

MULTI-HAZARD I SOCIO-EKONOMSKA PROCENA KRITIČNOSTI PUTNE MREŽE SRBIJE: PODRŠKA KLIMATSKOJ OTPORNOSTI I UPRAVLJANJU INFRASTRUKTUROM

Elco Koks¹, Jelena Ćirilović Stanković^{2*}, Shadi Shirazian¹, Valentin Weiward¹, Jasna Plavšić³,
Joël De Plaen¹

¹Vrije Universiteit, Amsterdam ²EcoConceptS, Srbija ³Građevinski Fakultet Univerziteta u Beogradu

Rezime: Klimatske promene sve više utiču na funkcionisanje transportnih sistema kroz kombinaciju ekstremnih vremenskih događaja i dugoročnih promena u životnoj sredini. Pored fizičkih oštećenja, poremećaji u funkcionisanju putne mreže mogu značajno uticati na pristup osnovnim uslugama i rad ključnih socio-ekonomskih sistema. U radu je predstavljena integrisana metodologija za procenu klimatske i funkcionalne kritičnosti putne mreže Srbije, razvijena sa ciljem unapređenja otpornosti infrastrukture i podrške upravljanju imovinom. Pristup obuhvata analizu više hazarda — uključujući poplave, klizišta, snežne nanose, kao i povećanje intenziteta padavina usled klimatskih promena — u kombinaciji sa pokazateljima performansi mreže i socio-ekonomskim indikatorima, kao što su dostupnost zdravstvenih i hitnih službi, kao i ključnih transportnih čvorišta. Primena GIS okvira omogućava identifikaciju deonika putne mreže koje su istovremeno izložene klimatskim hazardima i od ključnog značaja za očuvanje povezanosti i dostupnosti usluga. Zbog osetljivosti podataka, rad je fokusiran na metodološki pristup i njegovu primenu, dok su rezultati prikazani na agregiranom nivou. Predloženi okvir predstavlja praktičan alat za donošenje odluka zasnovanih na proceni rizika, podržavajući prioritizaciju investicija, planiranje održavanja, kao i razvoj strategija prilagođavanja klimatskim promenama i upravljanja kriznim situacijama u transportnom sektoru.

Ključne reči: Klimatska otpornost, kritičnost putne mreže, analiza više hazarda, socio-ekonomski aspekti, upravljanje infrastrukturnom imovinom.

A MULTI-HAZARD AND SOCIO-ECONOMIC CRITICALITY ASSESSMENT OF THE SERBIAN ROAD NETWORK: SUPPORTING CLIMATE RESILIENCE AND INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

Elco Koks¹, Jelena Ćirilović Stanković^{2*}, Shadi Shirazian¹, Valentin Weiward¹, Jasna Plavšić³,
Joël De Plaen¹

¹Vrije Universiteit, Amsterdam ²EcoConceptS, Srbija ³Faculty of Civil Engineering University of Belgrade

Abstract: Climate change is increasingly disrupting transport systems through a combination of extreme weather events and long-term environmental changes. In addition to physical damage, disruptions to road networks can significantly affect access to essential services and the functioning of critical socio-economic systems. This paper presents an integrated methodology for assessing the climate and functional criticality of the Serbian road network, developed to support infrastructure resilience and asset management. The approach combines multi-hazard analysis—including floods, landslides, snowdrifts, and increasing precipitation under climate change with network performance and socio-economic indicators, such as accessibility to healthcare, emergency services, and key transport nodes. A GIS-based framework is used to identify road segments that are both exposed to climate hazards and critical for maintaining connectivity and service accessibility. Due to data sensitivity, the paper focuses on the methodological approach and its application, while results are presented at an aggregated level. The proposed framework provides a practical tool for risk-informed decision-making, supporting the prioritization of investments, maintenance planning, and the development of climate adaptation and crisis management strategies in the transport sector.

Keywords: Climate resilience, Road network criticality, Multi-hazard assessment, Socio-economic consideration, Infrastructure asset management.

1. UVOD

Klimatske promene sve više utiču na funkcionisanje i pouzdanost transportne infrastrukture, naročito u regionima izloženim višestrukim prirodnim hazardima [1, 2, 3]. Srbija je već pretrpela značajne posledice klimatski uslovljenih događaja, što jasno ukazuje na ranjivost njene putne mreže. Poplave iz 2014. godine predstavljaju jednu od najtežih nedavnih katastrofa, sa ukupnom procenjenom štetom od približno 1,5 milijardi evra [4]. Transportni sektor bio je posebno pogođen, pri čemu je oštećeno 945 kilometara puteva i 307

* Autor zadužen za korespondenciju: jelenacirilovic@gmail.com

mostova, pretežno usled klizišta izazvanih intenzivnim padavinama [4]. Direktna šteta na putnoj infrastrukturi procenjena je na 65,7 miliona evra, dok su dodatni ekonomski gubici, usled produženja vremena putovanja i povećanih operativnih troškova vozila, iznosili 61,6 miliona evra [4]. Noviji događaji, uključujući poplave i bujične poplave tokom 2020. i 2023. godine, pogodili su više od 52.000, odnosno 15.000 ljudi [5, 6], dok su obilne snežne padavine u decembru 2024. godine izazvale značajne poremećaje u saobraćaju i produženje vremena putovanja [7].

Ovi događaji ukazuju ne samo na fizičku ranjivost putne infrastrukture, već i na šire društvene i ekonomske posledice poremećaja u funkcionisanju mreže [8]. Stoga obezbeđivanje otpornosti putne mreže Srbije zahteva pristupe koji prevazilaze tradicionalne procene zasnovane isključivo na karakteristikama infrastrukturnih objekata, i uzimaju u obzir funkcionalnu ulogu puteva u širem socio-ekonomskom sistemu.

U ovom radu predstavljen je pristup za procenu klimatske kritičnosti putne mreže Srbije, razvijen sa ciljem podrške procesima donošenja odluka u okviru upravljanja infrastrukturnom imovinom. Metodologija se zasniva na okviru hazard–izloženost–kritičnost, koji integriše analizu više hazarda sa pojednostavljenom procenom performansi mreže i mapiranjem socio-ekonomskih zavisnosti. Na ovaj način, deonice putne mreže vrednuju se ne samo prema svojoj izloženosti klimatskim hazardima, već i prema njihovom značaju za obezbeđivanje pristupa ključnim uslugama i održavanje nacionalne i regionalne povezanosti.

Glavni cilj rada je identifikacija deonice puteva čiji bi prekid funkcionisanja doveo do najvećih ekonomskih i društvenih posledica, kao i definisanje skupa prostorno eksplicitnih indikatora kritičnosti koji mogu da podrže prioritizaciju infrastrukturnih investicija. Rezultati su osmišljeni tako da se integrišu u postojeće sisteme za upravljanje putnom infrastrukturom, čime se doprinosi donošenju informisanih odluka zasnovanih na proceni rizika. Zbog osetljivosti podataka i ograničenja u pogledu poverljivosti, rad je primarno usmeren na metodološki okvir i njegovu primenu, dok su detaljni kvantitativni rezultati prikazani na agregiranom nivou. Poseban naglasak stavljen je na demonstraciju primenljivosti pristupa i njegovog potencijala za unapređenje procesa donošenja odluka u upravljanju infrastrukturom.

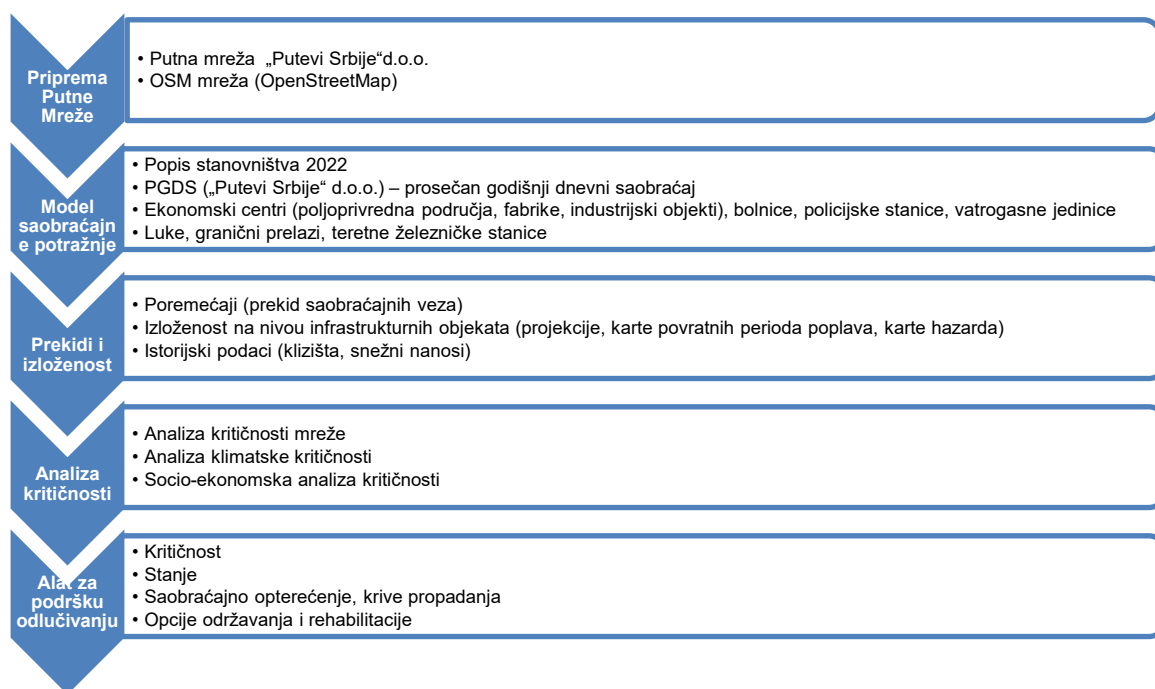
2. METODOLOŠKI OKVIR ZA PROCENU KRITIČNOSTI MREŽE

Klimatski rizici se najčešće procenjuju primenom okvira hazard–izloženost–ranjivost, koji kombinuje intenzitet i verovatnoću nastanka hazarda sa infrastrukturnim objektima koji mogu biti pogođeni i njihovom osetljivošću na oštećenja. Iako je ovaj pristup široko primenjen, on se prvenstveno fokusira na procenu potencijalnih oštećenja pojedinačnih infrastrukturnih objekata. Međutim, ne obuhvata eksplicitno posledice otkaza tih elemenata na funkcionisanje celokupnog sistema. Ovo ograničenje je posebno značajno u slučaju transportne infrastrukture, gde poremećaj na jednoj deonici može izazvati lančane efekte u okviru cele mreže. Kako bi se prevazišao ovaj nedostatak, u ovom istraživanju primenjuje se okvir hazard–izloženost–kritičnost, kojim se fokus pomera sa oštećenja na nivou pojedinačnih elemenata na uticaje na nivou sistema.

U okviru transportnih sistema, kritičnost mreže može se definisati kao relativni značaj određene deonice puta za očuvanje ukupnih performansi mreže. Ona odražava stepen u kome otkaz ili poremećaj na posmatranoj deonici utiče na povezanost, efikasnost putovanja i pristup ključnim destinacijama. U praktičnom smislu, procena kritičnosti ima za cilj identifikaciju deonice čiji bi prekid funkcionisanja doveo do najvećih posledica po sistem, kao što su produženje vremena putovanja, preusmeravanje saobraćaja ili gubitak pristupa osnovnim uslugama. Ovakav mrežni pristup posebno je značajan u kontekstu klimatskih hazarda, gde lokalizovani događaji (npr. poplave ili klizišta) mogu izazvati široko rasprostranjene funkcionalne poremećaje.

Kako bi se obuhvatila višefunkcionalna uloga putne mreže, u radu se primenjuje skup komplementarnih pokazatelja uticaja koji obuhvataju kako performanse transportnog sistema, tako i socio-ekonomske zavisnosti. Ovi pokazatelji uključuju indikatore dostupnosti osnovnih usluga (npr. zdravstvene zaštite i hitnih službi), kao i šire funkcije povezanosti, poput veza sa ključnim transportnim čvorištima i ekonomskim aktivnostima (industrijski objekti, poljoprivredna proizvodnja).

S obzirom na to da svaki pokazatelj osvetljava različit aspekt značaja mreže, razvijen je kompozitni indikator „klimatske kritičnosti“, zasnovan na pristupu ponderisanja. Na ovaj način omogućena je identifikacija deonice koje su dosledno kritične kroz više dimenzija, čime se obezbeđuje sveobuhvatnija osnova za određivanje prioriteta.



Slika 1. Pregled primenjene metodologije.

Predloženi pristup (Slika 1) zasnovan na kritičnosti nije zamišljen kao zamena za tradicionalne procene ranjivosti, već kao njihova dopuna. Dok procene ranjivosti pružaju detaljan uvid u fizičko stanje i osetljivost infrastrukturnih elemenata, one često zahtevaju podatke visoke rezolucije i terenska istraživanja. Nasuprot tome, procena kritičnosti predstavlja alat za sistemsko sagledavanje koji može da podrži strateško donošenje odluka. Identifikacijom najkritičnijih deonica u smislu njihovog doprinosa funkcionisanju mreže i društvenim potrebama, omogućava se usmeravanje detaljnijih analiza ranjivosti i ciljnih intervencija na najprioritetnije lokacije.

Ovakav pristup je posebno značajan u uslovima ograničene dostupnosti podataka, gde detaljne informacije o pojedinačnim infrastrukturnim elementima često nisu dostupne. Fokusiranjem na funkcionalni značaj infrastrukture, omogućava se efikasnije usmeravanje resursa i doprinosi razvoju otpornijih transportnih sistema.

3. DEFINISANJE ULAZNIH PODATAKA I PRIMENJENIH TRANSPORTNIH MODELA

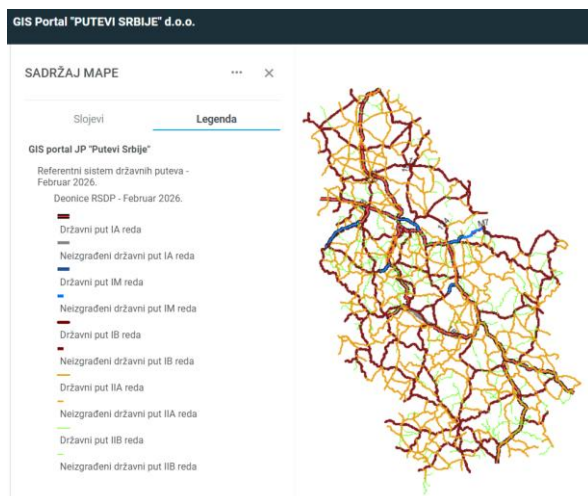
3.1. Podaci o putnoj mreži i grafovska reprezentacija

Analiza se zasniva na dve komplementarne reprezentacije putne mreže Republike Srbije. Primarni skup podataka obuhvata državnu putnu mrežu kojom upravlja „Putevi Srbije“ d.o.o., uključujući putne pravce kategorija IA, IB, IM, IIA i IIB, i koristi se za analizu kritičnosti mreže [9]. Pored toga, za potrebe analize pristupačnosti koristi se proširena mreža izvedena iz OpenStreetMap (OSM) baze [10], koja obuhvata i lokalne puteve neophodne za modeliranje pristupa socio-ekonomskim sadržajima. Zbog razlika u prostornoj reprezentaciji i neusaglašenosti ovih skupova podataka, mreže se obrađuju odvojeno i ne integrišu se direktno. Dok državnu mrežu predstavlja pouzdanu osnovu za modeliranje saobraćajnih tokova i sistemskih poremećaja, OSM mreža omogućava detaljniji prikaz lokalne pristupačnosti.

Radi sprovođenja analize na nivou mreže, putni podaci se transformišu u grafovsku strukturu, gde su putne deonice predstavljene kao grane (edges), a raskrsnice kao čvorovi (nodes). Međutim, originalni skup podataka zahteva više koraka prethodne obrade kako bi se obezbedila topološka konzistentnost i pogodnost za rutiranje. Ovi koraci uključuju povezivanje nepovezanih segmenata, rešavanje problema nedostajućih ili nepotpunih raskrsnica, kao i obezbeđivanje potpune povezanosti mreže. U tu svrhu primenjena je kombinacija ručnih korekcija i automatizovanih geoprostornih procedura, kao što su „snapping“ bliskih segmenata i deljenje linija u tačkama preseka, čime je dobijena potpuno povezana mreža (Slika 3).

Saobraćajni podaci su uključeni kroz integraciju podataka o prosečnom godišnjem dnevnom saobraćaju (Slika 2, PGDS) [9]. Izmerene vrednosti PGDS-a povezane su sa segmentima mreže kombinacijom identifikacionog

i prostornog uparivanja. Preostale praznine popunjene su hijerarhijskim pristupom zasnovanim na susednim segmentima i karakteristikama putnih kategorija, čime je obezbeđena konzistentna reprezentacija saobraćajnih opterećenja na nivou cele mreže.



Slika 2. PGDS na putnoj mreži
Izvor: (Putevi Srbije doo, GIS web portal).



Slika 3. Tri primera prilagođavanja mreže radi
obezbeđivanja potpune povezanosti.

Na kraju, mreža se transformiše u usmeren graf kako bi se verno prikazali realni uslovi saobraćaja. U ovoj reprezentaciji, jednosmerne saobraćajnice modeluju se kao grane sa jednim smerom kretanja, dok se dvosmerni putevi predstavljaju parovima grana suprotnih smerova. Time se omogućava realističnije rutiranje i obezbeđuje da dalja analiza performansi mreže i uticaja poremećaja odražava stvarna saobraćajna ograničenja. Dobijena grafovna reprezentacija predstavlja osnovu za modeliranje transportnih tokova i procenu funkcionalne kritičnosti putnih deonica u mreži Republike Srbije.

3.2 Modeliranje transportne potražnje (O–D Matrica)

Transportna potražnja se predstavlja pomoću matrice izvorišta (origin)–odredišta (destination) (O–D), formirane na osnovu podataka o broju stanovnika na nivou naselja iz Popisa 2022. godine [11], koji obuhvata približno 4.700 naselja u Srbiji. Svako naselje je prostorno povezano sa najbližim čvorom putne mreže, čime se definiše skup izvorišta i odredišta visoke prostorne rezolucije, koji verno odražava prostorni raspored stanovništva. O–D matrica se generiše primenom gravitacionog modela [12], u kome je broj putovanja između dve lokacije proporcionalan veličini njihove populacije, a obrnuto proporcionalan vremenu putovanja između njih. Konkretno, potražnja se računa na sledeći način:

$$D_{a,b} = P_a \times P_b \times e^{-\beta \cdot d_{a,b}}$$

gde je $D_{a,b}$ potražnja između izvorišta a i odredišta b , P_a i P_b odgovarajuće veličine populacije, $d_{a,b}$ normalizovano vreme putovanja po najkraćoj putanji u uslovima slobodnog toka (izraženo kao udeo u odnosu na maksimalno vreme putovanja između bilo koja dva čvora u O–D skupu), dok je β parametar opadanja sa rastojanjem koji određuje osetljivost potražnje na vreme putovanja (u ovoj analizi usvojen je $\beta = 1$). Unutarzonska putovanja (odnosno slučajevi kada su izvorište i odredište isti čvor) isključena su postavljanjem $D_{a,a} = 0$.

Vremena putovanja izračunavaju se na osnovu najkraćih putanja u uslovima slobodnog toka, korišćenjem dužina deonica i ograničenja brzine (u skladu sa važećim ograničenjima po kategorijama puteva). Rezultat ovog postupka je bazna matrica potražnje koja opisuje potencijalnu transportnu aktivnost između svih parova naselja u Srbiji, kao i vremena putovanja bez kašnjenja.

Transportna potražnja i funkcionisanje mreže analiziraju se kroz dva komplementarna pristupa, koji odražavaju različite dimenzije korišćenja i kritičnosti putne mreže. Prvi pristup odnosi se na modeliranje saobraćajnih tokova na nacionalnom nivou, korišćenjem O–D matrice u kombinaciji sa raspodelom saobraćaja. Drugi pristup obuhvata procenu uticaja poremećaja u putnoj mreži na pristupačnost ključnih socio-ekonomskih funkcija (zdravstvo, hitne službe, poljoprivreda i industrija), kao i uticaja klimatskih hazarda (poplave, klizišta i snežni nanosi).

3.3 Modeliranje poremećaja (disruption) i izloženosti (exposure)

Kritičnost mreže procenjuje se simulacijom poremećaja pojedinačnih putnih deonica i analizom njihovog uticaja na funkcionisanje sistema. Za svaku deonicu, ona se privremeno uklanja iz mreže, nakon čega se ponovo izračunavaju najkraće putanje između svih O–D parova.

Na osnovu poređenja sa baznim stanjem, putovanja se klasifikuju u tri kategorije:

- (i) nepromenjena putovanja, kod kojih rute ostaju iste;
- (ii) odložena putovanja, kod kojih postoje alternativne rute, ali sa dužim vremenom putovanja; i
- (iii) izolovana putovanja, kod kojih više ne postoji izvodljiva veza između izvorišta i odredišta.

Za kvantifikaciju uticaja na nivou mreže izračunava se ponderisano prosečno povećanje vremena putovanja, pri čemu se veća težina daje vezama sa većom potražnjom. Za izolovana putovanja uvodi se fiksna penalizacija od 6 sati, kako bi se odrazila ozbiljnost potpunog prekida veze.

Radi izražavanja uticaja u operativnim terminima, poremećaji saobraćaja se kombinuju sa intenzitetom saobraćaja kroz procenu izgubljenih vozilo-sati (vehicle hours lost - VHL). Ova metrika obuhvata i veličinu kašnjenja (ponderisano prosečno povećanje vremena putovanja) i intenzitet korišćenja mreže (PDGS), čime predstavlja robustan pokazatelj značaja pojedinačnih deonica u okviru mreže.

$$VHL_s = t_s^w \times PGDS_s$$

gde je VHL_s ukupan broj izgubljenih vozilo-sati usled poremećaja na deonici s , t_s^w potražnjom ponderisano prosečno dodatno vreme putovanja (u satima) koje imaju odložena i izolovana putovanja, dok je $PGDS_s$ prosečan godišnji dnevni saobraćaj na toj deonici. Ponderisani prosek izračunava se na sledeći način:

$$t_s^w = \frac{\sum D_{a,b} \times \Delta t_{a,b}^s}{\sum D_{a,b}}$$

gde je $D_{a,b}$ potražnja između izvorišta a i odredišta b , dok je $\Delta t_{a,b}^s$ dodatno vreme putovanja za taj O–D par nastalo usled uklanjanja deonice s . Ova metrika obuhvata i značaj putne deonice na nivou mreže (kroz kašnjenja izazvana preusmeravanjem saobraćaja) i intenzitet njenog korišćenja (kroz modelovane saobraćajne tokove predstavljene u O–D matrici). Dodatno, uticaji se razdvajaju na putničke i teretne komponente kroz procenu izgubljenih putničkih sati (PHL) i tona-sati (THL), na osnovu standardnih pretpostavki o popunjenosti vozila i nosivosti. Na taj način omogućava se detaljnije sagledavanje efekata poremećaja na različite korisničke grupe i ekonomske aktivnosti.

Na osnovu podrazumevanih vrednosti iz HDM-4 [13], prilagođenih kategorijama vozila u okviru PGDS podataka za Srbiju, primenjuju se sledeći konverzioni faktori: putnička vozila prevoze 2 putnika, autobusi 30 putnika, laka teretna vozila 1,2 tone, srednja teretna vozila 3,8 tona, teška teretna vozila 8,0 tona, dok zglobna vozila prevoze 14,5 tona. PHL i THL se zatim izračunavaju na sledeći način:

$$PHL_s = t_s^w \times (PGDS_s^{auto} \times 2 + PGDS_s^{bus} \times 30)$$

$$THL_s = t_s^w \times (PGDS_s^{lako} \times 1.2 + PGDS_s^{srednje} \times 3.8 + PGDS_s^{tesko} \times 8.0 + PGDS_s^{avoz} \times 14.5)$$

Ove metrike omogućavaju detaljniju procenu uticaja poremećaja, uz jasno razlikovanje između kašnjenja koja utiču na putnički saobraćaj i onih koja utiču na transport robe.

3.4 Okvir za procenu socio-ekonomske kritičnosti

Sve analize pristupačnosti sprovode se na mreži izvedenoj iz OpenStreetMap (OSM) baze (videti Poglavlje 3.1), koja obuhvata i lokalne puteve. Vremena putovanja po najkraćim putanjama izračunavaju se primenom Dijkstrinog algoritma [14] u uslovima slobodnog toka, čime se obezbeđuje konzistentna osnova za poređenje različitih scenarija. Za svaku analiziranu oblast jasno su definisana izvorišta i odredišta (Tabela 1), dok se uticaji kvantifikuju kao promene u vremenu putovanja u odnosu na bazno stanje, za različite scenarije poremećaja (videti Poglavlje 3.3).

Obezbeđivanje pravovremenog pristupa zdravstvenim uslugama od ključnog je značaja, naročito tokom ekstremnih događaja kada se potreba za medicinskom pomoći značajno povećava. Kašnjenja u dolasku do zdravstvenih ustanova mogu imati ozbiljne posledice, kako za pojedince, tako i za celokupan sistem. Privatne zdravstvene ustanove nisu uključene u analizu zbog ograničene dostupnosti podataka. Pored toga, pristup hitnim službama predstavlja ključni element efikasnog odgovora na katastrofe. Policijske stanice i vatrogasno-spasilačke jedinice imaju ulogu prvog odgovora, a njihova operativna efikasnost u velikoj meri zavisi od dostupnosti i funkcionalnosti putne mreže.

Tabela 1. O–D matrica za analizu socio-ekonomske kritičnosti

Oblast	Ishodišta (Origin)	Odredišta (Destination)	Opis
Zdravstvo	4700+ naselja (Popis 2022)	158 domova zdravlja, 40 opštih bolnica, 33 specijalnih bolnica, 4 klinička centra, 7 klinika i 16 instituta	Lokacije su prikupljene i geokodirane na osnovu zvaničnih izvora [15]
Hitne službe	4700+ naselja (Popis 2022)	162 policijske stanice, 154 vatrogasne jedinice	Lokacije su prikupljene i geokodirane na osnovu zvaničnih izvora [16,17]
Poljoprivreda	Lokacije proizvodnje po kulturama i broj registrovanih gazdinstava [18–21]	Rečne luke, železnički teretni terminali, granični prelazi	Izračunate su sve moguće rute povezivanja.
Industrija	Geolokacije najvećih industrijskih postrojenja i kompanija u Srbiji	Glavni međunarodni granični prelazi dostupni teretnom saobraćaju	

Poljoprivredna proizvodnja u Srbiji u velikoj meri zavisi od pouzdanih transportnih veza, naročito kada je reč o izvozu i kvarljivoj robi. Poremećaji u saobraćaju mogu dovesti do kašnjenja, kvarenja proizvoda i širih poremećaja u lancima snabdevanja. Industrijski centri predstavljaju ključne ekonomske čvorove, čija je povezanost sa međunarodnim tržištima od suštinskog značaja za trgovinu i ekonomsku stabilnost. Ova analiza omogućava identifikaciju putnih deonica koje su ključne za povezivanje proizvodnih područja sa izvozno orijentisanom infrastrukturom.

Pristupačnost se meri kao najkraće vreme putovanja od svakog naselja do najbliže zdravstvene ustanove ili službe za hitne intervencije. Ovo predstavlja baznu referencu za procenu uticaja poremećaja u mreži. U svim analiziranim oblastima pristupačnost se procenjuje kako u baznim, tako i u poremećenim uslovima, pri čemu se promene u vremenu putovanja koriste za kvantifikaciju socio-ekonomskih posledica poremećaja u saobraćaju.

3.5 Okvir za procenu klimatske kritičnosti

U ovom poglavlju opisuje se način na koji se klimatski hazardi prevode u poremećaje u putnoj mreži i integrišu u okvir za procenu kritičnosti. Pristup se sastoji iz dva osnovna koraka: (i) procene izloženosti na nivou pojedinačnih deonica putem prostornog preklapanja podacima o hazardima i putnoj mreži i (ii) definisanja scenarija poremećaja na osnovu pragova intenziteta hazarda. U analizi su obuhvaćene rečne poplave, klizišta i snežni nanosi, uz korišćenje istorijskih podataka i projekcija budućih događaja u skladu sa klimatskim promenama.

Izloženost se procenjuje primenom metode prostornog preklapanja, pri čemu se mape hazarda ukrštaju sa putnom mrežom kako bi se svakom putnom segmentu dodelila vrednost intenziteta hazarda. Za svaki tip hazarda izdvaja se maksimalna vrednost intenziteta duž posmatrane deonice (npr. dubina poplave ili klasa podločnosti klizištima), čime se formira skup podataka o izloženosti na nivou deonica. Ovaj skup podataka predstavlja osnovu za povezivanje informacija o hazardima sa analizama funkcionisanja mreže. Zbog razlika u prostornoj reprezentaciji, procena izloženosti se primarno sprovodi na mreži „Putevi Srbije“ d.o.o., dok je analiza pristupačnosti na OSM mreži ograničena na hazarde za koje je moguće obezbediti konzistentno prostorno poklapanje, odnosno na rečne poplave.

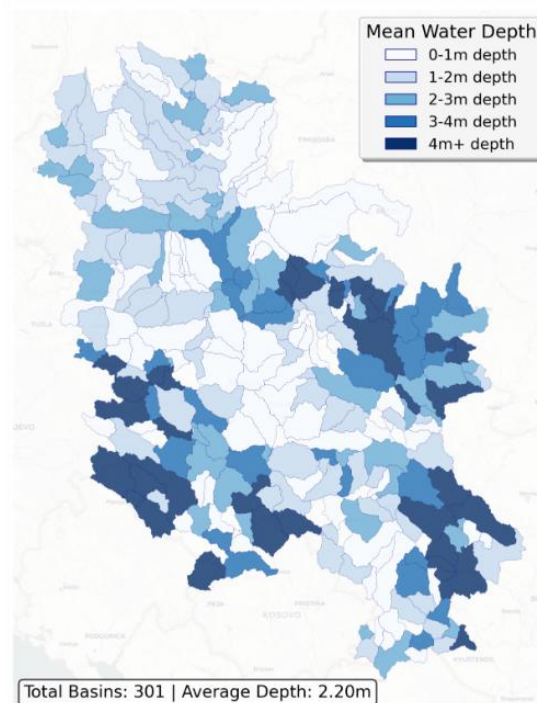
Da bi se uticaji hazarda uključili u analizu na nivou mreže, vrednosti izloženosti se prevode u binarna stanja funkcionalnosti. Putne deonice se smatraju ili potpuno funkcionalnim ili nefunkcionalnim, u zavisnosti od toga da li intenzitet hazarda prelazi unapred definisane pragove. Iako ovakav pristup ne obuhvata parcijalno smanjenje funkcionalnosti (npr. smanjenje brzine kretanja), omogućava konzistentan i računski efikasan okvir za procenu uticaja na nivou cele mreže kroz različite tipove hazarda i različite scenarije.

3.5.1 Modeliranje poplava

Izloženost poplavama određena je na osnovu evropskih i globalnih mapa hazarda koje je razvio Zajednički istraživački centar Evropske komisije (JRC) [22]. Ovi skupovi podataka (Slika 4) obezbeđuju prostorno eksplicitne procene dubine poplave za različite povratne periode, zasnovane na hidrauličkom i hidrološkom modeliranju. U ovoj analizi koristi se povratni period od 100 godina kao reprezentativni referentni scenario za procenu rizika od poplava. Vrednosti dubine poplave se prostorno preklapaju sa putnom mrežom, pri čemu se za svaku deonicu izdvaja maksimalna dubina. Kao prag za definisanje poremećaja usvojena je vrednost od 25 cm – deonice kod kojih dubina vode prelazi ovu vrednost smatraju se neprohodnim, u skladu sa tipičnim ograničenjima vozila. Iako ovakav pristup može dovesti do preceňivanja izloženosti, zbog nedostatka podataka o nasipima i postojećim merama zaštite, on obezbeđuje konzistentnu osnovu za analizu na nivou cele mreže.



Slika 4. Primer karte poplava za povratni period od 100 godina.



Slika 5. Pregled rečnih slivova.

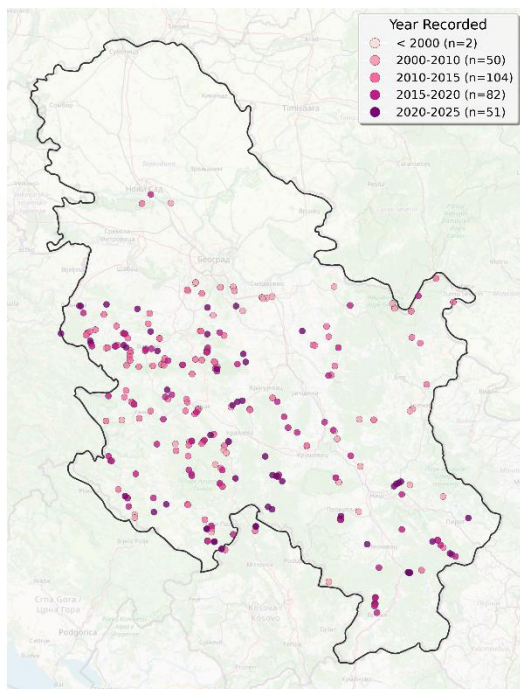
Mape poplava različitih povratnih perioda pokazuju dubine plavljenja date verovatnoće za svaku lokaciju, a ne prostorni raspored realnih pojedinačnih događaja. Kako bi se konstruisali prostorno konzistentni scenariji poremećaja, mape poplava su segmentirane prema granicama slivova (Slika 5). Poplava na svakom slivu se tretira kao nezavisan događaj, čime se obezbeđuje da se poremećaji javljaju isključivo unutar hidrološki povezanih celina. Na taj način formiran je skup diskretnih scenarija, u okviru kojih više putnih deonica može biti istovremeno pogođeno unutar istog sliva. Ovi scenariji zasnovani na događajima predstavljaju osnovu za analize kritičnosti mreže i pristupačnosti, omogućavajući procenu sistemskih uticaja u realističnim uslovima pojave hazarda. U cilju sagledavanja budućih klimatskih uslova, u analizu su uključene i projekcije ekstremnih padavina. Kao indikator intenziteta ekstremnih događaja koristi se maksimalna dnevna količina padavina (Rx1d), koja predstavlja najintenzivniji padavinski događaj u posmatranom periodu.

Klimatske projekcije preuzete su iz Digitalnog klimatskog atlasa Srbije [23] i zasnovane su na kombinaciji više globalnih i regionalnih klimatskih modela, za scenarije RCP4.5 i RCP8.5, koji predstavljaju umereni i visoki scenario emisija. Očekivano povećanje intenziteta padavina može dovesti do porasta ugroženosti od poplava,

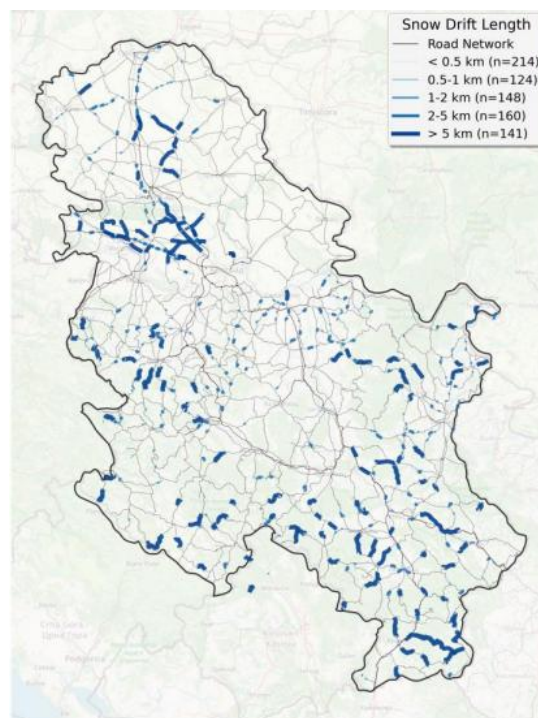
kao i indirektno povećati verovatnoću pojave povezanih procesa, poput klizišta. Iako u ovoj analizi nisu eksplicitno modelirani budući poremećaji u mreži, ove projekcije pružaju važan kontekst za interpretaciju rezultata i identifikaciju budućih trendova rizika.

3.5.2 Modelovanje klizišta i snežnih nanosa

Podaci o klizištima preuzeti su iz nacionalne baze klizišta kojom upravljaju „Putevi Srbije“ d.o.o., dostupne putem GIS web portal (Slika 6). Baza obuhvata 289 registrovanih lokacija klizišta na državnoj putnoj mreži. Za svaku lokaciju dostupne su prostorne koordinate, referenca na putnu deonicu, datum poslednjeg ažuriranja, kao i atributi koji opisuju trenutno stanje klizišta (sanirano, privremeno sanirano ili nesaniro). Dodatno, podaci sadrže informacije o hitnosti intervencije i uticaju na režim saobraćaja (normalno odvijanje, smanjena brzina ili naizmenično propuštanje vozila).



Slika 6. Zabeležena klizišta.



Slika 7. Zabeleženi snežni nanosi.

Iako klimatske projekcije ukazuju na trend smanjenja količine snega, pojava snežnih nanosa i dalje predstavlja operativni problem za putnu mrežu jer utiče na vidljivost, bezbednost i brzinu kretanja. Baza „Putevi Srbije“ d.o.o. putne mreže obuhvata 787 lokacija podložnih pojavi snežnih nanosa (Slika 7). Za svaku lokaciju dostupni su prostorni podaci, dužina i položaj zahvaćene deonice, kao i opis karakteristika događaja.

4. OKVIR ZA PROCENU KRITIČNOSTI

Cilj procene kritičnosti je identifikacija putnih deonica čiji bi poremećaj imao najveći uticaj na funkcionisanje mreže i pristup ključnim socio-ekonomskim funkcijama. U tu svrhu kombinuju se indikatori zasnovani na saobraćajnim tokovima, dobijeni modelovanjem transportne potražnje, sa indikatorima pristupačnosti izvedenim iz socio-ekonomskih analiza. Procena se zasniva na skupu komplementarnih metrika kritičnosti, koje obuhvataju različite dimenzije funkcionisanja mreže: (i) uticaje na saobraćajne tokove, (ii) uticaje na pristupačnost u pogledu socio-ekonomskih pokazatelja i (iii) njihovu integraciju sa izloženošću hazardima u cilju definisanja klimatske kritičnosti.

Različite metrike kritičnosti obuhvataju komplementarne aspekte značaja putne mreže. Njihova kombinovana primena omogućava sveobuhvatniju procenu u odnosu na oslanjanje na pojedinačne indikatore. Rezultati se mogu interpretirati kroz više dimenzija, što omogućava fleksibilno definisanje prioriteta u skladu sa ciljevima upravljanja putnom mrežom. Na primer, donosioci odluka mogu dati prioritet deonicama koje minimizuju kašnjenja u saobraćaju, unapređuju pristup ključnim uslugama ili jačaju ekonomsku povezanost. Ovako definisan višedimenzionalni okvir predstavlja pouzdanu osnovu za identifikaciju prioritarnih deonica za dalja istraživanja, uključujući detaljne procene ranjivosti i definisanje ciljanih mera adaptacije. U cilju podrške

donošenju investicionih odluka, rezultati se dodatno objedinuju u kompozitni indikator – indeks klimatske kritičnosti. Ovaj indeks integriše tri ključne dimenzije: (i) izloženost hazardima, (ii) uticaje poremećaja na nivou cele mreže i (iii) uticaje na pristupačnost u socio-ekonomskom pogledu.

Indeks klimatske kritičnosti sastoji se od tri podindeksa:

- Podindeks izloženosti hazardima (H) – predstavlja fizičku izloženost putnih deonica klimatskim hazardima, uključujući rečne poplave, klizišta, snežne nanose, kao i projektovane promene u intenzitetu ekstremnih padavina i poplava.
- Podindeks poremećaja na nivou mreže (T) – obuhvata systemske uticaje poremećaja putnih deonica, izražene kroz izgubljene putničke sate (PHL), tona-sate (THL), putničke kilometre (PKL) i tonažni kilometre (TKL).
- Podindeks lokalne pristupačnosti (A) – odražava uticaj poremećaja na dostupnost ključnih usluga i infrastrukturnih čvorova, uključujući zdravstvene ustanove, hitne službe, luke, železničke stanice i granične prelaze.

Sve metrike se normalizuju na zajedničku skalu [0,1] primenom min–max normalizacije, čime se obezbeđuje njihova uporedivost bez obzira na različite jedinice i opsege vrednosti. Na ovaj način se postiže da svaki indikator proporcionalno doprinosi konačnom rezultatu. Za datu metriku m sa vrednošću x za putnu deonicu s , normalizovana vrednost se definiše kao:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Podindeksi se zatim izračunavaju kao srednja vrednost njihovih normalizovanih komponenti: Podindeks izloženosti hazardima:

$$H_s = \frac{1}{5} \times (F_s^{norm} + R_s^{norm} + C_s^{norm} + L_s^{norm} + S_s^{norm})$$

gde je F = dubina poplave, R = promena intenziteta padavina u budućnosti, C = promena rečnih poplava u budućnosti, L = izloženost klizištima, S = izloženost snežnim nanosima.

$$T_s = \frac{1}{4} \times (PHL_s^{norm} + THL_s^{norm} + PKL_s^{norm} + TKL_s^{norm})$$

gde je PHL = izgubljeni putnički sati, THL = izgubljeni tonažni sati, PKL = izgubljeni putnički kilometri, TKL = izgubljeni tonažni kilometri. Podindeks pristupačnosti:

$$A_s = \frac{1}{6} \times (HOS_s^{norm} + FIR_s^{norm} + POL_s^{norm} + PRT_s^{norm} + BRD_s^{norm} + RWZ_s^{norm})$$

gde je HOS = kašnjenje pristupa bolnici, FIR = kašnjenje pristupa vatrogasnoj stanici, POL = kašnjenje pristupa policiji, PRT = kašnjenje pristupa luci, BRD = kašnjenje pri prelasku granice, RWY = kašnjenje pristupa železničkoj stanici. Ukupna ocena klimatske kritičnosti izračunava se kao:

$$CC_s = \frac{1}{3} \times (H_s + T_s + A_s)$$

Ova formulacija pridaje jednak značaj izloženosti opasnostima, performansama mreže i socio-ekonomskoj pristupačnosti. Radi potkrepljenja tumačenja, svi podindeksi i konačna ocena kritičnosti klime klasifikovani su u pet kategorija na osnovu kvintila:

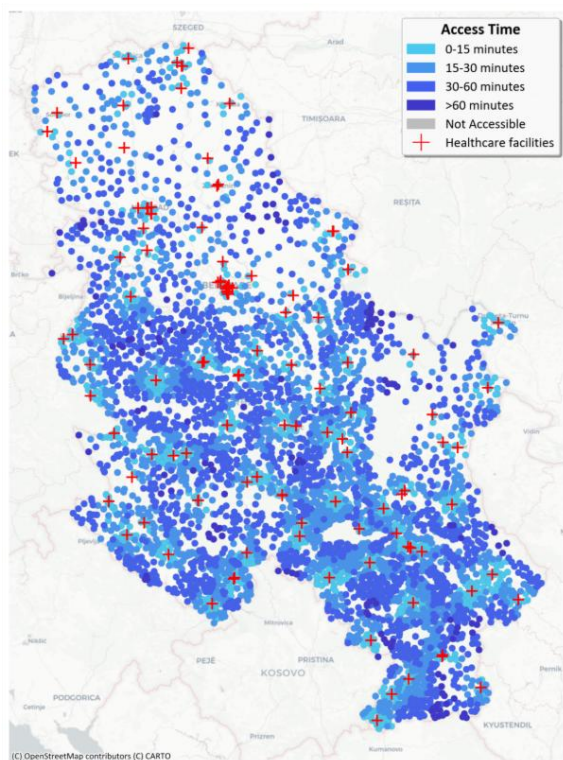
- Veoma nisko (0–20%)
- Nisko (20–40%)
- Srednje (40–60%)
- Visoko (60–80%)
- Veoma visoko (80–100%)

Ova klasifikacija olakšava komunikaciju rezultata i podržava procese donošenja odluka. Šema jednake težine predstavlja osnovnu pretpostavku. Međutim, okvir je modularan i omogućava prilagođavanje težina kako bi se

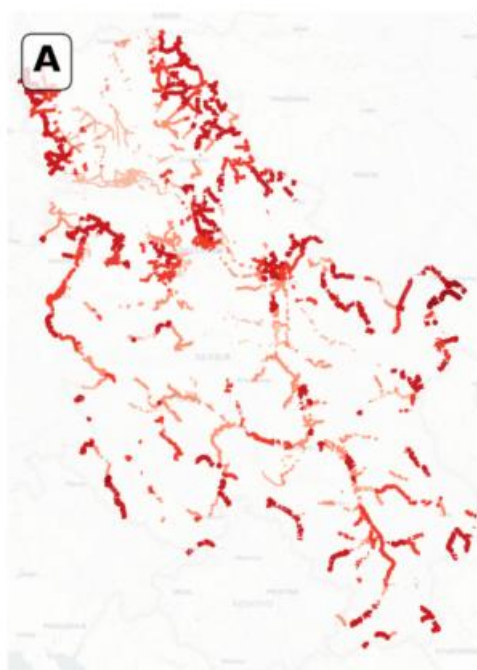
odrazili specifični prioriteti politike. Na primer, veći naglasak može se staviti na pristupačnost u hitnim slučajevima ili kretanje tereta, u zavisnosti od ciljeva planiranja. Važno je napomenuti da metrika kritičnosti klime nije namenjena da zameni detaljne inženjerske procene. Umesto toga, ona služi kao alat za skrining za identifikaciju deonica puteva koje zahtevaju dalja istraživanja i određivanje prioriteta za mere prilagođavanja klimatskim promenama. Tri podindeksa se takođe mogu analizirati nezavisno, pružajući dodatni uvid u različite dimenzije kritičnosti mreže.

5. REZULTATI PROCENE KRITIČNOSTI

Slika 8 prikazuje osnovnu pristupačnost zdravstvenim ustanovama širom Srbije pod normalnim uslovima rada, pre bilo kakvih poremećaja izazvanih opasnostima. Rezultati pokazuju da velika većina stanovništva ima dobar pristup zdravstvenim uslugama: približno 85% stanovništva može da stigne do zdravstvene ustanove u roku od 30 minuta, dok više od 99% to može da učini u roku od 60 minuta. Maksimalno vreme putovanja do najbliže zdravstvene ustanove je približno 2,2 sata i ograničeno je na mali broj udaljenih naselja.



Slika 8 Osnovna pristupačnost zdravstvenim ustanovama.



Slika 9 Povećanje vremena putovanja.

Slika 9 prikazuje povećanje vremena putovanja na putnim deonicama koje su ključne za pristup zdravstvenim uslugama u uslovima poplava (videti Poglavlje 3.3.1). Analiza se zasniva na 300 poplavnih događaja izvedenih iz mape za povratni period od 1/100 godina, kako je opisano u Poglavlju 3.3.1 i prikazano na Slici 4. U okviru svakog događaja može doći do istovremenog poremećaja više putnih deonica, čime se realističnije odražavaju sistemski efekti na nivou mreže.

Putne deonice identifikovane kao važne za pristup zdravstvenim uslugama (Slika 9) uzrokuju prosečno kašnjenje od približno 31 minut, sa medijanom od oko 29 minuta kroz sve simulirane poplavne scenarije. Većina kašnjenja nalazi se u intervalu od 20 do 60 minuta, što čini više od 70% slučajeva, dok svega oko 2% slučajeva prelazi jedan sat.

Zbog poverljivosti rezultata, u radu je prikazan samo deo nalaza koji se odnosi na kritičnost u kontekstu pristupa zdravstvenim uslugama u uslovima poplava. Ipak, opisana metodologija dosledno je primenjena na sve tipove hazarda i sve socio-ekonomske domene. Konačno, okvir omogućava izračunavanje kompozitnog indeksa klimatske kritičnosti za svaku putnu deonicu. Važno je naglasiti da se težinski faktori unutar indeksa mogu prilagođavati, čime upravljač putne mreže može usmeravati prioritete u skladu sa specifičnim ciljevima politike i strateškog planiranja.

6. INTEGRACIJA U UPRAVLJANJE IMOVINOM (ASSET MANAGEMENT)

Rezultati procene kritičnosti integrišu se u širi okvir upravljanja imovinom, sa ciljem podrške donošenju odluka i određivanju prioriteta investicija na putnoj mreži Srbije. Pored klimatske kritičnosti, u obzir se uzimaju i dodatni kriterijumi koji odražavaju operativne i strukturne karakteristike mreže. Oni uključuju stanje puta – oštećenost, ravnost, intenzitet saobraćaja (PGDS), kao i, gde je dostupno, informacije o stopama propadanja kolovozne konstrukcije i potrebama za održavanjem. Kombinovanjem ovih elemenata omogućava se identifikacija deonica koje nisu samo kritične sa aspekta funkcionisanja mreže i socio-ekonomskih uticaja, već zahtevaju i pravovremene intervencije sa stanovišta upravljanja imovinom.

Integracija ovih indikatora podržava višekriterijumski proces odlučivanja, omogućavajući balansiranje između otpornosti, efikasnosti i troškova. Umesto definisanja fiksnih prioriteta, okvir predstavlja fleksibilan alat za podršku odlučivanju, koji se može prilagoditi različitim ciljevima politike, budžetskim ograničenjima i planskim horizontima. Na taj način se ograničeni resursi mogu usmeriti ka deonicama kod kojih se očekuju najveći efekti u pogledu funkcionisanja mreže, pristupačnosti i klimatske otpornosti.

7. DISKUSIJA

Pristup zasnovan na kritičnosti, predstavljen u ovom radu, dopunjuje, a ne zamenjuje tradicionalne analize ranjivosti. Dok identifikuje putne deonice koje su najznačajnije za funkcionisanje mreže i najizloženije prirodnim hazardima, on ne obuhvata procenu fizičke osetljivosti pojedinačnih infrastrukturnih elemenata u pogledu oštećenja. Sveobuhvatna procena ranjivosti zahtevala bi detaljne podatke o karakteristikama putnih objekata (npr. struktura kolovoza, system za odvodnjavanje, karakteristike mostova), kao i obilaske na terenu, zbog ograničenja dostupnih podataka.

Integracija ovakvih informacija o ranjivosti na nivou pojedinačnih objekata sa rezultatima analize kritičnosti omogućila bi razvoj kompletnog okvira za procenu rizika. Time bi se dodatno unapredilo donošenje investicionih odluka, usmeravanjem sredstava ka deonicama koje su istovremeno i funkcionalno kritične i fizički ranjive na uticaje klimatskih ekstrema.

8. ZAKLJUČCI

Putna mreža Srbije izložena je značajnim klimatskim rizicima, naročito usled poplava, klizišta i snežnih nanosa, koji utiču kako na infrastrukturu, tako i na društveno-ekonomsku povezanost. Rezultati analize pokazuju da se oko 40% putnih deonica nalazi u kategorijama visoke i veoma visoke kritičnosti, pri čemu ne postoji jasna razlika između klasa puteva — autoputevi generišu veće saobraćajne gubitke, dok su regionalni putevi češće izloženi hazardima i imaju manju redundansu u mreži.

Relativno mali broj deonica, pretežno na putevima kategorije IIA i IB, izdvaja se kao posebno kritičan, usled kombinacije velikog saobraćajnog značaja i ograničenih alternativnih pravaca. Ove deonice predstavljaju prioritet za ulaganja u povećanje otpornosti.

Primenjeni okvir hazard–izloženost–kritičnost omogućava identifikaciju ovakvih deonica kroz integraciju izloženosti hazardima, poremećaja u mreži i uticaja na pristupačnost u ključnim socio-ekonomskim domenima. Dobijeni indeks klimatske kritičnosti predstavlja praktičan alat za određivanje prioriteta mera adaptacije, uz napomenu da dopunjuje, a ne zamenjuje tradicionalne procene ranjivosti.

Buduća istraživanja treba da uključe detaljnije podatke o ranjivosti infrastrukture, projekcije klimatskih promena i dodatne tipove hazarda, kao i šire efekte, poput emisija gasova izazvanih kašnjenjima u saobraćaju. Ukupno posmatrano, predloženi okvir omogućava efikasnije i ciljano planiranje investicija, fokusirajući se na deonice koje su istovremeno i visoko kritične i visoko izložene.

Literatura

- [1] Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L. G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 537–560. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.003>
- [2] Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., et al. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature Communications*, 10, 2677. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>

- [3] Koks, E., Rozenberg, J., Tariverdi, M., et al. (2023). A global assessment of national road network vulnerability. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(2), 025008.
- [4] Vlada Republike Srbije. 2014. Poplave u Srbiji 2014. (on-line) dostupno na: <https://reliefweb.int/report/serbia/serbia-floods-2014> (30.03.2026)
- [5] Međunarodna federacija društava Crvenog krsta i Crvenog polumeseca. 2020. Plan hitnog odgovora (EPoA) Srbija: poplave. (on-line) dostupno na: <https://adore.ifrc.org/Download.aspx?FileId=353411> (30.03.2026)
- [6] Međunarodna federacija društava Crvenog krsta i Crvenog polumeseca. 2023. DREF operacija: poplave u Srbiji, jun 2023. (on-line) dostupno na: <https://go-api.ifrc.org/api/DownloadFile/84779/MDRRS015do> (30.03.2026)
- [7] B92. 2024. Vremenski haos u celoj Srbiji. (on-line) dostupno na: <https://www.b92.net/english/society/88686/weather-chaos-throughout-serbia/vest> (30.03.2026)
- [8] Sistem za integrisano upravljanje vanrednom situacijom i rizicima od katastrofa za jedinice lokalne samouprave (on-line) dostupno na: <https://siuvs.gov.rs/publicaccess/clients> (30.03.2026)
- [9] „Putevi Srbije“ d.o.o. 2025. GIS portal Putevi Srbije [prostorni skup podataka]. (on-line) dostupno na: <https://gisportal.rs/smartPortal/gisjpps> (decembar 2025)
- [10] OpenStreetMap (OSM). (on-line) <https://www.openstreetmap.org/> (30.03.2026)
- [11] Republički zavod za statistiku. 2022. Popis stanovništva 2022 [skup podataka]. (on-line) dostupno na: <https://popis2022.stat.gov.rs/> (30.03.2026)
- [12] Barbosa, H., Barthelemy, M., Ghoshal, G., et al. (2018). Human mobility: Models and applications. *Physics Reports*, 734, 1–74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.01.001> (30.03.2026)
- [13] HDM -4 dokumentacija Tom 4 - Analitički okvir i model, Opisi: Deo E (on-line) dostupno na: <http://www.hdmglobal.com/> (30.03.2026)
- [14] Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.
- [15] Institut za javno zdravlje Srbije „Dr Milan Jovanović Batut“. 2021. Odabrani zdravstveni pokazatelji za 2021. godinu. Beograd.
- [16] Nacionalni mehanizam za prevenciju torture – Zaštitnik građana. n.d. Spisak regionalnih policijskih uprava sa policijskim stanicama. (on-line) dostupno na: <https://npm.ombudsman.org.rs> (decembar 2025)
- [17] Ministarstvo unutrašnjih poslova Republike Srbije. n.d. Teritorijalna pokrivenost sektora za vanredne situacije. (on-line) dostupno na: <http://prezentacije.mup.gov.rs/svs/Regioni.html> (decembar 2025)
- [18] Republički zavod za statistiku. 2023a. Popis poljoprivrede 2023 [skup podataka]. (on-line) dostupno na: <https://stat.gov.rs> (decembar 2025)
- [19] Republički zavod za statistiku. 2023c. Struktura, ekonomska snaga i plasman poljoprivrednih proizvoda u Srbiji. (on-line) dostupno na: <https://publikacije.stat.gov.rs>
- [20] Republički zavod za statistiku. 2023d. Strukturne promene u poljoprivredi i njihov uticaj na ekonomski rast u Srbiji. (on-line) dostupno na: <https://publikacije.stat.gov.rs>
- [21] Republički zavod za statistiku. 2023b. Stanje savremene voćarske proizvodnje u Srbiji i mogućnosti njenog unapređenja. Beograd.
- [22] Zajednički istraživački centar (Joint Research Centre). 2025. Karte opasnosti od rečnih poplava i katalog poplavnih događaja na evropskom i globalnom nivou [skup podataka]. (on-line) dostupno na: <https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/id-0054> (decembar 2025)
- [23] Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. 2022. Digitalni klimatski atlas Srbije. (on-line) dostupno na: <https://atlas-klime.eko.gov.rs/eng/> (decembar 2025)