



LCA analiza alternativnih materijala u asfaltnim mješavinama

Teodora Popović^a, Igor Jakanović^b, Katarina Mirković^a

^a Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora

^b Građevinski fakultet Subotica, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

ARTICLE INFO

DOI: 10.31075/PIS.71.02.06

Stručni rad

Primljen: 25.04.2025.

Prihvaćen: 26.05.2025.

Correspondent autor: teodorap@ucg.ac.me

ORCID ID

Teodora Popović: N.A.

Igor Jakanović: 0000-0002-6511-8398

Katarina Mirković: 0000-0001-8663-4888

Ključne riječi

Reciklaža

WMA

RAP

RCA

Ekonomska održivost

ekološka održivost

REZIME

Poslednjih decenija u porastu je svjetski trend istraživanja i primjene recikliranih materijala kolovozne konstrukcije sa dodacima različitih alternativnih materijala. Cilj ovog istraživanja je teoretsko dokazivanje uporednom analizom mana i prednosti posmatranih kolovoznih konstrukcija sa aspekta troškova životnog vijeka kolovoza, kao i procjene uticaja na životnu sredinu tokom životnog ciklusa kolovoza. Analiza je sprovedena uz pomoć LCA programa PaLATE. Analizirano je 8 kolovoznih konstrukcija TIP3 različitog sastava, pri čemu su podijeljene u 4 para gdje su upoređene ekonomske i ekološke vrijednosti uticaja konstrukcije bez i sa alternativnim materijalima kao potpunom ili djelimičnom zamjenom, kao i bez ili sa aditivima. Mješavine su spravljane po toplom postupku (WMA), kao alternativni materijali korišteni su: RAP (Recycled Asphalt Pavement), RCA (Recycled Concrete Aggregate), C&DW (Construction and Demolition Waste), SS (zgura iz procesa proizvodnje čelika u elektranama), polimer lignin, kobalt katalizator, bio razgradivi materijali, leteći pepeo. Zaključna razmatranja daju detaljan prikaz uporedne analize koja nedvosmisleno upućuje na prednosti savremenih tretmana sa aspekta ekonomskih i ekoloških uticaja na izgradnju i održavanje kolovoza.

1. Uvod

Potrošnja energije pri proizvodnji komponentnih materijala (agregata, bitumena, cementa itd), kao i potrošnja energije pri proizvodnji i ugrađivanju vrućih asfaltnih mješavina (HMA – Hot Mix Asphalt) koja uključuje grijanje agregata i bitumena, kao i transport komponentnih materijala i mješavina, predstavljaju veliko opterećenje za prirodno okruženje i održivost samih građevinskih procesa u toku čitavog životnog vijeka kolovoznih konstrukcija. Na smanjenje ogromnih finansijskih i energetske troškova utiče primjena alternativnih materijala i procesa, kao što su primjena recikliranih i korišćenje bio razgradivih materijala, kako u procesu projektovanja mješavina, tako i tokom izgradnje kolovoznih konstrukcija od asfaltnih mješavina dobijenih po toplom postupku (WMA – Warm Mix Asphalt). Prednosti savremenih tretmana kako projektovanja i izgradnje, tako i održavanja kolovoznih konstrukcija predstavljaju alternativne opcije za „ozelenjavanje“ postojećih kolovoza u cilju približavanja, za sada naizgled nedostižnoj, održivosti kolovoznih konstrukcija. Cilj ovog istraživanja predstavlja dokazivanje predmetnih teoretskih prednosti koristeći metodologiju procjene i troškova na nivou životnog ciklusa.

2. Alternativni koncepti asfaltnih kolovoznih konstrukcija

U ovom radu se fokus istraživanja, s ciljem proračuna analize troškova životnog vijeka kolovoza, odnosi na dokazane pozitivne efekte različitih materijala na asfaltne mješavine, kao i na cijenu proizvodnje, ugradnje i eksploatacije. Osim toga, korišćenje recikliranih materijala kao djelimična zamjena materijala u WMA mješavinama se smatra jednom od alternativa za smanjenje emisije ugljenika.

Takođe, kako je ogromna potreba za izgradnjom puteva rezultirala korišćenjem velikih količina prirodnih materijala, reciklirani materijali mogu pomoći u smanjenju potražnje za neobnovljivim resursima. Neki od alternativnih materijala koji mogu smanjiti negativne efekte na okolinu jesu: RAP (Recycled Asphalt Pavement), RCA (Recycled Concrete Aggregate), C&DW (Construction and Demolition Waste), SS (zgura iz procesa proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći), različiti modifikatori za bitumen kao što je lignin, ili čak otpadne gume, tj. CRM (Crumb Rubber Modifier).

Održivost se kao izraz pominje više decenija unazad, čije se značenje ogleda u jednom, glavnom cilju: očuvanju planete Zemlje koja, sa razlogom, polako, ali sigurno počinje da odgovara prirodnim nepogodama na neodgovornost njenih stanovnika. Osim u ostalim sferama ljudskog života, i građevina je oblast koja je, zajedno sa ostalima, usvojila različite agende, kao što su: Urbana agenda EU (koja je usvojena u maju 2016. godine u Amsterdamu), Olborška deklaracija koju je potpisalo 2708 gradova Evrope (1944), a čiji je rezultat Bijela knjiga EU. Kao objekti koji su neophodni za razvijanje društva i daljinsko povezivanje, putevi predstavljaju neizostavni dio svih razvojnih projekata. Tako predstavljaju potencijalnu opasnost po okolinu, zbog ogromnog korišćenja energije pri proizvodnji materijala, njihovoj ugradnji, ali i eksploataciji, kao i štetnog uticaja otrovnih agenasa sa površine kolovoza. Korišćenje pomenutih alternativnih materijala može smanjiti ovaj negativni uticaj, i potencijalno, svesti ga na prihvatljivi minimum. S tim ciljem, može se postaviti jednačina poboljšanja održivosti u oblasti izgradnje i upravljanja održavanjem kolovozima čiji su činoci sa lijeve i desne strane u nedvosmislenoj zavisnosti:

WMA (ili HWMA) tehnologija + alternativni materijali = održivost + isplativost. Efekti korišćenja nekih materijala kao što je ponovo upotrijebljeni asfalt i reciklirani asfalt na ponašanje HMA mješavina se ogledaju u promjeni mehaničkih karakteristika, najviše u okviru svojstva zapreminskih karakteristika mješavine, koja pozitivno utiče ne samo na očuvanje životne sredine, već i na smanjenje cijene kako izgradnje, tako i održavanja kolovoza. Za definisanje tipova kolovoznih konstrukcija koje su upoređivane u okviru LCA analize, korišćeni su podaci i metodološki pristupi iz više relevantnih naučnih radova.

2.1. "Zeleni" materijali za alternativne koncepte asfaltnog kolovoza

U okviru ovog istraživanja korišćen je i pristup opisan u radu Kovalskog „Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement“, gdje se razmatra mogućnost implementacije ekološki prihvatljivih materijala u strukturu kolovoza. Cilj rada je zamjena tradicionalnih sirovina baziranih na nafti sa održivim alternativama, bez narušavanja funkcionalnosti i trajnosti konstrukcije. Kao zamjena za klasične bitumenske vezive, predloženi su bio-flux bitumeni dobijeni iz metil estara uljane repice, kao i određeni industrijski bio-otpadi koji mogu zamijeniti naftne polimere u modifikovanim bitumenima. Pored toga, korišćenje bio-agensa omogućava proizvodnju asfaltnih mješavina na nižim temperaturama (WMA), što dodatno doprinosi smanjenju emisija u fazi ugradnje. Što se tiče mineralnih materijala, predlaže se primjena recikliranog asfalta (RAP) u većem procentu, kao i upotreba građevinskog i demoliranog otpada (C&DW) za izradu donjih nosećih slojeva kolovoza. Uz odgovarajuću separaciju, stabilizaciju i pripremu, C&DW pokazuje zadovoljavajuće mehaničke osobine.

Poseban akcenat stavljen je i na mogućnost modifikacije bitumena korišćenjem otpada iz proizvodnje bioetanola bogatog ligninom, čime se postiže sličan efekat kao kod SBS-modifikovanog bitumena, uz znatno niže troškove. Na taj način, ekološki koncept obuhvata sve slojeve kolovoza: od recikliranih materijala u donjim slojevima, preko „zelenih“ veziva u srednjim slojevima, do modifikovanih bitumena u habajućem sloju.

Na osnovu ovih karakteristika, jedan od tipova kolovoznih konstrukcija koji je razmatran u ovom radu oslanja se na principe izloženog ekološkog koncepta, kako bi se kroz LCA analizu procijenila njegova ukupna održivost u poređenju sa konvencionalnim konstrukcijama.

2.2. Korišćenje SS zgre za spravljanje WMA mješavina

Jedan od razmatranih tipova kolovozne konstrukcije u ovom istraživanju temelji se na primjeni SS-WMA i RAP-WMA asfaltnih mješavina, koje predstavljaju održivu alternativu tradicionalnim HMA (Hot Mix Asphalt) mješavinama. Osnovu ovog koncepta čine rezultati istraživanja predstavljenih u radovima [8], [13], gdje se analiziraju tehničke i ekološke prednosti korišćenja industrijske zgre (SS – Steel Slag) i recikliranog asfalta (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) u kombinaciji sa tehnologijom toplo ugrađenih asfalta (WMA – Warm Mix Asphalt). SS-WMA i RAP-WMA mješavine omogućavaju smanjenje radnih temperatura pri proizvodnji i ugradnji, što vodi ka manjem zagađenju, nižim emisijama, zaštiti prirodnih resursa, kao i smanjenim investicionim troškovima – naročito važnim u hladnijim klimatskim uslovima gdje su transportna ograničenja značajna. Osim toga, smanjenje temperature doprinosi sporijem starenju veziva i bržem puštanju puta u upotrebu.

Kod SS-WMA mješavina dodatna prednost leži u samoj prirodi SS agregata – riječ je o nusproizvodu industrije čelika, čime se doprinosi smanjenju otpada i zaštiti okoline. Mješavine koje koriste SS pokazale su se otpornijim na štetne efekte vlage u poređenju sa onima koje sadrže RAP. Ovo je povezano sa boljom teksturom površine SS agregata, što omogućava jaču mehaničku vezu sa bitumenom i bolju adheziju. U pomenutim istraživanjima korišćen je bitumen PG 64-22 (penetracija 50/70), uz dodatak sasobit aditiva (3% u odnosu na vezivo), koji smanjuje viskozitet i omogućava ugradnju na nižim temperaturama. Ovaj aditiv se aktivira u temperaturnom opsegu od 70–115°C, pri čemu doprinosi očvršćavanju matrice i povećanju čvrstoće. Rezultati ispitivanja pokazali su da SS-WMA mješavine imaju bolje mehaničke osobine i otpornost na vlagu, izražene kroz veće vrijednosti RMR (Resilient Modulus Ratio) i IDTR (Indirect Tensile Strength Ratio), u poređenju sa RAP-WMA mješavinama.

Ove osobine ih čine pogodnim za primjenu u uslovima srednjih do visokih temperatura, što odgovara i klimatskim karakteristikama područja kao što je Crna Gora. Zbog navedenih karakteristika, SS-WMA mješavine su uključene kao jedan od tipova kolovozne konstrukcije koji se analizira u okviru LCA metode u ovom radu.

2.3. Primjena otpadne gume kao materijala za proizvodnju tankih asfaltnih slojeva

Još jedan od razmatranih tipova kolovoznih konstrukcija u okviru ovog istraživanja temelji se na primjeni asfaltnih mješavina modificiranih otpadnim gumama. U radu Božovića i Mirković [5] analizirane su savremene metode primjene otpadnih automobilskih guma u svijetu, neophodna oprema, kao i uslovi njihove moguće primjene u Crnoj Gori. Glavna komponenta otpadnih guma korisna u izradi asfaltnih mješavina su elastomeri – prirodna i sintetička guma. Sintetička guma se posebno ističe zbog svoje bolje termičke stabilnosti. Uz to, prisustvo čađi u sastavu guma ima pozitivan efekat na stabilnost bitumena, jer povećava njegovu viskoznost i stvara deblji zaštitni film oko agregata, čime se usporava proces oksidacije i produžava vijek trajanja kolovoza. Tokom procesa pripreme modifikatora (CRM – Crumb Rubber Modifier), neželjeni elementi poput žica i vlakana se uklanjaju, a krajnji proizvod se dobija finim tehnološkim postupkom, a ne samo prostim usitnjavanjem. U pomenutom istraživanju korišćena je mješavina koja sadrži: 7,3% veziva BIT 50/70 sa dodatkom CRM, 3% filera i 89,7% agregatne mješavine.

Interesantno je da je cijena ugradnje za ovu modifikovanu mješavinu niža (2.94 EUR/m² za sloj debljine 4 cm) u poređenju sa klasičnom AB 11 mješavinom (3.97 EUR/m²), što dodatno potvrđuje ekonomske prednosti njenog korišćenja. Kao najefikasniji pristup primjeni otpadne gume u asfaltima, autori predlažu tzv. mokri postupak (Mekdonaldova metoda), naročito u kombinaciji sa skeletnom mješavinom agregata (SMA – Split Mastic Asphalt). Ova tehnologija omogućava primjenu tanjih slojeva uz zadržavanje potrebne nosivosti, što doprinosi dodatnom smanjenju ukupnih troškova i resursne potrošnje. Zahvaljujući kombinaciji produženog vijeka trajanja, nižih troškova ugradnje i efikasne upotrebe otpada, ovaj tip konstrukcije uključen je kao poseban slučaj u okviru LCA analize u ovom radu.

3. Metodologija LCA (Life Cycle Assessment)

LCA (procjena životnog ciklusa) je metodologija koja se koristi za procjenu i razumijevanje ekoloških uticaja određenih proizvoda. Svaka faza životnog ciklusa, od dobijanja materijala do kraja životnog ciklusa, je idealno uključena u procjenu.

LCA uključuje 4 osnovne komponente [16]:

- 1) Definisane cilja i obima procjene – opisivanje ograničenja sistema životnog ciklusa, funkcionalne jedinice koja se koristi u analizi i ciljne grupe.
- 2) Analiza inventara – kvantifikovanje potrošnje resursa, obima otpada i emisija po funkcionalnoj jedinici koja se može pripisati svim procesima unutar ograničenja sistema životnog ciklusa.
- 3) Procjena uticaja – obezbjeđenje dodatnih ekoloških karakteristika za značajniju procjenu rezultata inventara životnog ciklusa (unosi resursa i emisija su grupisani u kategorije ekoloških uticaja u cilju boljeg razumijevanja njihovog ekološkog značaja).
- 4) Interpretacija – korišćenje rezultata iz analize inventara i/ili procjene uticaja za donošenje zaključaka, preporuka, identifikovanje dorada analize ili pomoć pri procesu donošenja odluke.

Nezavisno od tipa LCA metode za analizu kolovoznih konstrukcija, procjene bi trebalo raditi za 5 faza životnog ciklusa [16]:

- 1) Faza proizvodnje materijala – uključuje svaki korak u procesu proizvodnje materijala, od ekstrakcije sirovih materijala (npr. krečnjaka) do njihove transformacije u materijale za asfalt (npr. cement) kao i svako neophodno transportovanje između objekata.
 - 2) Faza izgradnje – procesi korišćeni za ugradnju materijala na predmetnoj lokaciji kao i opremu koja se koristi na licu mjesta i kašnjenje u prevozu zbog građevinskih radnji.
 - 3) Faza eksploatacije – aktivnosti koje se dešavaju kada je kolovoz ugrađen: interakcija sa okolinom.
 - 4) Faza održavanja – aktivnosti održavanja, rehabilitacije i rekonstrukcije u toku životnog ciklusa kolovoza (materijali, izvođenje i nova faza eksploatacije).
 - 5) Kraj životnog ciklusa – može uključivati rušenje, odlaganje na deponiju, reciklažu i/ili druge aktivnosti koje se sprovode kada kolovoz gubi svoju funkciju.
- Jedna od metoda koja može dati zadovoljavajuće izlazne podatke uticaja kolovoznih konstrukcija na okolinu i cijenu troškova je PaLATE.

3.1. PaLATE

PaLATE je alat za procjenu životnog ciklusa kolovoza uzimajući u obzir efekte na životnu sredinu i ekonomiju. Stvoren je 2003. godine na Univerzitetu u Kaliforniji. Modelira životni ciklus kolovoza kroz fazu dobijanja materijala, proizvodnje, izvođenja, održavanja i kraja životnog ciklusa kolovoza. Zasnovan je na excel-u koji kombinuje ulazne podatke sa informacijama dodatim u toku procesa kako bi se dobio hibridan LCA okvir [16]. Ulazni podaci podrazumijevaju karakteristične gustine materijala korišćenih za svaki sloj, kao i aktivnost održavanja.

Izlazni podaci uključuju potrošnju energije i vode, potencijal globalnog zagrijavanja (GWP), NOx (emisije nitrogen dioksida), SO2 (emisije sumpor dioksida), CO (emisije ugljen monoksida), Hg (emisije žive), generisanje opasnog otpada. Osim toga, ovaj model daje jednostavan mehanizam za određivanje potrebnih finansijskih sredstava prilikom procesa (Santero, N. et al, 2010).

4. Analiza troškova životnog vijeka i uticaja na životnu sredinu odabranih kolovoznih konstrukcija

Kao pristupačna metoda, PaLATE daje uvid u ekonomske i ekološke uticaje konkretnih kolovoznih konstrukcija, sa dovoljnom tačnošću. hibridna LCA metoda predstavlja postupak koji na najefikasniji način kombinuje dva pristupa definisanju parametara potrebnih za istraživanje, i njihovo specifično modeliranje.

PaLATE je upravo alat koji modelira životni ciklus kolovoza kroz fazu dobijanja materijala, proizvodnje, izvođenja, održavanja i kraja životnog ciklusa kolovoza. Osim toga, njegova pristupačnost ga karakteriše kao primjereni izbor za predmetno istraživanje.

Navedena literatura [5, 8, 10, 12] je poslužila kao osnov za odabir sastava slojeva predmetnih kolovoznih konstrukcija, pri čemu je usvojeni tip kolovozne konstrukcije TIP 3, odnosno, tip konstrukcije koja se sastoji od asfaltnih slojeva (habajući i bitumenizirani noseći sloj), donje noseće podloge stabilizovane vezivom, i donje noseće podloge od nevezanog materijala. Ovaj izbor je proistekao iz uslova o analiziranju uticaja svih mogućih vrsta slojeva kolovozne konstrukcije.

Analizirano je 8 kolovoznih konstrukcija različitog sastava, pri čemu su podijeljene u 4 para gdje su upoređene ekonomske i ekološke vrijednosti uticaja konstrukcije bez i sa alternativnim, „zelenim“ materijalima kao aditivima ili zamjenama za klasične materijale. Sastav analiziranih kolovoznih konstrukcija je prikazan u tabeli br. 1.

Kako je primjena reciklaže kolovoza postala standard u svijetu, pa i na Balkanu, istraživanje je fokusirano na primjenu WMA mješavina koje su već zauzele bitno mjesto u proizvodnji i izgradnji za referentne kolovozne konstrukcije. Kao takve, poređene su sa kolovoznim konstrukcijama istih debljina slojeva, ali poboljšane alternativnim materijalima čije primjena je relativno zaživjela u modernom dobu graditeljstva puteva.

Tabela 1. Sastav slojeva kolovoznij konstrukcija čiji je uticaj na okolinu analiziran

| K.K. | Habajući sloj | BNS | CNS | MNS |
|------|---|---|--|-----------------------------------|
| 1 | WMA + BIT 60/70 (EN 12591) | agregat + BIT 60/70 | Nevezani drobljeni kameni agregat + cement | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 2 | WMA + BIT 60/70 (EN 12591) | RAP (75%) + RCA (25%) + BIT 60/70 | C&DW + leteći pepeo | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 3 | WMA + BIT 70/100 (EN 12591) | RAP + BIT 50/70 | Nevezani drobljeni kameni agregat + cement | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 4 | WMA + polimer lignina + BIT 70/100 (EN 12591) | RAP + bio-flux BIT 50/70 (dodatak kobalt katalizatora (0.1%) sa zagrijavanjem do 90°C u toku jednog sata) | C&DW + leteći pepeo | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 5 | WMA + BIT 60/70 (EN 12591) | RAP (40%) + agregat + BIT 60/70 | Nevezani drobljeni kameni agregat + cement | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 6 | WMA + BIT 60/70 (EN 12591) | SS (Electric Arc Furnace steel slag) + agregat + BIT 60/70 modifikovan sasobitom | C&DW + leteći pepeo | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 7 | WMA + BIT 50/70 (EN 12591) | RAP + BIT 50/70 | Nevezani drobljeni kameni agregat + cement | Nevezani drobljeni kameni agregat |
| 8 | WMA + BIT 50/70 (EN 12591) modifikovan sa CRM | RAP + bio-flux BIT 50/70 | C&DW + leteći pepeo | Nevezani drobljeni kameni agregat |

4.1. Ulazni parametri za istraživanje

Pomenuta analiza je izvršena uzimajući u obzir parametre definisane unutar samog programa, ali i parametrima dobijenim nakon istraživanja i eksperimenata u korišćenoj literaturi. Cijene svih materijala su definisane programski, odnosno, njihove vrijednosti su preuzete kao već postojeće unutar alata PaLATE. Procenat veziva u habajućem sloju iznosi 4%, u bituminiziranom nosećem sloju 3%, a u vezanom donjem nosećem sloju 2%. Međutim, kako je optimalan sadržaj asfalta za mješavinu sa 75% RAP-a i 25% RCA-a [12] 4.57%, usvojena vrijednost sadržaja bitumena u BNS sloju druge kolovozne konstrukcije iznosi 4%.

Program PaLATE pri proračunu uzima u obzir jediničnu zapreminsku težinu, pa su usvojene sljedeće vrijednosti za agregat i veziva:

Tabela 2. Jedinična zapreminska težina usvojenih materijala (g/cm³)

| Materijal | Jedinična zapreminska težina (g/cm ³) |
|--------------|---|
| Agregat | 2.08 |
| Šljunak | 1.35 |
| RAP | 2.23*/2.27** |
| RCA | 2.29 |
| Bitumen | 0.84/1.01*/1.38** |
| Cement | 1.27 |
| Leteći pepeo | 2.57 |
| SS zgura | 1.72 |

* - jedinična zapreminska težina RAP-a u BNS sloju i modifikovanog bitumena

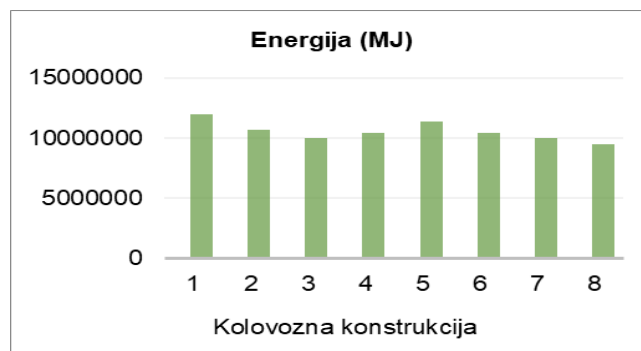
** - jedinična zapreminska težina RAP-a u vezanom donjem nosećem sloju i bitumena sa manjim procentom lignina

Bijeli čvrsti krečnjak je odabrana kao agregat, zbog boljih parametara u odnosu na krečnjak i bazalt [2], uključujući stabilnost i procenat šupljina ispunjenih vazduhom, pa je i vrijednost jedinične zapreminske težine usvojena prema literaturi [12].

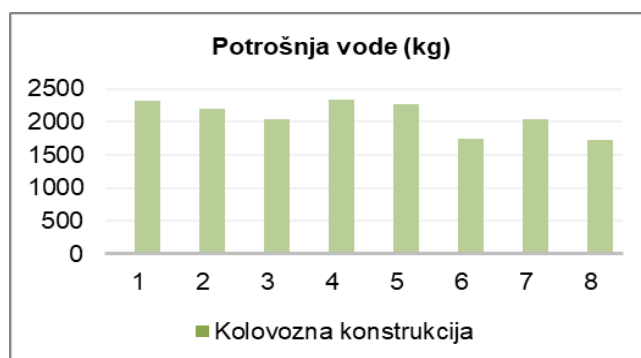
Jedinična zapreminska težina šljunka, cementa i zgre iz visoke peći je usvojena prema programu. Jedinična zapreminska težina RAP-a u BNS sloju (finije čestice) iznosi 2.23 g/cm³, dok je ta vrijednost za RAP u vezanom donjem nosećem sloju 2.27 g/cm³ (grubi agregat) [12]. RCA u vezanom donjem nosećem sloju je definisan vrijednošću od 2.29 g/cm³. Jedinična zapreminska težina običnog bitumena je usvojena prema programu, dok te vrijednosti za modifikovani bitumen i bitumen sa manjim procentom lignina iznose 1.01 g/cm³ [12] i 1.38 g/cm³ [15] respektivno. Prema literaturi [11] jedinična zapreminska težina letećeg pepela iznosi 2.57 g/cm³.

4.2. Uticaji na okolinu

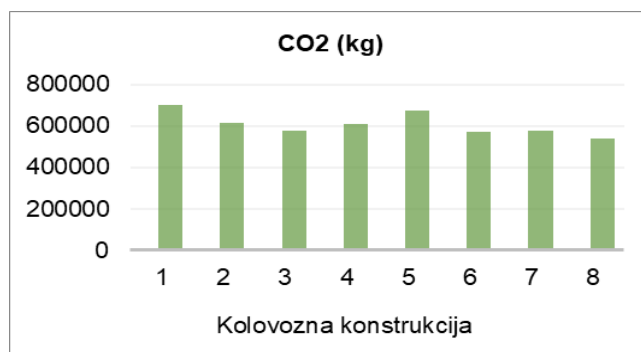
Kao što je već pomenuto, kolovozne konstrukcije su poređene po parovima, odnosno, kolovozna konstrukcija bez alternativnih materijala ima svoj „pandan“ sa alternativnim materijalima. Program nudi poređenje na osnovu: utrošene energije (MJ); potrošnje vode (kg); emisije ugljen-dioksida CO₂ (kg); emisije azot-monoksida i azot-dioksida NO_x(g); emisija štetnih čestica PM₁₀ (g); emisije sumpor-dioksida SO₂ (g); emisije ugljenmonoksida CO (g); emisije žive Hg (g); emisije olova Pb(g); generisanog opasnog otpada koji nastaje u toku same eksploatacije kolovoza (RCRA); emisije aldehida (g); (iako program nudi definisanje uticaja aldehida, predmetne konstrukcije nemaju ovakvih štetnih uticaja na životnu sredinu, pa neće biti obrađeni) emisije benzo (a)pirena (g); emisije hlorovanih dibenzodioksina i hlorovanih dibenzofurana CDD/CDF (g TEQ). Usporedne vrijednosti dobijenih ekoloških parametara su prikazane na Slikama od 1. do 12.



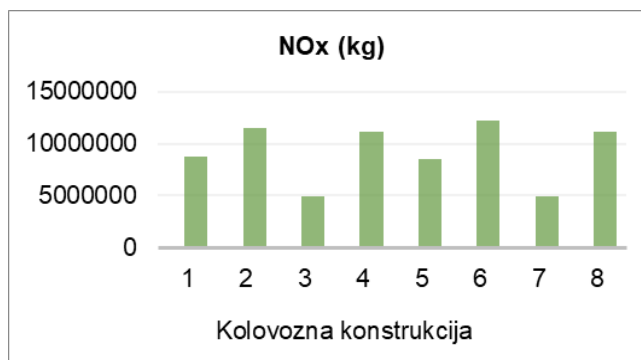
Slika 1. Usporedne vrijednosti utrošene energije svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



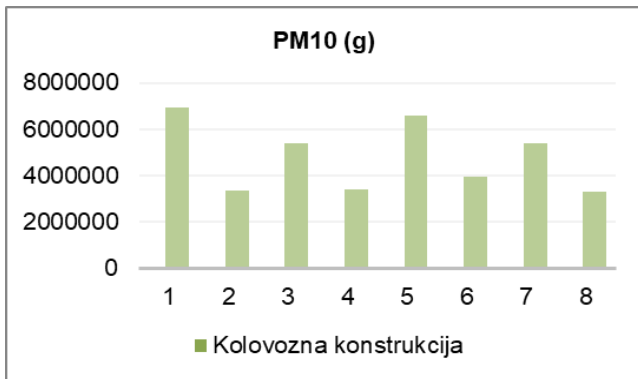
Slika 2. Usporedne vrijednosti potrošnje vode svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



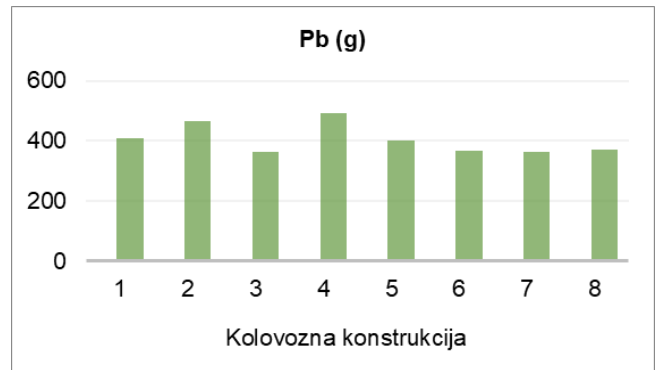
Slika 3. Usporedne vrijednosti emisije ugljen-dioksida svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



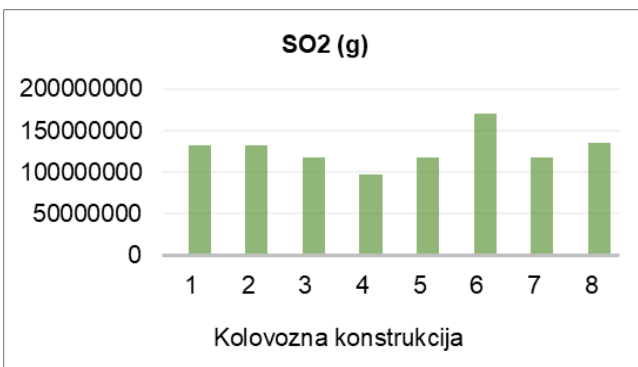
Slika 4. Usporedne vrijednosti azot-monoksida i azot-dioksida svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



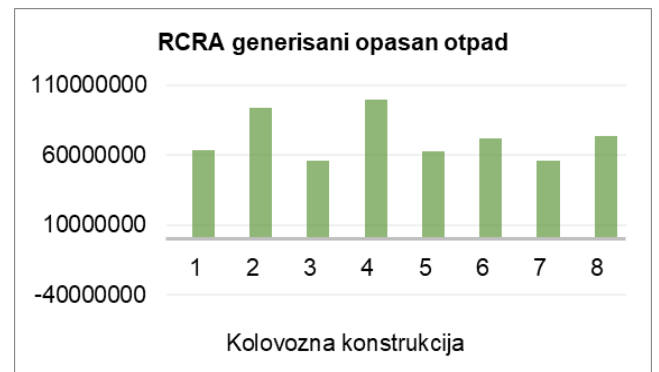
Slika 5. Uporedne vrijednosti emisije štetnih čestica svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



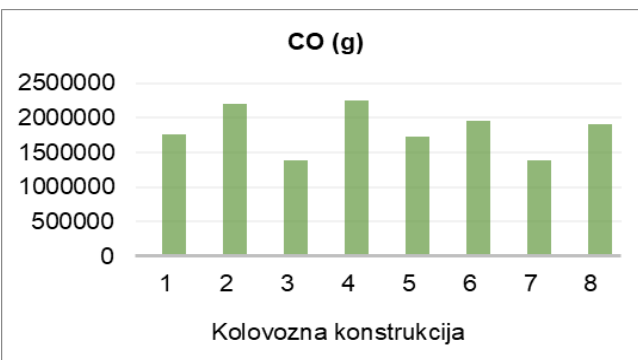
Slika 9. Uporedne vrijednosti emisije olova svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



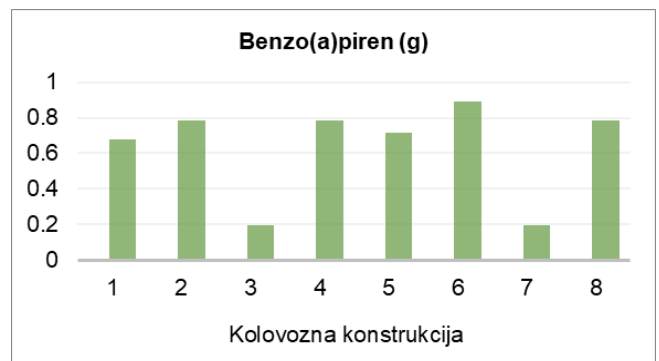
Slika 6. Uporedne vrijednosti emisije sumpor-dioksida svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



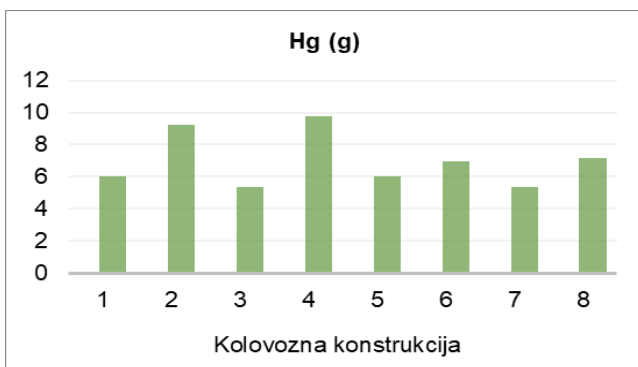
Slika 10. Uporedne vrijednosti generisanog opasnog otpada svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



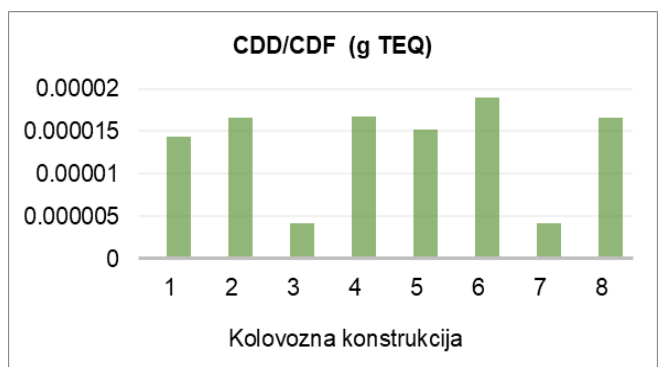
Slika 7. Uporedne vrijednosti emisije ugljen-monoksida svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



Slika 11. Uporedne vrijednosti emisije benzo(a)pirena svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



Slika 8. Uporedne vrijednosti emisije žive svih predmetnih kolovoznih konstrukcija



Slika 12. Uporedne vrijednosti emisije hlorovanih dibenzodioksina i hlorovanih dibenzofurana svih predmetnih kolovoznih konstrukcija

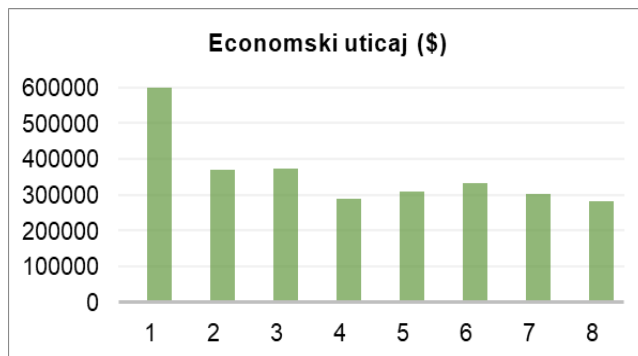
Kao što se vidi iz priloženih tabela i Slika, kolovozne konstrukcije izrađene od alternativnih materijala su karakterisane manjom potrošnjom energije, vode u stabilizovanim slojevima, kao i manjim emisijama ugljendioksida i štetnih čestica u vazduhu. Međutim, ekološki uticaji koji uzimaju u obzir druge parametre su manji kod klasičnih kolovoznih konstrukcija. To se u najvećoj mjeri može pripisati procesu proizvodnje mješavina sa alternativnim materijalima, ali i potrebnim resursima pri samoj izgradnji puta.

Ukoliko se pogleda ukupan uticaj na okolinu, kolovozna konstrukcija br. 8, ali i br. 4, su definisane znatno manjim ekološkim negativnim posljedicama. Kako je to prikazano u tabeli br. 7, kolovozna konstrukcija sa habajućim slojem spravljenim od mješavine sa ostacima guma ima za posljedicu najnižu potrošnju energije i vode, kao i emisije ugljendioksida i krupnijih štetnih čestica u vazduhu, koje predstavljaju jedan od glavnih štetnih uticaja po okolinu.

S tim u vezi, kolovozna konstrukcija čiji je habajući sloj izgrađen od bitumena modifikovanim ligninom, ali i bitumeniziranim nosećim slojem čije je vezivo bio-flux bitumen (dodatak kobalt katalizatora (0.1%) sa zagrijavanjem do 90°C u toku od jednog sata), emituje najmanje količine sumpor dioksida. Iako kolovozna konstrukcija br. 3, odnosno, konstrukcija od habajućeg sloja od mješavine spravljene po standardnom vrućem postupku, i BNS-a od RAP-a i bitumena kao veziva, emituje najmanje količine azot monoksida, ugljen monoksida, žive, olova, hlorovanih dibenzodioksina i hlorovanih dibenzofurana koji znatno utiču na ljudsko zdravlje, i definisana je skupljanjem manje količine generisanog opasnog otpada, dobijene vrijednosti ekoloških uticaja predmetnih kolovoznih konstrukcija pokazuju da je upotreba alternativnih materijala potencijalno rješenje za smanjenje ugrožavanja prirodne sredine.

4.3. Ekonomski uticaji

Pri upoređivanju parova kolovoznih konstrukcija, može se zaključiti da je cijena konstrukcija sa alternativnim materijalima jeftinija (osim u slučaju poređenja kolovozne konstrukcije sa klasičnim habajućim slojem izrađenim od mješavine po vrućem postupku i bitumeniziranog nosećeg sloja sa 40% RAP-a i kolovozne konstrukcije čiji je BNS izrađen od mješavine bitumena modifikovanog sasobitom, agregata i zgure iz visoke peći). Manje cijene alternativnih kolovoznih konstrukcija se mogu pripisati razlici koja se ogleda u implementaciji šljunka, odnosno količinama koje su znatno veće u slučaju referentnih kolovoznih konstrukcija. Prema programu, najjeftinija kolovozna konstrukcija jeste kolovozna konstrukcija broj 8 (tabele br. 3 i 4). Važno je napomenuti da su troškovi radne snage, opreme, kao i ostali troškovi jednako definisani u programu za sve kolovozne konstrukcije.



Slika 13. Usporedne ekonomske vrijednosti svih predmetnih kolovoznih konstrukcija

5. Zaključak

Predmetno istraživanje, motivisano potencijalnim poboljšanjem održivosti u oblasti izgradnje i upravljanja kolovozima, iskoristilo je dostupnu PaLATE metodu za primenu LCA metodologije. Istraživanje je sprovedeno kroz analizu 8 kolovoznih konstrukcija različitih karakteristika, odnosno sa različitim primijenjenim materijalima, pri čemu su broj i debljina slojeva ostali isti. Na osnovu ekoloških i ekonomskih uticaja, zaključeno je da kolovozne konstrukcije sa alternativnim materijalima imaju potencijal da zamijene klasične materijale koji negativno utiču na okolinu. Konstrukcija br. 1, koja se sastoji od klasičnog habajućeg sloja WMA sa bitumenom, bitumeniziranim nosećim slojevima sa običnim agregatom, kao i donjim nosećim slojevima od klasičnih materijala, pokazala se kao najskuplja opcija sa značajnim negativnim uticajem na životnu sredinu. Sa druge strane, upotreba otpada od guma kao dodatka vezivu i bio-flux bitumena, prema ekonomskim parametrima, predstavlja najracionalniju opciju, dok ekološki gledano, to je jedno od rješenja koje najmanje zagađuje okolinu. Iako proizvodnja bitumena sa alternativnim dodacima nosi nešto veće troškove, početni kapital je opravdan ako se uzme u obzir dugoročan uticaj na zaštitu životne sredine, što je naročito značajno u kontekstu globalnog zagrijavanja, kao i smanjenja troškova održavanja u budućnosti. Teorijske prednosti savremenih metoda projektovanja, izgradnje i održavanja kolovoznih konstrukcija koje koriste alternativne opcije, potvrđene su kroz ekonomsku i ekološku analizu uz pomoć LCA programa PaLATE. Njihova implementacija mogla bi da dovede do drastičnih promjena u karakteristikama puteva, čineći ih ekološki prihvatljivijim i održivijim. Ove inovacije ne samo da bi doprinijele smanjenju klimatskih uticaja, već bi mogle redefinisati samu prirodu drumskog saobraćaja, uz značajno poboljšanje mobilnosti i kvaliteta života.

5.1. Preporuke za dalja istraživanja

S obzirom na to da je program PaLATE razvijen još 2003. godine, jedna od osnovnih preporuka za buduća istraživanja jeste revizija i ažuriranje postojećih ulaznih podataka, posebno onih koji se odnose na cijene materijala, transporta i energije, u skladu sa savremenim tržišnim uslovima. Pored toga, preporučuje se usmjeravanje budućih studija ka detaljnijem ispitivanju

dugoročne izdržljivosti i performansi alternativnih materijala, sa posebnim fokusom na otpornost na saobraćajna opterećenja, temperaturne oscilacije, prisustvo vode i mehanička oštećenja. Poseban značaj treba dati i unapređenju metoda reciklaže postojećih kolovoznih materijala, kao što su RAP (reciklirani asfalt) i RCA (reciklirani betonski agregat), kroz istraživanje tehnologija za njihovo efikasnije čišćenje, obradu i ponovnu upotrebu. Time bi se dodatno smanjili ukupni troškovi, povećala održivost i smanjio negativan uticaj na životnu sredinu.

Literatura

- [1] Građevinski fakultet. (n.d.). Tehnologija građenja objekata niskogradnje: Postupci reciklaže pri rehabilitaciji asfaltnih kolovoznih konstrukcija. Preuzeto 19. februara 2023. sa <https://pdfcookie.com/documents/pdfcookie-w5lq71m7w027>
- [2] Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, & Mirković, K. (n.d.). Savremeni tretmani održavanja kolovoznih konstrukcija. Podgorica: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore.
- [3] Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, & Mladenović, G. (2021, 26. april). Reciklaža kolovoznih konstrukcija. Preuzeto 4. februara 2023. sa https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_10__recikla_a_kolovoznih_konstrukcija_1619209964840.pdf
- [4] Alsheyab, A. T. M., Khedaywi, T., & Ogillat, O. (2023). Effect of waste tire rubber on properties of asphalt cement and asphalt concrete mixtures: State of the art. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00361-4>
- [5] Božović, I., & Mirković, K. (2019). Pregled metoda primjene otpadnih automobilskih guma u proizvodnji asfaltnih mješavina i mogućnost primjene u Crnoj Gori. *Put i saobraćaj*, 6(7), 21–33. <https://doi.org/10.31075/PIS.67.02.03>
- [6] EN 15804:2012+A2:2019. (2019). Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [7] Federal Highway Administration. (2016, 21. novembar). Everyday Counts: Warm Mix Asphalt FAQs. U.S. DOT. Preuzeto 4. 4. 2023. <https://www.fhwa.dot.gov/innovation/everydaycounts/edc-1/wma-faqs.cfm>
- [8] Goli, H., Latifi, M., & Sadeghian, M. (2022). Moisture characteristics of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement (RAP) or steel slag. *Materials and Structures*, 55(53). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01893-0>
- [9] Iwanski, M., Chomicz-Kowalska, A., Maciejewski, K., Janus, K., Radziszewski, P., Liphardt, A., Michalec, M., & Goral, K. (2023). Stiffness evaluation of laboratory and plant produced foamed bitumen warm asphalt mixtures with fiber reinforcement and bio-flux additive. *Materials*, 16(5), 1950. <https://doi.org/10.3390/ma16051950>
- [10] Kowalski, K. J., Krol, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Perez, D., Vinas, M., Brijse, Y., Frosch, M., Le, D. M., & Wayman, M. (2016). Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. *Transportation Research Procedia*, 14, 3582–3591. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.426>
- [11] Mujkanović, A., Jovanović, M., & Zahirović, A. (2018). Povećanje efikasnosti primjene kalcijskog letećeg pepela u cementnim kompozitima putem mehaničke pripreme. U I. Međunarodna konferencija „Cjeloviti pristup okolišu“. Preuzeto sa <https://www.researchgate.net/publication/>
- [12] Naser, M., Abdel-Jaber, M., Al-shamayleh, R., Louzi, N., & Reem, I. (2022). Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts. *Transportation Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>
- [13] Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2023). Use of steel slags in asphalt pavements: A state-of-the-art review. *Sustainability*, 15(11), 8817. <https://doi.org/10.3390/su15118817>
- [14] Perez, I., Pasandin, A. R., & Medina, L. (2012). Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials & Design*, 36, 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.058>
- [15] Ren, S., Liu, X., Zhang, Y., Lin, P., Apostolidis, P., Erkens, S., Li, M., & Xu, J. (2021). Multi-scale characterization of lignin modified bitumen using experimental and molecular dynamics simulation methods. *Construction and Building Materials*, 123058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123058>
- [16] Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2010). Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research (SN3119a). Portland Cement Association.

LCA Analysis of Alternative Materials in Asphalt Mixtures

Teodora Popović, MSc

Faculty of Civil Engineering, University of Montenegro, Podgorica, Montenegro

Igor Jokanović, PhD

Faculty of Civil Engineering Subotica, University of Novi Sad, Serbia

Katarina Mirković, PhD

Faculty of Civil Engineering, University of Montenegro, Podgorica, Montenegro

Abstract: In recent decades, there has been a global trend in the research and application of recycled materials in pavement structures, with the addition of various alternative materials. The aim of this research is to theoretically demonstrate, through a comparative analysis, the advantages and disadvantages of the observed pavement structures from the perspective of life-cycle costs and the assessment of environmental impacts throughout the pavement's life cycle. The analysis was conducted using the LCA program PaLATE. Eight different types of pavement structures (TIP3) with various compositions were analyzed, divided into four pairs, comparing the economic and ecological impact values of structures without and with alternative materials (either as full or partial replacements), as well as without and with additives. The mixtures were produced using the warm mix asphalt (WMA) method. The alternative materials used were: RAP (Recycled Asphalt Pavement), RCA (Recycled Concrete Aggregate), C&DW (Construction and Demolition Waste), SS (steel slag from the production process in power plants), polymer lignin, cobalt catalyst, biodegradable materials, and fly ash. The concluding remarks provide a detailed overview of the comparative analysis, clearly pointing out the advantages of modern treatments in terms of economic and environmental impacts on the construction and maintenance of pavements.

Keywords: recycling, WMA, RAP, RCA, economic sustainability, environmental sustainability