PROBABILISTIČKI MODELI PROPADANJA KOLOVOZA

Dragana Zeljić, dipl.građ.inž.[1]
Doc. dr Igor Jokanović, dipl.građ.inž.[2]
UDK: 625.04
DOI: 10.14415/zbornikGFS22.016

Rezime: *Kolovozi su izloženi ponavljanju saobraćajnog opterećenja i uticaju okoline, što vremenom dovodi do deformacija i oštećenja. Predviđanje propadanja kolovoza je bitno kako bi se odredili parametri za projektovanje kolovoznih konstrukcija, kao i radi izbora odgovarajućeg načina održavanja i planiranja većih intervencija (rehabilitacija ili rekonstrukcija). Predviđanje propadanja kolovoza je moguće ostvariti primenom determinističkih i probabilističkih metoda što zavisi od modela simulacije starenja kolovoza. Ovaj rad se bavi predviđanjem propadanja kolovoza korišćenjem probabilističkih metoda na nivou mreže, i to pomoću matrice prelaznih verovatnoća i optimizacijom ciljne funkcije. Glavni razlog zbog koga je ovaj postupak slabo korišćen od strane inženjera u prošlosti, je teškoća određivanja prelazne verovatnoće (tj. verovatnoće da će put na određenom nivou propadanja „preći“ na sledeći nivo propadanja) iz empirijskih podataka ili iz posmatranja. Kao mogući odgovor na ovaj problem, u radu će biti opisane metode za određivanje prelaznih verovatnoća, izabrani optimumi i date preporuke za njihovu upotrebu.*

Ključne reči: *Stanje kolovoza, propadanje kolovoza, probabilističke metode, Markovljevi lanci, optimizacija, prelazne verovatnoće.*

1. UVOD

Namena određene infrastrukture, pa samim tim i puteva, je da pružaju unapred definisan nivo usluge svojim vlasnicima/upravljačima i korisnicima. Nivo kvaliteta, odnosno usluge novoizgrađene konstrukcije uglavnom ne može da ostane konstantan tokom vremena i opada kroz životni vek.

Kolovozi, kao završni i najskuplji elementi puteva, su izloženi ponavljanju saobraćajnog opterećenja i uticaju okoline, što vremenom dovodi do deformacija i oštećenja. Predviđanje propadanja kolovoza je bitno kako bi se odredili parametri za projektovanje kolovoznih konstrukcija, kao i radi izbora odgovarajućeg načina održavanja i planiranja većih intervencija (rehabilitacija ili rekonstrukcija).

Metode za predviđanje propadanja kolovoza mogu biti široko kategorizovane u determinističke i probabilističke zavisno od upotrebljene metode za simulaciju starenja

[1] Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Bulevar vojvode Stepe Stepanovića 77, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, e-mail: dzeljic@agfbl.org

[2] Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Republika Srbija, e-mail: jokanovici@gf.uns.ac.rs

kolovoza. Deterministički modeli su oni za koje je stanje predviđeno kao tačna vrednost na osnovu matematičkih funkcija posmatrane ili izmerene dotrajalosti. Probabilistički modeli, s druge strane, predviđaju stanje kao verovatnoću pojave iz oblasti mogućih stanja kolovoza [2], [5].
Na projektnom nivou, probabilistički modeli mogu biti upotrebljeni kako bi se predvidela verovatnoća pojave određene dužine puta koji je u konkretnom stanju u nekom trenutku vremena. Na nivou mreže, probabilistički modeli se upotrebljavaju za predviđanje stanja mreže puteva i prikazuju rezultate kao dužinu mreže u oblasti određenog stanja [7]. Ovi modeli se uobičajeno zovu Markovljevi modeli predviđanja i prilično uspešno se koriste na nivou mrežnog predviđanja stanja kolovoza. Markovljev model za predviđanje propadanja kolovoza pretpostavlja da ako je moguće predvideti stanje kolovoza u trenutku t_1, onda stanje kolovoza u trenutku t_2 nije tačno poznato, osim u probabilističkim uslovima [6].
Neke od prednosti korišćenja Markovljevih modela su: mogućnost korišćenja iskustava inženjera u određivanju matrice prelaznih verovatnoća, raspodela verovatnoća očekivanih vrednosti zavisne promenljive (buduće stanje kolovoza) sa naznakom deonica koje će pokazati različito ponašanje u budućnosti, razmatranje trendova ponašanja na osnovu terenskih zapažanja bez obzira na nelinearne promene tokom vremena i jednostavnost uključivanja rezultata i zaključaka terenskih merenja u modele predviđanja. Međutim postoje i određeni nedostaci, kao što je nemogućnost povezivanja sa fizičkim uzrocima propadanja i uključivanja starenja kolovoza (reološke karakteristike bitumena) u prelazne verovatnoće. Glavni razlog zbog koga je ovaj metod slabo korišćen od strane inženjera u prošlosti, je teškoća određivanja prelazne verovatnoće (tj. verovatnoće da će put na određenom nivou propadanja „preći“ na sledeći nivo propadanja) iz empirijskih podataka ili iz posmatranja. Kao mogući odgovor na ovaj problem, u radu su opisane tri metode za određivanje prelaznih verovatnoća, izabrani optimumi i date preporuke za njihovu upotrebu.

2. METODOLOGIJA

Modeli predviđanja se generalno koriste da bi se prognozirala promena stanja u određenom periodu vremena u budućnosti. Model je jednostavna šema kako će se određeni pokazatelj, u ovom slučaju stanje kolovoza, menjati kada je izložen određenim uslovima, a ovde su to karakteristike slojeva kolovozne konstrukcije, opterećenja kojima će biti izložena konstrukcija i okolina u kojima se odvija opterećivanje.
Markovljev model predviđanja je stohastički (slučajan) proces i poseduje tri ograničenja: (i) proces je diskretan u vremenu; (ii) proces bi trebalo da ima prebrojiv ili konačan skup stanja; (iii) proces bi trebalo da zadovolji „Markovsko svojstvo“. Markovsko svojstvo ili svojstvo zaboravljivosti je zadovoljeno ako buduće stanje procesa zavisi od njegovog sadašnjeg stanja, ali ne i od njegovih prošlih stanja [8]. Stohastički proces, u svojoj primeni za predviđanje propadanja kolovoza, zadovoljava Markovsko svojstvo ako je buduće stanje mreže zavisno od sadašnjeg stanja mreže, ali ne i od njegovog prošlog stanja. Moguće je pokazati da bi se lanac Markova mogao koristiti u određivanju propadanja kolovoza kako sledi:

- propadanje kolovoza je kontinualno u vremenu; međutim, kako bi bilo predočeno diskretno u vremenu, stanje putne mreže se analizira u određenom trenutku u vremenu;

- skup stanja, tj. broj mogućih ishoda, je beskonačan; međutim, u stvarnosti, skup stanja je definisan kao konačan broj fiksiranih klasa stanja za određeno oštećenje koje se razmatra;
- u propadanju kolovoza se pretpostavlja da je zadovoljeno Markovsko svojstvo.

Stanje kolovoza se može modelirati stacionarnim ili nestacionarnim lancima Markova. U slučaju stacionarnih lanaca, smatra se da će putna mreža uvek propadati sledeći prelazne verovatnoće jedne jedine prelazne matrice. Ako je obrazac propadanja određene putne mreže sklon tome da se promeni u određenom trenutku t u vremenu, proces propadanja može biti modeliran nestacionarnim lancima. Ovo podrazumeva upotrebu različitih prelaznih matrica pre i posle trenutka t. U ovom slučaju, vektor stanja u t će postati početni vektor za drugi lanac, koji će operisati sa drugom prelaznom matricom. Ovaj način uređenja se može obavljati koliko god puta je potrebno [7]. Diskretni lanci Markova se smatraju stalnim tj. stacionarnim ili homogenim u vremenu ako je verovatnoća prelaska iz jednog stanja u drugo nezavisna od vremena u kome se taj prelaz odigrava. Početno stanje bilo kog procesa može biti opisano početnim vektorom $a_0=(\alpha_1,\alpha_2,...,\alpha_n)$. Koristeći analogiju propadanja kolovoza, početni vektor označava verovatnoće tekućeg stanja mreže definisanih kao proporcije u svakoj klasi stanja. Početni vektor treba da zadovolji uslov da suma svih α_i bude jednaka 1 i da sve vrednosti moraju da budu nenegativne. Da bi se modeliralo propadanje kolovoza tokom vremena, potrebno je postaviti matricu prelaznih verovatnoća, označenu sa P. Opšta forma matrice je:

$$P=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Ova matrica sadrži sve informacije potrebne da bi se modeliralo kretanje procesa između stanja. Prelazne verovatnoće p_{ij} označavaju verovatnoću prelaska dela mreže u stanju i u stanje j, u jednom radnom ciklusu. Radni ciklus kod propadanja kolovoza se odnosi na jednu godinu degradacije usled saobraćaja i prirodnih faktora. Slično početnom vektoru, svaka matrica prelazne verovatnoće treba da zadovolji uslov da suma svih p_{ij} u svakom redu treba da bude jednaka 1 i da sve vrednosti moraju da budu nenegativne.

U matričnom obeležavanju, raspodela verovatnoće stanja procesa u određenom trenutku, npr. t=1, je data sa:

$$a_1=a_0\cdot P^1 \tag{1}$$

Slično, raspodela verovatnoće stanja procesa u bilo kom vremenu t može da bude sračunata prema:

$$a_t=a_0\cdot P^t \tag{2}$$

Propadanje stoga može biti modelirano korišćenjem prethodne jednačine, gde je a_t raspodela stanja u vremenu t, a_0 raspodela stanja u vremenu 0, i to je početni vektor, dok je P^t matrica prelazne verovatnoće na stepen t, što je proteklo vreme u godinama.

Još tri uslova se primenjuju na proces kada se on koristi za simuliranje propadanja kolovoza. Prvi, $p_{ij}=0$ za i>j, označava činjenicu da se stanje kolovoza ne može popraviti

bez primene nekog tretmana. Drugi, p_{nn}=1, označava činjenicu da kolovozi koji su dostigli svoje najgore stanje ne mogu dalje propadati. Treći uslov ne dozvoljava propadanje za više od jednog stanja u jednom radnom ciklusu, i obično se koristi kod modeliranja propadanja kolovoza.
Tada matrica P izgleda:

$$P=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Definisanje p_{ij} u matrici prelazne verovatnoće je uobičajeno korišćenjem jednog od dva načina [7]. Standardni pristup je da se iz istorijskih podataka posmatra način na koji putna mreža propada tokom vremena i da se isti koristi kako bi se procenilo p_{ij} koristeći sledeću formulu:

$$p_{ij}=\frac{N_{ij}}{N_i} \tag{3}$$

gde je N_{ij} broj deonica puta u mreži koje su prešle iz stanja i u stanje j tokom jednog radnog ciklusa; N_i ukupan broj deonica puta koje su započele godinu u stanju i. Odnos može da varira od godine do godine, pa je zato potrebno odrediti prosečnu vrednost za svako p_{ij} da bi se obezbedila tačnost modela. U slučaju da nije dostupan dovoljan broj pouzdanih istorijskih podataka, onda grupa iskusnih inženjera može proceniti p_{ij}.
Tri metode su testirane na generisanom skupu podataka posebno utvrđenih za ovu svrhu. Ove tri metode za procenu prelaznih verovatnoća su optimizirane korišćenjem nelinearnog optimizacionog algoritma Solver u računarskom programu MS EXCEL.
Stanje mreže za skup podataka je predstavljeno na skali od 0 do 100, gde 100 predstavlja savršeno stanje i suprotno, nula predstavlja totalno propadanje. Skup podataka simulira godišnje prikupljene podatke o stanju na 30 mesta neke putne mreže tokom perioda od 20 godina. Broj odabranih položaja za uzimanje podataka je baziran na činjenici da se sa uzorkom od oko 30 postiže veoma dobra procena standardne devijacije. Podaci o stanjima na 30 položaja obično prate normalnu raspodelu. Ovo se može podržati studijama u kojima se došlo do zaključka da prognoziran iznos ekvivalentnog jednoosovinskog opterećenja na kolovoz, uz dodatak ostalim projektnim promenljivima, treba uzeti kao slučajne promenljive sa normalnom raspodelom [1], [4].
Skup podataka o stanjima mreže predstavlja potpuno slučajan tempo propadanja. Trideset vrednosti o stanju mreže za svaku godinu je grupisano u 10 klasa, svaka je širine 10, kako je prikazano u Tabeli 1.

Tabela 1. Klase stanja za skupove podataka

klasa stanja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
donja granica	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
gornja granica	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10

Na ovaj način se dobija raspodela stanja a_0' do a_{20}' koje predstavljaju originalne podatke. Svaki skup podataka je takođe izložen regresionoj analizi baziranoj na metodi najmanjih kvadrata. Rezultujuća regresiona jednačina y(t), je uzeta kao deterministički model. Devijacija σ^2, za svaku godinu je takođe izračunata iz originalnih podataka.

Raspodela osmotrenih stanja u nultoj godini određuje početni vektor za proces a_0. Raspodele a_t za godine t=1÷20 su izračunate korišćenjem jednačine (2). Za stacionarne procese je jedna matrica derivirana za svih 20 godina, a za nestacionarne procese je jedna prelazna matrica derivirana za godine 1 do 10, a druga za godine 11 do 20. Vektor a_{10}, dobijen na osnovu prve prelazne matrice kod nestacionarnih procesa, je korišćen kao početni vektor za proračun sa drugom matricom. Na ovaj način su analizirani i stacionarni i nestacionarni lanci.

Prelazne verovatnoće p_{ij} u matrici P u jednačini (2) su dobijene optimizacijom ciljne funkcije, koja je posebna za svaki od tri ispitivane metode. Ograničenja nametnuta u procesu optimizacije znače da dobijena prelazna matrica dozvoljava samo prelaz iz jedne klase stanja u sledeću tokom bilo kog radnog ciklusa u trajanju od jedne godine. Ova pretpostavka je široko korišćena u Markovskom modeliranju predviđanja propadanja kolovoza i ima dodatnu korist u smanjenju vremena računanja.
Kada se a_t dobije, moguće je izračunati prosek stanja $\bar{y}(t)$ i devijaciju σ^2. Prosek se računa korišćenjem sledeće jednačine:

$$\bar{y}(t)=a_t \cdot c \qquad (4)$$

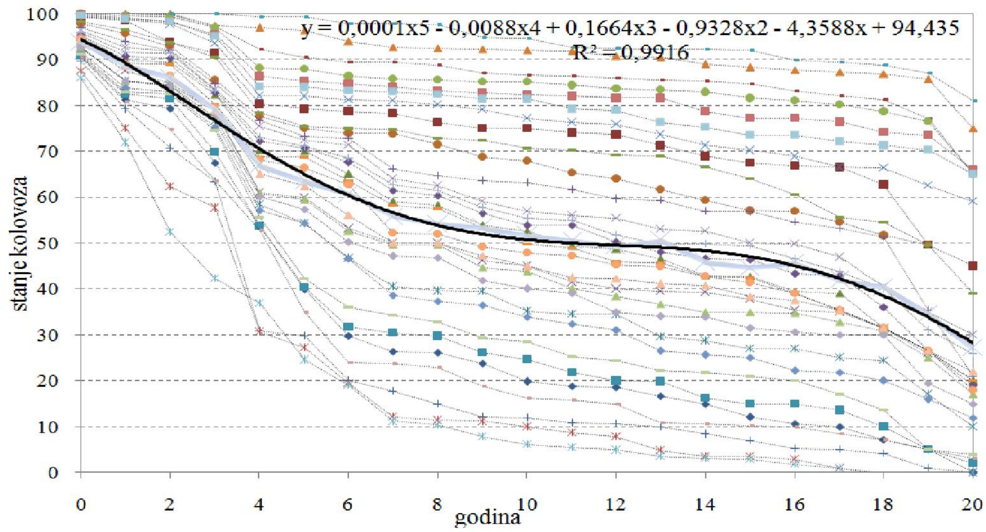
gde je c vektor reprezentativnih vrednosti klasa tj. vektor srednjih tačaka klasa stanja. Devijacija je izračunata korišćenjem sledeće jednačine:

$$\sigma_t^2=\sum\left(c_i^2 \cdot \alpha_{ti}\right)-\bar{y}(t)^2 \qquad (5)$$

gde su c_i i α_{ti} elementi vektora c i a_t.
Kao rezime postupka, skup podataka je opisan sa tri parametra: vrednost regresione jednačine y(t) za svako t, devijacija originalnih podataka σ^2 i raspodela stanja originalnih podataka a_t'. U isto vreme, prosek stanja $\bar{y}(t)$ i devijacija su izračunati iz raspodele a_t, dobijene korišćenjem prelaznih verovatnoća. Da bi se odredio relativan uspeh svake od metoda u simuliranju obrasca propadanja kolovoza, prosečno stanje $\bar{y}(t)$ za svako t, devijacija i raspodela a_t, izračunati pomoću prelaznih verovatnoća su upoređivani sa y(t) za svako t, devijacijom i raspodelom a_t' koje su izračunate iz originalnih podataka. U nastavku je opisano stvaranje skupa podataka korišćenog u analizi, a zatim sledi opis metoda korišćenih za procenu prelaznih verovatnoća.

3. GENERISANJE SKUPA PODATAKA

Skup podataka je generisan kako bi se testirale tri metode procene prelaznih verovatnoća. Generisan je 21 niz od po 30 podataka, za svaki vremenski presek po 30 podataka (od 0 do 20 godine), pomoću funkcije RAND u programu MS EXCEL i inverznom normalnom raspodelom (funkcija NORMSINV). Za svaki vremenski presek je usvojena srednja vrednost (μ) i standardna devijacija (σ).



Slika 1. Generisani skup podataka - rasipanje podataka i regresiona kriva

Skup podataka je pripremljen počevši od stanja kolovoza na 30 mesta u mreži između 80 i 100, uz smanjenje za svaku godinu. Obrazac propadanja za ovaj skup podataka je uzet sasvim proizvoljno. Svako od mesta u mreži može iskazati bilo koji trend propadanja, kao da nijedan od njih ne pripada istoj mreži. Cilj je bio da se stvori skup podataka koji simulira malo verovatan fenomen mreže u kojoj putevi propadaju prateći potpuno različite trendove propadanja [7]. Ovaj skup podataka je predstavljen na slici 1, kao i regresiona kriva dobijena regresionom analizom.

4. METODE KORIŠĆENE ZA PROCENU PRELAZNIH VEROVATNOĆA

Ispitivane su tri metode, A, B i C, za procenu prelaznih verovatnoća [7]. U metodi A je pretpostavljeno da su dostupni originalni podaci (tj. istorijski podaci o stanju za svako od 30 mesta u mreži) i da se mogu iskoristiti za procenu prelaznih verovatnoća. U metodi B, regresiona jednačina, dobijena iz originalnih podataka, je korišćena da bi se procenile prelazne verovatnoće. U metodi C je poređena raspodela podataka. Matematička postavka ovih metoda je predstavljena u nastavku.

Metoda A (procena prelaznih verovatnoća iz istorijskih podataka) pretpostavlja da su izvorni podaci korišćeni u regresionoj analizi determinističkog modela lako dostupni. Ako je stanje mesta j u trenutku t označeno sa c_{jt}, ciljna funkcija Z za ovaj metod je data sa:

$$Z=\min \sum_t \sum_j \left[c_{jt}-\bar{y}(t)\right]^2 \tag{6}$$

Ciljna funkcija „cilja“ na minimiziranje sume kvadrata razlike između svake od tačaka podataka c_{jt} i prosečnog stanja $\bar{y}(t)$ izračunatog iz raspodele stanja a_t dobijene pomoću prelazne matrice.

Metoda B (procena prelaznih verovatnoća iz istorijskih podataka prikazanih pomoću regresione jednačine) takođe koristi izvorne podatke, ali nakon što je dobijena regresiona jednačina. Regresiona jednačina je dobijena za generisani skup podataka pomoću metode najmanjih kvadrata.
Ako se sa y(t) označi regresiona jednačina, ciljna funkcija Z, pomoću koje se dobijaju prelazne verovatnoće, je data sa:

$$Z=\min \sum_t \left[y(t)-\bar{y}(t)\right]^2 \tag{7}$$

Ciljna funkcija dakle „cilja“ na minimiziranje sume kvadrata razlike između prosečnog stanja izračunatog iz raspodele stanja a_t i ordinata regresione jednačine. Ovo minimizira razliku između regresione krive i krive dobijene na osnovu prelazne matrice.

Metoda C (procena prelaznih verovatnoća iz raspodele istorijskih podataka) takođe koristi izvorne podatke, ali nakon što je dobijena raspodela podataka dobijenih pomoću prelazne matrice. Ako sa $a_t(i)$ označimo i-ti element raspodela dobijenih iz jednačine (2) u trenutku t, a sa $a_t'(i)$ označimo i-ti element raspodele originalnih podataka u trenutku t, ciljna funkcija Z je data sa:

$$Z=\min \sum_t \sum_i [a_t(i)-a_t'(i)]^2 \tag{8}$$

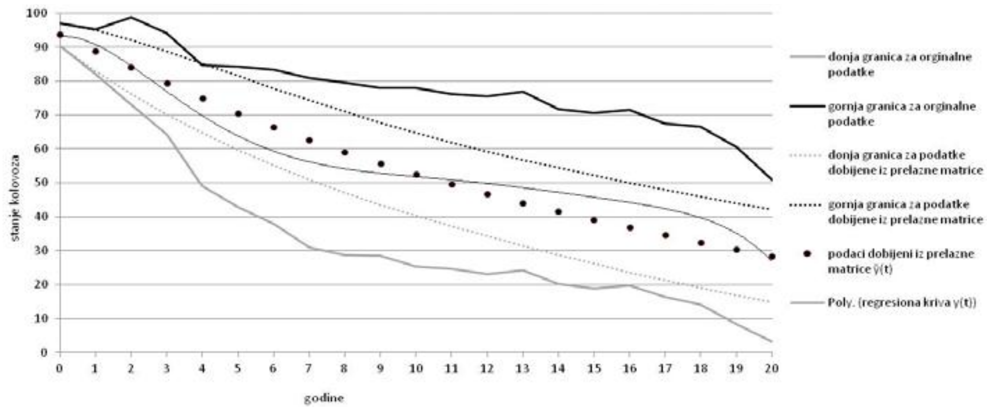
Ciljna funkcija dakle „cilja“ na minimiziranje sume kvadrata razlike između raspodela stanja dobijenih iz izvornih podataka i raspodela dobijenih na osnovu prelaznih verovatnoća.

5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

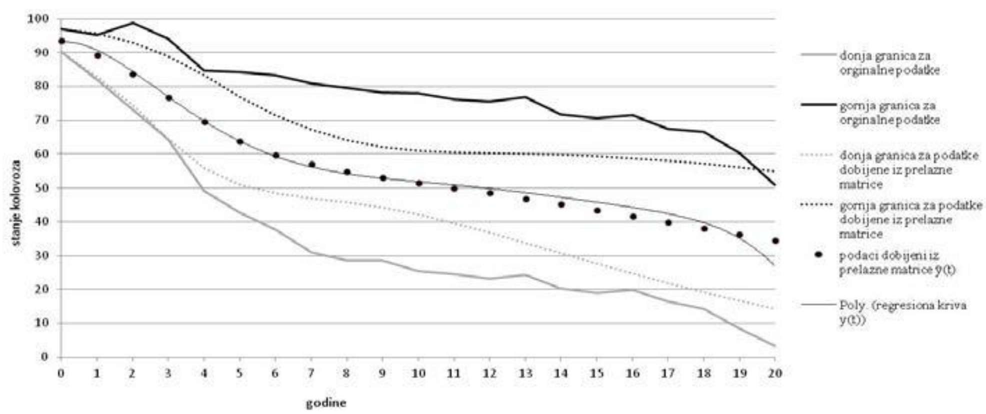
Prelazne verovatnoće su izvedene za generisani skup podataka pomoću tri metode, posebno za stacionarni i za nestacionarni proces.
Rezultati su zatim poređeni procenom naredna tri kriterijuma [7]:

- sličnost između krive dobijene iz prelazne matrice $\bar{y}(t)$ i regresione krive y(t);
- sličnost između standardne devijacije originalnih podataka i standardne devijacije podataka dobijenih na osnovu prelazne matrice;
- sličnost između originalne raspodele stanja a_t' i raspodela dobijenih na osnovu prelazne matrice a_t.

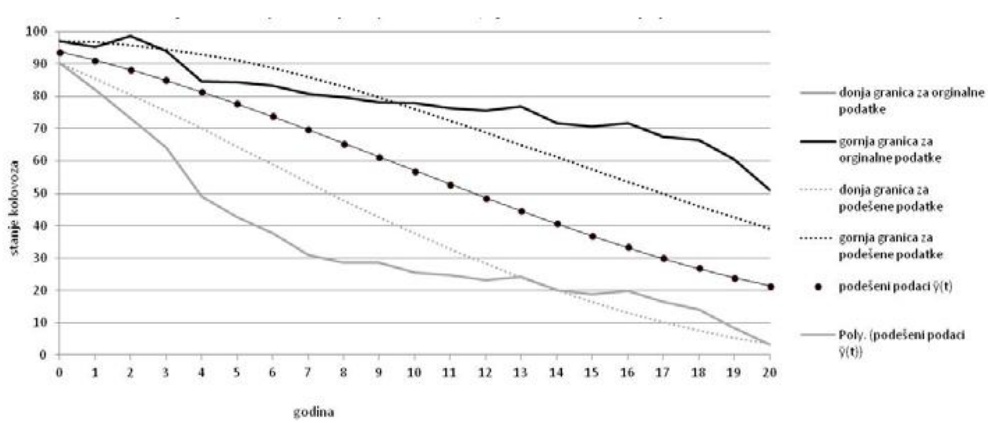
Optimizacijom ciljne funkcije za metode A, B i C došlo se do prelaznih matrica za stacionarne i nestacionarne procese.
Kada se dobije a_t pomoću prethodno navedenih prelaznih matrica, izračunava se prosek stanja $\bar{y}(t)$ i devijacija σ^2.
Prosek se računa korišćenjem jednačine (4), a devijacija se utvrđuje korišćenjem jednačine (5).
Iz dijagrama vrednosti stanja kolovoza u zavisnosti od godina se vrši procena sličnosti između krive dobijene iz prelazne matrice $\bar{y}(t)$ i regresione krive, kao i sličnost između standardne devijacije originalnih podataka i standardne devijacije podataka dobijenih na osnovu prelazne matrice, za stacionarne i nestacionarne procese za metode A, B i C. Ovi dijagrami su prikazani na slikama 2-4.



Slika 2. Regresiona kriva i podaci dobijeni iz prelazne matrice i granice standardne devijacije za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda A

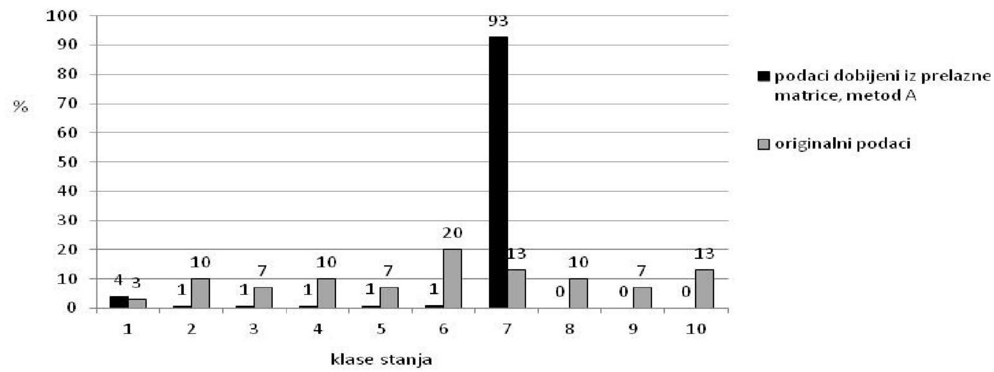


Slika 3. Regresiona kriva i podaci dobijeni iz prelazne matrice i granice standardne devijacije za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda B

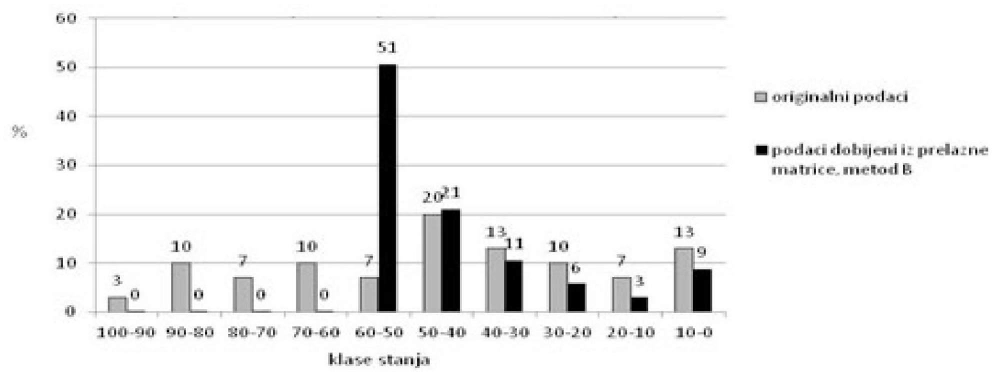


Slika 4. Regresiona kriva i podaci dobijeni iz prelazne matrice i granice standardne devijacije za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda C

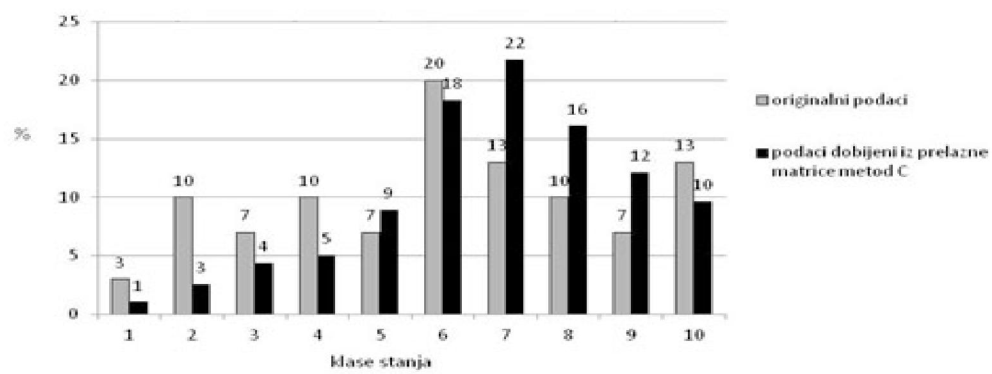
Raspodela stanja za generisani skup podataka u godini 15 je korišćena za procenu sličnosti između originalne raspodele stanja a_t' i raspodela dobijenih na osnovu prelazne matrice a_t, za stacionarne i nestacionarne procese prema metodama A, B i C. Ovo upoređenje je predstavljeno na slikama 5-7.



Slika 5. Originalni histogram i izvedeni histogrami za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda A



Slika 6. Originalni histogram i izvedeni histogrami za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda B



Slika 7. Originalni histogram i izvedeni histogrami za generisani skup podataka - stacionarni proces, metoda C

6. ZAKLJUČAK

Skup podataka o stanju mreže na 30 mesta tokom 20 godina je kreiran tako da mesta koja čine imaginarnu putnu mrežu propadaju na potpuno slučajan način. Ovo se odražava na bezobličnu formu raspodele i njenu veliku standardnu devijaciju. Iz rezultata, predstavljenih na gornjim dijagramima, može se zaključiti da metode A i B, i za stacionarne i za nestacionarne procese, proizvode krivu koja je bliska originalnoj regresionoj krivoj (slika 2), ali ne dovode do sličnih standardnih devijacija, kao ni do sličnih raspodela podataka dobijenih iz prelazne matrice za godinu 15, što se vidi na slikama 2 i 3. Za razliku od toga metoda C je proizvela identičnu regresionu krivu (koeficijent determinacije $R^2=1$) i manja odstupanja u standardnoj devijaciji (slika 2), kao i mnogo bližu raspodelu podataka dobijenih pomoću prelazne matrice prema originalnoj raspodeli podataka (slika 3). Jedan deo neslaganja se može objasniti i gubitkom određene tačnosti pri samom grupisanju podataka u deset klasa stanja kolovoza na samom početku procesa.

Predstavljene metode mogu biti unapređene korišćenjem naprednijih algoritama za pretraživanje. Nedostatak korišćenog algoritma Solver, kao i bilo kog drugog algoritma istog tipa, je garancija da li je pri optimizaciji prelaznih verovatnoća postignut globalni optimum. Druge metode pretrage brojeva, kao što su genetski algoritmi, mogu se koristiti za ove vrste ispitivanja kako bi se utvrdilo da li napredniji algoritmi pretrage unapređuju rezultate optimizacije.

Bitno je naglasiti značaj korišćenja Markovljevih modela u uslovima mrežnog predviđanja stanja kolovoza u slučajevima kada nije dostupna baza podataka o istoriji stanja kolovoza ili pouzdane regresione jednačine, što je veoma često u zemljama poput Srbije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Makedonije.

Glavna primena Markovljevog pristupa modeliranju stanja kolovoza se ogleda u donošenju odluka o mogućim postupcima održavanja, rehabilitacije i rekonstrukcije na nivou mreže (strateške analize). U zavisnosti od broja deonica koje se analiziraju, odnosno veličine mreže, moguće je da će se pojaviti veća potreba za linearnim programiranjem i korišćenjem određenih računarskih programa i vremena da bi se došlo do optimalnog rešenja, ali je u današnjem momentu tehnološkog razvoja ovaj problem lako prevazići.

Na kraju, važno je zapamtiti da je svrha modeliranja predviđanje budućeg stanja kako bi se odabrale deonice na kojima bi se obavljali radovi, utvrđivanje ili provera uticaja nivoa dostupnih finansijskih sredstava ili politika na stanje kolovoza, određivanje troškova tokom životnog ciklusa, i sl, tako da se, bez obzira na model koji se koristi, ova svrha mora zadovoljiti. Modeli predviđanja stanja moraju da služe sistemu upravljanja kolovozima, a ne da upravljaju samim sistemom.

LITERATURA

[1] AASHTO, Guide for the Design of Pavements Structures, Washington D.C., **1985**.

[2] AASHTO, Pavement Management Guide, Washington D.C., **2001**.

[3] Costello, S. B., Ortiz-García, J. J., Snaith, M. S., Development of the Transition Matrix Calculator, Proceedings of the 10th International Conference on Civil, Structural, and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp, Stirling, UK, **2005**.

[4] Darter, M.I., Hudson, W.R. , Probabilistic Design Concepts Applied to Flexible Pavement System Design, Report No. 123/18, Center for Highway Research, University of Texas at Austin, Austin, Texas, **1973**.
[5] Haas R., Hudson W. R., Zaniewski J., Modern Pavement Management, Kreiger Publishing Company, Malabar, Florida, **1994**.
[6] Hong H.P., Somo S., Probabilistic Assessment of Pavement Conditions, *Canadian Journal of Civil* Engineering, Vol. 28, No. 5, **2001**.
[7] Ortiz-García, J. J., Costello, S. B., Snaith, M. S., Derivation of Transition Probability Matrices for Pavement Deterioration Modeling, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 2, **2006**.
[8] Pauše, Ž., Vjerovatnost-informacije, stohastički procesi, Školska knjiga, Zagreb, **2003**.

PROBABILISTIC MODELS OF PAVEMENT DETERIORATION

***Summary**: Pavements are exposed to repeated traffic load and the effect of the environment, which eventually leads to deformations and damage. Prediction of pavement deterioration is essential to determine the parameters for the design of pavements, and to select appropriate ways of maintaining and planning of major interventions (rehabilitation and reconstruction). Models for predicting pavement deterioration can be broadly categorized into deterministic and probabilistic depending on the method used to simulate pavement aging. This paper deals with prediction of pavement deterioration using probabilistic methods at the network level by the help of transition probability matrix and optimization of objective function. The main reason for underuse of this model by engineers in the past is the difficulty of determining transition probabilities (i.e. probability that the road at a certain level of deterioration will "pass" to another level of deterioration) from empirical data or from observation. As a possible solution to this problem, the paper will describe methods for the determination of transition probabilities, chose optimum and give recommendations for their use.*

***Keywords**: Pavement condition, pavement deterioration, probabilistic methods, Markov chains, optimization, transition probabilities.*