modeluje. Određene pojave za određenu svrhu mogu se prikazati u agregiranom obliku, a za neku drugu svrhu potrebno je sagledati i njihovu

strukturu (stanovništvo ili protok vozila, na primer). Nivo agregacije zavisi i od toga u kojoj meri realnost može adekvatno da se izrazi matematičkim izrazima.

Vremenska komponenta modela može da predstavlja najsloženiji problem oblikovanja modela. Ona ima dvojaki uticaj na model i oni su međusobno spregnuti. Prvi se odnosi na planski period za koji će se koristiti model, a drugi na promene unutar strukture modela tokom vremena. Iz tih razloga se modeli dele na dinamičke, koji pokušavaju da odraze promene onih komponenti koje se menjaju kroz vreme, i statičke koji ove promene ne uzimaju u obzir.

Formalizacija modela ili prevođenje hipoteze o ponašanju posmatrane pojave u matematički ili simbolički jezik, predstavlja pripremu za završnu etapu određivanja početnog modela. U toj, završnoj etapi, model se iz opšteg oblika prevodi u poseban na taj način što se utvrđuje vrednost parametara i konstanti koji određuju odnose između varijabli u modelu. Postupak određivanja ovih vrednosti predstavlja kalibraciju modela.

U sledećoj fazi oblikovanja vrši se provera valjanosti – vrednovanje modela. Pored uobičajenih statističkih mera koje se tom prilikom koriste vrši se i logička kontrola dobijenih rezultata. Rezultat tih ispitivanja može da bude dvojak:

- početni model zadovoljava postavljene zahteve, u kom slučaju se ide u njegovu primenu, i ✓
- početni model ne zadovoljava pa je potrebna dogradnja i ponavljanje postupka. ✓

Što se tiče primene modela u planiranju urbanih sistema treba još reći da i kad se gore opisana procedura dosledno sprovede može se desiti da model ne odrazi na pravi način promene koje će se dogoditi. Osnovni razlozi za to leže u složenosti urbanih sistema na koje deluju i raznorodni uticaji koje nije moguće predvideti. Radi toga Bayliss [9] predlaže sledeće faze koje će, najverovatnije, dati najbolje rezultate u primeni modela prostornog planiranja kojima pripadaju i modeli saobraćaja:

1. Primeniti model (ili modele) da bi se odredio "prirodan" tok promene posmatranog sistema.
2. Iz ovog razloga se izoluju "prihvatljive" i "neprihvatljive" karakteristike.

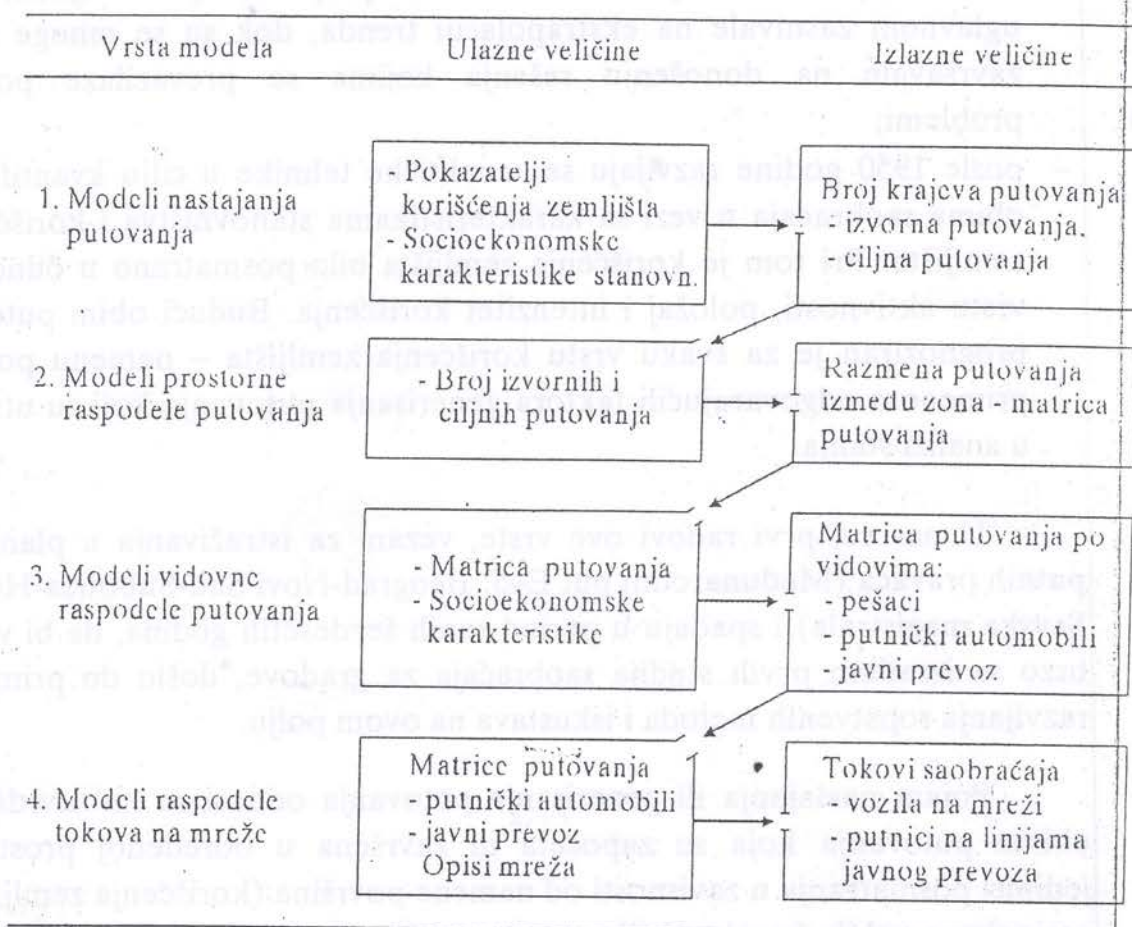
3. Definirati alternativne oblike razvoja koji su "poželjni" (prema postavljenim ciljevima).
4. Na bazi ovih alternativa mogu da se formulišu delovanja koja bi uticala da razvoj ide u željenom pravcu.
5. Rezultati ovih delovanja mogu se uneti u model koji se koristi za davanje prognoza. Ove prognoze zatim moraju da se uporede sa očekivanim rezultatima, i, ako je potrebno, delovanja mogu da se koriguju da bi se dobio željeni rezultat.
6. Kada je smišljena kombinacija delovanja koja postiže željene ciljeve, alternativna rešenja koja je stvorio model moraju da se testiraju u pogledu izvodljivosti i efikasnosti, a iz ovog procesa testiranja može da se odabere alternativa koja najbolje odgovara.

Saobraćajni modeli spadaju u grupu matematičkih modela, a koriste se za formalno opisivanje procesa koji nastaju u saobraćaju. Mogu da se podele u četiri osnovne grupe:

- modeli nastajanja putovanja; ✓
- modeli prostorne raspodele putovanja; ✓
- modeli vidovne raspodele putovanja, i ✓
- modeli raspodele tokova na mreže. ✓

Primena ovih modela je sukcesivna odnosno izlazni rezultati iz prve grupe modela primenjuju se kao ulazne veličine za drugu grupu modela i tako redom. Otud se za ove modele često kaže i lanac saobraćajnih modela jer su međusobno povezani, odnosno zavisni.

Tabela 17. Međusobni odnosi ulaznih i izlaznih veličina u lancu saobraćajnih modela



U tabeli je prikazan najčešće primenjivan redosled u lancu saobraćajnih modela. Međutim, kao što će se kasnije videti, modeli vidovne raspodele u pogledu redosleda mogu zauzimati bilo koju poziciju u ovom lancu što zavisi od metoda koje će se primeniti za raspodelu putovanja na vidove.

5.2. MODELI NASTAJANJA PUTOVANJA

Posle II svetskog rata razvoj metodologije planiranja saobraćaja išao je u pravcu sveobuhvatnijeg izučavanja odnosa saobraćaja i prostorne organizacije grada, odnosno korišćenja zemljišta. Ovi postupci su se uglavnom razvijali u dve osnovne etape:

- do 1950 godine u SAD rezultati istraživanja "izvor-cilj" kretanja koristili su se prvenstveno u opisu postojećeg stanja saobraćajnog sistema,

najčešće u obliku odgovarajućih matrica putovanja i "linija želja", koje su šematski pokazivale prostornu distribuciju putovanja. Prognoze su se uglavnom zasnivale na ekstrapolaciji trenda, dok su se mnoge studije završavale na donošenju rešenja kojima se prevazilaze postojeći problemi;

- posle 1950 godine razvijaju se analitičke tehnike u cilju kvantifikacije obima saobraćaja u vezi sa karakteristikama stanovništva i korišćenjem zemljišta. Pri tom je korišćenje zemljišta bilo posmatrano u odnosu na vrstu aktivnosti, položaj i intenzitet korišćenja. Budući obim putovanja prognozirani je za svaku vrstu korišćenja zemljišta - namenu površina primenom odgovarajućih faktora generisanja putovanja koji su utvrđeni u analizi stanja.

U nas su, prvi radovi ove vrste, vezani za istraživanja u planiranju putnih pravaca (Međunarodni put E-5: Beograd-Novi Sad-Subotica-Horgoš; Savska magistrala) i spadaju u period ranih šezdesetih godina, da bi veoma brzo sa izradom prvih studija saobraćaja za gradove, došlo do primene i razvijanja sopstvenih metoda i iskustava na ovom polju.

Pojam nastajanja ili generisanja putovanja odnosi se na utvrđivanje obima putovanja koja su započeta ili završena u određenoj prostornoj jedinici posmatranja u zavisnosti od namene površina (korišćenja zemljišta) i socioekonomskih karakteristika posmatranog područja. Svrha izučavanja nastajanja putovanja nije u tome da se utvrde sve karakteristike koje određuju putovanje u fizičkom smislu, kao što su dužina, trajanje i smer, nego da se identifikuju i kvantifikuju krajevi putovanja (izvorni i ciljni) koji pripadaju određenoj prostornoj jedinici (zoni). Postupak analize nastajanja (generisanja) putovanja sastoji se u iznalaženju metoda za uspostavljanje odgovarajuće funkcionalne zavisnosti između broja putovanja i namene površina i socioekonomskih karakteristika jedinica posmatranja (na primer, zone) u kojoj putovanja nastaju ili se završavaju. Generisani krajevi putovanja daju meru "produkcije" i "atrakcije" putovanja posmatrane prostorne jedinice i zajedno sa karakteristikama mreže predstavljaju osnovu modelske simulacije prostorne distribucije.

Generalno posmatrano može se reći da na nastajanje (generisanje) putovanja utiču tri faktora: intenzitet, karakter i prostorni razmeštaj aktivnosti.

Intenzitet odražava obim aktivnosti na posmatranom području i obično se iskazuje apsolutnim veličinama (broj domaćinstava, stanovnika ili zaposlenih) ili gustom (broj korisnika po jedinici površine). Varijacije intenziteta imaju značajan uticaj na broj i tip putovanja koje generiše posmatrano područje.

Dakle, moguće je uspostaviti zavisnost između broja putovanja i intenziteta aktivnosti, ali to nije dovoljno, jer postoje i drugi faktori. Karakter aktivnosti daje socioekonomsku identifikaciju jedinice posmatranja. Pri tome najveću važnost ima dohodak domaćinstva i stepen motorizacije.

Sa porastom stepena motorizacije raste i mobilnost, odnosno, sa porastom dohotka domaćinstva raste učešće putovanja putničkim automobilima a isto tako raste učešće putovanja sa svrhom kupovine i ostalih aktivnosti.

Prostorni razmeštaj aktivnosti, kao na primer, radnih zona u odnosu na stanovanje i slično, ima takođe veliki značaj za analizu nastajanja putovanja. Ovaj uticaj se, međutim, najčešće manifestuje u okviru prva dva, tako da se pre može govoriti o refleksiji svih ovih faktora nego o njegovom nezavisnom dejstvu kao nezavisno promenljive.

Kvantifikovanje uticaja činilaca nastajanja putovanja na mestu stanovanja daje meru produkcije putovanja jedinice posmatranja, dok se uticaj ovih faktora na drugom kraju javlja u obliku atrakcije. Promenljive koje daju intenzitet atrakcije, obično su izražene preko broja radnih mesta, prodajnog i radnog prostora itd., a promenljive koje daju karakter namene su izražene definisanjem tipa aktivnosti tj. delatnosti.

Do sada se pokazalo da preko 80 % svih putovanja počinje ili završava na mestu (zoni) stanovanja, što znači da se odluke o putovanju najčešće se donose na nivou domaćinstva. Zbog toga se najveći broj podataka za potrebe analize nastajanja putovanja prikuplja anketom u domaćinstvima.

Podaci na nivou saobraćajne zone najčešće se koriste za formiranje modela nastajanja putovanja. Socioekonomske karakteristike zone mogu se dobiti agregiranjem podataka o karakteristikama domaćinstava, dok se podaci o nameni površina moraju obezbediti iz drugih izvora (posebnim snimanjem, urbanistička dokumentacija, itd).

Sledeća tabela daje pregled promenljivih koje su relevantne za analizu nastajanja putovanja i rang važnosti koji imaju za izradu modela na nivou zone i domaćinstava:

Tabela 18. Pregled promenljivih značajnih za analizu nastajanja putovanja

| A. Promenljive značajne za analizu nastajanja putovanja na nivou zone | |
|---|---|
| 1. Demografski podaci | |
| - Ukupan broj stanovnika | 1 |
| - Godine starosti, pol, itd. | 2 |
| - Broj domaćinstava u zoni | 1 |
| - Prosečna veličina domaćinstva | 1 |
| - Broj učenika i studenata | 1 |
| 2. Ekonomski podaci | |
| - Ukupan broj zaposlenih | 1 |
| - Broj zaposlenih po delatnostima | 1 |
| - Broj zaposlenih u industriji | 3 |
| - Broj zaposlenih po mestu stanovanja | 1 |
| - Aktivno stanovništvo (radni kontigent) | 3 |
| - Aktivno stanovništvo po delatnostima | 3 |
| - Prosečni dohodak | 1 |
| - Dohodak po vrstama | 3 |
| - Stepen motorizacije | 1 |
| - Broj domaćinstava bez automobila | 2 |
| - Promet u tercijari | 3 |
| - Prosečna vrednost građevinskog fonda | 3 |
| 3. Podaci o nameni površina | |
| - Funkcionalna podela po aktivnostima | 3 |
| - Intenzitet korišćenja površina | 1 |
| B. Promenljive značajne za analizu nastajanja putovanja na nivou domaćinstva: | |
| - Posedovanje automobila | 1 |
| - Veličina porodice | 1 |
| - Broj osoba preko 5 godina starosti | 1 |
| - Dužina stanovanja | 3 |
| - Ukupan prihod u domaćinstvu | 2 |
| - Broj osoba preko 16 godina starosti | 2 |
| - Broj osoba koje poseduju vozačku dozvolu | 1 |
| - Godine starosti glave domaćinstva | 2 |
| - Udaljenost od centralne zone | 3 |
| - Zanimanje glave porodice | 1 |
| - Struktura i tip domaćinstva | 1 |

* Objašnjenje kategorije vrednosti podataka: 1-sušinski podatak, 2-potreban podatak, i 3-koristan podatak

Metode nastajanja putovanja se mogu svrstati u tri osnovne grupe:

- Utvrđivanje zavisnosti broja putovanja od porasta posmatranog područja.
- Klasifikovanje putovanja preko socioekonomskih karakteristika jedinice posmatranja domaćinstva (poznato kao metod unakrsne klasifikacione ili kategorijske analize).
- Utvrđivanje zavisnosti broja putovanja i socioekonomskih karakteristika i karakteristika namene površina preko regresione analize.

Metod utvrđivanja zavisnosti broja putovanja od porasta posmatranog područja zasniva se na uspostavljanju odnosa između broja putovanja i pojedinih planerskih pokazatelja, bilo da se tiču namene površina ili socioekonomskih karakteristika domaćinstava. Uspostavljeni odnosi se koriste u procesu prognoze kao faktori porasta budućeg obima putovanja.

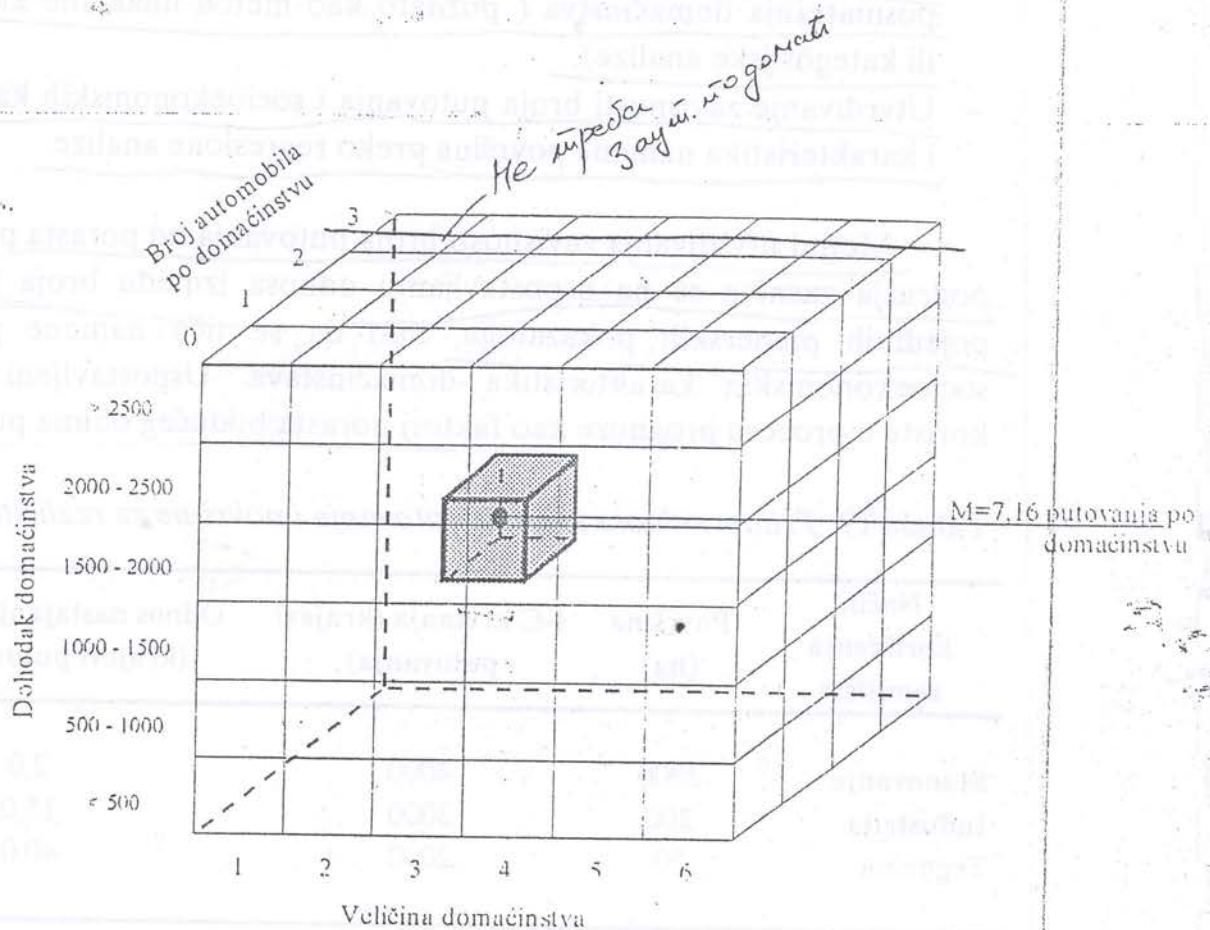
Tabela 19. *Primer odnosa krajeva putovanja i površine za različite namene*

| <u>Način korišćenja zemljišta</u> | <u>Površina (ha)</u> | <u>I-C kretanja (krajevi putovanja)</u> | <u>Odnos nastajanja putovanja (krajevi putovanja/ha)</u> |
|-----------------------------------|----------------------|---|--|
| Stanovanje | 2000 | 4000 | 2,0 |
| Industrija | 200 | 3000 | 15,0 |
| Trgovina | 50 | 2000 | 40,0 |

Metod unakrsne klasifikacione analize, ili kategorijske analize, je tehnika za prognozu krajeva putovanja koja je prvobitno primenjena u SAD¹⁾. Osnovna jedinica posmatranja je domaćinstvo. Postupak se sprovodi na taj način što se domaćinstva grupišu u homogene podgrupe, a za svaku od podgrupa se utvrđuju prosečne stope generisanja putovanja. Analizom podataka iz saobraćajnih istraživanja utvrđeno je da najveći uticaj na stope generisanja putovanja, odnosno mobilnost domaćinstva, imaju veličina domaćinstva, stepen motorizacije i dohodak domaćinstva. Prosečan broj putovanja u zavisnosti od ovih veličina čine ćelije kubne matrice kod koje jednu dimenziju čini npr. Veličina domaćinstva, drugu kategorije prosečnog dohotka, a treću stepen motorizacije.

Na slici 18. prikazana je kubna matrica koja sadrži 6 kategorija domaćinstava, 6 kategorija dohotaka i 3 kategorije stepena motorizacije, odnosno:

$$6 \times 6 \times 3 = 108 \text{ elemenata}$$



Slika 18. Kubna matrica generisanja putovanja u funkciji veličine domaćinstva, dohotka i stepena motorizacije

Izdvojen element odgovara domaćinstvu sa 3 člana, prosečnim dohotkom između 1500 i 2000 n.j. i 1 putničkim automobilom koje generiše 7,16 putovanja/dan.

Ključna pretpostavka kategorijske analize je da iste kategorije domaćinstva imaju istu dnevnu mobilnost i da se tokom vremena unutar iste kategorije domaćinstva mobilnost ne menja, odnosno približno ostaje ista. Na bazi ovih pretpostavki, ukoliko se za prognozni period može utvrditi broj

domaćinstava sa određenim karakteristikama (veličina, dohodak, motorizacija npr.) moguće je za ta domaćinstva utvrditi budući broj putovanja, odnosno:

$$P_i = \sum_{c=1}^n \bar{P}_c \times N_{ci} \quad \checkmark$$

Gde su :

P_i - ukupan broj putovanja koja generiše zona "i" ✓

\bar{P}_c - prosečan broj putovanja za domaćinstvo iz kategorije "c" ✓

N_{ci} - broj domaćinstava iz kategorije "c" nastanjenih u zoni "i" ✓

c - kategorija domaćinstva ✓

n - broj kategorija domaćinstva (u primeru na sl.18
n=6×6×3=108)

Sledeći primer ilustracije postupka primene kategorijske analize:

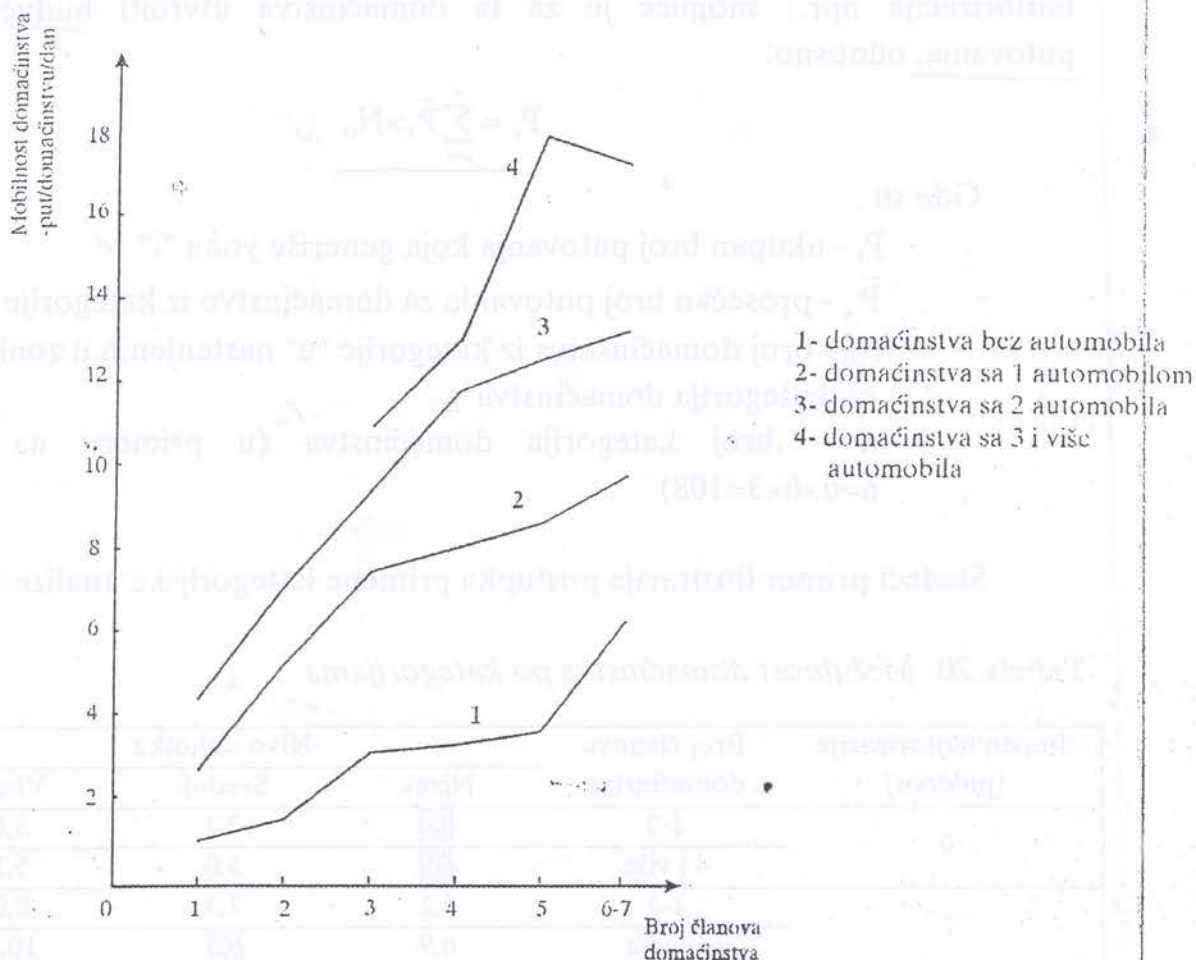
Tabela 20. *Mobilnost domaćinstva po kategorijama*

| Stepen motorizacije (pa/dom) | Broj članova domaćinstva | Nivo dohotka | | |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------|---------|-------|
| | | Nizak | Srednji | Visok |
| 0 | 1-3 | 3,4 | 3,7 | 3,8 |
| | 4 i više | 4,9 | 5,0 | 5,1 |
| 1 | 1-3 | 5,2 | 7,3 | 8,0 |
| | 4 i više | 6,9 | 8,3 | 10,2 |
| 2 i više | 1-3 | 5,8 | 8,1 | 10,0 |
| | 4 i više | 7,2 | 11,8 | 12,9 |

U ovom slučaju stope generisanja putovanja (mobilnost) svrstane su u 18 kategorija domaćinstava (3×2×3). Ako zona sadrži na primer 100 tročlanih domaćinstava sa niskim dohotkom, bez automobila, zatim 200 četvoročlanih domaćinstava sa takođe niskim dohotkom i bez automobila, 300 četvoročlanih domaćinstava sa srednjim dohotkom i 1 automobilom, i 50 domaćinstava sa 5 članova, visokim dohotkom i 2 automobila po domaćinstvu, tada će ta zona u toku dana generisati sledeći broj putovanja:

$$P = (100 \times 3,4) + (200 \times 4,9) + (300 \times 8,3) + (50 \times 12,9) = 4\,455 \text{ putovanja/dan}$$

Prilikom izbora veličina koje su od značaja za kategorijsku analizu nastajanja putovanja korisno je grafički prikazati odnos između zavisno promenljive (broj putovanja – mobilnost) i karakteristika domaćinstva. Na taj način može se uočiti da li postoji zavisnost između posmatranih veličina.



Slika 19. Mobilnost domaćinstva u funkciji veličine domaćinstva i stepena motorizacije

Prilikom analize nastajanja putovanja na nivou domaćinstva utvrđuju se izvorni krajevi putovanja. Za utvrđivanje ciljnih krajeva putovanja naglasak se stavlja na aktivnosti koje privlače putovanja kao što su razne aktivnosti: industrija, trgovina, ugostiteljski objekti, banke, obrazovne ustanove, poslovanje, rekreativne zone itd. U ovom slučaju kategorizacija se može vršiti prema delatnostima, broju zaposlenih, veličini radnog ili prodajnog prostora, lokaciji aktivnosti (centralna zona, periferija) i sl. Ako se ustanove stope privlačenja putovanja za razne vrste aktivnosti, po svrhama putovanja, u odnosu na, naprimer, broj zaposlenih i lokaciju aktivnosti, tada se na osnovu predviđanja korišćenja zemljišta može utvrditi i broj privučenih putovanja u posmatranu zonu, odnosno:

$$A_{jk} = \sum_{s=1}^m a_{sk} B_{js}$$

gde su :

A_{jk} - ukupan broj putovanja sa određenom svrhom "k" privučen u zonu "j", ✓

a_{sk} - stopa privlačenja (atrakcije) putovanja sa svrhom "k" po jedinici aktivnosti "s", ✓

B_{js} - intenzitet aktivnosti (sadržaja) "s" u zoni "j". ✓

Kategorijska analiza takođe omogućuje da se utvrde stope generisanja za različite vidove prevoza (automobil, javni prevoz) i različite svrhe putovanja (posao, školovanje, kupovina, servisi, itd.).

Postupak koji se najčešće koristi, bilo na nivou zone ili vezano za domaćinstvo, zasniva se na modelu linearne regresione analize. U ovom pristupu se pretpostavlja linearna veza zavisno promenljive y i jedne ili više nezavisno promenljivih (x_1, x_2, \dots, x_n) koja se može napisati u obliku:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

gde $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ predstavljaju parametre modela (regresioni koeficijenti). ✓

Ovi parametri se dobijaju metodom najmanjih kvadrata, odnosno svođenjem sume kvadrata razlike vrednosti zavisno promenljive (y) dobijene modelom i stvarne vrednosti utvrđene snimanjem na najmanju vrednost:

$$\sum_{i=1}^n e_i \rightarrow \min$$

$$e_i = (y_{im} - y_{ia})^2$$

gde su:

y_{ia} - vrednost zavisno promenljive dobijene snimanjem saobraćaja (stvarne vrednosti izvornih ili ciljnih krajeva putovanja) ✓

y_{im} - vrednosti zavisno promenljive (krajeva putovanja) dobijene modelom (posle kalibracije modela). ✓

Dobijene zavisnosti promenljivih definisanih na skupu podataka koji opisuju postojeće stanje, koriste se da se dobiju vrednosti zavisno promenljive Y odnosno:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n,$$

gde su:

- y – vrednost zavisno promenljive utvrđene snimanjem saobraćaja (krajevi putovanja), ✓
- $x_1 - x_n$ – vrednost nezavisno promenljivih u postojećem stanju, ✓
- $b_0 - b_n$ – parametri modela koji se kalibrišu, ✓
- Y – prognozirane vrednosti zavisno promenljive (krajevi putovanja), ✓
- $X_1 - X_n$ – planirane vrednosti nezavisno promenljivih. ✓

To znači da na osnovu planiranih vrednosti odgovarajućih nezavisno promenljivih (X_1, X_2, \dots, X_n) mogu da se izračunaju vrednosti budućeg obima putovanja (Y). Pri tome treba imati u vidu nekoliko osnovnih pretpostavki i ograničenja koje ima ova metoda, odnosno:

- da uvek postoji linearna zavisnost između zavisne promenljive i nezavisnih promenljivih. Ukoliko linearnost ne postoji tada se vrednosti promenljivih mogu modifikovati logaritmovanjem, korenovanjem ili korišćenjem recipročnih vrednosti; ✓
- regresiona analiza je u osnovi empirijske prirode i nije u mogućnosti da uspostavi uzročne veze između promenljivih; ✓
- primena regresionih jednačina u prognozi pretpostavlja da su dobijene vrednosti regresionih koeficijenata relevantne i za budućnost, odnosno da se uspostavljene zakonitosti neće bitno izmeniti u prognoznom periodu. ✓

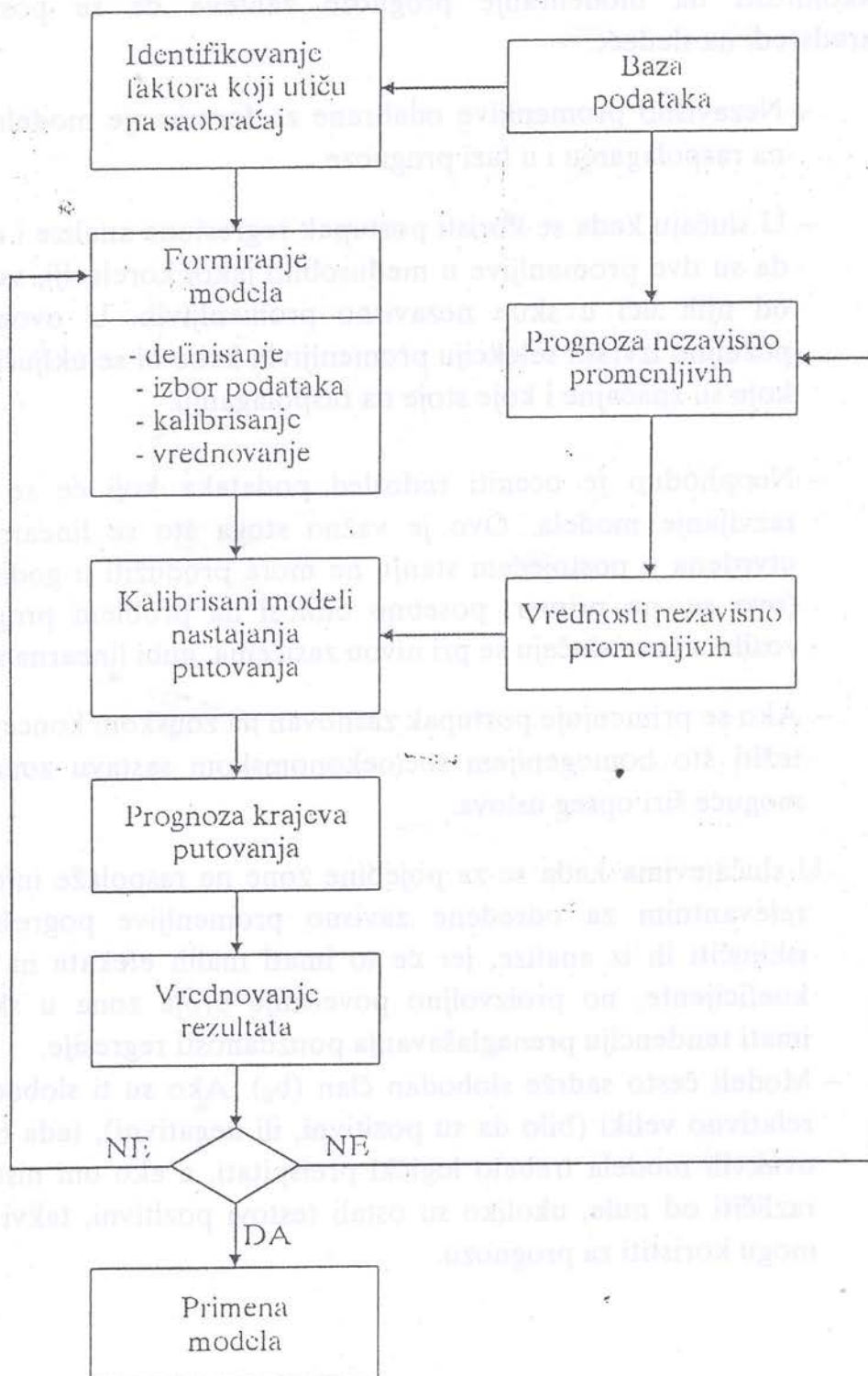
Provera valjanosti modela može se izvršiti na nekoliko načina koji se uglavnom svrstavaju u sledeće tri grupe:

- statistički testovi (koeficijent korelacije, standardna greška, "t" vrednost itd.), ✓
- testovi kojima se utvrđuje da li su osnovne pretpostavke modela narušene, ✓
- intenzivne provere logičnosti i opravdanosti uspostavljenih zakonitosti sa posebni osvrtom na mogućnosti primene u fazi prognoze (raspoloživost nezavisnih podataka za period prognoze). ✓

Posebno je važno ispitati logičku vezu između promenljivih jer, statistički ispravno postavljeni modeli ne moraju da budu uvek jednako vredni u prognožiranju budućeg obima putovanja. Primena uspostavljenih

zakonitosti na modeliranje prognoze zahteva da se posebna pažnja usredsredi na sledeće:

- Nezavisno promenljive odabrane za formiranje modela moraju biti na raspolaganju i u fazi prognoze.
- U slučaju kada se koristi postupak regresione analize i ako se utvrdi da su dve promenljive u međusobno jakoj korelaciji, samo će jedna od njih ući u skup nezavisno promenljivih. U ovom slučaju je poželjno izvršiti selekciju promenljivih kako bi se uključile samo one koje su značajne i koje stoje na raspolaganju.
- Neophodno je oceniti redosled podataka koji će se koristiti za razvijanje modela. Ovo je važno stoga što se linearna zavisnost utvrđena u postojećem stanju ne mora produžiti u godini prognoze (ovo se, na primer, posebno odnosi na problem prognoze broja vozila u kom slučaju se pri nivou zasićenja, gubi linearna zavisnost).
- Ako se primenjuje postupak zasnovan na zonskom konceptu mora se težiti što homogenijem socioekonomskom sastavu zona uz što je moguće širi opseg uslova.
- U slučajevima kada se za pojedine zone ne raspoložuje informacijama relevantnim za određene zavisno promenljive pogrešno bi bilo isključiti ih iz analize, jer će to imati malih efekata na regresione koeficijente, no proizvoljno povećanje broja zona u skupu može imati tendenciju prenaplašavanja pouzdanosti regresije.
- Modeli često sadrže slobodan član (b_0). Ako su ti slobodni članovi relativno veliki (bilo da su pozitivni, ili negativni), tada bi rezultate ovakvih modela trebalo logički preispitati, a ako oni nisu značajno različiti od nule, ukoliko su ostali testovi pozitivni, takvi modeli se mogu koristiti za prognozu.



Slika 20. Dijagram toka formiranja regresionog modela nastajanja putovanja

Za statističko vrednovanje regresionog modela stoje na raspolaganju različiti testovi pri čemu se ukupna ocena valjanosti modela zasniva na rezultatima pojedinačnih testova uzetih zajedno.

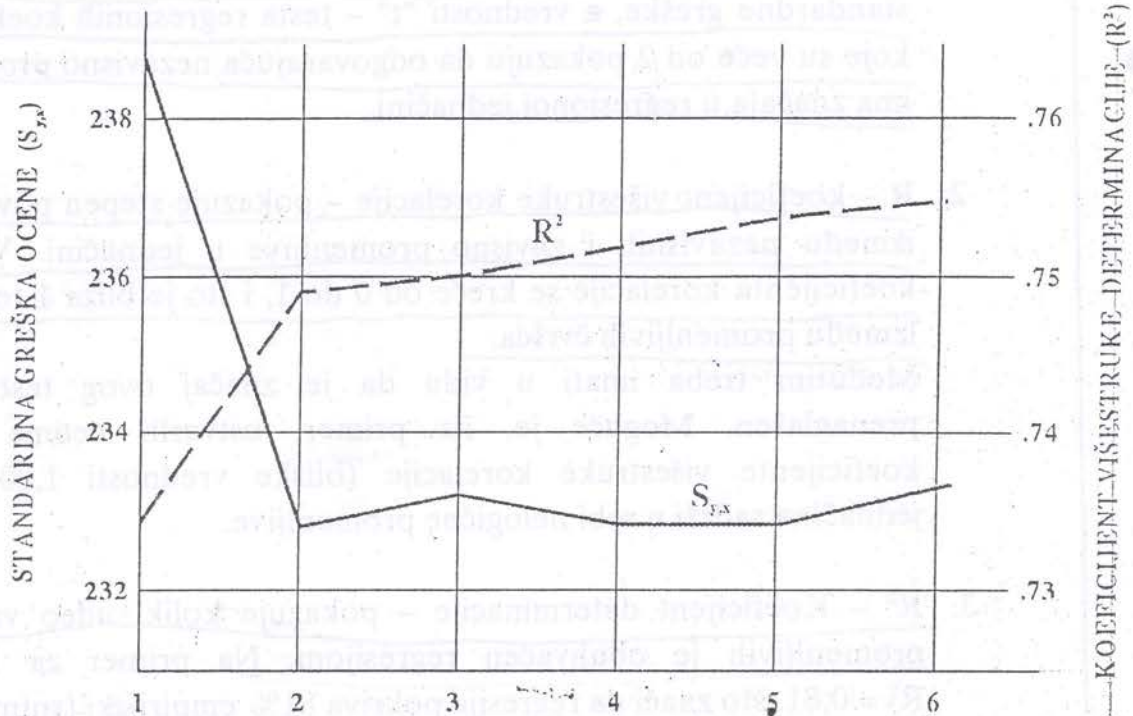
1. "t" – test regresionih koeficijenata – služi za ocenu statističke valjanosti pojedinih zavisno promenljivih (zajedno sa standardnom greškom). On predstavlja odnos regresionog koeficijenta i njegove standardne greške, a vrednosti "t" – testa regresionih koeficijenata koje su veće od 2 pokazuju da odgovarajuća nezavisno promenljiva ima značaja u regresionoj jednačini.
2. R – koeficijent višestruke korelacije – pokazuje stepen povezanosti između nezavisnih i zavisno promenljive u jednačini. Vrednost koeficijenta korelacije se kreće od 0 do 1, i što je bliža 1 to je veza između promenljivih čvršća.

Međutim treba imati u vidu da je značaj ovog testa često prenaplašen. Moguće je, na primer, ostvariti veoma visoke koeficijente višestruke korelacije (bliske vrednosti 1,00) a da jednačina sadrži u sebi nelogične promenljive.
3. R^2 – Koeficijent determinacije – pokazuje koliki udeo varijacija promenljivih je obuhvaćen regresijom. Na primer za $R=0,90$, $R^2 = 0,81$, što znači da regresija pokriva 81% empirijski (snimanjem) utvrđenih vrednosti zavisno promenljive.
4. $S_{y,x}$ – standardna greška ocene – označava stepen odstupanja od podataka oko uspostavljene regresione linije. Matematički, to je mera greške koju treba očekivati u proceni zavisno promenljive iz nezavisno promenljivih u jednačini.

Najviše značenja daje standardna greška kao procenat srednje vrednosti zavisno promenljive dobijene osmatranjem.

5. Korelaciona matrica sadrži sve korelacione koeficijente za sve kombinacije promenljivih. Ispitivanje tabele matrice mora se obaviti pre no što se počne bilo kakvo detaljno razvijanje jednačina u cilju određivanja veze između različitih nezavisnih i zavisnih promenljivih. Takvo ispitivanje može pružiti analitičaru uvid u veze između podataka. Čvrsta veza između nezavisnih i zavisnih promenljivih može se lako oceniti za logičnu. Međutim, posebno je vredno ispitati slučajeve kada postoji jaka međukorelacija nezavisnih promenljivih. Takva jaka korelacija često može

rezultovati u narušavanju procene najmanjih kvadrata i čak umanjiti rezultate.



Slika 21. Promena standardne greške ocene i koeficijenta višestruke determinacije (R^2) u koracima

Tabela 21. Rezultati regresione analize u koracima - produkcija putovanja stan-posao ($\bar{y} = 600$)

| Korak broj | Konstanta b_0 | Broj automobila X_1 | Proseč. prihod domać. X_2 | Populacija X_3 | Zaposleni X_4 | Stanovi X_5 | Standardna greška S_{yx} | R^2 | Procenat standard. greške (%) |
|------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------------------|-------|-------------------------------|
| 1 | 34.06 | 1.84 (19.75) | | | | | 238.77 | 0.735 | 39.8 |
| 2 | 197.03 | 1.89 (20.41) | -0.03 (2.09) | | | | 232.79 | 0.749 | 38.8 |
| 3 | 165.43 | 1.68 (5.48) | -0.02 (2.07) | 0.07 (0.72) | | | 233.18 | 0.750 | 38.9 |
| 4 | 199.66 | 1.63 (5.29) | -0.03 (2.31) | 0.22 (1.38) | -0.33 (1.18) | | 232.85 | 0.753 | 38.8 |
| 5 | 179.51 | 1.58 (5.03) | -0.02 (2.11) | 0.22 (1.34) | -0.49 (1.53) | 0.33 (1.00) | 232.84 | 0.755 | 38.8 |

Jednačine:

1. korak: $y = 34.06 + 1.84 X_1$
2. korak: $y = 197.03 + 1.89 X_1 - 0.03 X_2$
3. korak: $y = 165.43 + 1.68 X_1 - 0.02 X_2 + 0.07 X_3$
4. korak: $y = 199.66 + 1.63 X_1 - 0.03 X_2 + 0.22 X_3 - 0.33 X_4$
5. korak: $y = 179.51 + 1.58 X_1 - 0.02 X_2 + 0.22 X_3 - 0.49 X_4 + 0.33 X_5$

U zagradama su vrednosti "t" testa

Tabela 22. Korelaciona matrica

| | Produkcija (y_1) | Atrakcija (y_2) | Populacija (X_1) | Stepen motor. (X_2) | Broj rad. mesta (X_3) | Ukup. rad. prost. (X_4) | Broj zaposlen. (X_5) |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Produkcija (y_1) | 1.00 | 0.15 | 0.95 | 0.52 | 0.05 | -0.04 | 0.96 |
| Atrakcija (y_2) | 0.15 | 1.00 | 0.10 | 0.59 | 0.95 | 0.88 | 0.14 |
| Populacija (X_1) | 0.95 | 0.10 | 1.00 | 0.44 | -0.01 | -0.10 | 0.98 |
| Stepen motor. (X_2) | 0.52 | 0.59 | 0.44 | 1.00 | 0.52 | 0.43 | 0.50 |
| Broj rad. mesta (X_3) | 0.05 | 0.95 | -0.01 | 0.52 | 1.00 | 0.87 | 0.04 |
| Ukup. rad. prost. (X_4) | -0.04 | 0.88 | -0.10 | 0.43 | 0.87 | 1.00 | -0.06 |
| Broj zaposlen. (X_5) | 0.96 | 0.14 | 0.98 | 0.50 | 0.04 | 0.06 | 1.00 |

Izvor: *Studija saobraćaja Pančeva [10]*

Veza između ovih promenljivih utvrđena je metodom najmanjih kvadrata na primeru regresione analize u koracima. Model je pretpostavljen u obliku:

$$y_i = b_0 + b_{1i}x_1 + b_{2i}x_2 + b_{3i}x_3 + b_{4i}x_4 + b_{5i}x_5 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

gde su:

y_i – produkcija ili atrakcija zone

x_1 – populacija zone

x_2 – stepen motorizacije

x_3 – ukupan broj radnih mesta

x_4 – ukupna veličina radnog prostora (m^2)

x_5 – ukupan broj zaposlenih

b_0, b_{ji} – parametri modela ($j=1, 2, \dots, 5$).

Kada je za zavisno promenljivu uzeta produkcija zone redosled nezavisno promenljivih bio je X_5, X_1, X_3, X_4 , a kada je nezavisno promenljivu predstavljala atrakcija zone, redosled nezavisno promenljivih bio je X_3, X_4, X_1, X_2, X_5 .

Dobijene su sledeće regresione jednačine:

$$y_1 = 50.86 + 0.14 X_1 + 1.28 X_2 \quad (\text{za produkciju zone})$$

$$y_2 = 95.58 + 1.05 X_3 + 0.01 X_4 \quad (\text{za atrakciju zone}).$$

Iako je broj zaposlenih po zonama pokazivao visoku statističku vrednost u modelu za prognoziranje zonskih produkcija, morao je biti isključen iz razmatranja jer se taj podatak nije mogao oceniti u projekcijama (bar ne na nivou saobraćajnih zona). Zato je na mesto njega došao stepen motorizacije koji je po svojim statističkim obeležjima ocenjen kao treći po važnosti u ovom modelu.

Izneti pristup koji je korišćen u analizi nastajanja putovanja za potrebe studije saobraćaja Pančeva, pokazuje visok stepen obrade i statističke i logičke provere pouzdanosti dobijenih modela. Ovakav pristup bio je omogućen zahvaljujući visokom stepenu koordinacije izrade generalnog urbanističkog plana i studije saobraćaja i veoma kvalitetnoj informacionoj osnovi.

Primenjeni postupak omogućio je, da se već u fazi analize nastajanja putovanja vrše provere buduće organizacije prostora.

Za analizu nastajanja putovanja, odnosno kalibraciju modela, u Studiji saobraćaja Novog Sada [11], korišćen je takođe metod višestruke regresione analize u koracima. Usvojena je pretpostavka da između zavisno promenlive Y i nezavisno promenljivih X ($i = 1, 2, \dots, n$) postoji linearna veza oblika:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

gde su:

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ parametri koji se kalibrišu.

Analize su rađene posebno za utvrđivanje zavisnosti produkcije (P) i atrakcija (A) za putovanja vezana jednim od krajeva za stan i posebno za utvrđivanje zavisnosti izvornih (I) i ciljnih (C) krajeva putovanja.

Kao nezavisne promenljive (X) na nivou saobraćajne zone uzeti su sledeći pokazatelji:

S - broj stanovnika

Z_S - broj zaposlenih (po zoni grada)

Z_R - broj zaposlenih (po zoni rada)

Z_I - broj zaposlenih u industriji (po zoni rada)

Z_U - broj zaposlenih u uslužnim delatnostima (po zoni rada)

A - broj putničkih automobila (u zoni stanovanja)

D - prosečni prihod domaćinstva

T - veličina prodajnog prostora u trgovini na malo (m^2)

U - broj učenika i studenata (u zoni školovanja)

kao zavisno promenljive takođe na nivou saobraćajne zone, uzete su sledeće:

- P_1 - produkcija putovanja stan – posao
 A_1 - atrakcija putovanja stan – posao
 P_2 - produkcija putovanja stan – kupovina
 A_2 - atrakcija putovanja stan – kupovina
 P_3 - produkcija putovanja stan – škola
 A_3 - atrakcija putovanja stan – škola
 P_4 - produkcija putovanja stan – ostalo
 A_4 - atrakcija putovanja stan – ostalo
 P_5 - produkcija putovanja stan – posao putničkim automobilom
 A_5 - atrakcija putovanja stan – posao putničkim automobilom
 $I(C)$ - izvorni odnosno ciljni broj putovanja za putovanja koja ni u jednom od krajem nisu vezana za stan (non home based trips)

Nadalje slede dobijene jednačine, u kojima vrednosti u zagradi predstavljaju t – test, a R koeficijent korelacije.

$$P_1 = 1,243 Z_S + 1,119 A - 138,1 \quad R = 0,95 \quad (1)$$

(8,2) (3,5)

$$A_1 = 121,9 + 1,256 Z_R \quad R = 0,92 \quad (2)$$

(20,6)

$$P_2 = 0,389 S + 0,942 A - 0,52 \quad R = 0,89 \quad (3)$$

(5,29) (2,59)

$$A_2 = 359,8 + 0,789 T \quad R = 0,789 \quad (4)$$

(11,15)

$$P_3 = 0,458 S + 166,4 \quad R = 0,942 \quad (5)$$

(23,8)

$$A_3 = 133,5 + 1,396 U \quad R = 0,942 \quad (6)$$

(23,86)

$$P_4 = 0,92 S + 4,66 A - 204,11 \quad R = 0,95 \quad (7)$$

(5,0) (5,14)

$$A_4 = 1,752 T + 0,788 Z_R + 2212,7 \quad R = 0,62 \quad (8)$$

(8,2) (3,5)

$$P_5 = 0,67 A + 0,287 Z_S - 91,2 \quad R = 0,93 \quad (9)$$

(5,0) (4,6)

$$A_5 = 0,394 Z_R + 58,1 \quad R = 0,89 \quad (10)$$

(17,8)

$$I(C) = 0,284 T + 0,144 Z_U + 11 \quad R = 0,76 \quad (11)$$

(9,27) (2,0)

Iako neke od gornjih jednačina nisu dale zadovoljavajuće rezultate (npr. jednačina 8), ovakvom analizom stvorene su mogućnosti za relativno pouzdanu prognozu broja putovanja u zavisnosti od planiranog interezneta korišćenja zemljišta.

Navedeni sistem jednačina pokazuje da su mogućnosti za ispitivanje međuzavisnosti, saobraćaja i ostalih gradskih funkcija (stanovanja, rada, uslužnih delatnosti itd.) veoma široke. Međutim, u izradi ovakvih analiza za naše gradove najčešće se kao problem pojavljuje pitanje informacione osnove, pre svega u domenu nezavisnih podataka (broj stanovnika, zaposlenost, dohodak itd.) na nivou saobraćajne zone. On je posebno izražen u fazi prognoze, jer je najčešći slučaj da se prognoze nezavisnih podataka rade na nivou grada, ili što je ređi slučaj, na nivou makrozona, usled čega je njihovo prevođenje na nivo saobraćajne zone povezano sa dosta teškoća. Slične zakonitosti uočene su i u gradovima SAD i zapadne Evrope. U Vašingtonu [12] je utvrđena zakonitost oblika:

$$Y = 4.33 + 3.89 X_1 - 0.128 X_2 - 0.005 X_3 - 0.012 X_4$$

gde su:

- Y – broj putovanja po domaćinstvu
- X_1 – broj automobila po domaćinstvu
- X_2 – udaljenost zone od glavnog gradskog centra
- X_3 – gustina nastanjenosti
- X_4 – indeks dohotka po domaćinstvu.

U Engleskoj [4] je za radna putovanja utvrđena jednačina:

$$Y = 112 + 0.59 X_1 - 0.74 X_2 - 0.88 X_3 - 39.6 X_4$$

u kojoj su:

- Y – broj putovanja na posao
- X_1 – broj stanova u zoni nastajanja putovanja
- X_2 – broj zaposlenih
- X_3 – stepen motorizacije
- X_4 – rastojanje zone od glavnog gradskog centra.

Za ukupan broj putovanja po domaćinstvu dobijena je regresija:

$$y = 0.91 + 1.44 X_1 - 1.07 X_2$$

gde su:

- X_1 – broj zaposlenih po domaćinstvu
- X_2 – broj automobila po domaćinstvu

5.3. MODELI PROSTORNE RASPODELE PUTOVANJA

Pod prostornom raspodelom putovanja podrazumeva se utvrđivanje intenziteta povezanosti izvora i ciljeva putovanja. Drugim rečima, s obzirom da su saobraćajne zone, odnosno njihov položaj, definisane u prostoru, prostorna raspodela putovanja može se predstaviti matricom A_{ij} , u kojoj elementi matrice a_{ij} predstavljaju intenzitet putovanja između zone "i" i zone "j".

U analizi postojećeg stanja prostorna raspodela putovanja se utvrđuje anketiranjem učesnika u saobraćaju (izvor - cilj, I - C ankete), koje se u zavisnosti od cilja istraživanja sprovode na različite načine (anketiranjem u domaćinstvima, na spoljnom kordonu, u radnim organizacijama i sl.).

Postojeća matrica putovanja pruža široke mogućnosti za analizu ne samo saobraćajnog sistema, odnosno prostornih karakteristika putovanja, već i analizu međusobne povezanosti gradskih sadržaja, odnosno aktivnosti na posmatranom području. Svakako najznačajnija mogućnost u tom smislu ogleda se u ispitivanju relacija stanovanje - radno mesto i odnosa stanovanja prema centralnim sadržajima, što u stvari i predstavlja ključni problem pri identifikovanju stanja urbosistema i projekciji njegovog razvoja.

Za prognozu prostorne raspodele putovanja koriste se različite metode. Neke od njih, koje će ovde biti pomenute, danas se skoro i ne koriste i navedene su uglavnom radi ilustracije istorijata ove oblasti.

Razvoj matematičkih procedura za prognozu prostorne raspodele putovanja, započet je pedesetih godina i do danas one se uglavnom mogu svrstati u dve osnovne kategorije (lit. Bruton).

- Metode koje se zasnivaju na analogiji, a najčešće se sreću kao metode faktora porasta i
- Sintetičke metode u okviru kojih se utvrđuju zakonitosti međuzonske razmene putovanja, predpostavljajući da one mogu biti slične izvesnim fizičkim zakonima, a zatim se te zakonitosti koriste za prognozu.

5.3.1. Metode faktora rasta

Metode faktora porasta za prostornu raspodelu su zasnovane na pretpostavci da međuzonska razmena putovanja može da se projektuje u budućnost putem očekivanih stopa rasta na posmatranom području.

Generalno se ova grupa može prikazati oblikom:

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot F$$

gde su:

T_{ij} - budući broj putovanja između zone "i" i zone "j" ✓

t_{ij} - postojeći broj putovanja između zone "i" i zone "j" ✓

F - faktor porasta. ✓

To znači da je za korišćenje ovog metoda, pored faktora porasta, neophodno raspolagati i postojećom matricom međuzonske raspodele putovanja.

U zavisnosti od metode faktor porasta može da bude jednostavan ili se dobija kombinacijom nekoliko faktora koji proizilaze iz buduće namene površina i prognoze putovanja. On takođe može da bude jedinstven za čitavo područje, ili pak posebno sračunat za svaku saobraćajnu zonu.

Hronološki posmatrano redosled metoda faktora porasta bio bi sledeći:

-Metod jedinstvenog faktora porasta ✓

-Metod prosečnog faktora porasta ✓

-Fratar metod i ✓

-Detroit metod. ✓

Metod jedinstvenog faktora porasta

Ovaj metod je najstariji i najjednostavniji. Sastoji se u izračunavanju faktora porasta za čitavo područje za koje se radi prognoza, kojim se potom množi postojeća matrica putovanja. Rezultat predstavlja prognoziranu matricu putovanja, odnosno:

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot F$$

gde su:

T_{ij} - budući broj putovanja između zone "i" i zone "j" (model generisanja) ✓

t_{ij} - postojeći broj putovanja između zone "i" i zone "j" (anketa) ✓

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ig}}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{jg}}{\sum_{j=1}^n t_j} \quad \text{- odnos ukupnog broja putovanja u ciljnoj godini i ukupnog broja putovanja u baznoj godini. ✓}$$

Prema tome, ovaj metod predpostavlja da očekivani porast socioekonomskih pokazatelja na posmatranom području ima podjednak uticaj na porast broja putovanja između svakog para zona unutar tog područja.

Metod prosečnog faktora porasta

Matematički oblik ovog modela glasi:

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot \frac{(F_i + F_j)}{2}$$

gde su:

$$F_i = \frac{T_{ig}}{t_i}, \quad F_j = \frac{T_{jg}}{t_j} \quad \checkmark$$

T_{ij} - budući broj putovanja između zona "i" i "j" ✓

t_{ij} - postojeći broj putovanja između zona "i" i "j" ✓

F_i i F_j - faktori porasta izvorne zone "i" i ciljne zone "j" ✓

T_{ig} i T_{jg} - ukupan prognozirani broj putovanja sa izvorom u zoni "i", odnosno ciljem u zoni "j" (dobijeni modelom generisanja putovanja) ✓

t_i i t_j - postojeći ukupan broj putovanja sa izvorom u zoni "i", odnosno ciljem u zoni "j". ✓

U opštem slučaju, s obzirom da se računa sa vrednostima prosečnih faktora, dobijene vrednosti za ukupan broj ciljnih, odnosno izvornih putovanja po zoni se neće poklapati sa zadatim vrednostima dobijenim modelom nastajanja putovanja, odnosno:

$$T_i \neq T_{ig} \quad \text{i} \quad T_j \neq T_{jg} \quad \checkmark$$

gde su:

$$T_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}, \quad T_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad - \text{ukupan izračunat broj izvornih putovanja zone}$$

“i” odnosno ciljnih putovanja zone “j” ✓

T_{ig} , T_{jg} – ukupan broj izvornih putovanja zone “i” odnosno ciljnih putovanja zone “j” dobijen modelom nastajanja (generisanja) putovanja. ✓

Da bi se uskladile zadate sa dobijenim vrednostima, primenjuje se iterativan postupak pri čemu se vrši korekcija faktora na sledeći način:

$$F_{i(k+1)} = \frac{T_{ig}}{T_{ik}} \quad \checkmark \quad i$$

$$F_{j(k+1)} = \frac{T_{jg}}{T_{jk}}, \text{ odnosno } \checkmark$$

$$T_{ij(k+1)} = T_{ijk} \cdot \frac{F_{i(k+1)} + F_{j(k+1)}}{2} \quad \checkmark$$

gde je k - oznaka iteracije ✓

Postupak se ponavlja sve dok se ne postigne ✓

$T_{in} = T_{ig}$ i $T_{jn} \rightarrow T_{jg}$ gde je “n” oznaka poslednje iteracije ✓

Fratar metod

Težeći da prevaziđe nedostatke metoda jedinstvenog i prosečnog faktora porasta, Fratar je radeći na prognozi putovanja za metropolitensko područje Klivlenda, razvio metod sa osnovnom pretpostavkom da je:

- raspodela budućih putovanja iz date izvorne zone u proporciji sa postojećom raspodelom putovanja iz te zone, i da je
- raspodela tih (budućih) putovanja zavisna od faktora rasta ciljne zone.

U osnovi ovaj metod se sastoji u sledećem:

- Izračunava se ukupan broj budućih krajeva putovanja (izvornih i ciljnih) za svaku datu zonu putem modela nastajanja putovanja (T_{ig} , T_{jg}).
- U proporciji sa postojećom međuzonskom raspodelom putovanja i faktorima rasta ciljnih zona, vrši se raspodela prognoziranih putovanja iz svake izvorne ka svim ciljnim zonama. U ovom koraku dobijaju se dve vrednosti za međuzonsku razmenu putovanja: od zone “i” ka zoni “j” i od

zone "j" ka zoni "i", a njihova prosečna vrednost se uzima kao vrednost međuzonske razmene u prvoj aproksimaciji.

- Zbir vrednosti za svaku zonu, dobijen u prvoj aproksimaciji, se deli sa vrednošću koja je dobijena modelom nastajanja putovanja, čime se dobijaju novi faktori porasta za sledeću aproksimaciju.
- Izračunata međuzonska razmena u prvoj aproksimaciji se ponovo raspodeljuje, srazmerno postojećoj razmeni i novim faktorima porasta, a dobijene vrednosti se ponovo uprosečavaju. Postupak se ponavlja sve dok se ne dobiju zadovoljavajuće vrednosti.

Matematički izraz Fratar modela ima oblik:

$$T_{ij} = T_{ig} \cdot \frac{t_{ij} \cdot F_j}{\sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot F_j}$$

gde su:

T_{ij} – prognozirani broj putovanja iz zone "i" u zonu "j"

T_{ig} – očekivani broj izvornih putovanja iz zone "i" (prema modelu nastajanja putovanja)

t_{ij} – postojeći broj putovanja između zone "i" i zone "j"

F_j – faktori porasta

n – broj zona.

Detroit metod

Ovaj metod je razvijen prilikom izrade studije saobraćaja za metropolitensko područje Detroita. Njime su postignuta poboljšanja u odnosu na metod jedinstvenog i prosečnog faktora porasta, kao i u odnosu na Fratar metod koji zahteva veliki broj iteracija.

U pristupu Detroit metod je sličan metodu prosečnog faktora porasta i Fratar metodu. Međutim, kod njega je uvedena pretpostavka da, iako će broj putovanja generisanih u zoni "i" rasti kao što se predviđa faktorom porasta F , ta putovanja će biti raspodeljena prema ciljnim zonama "j" proporcionalno odnosu faktora F_j i ukupnog faktora F za čitavo područje. Matematički izraz za ovo glasi:

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot \frac{F_i \cdot F_j}{F}$$

gde su:

T_{ij} – prognozirani broj putovanja iz zone "i" u zonu "j" ✓

t_{ij} – postojeći broj putovanja iz zone "i" u zonu "j" ✓

F_i i F_j – faktori porasta zona "i" i "j" ✓

F – faktor porasta za posmatrano područje u celini. ✓

I u ovom slučaju potreban je određeni broj ponavljanja, s obzirom da u opštem slučaju ukupan broj putovanja po zoni, dobijen modelom raspodele, ne odgovara broju putovanja dobijenim modelom nastajanja putovanja. Faktori porasta za novu iteraciju računaju se po obrascu:

$$F_{i(k+1)} = \frac{T_{ig}}{T_{ik}}; \quad F_{j(k+1)} = \frac{T_{jg}}{T_{jk}}$$

gde je:

T_{ig} i T_{jg} – ukupan broj izvornih, odnosno ciljnih putovanja dobijen modelom nastajanja putovanja ✓

T_{ik} i T_{jk} – ukupan broj izvornih, odnosno ciljnih putovanja dobijen raspodelom u k-toj iteraciji ✓

k – oznaka iteracije ✓

Osnovne prednosti metoda faktora porasta sastoje se u sledećem:

- razumljivi su i jednostavni za primenu; ✓
- relativno jednostavnim procesom iteracije dobija se zadovoljavajuće usaglašavanje zadatih vrednosti ($T_{ig}-T_{jg}$) i raspodeljenih krajeva putovanja (T_i-T_j); ✓
- fleksibilni su i mogu se koristiti za prostornu raspodelu putovanja po pojedinim svrhama putovanja, za različita sredstva prevoza i različite periode dana; ✓
- dosadašnja iskustva pokazuju da daju dobre rezultate za područja sa stabilnim rastom. Njihova primena, takođe je pogodna u kratkoročnim prognozama. ✓

Ukratko, nedostaci su im sledeći:

- kao ulazne podatke zahtevaju postojeću matricu razmene putovanja, koja se dobija I-C anketama koje su relativno skupe; ✓

5.3.2. Sintetičke metode

U cilju otklanjanja nedostataka modela faktora porasta započet je razvoj modela koji sintetizuju karakteristike putovanja i dovode ih u vezu sa gradskim aktivnostima, namenom površina i transportnim sistemom. Ova grupa modela predstavlja tzv. interaktivne modele (modele međudejstava) raspodele putovanja. Kod ovih modela razmena putovanja između zona je funkcija emisije i privlačne snage zona i njihovog položaja u prostoru. Ovi modeli moraju da se kalibrišu odnosno prilagođavaju tako da teoretski postavljeni odnosi odgovaraju postojećim karakteristikama putovanja na području koje se posmatra. Kalibracija modela predstavlja jedan sveuhvatni test sposobnosti modela da reprodukuje postojeće karakteristike putovanja. Ukoliko test zadovoljava, model se može koristiti za prognozu raspodele putovanja koja su izračunata putem modela nastajanja putovanja.

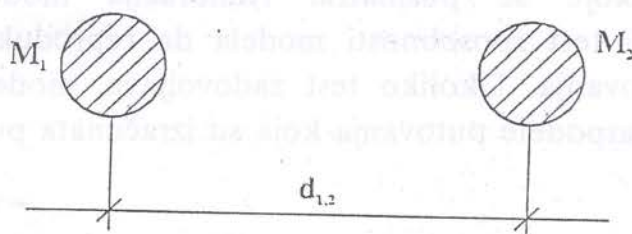
Osim u planiranju saobraćaja, modeli prostornih međudejstava imaju veliku primenu u urbanističkom i prostornom planiranju uopšte. Mnoge pojave unutar urbanog sistema ponašaju se slično zakonima poznatim iz fizike, pa ih je moguće simulirati, odnosno interpretirati matematičkim oblikom tih zakonitosti.

Generalno rečeno, modeli prostornih međudejstava mogu se izvesti za brojne i različite okolnosti. Primera radi njihova primena je dosta rasprostranjena u analizi mreže gradskih centara, naročito tercijarnih delatnosti, zatim stambenih lokacija i vrednovanju različitih tipova lokacija uopšte (specijalizovani centri, na primer). U planiranju saobraćaja primenjuju se sledeći oblici ovih modela:

- gravitacioni modeli
- modeli povoljnosti
- modeli "elektrostatičkog polja" i
- modeli višestruke regresione analize
- modeli linearnog programiranja

Gravitacioni modeli

Gravitacioni modeli su verovatno najčešće korišćeni matematički modeli u planiranju saobraćaja i korišćenju zemljišta. Ova grupa modela zasnovana je na hipotezi da se intenzitet interakcije između dva područja ponaša slično kao međudejstvo između dva tela u prostoru, odnosno po Njutnovom univerzalnom zakonu gravitacije koji glasi: "Dva tela u prostoru deluju jedno na drugo u proporciji sa proizvodom njihovih masa i obrnuto proporcionalno sa kvadratom njihovog rastojanja".



Matematički izraz ovog zakona glasi:

$$F_{1,2} = G \frac{M_1 M_2}{d_{1,2}^2} \quad \checkmark$$

gde su:

$F_{1,2}$ – sila kojom jedno telo deluje na drugo \checkmark

M_1 i M_2 – mase ili veličina posmatranih tela \checkmark

$d_{1,2}$ – rastojanje između posmatranih tela \checkmark

G – gravitaciona konstanta koja se utvrđuje empirijski prema stvarnim -
- konkretnim uslovima. \checkmark

U prvobitnom obliku gravitacioni model u prostornom planiranju se koristio za tumačenje intenziteta međudejstva između dva grada (naselja) u verziji koja matematički glasi:

$$I_{ij} = G \frac{P_i P_j}{d_{ij}^b}$$

gde su:

I_{ij} – intenzitet interakcije (međudejstva) između naselja "i" i naselja "j"

P_i – broj stanovnika naselja "i"

P_j – broj stanovnika naselja "j"

d_{ij} – rastojanje između naselja “i” i naselja “j”
 b – empirijski eksponent
 G – empirijska konstanta.

U ovom slučaju broj stanovnika P_i i P_j su veličine koje su ekvivalentne masama M_1 i M_2 izvornog Njutnovog zakona.

U kasnijoj primeni kada se prešlo na upotrebu ovog modela za definisanje broja putovanja između izvornih i ciljnih zona kao ekvivalent masa uzete su emisija putovanja izvorne zone odnosno privlačnost ciljne zone tako da je izraz postao:

$$T_{ij} = G \frac{P_i A_j}{d_{ij}^b}$$

odnosno:

T_{ij} – broj putovanja između izvorne zone “i” i ciljne zone “j”

P_i – broj putovanja koja potiču (“izviru”) iz zone “i” – “produkcija” zone “i”

A_j – broj putovanja koja imaju cilj u zoni “j” – “atrakcija” zone “j”

d_{ij} – rastojanje između zona “i” i “j”

G, b – parametri modela.

Gornji izraz se može napisati u obliku:

$$T_{ij} = G P_i A_j d_{ij}^{-b}$$

S obzirom da konstanta G ima različite vrednosti za svaki par izvornih i ciljnih zona može se napisati kao:

$$G_{ij} = C_i \cdot K_{ij}$$

a veličina d_{ij}^{-b} se može zameniti sa:

$$d_{ij}^{-b} = F_{ij} = f(t_{ij}) \text{ gde je } t_{ij} \text{ – vreme putovanja između zone “i” i “j”}$$

Zamenom se dobija:

$$T_{ij} = C_i P_i A_j F_{ij} K_{ij} \quad (1)$$

gde su:

T_{ij} – broj putovanja između zone “i” i zone “j”

C_i – konstanta izvorne zone “i”

P_i – produkcija zone “i”

A_j – atrakcija zone “j”

F_{ij} – faktor vremena putovanja između zona “i” i “j” – $F_{ij}=f(t_{ij})$ ✓

t_{ij} – vreme putovanja između zona “i” i “j”

K_{ij} – faktori korekcije razmene putovanja.

Vrednost konstante C za svaku izvornu zonu “i”, C_i , može se izračunati ako se uspostavi relacija da je ukupan broj putovanja T_{ij} za posmatranu zonu jednak produkciji zone P_i odnosno:

$$P_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} = \sum_{j=1}^n (C_i P_i A_j F_{ij} K_{ij}) =$$

$$= C_i P_i \sum_{j=1}^n (A_j F_{ij} K_{ij}), \text{ za } i=1, 2, \dots, n$$

odakle:

$$C_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n (A_j F_{ij} K_{ij})}, \text{ za } i=1, 2, \dots, n; \text{ n - broj zona} \checkmark$$

zamenom u (1) dobija se:

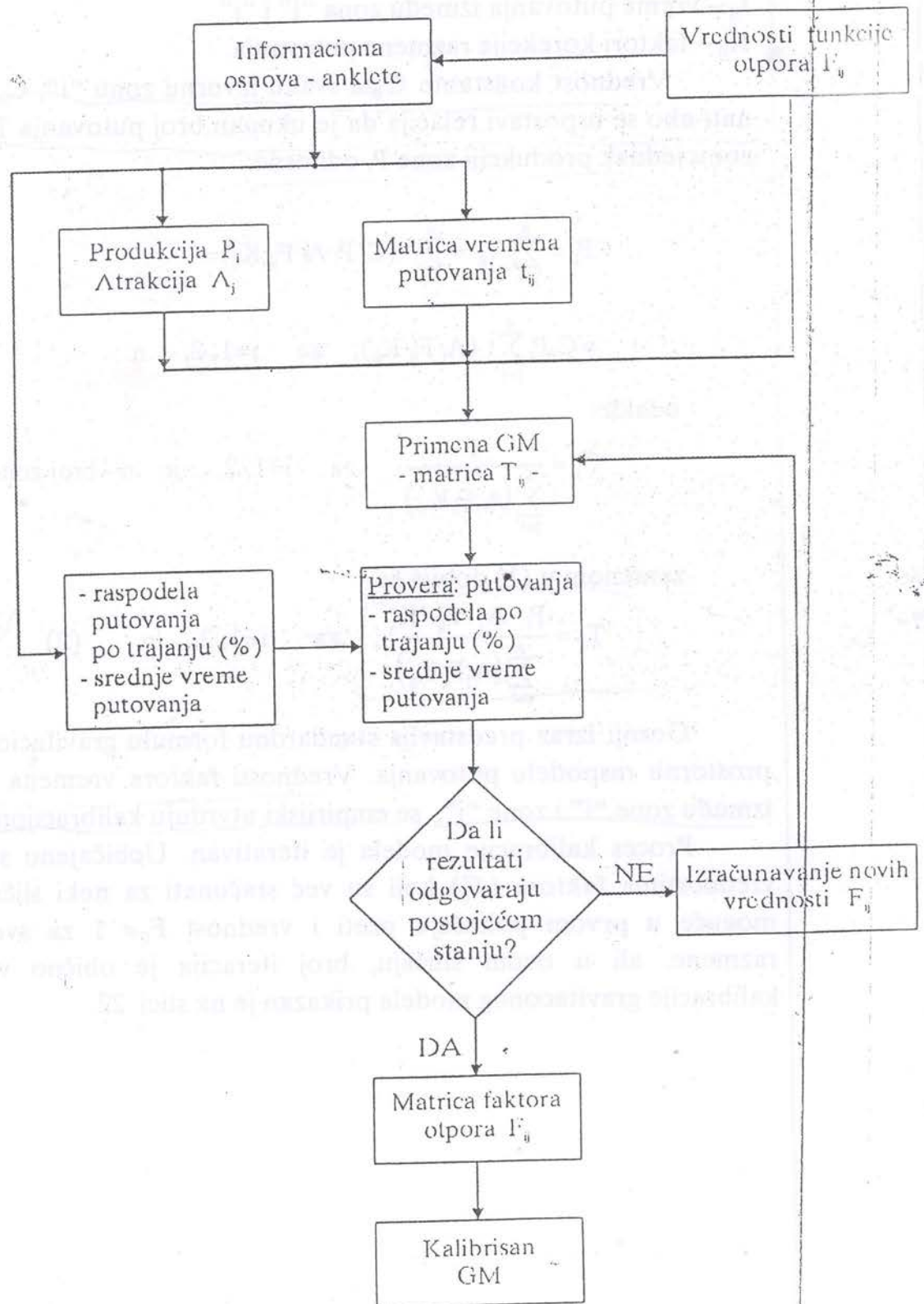
$$T_{ij} = \frac{P_i \cdot A_j \cdot F_{ij} \cdot K_{ij}}{\sum_{j=1}^n (A_j F_{ij} K_{ij})}, \text{ za } i=1, 2, \dots, n \quad (2) \checkmark$$

Gornji izraz predstavlja standardnu formulu gravitacionog modela za prostornu raspodelu putovanja. Vrednosti faktora vremena putovanja (F_{ij}) između zone “i” i zone “j”, se empirijski utvrđuju kalibracijom modela.

Proces kalibracije modela je iterativan. Uobičajeno se započinje sa vrednostima faktora (F_{ij}) koji su već sračunati za neki sličan grad, ali je moguće u prvom pokušaju uzeti i vrednost $F_{ij}=1$ za sve međuzonske razmene, ali u ovom slučaju, broj iteracija je obično veći. Postupak kalibracije gravitacionog modela prikazan je na slici 22.



Slika 22 Dijagram toka kalibracije gravitacionog modela



Slika 22. Dijagram toka kalibracije gravitacionog modela

Ulazni podaci za kalibraciju gravitacionog modela na osnovu rezultata ankete u domaćinstvu i to:

- produkcija zona P_i
- atrakcija zona A_j
- raspodela putovanja po trajanju u (%)
- srednje trajanje putovanja
- usvojene polazne vrednosti funkcija otpora F_{ij}
- usvojene početne vrednosti $K_{ij}=1$

Primenom formule gravitacionog modela izračunava se matrica putovanja, T_{ij} , a zatim se za tako dobijenu matricu izračunava raspodela putovanja po trajanju u (%) i srednje vreme putovanja kao veličine dobijene modelom. Upoređenjem ovih vrednosti dobijenih modelom i onih stvarnih (iz ankete) uočavaju se razlike: grafičke i numeričke (vidi sl. 23).

Za svaki novi pokušaj (iteraciju) nove vrednosti faktora otpora $F_{ij(k+1)}$ računaju se po formuli:

$$F_{ij(k+1)} = F_{ijk} \cdot \frac{a t_{ij}}{m T_{ijk}}$$

gde su:

$F_{ij(k+1)}$ - vrednosti faktora otpora za narednu iteraciju

F_{ij} - vrednosti faktora otpora upotrebljene u k -toj iteraciji

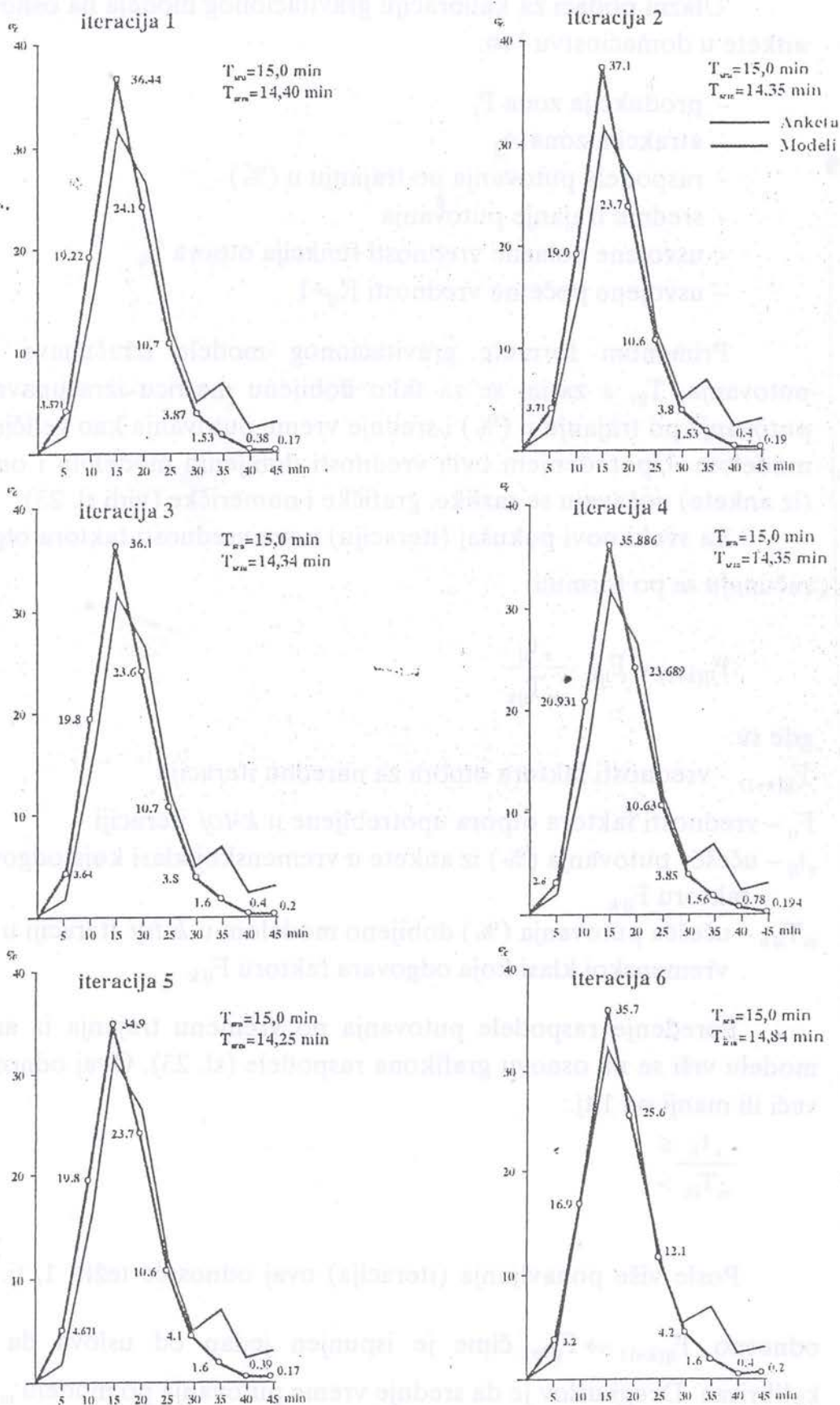
$a t_{ij}$ - učešće putovanja (%) iz ankete u vremenskoj klasi koja odgovara faktoru F_{ijk}

$m T_{ijk}$ - učešće putovanja (%) dobijeno modelom u k -toj iteraciji u vremenskoj klasi koja odgovara faktoru F_{ijk} .

Poređenje raspodele putovanja po vremenu trajanja iz ankete i po modelu vrši se na osnovu grafikona raspodele (sl. 23). Ovaj odnos može biti veći ili manji od 1 tj.:

$$\frac{a t_{ij}}{m T_{ijk}} \leq 1$$

Posle više ponavljanja (iteracija) ovaj odnos će težiti 1, tj. $\frac{a t_{ij}}{m T_{ijk}} \rightarrow 1$, odnosno $F_{ij(k+1)} \rightarrow F_{ijk}$, čime je ispunjen jedan od uslova da je model kalibrisan. Drugi uslov je da srednje vreme putovanja po modelu $m t_{sr}$ odstupa od srednjeg vremena putovanja po anketi $a t_{sr}$ za najviše $\pm 5\%$, odnosno:



Slika 23. Rezultati kalibracije gravitacionog modela
 (Izvor: saobraćajna studija Novog Sada)

$$\frac{a t_{sr} - m t_{sr}}{a t_{sr}} \cdot 100 = \pm 5\%$$

Tabela 23. Kalibracija GM - srednje vreme putovanja stan - posao [10]

| Iteracija | Anketa | Model | Odstupanje |
|-----------|---------------------|---------------------|--|
| | $a t_{sr}$ (min) | $m t_{sr}$ (min) | $\frac{a t_{sr} - m t_{sr}}{a t_{sr}} \cdot 100$ (%) |
| 0 | 21.72 | - | - |
| 1 | 21.72 | 15.64 | 27.9 |
| 2 | 21.72 | 18.84 | 13.2 |
| 3 | 21.72 | 19.76 | 9.0 |
| 4 | 21.72 | 20.08 | 7.53 |
| 5 | 21.72 | 20.71 | 4.62 |
| 6 | 21.72 | 21.44 | 1.26 |
| 7 | 21.72 | 21.05 | 3.08 |

U studiji saobraćaja Pančeva najbolji rezultat u pogledu razlike srednjeg trajanja putovanja po anketi i po modelu dobijen je u 6. iteraciji: svaki pokušaj pre toga i posle toga dao je lošije rezultate. U tabeli 23 prikazani su rezultati kalibracije gravitacionog modela u studiji saobraćaja Pančeva.

Primenom faktora korekcije K_{ij} (vidi formulu (2)) mogu se postići poboljšanja u kalibraciji gravitacionog modela. Ovi faktori se sračunavaju po formuli:

$$K_{ij} = R_{ij} \frac{1 - r_i}{1 - r_i R_{ij}}$$

gde su:

K_{ij} – faktor korekcije broja putovanja između zone “i” i zone “j”

$$r_i = \frac{a t_{ij}}{a P_i}$$

$$R_{ij} = \frac{a t_{ij}}{m T_{ij}}$$

$a t_{ij}$ – broj putovanja između zona “i” i “j” dobijen anketom

$m T_{ij}$ – broj putovanja između zona “i” i “j” po modelu u poslednjoj –

- usvojenoj iteraciji

${}_a P_i$ – ukupan broj izvornih putovanja zone “i” po anketi:

$${}_a P_i = \sum_{j=1}^n {}_a t_{ij}$$

n – broj saobraćajnih zona.

Vrednosti faktora korekcije K_{ij} se izračunavaju posle poslednje – usvojene iteracije tj. kada se utvrde vrednosti funkcije otpora F_{ij} . Upotreba faktora korekcije K_{ij} nije uvek neophodna i najčešće se za gradove veličine do 100.000 stanovnika ne uvodi u formulu modela. Inače gravitacioni model se kalibriše posebno za svaku svrhu putovanja.

Daljim istraživanjima tokom primene standardne formule gravitacionog modela (formula (2)), utvrđeno je da u razvijenim sistemima gde postoji oštra konkurencija između individualnog i javnog prevoza, osim vremena putovanja i troškovi putovanja značajno utiču na prostornu raspodelu putovanja. Razvijen je model tzv. generalizovanih troškova u obliku:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j C_{ij}^{-\lambda}$$

T_{ij} – broj putovanja između zone “i” i zone “j”

C_{ij} – generalizovani troškovi putovanja iz zone “i” u zonu “j” po vidovima prevoza $C_{ij} = A_1 t_{ij} + A_2 E_{ij} + A_3 D_{ij} + P_j + \delta$

t_{ij} – vreme putovanja iz zone “i” u zonu “j” po vidovima prevoza

E_{ij} – vreme “pristupa” sistemu, vreme čekanja

D_{ij} – rastojanje između zone “i” i “j”

A_1, A_2, A_3 – konstante koje reprezentuju vrednost vremena putovanja (t_{ij}), vremena pristupa (E_{ij}) i rastojanja (D_{ij}), respektivno

P_j – terminalni troškovi na ciljnom kraju tj. u ciljnoj zoni (npr. troškovi parkiranja)

δ – parametar koji se kalibriše.

Da bi se generalizovani troškovi sveli na jedinicu vremena putovanja izveden je obrazac:

$$C_{ij} = t_{ij} + \frac{A_2 E_{ij}}{A_1} + \frac{A_3 D_{ij}}{A_1} + \frac{P_j}{A_1} + \frac{\delta}{A_1}$$

koji predstavlja tzv. generalizovane troškove putovanja.

Dalje, u izrazu: $T_{ij} = A_i O_i B_j D_j C_{ij}^{-\lambda}$

$$A_i \text{ je: } A_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n B_j D_j C_{ij}^{-\lambda}}, \text{ jer je } O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij},$$

broj putovanja koji ima izvor u zoni "i" jednak je broju putovanja koji je utvrđen modelom generisanja putovanja, odnosno O_i – broj izvornih putovanja zone "i".

$$\text{Isto tako: } B_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n A_i O_i C_{ij}^{-\lambda}},$$

B_j – ravnotežni faktor koji (kao i A_i) obezbeđuje da broj putovanja koji ulazi u zonu "j" bude jednak broju ciljnih putovanja zone "j" utvrđen modelom generisanja saobraćaja.

D_j – broj putovanja koje privlači ciljna zona "j"

λ – parametar koji se kalibriše.

Ovaj oblik modela naziva se "dvostrano ograničen gravitacioni model" jer su njegovi izlazni rezultati i na izvornom i na ciljnom kraju ograničeni modelom nastajanja putovanja, tj:

$$\sum_{j=1}^n T_{ij} = O_i \quad ; \quad \sum_{i=1}^n T_{ij} = D_j$$

Modeli povoljnosti

Osnova na kojoj se zasnivaju modeli povoljnosti leži u predpostavci da je broj putovanja između para zona jednak proizvodu ukupnog broja putovanja koji nastaju u izvornoj zoni i verovatnoće da će svako izvorno putovanje imati prihvatljivo odredište u ciljnoj zoni, odnosno:

$$T_{ij} = I_i \cdot P(C_j) \quad (1)$$

gde su:

T_{ij} – putovanja između izvorne zone "i" i ciljne zone "j"

I_i – ukupan broj izvornih putovanja zone "i"

C_j – ukupan broj putovanja privučenih u zonu "j"

$P(C_j)$ – verovatnoća da će svako putovanje sa izvorom u zoni "i" imati cilj u zoni "j"

Verovatnoća da će neko putovanje da se završi u datoj ciljnoj zoni, definisana je njenim sadržajem (intenzitetom korišćenja) i poretkom u

odnosu na ostale ciljne zone koji se određuju u zavisnosti od vremena putovanja od izvorne zone. Ustvari, privlačna snaga ciljne zone zavisi od broja "povoljnih prilika" koje motivišu putovanje, što se može iskazati brojem radnih mesta, veličinom prodajnog prostora i raznovrsnošću robe i slično kao i od broja "povoljnih prilika" u drugim zonama koje se nalaze u istom položaju u odnosu na posmatranu izvornu zonu.

$P(C_j)$ je funkcija C_j jer model predpostavlja da zonske karakteristike određuju verovatnoću da će putovanje na cilju biti prihvaćeno

$P(C_j)$ takođe može da se definiše kao razlika verovatnoća da će izvorna putovanja zone "i" naći odgovarajući cilj u bilo kojoj od ciljnih zona, shodno udaljenosti od zone "i" do zone "j", uključujući i zonu "j" i verovatnoće da će ta ista putovanja naći odgovarajući cilj u bilo kojoj ciljnoj zoni izuzev "j".

$$T_{ij} = I_i [P(A) - P(B)] \quad (2)$$

gde je:

A - zbir svih ciljnih krajeva putovanja po zonama uključujući i zonu "j"

B - zbir svih ciljnih krajeva putovanja po zonama isključujući zonu "j"

Na osnovu ovoga je moguće definisati funkciju P. Verovatnoća da će putovanje da se završi unutar nekog broja ciljeva jednaka je proizvodu dve verovatnoće. One su:

- verovatnoća da taj broj ciljeva (zona) raspolaže sadržajima kojima putnik teži
- verovatnoća da ne postoji cilj bliži od uzetih

U definitivnom obliku to daje:

$$dP = (1 - P) \cdot L \cdot dV \quad (3)$$

gde je:

$$P = P(V)$$

V - je skup ciljnih tačaka za koje se računa verovatnoća da će se u njima završiti putovanja

L - verovatnoća da će mogući cilj biti prihvaćen.

Pretpostavljajući da je L konstanta (što je jedna od dve osnovne pretpostavke modela povoljnih prilika) gornja jednakost (3) postaje:

$$P = 1 - K \cdot e^{-LV} \quad (4)$$

gde su:

K – integraciona konstanta

e – osnova prirodnog logaritma

Za $K=1$ verovatnoća mora biti jednaka nuli. Kada je $V=0$ i jednakost tada postaje:

$$P(V) = 1 - e^{-LV} \quad (5)$$

odnosno na osnovu jednačine (2) dobija se:

$$T_{ij} = I_i \cdot (e^{-LB} - e^{-LA}) \quad (6)$$

Jednakost (6) predstavlja standardnu formulu modela povoljnih prilika.

I u ovom slučaju postupak kalibracije je iterativan. Posle svake iteracije sračunava se zbir ciljnih krajeva putovanja po obrascu:

$$C_{jk} = \frac{C_j}{Z_{j(k-1)}} - C_{j(k-1)}$$

gde je:

C_{jk} – Prilagođeni zbir ciljnih krajeva za zonu "j" u k-toj iteraciji

$$C_{jk} = C_j \quad \text{za } k=1$$

Z_{jk} – stvaran zbir ciljnih krajeva putovanja u zoni "j" u k-toj iteraciji

k – oznaka iteracije $k=1, 2, \dots, m$.

m – broj iteracija

Prilagođeni zbir ciljnih krajeva putovanja (C_{jk}) se koristi u sledećoj iteraciji, a postupak se ponavlja sve dok se izračunate vrednosti ciljnih krajeva putovanja na približe prognoziranim vrednostima.

Model "elektrostatičkog polja"

Kulonov zakon elektrostatičkog polja, na kome je zasnovana ova metoda, pojednostavljeno glasi: "...da se tela sa istovrsnim nabojem elektriciteta međusobno odbijaju, a raznovrsnim privlače..." kao i da je

“...sila odbijanja odnosno privlačenja utoliko veća ukoliko je naboj tih tela veći, a njihovo rastojanje manje”. Pod pretpostavkom da centri stanovanja imaju negativan naboj, a centri rada pozitivan, i da veličina naboja odgovara broju zaposlenih koji žive u zoni stanovanja “i”, odnosno broju radnih mesta u radnoj zoni “j” tada mogu da se uspostave relacije:

$$P_{ij} = \frac{R_j \cdot Z_i}{\sum_{j=1}^m R_j D_{ij}}; \quad P_{ji} = \frac{Z_i \cdot R_j}{\sum_{i=1}^n Z_i D_{ij}}$$

gde su:

P_{ij} – verovatnoće kretanja iz zone “i” u zonu “j”

P_{ji} – verovatnoće kretanja iz zone “j” u zonu “i”

Z_i – broj zaposlenih stanovnika zone “i”

R_j – broj radnih mesta zone “j”

D_{ij} – rastojanje između zone “i” i zone “j”.

Model u ovoj formi moguće je koristiti samo za radna putovanja (kuća-posao i obratno) i uz sledeće pretpostavke:

- područje za koje se koristi model je zatvoren sistem odnosno svaki zaposleni živi i radi na posmatranom području (odnosno nema radnih migracija u i van posmatranog područja),
- kretanje zaposlenih na posao je konstanta, svaki zaposleni putuje na posao svaki dan, na istoj relaciji,
- struktura zaposlenih je uravnotežena na čitavom području bez koncentracije pojedinih delatnosti,
- nivo dohotka je ravnomerno raspoređen na celo područje stanovanja,
- udaljenost zona izražava se vazdušnim rastojanjem između centroida zona,
- kretanja nastaju kao posledica “pozitivnog naelektrisanja” radnih mesta i “negativnog naelektrisanja” stanovanja.

Sledeći sličnu logiku u kasnijim fazama razvijen je model za putovanja u kupovinu, a zatim je testiran na celokupnim rezultatima izvor-cilj anketa (I – C ankete) [4].

Osnovne prednosti ovih modela su jednostavnost i niski triškovi s obzirom da za njihovu primenu nisu potrebni podaci o postojećim matricama

putovanja (nisu potrebne ankete). Međutim, to im je istovremeno i najveći nedostatak zato što se ne može proveriti koliko dobijeni rezultati odgovaraju stvarnom stanju. U nedostatke se ubraja i zahtev da se posmatrano područje posmatra kao zatvoren sistem, što se retko dešava u realnom stanju.

Po svojoj formi ovi modeli podsećaju na rane oblike gravitacionog modela u kojima su izostavljeni faktori koji se kalibrišu.

Modeli višestruke regresije

Modeli zasnovani na metodama višestruke regresione analize imaju primenu i u slučajevima prostorne raspodele putovanja. U ovom slučaju uspostavljaju se relacije oblika:

$$t_{ij} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, i$$

$$T_{ij} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

gde su:

t_{ij} – postojeći broj putovanja između zone "i" i zone "j" (matrice putovanja iz I – C anketa)

T_{ij} – budući broj putovanja između zone "i" i zone "j"

$x_1, x_2 \dots x_n$ – nezavisne promenljive koje predstavljaju karakteristike saobraćajnih zona u postojećem stanju

$X_1, X_2 \dots X_n$ – prognozirane nezavisne promenljive po zonama

$a_0, a_2 \dots a_n$ – regresioni koeficijenti koji se utvrđuju kalibracijom modela (metodom najmanjih kvadrata).

Kao nezavisne promenljive u ovom slučaju se najčešće uzimaju broj stanovnika, broj zaposlenih, promet u trgovini na malo, ali i rastojanje između izvornih i ciljnih zona.

Jedna od uspešno primenjenih jednačina ovog tipa ima oblik [4]:

$$T_{ij} = a_0 + a_1 \frac{S_j^2}{D_{ij}^2} + a_2 \frac{Z_j^2}{D_{ij}^2} + a_3 \frac{M_j^2}{D_{ij}^{1,5}} + a_4 \frac{I_j^2}{D_{ij}^{1,5}}$$

gde su:

T_{ij} - broj putovanja između zone "i" i zone "j"

S_j - broj stanovnika ciljne zone "j" u godini prognoze

Z_j - broj zaposlenih ciljne zone "j" u godini prognoze

M_j - stepen motorizacije zone "j" u godini prognoze

I_j - indeks izgrađenosti zone "j" u godini prognoze

D_{ij} - rastojanje između izvorne zone "i" i ciljne zone "j".

Kao metoda za prognozu raspodele putovanja višestruka regresiona analiza ima određenih prednosti. Za razliku od gravitacionog modela, modeli regresione analize mogu uključiti u jednačinu bilo koju promenljivu koja ima uticaj na raspodelu putovanja. Razumljiva je i može se primeniti za bilo koje područje i bilo koju svrhu putovanja. Nedostatak je što je većinu nezavisnih promenljivih teško pouzdano prognozirati za duži vremenski period kao i što regresioni koeficijenti ($a_0, a_1 \dots a_n$) ostaju konstanta za period prognoze.

Linearno programiranje

U nastojanju da se iznađu što pouzdanije metode za utvrđivanje prostorne distribucije putovanja primenjavano je i linearno programiranje kao jedna od tehnika rešavanja problema optimizacije.

Opšti izraz modela koji je sposoban da izvrši raspodelu putovanja sa "m" izvora i "n" ciljeva glasi:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} C_{ij} \rightarrow \min.$$

pri čemu je:

$$X_{ij} \geq 0 \quad (i=1, m; j=1, n)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = I_i \quad (i = 1, m)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = C_j \quad (j = 1, n)$$

gde su:

X_{ij} - međuzonska razmena putovanja koja se određuje modelom;

C_{ij} - "troškovi" putovanja (rastojanje između zona, vreme putovanja i trošak realizacije putovanja) - ulazna veličina u model;

Z - minimizirana vrednost linearne funkcije;

I_i - broj izvornih putovanja zone "i" (ulazna veličina za model);

C_j - broj ciljnih putovanja zone "j" (ulazna veličina za model).

Ova metoda ima samo teoretski značaj zato što se u rešavanju praktičnih problema ne postižu rezultati kao što je to slučaj sa prethodno izloženim modelima.

Zaključak o modelima prostorne raspodele putovanja.

U pogledu sposobnosti prikazanih modela za prostornu raspodelu putovanja teoretska rasprava i praktični rezultati pokazuju sledeće:

- praktični rezultati primene modela jedinstvenog faktora rasta pokazale su da ove metode daju najslabije rezultate u odnosu na ostale metode faktora rasta,
- osnovna prednost modela faktora rasta je što su jednostavni i ne zahtevaju složene analize u pogledu istraživanja uzroka nastajanja i raspodele putovanja,
- njihove osnovne slabosti sastoje se u tome što zahtevaju poznavanje postojeće matrice putovanja, zatim što i u budućnosti ne "proizvode" putovanja za koja je u baznoj matrici utvrđena vrednost nule, ne uzimaju u obzir značajne promene u korišćenju zemljišta kao ni promene u trajanju putovanja između zona.

Iz navedenog proizilazi da modeli faktora rasta nisu pogodni za dugoročne prognoze raspodele putovanja na područjima sa značajnim promenama u pogledu intenziteta i načina korišćenja zemljišta. Mogu se uspešno primenjivati za ekstrapolaciju anketa (izvor - cilj ankete) za nekoliko godina kao i za utvrđivanje raspodele spoljnog, posebno tranzitnog saobraćaja. U tu svrhu naročito je pogodna Fratarova metoda.

U drugoj grupi, tzv. sintetičkih modela, najširu primenu i najbolje rezultate dali su gravitacioni modeli, posebno oni sa tzv. dvostranim ograničenjem putem kojih se rezultati nastajanja putovanja usaglašavaju sa izlaznim rezultatima prostorne raspodele putovanja. Modeli ovog tipa su relativno jednostavniji od ostalih, ne zahtevaju složena istraživanja i komplikovanu proceduru kalibracije i provere. Osim toga gravitacioni modeli imaju široku primenu i u drugim oblastima prostornog i

urbanističkog planiranja kod tzv. "lokacionih modela" ili modela "prostorne interakcije".

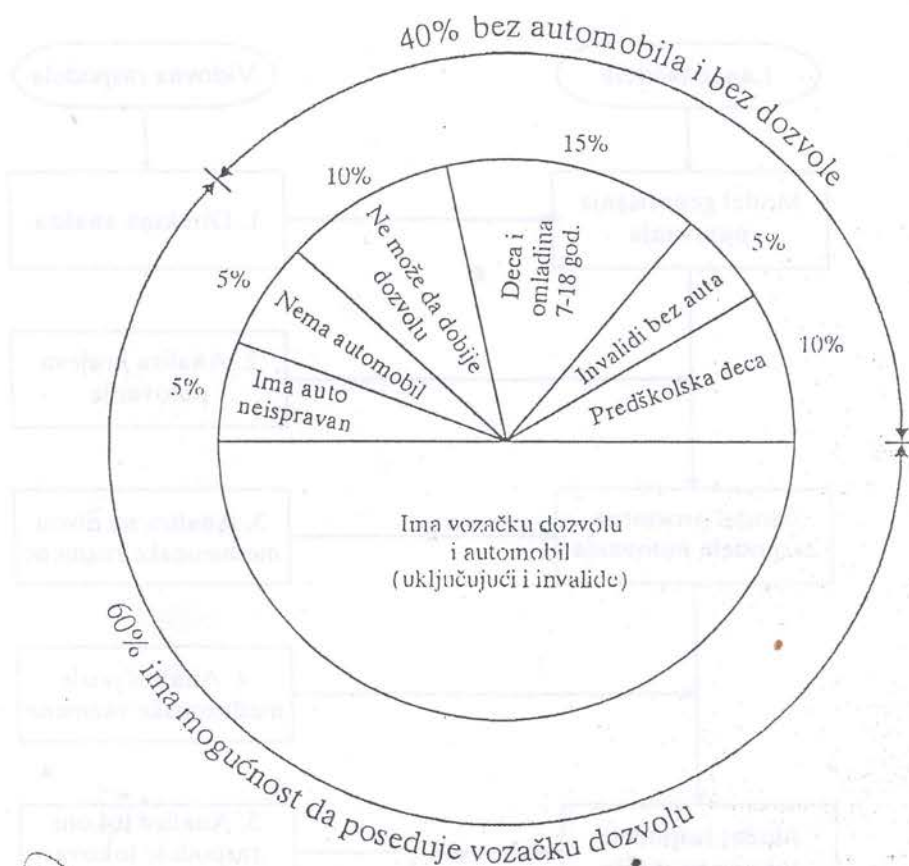
5.4. METODE VIDOVNE RASPODELE PUTOVANJA

Jedan od osnovnih preduslova za realizaciju putovanja je da postoji sredstvo ili način kojim će se ono obaviti. Putovanje, u zavisnosti od čitavog niza uticajnih faktora, može da se realizuje na različite načine: pešice, nekim od sredstava individualnog ili javnog prevoza ili njihovom kombinacijom. Metode vidovne raspodele putovanja predstavljaju postupke kojima se utvrđuju faktori i relacije koji utiču na izbor načina ili vida prevoza kojima se realizuju putovanja. U našoj praksi se ove metode nazivaju modalna ili vidovna raspodela putovanja (ređe: načinska raspodela putovanja) mada se često može sresti i izraz "modal split" koji potiče iz anglo-američke terminologije.

Pitanje vidovne raspodele putovanja je veoma široko što modele koji se u ovu svrhu koriste svrstava u grupu najsloženijih saobraćajnih modela. Proučavanja ove problematike se granaju u više pravaca, kao što su na primer:

- kada, u kojoj fazi planerske procedure, izvršiti raspodelu na vidove prevoza;
- koja putovanja uzeti u obzir za vidovnu raspodelu (sva ili samo određene kategorije stanovništva);
- na koji način tretirati svrhe – motive – putovanja prilikom izbora vida prevoza;
- na koji način posmatrati period dana u kome se realizuju putovanja (vršni period, vanvršni period, ceo dan itd.);
- na koje osnovne vidove – načine vršiti raspodelu (individualni – javni, pešački – mehanizovani, nemotorizovani – motorizovani itd).

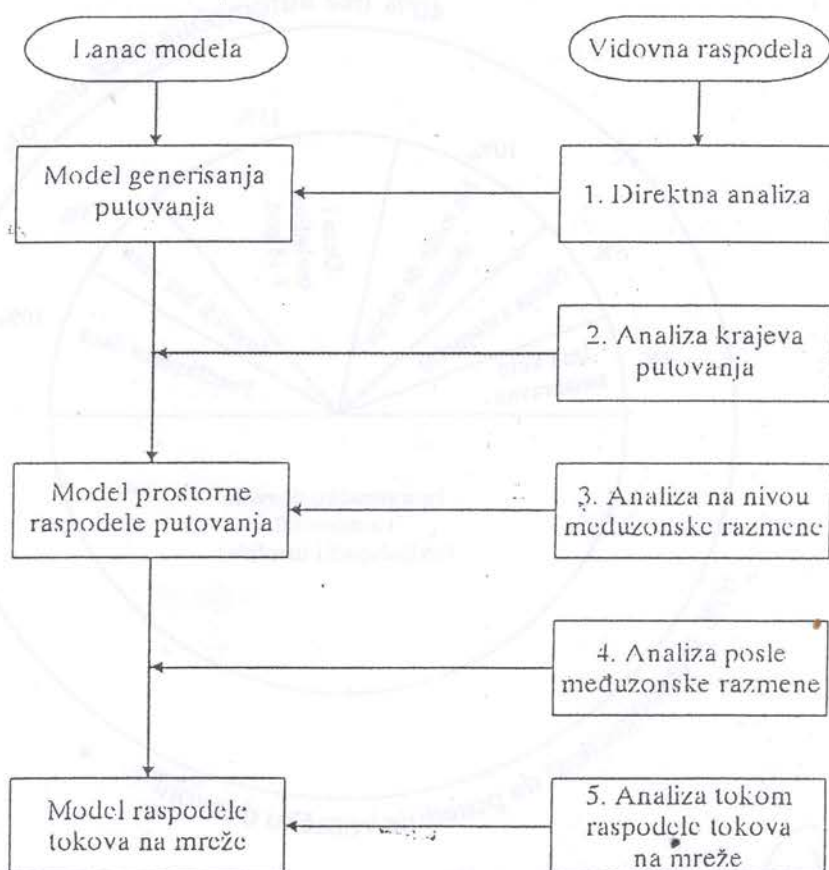
Međutim, pre nego što se pristupi sistematizaciji odgovora na ova pitanja trebalo bi sagledati dimenzije problema vidovne raspodele sa stanovišta korisnika gradskog saobraćajnog sistema. Na sl. 24 predstavljeni su odnosi pojedinih grupa stanovnika u pogledu mogućnosti izbora vida prevoza između vlastitog automobila i javnog prevoza.



Slika 24. *Struktura stanovništva prema mogućnosti korišćenja automobila*
[14]

Čak i pri vrlo visokom stepenu motorizacije između 45 i 50% stanovništva nema mogućnost izbora između individualnog i javnog prevoza (nema mogućnost korišćenja vlastitog automobila). Što se tiče položaja vidovne raspodele u lancu četvorostepenog modela putovanja on može biti sledeći:

1. u toku nastajanja putovanja, ✓
2. posle nastajanja putovanja, ✓
3. u toku prostorne raspodele putovanja, ✓
4. posle prostorne raspodele putovanja i ✓
5. tokom raspodele tokova na mreže. ✓



Slika 25. Položaj vidovne raspodele u lancu saobraćajnih modela

U prvom slučaju putem regresione analize izračunavaju se krajevi putovanja (atrakcije i produkcije) za svaki vid prevoza posebno. Kada se vidovna raspodela radi na nivou krajeva putovanja (2. slučaj), tada se rezultati dobijeni regresijama na nivou saobraćajnih zona krajevi putovanja (produkcije i atrakcije) dele na vidove prevoza. Posle toga se za svaki vid prevoza formiraju modeli prostorne raspodele putovanja putem kojih se dobijaju matrice putovanja za svaki vid prevoza posebno.

Ukoliko se vidovna raspodela vrši tokom odnosno uporedo sa prostornom raspodelom putovanja tada se pri formiranju modela u obzir uzimaju i oni pokazatelji koji utiču na izbor vida prevoza tako da se formira onoliko formi modela prostorne raspodele, koliko načina prevoza se razmatra u raspodeli (uglavnom putnički automobil i javni prevoz).

Najčešće je slučaj da se vidovna raspodela putovanja vrši po utvrđenoj prostornoj raspodeli putovanja (4. slučaj). Ovaj način omogućuje da se iz ukupne matrice putovanja na osnovu odgovarajućih kriterijuma izdvoje onoliko elementarnih matrica na koliko vidova ili načina se razlaže ukupan broj putovanja (pešice, putnički automobil i javni prevoz, na primer). Vidovna raspodela tokom pripisivanja tokova na mreže sprovodi se sa

idejom da se svi oni tokovi koje ne može da prihvati (zbog ograničenog kapaciteta) ulična mreža pripišu javnom prevozu. U ovom slučaju javni prevoz ima podređenu ulogu jer je favorizovan individualni način prevoza do granice prihvatljivog iskorišćenja kapaciteta (nivoa usluge) ulične mreže.

U klasičnoj stručnoj literaturi modeli vidovne raspodele putovanja uglavnom se svrstavaju u tri osnovne grupe:

1. modeli zasnovani na agregiranim podacima zonskih karakteristika tzv. agregirani modeli;
2. modeli zasnovani na podacima o ponašanju pojedinih socio-ekonomskih kategorija putnika tzv. deagregirani modeli;
3. modeli vidovne raspodele u koracima (step by step modeli).

Kod prve grupe modela zakonitosti odnosa između pojedinih vidova prevoza se utvrđuju na bazi podataka o karakteristikama izvornih i ciljnih zona putovanja, kao što su stepen motorizacije, veličina dohotka, broj domaćinstava sa ili bez automobila itd. U ovom slučaju tzv. nezavisni podaci su agregirani na nivou saobraćajne zone pa se otuda i ova grupa modela naziva agregiranim modelima.

Kod modela kojima se odnosi između pojedinih vidova – načina prevoza procenjuje na osnovu zakonitosti ponašanja pojedinaca tzv. bihevioristički modeli, utvrđuje se verovatnoća da će putnik, koji pripada određenoj socioekonomskoj grupi stanovnika, izabrati jedno od alternativnih vidova prevoza. S obzirom da se radi o ponašanju pojedinačnih putnika modeli ovog tipa nose naziv i deagregirani modeli.

Modeli vidovne raspodele u koracima zasnovani su na činjenici da uvek postoji određen broj stanovnika koji iz raznoraznih razloga ne poseduju ili ne mogu da koriste putnički automobil, pa su samim tim upućeni na druge vidove prevoza (vidi sl. 25). Modeli u ovoj grupu u prvoj fazi procenjuju koliko putnika ima mogućnost izbora vida prevoza, a zatim se iz ove grupe izdvajaju oni koji se mogu opredeliti za javni prevoz i dodaju grupi koja nema mogućnost izbora čime se utvrđuje ukupan broj korisnika javnog prevoza odnosno individualnih prevoznih sredstava.

Imajući u vidu složenost strukture modela u sve tri grupe, a time i njihovu pouzdanost za dugoročne prognoze, u poslednje vreme sve češće je u primeni postupak koji se može nazvati metodom dirigovane (ili ciljane) vidovne raspodele putovanja. U ovom slučaju radi se o utvrđivanju najpovoljnijih odnosa između pojedinih vidova prevoza kako sa stanovišta

politike razvoja saobraćajnog sistema tako i sa stanovišta želja i mogućnosti pojedinaca kao učesnika u saobraćaju, a potom definisanju skupa mera kojim će se ti odnosi postići.

Kao što je već rečeno, na izbor vida prevoza utiču brojni faktori od kojih se oni najznačajniji mogu svrstati u tri osnovne grupe:

1. faktore zavisne od karakteristika putovanja, ✓
2. faktore zavisne od karakteristika putnika, ✓
3. faktore zavisne od karakteristika saobraćajnog sistema. ✓

Faktori zavisni od karakteristika putovanja. Kao najvažnije karakteristike putovanja koje imaju uticaj na izbor vida prevoza uzimaju se svrha putovanja, period dana u kome se obavlja putovanje i dužina odnosno trajanje putovanja.

Motiv, odnosno svrha putovanja utiče na izbor vida prevoza na taj način što se za odlazak na posao i u školu (fakultet) putnici u većoj meri opredeljuju za javni prevoz, dok recimo kada je u pitanju kupovina ili zabava prisutno je povećano učešće putničkih automobila. Ove pojave se mogu objasniti i činjenicom da se odlazak na posao i u školu i/ili fakultet dešava u periodu vršnog opterećenja kada zbog čestih zastoja i izraženih problema parkiranja deo vlasnika automobila (tj. putnici koji imaju mogućnost izbora) radije koristi javni prevoz, kao i činjenicom da svakodnevno korišćenje automobila za odlazak na posao predstavlja značajan trošak za većinu zaposlenih. Nasuprot tome povremeni odlazak u kupovinu, razonodu i sl. većina vlasnika automobila obavlja, najčešće sa još nekim članom porodice, automobilom jer želi da ima odgovarajući komfor i apsolutnu samostalnost u izboru vremena i putanje kojom će obaviti putovanje.

Dužina putovanja, merena rastojanjem ili utroškom vremena između izvora i cilja evidentno ima značaja za izbor vida prevoza. Za kratka putovanja do nekoliko stotina metara putovanja se obavljaju pešice, na srednjim relacijama koristi se automobil ili javni gradski prevoz, a na većim udaljenostima međugradski autobus, železnica ili pak avion što naravno zavisi i od troškova koji zahteva svaki od tih vidova.

Faktori zavisni od karakteristika putnika. Kada su u pitanju karakteristike putnika odnosno njihov uticaj na izbor vida prevoza najznačajnije su: ekonomski status, posedovanje automobila, gustina nastanjenosti i određene

socioekonomske karakteristike domaćinstva. Ekonomski status, odnosno dohodak domaćinstva i/ili pojedinca svakako su od presudnog uticaja ne samo na mobilnost članova domaćinstva već i na način na koji se obavljaju putovanja. Domaćinstva sa većim prihodima imaju veću mobilnost i češće koriste putnički automobil od domaćinstava sa nižim prihodima. Nasuprot tome domaćinstva sa nižim prihodima više koriste sredstva javnog prevoza, pešačenje ili biciklistički prevoz.

Posedovanje putničkog automobila, koje je inače u tesnoj vezi sa dohotkom domaćinstva, takođe ima neposredan uticaj na vidovnu raspodelu putovanja. Domaćinstva koja poseduju automobil ostvaruju veći broj putovanja automobilom i obratno.

Što se tiče gustine nastanjenosti prisutna je činjenica da je u zonama sa manjim gustinama (zone rezidencijalnog i porodičnog stanovanja) mreža linija javnog prevoza nerazvijenija i frekvencija vozila niža, pa je otuda i nivo korišćenja javnog prevoza niži, odnosno stanovnici su više upućeni na korišćenje automobila.

Kada se međutim ovaj problem posmatra celovito teško je reći šta je uzrok, a šta posledica. Naime, kada su u pitanju obeležja putnika može se reći da izbor vida prevoza uglavnom (ako ne i isključivo) zavisi od dohotka jer domaćinstva sa većim dohotkom imaju i viši stepen motorizacije (više automobila na raspolaganju) i viši stepen korišćenja automobila. Takođe, domaćinstva sa višim dohotkom češće žive u zonama niskih gustina jer poseduju porodične kuće u ekskluzivnim delovima grada, koji su, uglavnom zbog male zainteresovanosti stanovnika takvih zona za javni prevoz, slabije opsluženi linijama javnog prevoza.

Faktori zavisni od karakteristika saobraćajnog sistema. Uticaj karakteristika saobraćajnog sistema na vidovnu raspodelu najčešće se izražava preko vremena putovanja i troškova putovanja, ili preko izvedenih pokazatelja kao što su nivo usluge i indeks pristupačnosti.

Uticaj vremena putovanja može se izraziti količnikom koji pokazuje koliko puta više traje putovanje javnim prevozom od putovanja putničkim automobilom, odnosno:

$$K_t = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{t_6 + t_7 + t_8}$$

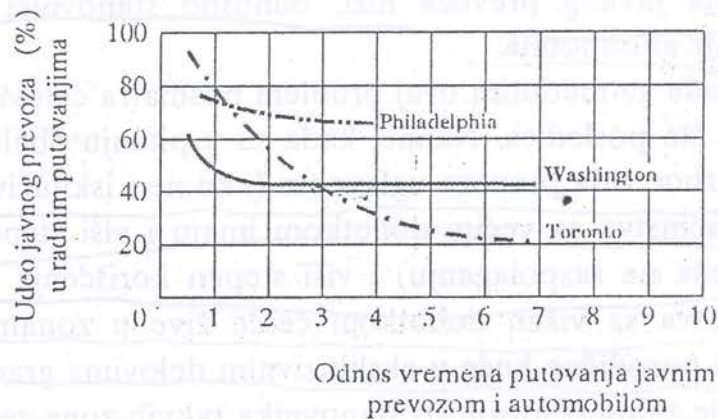
gde su:

K_t – odnos vremena putovanja javnim prevozom i putničkim automobilom;

t_1 – vreme vožnje u vozilu javnog prevoza;

- t_2 – vreme presedanja; ✓
- t_3 – vreme čekanja na vozilo javnog prevoza; ✓
- t_4 – vreme pešačenja od mesta polaska (izvora) do vozila javnog prevoza; ✓
- t_5 – vreme pešačenja od vozila javnog prevoza do mesta dolaska (cilja); ✓
- t_6 – vreme vožnje automobilom; ✓
- t_7 – vreme potrebno za parkiranje automobila na ciljnom kraju putovanja; ✓
- t_8 – vreme pešačenja od mesta parkiranja automobila do ciljne adrese⁵. ✓

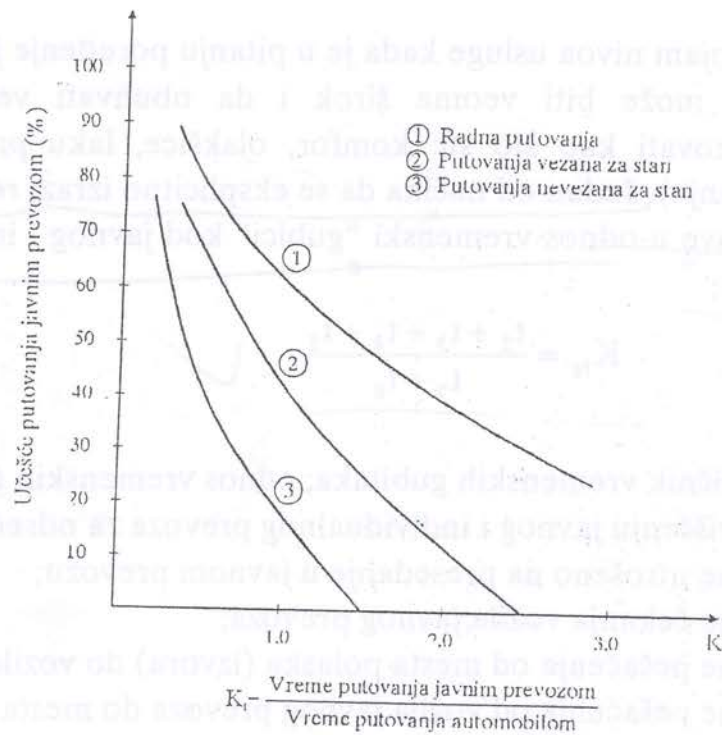
Istraživanja u SAD i Kanadi su pokazala da sa porastom količnika K , opada učešće javnog prevoza kada su u pitanju putovanja sa svrhom odlaska na posao u periodima vršnog opterećenja. Utvrđeno je takođe da je ovaj uticaj različit u različitim sredinama, ali se nije zalazilo dublje u uzroke ovih različitosti.



Slika 26. Uticaj vremena putovanja na izbor vida prevoza za radna putovanja za gradove u Americi [4]

Na slici 27 prikazan je uticaj vremena putovanja na izbor prevoznog sredstva za različite svrhe putovanja. Učešće javnog prevoza za radna putovanja je veće nego za ostale svrhe putovanja. Međutim, u svakom slučaju sa porastom vremena putovanja javnim prevozom opada njegovo učešće u broju putovanja bez obzira na motiv putovanja.

⁵ Navedena formula je data u izvornom obliku kojim je predpostavljeno da je automobil parkiran na adresi polaska (nema pešačenja do automobila). Ispravnije bi bilo da u formuli egzistira i veličina t_9 – vreme pešačenja do parkiranog automobila.



Slika 27. Uticaj vremena putovanja na izbor prevoznog sredstva za različite svrhe putovanja [15]

Uticaj troškova putovanja može se takođe izraziti preko količnika čiji izraz glasi:

$$K_c = \frac{c_1 \cdot p}{c_2 + c_3 + c_4 + 0,5c_5}$$

gde su:

K_c – odnos troškova putovanja javnim prevozom i putničkim automobilom;

c_1 – cena vožnje u javnom prevozu;

c_2 – troškovi pogonskog goriva putničkog automobila;

c_3 – troškovi maziva putničkog automobila;

c_4 – troškovi putarine (mostarine ili korišćenja tunela) pri korišćenju putničkog automobila;

c_5 – troškovi parkiranja putničkog automobila na ciljnom kraju putovanja;

p – popunjenost putničkog automobila.

Ostali eksploatacioni troškovi putničkog automobila se obično zanemaruju mada mogu da predstavljaju značajne stavke (osiguranje, održavanje, amortizacija).

Pojam nivoa usluge kada je u pitanju poređenje javnog i individualnog prevoza može biti veoma širok i da obuhvati veličine koje je teško kvantifikovati kao što su: komfor, olakšice, laku promenu vida prevoza (presedanje). Jedan od načina da se eksplicitno izrazi relativan nivo usluge je da se stave u odnos vremenski "gubici" kod javnog i individualnog prevoza, odnosno:

$$K_{lg} = \frac{t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{t_7 + t_8}$$

gde su:

K_{lg} – količnik vremenskih gubitaka; odnos vremenskih gubitaka pri korišćenju javnog i individualnog prevoza za određeno putovanje;

t_2 – vreme utrošeno na presedanje u javnom prevozu;

t_3 – vreme čekanja vozila javnog prevoza;

t_4 – vreme pešačenja od mesta polaska (izvora) do vozila javnog prevoza;

t_5 – vreme pešačenja od vozila javnog prevoza do mesta dolaska (cilja);

t_7 – vreme parkiranja automobila;

t_8 – vreme pešačenja od mesta parkiranja automobila do ciljne adrese.

Ovako definisan nivo usluge polazi od toga da je vreme utrošeno izvan vozila "gubitak", i da je nivo usluge u sistemu javnog prevoza niži ukoliko je ovaj količnik veći i obrnuto.

Indeks pristupačnosti. U opštem slučaju indeks pristupačnosti je pokazatelj koji predstavlja pogodnost (ili "lakoću") pristupa određenoj lokaciji određenom vrstom prevoza.

Klasična formula za izračunavanje indeksa pristupačnosti za lokaciju "i" glasi:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{\left(\frac{d_{ij}}{V_{ij}}\right)^\alpha}, \text{ odnosno } I_i = \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{t_{ij}^\alpha}, \text{ ili: } I_i = \sum_{j=1}^n S_j t_{ij}^{-\alpha}$$

gde su:

I_i – indeks pristupačnosti u tački (centroidu) "i"

S_j – broj stanovnika zone "j"

d_{ij} – rastojanje između centroida "i" i "j"

V_{ij} – brzina putovanja između centroida "i" i "j"

t_{ij} – vreme putovanja između centroida "i" i "j"

α – eksponent funkcije otpora.

S obzirom da izraz $I_i = \sum_{j=1}^n S_j t_{ij}^{-\alpha}$ predstavlja imenilac klasičnog gravitacionog modela, kasnija forma indeksa pristupačnosti prešla je u oblik:

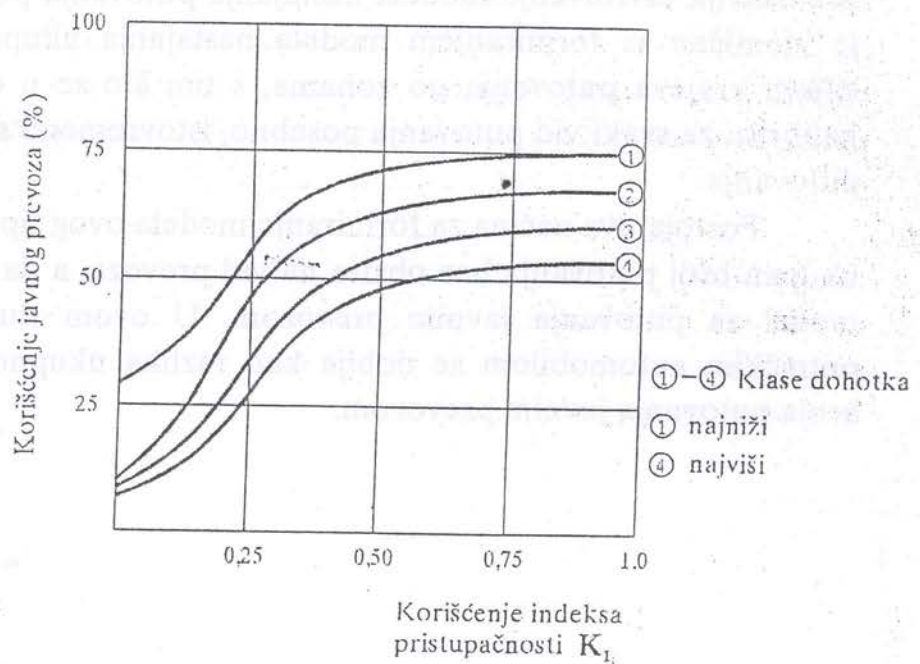
$I_i = \sum_{j=1}^n A_j F_{ij}$ što predstavlja imenilac standardnog gravitacionog modela pri čemu je:

I_i – indeks pristupačnosti zone “i”

A_j – atrakcija zone “j” – broj putovanja privučenih u zonu “j”

F_{ij} – funkcija otpora $F_{ij} = f(t_{ij})$

Okolnost da je funkcija otpora $F_{ij} = f(t_{ij})$ različita za različite vidove prevoza i različite svrhe putovanja iskorišćena je za definisanje krivih prikazanih na sl. 28.



Korišćenje indeksa pristupačnosti K_i

Korišćenje indeksa pristupačnosti K_i

Slika 28. Učešće putovanja na posao sredstvima javnog prevoza u zavisnosti od pristupačnosti [12]

U ovom slučaju količnik indeksa pristupačnosti je izračunat kao:

$$K_{Ai} = \frac{\sum_{j=1}^n A_j f_{JP}(t_{ij})}{\sum_{j=1}^n A_j f_{PA}(t_{ij})}$$

gde su:

K_{Ai} – količnik indeksa pristupačnosti za zonu "i"

A_j – ukupan broj radnih putovanja privučenih u zonu "j" (sa ciljem u zoni "j")

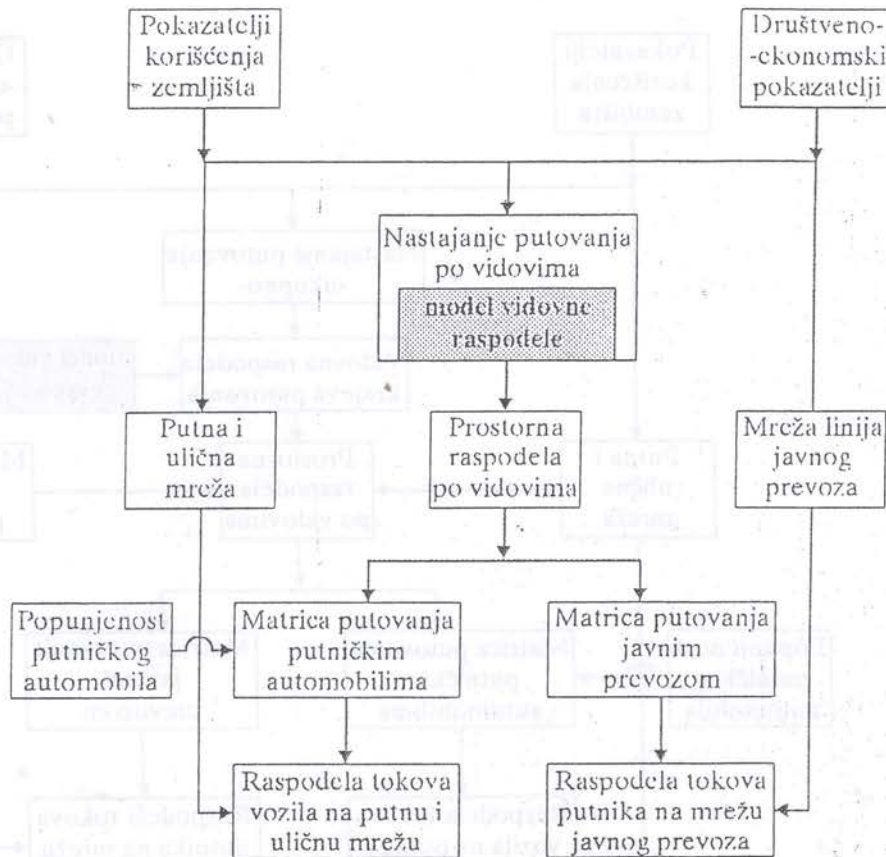
$f_{JP}(t_{ij})$ – vrednost funkcije otpora između zone "i" i zone "j" u mreži javnog prevoza

$f_{PA}(t_{ij})$ – vrednost funkcije otpora između istog para zona "i" i "j" u uličnoj mreži.

5.4.1. Vidovna raspodela tokom nastajanja putovanja

Ovakav način raspodele putovanja na vidove prevoza u stvari predstavlja utvrđivanje modela nastajanja putovanja po vidovima. Postupak je identičan sa formiranjem modela nastajanja ukupnog broja izvornih i ciljnih krajeva putovanja po zonama, s tim što se u ovom slučaju modeli kalibrišu za svaki vid putovanja posebno, istovremeno sa utvrđivanjem broja putovanja.

Postoje dva načina za formiranje modela ovog tipa. Prvi je da se utvrdi ukupan broj putovanja bez obzira na vid prevoza, a da se posebno kalibriše model za putovanja javnim prevozom. U ovom slučaju broj putovanja putničkim automobilom se dobija kao razlika ukupnog broja putovanja i broja putovanja javnim prevozom.



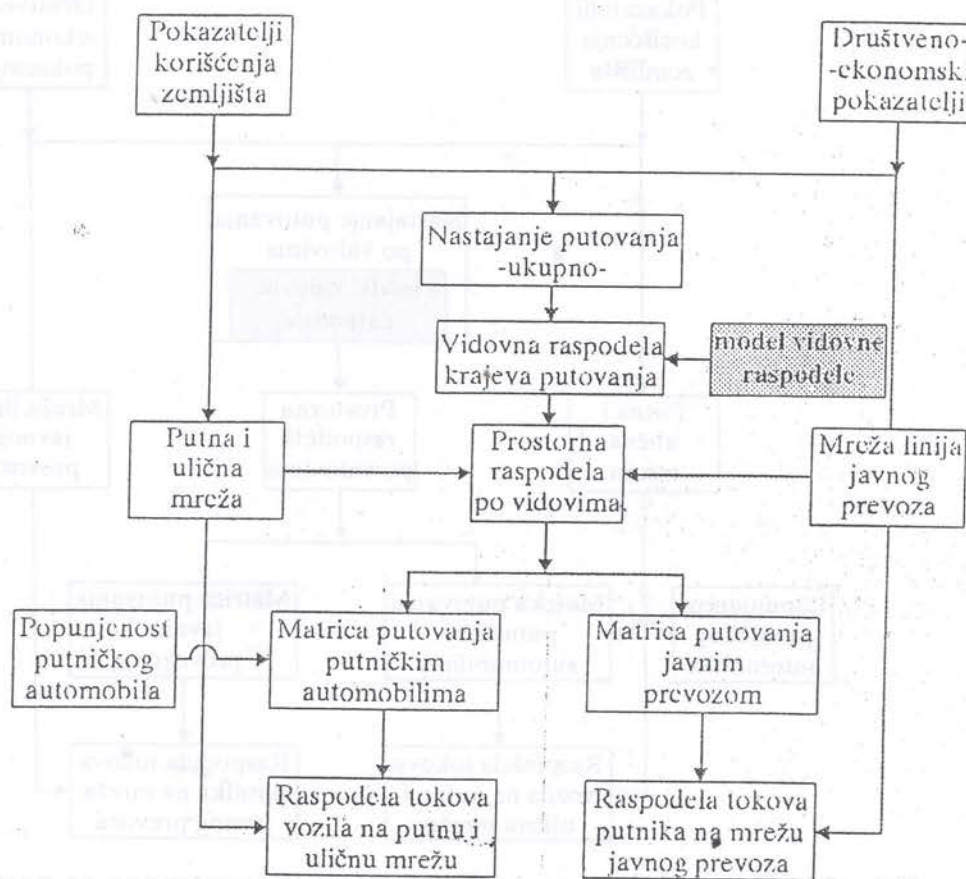
Slika 29. Raspodela putovanja na vidove istovremeno sa nastajanjem putovanja

U drugom slučaju posebno se utvrđuje model za putovanja javnim prevozom, a posebno za putovanja putničkim automobilom.

Metode koje se koriste za formiranje ovih modela su višestruka regresiona analiza i kategorijska analiza.

5.4.2. Vidovna raspodela krajeva putovanja

Vidovna raspodela krajeva putovanja sastoji se u utvrđivanju ukupnog broja izvornih i ciljnih putovanja za svaku saobraćajnu zonu, a zatim u definisanju odnosa između javnog i individualnog prevoza na nivou krajeva putovanja. Primenom ovih odnosa na ukupan broj krajeva putovanja dobija se raspodela krajeva putovanja po vidovima. U sledećem koraku za svaki vid prevoza posebno se utvrđuje prostorna raspodela putovanja (matrice putovanja).



Slika 30. Vidovna raspodela krajeva putovanja

Jedan od načina utvrđivanja izvornih krajeva putovanja između javnog i individualnog prevoza je putem višestruke regresione analize regresije oblika [4].

$$y = a_0 + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7$$

gde su:

y - procenat putovanja na posao javnim prevozom (%)

x_1 - odnos vremena putovanja

x_2 - odnos troškova putovanja

x_3 - stepen motorizacije

x_4 - indeks veličine porodice

x_5 - indeks veličine dohotka

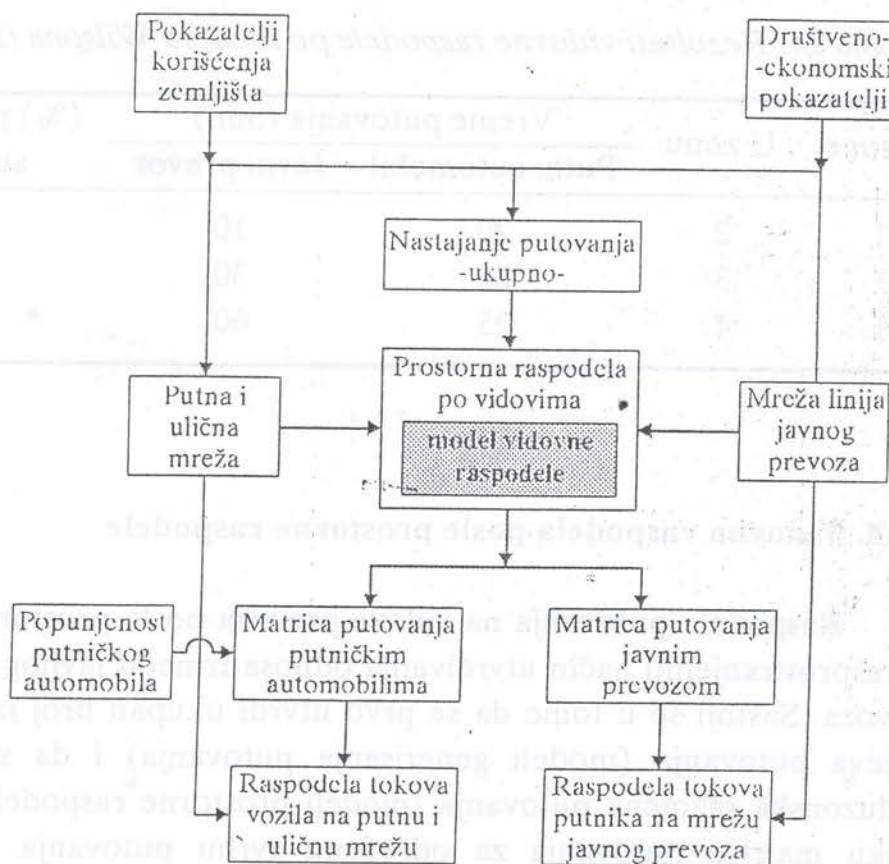
x_6 - dužina putovanja

x_7 - procenat žena u zaposlenom stanovništvu

$a_0 - a_7$ - regresioni koeficijenti jednačine.

5.4.3. Vidovna raspodela u okviru prostorne raspodele putovanja

U ovom postupku raspodela sledi posle utvrđivanja ukupnog broja putovanja. Sprovodi se jednim od modela prostorne raspodele putovanja sa parametrima koji su kalibrisani prema karakteristikama javnog ili individualnog prevoza. Na primer, ukoliko se koristi gravitacioni model, što je najčešće slučaj, tada se faktori otpora posebno kalibrišu za javni, a posebno za individualni prevoz. Izlazni rezultati su matrice putovanja individualnim i javnim vidovima prevoza.



Slika 31. Vidovna raspodela u okviru prostorne raspodele putovanja

Jedan od modela ovog tipa razvio je Wilson [16] u obliku:

$$\frac{T_{ij(1)}}{\sum_{m=1}^2 T_{ij(m)}} = \frac{1}{1 + e^{-\beta(F_{ij(2)} - F_{ij(1)})}}$$

gde su:

$T_{ij(1)}$ – broj putovanja između zone "i" i "j" vidom prevoza $m=1$

$T_{ij(m)}$ – broj putovanja između zone “i” i “j” za vid prevoza m, m=1, m=2,
 $F_{ij(1)}$ – funkcija otpora između zona “i” i “j” za vid prevoza m=1
 $F_{ij(2)}$ – funkcija otpora između zona “i” i “j” za vid prevoza m=2
 β - kalibracioni parametar gravitacionog modela.

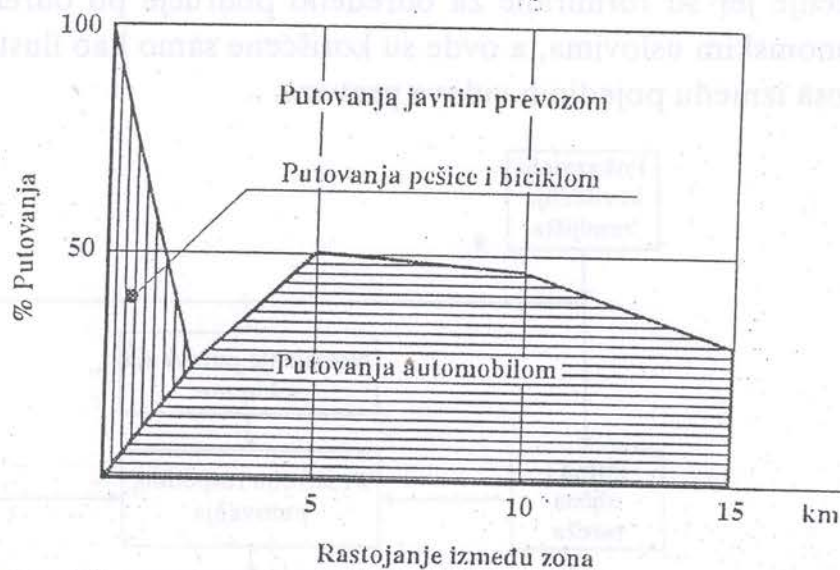
Na primer za kalibrisani gravitacioni parametar $\beta=0,05$ i dva vida prevoza individualni (m=1) i javni (m=2) između zona 1-2, 1-3 i 1-4 dobijena je sledeća raspodela na vidove prevoza:

Tabela 24. Rezultati vidovne raspodele po modelu Wilsona [16]

| Iz zone | U zonu | Vreme putovanja (min) | | (%) putovanja putn. automobilom |
|---------|--------|-----------------------|--------------|----------------------------------|
| | | Putn. automobil | Javni prevoz | |
| 1 | 2 | 20 | 10 | 38 |
| 1 | 3 | 25 | 30 | 56 |
| 1 | 4 | 25 | 60 | 85 |

5.4.4. Vidovna raspodela posle prostorne raspodele

Raspodela putovanja na vidove prevoza posle prostorne raspodele je najrasprostranjeniji način utvrđivanja odnosa između javnog i individualnog prevoza. Sastoji se u tome da se prvo utvrdi ukupan broj izvornih i ciljnih krajeva putovanja (modeli generisanja putovanja) i da se zatim utvrdi međuzonska razmena putovanja (modeli prostorne raspodele putovanja) u obliku matrice putovanja za određenu svrhu putovanja svim vidovima prevoza. Vidovna raspodela se obavlja na taj način što se vrednosti međuzonske razmene putovanja T_{ij} iz matrice putovanja množe odgovarajućim postotkom koji zavisi od odnosa vremena putovanja javnim prevozom i putničkim automobilom za posmatrani par zona “i” i “j” (vidi sliku 27). Na primer prema krivama raspodele na sl. 27 ukoliko je odnos vremena putovanja javnim prevozom i putničkim automobilom jednak 1.0, tada se oko 60% putovanja na posao (radna putovanja) obavi javnim prevozom, a 40% putničkim automobilom, a za putovanja vezana za stan 40% javnim prevozom a 60% automobilom. Kod ostalih putovanja na ovom dijagramu (putovanja nevezana za stan) samo oko 15% će koristiti javni prevoz. Krive na ovom dijagramu (sl. 27) naravno nemaju univerzalno



Slika 33 Vidovna raspodela u funkciji rastojanja između zona [12]

Međutim, pošto rastojanje nije jedini kriterijum za izbor vida prevoza ovakav način raspodele nije imao širu primenu.

Složenije metode vidovne raspodele posle prostorne raspodele putovanja zasnovane su na tehnici tzv. "diskriminantne analize" kojom se na bazi verovatnoće izbora pojedinog sredstva prevoza utvrđuje odnos putnika prema pojedinim vrstama ponude transportnog sistema.

U suštini metoda je zasnovana na sledeće dve pretpostavke:

- (1) putnici imaju jednaku mogućnost izbora i
- (2) svaki putnik prilikom izbora sredstva svesno ili nesvesno vrednuje prednosti i nedostatke jednog sredstva u odnosu na drugo. Faktori koji se koriste u ovom vrednovanju su pre svega vreme putovanja, cena, komfor i pouzdanost. Relativna važnost odnosno "težina" pojedinih faktora raspodele modelira se primenom jedne od statističkih tehnika poznatoj pod nazivom "diskriminantna analiza". U Engleskoj je primenom ovog metoda razvijena takozvana globalna jednačina vidovne raspodele na bazi podataka snimanja u gradovima Liverpool, Mančester, Lester, itd. Verovatnoća izbora sredstva prevoza ocenjena je na osnovu logističke funkcije verovatnoće oblika:

$$P_{(z)} = \frac{e^{z}}{1 + e^{z}}$$

$$Z_j = a_0 + a_i X_i$$

gde su:

a_0 – konstanta

a_i – koeficijenti koji određuju važnost i -te promenljive u izboru sredstava

X_{ij} – vrednost i -te promenljive za j -tog putnika

Z_j – mera preferencije putnika za određenu vrstu prevoza.

Nakon kalibracije dobijena je sledeća jednačina koja opisuje raspodelu između putovanja autobusom i putovanja automobilom:

$$Z = 0,2 + 0,804X_1 + 0,571X_2 + 0,337X_3 + 0,526X_4$$

gde su:

X_1 – razlika u vremenu pešačenja za putovanja autobusom odnosno automobilom

X_2 – razlika u vremenu čekanja

X_3 – razlika u vremenu vožnje autobusom i automobilom

X_4 – razlika u ceni prevoza

Na osnovu ove globalne jednačine moguće je razviti specifične oblike zakonitosti za druge gradive izračunavanjem novih koeficijenata jednačine pomoću poznatih vrednosti standardnog odstupanja pojedinih promenljivih.

Istraživanja vidovne raspodele pokazala su da pored vremena i troškova putovanja značajan uticaj imaju faktori kao što su udobnost, pouzdanost i pogodnost transportnog sistema, koje je i najteže kvantifikovati. Primenom psihometrijskih metoda u analizi ponašanja putnika proširene su mogućnosti utvrđivanja odnosa prema atributima pojedinih vidova prevoza. Naime, putovanje određenim sredstvom karakteriše konglomerat atributa koje je moguće analizirati sa aspekta putnika odnosno korisnika. U tom pogledu kao ilustracija mogu da posluže rezultati istraživanja motiva izbora putnika u radnim organizacijama u Beogradu u kojima postoji prevoz zaposlenih za sopstvene potrebe [17]. Motivi ili razlozi opredeljenja putnika za određeni vid prevoza grupisani su u 12 osnovnih kategorija. Svaki anketirani putnik mogao je da se opredeli za jedan ili više motiva i da ih rangira po važnosti prema sopstvenom nađenju. Anketom su bili obuhvaćeni svi zaposleni bilo da koriste prevoz radne organizacije ili na posao dolaze vozilima javnog gradskog saobraćaja, sopstvenim automobilom ili pešice. Korisnici prevoza radne organizacije dali su sledeće odgovore o motivima svog izbora:

Tabela 25. *Struktura motiva izbora vidova prevoza - korisnici prevoza radne organizacije*

| Motiv izbora | Procenat odgovora (%) |
|---------------------------------------|-----------------------|
| 1. Dolazak na posao u planirano vreme | 27,2 |
| 2. Niža cena putovanja | 20,1 |
| 3. Brže putovanje bez zastoja | 14,9 |
| 4. Kraće vreme čekanja | 9,6 |
| 5. Udobnost putovanja | 8,8 |
| 6. Nedostatak izbora | 8,6 |
| 7. Kraće vreme vožnje | 5,7 |
| 8. Kraće vreme pešačenja | 4,4 |
| 9. Mogućnost izbora vremena polaska | 0,7 |
| UKUPNO: | 100 |

Pouzdanost je, kao što se vidi, osnovno obeležje ovog vida posebnog prevoza, s obzirom da je prilagođen potrebama radne organizacije i obezbeđuje siguran dolazak na posao do početka radnog vremena. Takođe je jasan motiv opredeljenja na osnovu niže cene putovanja, jer je ovaj prevoz beneficiran od strane radnih organizacija, a u mnogim slučajevima i besplatan. Očigledno je da je nemogućnost izbora vremena polaska najveći nedostatak ovog vida prevoza sa stanovišta korisnika.

Motivi koji opredeljuju vlasnike automobila da na posao dolaze isključivo sopstvenim automobilom, sasvim su druge prirode.

Tabela 26. *Struktura motiva izbora vida prevoza - korisnici putničkih automobila*

| Motiv izbora | Procenat odgovora (%) |
|---|-----------------------|
| 1. Udobnost putovanja | 20,8 |
| 2. Mogućnost izbora vremena polaska | 15,1 |
| 3. Prevoz članova porodice na posao ili u školu (obdanište) | 14,2 |
| 4. Brže putovanje bez zastoja | 13,2 |
| 5. Dolazak na posao u planirano vreme | 9,4 |
| 6. Kraće vreme čekanja | 6,6 |
| 7. Nedostatak izbora | 6,6 |
| 8. Kupovina ili privatni posao posle radnog vremena | 3,8 |
| 9. Kraće vreme pešačenja | 2,8 |
| 10. Poslovi u toku radnog vremena | 1,9 |
| 11. Niža cena putovanja | 0,9 |
| 12. Ostalo | 4,7 |
| UKUPNO: | 100 % |

Zaposleni koji poseduju automobil koriste ga najviše zbog udobnijeg putovanja i mogućnosti izbora vremena polaska. Ovde je međutim, karakteristično da je prevoz članova porodice na posao i u školu vrlo visoko ocenjen, što govori o izvesnim prednostima automobila koje drugi vidovi prevoza teško mogu da ugroze.

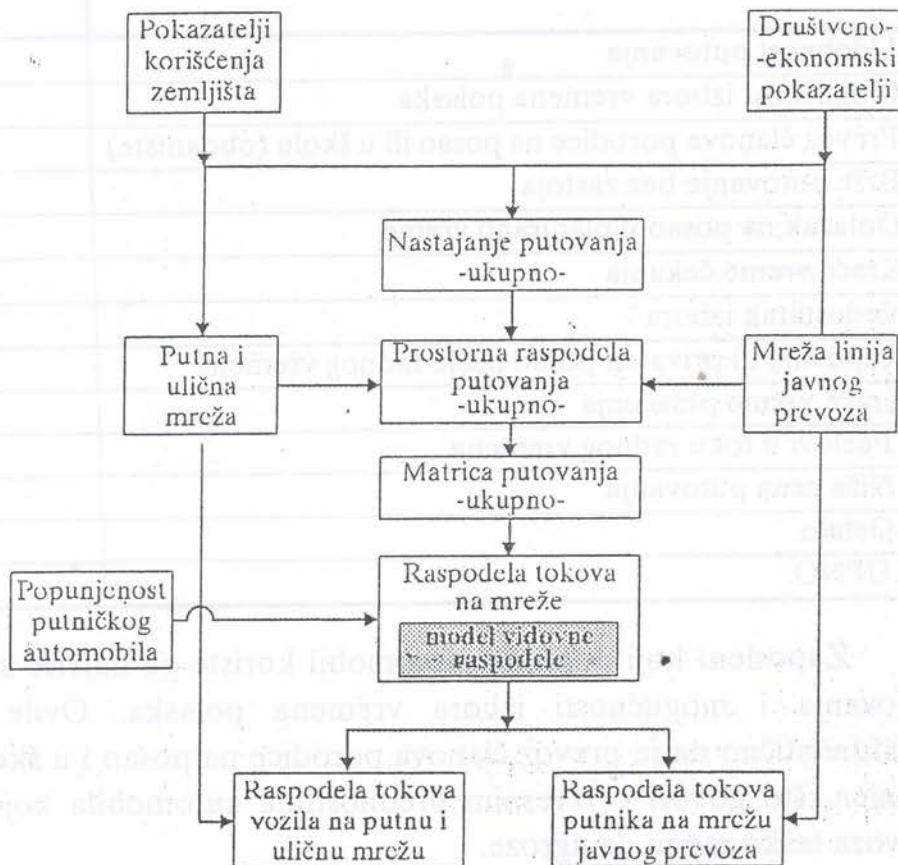
5.4.5. Vidovna raspodela tokom raspodele tokova na mreže

Raspodela putovanja na vidove u okviru pripisivanja tokova na mreže može da se obavi na dva načina:

1. Posle pripisivanja ukupnog broja putovanja na putnu i uličnu mrežu, i
2. Pripisivanjem dela putovanja putnoj i uličnoj mreži.

U prvom slučaju posle prostorne raspodele putovanja celokupna matrica putovanja se raspodeljuje na posmatranu putnu i uličnu mrežu bez ograničenja kapacitetom, a potom se utvrđuju koridori na kojima se javljaju glavni tokovi putovanja.

Nakon toga se protoci na osnovnim koridorima dele na javni prevoz i individualna vozila i saglasno tome formira se mreža linija javnog prevoza sa odgovarajućim kapacitetima.



Slika 34. Raspodela putovanja na vidove istovremeno sa raspodelom tokova na mreže

U drugom slučaju iz celokupne matrice putovanja izdvaja se deo putovanja na osnovu kriterijuma nivoa usluge na putnoj i uličnoj mreži.

5.4.6. Vidovna raspodela putovanja u koracima ✓

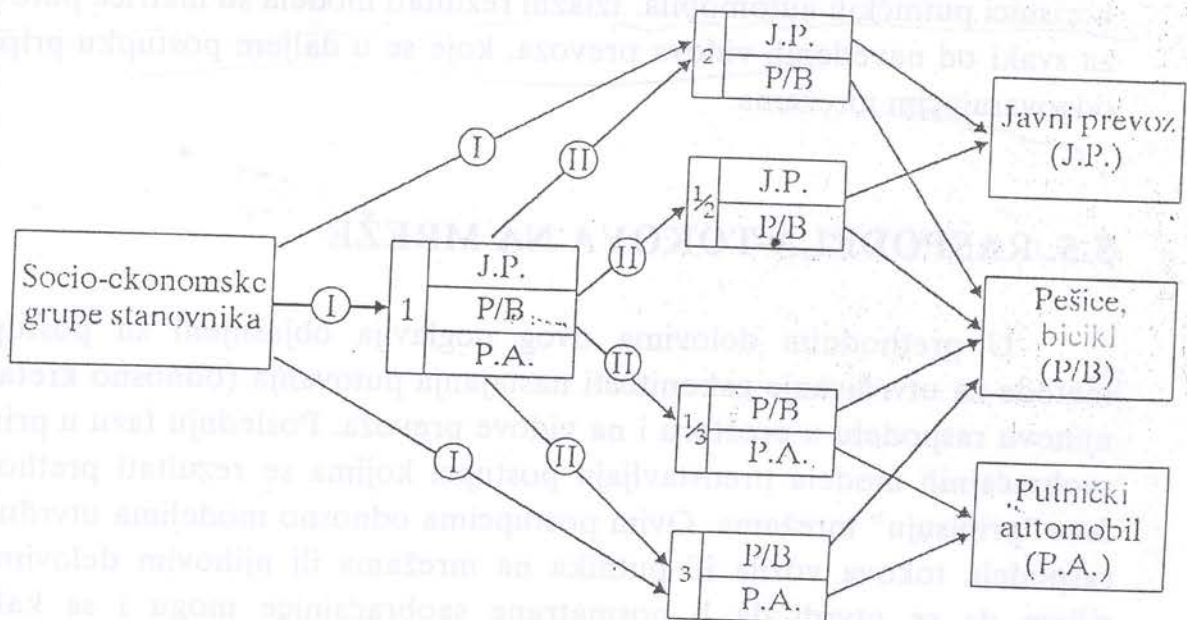
Složenost problema izbora vida prevoza nagnala je neke autore da zavisnost određene kategorije putnika od pojedinih vidova prevoza uzmu kao osnov za formiranje modela vidovne raspodele. Na slici 24 data je generalna struktura stanovništva prema mogućnostima korišćenja automobila za nivo motorizacije od približno 1 automobil po domaćinstvu. Kao što se vidi najmanje 40% stanovništva uopšte nema mogućnost korišćenja automobila. Isto tako oko 50% stanovnika ima na raspolaganju

putnički automobil, i oni predstavljaju populaciju koja ima mogućnost izbora između javnog i individualnog prevoza. Treću grupaciju čine stanovnici koji iz raznih razloga moraju da koriste isključivo individualne vidove prevoza što znači da i oni kao i prva grupa nemaju mogućnost izbora.

Prema tome, svi putnici se mogu podeliti u tri osnovne grupacije:

1. putnici koji na raspolaganju imaju samo javni prevoz,
2. putnici koji imaju mogućnost izbora između javnog i individualnog prevoza, i
3. putnici koji na raspolaganju imaju samo individualni prevoz.

Na sl. 35. data je šema vidovne raspodele u koracima koju primenjuje Švedska konsultantska firma SWECO [18]



Slika 35. Šematski prikaz vidovne raspodele u koracima

U ovom slučaju u obzir su uzeta i putovanja koja se obavljaju pešice i/ili biciklom⁶, što je u poslednje vreme sve prisutnija pojava u vidovnoj raspodeli u evropskim gradovima, a posebno je važno za naše gradove u kojima je učešće pešačkih putovanja značajno.

U principu ovaj način raspodele se svodi na to da se na osnovu socioekonomskih karakteristika stanovništva (starosna i polna struktura i ekonomski status meren prihodima i/ili stepenom motorizacije) u I koraku formiraju tri grupe putnika:

⁶ U originalnoj formi bicikl i moped su uzeti kao jedan vid prevoza.

1. putnici koji imaju mogućnost izbora,
2. putnici koji mogu da koriste samo javni prevoz i/ili pešačenje odnosno bicikl, i
3. putnici koji mogu da koriste samo putnički automobil i/ili pešačenje odnosno bicikl.

U II koraku se iz 1. grupe putnika (putnici koji imaju mogućnost izbora) na osnovu određenih kriterijuma izdvajaju oni koji koriste jednu od raspoloživih alternativa i pripisuju se već formiranim grupama 2 i 3. Kao kriterijum se u ovom slučaju najčešće uzimaju odnos troškova i/ili vremena putovanja. U poslednjem, III koraku izdvajanjem iz prethodnih grupa dobijaju se skupovi putnika koji koriste javni prevoz, pešačenje i/ili bicikl, i korisnici putničkih automobila. Izlazni rezultati modela su matrice putovanja za svaki od navedenih vidova prevoza, koje se u daljem postupku pripisuju odgovarajućim mrežama.

5.5. RASPODELA TOKOVA NA MREŽE

U prethodnim delovima ovog poglavlja objašnjeni su postupci i metode za utvrđivanje zakonitosti nastajanja putovanja (odnosno kretanja), njihovu raspodelu u prostoru i na vidove prevoza. Poslednju fazu u primeni saobraćajnih modela predstavljaju postupci kojima se rezultati prethodnih faza "pripisuju" mrežama. Ovim postupcima odnosno modelima utvrđuje se raspodela tokova vozila ili putnika na mrežama ili njihovim delovima sa ciljem da se utvrdi da li posmatrane saobraćajnice mogu i sa kakvim efektima da "prihvate" postojeće ili očekivane (planirane) tokove saobraćaja.

Postupci za raspodelu tokova na mreže dele se na one kojima se utvrđuje raspodela tokova na alternativne puteve između jednog para izvorne i ciljne zone, i na one kojima se obuhvataju svi izvori i ciljevi odnosno celokupne mreže na posmatranom području.

Postupci iz prve grupe nastali su u prvobitnim fazama razvoja tehnika planiranja saobraćaja kao potreba da se u slučaju izgradnje novog puta između dva područja utvrdi koji deo saobraćaja će privući novi put. Na osnovu toga analizirana je opravdanost izgradnje novog puta. Tek kasnije razvoj računarske tehnologije omogućio je da se primenjuju složene raspodele tokova na mrežama između većeg broja izvora i ciljeva.

Prilikom izbora putanje između zone izvora i zone cilja osobe koje putuju ne koriste identične puteve što se objašnjava sledećim okolnostima:

- pojedinci različito vrednuju alternative koje su im na raspolaganju, i
- učesnici u saobraćaju, pre svega vozači, u jednom trenutku teže da uspostave ravnotežu između intenziteta saobraćaja i mogućnosti mreže.

U slučaju kada je broj vozila na mreži znatno ispod kapaciteta (viši nivo usluge) individualne preferencije imaju prevagu u izboru putanje. Međutim kako se javlja sve gušći tok, sve veći značaj dobija nastojanje učesnika u saobraćaju da se kreću manje opterećenim delovima mreže čime se zapravo odnos potražnje i ponude (broj vozila na mreži i kapacitet mreže) dovodi u stanje ravnoteže. Ovakva ponašanja su tipična za periode vanvršnog i vršnog opterećenja.

Faktori koji imaju ulogu u izboru puta vezani su za osnovne elemente saobraćajne tehnike odnosno zavise od karakteristika puta, vozila i vozača.

U faktore koji zavise od karakteristika puta ubrajaju se:

- rastojanje između izvora i cilja
- trajanje putovanja
- troškovi putovanja
- vrsta puta
- uslovi saobraćaja.

Rastojanje, trajanje putovanja i troškovi se često kombinuju, većinom kada su u pitanju individualna putovanja, zato što se svaka od njih iskazuje različitim jedinicama. Kada je u pitanju komercijalni transport tada cena po vozila km ili vozila satu obično ima uticaj na izbor putanje. Kada su u pitanju karakteristike koje odražavaju vrstu puta, one se u većini modela zanemaruju, mada u realnosti imaju uticaja. Na primer situacioni i nivelacioni plan puta, rad svetlosne signalizacije i slično, opredeljuju kod vozača i mogu da imaju različito uticaj na izbor puta.

Karakteristike vozila takođe većina modela ne uzima u obzir kada je potrebno izvršiti raspodelu tokova komercijalnih vozila. Tada je najčešće slučaj da se delovi putne i/ili ulične mreže na kojima postoji zabrana za određene kategorije vozila isključuju iz analize. U principu kada se izbor putanje vrši na osnovu vremena i/ili troškova karakteristika vozila dolaze do izražaja na taj način što se brzina i troškovi razlikuju za individualna i komercijalna vozila (putničke automobile i teretna vozila i autobuse). Iz toga proizilazi da raspodelu tokova za putničke automobile i komercijalna vozila treba vršiti odvojeno mrežama koje imaju različite karakteristike,

odnosno otpore (režim i brzinu). Što se tiče karakteristika vozača njih je najteže uključiti u analizu (model). Najčešće se zauzima stav da se u grupnom ponašanju kakav je slučaj sa učesnicima u saobraćaju, prilikom izbora putanje, subjektivni faktori međusobno potiru.

5.5.1. Raspodela tokova na alternativne puteve

Ideja raspodele tokova saobraćaja ponikla je, kao što je rečeno, iz potrebe da se iznađe deo saobraćaja između dve zone za koji bi se moglo očekivati da će koristiti novim putem koji će spajati te dve zone. Kasnije je izbor putanja proširen na četiri, a danas na neograničen broj putanja, odnosno na celokupnu putnu i/ili uličnu mrežu.

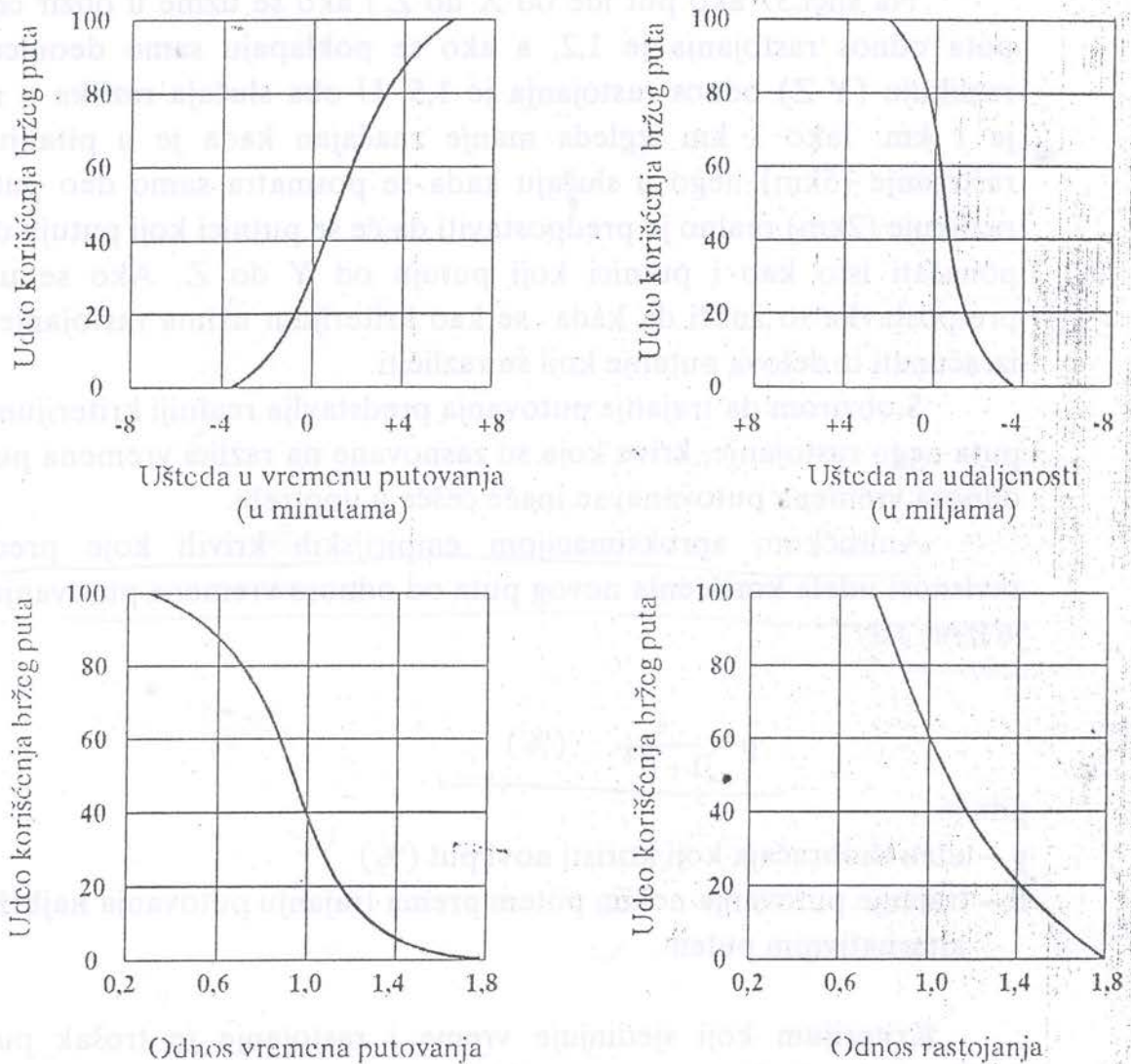
Metode raspodele tokova na alternativne puteve se zasnivaju na upoređenju razlika ili odnosa rastojanja ili vremena putovanja između dva puta koja povezuju posmatrane zone. Ove metode se još nazivaju metodama diverzionih krivih, zato što se koriste empirijski utvrđene krive u grafičkom ili analitičkom obliku za utvrđivanje udela saobraćaja koji koristi alternativni put.

Najčešće se, kada su u pitanju ovakve metode raspodele, koriste kriterijumi:

- A-B : ušteda u vremenu putovanja ✓
- C-D : ušteda u pređenom putu, ✓
- B/A : odnos vremena putovanja, ✓
- D/C : odnos rastojanja (pređenog puta), ✓
- F/E : odnos troškova ✓

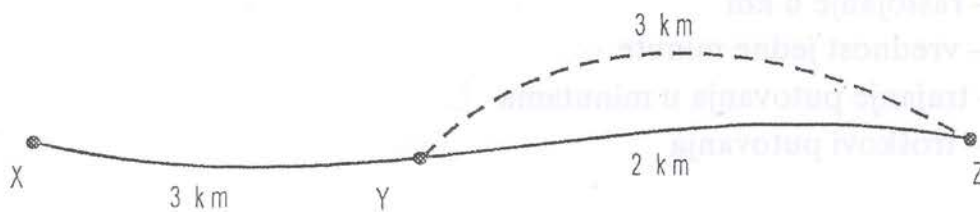
gde su:

- A - vreme putovanja najbržim postojećim putem ✓
- B - vreme putovanja novim putem ✓
- C - rastojanje najkraćim postojećim putem ✓
- D - rastojanje novim putem ✓
- E - troškovi na postojećem putu ✓
- F - troškovi na novom putu ✓



Slika 36. Tipične diverzione krive [4]

Kod ovih modela jedno od pitanja koje se postavlja je kako interpretirati rastojanje po različitim putanjama.



Slika 37. Ilustracija primera za određivanje razlike i odnosa rastojanja

Na slici.37 ako put ide od X do Z i ako se uzme u obzir cela dužina puta odnos rastojanja je 1,2, a ako se poklapaju samo deonice koje se razlikuju (Y-Z) odnos rastojanja je 1,5. U oba slučaja razlika u rastojanju je 1 km. Iako 1 km izgleda manje značajan kada je u pitanju ukupno rastojanje (5km) nego u slučaju kada se posmatra samo deo puta koji se razlikuje (2km) realno je pretpostaviti da će se putnici koji putuju od X do Z ponašati isto kao i putnici koji putuju od Y do Z. Ako se usvoji ova pretpostavka to znači da kada se kao kriterijum uzima rastojanje treba ga izračunati iz delova putanje koji su različiti.

S obzirom da trajanje putovanja predstavlja realniji kriterijum za izbor puta nego rastojanje, krive koje su zasnovane na razlici vremena putovanja i odnosa vremena putovanja su inače češće u upotrebi.

Anlitičkom aproksimacijom empirijskih krivih koje predstavljaju zavisnost udela korišćenja novog puta od odnosa vremena putovanja dobijen je izraz [12]

$$p = \frac{1}{1+R^6} \quad (\%)$$

gde je

p – udeo saobraćaja koji koristi novi put (%) ✓

R – trajanje putovanja novim putem prema trajanju putovanja najbržim alternativnim putem. ✓

Kriterijum koji sjedinjuje vreme i rastojanje je trošak putovanja. Troškovi putovanja mogu se utvrditi izrazom:

$$C = C_d \cdot D + C_t \cdot T + C_p$$

gde su:

C – troškovi korišćenja posmatranog puta ✓

C_d – troškovi po vozila km

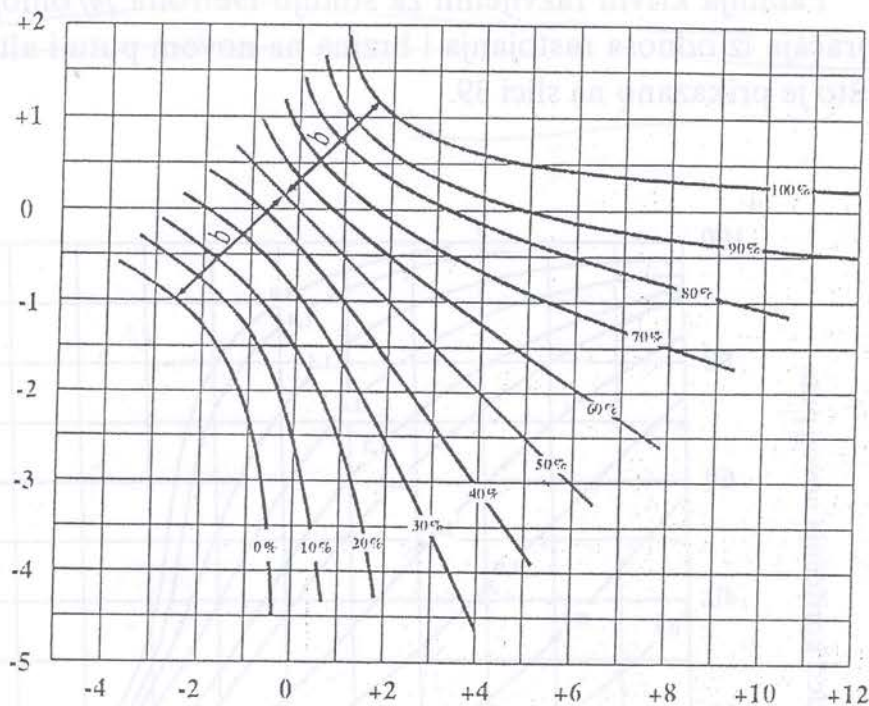
D – rastojanje u km

C_t – vrednost jedne minute

T – trajanje putovanja u minutama ✓

C_p – troškovi putovanja

Familija hiperbola konstruisana matematičkim putem na osnovu istraživanja na autoputevima u Kaliforniji (tzv. kalifornijske krive) [4] pružaju mogućnost da se izvrši raspodela saobraćaja na osnovu uštede u vremenu putovanja i rastojanju.



Slika 38. Krive raspodele saobraćaja u funkciji uštede u vremenu putovanja i rastojanja [4]

Gornje krive se mogu predstaviti izrazom:

$$p = 50 + \frac{50(d + mt)}{\sqrt{(d - mt)^2 + 2b^2}}$$

gde su:

p – udeo korišćenja novog puta (%)

d – razlika rastojanja (u miljama)

t – razlika u vremenu (u minutama)

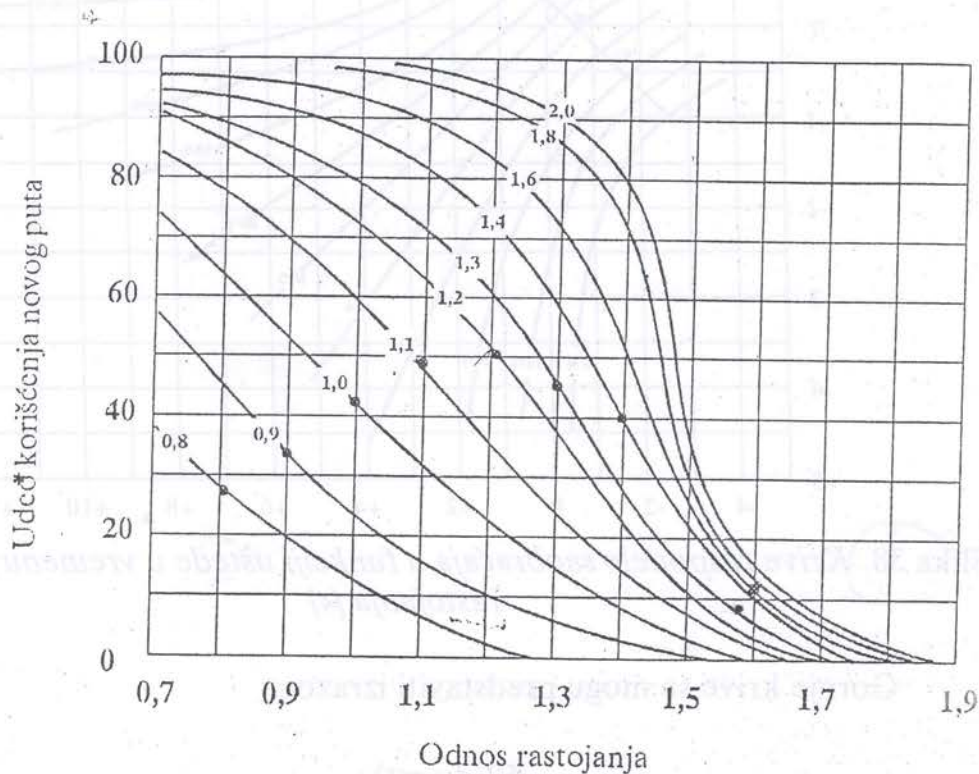
m – parametar kojim se iskazuje odnos vrednosti jedne minute prema vrednosti jediničnog transportnog rada

b – parametar kojim se meri rastojanje vrhova hiperbola.

Vrednosti m i b se kalibrišu za svaku oblast posebno. U Kaliforniji su utvrđene vrednosti $m = 0,5$ i $b = 1,5$ tako da izraz glasi:

$$p = 50 + \frac{50\left(d + \frac{1}{2}t\right)}{\sqrt{\left(d - \frac{1}{2}t\right)^2 + 4,5}} \quad (\%)$$

Familija krivih razvijenih za studiju Detroit [4] omogućuje raspodelu saobraćaja iz odnosa rastojanja i brzina na novom putu i alternativnom putu kao što je prikazano na slici 39.



Slika 39. Diverzione krive kao funkcija odnosa rastojanja i odnosa brzina [4]

Krive se koriste na taj način što se za utvrđeni odnos rastojanja (vrednost na apscisi) i odnos brzina (za svaki odnos brzina data je druga kriva) na ordinati može očitati procenat korišćenja novog puta. Na primer: za odnos rastojanja 1,4 i odnos brzina 1,3 udeo korišćenja novog puta iznosiće 28 % (na slici 39. tačka označena simbolom *).

U studiji regionalnog transporta Los Andelosa – LARTS, [19] za raspodelu tokova na alternativne puteve primenjeni su parametri krive $m = 0,5$ i $b = 2,0$ odnosno:

$$p = 40 + \frac{60 \left(d + \frac{1}{2} t \right)}{\left[\left(d - \frac{1}{2} t \right)^2 + 8 \right]^{\frac{1}{2}}} (\%)$$

Vremenom sa razvojem metoda planiranja i računarske tehnologije broj alternativnih puteva na koje je vršena raspodela tokova, je povećan tako da su se postupno razvile metode koje omogućavaju da se saobraćaj između dveju zona raspodeli na bilo koji broj puteva. Time su stvorene metode raspodele tokova na mreže, odnosno metode pripisivanja tokova saobraćaja na mreže.

5.5.2. Raspodela tokova saobraćaja na mreže

Raspodela tokova saobraćaja na mreže predstavlja postupak kojim se prostorna raspodela putovanja i/ili vozila data u formi izvor-cilj matrice pripisuje odgovarajućim delovima mreže. Ovaj postupak se još naziva i opterećivanje mreže (ili mreža), zato što se kao izlazni rezultati dobijaju vrednosti tokova putnika i/ili vozila između čvorova (raskrsnica), odnosno "opterećenost" mreže.

Pre nego što se pređe na same postupke raspodele tokova na mreže potrebna su još neka objašnjenja u vezi sa pripremom (kodiranjem) mreža.

Kao što je prikazano u tački 3.7.3 za opis saobraćajnih mreža usvojeni su opšti principi iz teorije grafova. Kao i u teoriji grafova tako i u ovom slučaju svaka mreža se može opisati skupom čvorova međusobno spojenih vezama-granama. Pri tome čvorovi predstavljaju raskrsnice i generatore saobraćaja (centroide), a veze (linkovi, grane) predstavljaju deonice tj. delove mreže između dva susedna čvora. Svakoj vezi može se dodeliti jedna ili više numeričkih karakteristika (dužina, brzina, kapacitet itd.), u zavisnosti od metode koja će se primeniti za raspodelu tokova. Svaka veza može biti usmerena ili neusmerena, što zavisi od režima saobraćaja na posmatranoj vezi (jednosmeran, dvosmeran).

Čvorovi u mreži se numerišu prema unapred utvrđenim kriterijumima. Čvorovi koji predstavljaju centroide zona (odnosno izvore ili ciljeve putovanja) čine prvih m elemenata skupa, od n čvorova pri čemu je m broj saobraćajnih zona koje opslužuje posmatrana mreža tako da je $n \geq m$.

Skup veza (deonica) koje se nadovezuju jedna na drugu od izvora do cilja naziva se putanja. Između bilo koje dve zone koje generišu saobraćaj

(izvorni ili ciljni centroid), postoji veliki broj mogućih putanja koje imaju određene karakteristike (vreme putovanja brzina, nivo usluga i slično). Prilikom kretanja od izvora do cilja pojedinac bira jednu od putanja vrednovanjem pojedinih njenih elemenata ili kompletnim sagledavanjem više njih. U cilju definisanja kriterijuma za vrednovanje određuje se "otpor" koji predstavlja skup različitih karakteristika putanje. Ukoliko se zna "otpor" svake od mogućih putanja između određenog izvora i cilja, moguće je izabrati putanju sa najmanjim "otporom" kao najpovoljniju. Kao mera "otpota" može se uzeti rastojanje (pređeni put), vreme utrošeno za savlađivanje putanje, troškovi, brzina ili kombinacija ovih veličina (tzv. generalizovani troškovi), odnosno iste one veličine koje se uzimaju kao kriterijum za raspodelu na alternativne puteve između jednog para zona (tačka 5.5.1).

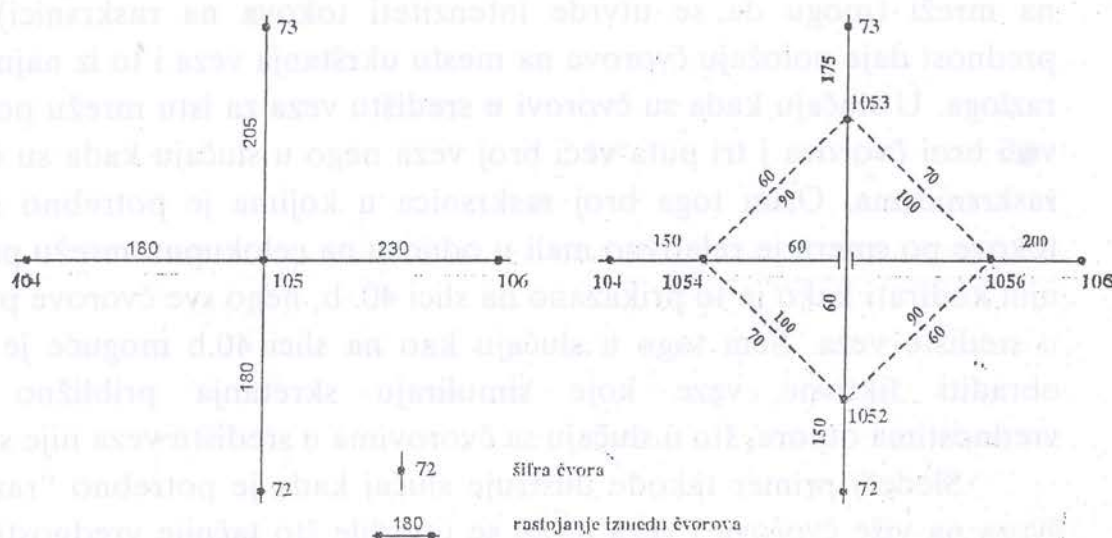
Vrste raspodele tokova na mreže

Kada je u pitanju raspodela tokova na mreže javlja se i potreba da se detaljno utvrdi raspodela tokova saobraćaja u čvoru, odnosno raskrsnici. Raspodela tokova saobraćaja u čvoru raskrsnici, omogućuje da se utvrdi intenzitet saobraćaja za svaki smer posebno na osnovu čega je moguće definisati projektantske elemente (broj i namenu traka, režim saobraćaja, potrebu za kanalisanjem tokova i slično) na osnovu kojih se kasnije rade saobraćajni i građevinski projekti raskrsnice, odnosno čvora.

U ovom slučaju uobičajen način kodiranja mreže mora da se transformiše na način kako je prikazano na sl. 40 b. Da bi se utvrdio intenzitet tokova za svaki smer posebno uvode se fiktivne veze (dijagonale na slici b) sa elementima dužina koje odražavaju otpore u desnom, odnosno levom skretanju.

Na taj način, na primer, iz čvora 106 desno skretanje ka čvoru 73 će se odvijati vezom 1056-1053 dužine (otpota) 70, a levo skretanje iz čvora 73 u čvor 106 vezom 1053-1056 dužine 100. Otpori su dužina veze ili vreme potrebno da se savlada veza odnosno iste jedinice koje se koriste kao mera otpora na vezama koje povezuju realne čvorove.

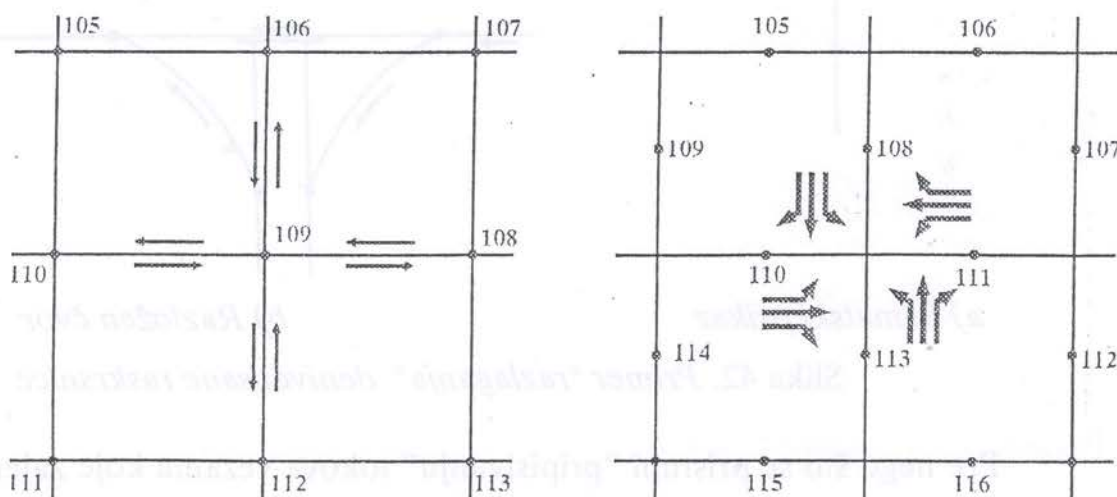
Fiktivni čvorovi (1052, 1053, 1054, 1056) zamenjuju stvarni (realni) čvor 105, a umeću se tako u mrežu da veze između čvorova 104 i 106, odnosno 72 i 73 ostanu sa neizmenjenim elementima (dužina, brzina, kapacitet). Dijagonalne veze se kodiraju sa elementima koji odgovaraju otporima u desnom odnosno levom skretanju.



a) bez raspodele tokova u raskrsnici b) sa raspodelom tokova u raskrsnici

Slika 40. Položaj čvorova prilikom kodiranja mreže

Kada je potrebno utvrditi intenzitet tokova na većem broju čvorova koji pripadaju delu mreže (ili celokupnoj mreži) mreža može da se definiše na taj način što će se čvorovi postaviti u središte veza između raskrsnica kako je to prikazano na sledećoj slici.

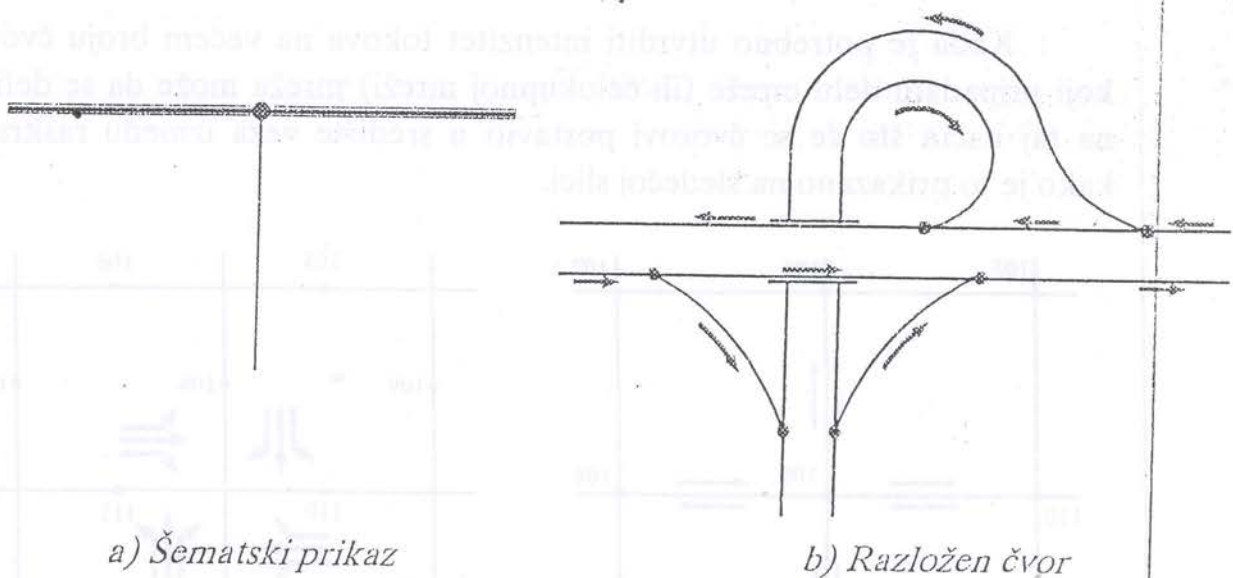


a) bez raspodele tokova u raskrsnicama b) sa raspodelom tokova u raskrsnicama

Slika 41. Položaj čvorova prilikom kodiranja mreže

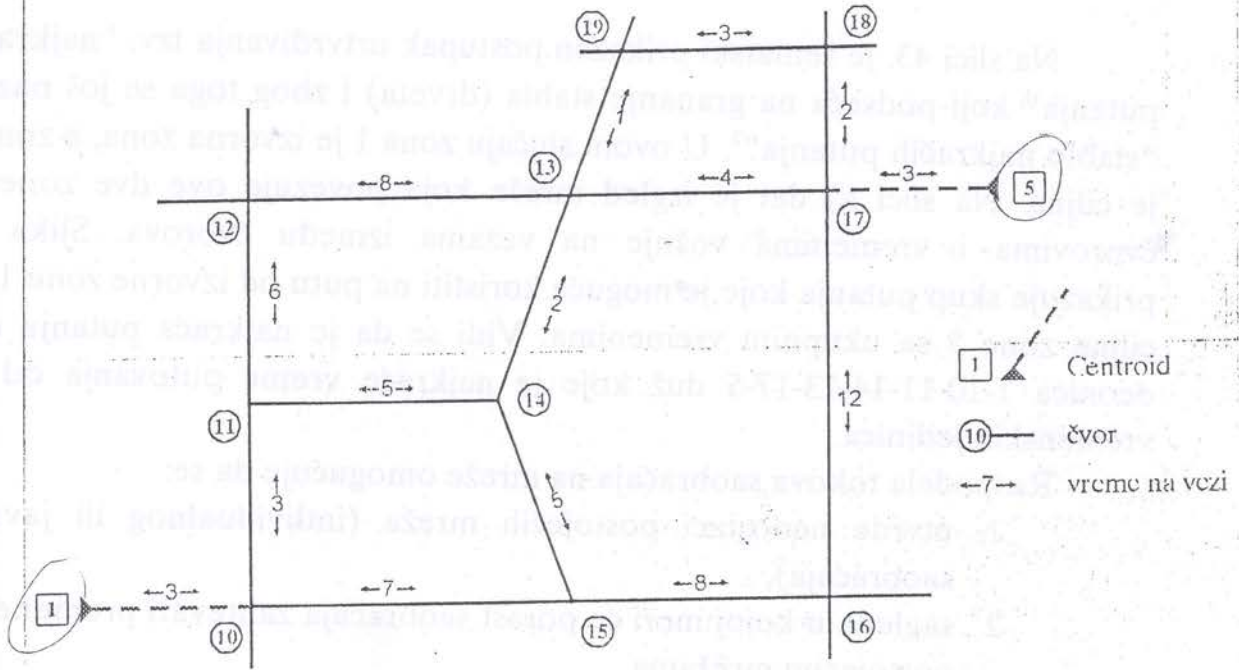
Iako položaj čvorova u središtu veze više odgovara stvarnim uslovima na mreži (mogu da se utvrde intenziteti tokova na raskrsnici) ipak se prednost daje položaju čvorova na mestu ukrštanja veza i to iz najmanje dva razloga. U slučaju kada su čvorovi u središtu veza za istu mrežu potreban je veći broj čvorova i tri puta veći broj veza nego u slučaju kada su čvorovi u raskrsnicama. Osim toga broj raskrsnica u kojima je potrebno simulirati tokove po smeru je relativno mali u odnosu na celokupnu mrežu pa je bolje njih kodirati kako je to prikazano na slici 40. b, nego sve čvorove postavljati u središte veza. Sem toga u slučaju kao na slici 40.b moguće je detaljno obraditi fiktivne veze koje simuliraju skretanja približno realnim vrednostima otpora, što u slučaju sa čvorovima u središtu veza nije slučaj.

Sledeći primer takođe ilustruje slučaj kada je potrebno "razlaganje" čvora na više čvorova i veza da bi se utvrdile što tačnije vrednosti toka na raskrsnici. Reč je o denivelisanoj raskrsnici kod koje je, ako se analiziraju intenziteti tokova po smeru, potrebno uvesti "nove" (fiktivne) čvorove koji omogućuju da se svaki tok posmatra posebno.

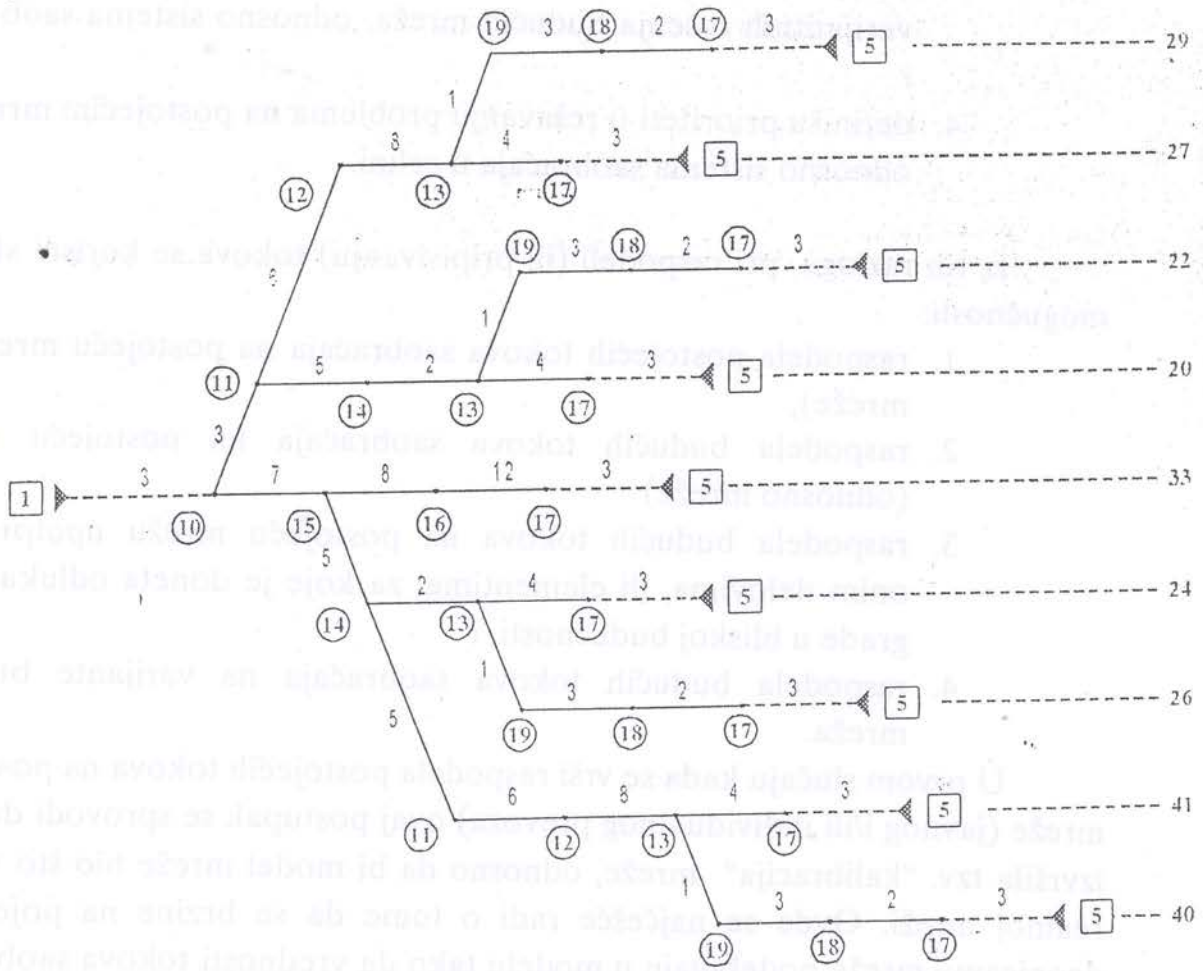


Slika 42. Primer "razlaganja" denivelisane raskrsnice

Pre nego što se pristupi "pripisivanju" tokova vezama koje zajedno sa čvorovima čine mrežu, potrebno je utvrditi putanje koje povezuju svaki od m parova zona (m – broj saobraćajnih zona). U zavisnosti od metode koja će se primeniti može se utvrditi jedna ili više putanja po kriterijumu najmanjeg "otpora".



a) Izgled mreže



b) Stablo putanja

Slika 43. Formiranje "stabla" minimalnih putanja između zona 1 i 5

Na slici 43. je šematski prikazan postupak utvrđivanja tzv. "najkraćih putanja" koji podseća na grananje stabla (drveta) i zbog toga se još naziva "stablo najkraćih putanja"⁷. U ovom slučaju zona 1 je izvorna zona, a zona 5 je ciljna. Na slici a) dat je izgled mreže koja povezuje ove dve zone sa čvorovima i vremenima vožnje na vezama između čvorova. Slika b) prikazuje skup putanja koje je moguće koristiti na putu od izvorne zone 1 do ciljne zone 5 sa ukupnim vremenima. Vidi se da je najkraća putanja duž deonice 1-10-11-14-13-17-5 duž koje je najkraće vreme putovanja od 20 vremenskih jedinica.

Raspodela tokova saobraćaja na mreže omogućuje da se:

1. utvrde nedostaci postojećih mreža (individualnog ili javnog saobraćaja),
2. sagleda u kojoj meri će porast saobraćaja zahtevati promene na postojećim mrežama,
3. dobiju odgovarajuće informacije koje omogućuju izradu varijantnih rešenja budućih mreža, odnosno sistema saobraćaja i
4. definišu prioritete u rešavanju problema na postojećim mrežama odnosno sistema saobraćaja u celini.

Iz tih razloga pri raspodeli (ili pripisivanju) tokova se koriste sledeće mogućnosti:

1. raspodela postojećih tokova saobraćaja na postojeću mrežu (ili mreže),
2. raspodela budućih tokova saobraćaja na postojeću mrežu (odnosno mreže)
3. raspodela budućih tokova na postojeću mrežu upotpunjenu onim delovima, ili elementima, za koje je doneta odluka da se grade u bliskoj budućnosti, i
4. raspodela budućih tokova saobraćaja na varijante budućih mreža.

U prvom slučaju kada se vrši raspodela postojećih tokova na postojeće mreže (javnog i/ili individualnog prevoza) ovaj postupak se sprovodi da bi se izvršila tzv. "kalibracija" mreže, odnosno da bi model mreže bio što verniji realnoj mreži. Ovde se najčešće radi o tome da se brzine na pojedinim deonicama mreže podešavaju u modelu tako da vrednosti tokova saobraćaja na mreži dobijene modelom približno odgovaraju vrednostima utvrđenim

⁷ Engl. minimum path tree.

brojanjem saobraćaja na karakterističnim presecima mreže. Osnovni ulazni podaci za ovaj slučaj raspodele su postojeća matrica vožnji i/ili putovanja i model postojećih mreža (javnog i individualnog saobraćaja).

Kada je u pitanju raspodela budućih tokova saobraćaja na postojeće mreže ona se sprovodi u cilju utvrđivanja u kojoj meri će postojeća mreža moći da prihvati buduće tokove saobraćaja, odnosno da se utvrdi koji uslovi postojeće mreže neće moći da zadovolje buduće zahteve saobraćaja. U ovom slučaju osnovni ulazni podaci su prognozirana matrica (ili matrice) vožnji (ili putovanja) i model postojeće mreže (ili mreža).

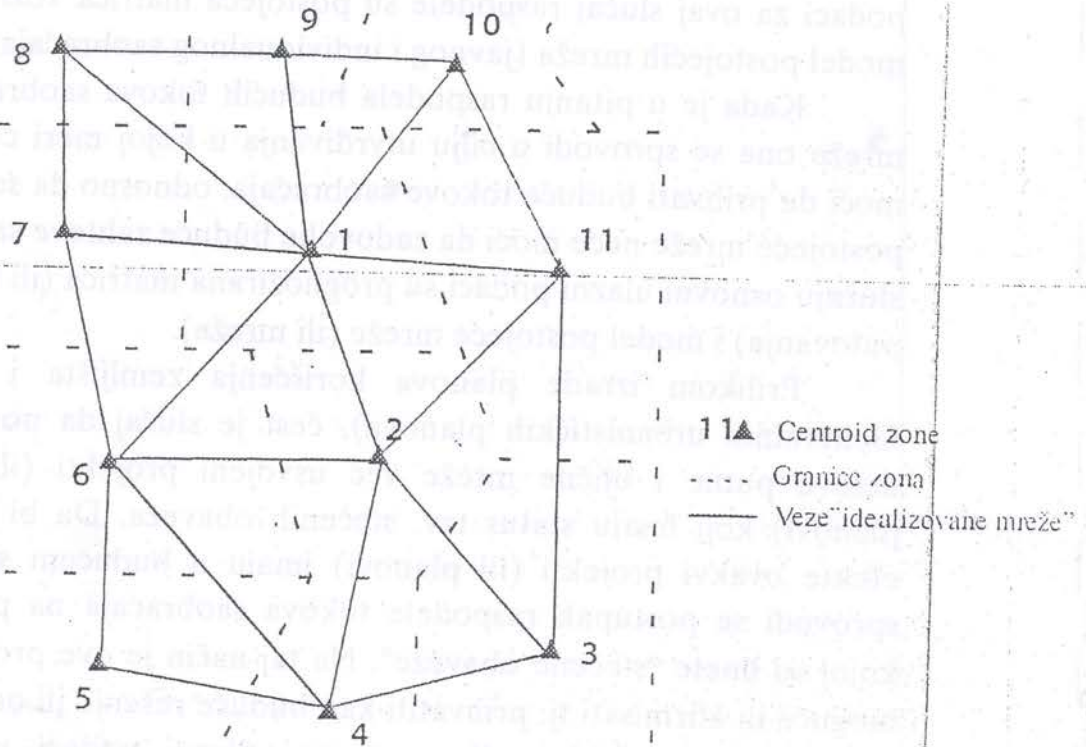
Prilikom izrade planova korišćenja zemljišta i saobraćaja (npr. Generalnih urbanističkih planova), čest je slučaj da postoje za određene delove putne i ulične mreže već usvojeni projekti (ili npr. regulacioni planovi) koji imaju status tzv. stečenih obaveza. Da bi se utvrdilo kakve efekte ovakvi projekti (ili planovi) imaju u budućem sistemu saobraćaja sprovodi se postupak raspodele tokova saobraćaja na postojećoj mreži u kojoj su unete "stečene obaveze". Na taj način je ove projekte (ili planove) moguće ili afirmisati tj. prihvatiti kao buduće rešenje ili odbaciti ako ne daju zadovoljavajuće efekte. Kao osnovni ulazni podaci u ovom postupku pripisivanja uzimaju se buduće matrice putovanja (ili vožnji) i model postojeće mreže u koji su unete izmene na osnovu "stečenih obaveza".

Raspodela budućih tokova saobraćaja na varijante budućih mreža je poslednja karika u lancu saobraćajnih modela. Rezultati ovih raspodela omogućuju:

1. Izbor najpovoljnije varijante mreža odnosno budućeg sistema saobraćaja
2. Utvrđivanje eksploatacionih karakteristika budućeg sistema saobraćaja
3. Izbor i utvrđivanje tehničkih elemenata budućeg sistema saobraćaja, i
4. Definisane prioriteta u realizaciji budućeg (planiranog) sistema saobraćaja.

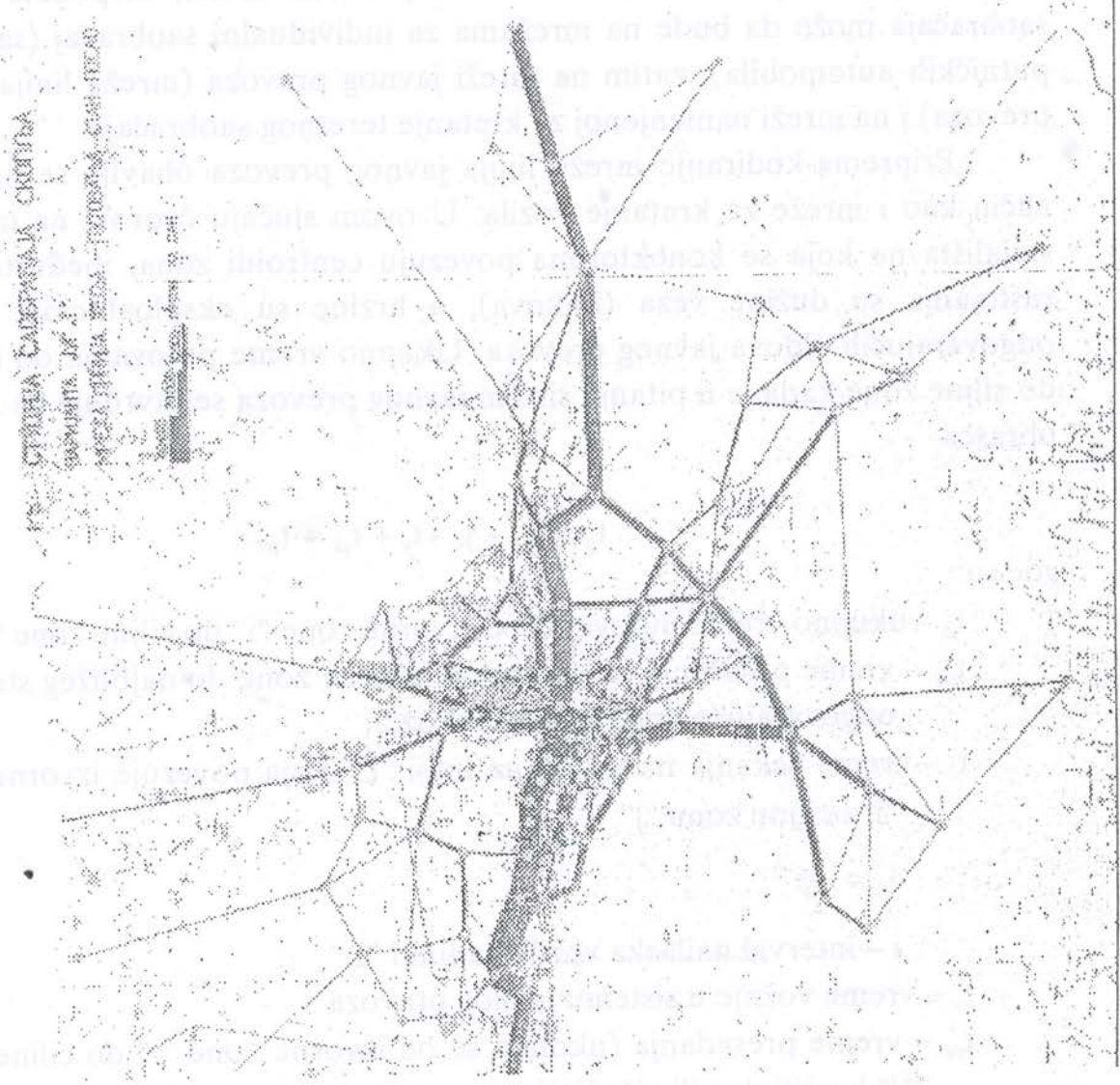
Ulazni podaci za ovaj način raspodele tokova su buduće (prognozirane) matrice putovanja i/ili vožnji i varijante budućih (planiranih) mreža.

Pre nego što se pristupi formiranju varijanti mreža može se pristupiti utvrđivanju osnovnih saobraćajnih koridora. U tu svrhu se koristi raspodela tokova na tzv. "idealizovanoj mreži". Idealizovana mreža predstavlja model mreže koji se dobija kada se centriodi susednih zona međusobno direktno spoje pravolinijskim vezama kao što je prikazano na sl.44.

Slika 44. *Idealizovana mreža*

Idealizovana mreža⁸ je ustvari pojednostavljena mreža koja omogućuje međusobnu povezanost svih zona na posmatranom području ne vodeći pri tom računa o stvarnoj-realnoj mreži. Čvorovi na idealizovanoj mreži su centriodi zona, a rastojanja između centroida, odnosno veze predstavljaju vazdušno rastojanje između centroida susednih zona. Na slici 45. dat je prikaz raspodele tokova putnika na idealizovanoj mreži.

⁸ Engl.: Spider network jer podseća na paukovu mrežu



Slika 45. Opterećenje idealizovane mreže [20]

Već je napomenuto, ali treba i posebno istaći, raspodela tokova saobraćaja može da bude na mrežama za individualni saobraćaj (saobraćaj putničkih automobila), zatim na mreži javnog prevoza (mreža linija javnog prevoza) i na mreži namenjenoj za kretanje teretnog saobraćaja.

Priprema-kodiranje mreže linija javnog prevoza obavlja se na sličan način kao i mreže za kretanje vozila. U ovom slučaju čvorovi na mreži su stajališta na koja se konektorima povezuju centri zona, međustajališna rastojanja su dužine veza (linkova), a brzine su eksploatacione brzine odgovarajućih vidova javnog prevoza. Ukupno vreme putovanja od izvorne do ciljne zone kada je u pitanju sistem javnog prevoza se utvrđuje na osnovu obrasca:

$$t_p = t_{p1} + t_c + t_v + t_{pr} + t_{p2}$$

gde su:

t_p – ukupno vreme putovanja od izvorne zone "i" do ciljne zone "j";

t_{p1} – vreme pešačenja od centroida izvorne zone do najbližeg stajališta odgovarajuće linije javnog prevoza;

t_c – vreme čekanja na vozilo na liniji "L" koja povezuje izvornu zonu "i" i ciljnu zonu "j"

$$t_c = \frac{1}{2} i$$

i – interval nailaska vozila na liniji "L"

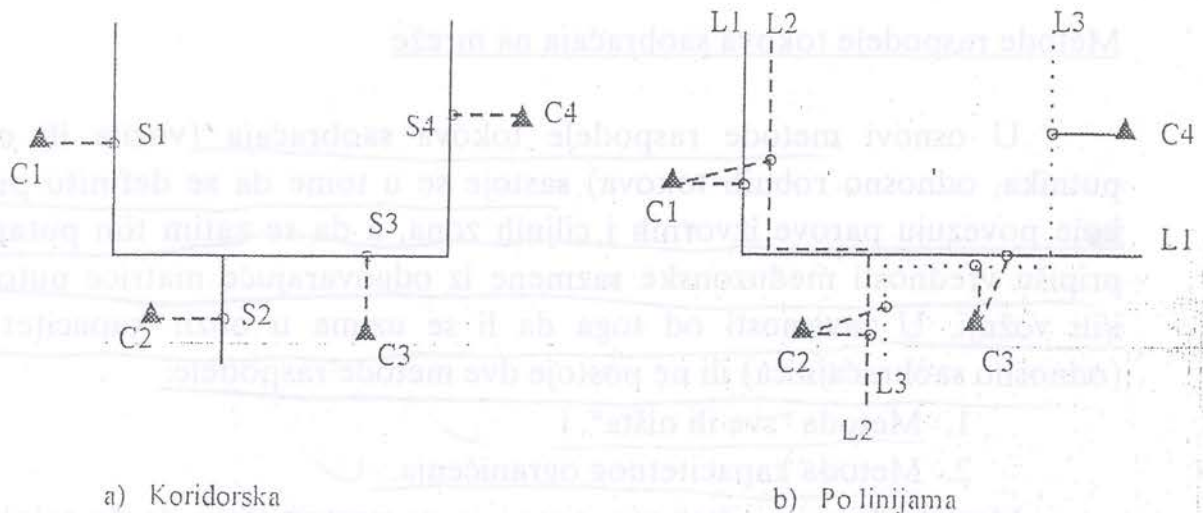
t_v – vreme vožnje u sistemu javnog prevoza :

t_{pr} – vreme presedanja (ukoliko se od izvorne zone "i" do ciljne zone "j" koristi dve ili više linija);

t_{p2} – vreme pešačenja od izlaznog stajališta do centroida ciljne zone "j".

Kao što se vidi priprema (odnosno kodiranje) mreže javnog prevoza zahteva detaljnu analizu elementarnih vremena koja čine ukupno vreme putovanja javnim prevozom.

Raspodela tokova putnika u javnom prevozu može da bude koridorska ili za svaku liniju ponaosob (slika 46).



a) Koridorska

b) Po linijama

Slika 46. Kodiranje mreže javnog prevoza – detalj

Ulazni podaci za raspodelu tokova putnika u javnom prevozu su matrica putovanja javnim prevozom (dobijena modelom vidovne raspodele) i mreža javnog prevoza – koridorska ili linijska. Izlazni rezultati su:

- protok putnika po deonicama i smeru
- ulasci-izlasci po stajalištima
- broj presedanja
- transportni rad iskazan u putničkim kilometrima (pkm)
- transportno vreme u putnik satima (ph)

Za raspodelu tokova teretnih vozila takođe je potrebna odgovarajuća priprema mreže. Ona se sastoji u tome da se iz celokupne mreže koja se koristi za raspodelu tokova putničkih automobila izdvoje oni delovi – deonice na kojima će režimski biti (planirana) zabrana kretanja teretnih vozila. U ovom slučaju ulazne veličine su matrica kretanja – vožnji teretnih vozila i selektovana mreža na kojoj može da se odvija vožnja teretnih vozila.

Poslednjih godina se u gradovima sve veća pažnja posvećuje biciklističkom saobraćaju. U vezi sa tim vrši se i raspodela biciklističkih tokova na mrežu biciklističkih puteva i staza. Priprema mreže vrši se na isti način kao i za raspodelu tokova putničkih automobila (ili teretnih vozila), pri čemu se naravno u obzir uzimaju eksploatacione karakteristike biciklističkog saobraćaja (brzina, odnosno vreme putovanja). U ovom slučaju potrebno je raspolagati matricom biciklističkih vožnji, odnosno prilikom vidovne raspodele potrebno je izdvojiti putovanja koja će se obaviti ovim vidom prevoza.

Metode raspodele tokova saobraćaja na mreže

U osnovi metode raspodele tokova saobraćaja (vozila ili osoba-pasnika, odnosno robnih tokova) sastoje se u tome da se definišu putanje koje povezuju parove izvornih i ciljnih zona, a da se zatim tim putanjama pripišu vrednosti međuzonske razmene iz odgovarajuće matrice putovanja i/ili vožnji. U zavisnosti od toga da li se uzima u obzir kapacitet veza (odnosno saobraćajnica) ili ne postoje dve metode raspodele:

1. Metoda "sve ili ništa", i ✓
2. Metoda kapacitetnog ograničenja. ✓

Metoda "sve ili ništa" zasnovana je na pretpostavci da će celokupan saobraćaj između svakog para zona koristiti tzv. "minimalnu putanju" između odgovarajućeg para zona bez obzira na veličinu protoka i kapacitet veza. Zbog toga je ova metoda i dobila naziv "sve ili ništa"⁹. Kriterijum za izbor "najkraće putanje" može da bude rastojanje, vreme putovanja, ili troškovi putovanja. Postoji i pojam "generalizovani troškovi putovanja" koji objedinjuju sva tri prethodno navedena kriterijuma (rastojanje, vreme i trošak).

Postupak "sve ili ništa" se sprovodi tako što se prvo utvrde minimalne putanje (po nekom od usvojenih kriterijuma) i da se zatim tim putanjama kumulativno pripišu vrednosti putovanja (ili vožnji).

Osnovni nedostatak ove metode sastoji se u tome što pripisane veličine protoka često prevazilaze kapacitet na najopterećenijim delovima mreže. Metoda "sve ili ništa" se danas ređe koristi za raspodelu tokova na putnoj i uličnoj mreži. Primenjuje se za raspodelu tokova na idealizovanoj mreži (tzv. spajder mreži) i za raspodelu tokova putnika na mreži linija javnog prevoza.

Metoda kapacitetnog ograničenja otklanja nedostatke metode "sve ili ništa" na taj način što uzima u obzir kapacitet veza. Zbog toga rezultati koji se dobijaju ovom metodom mogu da odraze realno stanje saobraćajnog opterećenja.

Budući da se kod ove metode u obzir uzima kapacitet veza, potrebno je uspostaviti relacije između veličine protoka, gustine saobraćajnog toka i brzine iz odnosa:

$$q = g \cdot V \quad ; \quad g = \frac{q}{V} \quad ; \quad V = \frac{q}{g} \quad \text{gde su: } \checkmark$$

⁹ Engl. all or nothing

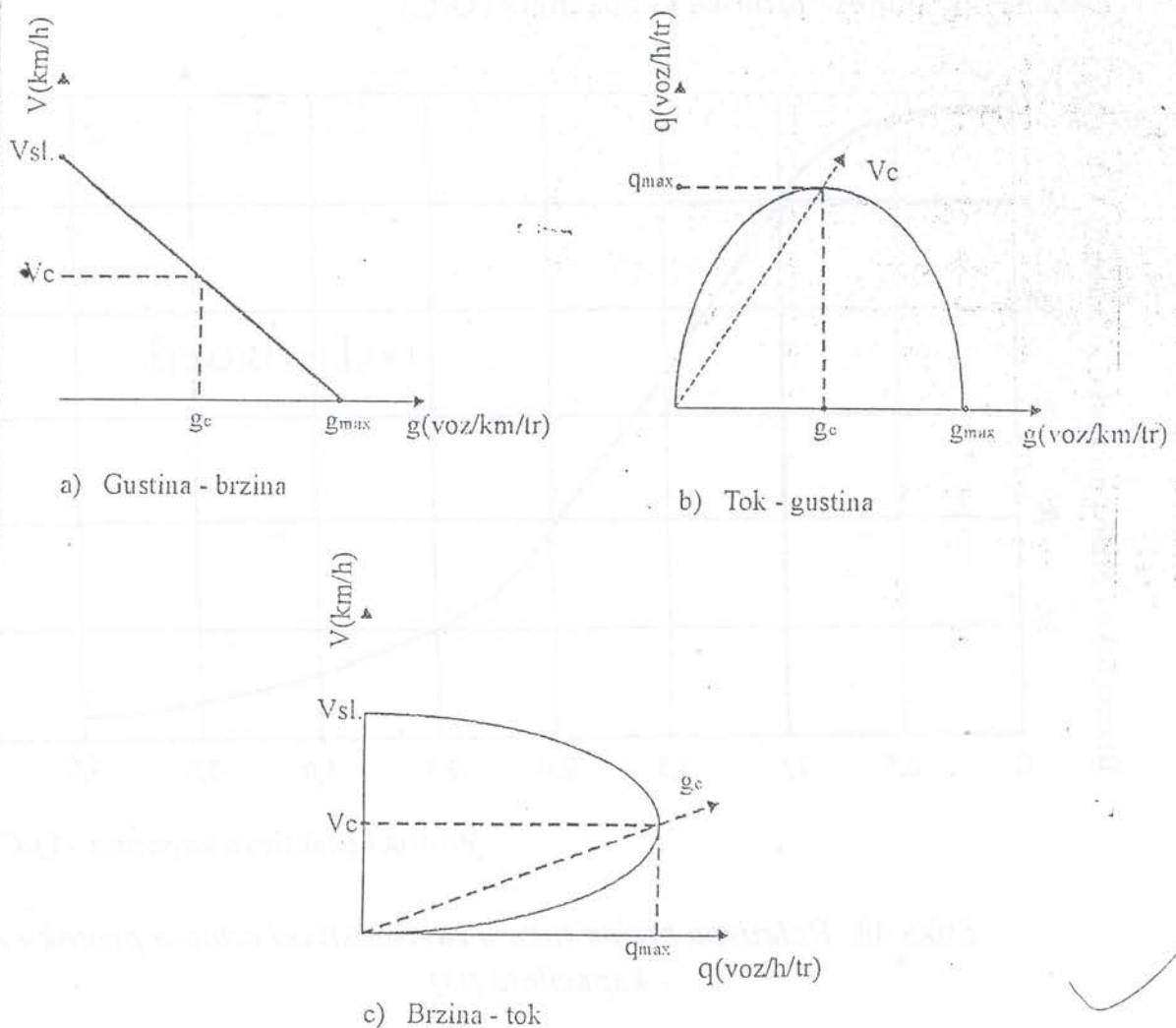
q – protok vozila (vozila/h) ✓

g – gustina toka (vozila/km) ✓

V – prosečna brzina toka (km/h) ✓

Na slici 47. su prikazani dijagrami međuzavisnosti osnovnih pokazatelja saobraćajnog toka na kojima je zasnovan metod raspodele tokova putem ograničenja kapacitetom.

Kao što se vidi (dijagram a) gustina-tok) sa porastom gustine saobraćaja opada brzina toka sve do maksimalne gustine g_{max} pri čemu dolazi do zastoja, odnosno brzina toka $V = 0$. Takođe pri maksimalnoj gustini g_{max} (dijagram b) tok-gustina) protok vozila $q = 0$ zato što se vozila ne kreću ($V=0$). Konačno na dijagramu c) brzina – tok vidi se da se maksimalni protok q_{max} postiže pri brzini pri praktičnom kapacitetu - V_c . Naravno da pri opadanju brzine raste vreme putovanja, odnosno uslovi na mreži se menjaju sa promenom intenziteta saobraćajnog toka.



Slika 47: Međuzavisnost osnovnih pokazatelja saobraćajnog toka [21]

Empirijski je utvrđeno [13] da se vreme putovanja na vezi (linku) u zavisnosti od odnosa protoka i kapaciteta (Q/C) menja po obrascu:

$$t = t_0 [1 + 0.15 (Q/C)^4]$$

gde su :

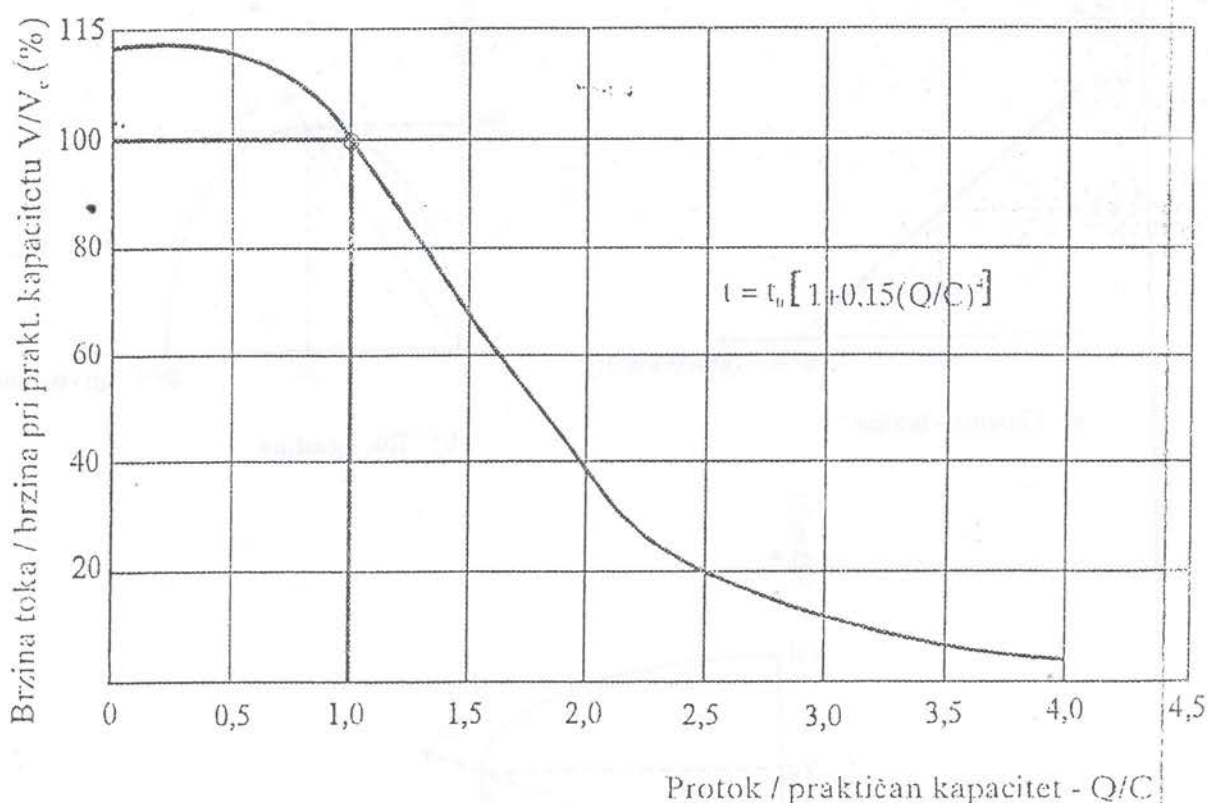
t – prilagođeno vreme putovanja (vožnje) pri kojem se pripisan protok Q može odvijati na posmatranoj vezi (linku)

t_0 – vreme putovanja pri slobodnom toku pri brzini V_{sl} pomnoženo sa 0,87

Q – pripisan (raspodeljen) protok na posmatranoj vezi

C – praktičan kapacitet posmatrane veze

Na slici 48. prikazan je dijagram zavisnosti vremena putovanja (vožnje) od odnosa protoka i kapaciteta (Q/C).



Slika 48. Relativna brzina toka u zavisnosti od odnosa protoka i kapaciteta [13]

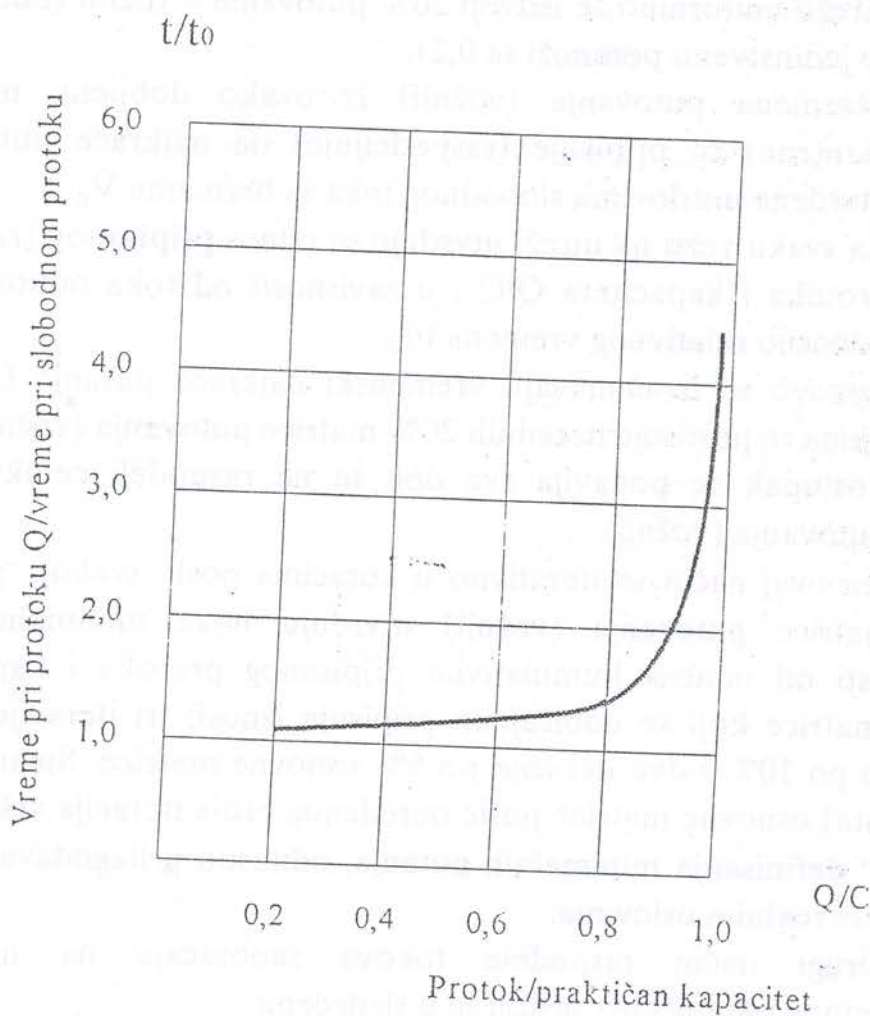
Iz dijagrama na slici 48 se vidi da je pri odnosu $Q/C = 1$ tj. pri protoku koji odgovara kapacitetu relativna brzina $V/V_c = 1:00$, što znači da se

maksimalni protok (Q_{max}) ostvaruje pri brzini pri kapacitetu (V_c) (vidi sl.47 - c).

Ukoliko se gornji izraz podeli sa vremenom putovanja (vožnje) pri slobodnom toku (t_0) dobija se relativno vreme putovanja (vožnje), odnosno:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1 + 0,15(Q/C)^4}{1}$$

koje se može predstaviti dijagramom na slici 49.



Slika 49. Dijagram relativnog vremena putovanja u zavisnosti od odnosa protoka i kapaciteta

Sa dijagrama na sl. 49 uočljivo je da, naprimer, ako je odnos pripisanog protoka Q i kapaciteta C $Q/C = 0,8$, vreme putovanja (t) u odnosu na vreme putovanja pri slobodnom toku (t_0) se uvećava za 1,4 puta, odnosno za 40%. To praktično znači da prvobitno utvrđene minimalne putanje između parova zona pri slobodnom toku (Q_0) sa porastom protoka

tj. odnosa Q/C postaju "sporije" zbog povećanja vremena putovanja, tako da je potrebno utvrditi novu familiju minimalnih putovanja koje su konkurentne prethodnoj.

Simulacija ovog procesa na računaru može se obaviti na sledeći način:

1. Utvrđuju se vremenski najkraće putanje iz svake izvorne zone do svih ciljnih zona (tzv. familija minimalnih putanja).
2. Iz matrice putovanja (vožnji) koja se raspodeljuju (pripisuju) na mrežu uniformno se izdvoji 20% putovanja – vožnji (odnosno matrica se jedinstveno pomnoži sa 0,2).
3. Razmena putovanja (vožnji) iz ovako dobijene matrice (20% razmene) se pripisuje (raspodeljuje) na najkraće putanje koje su utvrđene u uslovima slobodnog toka sa brzinama V_{sl} .
4. Za svaku vezu na mreži utvrđuje se odnos pripisanog (raspodeljenog) protoka i kapaciteta Q/C i u zavisnosti od toka odnos brzina V/V_c odnosno relativnog vremena t/t_0 .
5. Ponovo se izračunavaju vremenski najkraće putanje (kao pod 1) i njima se pripisuje narednih 20% matrice putovanja (vožnji).
6. Postupak se ponavlja sve dok se ne raspodeli celokupna matrica putovanja (vožnji).

Na ovaj način se iterativno u koracima posle svakog "propuštanja" dela matrice putovanja (vožnji) utvrđuju nove minimalne putanje u zavisnosti od odnosa kumulativno pripisanog protoka i kapaciteta veza. Udeo matrice koji se uobičajeno pripisuje iznosi: tri iteracije po 20%, tri iteracije po 10% i dve iteracije po 5% osnovne matrice. Smanjivanje udela (procenta) osnovne matrice posle određenog broja iteracija vrši se u cilju što "finijeg" definisanja minimalnih putanja, odnosno prilagođavanja modelske raspodele realnim uslovima.

Drugi način raspodele tokova saobraćaja na mreže putem kapacitetnog ograničenja sastoji se u sledećem:

1. Utvrđuju se vremenski najkraće putanje iz svake izvorne zone do svih ciljnih zona u uslovima slobodnog toka (V_{sl}).
2. Ovako utvrđenoj familiji minimalnih putanja pripisuju se putovanja (vožnje) iz zone 1 u sve ciljne zone sa kojima zona 1 ima razmenu.
3. Utvrđuju se odnosi Q/C na vezama i definiše nova familija minimalnih putanja.
4. Ovako utvrđenoj familiji minimalnih putanja pripisuju se putovanja (vožnje) sa izvorom u zoni 2 prema svim ciljnim zonama sa kojima zona 2 ima razmenu.

5. Postupak se ponavlja za sve ostale zone tako da u ovom slučaju je broj ponavljanja jednak broju saobraćajnih zona što znatno usporava proceduru.

Bez obzira o kojoj se metodi raspodele tokova saobraćaja na mreže radi osnovni izlazni rezultati su:

- kumulativan protok vozila i putnika na vezi (između dva čvora) po smeru iskazan u broju vozila u određenoj vremenskoj jedinici (obično na sat ili na dan), odnosno broju putnika po smeru na sat ili dan, kada je u pitanju javni prevoz.
- transportni rad po kategorijama saobraćajnica iskazan u vozilakilometrima na sat (ili na dan), odnosno kada je u pitanju javni prevoz putnikakilometara na sat (ili dan) po linijama, odnosno vidovima javnog prevoza (autobus, trolejbus, šinski sistemi itd.), i
- transportno vreme iskazano u vozilasati na sat ili na dan za automobilski saobraćaj, odnosno putniksati na sat ili na dan, za sistem javnog prevoza.

Transportni rad vozila predstavlja veličinu koja se dobija kao proizvod protoka vozila i dužine veze na kojoj se taj protok pojavljuje, odnosno:

$$TR_i = Q_i \cdot l_i \text{ (vozkm/v.j.)}$$

$$UTR_k = \sum_{i=1}^r Q_{ik} \cdot l_{ik} \text{ (vozkm/v.j.)}$$

gde su:

TR_i – transportni rad na vezi (linku) "i"

Q_i – protok vozila na vezi "i" u određenoj vremenskoj jedinici (sat,dan)

l_i – dužina veze u (km) na kojoj se odvija protok Q_i

UTR_k – ukupan transportni rad na saobraćajnicama kategorije "k" (npr. gradske magistrale)

Q_{ik} – protok vozila na vezi "i" koja pripada kategoriji saobraćajnice "k" u određenoj vremenskoj jedinici

l_{ik} – dužina veze "i" koja pripada "k"-toj kategoriji saobraćajnica na kojoj se odvija protok vozila Q_{ik}

r – broj veza (linkova) u kategoriji saobraćajnica "k"

Na isti način se utvrđuje i transportno vreme odnosno:

$$TH_i = Q_i \cdot t_i \text{ (vozilasati/v.j.)}$$

$$UTH_k = \sum_{i=1}^r Q_{ik} \cdot t_{ik} \text{ (vozilasati/v.j.)}$$

gde su:

TH_i – broj vozilasati na vezi "i" u određenoj vremenskoj jedinici (sat, dan)

Q_i – protok vozila na vezi "i" u posmatranoj vremenskoj jedinici

t_i – vreme iskazano u satima koje je potrebno da se savlada dužina veze "i"

UTH_k – ukupno transportno vreme na delu mreže koja pripada kategoriji "k"

Q_{ik} – protok vozila na vezi "i" koja pripada kategoriji "k" u posmatranoj vremenskoj jedinici

t_{ik} – vreme koje se utroši na savlađivanje deonice "i" kategorije "k"

r – broj veza koje pripadaju kategoriji saobraćajnica "k"

Na osnovu ovih veličina, transportni rad i transportno vreme, dobijaju se izvedene veličine koje predstavljaju prosečnu dužinu vožnje i prosečno trajanje putovanja iz relacija:

$$l_{srv} = \frac{\sum_{k=1}^s UTR_k}{BV} \text{ (km)}$$

$$t_{srv} = \frac{\sum_{k=1}^s UTH_k}{60 \cdot BV} \text{ (min)}$$

gde su:

l_{srv} – srednja dužina vožnje za posmatranu kategoriju vozila (putnički automobili, teretna vozila)

t_{srv} – srednje vreme vožnje za posmatranu kategoriju vozila u minutama

$\sum_{k=1}^s UTR_k$ – ukupan transportni rad na celokupnoj mreži u vozilakm

$\sum_{k=1}^s UTH_k$ – ukupno transportno vreme na celokupnoj mreži u vozilasatima

BV – ukupan broj vožnji između izvornih i ciljnih zona (zbir svih elemenata matrice koja se raspodeljuje na mrežu)

K – broj kategorija saobraćajnica $K = 1$ do S

Na isti način utvrđuje se transportni rad i transportno vreme u sistemu javnog prevoza putnika, sa tim što se transportni rad dobija kao proizvod međustajališnog rastojanja i protoka putnika između dva stajališta i iskazuje se u putničkim kilometrima (pkm). U ovom slučaju transportno vreme se dobija kao proizvod protoka putnika između dva stajališta i vremena vožnje između ta dva stajališta, a iskazuje se u putniksatima (ph). Na sličan način kao kad je u pitanju raspodela tokova vozila, i kod raspodele tokova putnika u javnom prevozu utvrđuje se srednja dužina putovanja – l_{sr} (km) i srednje vreme putovanja – t_{sr} (min).

Prilikom raspodele tokova putnika u javnom prevozu kao izlazne veličine dobijaju se i vrednosti ulazaka i izlazaka putnika po stajalištima i broj putnika koji presedaju. Ovo su takođe podaci koji se koriste za analizu eksploatacionih karakteristika sistema koji se planira.

Savremeni softverski paketi koji se danas koriste u oblasti planiranja saobraćaja kao što su PTV VISION, TRIPS, EMME 2¹⁰, imaju veoma široke mogućnosti za analizu raspodele tokova na mreže. To omogućuje da se u procesu iznalaženja najprihvatljivijih rešenja planiranog sistema saobraćaja izgradi veliki broj varijanti i podvarijanti čijim međusobnim poređenjem i kombinovanjem može da se definiše rešenje koje najviše odgovara postavljenim ciljevima i kriterijumima.

¹⁰ Detaljnije informacije o ovim softverskim paketima mogu se dobiti preko interneta na adresama koje su date u spisku literature.