

ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA (LCA) ASFALTNIH KOLOVOZA SA SADRŽAJEM BAKARNE I ČELIČNE ZGURE

Jelena Đorđević¹, Goran Mladenović²

¹ Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru, Zeleni bulevar 35, djordjevic.jelena030@gmail.com

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Rezime: Veliki industrijski razvoj je poslednjih decenija izazvao nekontrolisano iskorišćavanje prirodnih resursa i degradaciju životne sredine, što je dovelo do zabrinutosti društva za posledice koje utiču na stanje životne sredine.

Izgradnja putne infrastrukture je jedan od glavnih faktora koji doprinose globalnom zagrevanju u oblasti građevinarstva. Procenjeno je da svaki metar izgrađenog puta godišnje izazove emisiju gasova staklene bašte u iznosu od 14,7 kg CO₂ek, gde su faza ekstrakcije i proizvodnja materijala glavni procesi koji doprinose ukupnoj emisiji ugljenika i potrošnji energije. (1) To je razlog zašto izbor materijala za izradu kolovoznih konstrukcija direktno utiče na lokalno zagađenje i degradaciju životne sredine.

U ovom radu je razmatrana upotreba bakarne i čelične zgure kao delimične zamene prirodnog agregata u asfaltnim mešavinama i analiziran je životni ciklus kolovoznih konstrukcija, napravljenih od pomenutih mešavina.

Eksperimentalna istraživanja su pokazala da upotreba bakarne i čelične zgure u asfaltnim mešavinama dovodi do povećane potrošnje veziva prilikom spravljanja mešavina i do povećavanja transportne mase, što dovodi do povećane potrošnje energije i negativno utiče na globalno zagrevanje i zdravlje ljudi. Međutim, upotreba ovih industrijskih nusproizvoda u asfaltnim mešavinama dovodi do uštede prirodnih agregata i rešava problem deponovanja ovog otpadnog materijala na odlagalištima, što je veoma značajno sa ekološkog aspekta.

Ključne reči: bakarna zgura, čelična zgura, LCA, asfaltna mešavina, zaštita životne sredine.

LIFE CYCLE ANALYSIS (LCA) OF ASPHALT LAYERS CONTAINING COPPER AND STEEL SLAG

Jelena Đorđević¹, Goran Mladenović²

¹ Institute of Mining and Metallurgy in Bor, Zeleni bulevar 35, djordjevic.jelena030@gmail.com

² University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Abstract: In recent decades, large-scale industrial development has caused uncontrolled exploitation of natural resources and environmental degradation, which has led to society's concern about the consequences affecting the state of the environment.

The construction of road infrastructure is one of the main factors contributing to global warming in the construction industry. It has been estimated that each meter of road constructed annually causes greenhouse gas emissions of 14.7 kg CO₂eq, where the extraction phase and material production are the main processes that contribute to the total carbon emissions and energy consumption. (1) This is the reason why the choice of materials for the construction of pavement structures directly affects local pollution and environmental degradation.

In this paper, the use of copper and steel slag as a partial replacement of natural aggregate in asphalt mixtures was discussed and the life cycle of pavement structures made from the aforementioned mixtures was analyzed.

Experimental research has shown that the use of copper and steel slag in asphalt mixtures leads to increased consumption of binder for preparation of mixtures and to an increase in transport mass, which cause increased energy consumption and negatively affect global warming and human health. However, the use of these industrial by-products in asphalt mixtures leads to the saving of natural aggregates and solves the problem of depositing this waste material in landfills, which is very significant from an environmental point of view.

Keywords: copper slag, steel slag, LCA, asphalt mixture, environmental protection.

¹ djordjevic.jelena030@gmail.com

² emladen@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Brz industrijski razvoj doprinosi velikoj potrošnji prirodnih resursa i zagađenju životne sredine. Različite aktivnosti u toku industrijskih procesa dovode do emitovanja štetnih gasova, koji učestvuju u formiranju prirodnog fenomena – efekta staklene bašte. Kako je funkcija gasova sa efektom staklene bašte apsorpcija jednog dela zračenja Zemlje, koje se potom emituje jednako u svim pravcima i dovodi do zagrevanja Zemlje, povećanje koncentracije ovih gasova dovodi do energetskog disbalansa u klimatskom sistemu, što konačno rezultuje globalnim zagrevanjem, odnosno povećanjem prosečne temperature Zemlje. Problem globalnog zagrevanja je stvorilo veliku zabrinutost društva, kao i potrebu za sprovođenjem aktivnosti koje neće ugroziti stanje životne sredine.

Analiza životnog ciklusa (Life Cycle Assessment - LCA) je jedan od ključnih alata koji se koristi za analizu uticaja na životnu sredinu postojećih materijala i tehnologija, kao i za razvoj novih i poboljšanje karakteristika postojećih proizvoda. LCA proučava različite vidove uticaja na životnu sredinu tokom celokupnog životnog veka proizvoda od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje, upotrebe i postupanja na kraju životnog ciklusa, recikliranja i konačnog odlaganja tj. „od klevke do groba”.

Poseban problem predstavlja otpad koji nastaje u svim oblastima ljudskih aktivnosti, kako u razvijenim, tako i u zemljama u razvoju. Otpad je ozbiljan ekološki, socijalni i ekonomski problem za sve moderne razvijene ekonomije. Otpad s jedne strane svojim nastajanjem i delovanjem izaziva zagađenje životne sredine, ali sa druge strane otpad predstavlja veliki potencijal kao resurs sekundarnih sirovina i energije. Tretman otpada predstavlja veliki izazov za tehničku struku u cilju razvoja tehnoloških postupaka koji mogu biti prihvatljivi za životnu sredinu.

Jedan od sektora koji doprinosi povećanju negativnih uticaja na životnu sredinu u svetu je građevinska industrija. Najveći deo negativnih uticaja je usmeren na vodu, potrošnju energije, emisiju zagađujućih gasova u atmosferu i eksploataciju prirodnih resursa. Izgradnja i upotreba putne infrastrukture zahteva veliku potrošnju energije, kako u toku proizvodnje sirovina i spravljanja asfaltnih mešavina, tako i za ugradnju mešavina i održavanje saobraćajne infrastrukture. To je razlog zašto se mnogi istraživači bave analizom životnog ciklusa kolovoznih konstrukcija i traže način da inovativnim metodama ili unapređenim postojećim tehnologijama daju doprinos u smanjenju štetnih uticaja na životnu sredinu.

Agregati su glavni materijal koji se koristi za izradu kolovoza. Asfalt beton prosečno sadrži oko 90% agregata, 3% punila, 2% aditiva i 5% veziva, što znači da izgradnja jednog kilometra novog puta zahteva potrošnju oko 30.000 tona agregata. (1) Ova činjenica je još jedan razlog zašto treba ispitati mogućnost upotrebe otpadnih i alternativnih materijala i nusproizvoda kao delimične zamene prirodnih agregata u asfaltnim mešavinama. S jedne strane, time bi se smanjila ekstrakcija i proizvodnja sirovina, došlo bi do smanjenja potrošnje vode, struje i dizela, kao i smanjenja drugih difuznih emisija kao što su buka i prašina. Sa druge strane, smanjilo bi se odlaganje otpada na deponijama, što bi produžilo njihov vek trajanja i rešilo ekološki problem.

Proizvodnja asfaltnog veziva je složen proces koji podrazumeva ekstrakciju, transport i preradu sirove nafte. Svaka od pomenutih faza proizvodnje podrazumeva potrošnju energije i sagorevanje fosilnih goriva, pri čemu dolazi do emisije značajnih količina štetnih gasova.

U ovom radu je razmatrana upotreba bakarne i čelične zgure kao alternativnih materijala koji se mogu koristiti kao delimična zamena prirodnog agregata u asfaltnim mešavinama i uticaj kolovoznih konstrukcija, napravljenih od pomenutih mešavina, na životnu sredinu.

2. METODOLOGIJA ANALIZE ŽIVOTNOG CIKLUSA (LCA)

LCA predstavlja metod i alat za utvrđivanje uticaja industrijskog proizvoda (ili procesa) na životnu sredinu imajući u vidu celokupan životni ciklus proizvoda, odnosno to je proces analize materijala, energije, emisija i otpada koje „produkuje“ proizvod kroz celokupan životni ciklus od nastanka, tj. počevši od resursa i eksploatacije materijala, pa do konačnog odlaganja.

LCA analizira sve i/ili više faza životnog ciklusa proizvoda, uzima u obzir različite uticaje tih faza na životnu sredinu i prirodne resurse, ocenjuje, analizira i interpretira rezultate. Na ovaj način, LCA pomaže kompanijama da odluče do kog nivoa je potrebno baviti se problematikom zaštite životne sredine u procesu odlučivanja o karakteristikama proizvoda, odnosno o vrstama usluga koje kompanija vrši.

Kroz ovaj postupak analize se takođe identifikuju i svi koraci ili procesi između različitih faza i za svaki od tih koraka se definišu ulazi (materijali, resursi i energija) i izlazi (emisije u vodu, vazduh i čvrsti otpad) koji se uzimaju u obzir pri definisanju uticaja.

Identifikacija stanja životne sredine koja rezultira usled uticaja određenih ulaza, odnosno izlaza se ocenjuje kroz studiju ocene uticaja životnog ciklusa. Na osnovu ove studije se dobija opšta slika uticaja posmatranog sistema proizvoda ili usluga na životnu sredinu.

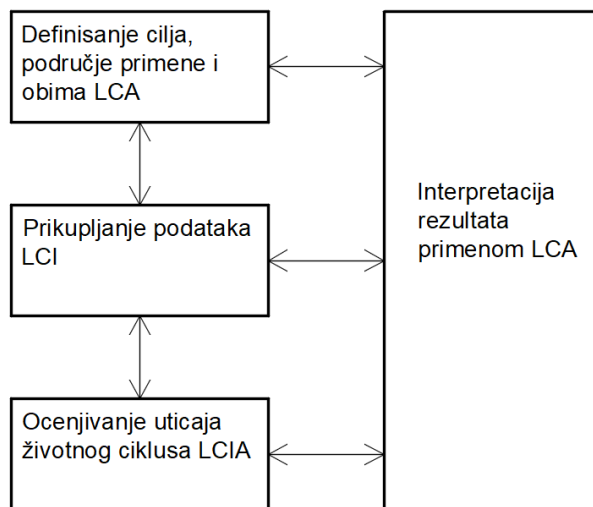
LCA predstavlja iterativni proces koji se sastoji iz četiri faze:

Faza I – definisanje cilja, područja primene i obima LCA;

Faza II – prikupljanje podataka – LCI (Life Cycle Inventory);

Faza III - ocenjivanja uticaja životnog ciklusa – LCIA (Life Cycle Impact Assessment);

Faza IV - interpretacije rezultata primene LCA.



Slika 1. Faze ocenjivanja životnog ciklusa (2)

2.1. Definisanje cilja, područje primene i obima LCA

U prvoj fazi neophodno je odrediti cilj, područje primene i obim analize, tj. predmet analize u zavisnosti od namene. Definisanjem cilja određuju se primene LCA, razlozi za izradu studije i korisnici kojima treba dostaviti rezultate studije. Predmet studije obuhvata jasno definisane funkcije proizvoda, funkcionalnu jedinicu, strukturu sistema proizvoda koji se ispituje i granice sistema proizvoda.

U slučaju analize kolovoznih konstrukcija sa alternativnim materijalima, u ovoj fazi je potrebno definisati krajnji cilj analize. To je zapravo ispitivanje na koji način alternativni materijali utiču na emitovanje štetnih gasova i degradaciju životne sredine. Potrebno je navesti dužinu i širinu deonice koja se ispituje, debljinu i sastav kolovozne konstrukcije, kao i broj mešavina ili scenarija koji su obuhvaćeni analizom. U ovoj fazi se definišu i procesi koji su predmet analize u toku životnog veka kolovozne konstrukcije, što predstavlja obim ispitivanja.

2.2. Prikupljanje podataka LCI

Ova faza podrazumeva prikupljanje podataka i proračune radi kvantitativnog iskazivanja odgovarajućih ulaza i izlaza sistema proizvoda. Podaci koji se obrađuju i učestvuju u procesu podrazumevaju upotrebu sirovina, kao i emisije u vazduh, vodu i zemljište.

Dakle, kroz analizu unetih podataka životnog veka kolovozne konstrukcije, energetske resursi i potrošnja materijala u toku izgradnje, održavanja i tretiranja na kraju životnog veka kolovoza, definisani su i kvantifikovani u formi ekoloških jedinica.

2.3. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa LCIA

Faza ocenjivanja uticaja životnog ciklusa bavi se analizom povezanosti ulaza i izlaza sa uticajima na životnu sredinu. Postupak ocenjivanja uticaja životnog ciklusa obuhvata svrstavanje podataka u kategorije uticaja (klasifikacija), preračunavanje podataka u kategoriju uticaja (karakterizacija), poređenje dobijenih vrednosti sa poznatim jediničnim uticajima na životnu sredinu, radi sagledavanja njihovog značaja (normalizacija) i objedinjavanje rezultata u jedinstvenu ocenu, u specifičnim slučajevima radi komparacije preprojektovanog i postojećeg proizvoda (dodela težinskih koeficijenata, ponderisanje).

2.4. Interpretacije rezultata primene LCA

Četvrta faza je sistematski postupak za identifikovanje, proveru, kvalifikovanje i ocenjivanje informacija dobijenih na osnovu rezultata analize životnog ciklusa i/ili ocenjivanja uticaja životnog ciklusa sistema proizvoda. Rezultati interpretacije se daju u obliku zaključaka i preporuka donosiocima odluka, a u skladu sa ciljem i predmetom studije.

3. ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA ASFALJNIH KOLOVOZA SA SADRŽAJEM BAKARNE ZGURE

Bakarna zgura u Srbiji je jedan od nusproizvoda koji se deponuje u velikim količinama u blizini proizvodnog procesa u Boru i kao otpad čije se količine svakodnevno povećavaju na odlagalištima stvara veliki ekološki problem. Jedan od načina rešavanja ovog problema je mogućnost korišćenja bakarne zgure kao delimične zamene prirodnog agregata u asfaltnim mešavinama. Dosadašnja ispitivanja su pokazala da su fizičko-mehaničke karakteristike ovog materijala povoljne za primenu zgure kao agregata. Takođe, rezultati ispitivanja asfaltnih mešavina sa dodatkom bakarne zgure su ohrabrujući i ostavljaju prostor za detaljnijom analizom upotrebe ovog alternativnog materijala u kolovoznim konstrukcijama. Kako bi se u potpunosti sagledala mogućnost primene bakarne zgure u asfaltnim mešavinama, neophodno je analizirati i životni ciklus kolovozne konstrukcije sa ovim materijalom i proveriti uticaje na životnu sredinu. Još uvek se niko od istraživača iz kompanije Serbia Zijin Copper (nekadašnji Rudarsko-topioničarski basen Bor) nije bavio ispitivanjem bakarne zgure u pogledu uticaja na životni ciklus (Life Cycle Assessment – LCA) asfaltnih mešavina sa ovim materijalom. Međutim, istraživači u svetu se bave ovom temom i već su došli do određenih rezultata.

Diana Movilla-Quesada i ostali autori (3) istraživali su asfaltne mešavine sa različitim sadržajem industrijskih nusproizvoda (bakarna zgura i celulozni pepeo), kao i sa dodatkom polietilen tereftalata (PET) i najlonskih vlakana. Analiza životnog ciklusa ovih mešavina bazirala se na fazi proizvodnje i fazi ugradnje pomenutih mešavina, čiji je sastav prikazan u tabeli 1.

Tabela 1. *Procentualno učešće alternativnih materijala u asfaltnim mešavinama*

Asfaltna Mešavina	Agregat (%)	Bitumen (%)	Tip materijala	(%)
M1	100.00	5.20	Krečnjak	-
M2	85.00	5.20	Bakarna šljaka	15.00
M3	100.00	5.20	PET	14.00
M4	94.00	5.20	Celulozni pepeo	6.00
M5	100.00	4.68	Najlonska vlakna	0.52

Izvor: (3)

Laboratorijski projektovan i kalibrisan sistem za merenje gasova pomoću senzora, korišćen je za upoređivanje emisije metana (CH₄), ugljen monoksida (CO) i ugljen dioksida (CO₂) kontrolne mešavine (M1) sa mešavinama koje sadrže alternativne materijale (M2, M3, M4, M5).

Dobijeni rezultati pokazuju u kojoj meri alternativni materijali, kao sastavni delovi asfaltnih mešavina, utiču na količinu emitovanih gasova, a samim tim i na životnu sredinu. Emisija metana za asfaltne mešavine napravljene od polimernih materijala, tj. od PET i najlonskih vlakana se povećava u odnosu na kontrolnu mešavinu za 21% i 14% respektivno. Nasuprot tome, istaživanja su pokazala da asfaltne mešavine sa bakarnom zgurom i celuloznom pepelom emituju 12% manje metana od kontrolne mešavine. Takođe, upotreba bakarne zgure i celuloznog pepela kao delimične zamene prirodnog agregata u mešavinama smanjuje emisiju gasova staklene bašte u fazi proizvodnje mešavina za 15% i doprinosi stvaranju fotohemijskog ozona za kraći vremenski period. Ispitivanja emisije ugljen dioksida predmetnih asfaltnih mešavina pokazuju značajno povećanje kod svih mešavina, 26% i 44,5% za mešavine sa sadržajem celuloznog pepela i bakarne zgure i 130% i 53% za mešavine sa PET materijalom i najlonskim vlaknima respektivno. Kao razlog povećanja emisije

CO₂ u asfaltnim mešavinama sa bakarnom zgurom navodi se činjenica da se potroši više energije prilikom spravljanja ove mešavine u odnosu na kontrolnu zbog absorpcije veće količine bitumenskog veziva kod zgure kao zamenjujućeg agregata. Količina ugljen monoksida koji se emituje u fazi proizvodnje analiziranih mešavina je bez značajnih promena u poređenju sa kontrolnom mešavinom.

4. ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA ASFALTNIH KOLOVOZA SA SADRŽAJEM ČELIČNE ZGURE

Nusproizvod koji se dobija u procesu proizvodnje čelika jeste čelična zgura. Godišnja proizvodnja u svetu ovog otpadnog industrijskog materijala je oko 130 miliona tona. (4) Najveći deo čelične zgure se odlaže na deponijama, što predstavlja veliki ekološki problem koji je naveo mnoge istraživače da ispituju mogućnost upotrebe čelične zgure kao alternativnog materijala u različitim sferama.

Veoma bitna primena ovog materijala je upotreba u izgradnji puteva, gde se čelična zgura često koristi kao materijal za stabilizaciju tla. Osim u površinskim slojevima tla, granulirana zgura iz visokih peći uspešno se primenjuje i kao vezivo pri stabilizaciji dubljih slojeva tla, u slučaju slabe nosivosti tla na kojem je planirana gradnja inženjerskih građevina. Prema statističkim podacima, jedna od najučestalijih primena jeste u nevezanim mešavinama za donji stroj puteva ili kao agregat u asfaltnim mešavinama. (5)

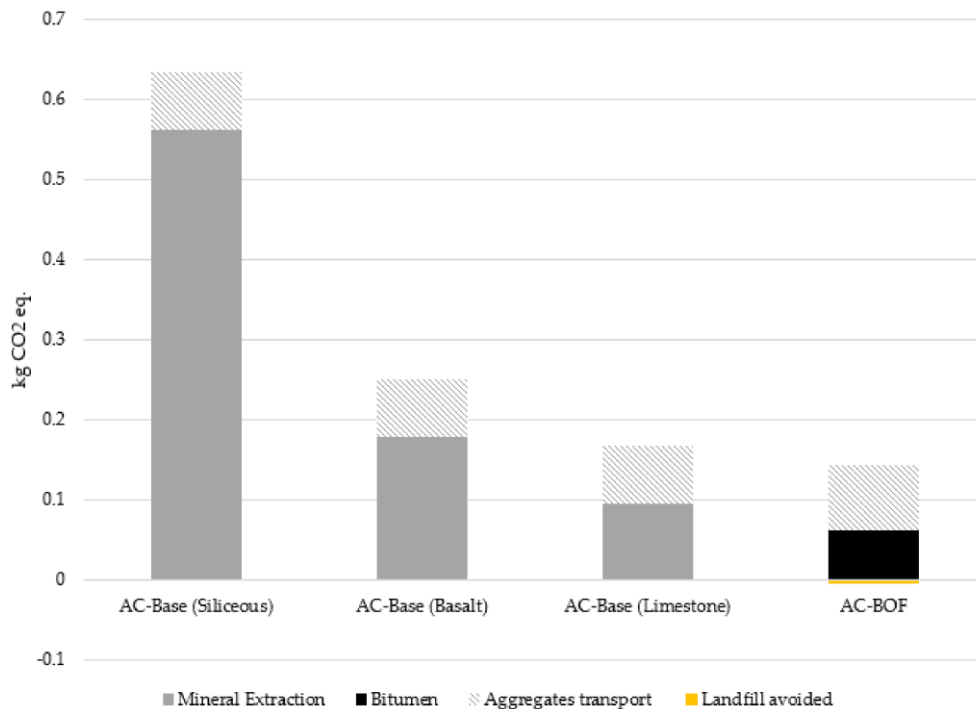
Mnoge laboratorijske analize su pokazale da primena čelične zgure u asfaltnim mešavinama može poboljšati otpornost na klizanje, mehanička svojstva i otpornost na stvaranje kolotruga. Neke studije pokazuju da mešanje krečnjaka i čelične zgure, kao krupnog agregata, asfaltnoj mešavini obezbeđuje visoku otpornost na plastičnu deformaciju, otpornost na zamor i trajnost.

Marina Díaz-Piloneta sa grupom autora (1) istraživala je upotrebu neobrađene čelične zgure iz visokih peći kao alternative prirodnim agregatima u površinskim slojevima asfaltnih kolovoza. Izvršena je analiza uslova koje agregati treba da ispune kada se koriste za spravljanje asfaltnih mešavina, ispitivanje dve asfaltne mešavine i analiza životnog ciklusa kolovoza spravljenih od tih mešavina. Jedna mešavina za izradnju puta je sadržala krečnjak kao krupni agregat (AC-Base), a u drugoj je izvršena zamena 15% ove frakcije prirodnog agregata sa čeličnom zgurom iz visokih peći (AC-BOF).

Predmetne mešavine sadržale su bitumen 50/70 kao vezivni materijal. Minimalni sadržaj veziva za površinske slojeve asfaltnih kolovoza, prema španskim standardima, iznosi 4,5%. Optimalni sadržaj bitumena koji je usvojen za analizirane mešavine u ovoj studiji je 4,96% za AC-Base i 5,27% za AC-BOF. Može se zaključiti da upotreba čelične zgure zahteva malo veću količinu bitumena zbog veće poroznosti materijala.

Analiza životnog ciklusa je sprovedena za kolovozne konstrukcije za mala i srednja vozila za jediničnu površinu od 1 m². Razmatrani radni vek bio je 20 godina, a metodologija ispitivanja je zasnovana na standardu ISO 14040. Podaci prikupljeni za životni ciklus analizirani su u softveru SimaPro v8. Istraživanja su obuhvatala analizu „od klevke do kapije“, koja je uzela u obzir fazu proizvodnje sirovina, transport i ugradnju mešavina.

Na osnovu unetih podataka i pretpostavki, dobijeni su rezultati potencijala globalnog zagrevanja, koji su prikazani na slici 2.



Slika 2. *Uporedni potencijal globalnog zagrevanja za različite scenarije (1)*

U poređenju sa razmatranim prirodnim agregatima, primena čelične zgure omogućava smanjenje emisije CO₂eq. Uvođenje čelične zgure u asfaltnu mešavinu kao krupnog agregata umesto krečnjaka, doprinosi smanjenju emisije ugljenika za više od 14%, dok u slučaju upotrebe čelične zgure umesto silicijumskog agregata dovodi do smanjenja emisije ugljenika za približno 78%. Ovaj rezultat je implicirao zaključak da primena mešavine na bazi čelične zgure dovodi do uštede od 0.5 kg CO₂eq po m² površine kolovoza. (1)

Faza sa najvećim negativnim uticajem na životnu sredinu je ekstrakcija mineralnog materijala, a u slučaju čelične zgure, to je transportna udaljenost, što zbog lokacija deponija koje su uslovljene metalurškim procesom, što zbog velike gustine zgure (oko 3 t/m³), tako da je transport odlučujući faktor u ponovnoj upotrebi čelične zgure.

Panos Georgiou (6) je kroz svoj istraživački rad analizirao uticaje alternativnih materijala na životnu sredinu u habajućim slojevima kolovoznih konstrukcija. Ispitivao je upotrebu čelične zgure iz elektrolučnih peći i recikliranog asfalta sa različitim procentualnim sadržajima u asfaltnim mešavinama po toplom postupku. Uticaji na životnu sredinu ovih mešavina sagledani su od „kolevke do kapije“ i obuhvatili su ekstrakciju i proizvodnju sirovina, transport, rad postrojenja za spravljanje mešavina i ugradnju.

Referentna mešavina je spravljena od prirodnog agregata (granit i krečnjački pesak) nominalne maksimalne veličine zrna 12,5 mm. Sa referentnom mešavinom su upoređivane asfaltna mešavina po toplom postupku WMA_25RA, WMA_40RA i WMA_50RA, koje respektivno sadrže 25%, 40% i 50% recikliranog asfalta i čeličnu zguru iz elektrolučnih peći, kao zamenu prirodnog krupnog agregata.

Uticaj na životnu sredinu pomenutih asfaltnih mešavina razmatran je korišćenjem programa PaLATE, alata za analizu životnog ciklusa koji je prilagođen za procenu uticaja kolovoznih konstrukcija. Rezultati PaLATE su se odnosili na inventar životnog ciklusa (energija, potrošnja vode, emisije i generisani opasan otpad) i na procenu uticaja na životni ciklus. Analizirano je više scenarija sa pomenutim mešavinama, kako bi se na što bolji način sagledale pogodnosti upotrebe alternativnih materijala u pogledu očuvanja životne sredine.

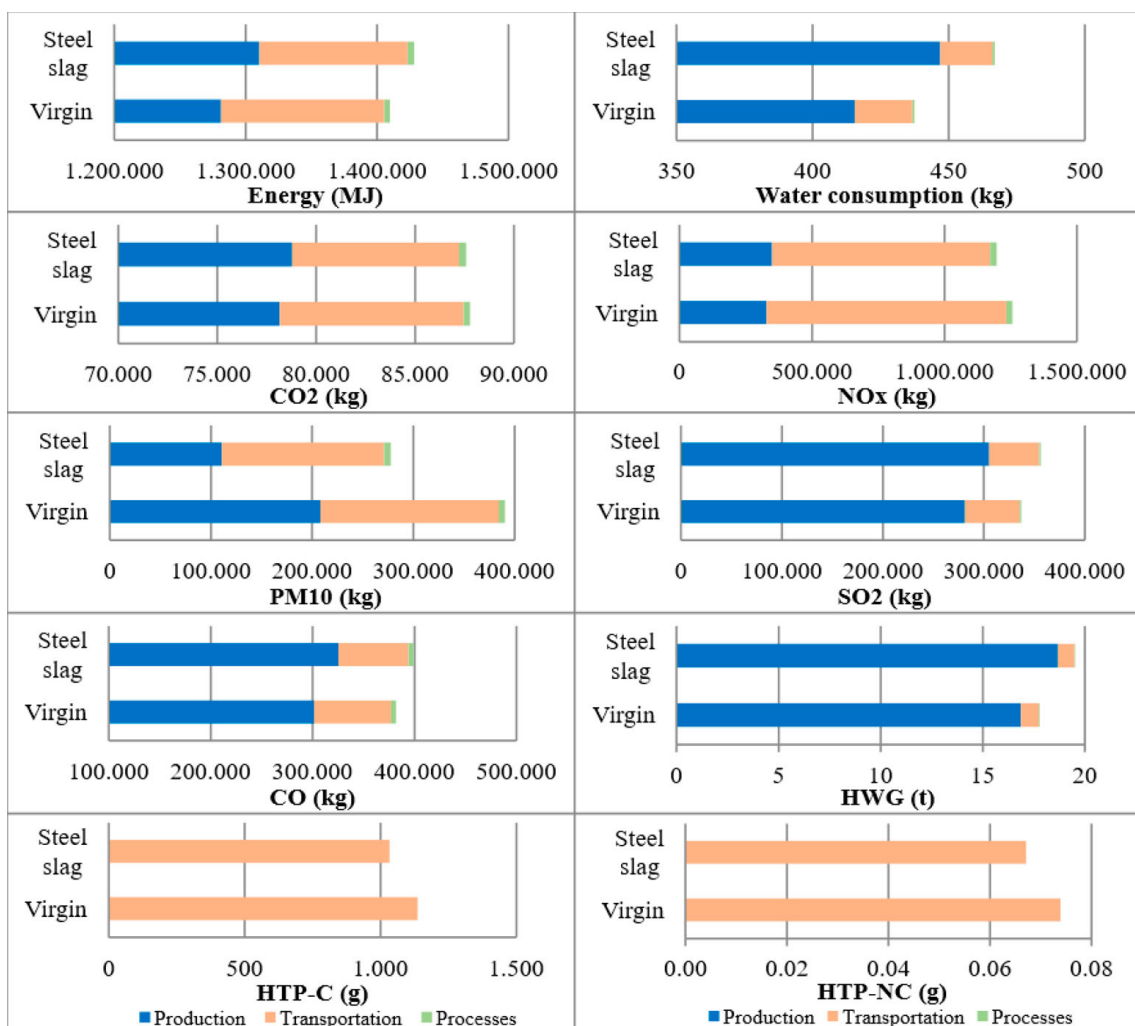
U prvom scenariju se sagledavao energetski potencijal proizvodnih postrojenja, tj. mogućnost zamene dizel goriva prirodnim gasom prilikom rada postrojenja i proizvodnje asfaltnih mešavina po toplom postupku (WMA). U tabeli 2 prikazani su rezultati prvog scenarija.

Tabela 2. *Rezultati prvog scenarija*

Kategorije uticaja	Dizel (fired)	Prirodni gas (fired)	% smanjenja u kategorijama uticaja pri prelasku sa dizela na prirodni gas
Energy (MJ)	1,428,069	1,409,771	-1.4%
CO ₂ (kg)	89,135	87,780	-1.7%
NO _x (kg)	1,295,351	1,256,574	-10.6%
SO ₂ (kg)	371,129	337,087	-10.8%
CO (kg)	556,334	381,770	-36.7%

Izvor: (6)

U drugom scenariju su se razmatrali uticaji na životnu sredinu nastali usled zamene prvobitnih agregata čeličnom zgurom u asfaltnim mešavinama. Rezultati scenarija dva prikazani su na slici 3 i odnose se na analizu potrošnje energije, potrošnju vode, emisije CO₂, NO_x, PM10, potencijal toksičnosti za ljude HTP (kancerogeni i nekancerogeni), SO₂, CO i stvarnog opasnog otpada HWG. Prilikom obrade podataka, razmatrana su proizvodna postrojenja koja rade na prirodan gas.



Slika 3. Rezultat scenarija 2 (6)

Treći scenario se odnosio na uporednu analizu referentne asfaltna mešavine po vrućem postupku (HMA) i tri mešavine sa sadržajem čelične zguře kao zamene prirodnog krupnoznoznog agregata i 25%, 40% i 50% recikliranog asfalta spravljene na temperaturi predviđenoj za vruće asfaltna mešavine. Kombinovana upotreba čelične zguře i recikliranog asfalta u asfaltnim mešavinama pokazala je značajne rezultate u ekološkom pogledu. Primećeno je smanjenje od 16%, 28% i 35% u potrošnji energije za mešavine sa 25%, 40% i 50% recikliranog asfalta, respektivno. Takođe, uočeno je smanjenje emisije gasova staklene bašte, potrošnje vode i stvaranja otpada, kao i potencijala toksičnosti za ljude. Ove prednosti, koje se generalno povećavaju sa većim

sadržajem recikliranog asfalta, proizilaze iz manjih zahteva za eksploataciju sirovina, proizvodnje bitumena i snabdevanje resursima.

Četvrti scenario je sličan trećem. Razlika je u smanjenoj temperaturi izrade mešavina sa alternativnim materijalima, a temperatura je bila prilagođena asfaltnim mešavinama po toplom postupku. Snižavanjem temperature proizvodnje mešavina sa čeličnom zgurom i recikliranim asfaltom za 30°C, negativni uticaji na životnu sredinu su dodatno smanjeni za 3%, što ukazuje na to da pozitivni efekti upotrebe čelične zgure i recikliranog asfalta u asfaltnim mešavinama, kao alternativnog materijala, daleko premašuju benefite postignute smanjivanjem temperature proizvodnje mešavina.

Sveobuhvatni zaključak autora je bio da je mešavina po toplom postupku sa sadržajem čelične zgure i 50% recikliranog asfalta najprihvatljivija u poređenju sa referentnom mešavinom i daje najviše pozitivnih efekata.

Bonoli je sa grupom autora (7), takođe istraživala asfaltne mešavine sa sadržajem recikliranog asfalta i čelične zgure. Ispitane su dve eksperimentalne asfaltne mešavine sa različitim sastavom:

1. 35% RAP i 16% čelične zgure (MixW1) - za habajući sloj,
2. 45% RAP i 15% čelične zgure (MixB1) - za vezni sloj.

Pomenute eksperimentalne mešavine su upoređivane sa kontrolnim mešavinama za habajući (MixW0) i vezni sloj (MixB0).

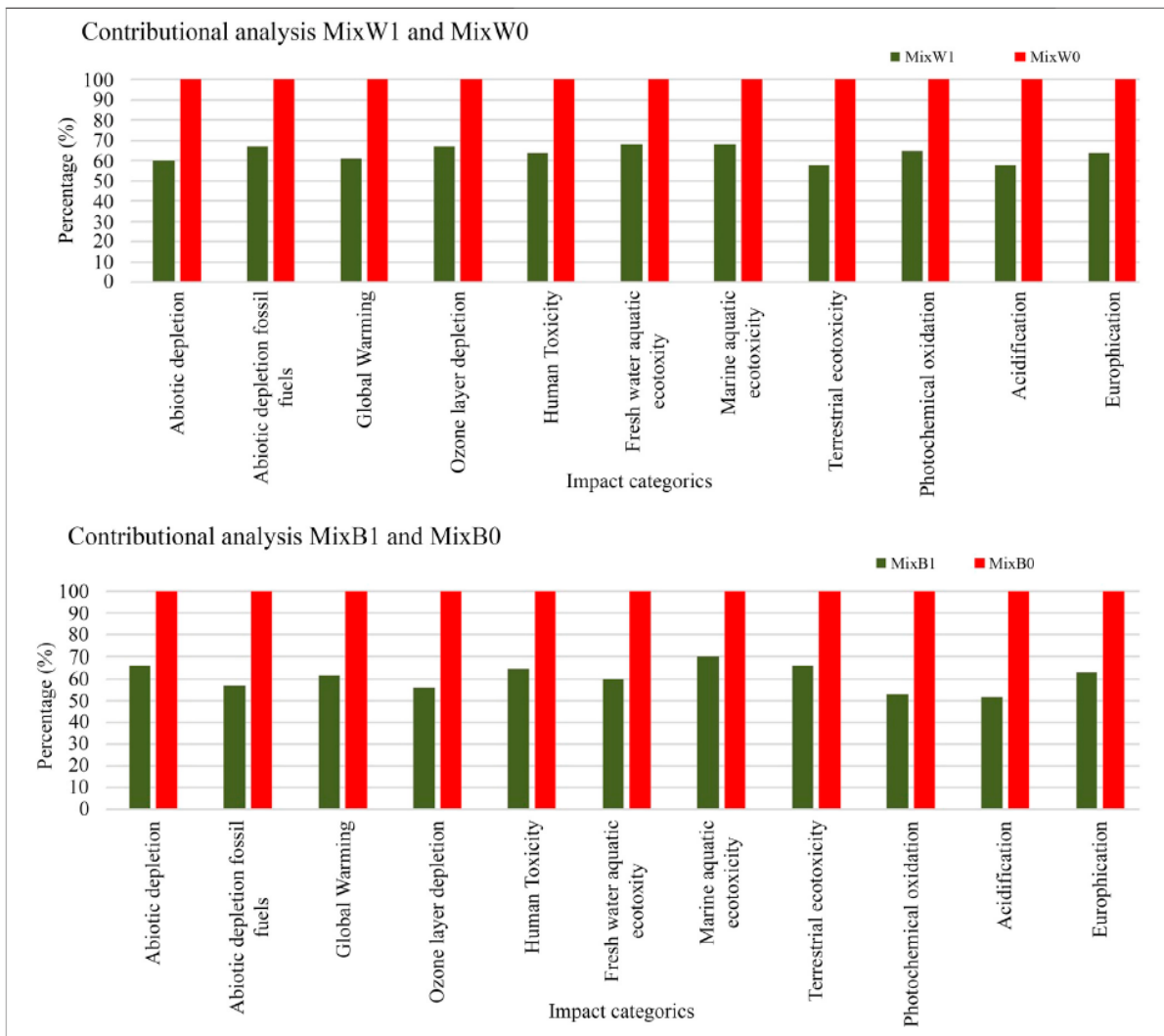
Asfaltne mešavine za habajući sloj (MixW0 i MixW1) su sadržale 6% bitumena, a mešavine za vezni sloj (MixB0 i MixB1) su bile spravljene sa 5% bitumena. U asfaltnim mešavinama koje sadrže RAP i čeličnu zguru, pomenuti procenti su uključivali i sadržaj ostarelog bitumena u RAP-u. Sadržaj ostarelog bitumena u mešavinama za habajući sloj (MixW1) bio je 3,85%, a u mešavinama za vezni sloj 3,30%. Uključivanje recikliranog materijala u spravljanje mešavina zahtevalo je upotrebu aditiva za recikliranje, kojim se poboljšavaju svojstva prijanjanja, termička osetljivost, viskozitet i obradivost mešavina.

Analiza životnog ciklusa je vršena na deonici sporednog prigradskog puta dužine 1km i širine 10,5m, a debljine habajućeg sloja 4 cm i veznog sloja 6 cm. Obim ispitivanja je bio "od klevke do kapije", što obuhvata kompletan proces proizvodnje i ugradnje asfaltnih mešavina. Analizom nije bilo obuhvaćeno konačno odlaganje i reciklaža asfalta na kraju životnog ciklusa kolovozne konstrukcije. Analiza životnog ciklusa rađena je u softveru SimaPro. Ovim analitičkim alatom procenjeni su sledeći uticaji: abiotsko iscrpljivanje, acidifikacija, eutrofikacija, potencijal globalnog zagrevanja, oštećenje ozonskog omotača i fotohemijska oksidacija.

Tabela 3. Uticaj na životnu sredinu mešavina MixW0, MixW1, MixB0, MixB1 (7)

Kategorija uticaja	Jedinica mere	Ukupno			
		MixW0	MixW1	MixB0	MixB1
Global warming potential	kg CO ₂ eq.	7.51E + 04	4.60E + 04	9.37E + 04	5.80E + 04
Human toxicity	kg 1.4 – DB eq.	2.86E + 04	1.82E + 04	4.02E + 04	2.62E + 04
Acidification	kg SO ₂ eq.	5.30E + 02	3.09E + 02	6.36E + 02	3.35E + 02
Eutrophication	kg PO ₄ eq.	1.30E + 02	8.31E + 01	1.73E + 02	1.09E + 02
Ecotoxicity	kg 1.4 – DB eq.	2.30E + 03	1.53E + 03	2.33E + 03	1.55E + 03
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	2.61E + 01	1.53E + 01	3.25E + 01	1.72E + 01
Ozone layer depletion	kg CFC - 11 eq.	4.74E - 02	3.18E - 02	5.97E - 02	3.39E - 02
Abiotic depletion	kg Sb eq.	2.44E - 01	1.45E - 01	2.23E - 01	1.49E - 01
Abiotic depletion fossil fuels	MJ	3.74E + 06	2.52E + 06	4.73E + 06	2.73E + 06

Izvor: (7)



Slika 4. Analiza doprinosa recikliranog asfalta RAP i čelične zgure u asfaltnim mešavinama (7)

Rezultati studije su pokazali da upotreba recikliranog asfalta i čelične zgure u asfaltnim mešavinama za izgradnju 1 km prigradskog puta, smanjuje sadržaj čistog bitumena za 2,15% za habajući sloj i 1,7% za vezni sloj. Upotreba ovih alternativnih materijala omogućila je uštedu 438 tona prirodnog agregata i 18,2 tona čistog bitumena za habajući sloj, kao i 826,2 tona prirodnog agregata i 22,1 tonu prirodnog bitumena za vezni sloj. Pored uštede prirodnih resursa, upotreba recikliranog asfalta i čelične zgure povoljno utiče na sve kategorije uticaja na životnu sredinu (slika 4 i tabela 3), što ostavlja prostor za detaljnija istraživanja i rešavanja problema zaštite životne sredine. (7)

Jinzhou Liu (8) se u svojoj studiji, pored otpornosti na vlagu asfaltnih mešavina sa sadržajem čelične zgure, bavio i analizom životnog ciklusa pomenutih mešavina. Analizirao je deonicu magistralnog puta u Nanjingu, Kina, dužine 1 km, širine 20 m sa debljinom asfaltnog zastora od 4 cm. Istraživanja su obuhvatala proizvodnju sirovina, odnosno eksploataciju i drobljenje agregata, kao i nabavku čelične zgure sa deponije železare. Kako je čelična zgura korišćena kao čvrsti otpad, proces topljenja, koji je deo proizvodnog procesa čelične zgure, nije bio uključen u analizu životnog ciklusa. Takođe, predmet istraživanja su bili transport i spravljanje asfaltnih mešavina, dok faza ugradnje asfaltnih mešavina, faze eksploatacije i održavanja, kao i kraj životnog veka kolovozne konstrukcije nisu razmatrani u ovoj studiji zbog nedostataka pouzdanih podataka.

Za potrebe ispitivanja napravljeno je šest mešavina, od kojih su tri dvofrakcijske asfaltnih mešavina (SMA-13) sa maksimalnom nominalnom veličinom zrna 13,2 mm i sadržajem čelične zgure 0%, 50% i 100%, kao zamene prirodnog drobljenog agregata veličine zrna veće od 2,36 mm. Preostale tri mešavine su asfaltni betoni (AC-13) sa istim sadržajem čelične zgure, kao i u prethodno pomenutim mešavinama.

Eksperimentalne mešavine su sadržale čeličnu zguru iz visokih peći koja je prethodno bila deponovana bar šest meseci na odlagalištu uz povremeno vlaženje. Uslov koji je ovaj materijal morao da ispuni, kako bi bio korišćen za spravljanje asfaltnih mešavina je bio da sadržaj CaO bude manji od 3%.

Na osnovu svih neophodnih podataka o materijalima, potrošenoj energiji i transportnim udaljenostima, analiza životnog ciklusa je izvršena u softveru SimaPro. Ovim alatom je izvršena kvantifikacija uticaja emisije gasova staklene bašte, uticaja radijacije, ozonskog omotača, klimatskih promena, ekotoksičnosti, kancerogenih uticaja i acidifikacije/eutrofikacije.

Rezultati su pokazali da je proizvodnja asfalta stvorila najveći deo ukupnih uticaja, okvirno između 46% i 85% i oni se odnose na uticaj stvaranja ozona na zdravlje ljudi, uticaj stvaranja ozona na kopnene ekosisteme, stratosferska oštećenja ozona, formiranje finih čestica, zakiseljavanje zemlje i kancerogenu toksičnost na ljude. (8) Transport čelične šljake je imao najveći negativni uticaj na ekotoksičnost kopna i iznosio je 46%-68% od ukupnih uticaja. (8)

Tabela 4. Rezultati analize životnog ciklusa asfaltnih mešavina za nekoliko scenarija (8)

Kategorija uticaja	Jedinica mere	Tip kolovozne konstrukcije					
		A	B	C	D	E	F
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.08	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	2611.30	2972.44	3399.00	25,726.39	28,333.40	30,954.15
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	280.11	303.74	332.74	315.28	350.83	386.81
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	147.58	157.51	170.84	171.25	187.08	203.68
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	291.69	316.49	346.94	328.69	365.95	403.71
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	384.18	422.95	470.90	450.68	508.07	567.44
Freshwater eutrophication	kg P eq	3.51	4.18	4.91	6.22	7.34	8.44
Marine eutrophication	kg N eq	0.35	0.41	0.48	1.02	1.16	1.30
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4 - DCB	264,256.48	420,215.00	576,170.87	357,059.26	562,808.57	761,442.93
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4 - DCB	566.02	734.78	910.44	2253.69	2625.80	2992.52
Marine ecotoxicity	kg 1,4 - DCB	1017.08	1340.04	1675.58	3381.07	4011.97	4632.85
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4 - DCB	2904.11	3402.64	3954.05	4179.76	4945.58	5707.37
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4 - DCB	17,438.44	23,681.09	30,107.31	80,567.78	94,359.42	107,935.06

Izvor: (8)

U tabeli 4 prikazani su rezultati analize životnog ciklusa asfaltnih mešavina AC13-0%, AC13-50%, AC13-100%, SMA 13-0%, SMA 13-50%, SMA 13-100%, koje su označene A, B, C, D, E, F respektivno.

5. ZAKLJUČAK

U naučnim studijama se navodi da su ekstrakcija sirovina, transport i spravljanje asfaltnih mešavina faze u kojima je zabeležena najveća potrošnja energije i emisije štetnih gasova. To je razlog zašto mnogi istraživači pokušavaju da uključe alternativne materijale u proizvodnju asfaltnih mešavina, kako bi smanjili potrošnju prirodnih resursa i negativne uticaje na životnu sredinu.

Industrijski nusproizvodi, kao što su bakarna i čelična zgura, stvaraju veliki ekološki problem u našoj zemlji zbog deponovanja i zato bi njihova primena kao alternativnih materijala u izgradnji putne infrastrukture bila od velikog značaja. Naučni radovi pokazuju da je njihova upotreba moguća u proizvodnji asfaltnih mešavina, gde ovi materijali kao delimična zamena prirodnih agregata, omogućavaju dobre fizičko-mehaničke karakteristike mešavina i doprinose uštedi prirodnih materijala. Najpovoljniji rezultati sa aspekta smanjenja emisije gasova staklene bašte, dobijeni su kada se prilikom izgradnje kolovozne konstrukcije koristila asfaltna mešavina sa bakarnom ili čeličnom zgurum, kao delimičnom zamenom prirodnog agregata, u kombinaciji sa recikliranim

asfaltom. Korišćenje zgure u asfaltnim mešavinama u određenom procentu umesto prirodnih agregata zahteva veću količinu bitumena zbog veće poroznosti zgure, što predstavlja negativan uticaj ovog materijala. Međutim, ovaj problem se može rešiti dodavanjem recikliranog asfalta, koji u sebi sadrži i određenu količinu bitumena, koji može nadomestiti dodatni bitumen koji zahteva zgura.

Upotreba ovih alternativnih materijala, pored rešavanja problema njihovog deponovanja i uštede prirodnih resursa, doprinela je i smanjenju potrošnje energije jer se preskače faza ekstrakcije sirovina, koja izaziva najveću količinu emisije štetnih gasova u toku životnog ciklusa kolovozne konstrukcije.

Ova zapažanja u naučnim studijama su ohrabrujuća i otvaraju mogućnost ispitivanja upotrebe nusproizvoda iz naše zemlje kao potencijalnog materijala za proizvodnju asfaltnih mešavina.

Zahvale

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, evidencioni broj ugovora je 451-03-47/2023-01/ 200052.

Literatura

- [1] Díaz-Piloneta, M.; Terrados-Cristos, M.; Álvarez-Cabal, J.V.; Vergara-González, E. 2003. *Comprehensive Analysis of Steel Slag as Aggregate for Road Construction: Experimental Testing and Environmental Impact Assessment*. Materials 14, 3587.
- [2] ISO 14040, *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, Second edition 2006-07-01.
- [3] Movilla-Quesada, D.; Lagos-Varas, M.; Raposeiras, A.C.; Muñoz-Cáceres, O.; Andrés-Valeri, V.C.; Aguilar-Vidal, C. 2021. *Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials*. Sustainability 13, 8081.
- [4] Pedro S. Humbert, Joao Castro-Gomes, 2019. *CO2 activated steel slag-based materials: A review*, Journal of Cleaner Production 208: 448-457.
- [5] Amir Džananović, Nazim Manić, 2018. *Mogućnost upotrebe zgure visoke peći kao agregata u betonu*, GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE 61, 3: 67-78.
- [6] Panos Georgiou, Andreas Loizos. 2021. *Environmental assessment of warm mix asphalt incorporating steel slag and high reclaimed asphalt for wearing courses: a case study*, Road Materials and Pavement Design, 22:sup1, S662-S671;
- [7] Bonoli A, Degli Esposti A and Magrini C, 2020. *A Case Study of Industrial Symbiosis to Reduce GHG Emissions: Performance Analysis and LCA of Asphalt Concretes Made with RAP Aggregates and Steel Slags*, Frontiers in Materials, 7:572955.
- [8] Jinzhou Liu, Weicheng Wang, Yuchen Wang, Xingye Zhou, Shuyi Wang, Qi Liu, Bin Yu, 2023. *Towards the sustainable utilization of steel slag in asphalt pavements: A case study of moisture resistance and life cycle assessment*, Case Studies in Construction Materials 18, e01722.