

# PROCENA INDIREKTNIH TROŠKOVA USLED PREKIDA PUTNE VEZE ZBOG SMANJENJA FUNKCIONALNIH PERFORMANSI MOSTA

**Vladan Ilić**, master inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, vilic@grf.bg.ac.rs

**Nikola Tanasić**, dipl. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, nikola@imk.grf.bg.ac.rs

**prof. dr Rade Hajdin**, dipl. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, rade.hajdin@grf.bg.ac.rs

Stručni rad

**Rezime:** Stabilnost i nosivost najvažnijih inženjerskih objekata na deonici puta (mostovi, tuneli, vijadukti, itd.) imaju ogroman uticaj na funkcionalne performanse cele putne mreže. Najviše su ugroženi mostovi preko bujičnih reka, što je na žalost i potvrđeno tokom majskih poplava 2014. na većem delu putne mreže Srbije. Oštećenja na konstrukciji mosta, nastala u poplavama, smanjuju nosivost i projektovani kapacitet mostova, kao i njihovu sposobnost da obezbede siguran saobraćaj za sve korisnike putne deonice na kojoj se oni nalaze. Delimična obustava ili u najgorem slučaju potpuni prekid saobraćaja usled rušenja mosta, pored direktnih troškova vezanih za obnovu mostovske konstrukcije, dovode do značajnog rasta indirektnih troškova korisnika puta. Tema ovog rada je upravo efikasna procena indirektnih troškova usled delimičnog ili potpunog zatvaranja deonice puta zbog oštećenja na konstrukciji mosta. Simulacioni model u VISUM-u jednog dela nacionalne mreže Srbije korišćen je kao osnova za procenu "ranjivosti" linkova koji prelaze preko mostova ugroženih poplavama.

**Glavne reči:** stabilnost mosta, nosivost, oštećenje na konstrukciji, simulacioni model, VISUM, putna mreža, indirektni troškovi.

## ASSESSMENT OF INDIRECT COSTS DUE TO HIGHWAY LINK SEVERANCE CAUSED BY REDUCTION OF BRIDGE FUNCTIONAL PERFORMANCE

**Vladan Ilic**, M.Sc. CE

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, vilic@grf.bg.ac.rs

**Nikola Tanasić**, B.Sc. CE

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, nikola@imk.grf.bg.ac.rs

**Rade Hajdin**, Ph.D. CE

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, rade.hajdin@grf.bg.ac.rs

Professional paper

**Summary:** Stability and bearing capacity of the most important engineering structures of road sections (bridges, tunnels, viaducts, etc...) have enormous influence on the functional performance of the entire highway network. The bridges over torrential rivers are the most vulnerable, which unfortunately has been manifested in May floods in

2014 on the large part of the Serbian national highway network. Structural damage on bridges, inflicted in floods, reduce bearing capacity and designed traffic flow performance of bridges, as well as their capacity to provide safe traffic for all road users. In addition to the direct costs related to the reconstruction of the bridge structure, a partial restriction or in the worst case total traffic suspension due to bridge collapse, leads to a significant increase of indirect costs of road users. In fact, topic of this paper is efficient assessment of the indirect costs due to partial or complete closure of highway section due to damage on bridge structural elements. The VISUM simulation model of one part of the Serbian national highway network was used as a basis for the vulnerability assessment of links that cross over the bridges endangered by floods.

**Key words:** bridge stability, bearing capacity, structural damage, simulation model, VISUM, road network, indirect costs.

## 1. UVOD

Pri upravljanju saobraćajnom infrastrukturom, Direkcija za rukovođenje mrežom javnih puteva ili neka druga državna institucija, često je suočena sa problemom delimične ili potpune obustave saobraćaja na deonici putne mreže na kojima se izvode građevinski radovi rehabilitacije ili rekonstrukcije. Problem definisanja optimalne metodologije za izvođenje pomenutih građevinskih radova je utoliko veći, jer istovremeno mora da se vodi računa o indirektnim troškovima korisnika, koji nastaju usled delimičnog smanjenja ili totalnog prekida saobraćaja na rekonstruisanim deonici unutar mreže javnih puteva.

Predmet rekonstrukcije i/ili rehabilitacije mogu biti i svi inženjerski objekti izgrađeni na nekoj deonici puta (mostovi, tuneli, vijadukti, itd.), čija nosivost i stabilnost direktno utiču na saobraćajne tokove preko ugroženih deonica, odnosno njihovu propusnu moć, što se dalje manifestuje na funkcionalne performanse čitave mreže. Za potrebe usvajanja optimalne strategije sa minimumom indirektnih posledica pri redistribuciji saobraćajnih tokova sa ugroženih deonica, analizira se nekoliko mogućih scenarija delimične obustave ili potpunog prekida saobraćaja, koristeći specijalne modele izrađene pomoću softvera za simulaciju preraspodele saobraćaja kao što je VISUM [1]. Svrha izrade simulacionog modela i izvođenja pomenutih proračuna, jeste da se pronađe onaj scenario delimičnog ili potpunog prekida određenog linka na razmatranoj deonici mreže, koji će da prouzrokuje najveće indirektno troškove. Efikasna metodologija za brzo procenu indirektnih troškova omogućava Direkciji za upravljanje mrežom javnih puteva brzo donošenje odluka u vanrednim situacijama.

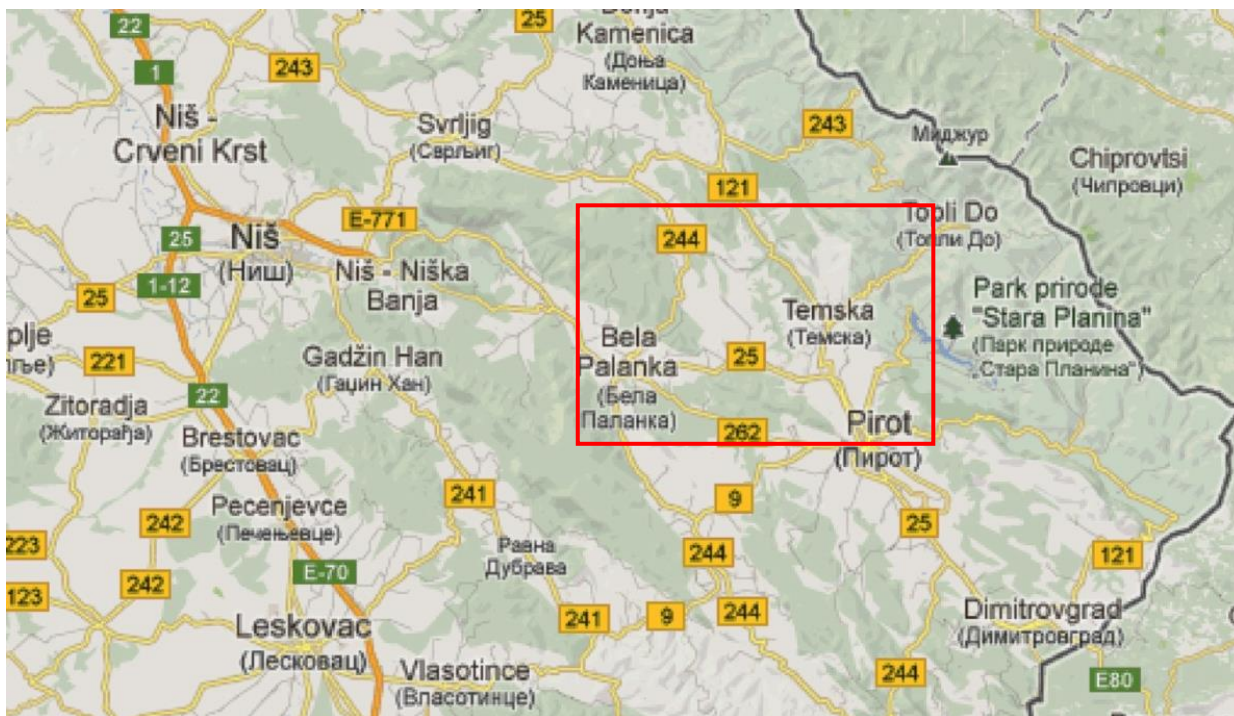
Veliki broj naučnika i istraživača razvio je čitav niz matematičkih metoda i proračunskih modela za izračunavanje indirektnih troškova usled prekida neke veze ili za pronalaženje "najranjivijeg" linka u mreži. Najaktuelnija istraživanja fokusirana su na "ranjivost" putne mreže usled učestale pojave prirodnih katastrofa kao što su poplave, lavine i bujice. Ipak, još uvek nije uspostavljena neka zajednički priznata metodologija za procenu posledica na saobraćaj, prouzrokovanih prekidom nekog linka u putnoj mreži.

Osnovni principi korišćeni za proračun posledica na saobraćaj usled prekida nekog linka usvojeni su iz "Metodologije za procenu ranjivosti Švajcarske putne mreže", koja je prvo predstavljena u radu Erath-a [2]. Razni autori, a posebno Berdica [3], Taylor i D'Este [4], Knopp i drugi [5], i Matisziw i drugi [6], dali su svoj doprinos kroz različito viđenje uticaja prekida neke veze unutar mreže na odvijanje saobraćaja. Da bi se procenio uticaj različitih oštećenja na infrastrukturi putne mreže korišćeni su razni matematički modeli i algoritmi. Na primer, Bocchini i Frangopol [7] koristili su genetske algoritme (GAs - Genetic Algorithms) da dobiju optimalnu otpornost i odrede, na osnovu procene troškova posle katastrofe, prioritete intervencije na mostovima duž putne veze između dva grada koja su zadesili razarajući prirodni ili veštački izazvani događaji. Značajan doprinos u definisanju nove metodologije za identifikaciju kritičnih deonica putne

infrastrukture dala je Schulz [8], kao kombinaciju analize topologije mreže, analize rizika i procene uticaja od nepredviđenih prirodnih događaja, kao što su poplave, zemljotresi, požari itd.

## 2. POSTAVKA MODELA

Za reprezentativan primer izabrana je postojeća putna mreža između gradova Bela Palanka i Pirot u blizini budućeg autoputa E-80, koji pripada panevropskom koridoru X. Na **Slici 1** prikazana je mapa putne mreže u jugoistočnom delu Srbije između gradova Niša i Dimitrovgrada, na kojoj je sa crvenim pravougaonikom oivičen poseban deo podmreže (subnetwork u VISUM-u), koji je predmet detaljne analize u simulacionom modelu. Kao što se može videti, trenutno najvažniji putni pravac koji povezuje Belu Palanku i Pirot je državni put prvog reda M-1.12 sa poprečnim profilom dvotračnog puta. M-1.12 idući od Bele Palanke ka Pirotu na četiri mesta preseca reku Nišavu, a mostovi koji se koriste za prelazak preko reke, prateći smer rasta stacionaže prema Pirotu, nazvani su *Nišava 1*, *Nišava 2* i tako redom do *Nišava 4*. S obzirom na ugroženu stabilnost pomenutih mostova zbog izloženosti temelja njihovih rečnih stubova bujičnom toku reke Nišave, osnovni cilj izrade simulacionog modela date mreže bio je da se utvrdi koji prekid linka, odnosno, rušenje kojeg od ova četiri mosta, će izazvati najveće indirektno troškove korisnika.



**Slika 1.** Mapa putne mreže u jugoistočnoj Srbiji sa označenom podmrežom koja je predmet analize u simulacionom modelu (Izvor: [9])

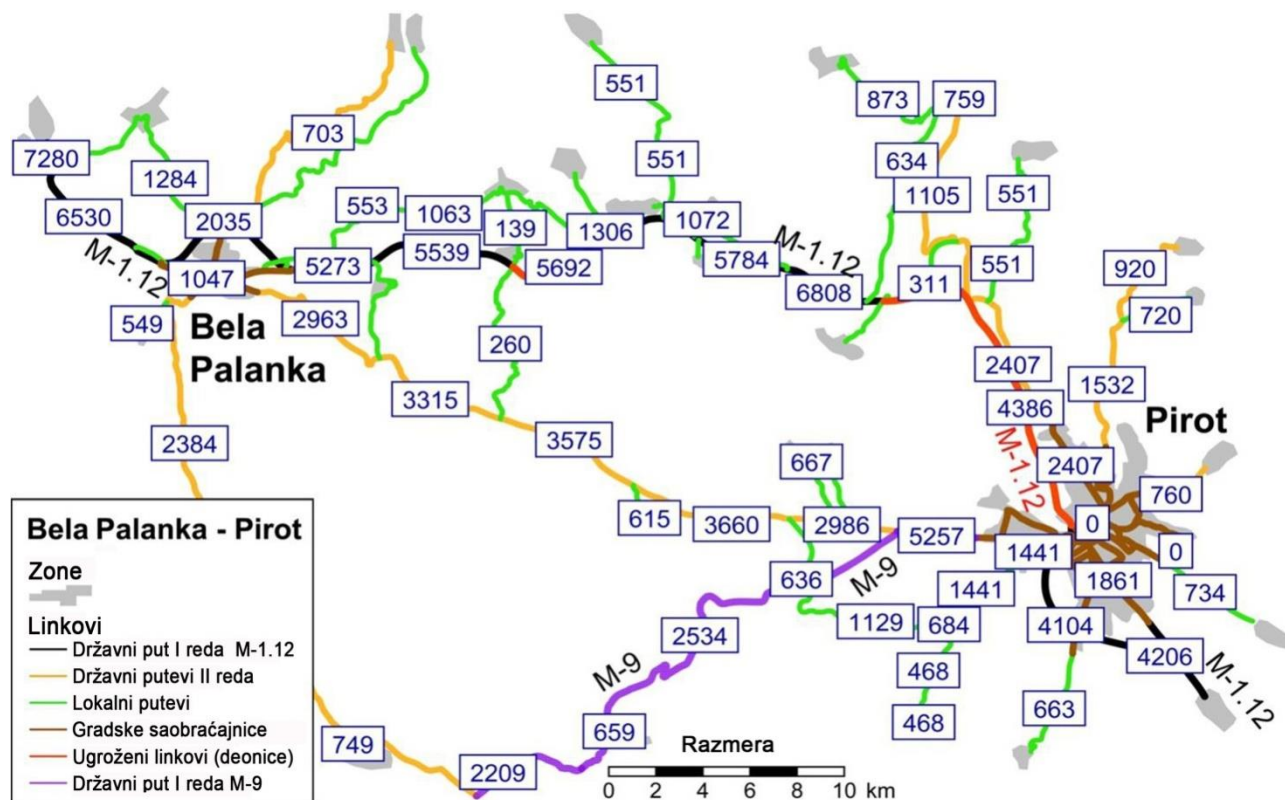
Jedan od razloga zašto je baš izabran ovaj deo mreže, pored realne opasnosti da se jedan od označenih mostova sruši za vreme poplave, jeste što pored državnog puta I reda M-1.12, Pirot i Belu Palanku preko državnog puta I reda M-9 povezuju još dve alternativne rute manjeg kapaciteta. Jasno je da će prilikom rušenja bilo kojeg od posmatranih mostova na primarnom potezu (M-1.12), dobar deo saobraćaja biti preusmeren upravo na ove alternativne puteve.

U generisanoj podmreži formirano je 36 saobraćajnih zona koje su korišćene kao osnovni mrežni objekti za dalje kreiranje ulaznih parametara saobraćajne potražnje. U izvorno-ciljnim matricama smešteni su podaci o broju putovanja iz izvorne zone  $i$  ka odredišnoj zoni  $j$ . Jedinice elemenata matrice potražnje za individualni transport (Privat Transport- PrT) su putovanja automobila ili kamiona, koja u stvari označavaju zahtevanu saobraćajnu potražnju iz saobraćajne zone  $i$  ka zoni  $j$ .

Podaci o izvorno-ciljnim putovanjima potiču iz saobraćajnih studija [10] koje su urađene za potrebe Generalnog projekta koridora X za deo transportne mreže između Niša i državne granice sa Bugarskom. Međutim, ovi podaci o saobraćajnoj

potražnji, koji su prikupljeni na osnovu istraživanja organizovanih 1996. godine, ne predstavljaju valjane ulazne podatke za proračun raspodele saobraćajnih tokova individualnog transporta (PrT), zato što su se u međuvremenu saobraćajni protoci, a naročito obim tranzitnog saobraćaja, na posmatranoj mreži radikalno promenili. Posle ulaska Bugarske u Evropsku uniju, nisu rađene nove ankete niti neke druge saobraćajne studije u ovom delu Srbije. Iz tog razloga, izvorno-ciljne matrice moraju se dodatno kalibrisati da bi vrednosti saobraćajne potražnje u njima odgovarale merenim vrednostima na osnovu podataka iz brojača saobraćaja, koji su postavljeni na primarnim linkovima. Za modifikaciju starih izvorno-ciljnih matrica, komparacijom sa aktuelnim vrednostima iz brojača saobraćaja, korišćena je VISUM-ova funkcija TFlowFuzzy [11].

Na osnovu generisanih vrednosti saobraćajne potražnje, izvršen je proračun raspodele saobraćajnih tokova koristeći matematičku metodu ekvilibrijuma (equilibrium assignment). Ekvilibrijum metoda vrši raspodelu saobraćajne potražnje rukovodeći se prvim Wardrop-ovim principom [11] koji glasi: „Svaki korisnik putne mreže bira svoju putanju kretanja na takav način, da njegovo vreme putovanja ako bi se kretao svim drugim alternativnim



**Slika 2.** Rezultati proračuna saobraćajnog opterećenja po metodi Equilibrium-a na modelu mreže sa neprekinutim linkovima

rutama bude jednako, što znači da bi prelazak na neku drugu putanju kretanja sigurno povećao njegovo vreme putovanja“. Rezultati proračuna

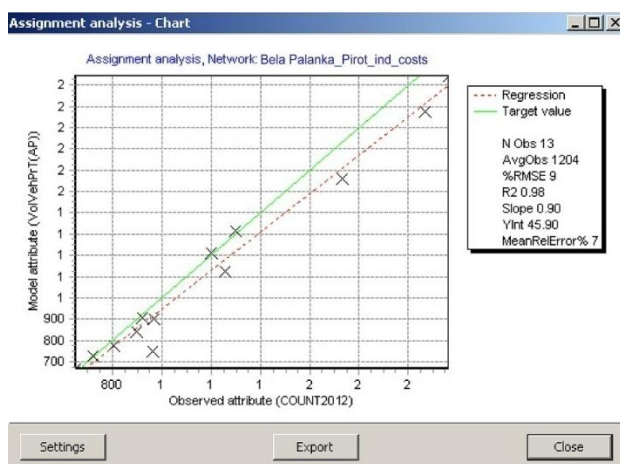
saobraćajnog opterećenja na modelu mreže sa neprekinutim linkovima koji idu preko mostova Nišava 1 - 4 prikazani su na **Slici 2.**

### 3. VERIFIKACIJA I VALJANOST SRAČUNATOG SIMULACIONOG MODELA

Za ocenu replikativne valjanosti kreiranog simulacionog modela izvršena je regresiona analiza poređenjem vrednosti saobraćajnog opterećenja za linkove koji pripadaju državnim putevima I reda (M-1.12 i M-9), sa vrednostima saobraćajnog opterećenja iz brojača saobraćaja koji su postavljeni na istim tim linkovima u realnosti. Podaci iz brojača saobraćaja su dobijeni od Javnog preduzeća "Putevi Srbije" [12] i odnose se na kalendarsku 2012. godinu, pošto u vreme izrade simulacionog modela nije bilo moguće dobiti podatke o brojanju saobraćaja za aktuelnu 2013. godinu. Svi podaci o brojanju saobraćaja uneti su u VISUM definisanjem novih korisničkih atributa (COUNT 2012) za one linkove iz simulacionog modela, čije je saobraćajno opterećenje kasnije upoređeno sa realnim vrednostima.

Merodavni podaci za veličine opterećenja i strukturu saobraćajnog toka preuzeti su sa sledećih automatskih brojača [12]:

- Brojačko mesto: 137 Crvena reka, za deonicu dužine 10,00km, Crvena reka - Bela Palanka. Oznaka deonice je 0054, a broj puta M-1.12;
- Brojačko mesto: 138 Bela Palanka, za deonicu dužine 27,60km, Bela Palanka - Pirot. Oznaka deonice je 0055, a broj puta M-1.12;
- Brojačko mesto: 301 Pirot 2, za deonicu dužine 4,30km, Sadikov Bunar - Pirot. Oznaka deonice je 0155, a broj puta M-9;
- Brojačko mesto: 139 Pirot 1, za deonicu dužine 14,40km, Pirot - za Sukovo. Oznaka deonice je 0056, a broj puta M-1.12;
- Brojačko mesto: 141 Dimitrograd, za deonicu dužine 7,00km, Dimitrograd - za Gradinu. Oznaka deonice je 0058, a broj puta M-1.12.



Slika 3. Regresiona analiza za sračunate veličine saobraćajnog opterećenja iz modela

Rezultati proračuna koeficijenta korelacije između izmerenih i simuliranih vrednosti saobraćajnog opterećenja pokazuju vrlo značajan stepen poklapanja. Kritična vrednost koeficijenta korelacije iznosi 0,90 u kom smislu je dobijena vrednost, kao što se vidi sa Slike 3, iznad nje ( $R = 0,98 > 0,46$ ), što obezbeđuje visoki nivo značajnosti. Na osnovu izvršene verifikacije valjanosti modela, može se zaključiti da model u celini realno reprezentuje aktuelno stanje na saobraćajnoj mreži ovog dela Srbije, a samim tim, i sračunate veličine indirektnih troškova korisnika predstavljaju dovoljno tačne i pouzdane vrednosti.

### 4. METODOLOGIJA PRORAČUNA INDIREKTNIH TROŠKOVA

U analiziranom simulacionom modelu saobraćajne mreže, izdvojeni su "ugroženi" linkovi koji idu preko mostova *Nišava 1 - 4*, za koje je utvrđeno da postoji opravdana bojazan za nastanak oštećenja usled poplava. Rizik od prekida linka izražava se kao proizvod verovatnoće pojave određenog inicijalnog događaja, na primer poplave, verovatnoće rušenja mosta usled ovog događaja i posledica prekida puta. Smanjenje kapaciteta linka ovde se zapravo tumači kao nemogućnost da se ostvari projektovana namena linka usled oštećenja na mostu, uključujući i najgori scenario tj. rušenje mosta. Pri tome razlikujemo dve vrste posledica:

- Direktno posledice ili direktni troškovi (DT), u vidu strukturnih oštećenja konstrukcije, koji uključuju troškove popravke neophodne da se most vrati u prvobitno stanje i
- Indirektno posledice ili indirektni troškovi (IT) korisnika putne mreže usled ograničenja protoka ili potpunog prekida saobraćajnih tokova kroz analizirane linkove, uključujući i dodatne troškove zbog uvećanog vremena i dužine putovanja.

Prema tome, ugroženost linka  $i$ , koji ide preko mosta, jeste verovatnoća pojave oštećenja na mostu zbog datog incidentnog događaja ( $P_{fi,Se}$ ), koji dovodi do smanjenja kapaciteta ili prekida linka, pomnožena sa sumom direktnih i indirektnih posledica ( $DT_i, IT_i$  respektivno) [13]:

$$R_i = P_{fi,Se} \cdot (DT_i + IT_i) \quad (1)$$

gde su:

- $DT_i$  - direktne finansijske posledice delimičnog ili potpunog prekida linka  $i$ , usled nastanka oštećenja na nekom od mostova (*Nišava 1-4*),
- $IT_i$  - indirektno posledice na saobraćaj izazvane delimičnim ili potpunim prekidom linka  $i$ , i
- $R_i$  - ugroženost ili "ranjivost" linka  $i$  usled nastanka oštećenja na nekom od mostova (*Nišava 1-4*).

Određivanje verovatnoće  $P_{fi,se}$  ovde nije razmatrano, s obzirom da je težište rada usvajanje metodologije za proračun indirektnih troškova. U slučaju analizirane saobraćajne mreže u jugoistočnoj Srbiji, alternativne rute i obilaznice su generalno dostupne za većinu ugroženih linkova na državnom putu prvog reda M-1.12. Pošto je u izdvojenom delu mreže pretpostavljena "neelastična saobraćajna potražnja" [13] promena odredišta ili čak otkazivanje planiranih putovanja korisnika puta, nisu razmatrani u okviru predstavljenog modela.

Ekonomska procena indirektnih troškova ( $IT_i$ ), usled kretanja vozila alternativnim rutama i obilaznicama, sledi već dobro poznatu metodologiju cost-benefit analiza, koje kvantifikuju promene u saobraćajnim tokovima na svim linkovima u novčane jedinice [2]. Primenjujući koncept generalizovanih putnih troškova, efekti izazvani putovanjem vozila preko alternativnih ruta usled prekida linka zbog rušenja mosta mogu se podeliti na tri dela:

- Dodatni troškovi usled povećanog vremena putovanja ( $\Delta VP_i$ ),
- Dodatni troškovi prozrokovani uvećanom dužinom putovanja ( $\Delta DP_i$ ), i
- Promene u stopama (učestalostima pojave) saobraćajnih nezgoda i ukupnim pratećim troškovima nesreća ( $\Delta AC$ ).

Pomenuti efekti se, takođe, mogu javiti pri prekidu linkova usled nekih drugih incidentnih događaja, kao što su zemljotresi, lavine, požari itd., što znači da se opisana metodologija može na sličan način primeniti za procenu indirektnih troškova za različite hazarde. VISUM nudi veliki broj mogućnosti obračuna indirektnih troškova korisnika po različitim parametrima za sve linkove u mreži, kao i alate za naknadno editovanje proračuna.

Formalno, dodatno vreme putovanja prouzrokovano prekidom linka definiše se kao [13]:

$$\Delta VP_i = \sum_i \sum_{j \neq i} (C_{ij}^{(l)} - C_{ij}^{(0)}) \quad (2)$$

gde je:

$C_{ij}^{(0)}$  = vreme putovanja od izvora  $i$  ka odredištu  $j$  pri normalnim uslovima na mreži, i

$C_{ij}^{(l)}$  = vreme putovanja od izvora  $i$  ka odredištu  $j$  pri izmenjenim uslovima na mreži kada je link  $l$  prekinut.

Dodatni troškovi usled povećane dužine putovanja ( $\Delta DP_i$ ), prouzrokovane prekidom linka, definišu se kao [13]:

$$\Delta DP_i = \sum_i \sum_{j \neq i} (d_{ij}^{(l)} - d_{ij}^{(0)}) \quad (3)$$

gde je:

$d_{ij}^{(0)}$  = dužina putovanja od izvora  $i$  ka odredištu  $j$  pri normalnim uslovima na mreži, i

$d_{ij}^{(l)}$  = dužina putovanja od izvora  $i$  ka odredištu  $j$  pri izmenjenim uslovima na mreži kada je link  $l$  prekinut.

Dodatni troškovi saobraćajnih nezgoda izazvani prekidom linka definišu se kao [13]:

$$\Delta AC = \sum_m (V_{m,t}^{(l)} - V_{m,t}^{(0)}) \cdot ARC_t \quad (4)$$

gde su:

$\Delta AC$  = dodatni troškovi saobraćajne nesreće,

$V_{m,t}^{(0)}$  = saobraćajno opterećenje na linku  $m$  tipa  $t$  pri normalnim uslovima na mreži,

$V_{m,t}^{(l)}$  = saobraćajno opterećenje na linku  $m$  tipa  $t$  u uslovima kada je link  $l$  prekinut u mreži, i

$ARC_t$  = troškovi nezgoda u funkciji saobraćajnog opterećenja na linkovima tipa  $t$ .

Indirektni troškovi ( $IT_i$ ) dobijaju se na kraju kao:

$$IT_i = \Delta VP_i \cdot C_{VP} + \Delta DP_i \cdot C_{DP} + \sum_t \Delta AC \quad (5)$$

gde  $C_{VP}$  označava cenu koju je država spremna da plati za jedinično vreme putovanja, izgubljeno zbog prekida ili delimičnog zatvaranja nekog linka, dok je  $C_{DP}$  jednako prosečnim troškovima vožnje po jediničnoj dužini. Opisane vrednosti za Srbiju preuzete su iz "Priručnika za analizu troškova i koristi" [14], dok su troškovi sobračajnih nezgoda i njihova učestalost procenjeni na osnovu rezultata istraživanja Osobe, Tubića i Mertner-a [15].

## 5. RAZLIČITI SCENARIJI DELIMIČNOG ILI POTPUNOG PREKIDA PRIMARNIH LINKOVA

Na osnovu procene rizika od kolapsa i broja ugroženih mostova (*Nišava 1 - 4*) određena je veličina analizirane podmreže sa najugroženijim linkovima. Podmreža je izdvojena iz nacionalne putne mreže uključujući njenu internu i tranzitnu potražnju. Pri generisanju modela saobraćajne podmreže veličine svih ulaznih i izlaznih saobraćajnih tokova pretpostavljene su na osnovu kontinualno merenih podataka o veličinama protoka duž analiziranih linkova. Takođe, kao što je već pomenuto, usvojeni model podmreže sadrži sve linkove koji mogu poslužiti kao alternativne rute za deonice primarnog pravca (M-1.12) koje prelaze preko posmatranih mostova.

Pojedine alternativne rute, koje vode preko lokalnih puteva, imaju male kapacitete zahvaljujući uskim poprečnim profilima i kolovoznoj konstrukciji od makadama. Stoga, u mnogim scenarijima prekida nekog od primarnih linkova, takve rute ne mogu se koristiti kao alternativne za teška teretna vozila (Heavy Goods Vehicles - HGV), već samo kao privremene obilazne rute za putničke automobile. Na bazi dvodimenzionalno - ograničenog generisanja saobraćajne potražnje i distribucije tokova, posebno za automobile i teška teretna vozila, primenjena je metoda ekvilibrijuma (equilibrium assignment) iz VISUM-a 13.0 za proračun saobraćajnog opterećenja na svim linkovima u modelu.

Za podmrežu korišćenu u modelu, određena ograničenja su usvojena kako bi se pojednostavio postupak proračuna. Iz opšteg postupka proračuna saobraćajnog opterećenja isključena su postojeća kretanja putnika sistemom javnog prevoza (Public Transport - PuT), pošto je obim saobraćaja u javnom prevozu zanemarljiv u poređenju sa ukupnim obimom saobraćaja na relevantnim linkovima. Shodno tome, u proračunskoj proceduri, pri definisanju mogućih načina kretanja izabran je individualni transportni sistem (Privat Transport - PrT) sa režimima kretanja koji uključuju automobile (Car) i kamione, odnosno teška teretna vozila (HGV). Ulazni podaci za model, koji obuhvataju grafičke parametre, preuzeti su iz Idejnog projekta budućeg autoputnog koridora X-c kroz Srbiju [16].

Reka Nišava ima izražen bujičav tok na delu saobraćajne podmreže gde se nalaze linkovi sa ugroženim mostovima (Nišava 1 - 4), zbog čega se tokom topljenja snega i rasta vodostaja usled veće količine padavina u prolećnom periodu, povećava i rizik od nastanka oštećenja na pomenutim mostovima.

Najugroženiji su rečni stubovi mosta, gde se usled porasta brzine kretanja vode za vreme naglog povećanja protoka, javljaju izraženo spiranje i odnošenje rečnog materijala u zoni oko stubova i njihovih temelja. Ovaj proces poznatiji kao lokalna erozija rečnog dna, u slučaju dužeg trajanja perioda veoma velikih voda, dovodi u pitanje nosivost i stabilnost mosta, a neretko može dovesti i do rušenja mosta.

Pri "opiranju" konstrukcije mosta lokalnoj eroziji rečnog dna mogu nastati oštećenja različitih razmera koja značajno smanjuju nosivost mosta, a samim tim i kapacitet linka u mreži koji prelazi preko tog mosta. Ovo je detaljno razmotreno pri proračunu raspodele saobraćajnih tokova metodom ekvilibrijuma, i tri moguća scenarija smanjenja kapaciteta ugroženih linkova usled oštećenja konstrukcije na mostovima su analizirana:

- 1) Preraspodela saobraćajnih tokova kada je normalno stanje na mreži bez ograničenja kapaciteta ugroženih linkova usled oštećenja konstrukcije mosta;
- 2) Preraspodela saobraćaja u slučaju kada je zatvorena jedna vozna traka na mostu zbog radova i drugih mera na rehabilitaciji, i
- 3) Potpuni prekid putnog linka usled rušenja mosta, odnosno, potpuna obustava saobraćaja tokom rekonstrukcije mosta.

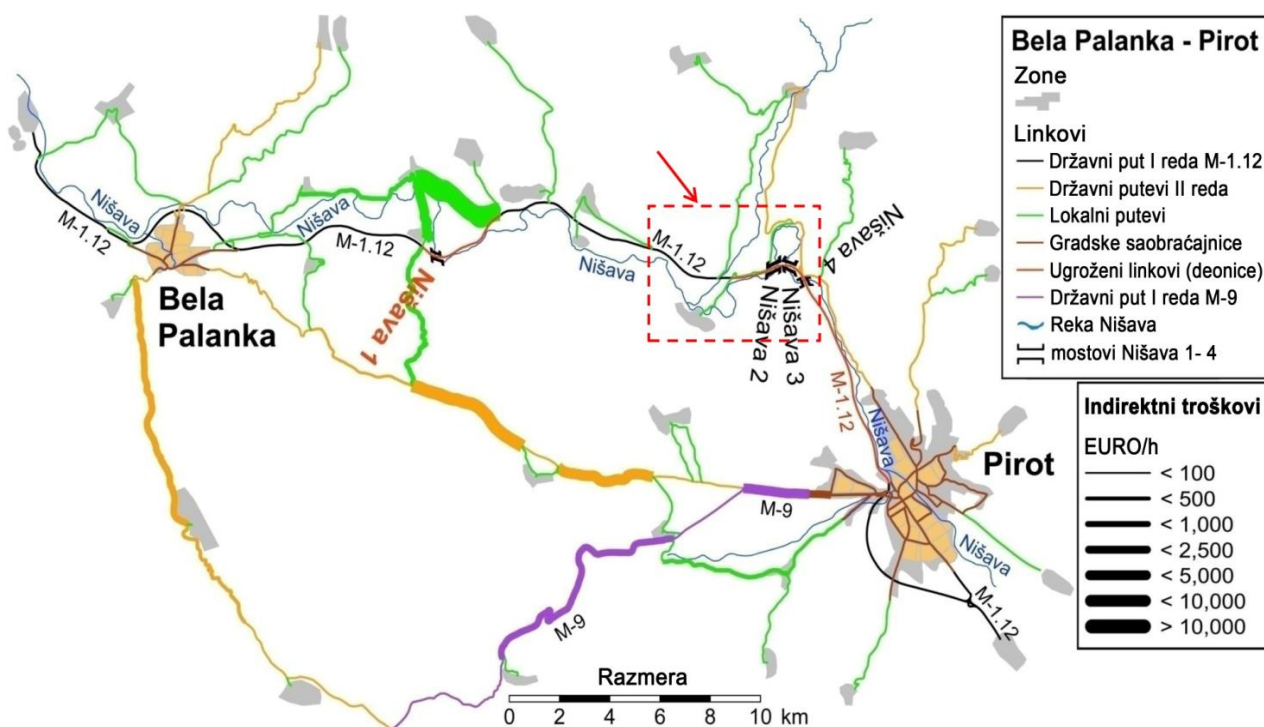
Na primarnom linku, tj. na državnom putu prvog reda M-1.12, označena su četiri ugrožena mosta (Nišava 1 - 4), koja mogu biti izložena znatnoj lokalnoj eroziji rečnog dna usled pojave velikih voda. Njihove pozicije obeležene su posebnim simbolima na mapi mreže linkova na Slici 4. Na istoj slici označene su crvenim pravougaonikom granice uvećanog isečka simulacionog modela, kako bi se detaljnije prikazao položaj mostova Nišava 2 - 4 na narednoj slici. Jasno je sa Slike 5 da će oštećenja na mostovima Nišava 2 i 3 prouzrokovati iste posledice pošto oni fizički pripadaju istom linku na kome između njih ne postoje nikakvi priključci ili ukrštaji sa drugim linkovima. Primenom ovakvog pristupa za selekciju linkova na druge ugrožene mostove, utvrđena su tri primarna linka na državnom putu prvog reda M-1.12, koja mogu biti prekinuta ili delimično zatvorena zbog strukturnih oštećenja na jednom od posmatranih mostova. Razni scenariji "otkaza" uključuju potpuno ili delimično zatvaranje ugroženih linkova u isto vreme preko sva četiri mosta, kao i sve druge moguće kombinacije smanjenja kapaciteta ili prekida linkova usled različitog obima oštećenja konstrukcije mostova. Pošto je broj varijacija  $r$ -klase u skupu od  $n$  elemenata sa ponavljanjima jednak  $V_r(n) = n^r$ , i ako se zna da postoje 3 moguća scenarija za "otkaz" primarnog linka koja se mogu desiti na 3 odvojene lokacije, dobija se  $V_3(3) = 27$  alternativnih izbora rute kretanja. U Tabeli 1 predstavljene su moguće varijacije za zatvaranje primarnog linka usled kolapsa nekog od mostova u podmreži, pri čemu je korišćena sledeća notacija:

- 1 - Nema poremećaja saobraćaja na linku koji obuhvata odgovarajući ugroženi most,
- 1/2 - Jedna vozna traka ili jedna polovina poprečnog profila linka je zatvorena zbog radova na rehabilitaciji odgovarajućih mostova, i
- 0 - Potpuno zatvaranje linkova i obustava saobraćaja usled rušenja mosta.

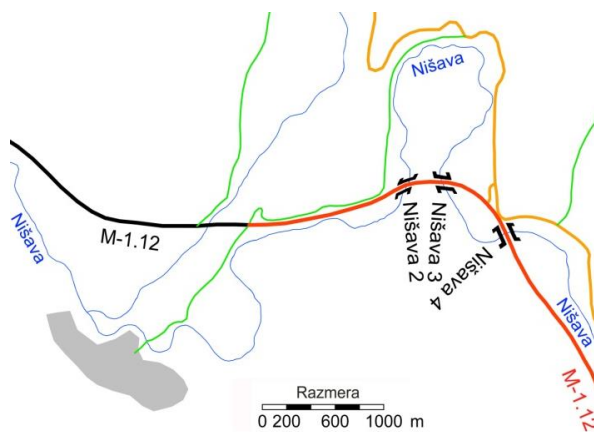
Kako bi se procenili troškovi dodatnog vremena i dužine putovanja, ukupni indirektni troškovi za 27 različitih scenarija ograničenja kapaciteta linkova sračunati su u VISUM-u. Indirektni troškovi za sve navedene scenarije iz Tabele 1 određeni su njihovim upoređivanjem sa odgovarajućim troškovima na "neporemećenoj" mreži. Najveće vrednosti indirektnih troškova za one scenarije gde je jedna traka zatvorena moraju se dodatno analizirati kako bi se uzela u obzir vozila koja imaju ukupnu masu veću od 3,50 tona.

Tabela 1. Moguće varijacije za delimično i/ili potpuno zatvaranje primarnog linka usled različitih scenarija "otkaza" mostova Nišava 1 – 4

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Nišava 1	1	1/2	0	1	1	1	1	1/2	0	1	1	0	1/2	1/2	1/2	1	0	1/2	1/2	0	0	1/2	1	0	0	1/2	0
Nišava 2 i 3	1	1	1	1/2	0	1	1	1/2	0	1/2	0	1/2	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0	0	0	0	0	1/2	1	1	1
Nišava 4	1	1	1	1	1	1/2	0	1/2	0	0	1/2	1	1	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0	0	0	0	0	1/2



Slika 4. Indirektni troškovi (označeni različitim debljinama linkova) iz simulacionog modela u VISUM-u za slučaj potpunog prekida saobraćaja na državnom putu I reda M-1.12 zbog rušenja mosta Nišava 1 (Izvor: [13])



Slika 5. Isečak iz simulacionog modela sa detaljnim prikazom položaja mostova Nišava 2 - 4

Postoje dve mogućnosti u zavisnosti od nivoa oštećenja konstrukcije mosta: Ako veličina deformacije konstrukcije mosta ne utiče na njegov kapacitet prenosa opterećenja, odnosno njegovu nosivost, nema potrebe za uvođenjem zabrane saobraćaja za određene kategorije vozila, ili u suprotnom, neće biti dozvoljen prelazak mosta za sva vozila teža od 3,50 tona.

Od svih analiziranih scenarija u modelu najinteresantniji je onaj koji će prouzrokovati najveće dodatne troškove korisnika mreže u smislu najvećih dodatnih vremena i dužina putovanja. Krajnji cilj je da se rangiranjem linkova prema veličini indirektnih troškova, izazvanih njihovim otkazom, napravi kompletan hijerarhijski pregled mogućih "posledica" nastalih otkazom određenih linkova. Prema tome, rangiranjem linkova prema veličini indirektnih troškova korisnika usled njihovog delimičnog zatvaranja ili potpunog prekida, dobija se jasna slika o tome koje deonice, odnosno, koji linkovi najviše utiču na funkcionalne performanse mreže.

## 6. PREGLED REZULTATA PRORAČUNA IZ SIMULACIONOG MODELA

Kolaps mosta *Nišava 1* generisaće najveće dodatno vreme putovanja u posmatranoj podmreži, jer raspoložive alternativne rute uglavnom obuhvataju lokalne puteve, čiji je kapacitet ograničen na 800 voz/h, što nije dovoljno da se prihvate preusmereni saobraćajni tokovi usled prekida linka preko pomenutog mosta. Kao što se može videti na **Slici 4**, ovi lokalni putevi opterećeni su i do 90% njihovog kapaciteta, što za posledicu ima i najveće indirektno troškove. Ako bi neki od navedenih linkova bio opterećen sa više od 100%, definisanog kapaciteta, stvorili bi se uslovi za nastanak saobraćajnih gužvi, odnosno, kompletan zastoj saobraćaja. U ovim slučajevima mora se opet razmotriti da li je opravdano usvojiti pretpostavku o "neelastičnoj saobraćajnoj potražnji", zato što vremenski gubici korisnika u takvim uslovima značajno rastu, što sigurno može uticati na konačan ishod njihovih planova za nastavak putovanja.

Prekid primarnog linka preko mosta *Nišava 1* prouzrokovao bi dodatno vreme putovanja od 7.977,00 h po danu, dodatnu dužinu putovanja od 27.131,00 km i povećanje troškova saobraćajnih nezgoda za 6.592,00 eura po danu, što posle sumiranjem svih dodatnih troškova, dovodi do ukupnih indirektnih posledica prekida navedenog linka od 105.104,00 eura po svakom danu potpune obustave saobraćaja. Pored toga, prekid putnog linka preko mostova *Nišava 2* i *3* izazvao bi najveći porast ukupne dužine obilaznih putanja korisnika analizirane podmreže sa ukupnom dodatnom dužinom putovanja svih vozila od 32.959,00 km.

Dobijeni rezultati iz simulacije preraspodele saobraćaja ukazuju da ne postoje problemi sa nastankom saobraćajnih gužvi ili zastoja, zato što su aktuelna saobraćajna opterećenja sa vršnim časovnim opterećenjima koja ne prelaze 700 voz/h, niska za rang dvotračnog puta (M-1.12). Troškovi dodatnog vremena putovanja zauzimaju najveći udeo od ukupnih indirektnih troškova usled prekida linka, što se može objasniti niskim kapacitetom lokalnih puteva koji služe kao alternativne rute.

Veoma važnu ulogu na izlazne rezultate bilo kojeg simulacionog modela ima topologija saobraćajne mreže, odnosno, broj, raspored i kategorija raskrsnica između linkova različitog ranga. Rezultati simulacije za mreže sa različitom topologijom, a na kojima su približno ista saobraćajna opterećenja, mogu veoma da se razlikuju. Ako se ponovo sagleda podmreža na **Slici 4**, odmah se vidi da prekidom nekog od primarnih linkova na državnom putu M-1.12, značajan deo saobraćajnih tokova biva preusmeren na dve najznačajnije alternativne rute koje vode preko linkova koji pripadaju državnom putu prvog reda M-9.

Izvesno je da bi se dobijeni rezultati simulacionog modela drastično razlikovali ako u slučaju analizirane podmreže ne bi postojale dve dominantne alternativne rute približno istog kapaciteta, i sav saobraćaj sa primarnog linka bi morao da se preraspodeli na raspoložive lokalne puteve manjeg kapaciteta, što bi na kraju rezultiralo "preopterećenjem" lokalne mreže i formiranjem većih zastoja saobraćaja. Pošto bi primena prezentovane metodologije za procenu indirektnih troškova na putnoj mreži sa većim saobraćajnim opterećenjima i drugom topologijom dala značajno različite rezultate, buduća istraživanja treba da potvrde osnovne principe uspostavljene pri analizi simulacionog modela u ovom radu.

## 7. ZAKLJUČAK

Prikazana metodologija za procenu indirektnih troškova, koristeći najmodernija softverska rešenja za izradu simulacionih modela saobraćajnih mreža, nastojala je da što jasnije pruži odgovor na pitanje koje su moguće posledice na saobraćaj usled smanjenog kapaciteta ili u najgorem slučaju potpunog prekida ugroženog linka u posmatranoj putnoj mreži. Velike uštede u pogledu troškova korisnika mogu biti postignute ako se na osnovu iscrpnih analiza simulacionog modela mreže usvoji jedinstveni sistem prioritizacije rekonstrukcije oštećenih deonica. Jedino sveukupnom analizom transportnog modela određene regije ili cele nacionalne mreže moguće je precizno identifikovati najugroženije deonice čiji bi prekid doveo do najvećih zastoja i poremećaja saobraćaja.



Na ovaj način treba formirati i bazu najvažnijih inženjerskih objekata na primarnim pravcima (veliki mostovi, tuneli, potporne konstrukcije, galerije itd.), čija stabilnost i funkcionalnost značajno utiču na kapacitet celog poteza, a neretko i većeg dela mreže. Sprovedenjem opisanog postupka na svim linkovima nacionalne mreže stvara se pouzdana osnova za kreiranje tzv. "mape ranjivosti" saobraćajne infrastrukture. Iz takve mape mogu se veoma praktično i brzo dobiti podaci o "osetljivosti" bilo koje deonice mreže prema različitim prirodnim ili veštački izazvanim hazardima.

Katastrofalne poplave koje su zahvatile veći deo Srbije u maju mesecu ove godine, i prouzrokovale milionske štete na velikom broju mostova preko nadošlih reka, nedvosmisleno su potvrdile neophodnost sprovođenja opisane analize na svim putnim pravcima gde postoji opravdana bojazan od formiranja i nekontrolisanog širenja bujičnih tokova. Dalji razvoj i kontinualno unapređenje predstavljene metodologije neuporedivo manje košta sve korisnike javnih puteva u odnosu na veličinu indirektno štete koja je izazvana oštećenjem ili rušenjem najvažnijih objekata saobraćajne infrastrukture.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja u okviru projekta Tehnološkog razvoja - TR 36002 pod nazivom: „Planiranje i upravljanje saobraćajem i komunikacijama primenom metoda računarske inteligencije", finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

#### Literatura

- [1] User Manual VISUM 13.0 (2014) Traffic Mobility Logistics (PTV), Karlsruhe, Germany.
- [2] Erath, A., Birdsall, J., Axhausen, K.W. and Hajdin, R. (2009) Vulnerability Assessment Methodology for Swiss Road Network. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2137, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 118-126.
- [3] Berdica, K. (2002) An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done, and Should Be Done. Transport Policy, Vol. 9, No. 2, pp 117-127.
- [4] Taylor, M.A.P. and D'Este, G.M. (2003) Network Vulnerability: An Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks. Network Reliability of Transport (M. G. H. Bell, Y. Lida, eds.), Pergamon, Oxford, United Kingdom, pp. 23-44.
- [5] Knopp, V.L., Hoogendoorn, S.P. and Van Zuylen, H.J. (2007) Quantification of Impact of Spillback Modeling in Assessing Network Reliability. Presented at 86<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [6] Matisziw, T.C, Murray, A.T. and Grubestic, T.H. (2007) Evaluating Vulnerability and Risk in Interstate Highway Operation. Presented at 86<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [7] Bocchini, P. and Frangopol, M.D. (2012) Optimal Resilience and Cost - Based Postdisaster Intervention Prioritization for bridges along a Highway Segment. ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 117-129.
- [8] Schulz, C. (2011) Ph.D. Thesis: The Identification of Critical Road Infrastructures - The Case of Baden - Wuerttemberg. Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, pp. 2-23.
- [9] Mapa putne mreže jugoistočne Srbije. (2014) Dostupno preko: <https://www.google.rs/maps/> (14.07.2014)
- [10] Saobraćajne studije i prognoze. (1996) Generalni projekat za autoputni koridor X-c: Niš - Bugarska granica, Institut za puteve, Beograd.
- [11] Fundamentals - VISUM 13.0 (2014) Traffic Mobility Logistics (PTV), Karlsruhe, Germany.
- [12] Brojanje saobraćaja na mreži državnih puteva Republike Srbije. (2013) Prosečan godišnji dnevni saobraćaj - PGDS u 2012. godini, Javno preduzeće "Putevi Srbije", Beograd.
- [13] Tanasić, N., Ilić, V. and Hajdin, R. (2013) Vulnerability Assessment of Bridges Exposed to Scour. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Maintenance and Preservation 2013, Vol. 1, No. 2360: Including 2013 Thomas B. Deen Distinguished Lecture, Transportation Research Board of National Academies, Washington D.C., pp. 36-44.
- [14] Priručnik za analizu troškova i koristi. (2010) Javno preduzeće "Putevi Srbije" i Ministarstvo infrastrukture Vlade Republike Srbije, Beograd, strana 103-121.
- [15] Osoba, M., Mertner, J. and Tubić, V. (2007) First Experience on Road Safety Auditing in Serbia - is it Cost Effective? European Transport Conference, Innovative Approaches to Improving Road Safety, Belgrade.
- [16] Idejni projekat autoputa E-80 Niš - Dimitrovgrad, deonice 3, 4, 5 i 6. (2009) Institut za puteve, Beograd.