

INTEGRISANA ANALIZA INTERAKCIJE PUTNE INFRASTRUKTURE I KLIMATSKIH PROMENA

Marina Milenković^{1*}, Stefan Trifunović², Goran Mladenović³, Draženko Glavić⁴, Jelica Komarica⁵, Marija Mitić⁶

^{1*}Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, marina.milenkovic@sf.bg.ac.rs

²Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, s.trifunovic@tu-braunschweig.de

³Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

⁴Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, drazen@sf.bg.ac.rs

⁵Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, j.komarica@sf.bg.ac.rs

⁶Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, marija.mitic2812@gmail.com

Rezime: Drumski saobraćaj predstavlja jedan od najznačajnijih izvora emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG), čime doprinosi globalnim klimatskim promenama. Istovremeno, putna infrastruktura je izrazito ranjiva na posledice klimatskih promena, koje dovode do povećane učestalosti oštećenja putne infrastrukture. Takvi procesi uslovljavaju porast troškova održavanja i dodatno otežavaju upravljanje putevima, što se negativno odražava na efikasnost i bezbednost saobraćaja. U savremenoj literaturi sve veća pažnja se posvećuje razvoju strategija adaptacije i mitigacije, usmerenih kako na smanjenje emisija tokom životnog ciklusa puta, tako i na unapređenje otpornosti putne infrastrukture u uslovima klimatskih promena. Cilj ovog rada je analiza dvosmerne interakcije između putne infrastrukture i klimatskih promena, kroz razmatranje emisija GHG tokom životnog ciklusa puta, kao i uticaja klimatskih faktora na funkcionisanje mreže puteva. Rad pruža kritički pregled savremenih inovativnih mera koje se primenjuju u međunarodnoj praksi, uz analizu njihove primenljivosti i diskusiju o mogućnostima implementacije u Republici Srbiji.

Ključne reči: životni ciklus puta, otpornost putne infrastrukture, upravljanje putnom infrastrukturom, parametri saobraćajnog toka

INTEGRATED ANALYSIS OF INTERACTIONS BETWEEN ROAD INFRASTRUCTURE AND CLIMATE CHANGE

Marina Milenković^{1*}, Stefan Trifunović², Goran Mladenović³, Draženko Glavić⁴, Jelica Komarica⁵, Marija Mitić⁶

^{1*}University of Belgrade, The Faculty of Transport and Traffic Engineering, marina.milenkovic@sf.bg.ac.rs

²Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, s.trifunovic@tu-braunschweig.de

³University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

⁴University of Belgrade, The Faculty of Transport and Traffic Engineering, drazen@sf.bg.ac.rs

⁵University of Belgrade, The Faculty of Transport and Traffic Engineering, j.komarica@sf.bg.ac.rs

⁶University of Belgrade, The Faculty of Transport and Traffic Engineering, marija.mitic2812@gmail.com

Abstract: Road transport constitutes one of the most significant sources of greenhouse gas (GHG) emissions, thereby contributing to global climate change. At the same time, road infrastructure is highly vulnerable to the impacts of climate change, which result in an increased frequency of damage to road assets. These processes lead to higher maintenance costs and impose additional challenges for road management, ultimately exerting a negative impact on traffic efficiency and safety. In the contemporary scientific literature, increasing attention is devoted to the development of adaptation and mitigation strategies aimed at both reducing emissions throughout the road life cycle and enhancing the resilience of road infrastructure under changing climatic conditions. The objective of this paper is to analyze the bidirectional interaction between road infrastructure and climate change by examining GHG emissions across different phases of the road life cycle, as well as the effects of climatic factors on the functioning of the road network. The paper provides a critical review of contemporary innovative measures applied in international practice and discusses their applicability and implementation potential in the Republic of Serbia.

Keywords: road life cycle, road infrastructure resilience, road infrastructure management, traffic flow parameters

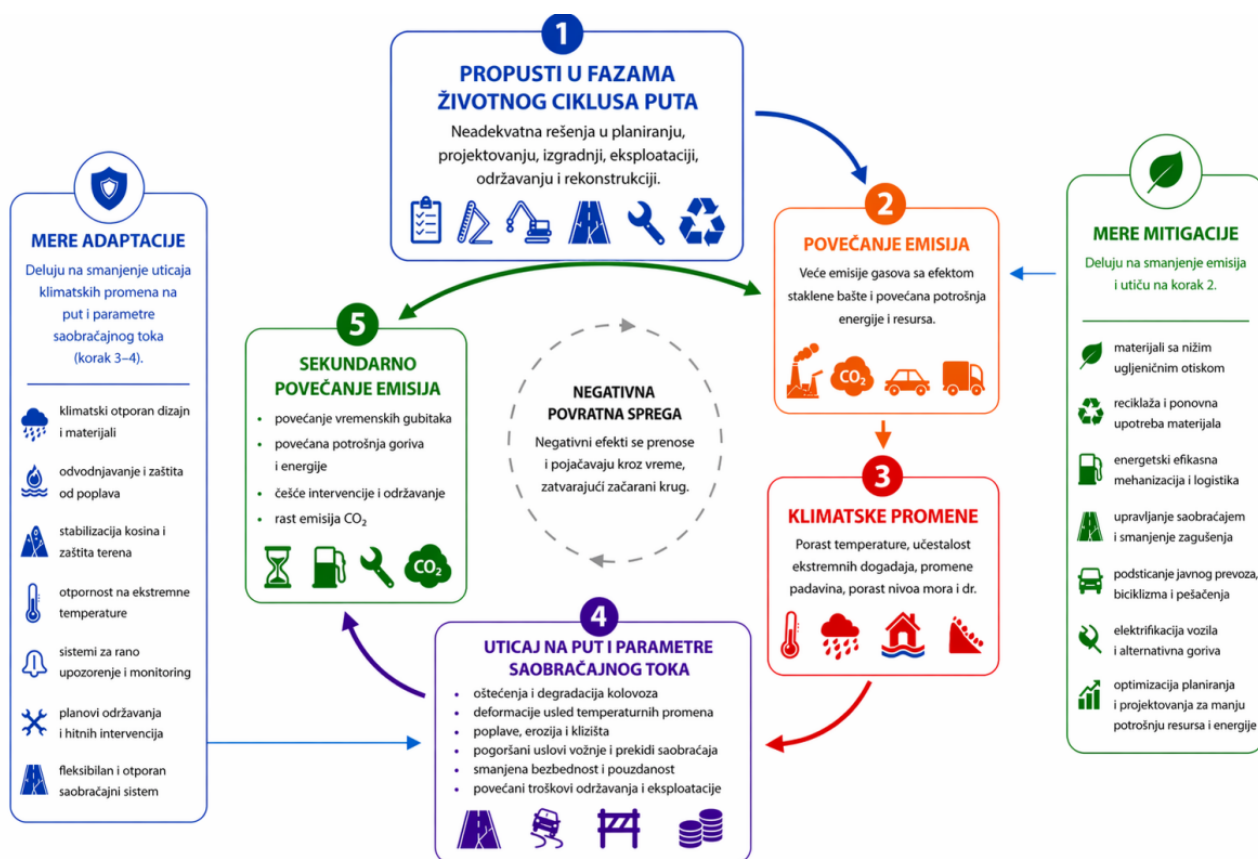
¹Autor zadužen za korespondenciju: marina.milenkovic@sf.bg.ac.rs

1. UVOD

Putna infrastruktura i klimatske promene nalaze se u složenoj dvosmernoj interakciji. Aktivnosti u okviru životnog ciklusa puta predstavljaju značajan izvor emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG) i, u odsustvu mera mitigacije, doprinose klimatskim promenama. Klimatske promene, zauzvrat, utiču na infrastrukturu i saobraćajni sistem, dovodeći do oštećenja, povećanih troškova održavanja i pogoršanja uslova odvijanja saobraćaja. Kako se ovi uticaji ne mogu u potpunosti izbeći, mere adaptacije su neophodne za ublažavanje posledica i očuvanje funkcionalnosti sistema. U suprotnom, degradacija infrastrukture i poremećaji u saobraćajnom toku mogu dovesti do dodatnih emisija, čime se ova dvosmerna interakcija dodatno pojačava.

Značaj razmatrane problematike potvrđuju i savremeni regulatorni okviri na nivou Evropske unije. Evropska komisija je 2021. godine predstavila paket zakonodavnih predloga „Fit for 55“, sa ciljem smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte za najmanje 55% do 2030. godine u odnosu na nivo iz 1990. godine (European Commission, 2021a). U okviru ovog paketa ističe se značaj sektora drumskog saobraćaja, s obzirom na to da drumska vozila učestvuju sa približno 15% u ukupnim emisijama CO₂ u Evropskoj uniji. Paralelno, usvojena je i Strategija adaptacije na klimatske promene, koja naglašava potrebu povećanja otpornosti infrastrukture, posebno u kontekstu ekstremnih temperatura i poplava (European Commission, 2021b).

Ukoliko se u pojedinim fazama životnog ciklusa puta ne primene odgovarajuće mere, može doći do povećanih emisija i intenzivnijeg negativnog uticaja na klimatske promene, što ukazuje na potrebu primene mera mitigacije. Klimatske promene istovremeno povratno utiču na putnu infrastrukturu i uslove odvijanja saobraćaja, zbog čega je neophodna primena mera adaptacije radi smanjenja ranjivosti sistema (Glavić, 2025). Njihovom koordinisanom primenom moguće je ublažiti negativnu povratnu spregu između putne infrastrukture, saobraćajnih tokova i klimatskih promena. Mere mitigacije usmerene su na smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte i negativnog uticaja transportnog sistema na klimu, dok su mere adaptacije usmerene na smanjenje ranjivosti infrastrukture i saobraćajnog sistema na klimatske uticaje (Slika 1).



Slika 1. Šematski prikaz dvosmerne interakcije putne infrastrukture i klimatskih promena sa odgovarajućim merama mitigacije i adaptacije

Iako u literaturi postoji značajan broj istraživanja koja analiziraju emisije u pojedinačnim fazama životnog ciklusa puta, kao i uticaje klimatskih promena na saobraćajni sistem, integrisani pristupi koji istovremeno razmatraju ovu dvosmernu interakciju i povezuju mere mitigacije i adaptacije i dalje su nedovoljno zastupljeni. Ovakav nedostatak posledica je činjenice da ovakve analize zahtevaju objedinjavanje različitih metodoloških okvira, uključujući analize životnog ciklusa, analize saobraćajnog toka i procene klimatskih uticaja, kao i odgovarajući nivo dostupnosti i međusobne usklađenosti relevantnih podataka. Dodatno, ovakvi pristupi podrazumevaju integraciju znanja iz različitih, međusobno komplementarnih oblasti, pre svega građevinarstva i saobraćajnog inženjerstva, čija koordinisana primena u okviru jedinstvenog analitičkog okvira predstavlja poseban izazov. Postojeća istraživanja su u velikoj meri usmerena na pojedinačne aspekte sistema, zbog čega se emisije i klimatski uticaji najčešće razmatraju odvojeno, bez njihovog sistemskog povezivanja. Posebno je izražen nedostatak radova koji ove koncepte analiziraju u kontekstu zemalja u razvoju i specifičnih nacionalnih uslova.

Navedeni procesi imaju značajne implikacije na različite aktere transportnog sistema. Sa stanovišta upravljača puta, one se ogledaju u povećanju troškova održavanja, potrebi za češćim intervencijama i otežanom planiranju upravljanja infrastrukturom. Za korisnike dovode do produženja vremena putovanja, smanjenja pouzdanosti i bezbednosti, kao i povećanja operativnih troškova. Na nivou društva u celini, ispoljavaju se kroz ekonomske gubitke, poremećaje u lancima snabdevanja i otežan pristup uslugama. Zbog toga je razumevanje ovih uticaja od ključnog značaja za unapređenje upravljanja transportnim sistemom u uslovima klimatskih promena.

Polazeći od navedenog, cilj ovog rada je analiza dvosmerne interakcije između putne infrastrukture i klimatskih promena, kroz razmatranje emisija gasova sa efektom staklene bašte tokom životnog ciklusa puta, kao i uticaja klimatskih faktora na funkcionisanje putne infrastrukture i saobraćajnog toka. Doprinos rada ogleda se u integrisanom sagledavanju ovih procesa, sistematizaciji mera mitigacije i adaptacije po fazama životnog ciklusa puta, kao i u analizi njihove primenljivosti u kontekstu Republike Srbije.

Rad je strukturiran na sledeći način. Nakon uvodnog dela, u drugom poglavlju analiziraju se emisije gasova sa efektom staklene bašte po fazama životnog ciklusa putne infrastrukture. U trećem poglavlju razmatraju se uticaji klimatskih promena na putnu infrastrukturu i parametre saobraćajnog toka. U narednim poglavljima sistematizuju se mere mitigacije i adaptacije, dok je posebno poglavlje posvećeno analizi stanja i mogućnosti njihove primene u Republici Srbiji. Na kraju rada dati su zaključci i smernice za dalja istraživanja.

2. UTICAJ RAZLIČITIH FAZA ŽIVOTNOG CIKLUSA PUTA NA KLIMATSKIE PROMENE

Različiti pristupi definisanju faza životnog ciklusa putne infrastrukture identifikovani su u naučnim i stručnim izvorima. Dok pojedine studije primenjuju detaljniji LCA (Life Cycle Assessment) okvir koji obuhvata faze planiranja, projektovanja, proizvodnje materijala, izgradnje, eksploatacije, održavanja i kraja životnog ciklusa puta, druge koriste sažetiji pristup u kome su pojedine aktivnosti objedinjene u šire faze životnog ciklusa. U zavisnosti od obuhvata analize i nivoa detaljnosti, u literaturi se mogu naći klasifikacije koje obuhvataju četiri, pet ili veći broj faza životnog ciklusa. Na primer, prema pristupu koji primenjuju PIARC i Svetska banka razlikuju se četiri osnovne faze životnog ciklusa putne infrastrukture: izgradnja, eksploatacija, održavanje i kraj životnog ciklusa. U naučnim radovima koji primenjuju LCA pristup često se koristi detaljnija klasifikacija sa pet faza životnog ciklusa puta, u kojoj se proizvodnja građevinskih materijala i izgradnja putne infrastrukture posmatraju odvojeno kako bi se preciznije sagledao njihov pojedinačni doprinos ukupnim emisijama.

U literaturi o proceni emisija gasova sa efektom staklene bašte u sektoru drumskog transporta mogu se izdvojiti dva osnovna pristupa analizi životnog ciklusa puta. Prvi pristup odnosi se na analizu životnog ciklusa same infrastrukture (infrastructure life-cycle assessment), u okviru koje se razmatraju emisije povezane sa proizvodnjom građevinskih materijala, izgradnjom, održavanjem i krajem životnog ciklusa puta. Drugi pristup obuhvata širi sistemski okvir (transport system life-cycle assessment), u kojem se, pored emisija infrastrukture, uzimaju u obzir i emisije nastale tokom eksploatacije puta, odnosno emisije vozila koja koriste transportnu infrastrukturu. U tom slučaju operativna faza, odnosno eksploatacija puta od strane korisnika, obično predstavlja dominantan izvor emisija u ukupnom životnom ciklusu transportnog sistema.

Pregled rezultata aktuelnih studija koje analiziraju emisije gasova sa efektom staklene bašte u različitim fazama životnog ciklusa putne infrastrukture prikazan je u Tabeli 1. Tabela daje komparativni prikaz procenjenog doprinosa pojedinih faza životnog ciklusa, pri čemu su prikazane studije koje se odnose na analizu životnog ciklusa same infrastrukture (Infrastructure LCA).

Iako je u literaturi prisutan tek manji broj radova u kojima se razmatra širi sistemski okvir i uključuju emisije vozila tokom eksploatacije puta (transport system LCA), njihovi rezultati se ne prikazuju kroz jasno definisane faze životnog ciklusa niti kroz uporedive opsege doprinosa, zbog čega se ovi pristupi razmatraju u nastavku teksta.

Tabela 1. Raspodela emisija po fazama životnog ciklusa putne infrastrukture

Studija	Predmet analize	Proizvodnja materijala	Izgradnja puta	Održavanje puta	Kraj životnog ciklusa puta
Huang et al. (2009)	Infrastructure LCA	40–60%	10–20%	20–30%	<5%
Santero, Masanet & Horvath (2011)	Infrastructure LCA	40–60%	5–15%	20–30%	<5%
Giani et al. (2015)	Infrastructure LCA	45–65%	5–15%	20–30%	<5%
de Bortoli et al. (2022)	Infrastructure LCA	40–50%	5–15%	30–40%	–

Kao što je prikazano u Tabeli 1, u studijama koje analiziraju životni ciklus putne infrastrukture (Infrastructure LCA), emisije se raspodeljuju po fazama životnog ciklusa puta, pri čemu najveći doprinos najčešće potiče iz faze proizvodnje građevinskih materijala (oko 40–60%), dok održavanje učestvuje sa približno 20–40%, izgradnja sa 5–15%, a kraj životnog ciklusa sa manje od 5% (Huang et al., 2009; Santero et al., 2011; Giani et al., 2015; de Bortoli et al., 2022).

U analizama transportnog sistema (Transport system LCA), emisije se posmatraju na nivou celokupnog sistema i prikazuju prema izvorima emisija u okviru sistema, zbog čega dominantan izvor emisija predstavlja faza eksploatacije, čiji udeo može biti veoma visok i u pojedinačnim slučajevima prelaziti 90%, posebno u analizama putničkog transporta (Chester & Horvath, 2010; Santos et al., 2015). Ova razlika proizlazi iz činjenice da su emisije povezane sa infrastrukturom vezane za određene faze i vremenski ograničene, dok se emisije vozila generišu kontinuirano tokom korišćenja puta (Liu et al., 2022).

U nastavku se detaljnije razmatra doprinos pojedinačnih faza životnog ciklusa putne infrastrukture emisijama gasova sa efektom staklene bašte. Svaka faza životnog ciklusa putne infrastrukture doprinosi klimatskim promenama putem specifičnih mehanizama generisanja emisija gasova sa efektom staklene bašte (Huang et al., 2009; Santero et al., 2011).

Faza proizvodnje građevinskih materijala predstavlja jedan od dominantnih izvora emisija, prvenstveno usled velike potrošnje energije u procesima proizvodnje, naročito u proizvodnji cementa i komponentnih materijala za spravljanje asfalta, koje karakteriše visoka potrošnja fosilnih goriva i značajan udeo procesnih emisija CO₂ (Butt et al., 2012; Giani et al., 2015). Rezultati istraživanja, uključujući projekat „ÖKOPOST“, ukazuju da proizvodnja bitumena predstavlja dominantan izvor emisija u ovoj fazi (Kessel et al., 2025). Procene pokazuju da proizvodnja jedne tone bitumena generiše približno 712 kg CO₂, što na nivou Evropske unije rezultira emisijama reda veličine više miliona tona godišnje (Ecoinvent 2.2+). Pored navedenih izvora emisija, značajan uticaj imaju i izbor energenta i upravljanje resursima u procesu proizvodnje. Prelazak na obnovljive izvore energije predstavlja važnu meru njihovog smanjenja, dok proizvodnja bitumena zahteva i značajne količine resursa, uključujući vodu i energiju (Eurobitume, 2019; EAPA, 2021). U tom kontekstu, primena reciklaže predstavlja jedan od ključnih mehanizama za smanjenje emisija u ovoj fazi. Asfalt se u potpunosti može reciklirati, pri čemu je strugani asfalt (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) značajan resurs u putnoj infrastrukturi. Međutim, dozvoljeni udeli RAP-a variraju u zavisnosti od tehničkih propisa, vrste sloja i saobraćajnog opterećenja. U praksi se najčešće koriste udeli u opsegu od 20 do 50 %, pri čemu su niži u habajućim, a viši u veznim i nosećim slojevima. Napredniji pristupi pokazuju da je moguće dostići i znatno više udele, ali uz primenu naprednih tehnologija i strogu kontrolu kvaliteta (Tsakoumaki & Plati, 2024; van Akker, 2022; Sutor-Fiedler, 2021).

U fazi izgradnje putne infrastrukture, emisije nastaju kao posledica rada građevinske mehanizacije, transporta materijala i izvođenja pripremnih radova, pri čemu su vremenski ograničene i po pravilu manjeg intenziteta u odnosu na ostale faze (Santero et al., 2011; de Bortoli et al., 2022). Ipak, i u ovoj fazi postoji značajan potencijal za smanjenje emisija. Jedan od najefikasnijih pristupa predstavlja primena asfaltnih mešavina proizvedenih na sniženim temperaturama (WMA – Warm Mix Asphalt), koje omogućavaju smanjenje temperature proizvodnje i potrošnje energije u odnosu na konvencionalne mešavine (Wistuba, 2025).

Time se redukuju emisije aerosola i para iz bitumena, uz očuvanje mehaničkih svojstava i trajnosti kolovozne konstrukcije. Pored ekoloških i zdravstvenih benefita, niže temperature doprinose i smanjenju potrošnje energije, čime se dodatno smanjuje ukupni ekološki uticaj. Pored navedenog, transportne udaljenosti tokom izgradnje imaju značajan uticaj na emisije gasova sa efektom staklene bašte i potrošnju energije, što ukazuje na važnost optimalne organizacije logistike, uključujući adekvatnu alokaciju izvora materijala i lokacija asfaltnih baza (Kessel et al., 2025).

U fazi eksploatacije putne infrastrukture, emisije se generišu kontinuirano kao posledica saobraćajnih tokova i predstavljaju dominantan izvor emisija u okviru životnog ciklusa transportnog sistema. Njihov intenzitet uslovljen je intenzitetom saobraćaja, karakteristikama saobraćajnog toka, pojavom zagušenja i dominantnom upotrebom vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (Chester & Horvath, 2010; Santos et al., 2015). U literaturi se mere mitigacije u transportu često sistematizuju kroz pristup „Avoid–Shift–Improve“, koji obuhvata upravljanje transportnom potražnjom, uključujući optimizaciju rute i vremena putovanja, promenu vidovne raspodele i unapređenje efikasnosti transportnog sistema. Primena inteligentnih transportnih sistema (ITS), kao što su adaptibilno upravljanje svetlosnom signalizacijom, upravljanje brzinama, upravljanje incidentima, kao i primena sistema naplate putarine zasnovanih na slobodnom toku, doprinosi smanjenju zastoja i unapređenju uslova saobraćajnog toka, čime se smanjuju emisije po vozilu. Dodatno, mere upravljanja transportnom potražnjom, uključujući restriktivne (push) i stimulativne (pull) instrumente, kao što su naplata parkiranja, naplata zagušenja, kao i unapređenje javnog prevoza i razvoj deljenih oblika mobilnosti, doprinose smanjenju upotrebe putničkih automobila i posledično smanjenju emisija polutanata. Konačno, unapređenje karakteristika voznog parka kroz elektrifikaciju i povećanje udela niskoemisionih vozila predstavlja ključni pravac smanjenja emisija u ovoj fazi.

U fazi održavanja putne infrastrukture, emisije nastaju kao rezultat periodičnih intervencija na infrastrukturi, uključujući rehabilitaciju kolovoza, zamenu konstrukcionih slojeva i druge radove održavanja, što dovodi do njihovog kumulativnog efekta tokom dugog eksploatacionog perioda (Huang et al., 2009; Wang et al., 2024). Intenzitet emisija u ovoj fazi zavisi od učestalosti intervencija, izbora materijala i primenjenih tehnologija, kao i od kvaliteta projektovanja i izgradnje, koji direktno utiču na potrebu za kasnijim održavanjem.

U fazi kraja životnog ciklusa putne infrastrukture, emisije su povezane sa uklanjanjem infrastrukture, transportom i tretmanom otpadnih materijala, pri čemu je njihov ukupan doprinos relativno nizak (Flores-Ruiz et al., 2025; Gołębiowska, 2025). Međutim, ograničen nivo reciklaže i ponovne upotrebe materijala ukazuje na značajan potencijal za smanjenje emisija u ovoj fazi, posebno kroz unapređenje procesa ponovne upotrebe građevinskih materijala i optimizaciju upravljanja otpadom.

Faza projektovanja nema značajan direktan doprinos emisijama gasova sa efektom staklene bašte, ali ima izražen indirektan uticaj, budući da definiše ključne karakteristike putne infrastrukture koje određuju emisije u svim narednim fazama životnog ciklusa. Izbor trase i geometrije utiče na obim zemljanih radova i potrebne količine materijala, dok tip i dimenzionisanje kolovozne konstrukcije određuju vrstu i količinu ugrađenih materijala, a samim tim i emisije iz njihove proizvodnje. Istovremeno, projektovanjem se definišu i parametri saobraćajnog toka, poput brzine, intenziteta i gustine saobraćaja, koji direktno utiču na emisije vozila tokom eksploatacije. Zbog toga se faza projektovanja u većini studija ne posmatra kao zasebna faza u okviru LCA pristupa, već kao determinanta emisija u ostalim fazama životnog ciklusa, čime se izbegava mogućnost duplog računanja emisija.

U kontekstu sagledavanja celokupnog životnog ciklusa putne infrastrukture, važno je istaći da izbor odgovarajuće strukture kolovozne konstrukcije, adekvatnih materijala i optimalne asfaltne mešavine, kao i stroga kontrola kvaliteta tokom ugradnje, mogu značajno produžiti eksploatacioni vek puta. Produženje veka trajanja direktno utiče na smanjenje potrebe za čestim intervencijama održavanja i rekonstrukcije, što u ukupnom bilansu ima izrazito pozitivan efekat na ekološki uticaj putne infrastrukture. Ovu tvrdnju potvrđuju i istraživači u okviru projekta „ÖKOPOST“, koji ističu značaj trajnosti kao jednog od ključnih faktora održivosti u analizi životnog ciklusa putne infrastrukture (Kessel et al., 2025).

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da različite faze životnog ciklusa doprinose emisijama kroz različite mehanizme i intenzitete, pri čemu izbor obuhvata analize značajno utiče na identifikaciju dominantnih izvora emisija. Ovo je od posebnog značaja za definisanje odgovarajućih mera mitigacije (Tabela 2).

Tabela 2. Mere mitigacije emisija gasova sa efektom staklene bašte po fazama životnog ciklusa putne infrastrukture

Faza	Ključni izvori emisija	Mere mitigacije
Planiranje i projektovanje	Veliki obim zemljanih radova; značajna upotreba materijala sa visokim emisijama CO ₂ , nepovoljni projektni parametri koji povećavaju potrošnju goriva; neodgovarajuća namena zemljišta	• optimizacija trase u cilju minimizacije zemljanih radova • optimizacija kolovozne konstrukcije i primena niskougljeničnih materijala • projektovanje geometrije koja obezbeđuje stabilne režime vožnje • integracija transportnog i prostornog planiranja radi smanjenja transportnog rada • planiranje obilaznica radi redistribucije tranzitnih tokova
Proizvodnja materijala	Emisije iz proizvodnje cementa (klinker); emisije iz proizvodnje asfalta; visoka energetska intenzivnost procesa	• smanjenje udela klinkera u cementu • primena recikliranih materijala (RAP) • korišćenje industrijskih nusproizvoda (leteći pepeo, zgura) • unapređenje energetske efikasnosti i dekarbonizacija proizvodnih procesa
Izgradnja	Emisije iz rada građevinske mehanizacije; emisije iz transporta materijala	• primena niskoemisione građevinske mehanizacije (elektrifikacija, alternativna goriva) • optimizacija logistike i skraćanje transportnih relacija • primena tehnologija sa smanjenim energetskeim zahtevima (npr. warm mix asphalt)
Eksploatacija	Emisije vozila usled sagorevanja goriva; povećana potrošnja goriva usled zagušenja i nestabilnih režima vožnje; visok intenzitet saobraćaja	• upravljanje saobraćajnim tokovima primenom ITS sistema (npr. adaptivna signalizacija, upravljanje brzinama, upravljanje incidentima itd.) • upravljanje transportnom potražnjom (TDM: npr. naplata zagušenja, deljena mobilnost itd.) • unapređenje karakteristika voznog parka (elektrifikacija, niskoemisiona vozila)
Održavanje	Emisije iz periodičnih intervencija; proizvodnja i transport materijala; rad mehanizacije	• primena strategija preventivnog održavanja u cilju očuvanja povoljnih uslova vožnje • primena tehnologija reciklaže kolovoza in situ • smanjenje potrebe za novim materijalima
Kraj životnog ciklusa	Emisije iz uklanjanja infrastrukture; transport i odlaganje materijala	• povećanje stepena reciklaže materijala • unapređenje praksi ponovne upotrebe materijala • smanjenje odlaganja na deponije

3. UTICAJ KLIMATSKIH PROMENA NA PUT I PARAMETRE SAOBRAĆAJNOG TOKA

Uticaj klimatskih promena na putnu infrastrukturu može se posmatrati kroz dva osnovna aspekta: ekstremni klimatski događaji, koji u kratkom vremenskom periodu mogu izazvati oštećenja infrastrukture i poremećaje u odvijanju saobraćaja, i dugoročne klimatske promene, koje postepeno utiču na trajnost i funkcionalnost putne infrastrukture, dovodeći do ubrzane degradacije i povećanih zahteva za održavanjem. U tom kontekstu, promene temperaturnog režima i učestalost nepovoljnih vremenskih uslova značajno utiču na stanje putne infrastrukture, što rezultira ubrzanom degradacijom kolovozne konstrukcije i smanjenjem njene nosivosti. Povišene temperature uzrokuju omekšavanje asfaltnih slojeva i povećanje trajnih deformacija kolovoza, dok povećana vlažnost i zasićenje tla smanjuju nosivost podloge i stabilnost konstrukcije (Huang et al., 2009; Santero et al., 2011). Navedeni uticaji dovode do povećanja učestalosti oštećenja, potrebe za češćim intervencijama održavanja i rasta troškova upravljanja infrastrukturom (de Abreu et al., 2022; Duque et al., 2024), dok intenzivne padavine dovode do dodatnog opterećenja sistema za odvodnjavanje i povećavaju rizik od plavljenja kolovoza (Wang et al., 2024).

Posledice navedenih procesa neposredno se odražavaju na performanse saobraćajnog sistema. Empirijska istraživanja ukazuju na smanjenje brzine kretanja vozila i promene režima vožnje tokom padavina, pri čemu se brzine mogu smanjiti za približno 2–10% u zavisnosti od njihovog intenziteta i karakteristika saobraćajnice (Tsapakis et al., 2013). Analize zasnovane na velikim skupovima podataka potvrđuju da vremenski uslovi značajno utiču na osnovne parametre saobraćajnog toka, odnosno protok, brzinu i gustinu, kao i njihove međusobne odnose (Sakhare et al., 2023).

Istovremeno, smanjenje brzine prati redukcija kapaciteta usled povećanih rastojanja sledjenja i opreznijeg ponašanja vozača (Koetse & Rietveld, 2009; Touloumidis et al., 2025). Kao posledica navedenih promena dolazi do povećanja vremena putovanja i pojave zagušenja. Analize pokazuju da vreme putovanja može porasti za nekoliko procenata u umerenim uslovima, dok u uslovima intenzivnijih padavina povećanje može dostići približno 5–10% (Tsapakis et al., 2013; FHWA, 2017). Međutim, klimatski uticaji imaju još izraženiji efekat na pouzdanost vremena putovanja, odnosno na njegovu varijabilnost i predvidivost, što predstavlja ključni aspekt performansi transportnog sistema (Touloumidis et al., 2025). U uslovima ekstremnih klimatskih događaja, kao što su poplave i klizišta, dolazi do prekida saobraćaja, uz istovremeno smanjenje nivoa usluge na mreži. Studije pokazuju da čak i plavljenje manjeg dela mreže može povećati ukupno vreme putovanja na mreži za oko 5–10%, usled preusmeravanja tokova i većeg opterećenja alternativnih pravaca (Pregolato et al., 2017). Dodatno, poremećaji na jednoj deonici mogu uticati i na druge delove mreže, što dovodi do širenja zastoja i dodatnog povećanja kašnjenja (Contreras-Jara et al., 2025; Liu et al., 2026). Klimatske promene značajno utiču i na bezbednost saobraćaja. Vlažan kolovoz, smanjena vidljivost i promenjeni uslovi prijanjanja povećavaju verovatnoću saobraćajnih nezgoda, što dodatno doprinosi prekidima i zastojima u saobraćajnom toku (Koetse & Rietveld, 2009). Dodatno, vremenski uslovi predstavljaju jedan od ključnih faktora rizika, naročito u uslovima intenzivnih padavina i ekstremnih događaja (de Abreu et al., 2022). Na osnovu navedenih nalaza može se zaključiti da klimatske promene utiču na putnu infrastrukturu i saobraćajni tok kroz međusobno povezane procese: degradaciju kolovoza, smanjenje brzine i kapaciteta, povećanje vremena putovanja i njegove varijabilnosti, pogoršanje bezbednosti i pojavu poremećaja u funkcionisanju mreže. Ovi efekti imaju sistemski karakter i predstavljaju osnovu za definisanje mera adaptacije usmerenih na povećanje otpornosti infrastrukture i stabilnosti saobraćajnog toka.

Na osnovu identifikovanih uticaja klimatskih promena na putnu infrastrukturu i saobraćajni tok, u literaturi se izdvajaju različiti pristupi definisanju mera adaptacije. Jedan od često korišćenih pristupa zasniva se na razlikovanju tzv. „tvrdih“ i „mekih“ mera, pri čemu „tvrde“ mere podrazumevaju fizičke intervencije na infrastrukturi, dok „meke“ mere obuhvataju upravljačke i institucionalne aktivnosti (de Abreu et al., 2022). Pored toga, u okviru projekata kao što su RIMAROC i ROADAPT naglašava se potreba da se adaptacija sagledava kroz sve faze životnog ciklusa puta, uzimajući u obzir specifične klimatske uticaje i odgovarajuće mere prilagođavanja u svakoj fazi. U skladu sa navedenim pristupima, u nastavku su sistematizovane ključne mere adaptacije na klimatske promene po fazama životnog ciklusa putne infrastrukture, kako je prikazano u Tabeli 3.

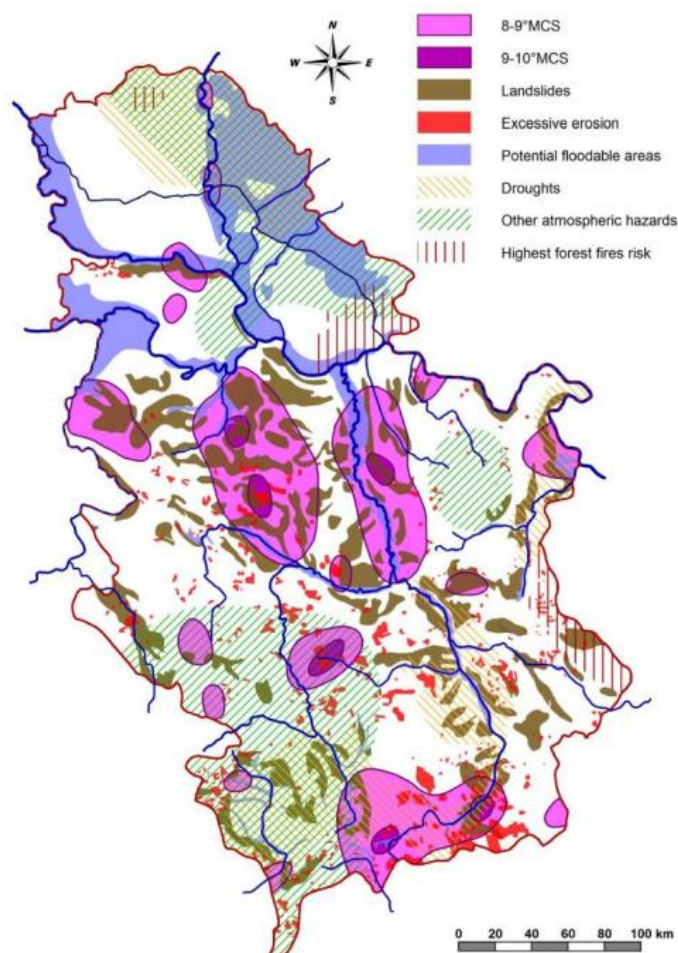
Tabela 3. Mere adaptacije u različitim fazama životnog ciklusa putne infrastrukture

Faza	Ključni uticaji klimatskih promena	Mere adaptacije
Planiranje i projektovanje	Izloženost trase klimatskim rizicima (poplave, klizišta); povećani zahtevi u pogledu odvodnjavanja i otpornosti konstrukcije	- procena klimatskih rizika pri planiranju infrastrukture - izbor trase u skladu sa klimatskim rizicima - dimenzionisanje sistema za odvodnjavanje u uslovima intenzivnih padavina - projektovanje otpornije kolovozne konstrukcije - obezbeđenje alternativnih pravaca u slučaju prekida saobraćaja - planiranje namene prostora radi smanjenja transportnih zahteva i opterećenja mreže
Proizvodnja materijala	Smanjena trajnost i otpornost materijala na klimatske uticaje	- razvoj materijala otpornijih na visoke temperature i vlagu - modifikacija asfaltnih i betonskih mešavina - kontrola kvaliteta materijala u skladu sa očekivanim klimatskim uslovima eksploatacije
Izgradnja	Izloženost radova ekstremnim vremenskim uslovima; nestabilnost tla	- stabilizacija tla i zaštita nasipa tokom izvođenja radova - prilagođavanje dinamike izvođenja klimatskim uslovima
Eksploatacija	Poremećaji u odvijanju saobraćajnog toka; smanjenje brzine i kapaciteta; povećanje vremena putovanja i njegove varijabilnosti; smanjenje nivoa usluge	- upravljanje saobraćajem u realnom vremenu primenom ITS sistema, uključujući adaptabilno upravljanje signalizacijom, upravljanje brzinama, upravljanje incidentima itd. - uspostavljanje sistema ranog upozorenja na ekstremne vremenske događaje - upravljanje režimom kretanja teških teretnih vozila tokom ekstremno visokih temperatura radi zaštite putne infrastrukture
Održavanje	Ubrzana degradacija kolovozne konstrukcije i učestalija oštećenja	- kontinuirani monitoring stanja infrastrukture - preventivno i adaptivno održavanje - sanacija oštećenja i unapređenje drenaže na kritičnim deonicama - zaštita kritičnih infrastrukturnih objekata od klimatskih uticaja
Kraj životnog ciklusa	Povećana degradacija materijala i otežana ponovna upotreba	- priprema materijala za reciklažu i ponovnu upotrebu - planiranje upravljanja otpadom u uslovima klimatskih promena

U urbanim sredinama razvijeni su koncepti poput 'sponge city', koji podrazumeva integrisano upravljanje vodama nastalim usled atmosferskih padavina kroz primenu propusnih materijala, zelene infrastrukture i sistema za zadržavanje i infiltraciju vode. Ovi pristupi doprinose smanjenju rizika od plavljenja i unapređenju urbanog vodnog režima, ali prevazilaze okvir pojedinačne putne infrastrukture i odnose se na šire urbanističko planiranje, te se u ovom radu ne razmatraju detaljnije.

4. IMPLIKACIJE KLIMATSKIH PROMENA I MOGUĆNOSTI PRIMENE MERA U REPUBLICI SRBIJI

Analiza uticaja klimatskih promena na teritoriji Republike Srbije ukazuje da su najizraženiji rizici povezani sa poplavama i klizišnim procesima, što predstavlja dominantan izazov za funkcionisanje putne infrastrukture (Slika 2). Povećana učestalost i intenzitet padavina dovode do preopterećenja sistema za odvodnjavanje, erozije tla i smanjenja nosivosti kolovozne konstrukcije, dok istovremeno iniciraju klizišne procese i destabilizaciju kosina. U takvim uslovima dolazi do oštećenja infrastrukture, smanjenja bezbednosti i pogoršanja uslova saobraćajnog toka.



Slika 2. Mapa Srbije sa naznačenim područjima izloženim prirodnim opasnostima (izvor: Prostorni plan Republike Srbije 2010-2020. Ministarstvo zaštite životne sredine i prostornog planiranja i Republička agencija za prostorno planiranje Beograd)

Uzimajući u obzir identifikovane rizike, ključne mere adaptacije u uslovima Republike Srbije odnose se pre svega na unapređenje sistema odvodnjavanja, stabilizaciju tla i kosina, kao i na kontinuirani monitoring i preventivno održavanje putne infrastrukture. Poseban značaj imaju pravovremeno uočavanje i sanacija oštećenja, kao i unapređenje kritičnih elemenata infrastrukture, pre svega sistema za odvodnjavanje, mostova i kosina, u skladu sa povećanim klimatskim opterećenjima, čime se smanjuje potreba za reaktivnim intervencijama i unapređuje otpornost sistema na klimatske uticaje.

Iako su u prethodnom periodu sprovedene određene aktivnosti u oblasti upravljanja rizicima, u praksi je i dalje dominantan reaktivan pristup, pri čemu se intervencije najčešće realizuju nakon nastanka oštećenja. U tom smislu, dalji razvoj sistema upravljanja putnom infrastrukturom treba usmeriti ka preventivnom i proaktivnom delovanju, u skladu sa savremenim pristupima adaptacije na klimatske promene.

Pored mera adaptacije, značajan aspekt odnosi se i na smanjenje negativnog uticaja putne infrastrukture na životnu sredinu odnosno na mere mitigacije. Aspekt uticaja putne infrastrukture na životnu sredinu, posebno u fazama proizvodnje materijala i izgradnje, još uvek nije u dovoljnoj meri razmatran u Republici Srbiji. Dodatno, Republika Srbija ne raspolaže u potpunosti nezavisnim snabdevanjem ključnim materijalom, bitumenom, što naglašava potrebu za racionalnim korišćenjem resursa. Istovremeno, istraživanja u oblasti primene alternativnih materijala su i dalje ograničena. U praksi su u upotrebi asfaltne baze čija energetska efikasnost često nije na zadovoljavajućem nivou, iako je u poslednjih nekoliko godina uočen pozitivan trend unapređenja tehnologije i procesa proizvodnje. Primena asfaltnih mešavina sa dodatkom struganog asfalta (RAP) i dalje je relativno ograničena, međutim donošenje tehničkih uslova predstavlja značajan korak ka sistematičnijem pristupu reciklaži i unapređenju održivosti u oblasti putne infrastrukture.

U okviru faze eksploatacije puta, mere usmerene na smanjenje emisija u Srbiji mogu se grupisati u tri osnovna pravca: unapređenje upravljanja saobraćajem primenom inteligentnih transportnih sistema (ITS), elektrifikaciju voznog parka i primenu mera upravljanja saobraćajnim zahtevima. Prvi pravac odnosi se na primenu ITS rešenja, koja imaju za cilj povećanje efikasnosti saobraćajnog toka i smanjenje zastoja. U Srbiji su u određenoj meri implementirani sistemi adaptivnog upravljanja svetlosnim signalima, koordinacija svetlosnih signala kroz tzv. „zelene talase“, promenljiva saobraćajna signalizacija, sistemi elektronske naplate putarine, kao i pojedini sistemi informisanja korisnika. Pored toga, prisutni su i elementi upravljanja saobraćajem u tunelima, kao i sistemi za detekciju i upravljanje incidentnim situacijama, čime se doprinosi povećanju bezbednosti i smanjenju zastoja izazvanih incidentima. Iako ovi sistemi doprinose smanjenju emisija kroz optimizaciju saobraćajnog toka, njihov nivo primene u Srbiji može se oceniti kao nizak do umeren, uz značajan prostor za unapređenje.

Drugi pravac odnosi se na elektrifikaciju voznog parka. Republika Srbija sprovodi mere usmerene ka elektrifikaciji vozila, prvenstveno kroz subvencionisanje kupovine novih električnih vozila, u cilju smanjenja emisija zagađujućih materija i negativnih uticaja drumskog saobraćaja na životnu sredinu. Zahvaljujući ovim merama, broj električnih vozila u Srbiji beleži rast, međutim njihov udeo u ukupnom voznom parku je i dalje nizak, zbog čega su efekti na smanjenje emisija ograničeni. Dodatno, posmatrano sa aspekta životnog ciklusa, ekološke koristi električnih vozila u velikoj meri zavise od strukture proizvodnje električne energije, koja se u Srbiji i dalje dominantno zasniva na fosilnim gorivima, zbog čega je njihov ukupni potencijal za smanjenje emisija i dalje ograničen. U tom kontekstu, značajnu ulogu imaju mere usmerene ka unapređenju energetske efikasnosti i razvoju obnovljivih izvora energije, koje su prepoznate i kroz strateške dokumente energetske tranzicije Republike Srbije.

Treći pravac obuhvata mere upravljanja saobraćajnim zahtevima (TDM), koje imaju za cilj smanjenje upotrebe putničkih automobila i podsticanje korišćenja održivijih vidova mobilnosti. U Srbiji se ove mere trenutno najviše ogledaju kroz sistem naplate parkiranja u urbanim sredinama. Iako su pojedine „pull“ mere, poput unapređenja javnog gradskog prevoza i razvoja mikromobilnosti, prisutne, njihova primena je i dalje ograničena i nedovoljno integrisana u širi okvir upravljanja saobraćajnim zahtevima, zbog čega njihov potencijal u smanjenju upotrebe putničkih automobila nije u potpunosti iskorišćen.

5. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana dvosmerna interakcija između putne infrastrukture i klimatskih promena, kroz razmatranje emisija gasova sa efektom staklene bašte u različitim fazama životnog ciklusa puta, kao i uticaja klimatskih faktora na funkcionisanje putne infrastrukture i saobraćajnog toka. Rezultati ukazuju da različite faze životnog ciklusa doprinose emisijama kroz različite mehanizme i intenzitete, pri čemu u okviru analize infrastrukture dominantan udeo imaju proizvodnja građevinskih materijala i održavanje, dok u širem sistemskom kontekstu faza eksploatacije predstavlja ključni izvor emisija. Istovremeno, klimatske promene utiču na putnu infrastrukturu i saobraćajni sistem kroz međusobno povezane procese degradacije kolovozne konstrukcije, smanjenja brzine i kapaciteta, povećanja vremena putovanja i njegove varijabilnosti, kao i smanjenja bezbednosti saobraćaja. Ovi uticaji imaju izražen sistemski karakter, jer se efekti javljaju istovremeno na nivou infrastrukture i saobraćajnog toka, uz značajne međuzavisnosti.

Sagledavanje navedenih procesa u okviru jedinstvenog analitičkog pristupa od posebnog je značaja, jer omogućava istovremeno razmatranje uticaja putne infrastrukture na klimatske promene kroz emisije gasova sa efektom staklene bašte, kao i uticaja klimatskih promena na funkcionisanje putne infrastrukture i saobraćajnog sistema. Posmatranje ovih aspekata izolovano može dovesti do parcijalnih i nedovoljno efikasnih rešenja, dok integrisani pristup omogućava identifikaciju sinergijskih efekata između mera mitigacije i adaptacije, kao i izbegavanje potencijalnih konflikata između njih, čime se doprinosi efikasnijem i održivijem upravljanju putnom infrastrukturom u uslovima klimatskih promena. U tom smislu, posebno je važno istaći da izostanak delovanja u bilo kojoj fazi životnog ciklusa ili segmentu sistema može inicirati negativnu povratnu spregu, u kojoj se degradacija infrastrukture, poremećaji u saobraćajnom toku i emisije međusobno pojačavaju, formirajući zatvoren ciklus. Takvi procesi dodatno ubrzavaju pogoršanje stanja infrastrukture i povećavaju ukupne ekološke i operativne troškove sistema.

Rezultati analize u kontekstu Republike Srbije ukazuju da su najizraženiji klimatski rizici povezani sa poplavama i klizišnim procesima, dok je u praksi i dalje dominantan reaktivan pristup upravljanju infrastrukturom. Iako su određene mere adaptacije i mitigacije već prisutne, njihov nivo primene može se oceniti kao nizak do umeren, uz značajan prostor za unapređenje, posebno u pogledu sistematične primene preventivnih pristupa, unapređenja energetske efikasnosti proizvodnje materijala, šire primene reciklaže i razvoja integrisanih mera upravljanja saobraćajnim zahtevima.

U tom kontekstu, dalji razvoj istraživanja i prakse treba da bude usmeren ka unapređenju informacionih i analitičkih osnova, uključujući razvoj i sistematizaciju baza podataka, kao i detaljniju analizu istorijskih podataka o klimatskim uticajima i performansama infrastrukture. Poseban značaj ima prelazak sa reaktivnog na preventivni i planski pristup upravljanju, zasnovan na proceni rizika i sagledavanju mogućih budućih efekata klimatskih promena. Istovremeno, neophodno je sprovesti detaljniju analizu potencijala primene inovativnih mera, uključujući integrisane pristupe upravljanju padavinskim vodama, kao što su savremeni koncepti „sponge city“, kao i primenu adaptibilnih sistema koji integrišu meteorološke podatke i razvoj savremenih koncepata upravljanja saobraćajem i infrastrukturom, u cilju povećanja otpornosti i održivosti transportnog sistema. Ovakav integrisani pristup predstavlja osnovu za prelazak sa reaktivnog na proaktivno i adaptivno upravljanje putnom infrastrukturom, čime se stvaraju preduslovi za dugoročno održiv i klimatski otporan razvoj transportnog sistema.

Literatura

- [1] Butt, A. A., Birgisdóttir, H., Bhandar, G. S., Hauschild, M., & Christensen, T. H. (2012). *Life cycle assessment of road construction and maintenance*. In: *Pavement Engineering and Materials*.
- [2] Chester, M., & Horvath, A. (2010). *Life-cycle assessment of high-speed rail: The case of California*. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014003.
- [3] Contreras-Jara, C., Herrera, M., & de Almeida Correia, G. (2025). *Propagation of traffic disruptions under climate-related infrastructure failures*. *Reliability Engineering & System Safety*, 257, 110112.
- [4] DAV. (2009). *Temperaturabesenkte Asphalte. Ratschläge aus der Praxis für die Praxis*. Bonn.
- [5] de Abreu, M. M., Silva, C., & Costa, P. (2022). *Climate change adaptation measures for road infrastructure: A systematic review*. *Sustainability*, 14(18), 11354.
- [6] de Bortoli, A., Dumont, A.-G., Allacker, K., & Dewulf, J. (2022). *Life cycle assessment of road pavements: Overview and perspectives*. *Sustainability*, 14(3), 1193.
- [7] Duque, L., Martínez, J., & Cardona, O. D. (2024). *Road infrastructure vulnerability and adaptation under climate change scenarios*. *Climate Risk Management*, 43, 100581.
- [8] EAPA. (2021). *Asphalt in Figures 2020*. European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels.
- [9] European Commission. (2021a). *“Fit for 55”: Delivering the EU’s 2030 climate target on the way to climate neutrality*. Publications Office of the European Union.
- [10] European Commission. (2021b). *Forging a climate-resilient Europe: The new EU Strategy on Adaptation to Climate Change*. Publications Office of the European Union.
- [11] Eurobitume. (2019). *The Eurobitume Life-Cycle-Inventory for Bitumen, Version 3.0*. European Bitumen Association, Brussels.
- [12] Federal Highway Administration (FHWA). (2017). *Weather and traffic management benefits assessment*. U.S. Department of Transportation.
- [13] Flores-Ruiz, D., Martínez-Argüelles, G., & Pérez-Acebo, H. (2025). *End-of-life management and recycling strategies for road pavements: Environmental implications*. *Sustainability*, 17(2), 812.
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2026). *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut im Straßenbau (TL Asphalt-StB 26)*. FGSV Verlag.

- [15] Glavic, D. (2025). The impact of climate change on road and transport infrastructure. *Journal of Road and Traffic Engineering*, 71(1), 53-56. <https://doi.org/10.31075/PIS.71.01.08>
- [16] Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). *Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling*. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224–238.
- [17] Gołębiowska, I. (2025). *Circular economy approaches in road infrastructure end-of-life management*. *Materials*, 18(1), 233.
- [18] Huang, Y., Bird, R., & Bell, M. (2009). *A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 197–204.
- [19] Kessel, T., Pasderski, J., Falter, C., Wistuba, M. P., Büchler, S., & Pohl, T. (2025). *Nachhaltigkeitspotentiale im Straßenbau mit dem Fokus auf Treibhausemissionen, Energiebedarf und Ressourcenschonung (FE 04.0341/2021/ARB)*. Technische Universität Braunschweig & UTech – Umtec Technologie AG.
- [20] Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). *The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 205–221.
- [21] Liu, X., Wang, H., & Al-Qadi, I. L. (2022). *Life-cycle greenhouse gas emissions of transportation infrastructure systems: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130448.
- [22] Liu, Y., Zhang, L., & Li, Z. (2026). *Network-wide impacts of extreme weather disruptions on road transport systems*. *Transportation Research Part A*, 195, 104356.
- [23] PIARC (World Road Association). (2019). *Climate change adaptation framework for road infrastructure*. Paris: PIARC.
- [24] Pregnotato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). *The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 67–81.
- [25] RIMAROCC. (2011). *Risk management for roads in a changing climate*. Conference of European Directors of Roads (CEDR).
- [26] ROADAPT. (2015). *Guidelines for adaptation strategies to climate change for European road authorities*. CEDR Transnational Road Research Programme.
- [27] Sakhare, A., Wolshon, B., & Pande, A. (2023). *Weather impacts on traffic flow characteristics: A data-driven analysis*. *Transportation Research Record*, 2677(5), 522–536.
- [28] Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). *Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809.
- [29] Santos, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. (2015). *A life cycle assessment model for pavement management: Road pavement construction and management in Portugal*. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(4), 315–336.
- [30] Sutor-Fiedler, M. (2021). *Baden-Württemberg fordert Maximalrecycling bundesweit*. *Asphalt & Bitumen*, 7(2), 16–19.
- [31] Touloumidis, G., Antoniou, C., & Yannis, G. (2025). *Effects of adverse weather conditions on traffic flow and travel time reliability*. *Transportation Research Part C*, 168, 104812.
- [32] Tsakoumaki, M., & Plati, C. (2024). *A Critical Overview of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Pavement Construction*. *Infrastructures*, 9(8), 128. <https://www.mdpi.com/2412-3811/9/8/128>
- [33] Tsapakis, I., Cheng, T., & Bolbol, A. (2013). *Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times*. *Journal of Transport Geography*, 28, 204–211.
- [34] van Akker, J. (2022). *Evaluation of material properties of hot mix asphalt mixtures with high levels of reclaimed asphalt pavement using multi-scale characterization* (Master thesis). Delft University of Technology. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:d0efe4df-6c62-4996-9ff1-a37e11c0ab04>
- [35] Wang, T., Lee, I.-S., Kendall, A., Harvey, J., & Lee, E.-B. (2024). *Climate change impacts on pavement performance and maintenance: A review*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128, 104091.
- [36] Wistuba, M. P. (2019). *Straßenbaustoff Asphalt*. Braunschweig. ISBN 978-3-932164-16-3.
- [37] World Bank. (2021). *Climate-resilient transport infrastructure: Guidance for low- and middle-income countries*. Washington, DC: World Bank.