

Primljen / Received: 5.3.2025.

Ispravljen / Corrected: 4.7.2025.

Prihvaćen / Accepted: 12.8.2025.

Dostupno online / Available online: 10.11.2025.

# Sveobuhvatan pregled primjene recikliranih materijala u ekološki prihvatljivoj gradnji kolnika

Autor:

**Yuanxin Li**, dipl.ing.građ.

Gansu HATG Road Industry Co. Ltd, Kina

[liyuanxianhatg@gmail.com](mailto:liyuanxianhatg@gmail.com)

Autor za korespondenciju

Pregledni rad

**Yuanxin Li**

## Sveobuhvatan pregled primjene recikliranih materijala u ekološki prihvatljivoj gradnji kolnika

Integracija recikliranih materijala pri izgradnji kolničkih konstrukcija ključni je segment strategije promicanja održive cestogradnje. Reciklirani betonski agregat, reciklirani asfaltirani kolnik i gumeni granulat mogu znatno doprinijeti smanjenju negativnog utjecaja cestogradnje na okoliš tako da se potrošnja neobnovljivih prirodnih resursa i nastajanje građevnog otpada svedu na najmanju moguću mjeru. Tehnička vrednovanja pokazala su da ti materijali mogu osigurati svojstva usporediva s tradicionalnima ili ih čak nadmašiti. Iako i dalje postoje problemi povezani s heterogenosti u svojstvima i nedostatkom standardizacije, ekonomske analize upućuju na mogućnost znatne uštede. Ovo istraživanje ističe potrebu za kontinuiranim tehnološkim inovacijama i uvođenjem regulatornih mjera kako bi se omogućila šira primjena recikliranih materijala, ostvarili ciljevi kružnoga gospodarstva u izgradnji kolnika te doprinijelo dugoročnoj održivosti cestogradnje.

**Ključne riječi:**

kolnička konstrukcija, održivi kolnici, reciklirani materijali, kružno gospodarstvo

Subject review

**Yuanxin Li**

## A comprehensive review of recycled materials in eco-friendly pavement construction

The integration of recycled materials into pavement construction is a vital strategy for promoting sustainable urban infrastructure. Recycled concrete aggregate, reclaimed asphalt pavement, and crumb rubber have demonstrated significant potential to reduce environmental impacts by minimising resource consumption and construction waste generation. Technical evaluations revealed that these materials can deliver performance comparable to or exceeding that of conventional pavements. Although issues related to quality variability and lack of standardisation persist, economic analyses have identified significant cost savings. This review underscores the need for continued technological innovation and regulatory interventions to facilitate broader adoption, support circular economy objectives in pavement construction, and contribute to long-term sustainability targets.

**Key words:**

pavement construction, sustainable pavements, recycled materials, circular economy

## 1. Uvod

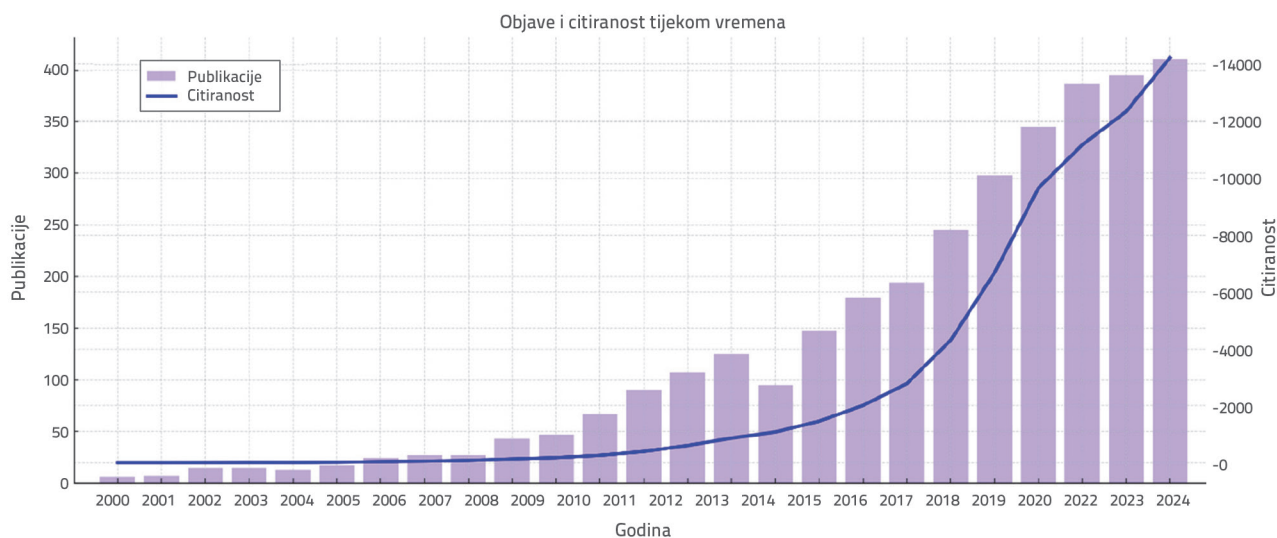
Građevinska industrija, osobito područje projektiranja i izgradnje kolnika, suočava se s ključnim izazovom uravnoteživanja zahtjeva za dugotrajnom i učinkovitom infrastrukturom uz neophodno očuvanje ekološke održivosti [1, 2]. Tradicionalni materijali koji se koriste pri izgradnji betonskih i asfaltnih kolnika potvrđeni su kao učinkoviti i ekonomski prihvatljivi, no imaju znatne negativne utjecaje na okoliš, uključujući visoke emisije stakleničkih plinova te trošenje ograničenih prirodnih resursa [3, 4]. Istodobno zaoštavanje globalne krize gomilanja otpada, koju karakterizira sve veća količina biološki nerazgradivih tokova otpada poput plastike, gume i građevnog otpada, znatan je ekološki problem [5].

Suočavanje s tim gorućim izazovima potaknulo je novi pomak paradigme prema razvoju održivih alternativnih materijala za izgradnju kolničkih konstrukcija. Jedna od važnijih alternativa jest primjena recikliranih materijala, koja se pokazala obećavajućim rješenjem jer istodobno smanjuje negativne okolišne utjecaje izgradnje kolnika i pridonosi učinkovitijemu gospodarenju otpadom [6]. Prelazak na primjenu recikliranih materijala u izgradnji kolnika odražava širi trend usmjeren prema implementaciji načela kružnoga gospodarstva u građevinskome sektoru [7–11]. Ponovnom upotrebom otpadnih materijala u funkciji sastavnih dijelova novih kolničkih konstrukcija omogućuje se kruženje materijala u zatvorenoj petlji, čime se potiče održiviji model razvoja cestogradnje.

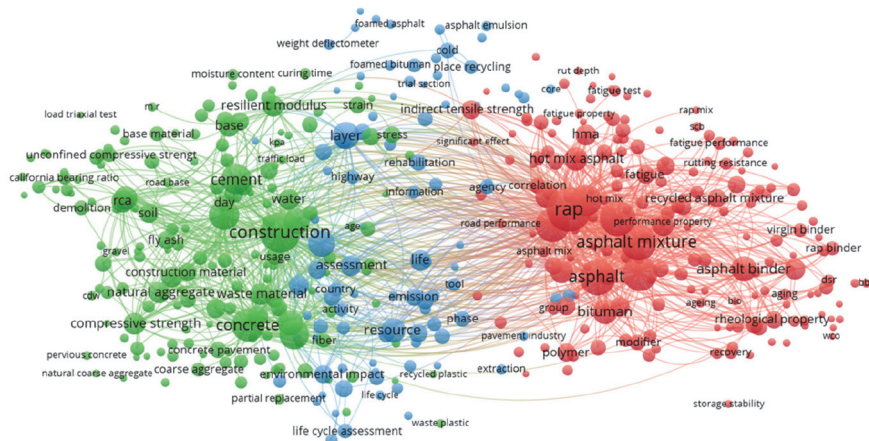
Cilj ovog rada jest detaljno prikazati integraciju recikliranih materijala u izgradnju kolnika. U radu procjenjuju se njihove potencijalne koristi za okoliš, tehnička svojstva, povezani izazovi te mogućnosti primjene, čime se stvara sveobuhvatan pregled njihove uloge u promicanju ekološki osviještenog i održivog pristupa u praksi projektiranja i izgradnje kolnika.

## 2. Bibliometrijska analiza primjene recikliranih materijala u izgradnji kolnika

Sve veća posvećenost održivosti potaknula je znatan interes za primjenu recikliranih materijala u kolničkim konstrukcijama u posljednjih dvadeset i pet godina. Taj je trend vidljiv u podacima o broju publikacija i navoda prikazanim na slici 1. Broj publikacija stalno se povećavao s otprilike 10 u 2000. na više od 400 u 2024., što upućuje na rastući istraživački interes i fokus na tu temu usmjerenu na održivost. Posebno je važan eksponencijalni porast broja navoda s nekoliko stotina početkom dvijetisućitih na više od 14.000 do 2024. Taj trend upućuje na to da su istraživanja u tome području postigla znatan utjecaj i priznanje unutar znanstvene zajednice. Snažno ubrzanje povećanja broja navoda, počevši od 2015., dodatno ističe sve veću važnost tog područja, što se poklapa sa širim pomakom prema primjeni recikliranih materijala u cestogradnji kao odgovorom na ekološke probleme i ograničene prirodne resurse. Općenito, ti trendovi odražavaju znatan napredak i brzo širenje baze znanja usmjerene na primjenu recikliranih materijala poput gumenoga granulata, recikliranoga betonskog agregata i recikliranoga asfaltnog kolnika u izgradnji i održavanju kolničkih konstrukcija. Mapa mreže istodobnih pojavljivanja generirana analizom baze podataka *Web of Science* (WoS), prikazana na slici 2., omogućuje sveobuhvatnu vizualizaciju ključnih tema, odnosa i međusobnih veza unutar istraživačke domene primjene recikliranih materijala na kolnicima. Središnji i dominantni klaster odnosi se na pojam "bitumenska mješavina", koji je usko povezan s raznim podtemama kao što su vruća bitumenska mješavina, reciklirana bitumenska mješavina, vrsta veziva, aditiv za miješanje i kompleksni modul. Zato je primarni fokus ovoga istraživačkog područja na sastavu, svojstvima i proizvodnji bitumenskih mješavina, osobito onih s udjelom recikliranih materijala. Nekoliko drugih istaknutih klastera koji okružuju klaster usmjeren na bitumenske mješavine



Slika 1. Godišnja predviđanja i trendovi citiranja iz baze podataka *Web of Science* (WoS) za ključne riječi "recikliranje", "materijali" i "kolnici" (2000. - 2024.)



Slika 2. Mapa istodobnih pojavljivanja ključnih riječi na temelju ukupne snage poveznica (kriteriji pretraživanja: tema = "reciklirani", "materijali" i "kolnik"; sve ključne riječi; minimalni broj pojavljivanja ključne riječi = 30; 446 ključnih riječi doseglo je prag)

istaknuli su raznolike aspekte ovoga istraživačkog područja. Jedan od takvih klaster čine skupina "beton", koja obuhvaća pojmove poput "tlačna čvrstoća", "savojna čvrstoća", "reciklirani betonski agregat", "stabilizacija posteljice" i "otpadni beton". To upućuje na istodobni fokus na upotrebu recikliranog betona i drugih betonskih materijala u izgradnji kolnika. Ostali klasteri bave se širim pitanjima zaštite okoliša i održivosti. Pojmovi poput "utjecaj na okoliš", "otpadna plastika", "leteći pepeo" i "procjena životnog ciklusa" odražavaju sve veći interes za uključivanje recikliranih i ekološki prihvatljivih materijala u gradnju kolnika, potaknut potrebom za održivom cestogradnjom. Ostali znatni klasteri odnose se na svojstva i performanse materijala poput reoloških karakteristika, udjela vlage, vrijeme njege i trajne deformacije te na metode ispitivanja i procjene, uključujući probne dionice, praćenje i utjecajne čimbenike. Svi ti klasteri zajedno ističu složenost istraživanja, uključujući svojstva materijala i pristupe njihovoj procjeni.

### 3. Vrste recikliranih materijala u izgradnji kolnika

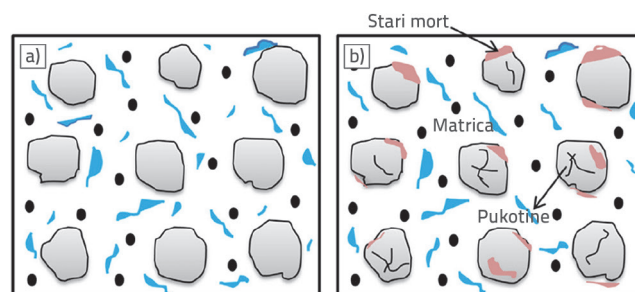
Mapa mreže istodobnih pojavljivanja pruža detaljan uvid u ključne teme, njihove međusobne poveznice i glavna područja fokusa unutar istraživanja primjene recikliranih materijala u izgradnji kolnika, ističući interdisciplinarnu i održivošću vođenu prirodu tog područja. Kako bi se osigurao sveobuhvatan i metodološki utemeljen pregled, analizirana literatura odabrana je prema sljedećim kriterijima: a) godina objave od 2005. do danas radi prikaza suvremenih istraživačkih dostignuća; b) učestalost citiranja veća od 10, što upućuje na znanstveni utjecaj; c) izravna relevantnost za primjenu recikliranih materijala u izgradnji kolnika, i d) metodološka strogost, uključujući eksperimentalnu validaciju i objavljivanje u recenziranim časopisima. U ovome poglavlju razmotrene su različite vrste recikliranih materijala koji su uspješno integrirani u izgradnju kolnika. Svaki materijal potječe iz različitih tokova otpada i posjeduje jedinstvene karakteristike, no svi zajedno doprinose općemu cilju promicanja razvoja održive i ekološki odgovorne cestogradnje.

### 3.1. Reciklirani betonski agregat (RCA)

Reciklirani betonski agregat (engl. *Recycled Concrete Aggregate* - RCA) jest zrnati materijal proizveden preradom očvrstnutog betona dobivenog iz građevnog otpada i otpada od rušenja. Obično se sastoji od čestica prirodnog agregata obavijenih ostacima cementne paste ili morta iz izvorne betonske mješavine. RCA je stekao popularnost kao održiva zamjena za prirodne agregate (engl. *natural aggregate* - NA) u izgradnji kolnika zbog svojih ekoloških i ekonomskih prednosti, uključujući očuvanje prirodnih resursa, smanjenje količina građevnog otpada i niži utrošak

energije povezan s proizvodnjom agregata [12-15]. Odlikuje ga udio morta iz izvornog betona, što mu daje specifična fizička mehanička svojstva u usporedbi s konvencionalnim prirodnim agregatima (engl. *natural conventional aggregate* - NCA). RCA se odlikuje većom razinom poroznosti, povećanom apsorpcijom vode te smanjenom gustoćom i čvrstoćom, što je uglavnom posljedica porozne i mikroispucale prirode preostalog morta [16, 17]. Ta važna svojstva mogu negativno utjecati na trajnost i mehanička svojstva betona i stabiliziranih slojeva u koje je ugrađen RCA.

Unatoč tim ograničenjima RCA se uspješno upotrebljava na kolnicima, osobito u nevezanim nosivim slojevima i slojevima za zaštitu od smrzavanja te u cementom stabiliziranim nosivim slojevima i mršavome betonu. U betonskim kolničkim pločama njihova primjena često se svodi na djelomičnu zamjenu prirodnih agregata, primarno zbog pitanja vezanih uz varijabilnost svojstava (slika 3.). Kako bi se ti izazovi riješili, znatna istraživanja usmjerena su na poboljšanje kvalitete RCA primjenom metoda prethodne obrade koje ili uklanjaju ili ojačavaju prijanjajući mort [18-20].



**Slika 3. Shematska usporedba fizikalnih svojstava između: a) NCA; b) RCA [19]**

Istražene su dvije primarne strategije: uklanjanje morta i ojačanje morta. Mehaničke tehnike poput brušenja mogu učinkovito odvojiti prijanjajući mort, no mogu uzrokovati mikropukotine i

prekomjerni udio sitnih čestica [21–23]. Kemijske obrade, uključujući uranjanje u vodu i kiselinu, imale su različite razine uspjeha. Iako uranjanje u vodu pomaže u čišćenju RCA-e, može ostaviti sloj oslabljenog, djelomično hidratiziranog morta. S druge strane, kisele otopine mogu učinkovitije ukloniti proizvode hidratacije, čime se poboljšava kvaliteta RCA-e, ali uz veće troškove obrade i ekološke probleme [24, 25].

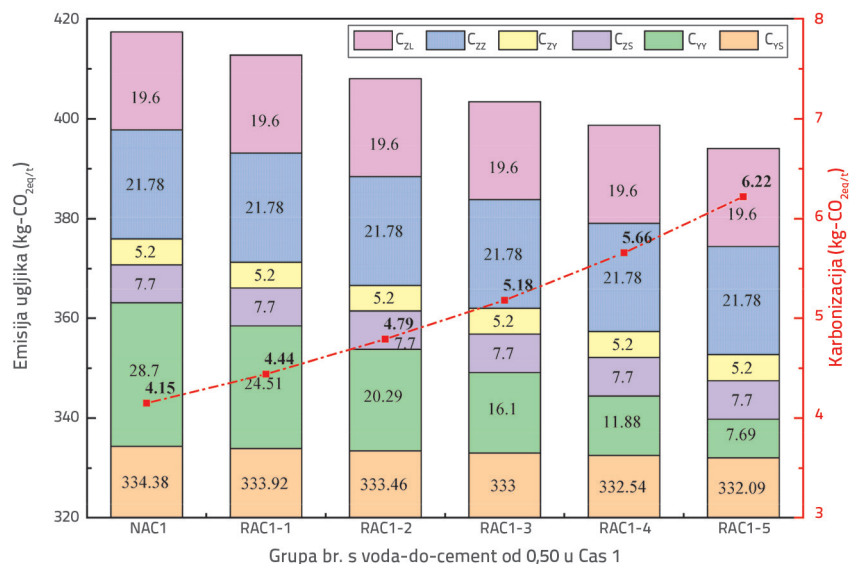
Učvršćivanje prijanjavjućeg morta na RCA provodi se zatvaranjem pora ili nanošenjem zaštitnog premaza radi poboljšanja vodootpornosti. Zbog svoje ljepljive prirode polimeri mogu prekriti RCA, čime se smanjuje njegova sposobnost apsorpcije vode [26]. Upotreba pucolanskih tvari poput silicijske prašine također može poboljšati svojstva RCA-e popunjavanjem praznina

u mortu i poboljšanjem mikrostrukture u prijelaznim zonama gdje agregat dodiruje beton [27].

Shaban i sur. pokazali su da obrada RCA-e pucolanskim suspenzijama, koje imaju udio od 40 % letećeg pepela i cementa u kombinaciji s 3 % nano-silicijeva dioksida, tijekom četiri sata rezultira smanjenjem apsorpcije vode za više od 50 do 55 % te povećanjem gustoće čestica za 10 do 11 %. Osim toga te obrade poboljšale su otpornost na abraziju za od 31 do 35 % i rezultirali ujednačenijom mikrostrukturom s nižim omjerom kalcija i silicija, što je povezano s poboljšanom mehaničkom čvrstoćom i trajnošću agregata. [28]. Nadalje, istraživane su metode poput biološkog taloženja kalcijeva karbonata i primjene otopine natrijeva silikata zbog njihove učinkovitosti u zatvaranju mikropora i poticanju formiranja cementnih spojeva *in situ* reakcijama s preostalim kalcijevim hidroksidom u RCA-i [29].

Istraživači su također pokazali velik interes za trajnost betona na bazi RCA-e, osobito za sposobnost betona da se odupre raznim vrstama oštećenja i da održi cjelovitost svoje strukture tijekom vijeka trajanja u različitim uvjetima okoline. Taj je aspekt ključna odrednica za praktičnu primjenu RCA-e u građevini [30, 31]. Sveobuhvatan pregled Zhanga i sur. istaknuo je trajnost RCA betona, osobito njegovu otpornost na agresivne okolišne utjecaje poput penetracije klorida, karbonizacije, napada sulfata i ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja [32]. Ti rezultati pokazuju da beton s RCA-om može postići trajnost usporedivu s tradicionalnim betonom ako je omjer vode i cementa kontroliran na ispravan način te ako su osigurani odgovarajući uvjeti stvrdnjavanja.

Poon i sur. pokazali su da primjena karboniziranih RCA-ova u betonu s recikliranim agregatom smanjuje apsorpciju vode i poboljšava nepropusnost, postići smanjenje električne vodljivosti, prodiranje kloridnih iona i propusnost plinova za više od 42,4 %. Osim toga karbonizacija RCA-e ima izraženiji



Slika 4. Životni ciklus emisija ugljika pri različitim udjelima zamjene recikliranoga sitnog agregata, uz konstantan omjer vode i cementa [35]

pozitivan učinak na trajnost nego na mehanička svojstva betona s recikliranim agregatom (RAC), što upućuje na to da bi stope apsorpcije vode mogle poslužiti kao pouzdani pokazatelji ukupne trajnosti RAC-a [33].

Osim mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti istraživani su strukturno ponašanje te performanse betona s RAC-om u različitim primjenama. Tabsh i sur. ispitali su utjecaj različitih udjela RAC-e na ponašanje pri smicanju i na čvrstoću armiranobetonskih greda [34]. Uočili su da su grede izrađene od 50 % recikliranoga krupnog agregata imale 27 % manju smičnu čvrstoću u usporedbi s gredama od prirodnog agregata pri nižemu omjeru raspon/visina, dok su pri višim omjerima pokazale usporediva svojstva. Grede izrađene u cijelosti od recikliranog agregata imale su smičnu čvrstoću nižu za oko 5 % u odnosu na grede od prirodnog agregata, bez obzira na omjer raspon/visina. Postojeći teorijski modeli poput norme ACI 318 i metode Strut-and-Tie ostali su učinkoviti u predviđanju smične čvrstoće RACgreda.

Kao što je to prikazano na slici 4., Li i sur. [35] procijenili su utjecaj na okoliš različitih mješavina RAC-a s omjerom vode i cementa od 0,50, ističući emisije ugljika i potencijal karbonizacije u pet konfiguracija RAC-a i kontrolu betona od prirodnog agregata (eng. *Natural Aggregate Concrete* - NAC). Ukupne emisije ugljika u RAC mješavinama bile su slične onima s NAC mješavinama, no doprinosi CO<sub>2</sub> iz različitih faza životnog ciklusa (C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub>) pokazali su znatne razlike. Posebno je RAC-5 pokazao najveću apsorpciju karbonizacije (6,22 kg CO<sub>2</sub>eq/t), što upućuje na povećani potencijal vezivanja CO<sub>2</sub> u poroznijim recikliranim betonima. Ti rezultati ističu dvostruke ekološke koristi primjene RAC-e, kako u smanjenju potražnje za novim materijalima tako i u doprinosu ugljičnoj neutralnosti zahvaljujući većoj sposobnosti karbonizacije.

Prepoznajući potencijal za daljnje poboljšanje svojstava, nedavna istraživanja ispitivala su sinergijske učinke kombiniranja RCA-e s drugim recikliranim materijalima. Raza i



sur. istraživali su ugradnju mikrokarbonskih vlakana u beton na bazi RCA-e i pokazali znatna poboljšanja mehaničke čvrstoće, mikrostrukturne cjelovitosti te ukupne trajnosti kompozitnog materijala [36]. Taj pristup predstavlja rješenje za upravljanje građevnim otpadom i za valorizaciju recikliranih karbonskih vlakana, ističući potencijal inovativnih sustava višestruko recikliranih materijala u održivoj gradnji. Takva istraživanja naglašavaju kontinuirane napore usmjerene na optimiranje svojstava RCA-e primjenom naprednih strategija u inženjerstvu materijala, čime se proširuje primjenjivost recikliranih agregata u učinkovitoj infrastrukturi [37].

Ukratko, RCA nudi i prilike i izazove u izgradnji kolnika, pružajući ekološke i strukturne koristi ako se pravilno obrađuje i ugrađuje, dok kontinuirane inovacije u prethodnoj obradi i formulaciji mješavina dodatno poboljšavaju njegovu izvedbu i održivost.

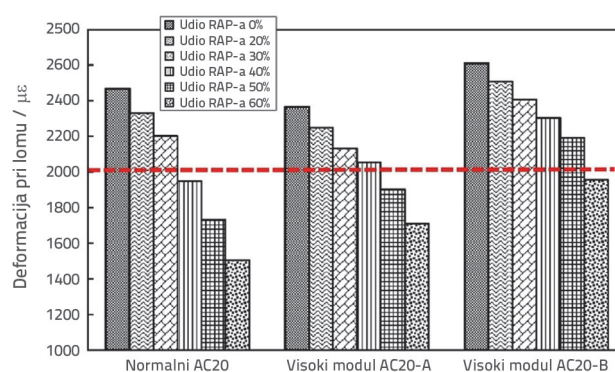
### 3.2. Reciklirani asfaltni kolnik (RAP)

Reciklirani asfaltni kolnik (engl. *Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP) jest reciklirani materijal koji se dobiva mljevenjem ili uklanjanjem postojećih slojeva asfaltnoga kolnika tijekom održavanja ili obnove ceste. Primarno se sastoji od staroga bitumenskog veziva i agregata dobivenih iz postojećih kolnika, koji se potom obrađuju drobljenjem i prosijavanjem kako bi se zadovoljili specifični zahtjevi granulacije za ponovnu upotrebu. RAP je privukao veliku pozornost kao vrijedna i održiva komponenta u bitumenskim mješavinama zbog svojih ekoloških i ekonomskih prednosti, uključujući očuvanje prirodnih agregata, smanjenje emisija stakleničkih plinova i znatne uštede troškova u projektima izgradnje i obnove kolnika [38-42].

Brojna istraživanja ističu prednosti primjene RAP-a u pogledu okolišnih, ekonomskih i mehaničkih svojstava. Naprimjer, Zaumanis i sur. izvijestili su da zamjena 50 % neobrađenog agregata RAP-om u vrućim bitumenskim mješavinama (HMA) može smanjiti ukupni ugljični otisak za više od 38 % [43]. To znatno smanjenje emisija ponajprije se pripisuje smanjenoj potrošnji energije i obradi materijala povezanoj s proizvodnjom prirodnog agregata i bitumena. Peng i sur. razvili su model emisije ugljika tijekom životnog ciklusa za izgradnju asfaltnih kolnika i primijetili da primjena energetske učinkovitosti strategija poput tehnologija niskotemperaturnih bitumenskih mješavina i optimirane uporabe RAP-a može smanjiti emisije stakleničkih plinova za 35,93 % te troškove izgradnje za 18,58 % [44, 45]. Ta istraživanja zajedno pokazuju da primjena RAP-a doprinosi globalnim ciljevima održivosti smanjenjem klimatskih utjecaja i poticanjem očuvanja resursa.

S ekonomskoga gledišta, Copeland je izvijestio da primjena RAP-a može donijeti uštedu troškova do 34 % u usporedbi s tradicionalnim HMA mješavinama [46]. Te uštede proizlaze iz smanjenja potrošnje prirodnih agregata i bitumena, manjih troškova transporta te smanjenih naknada za odlaganje otpada. Ekonomske prednosti posebno su izražene u velikim projektima asfaltiranja i obnove, gdje su volumeni materijala i povezani troškovi znatni.

S mehaničkog aspekta, integracija RAP-a u bitumenske mješavine znatno utječe na strukturno ponašanje izgrađenoga kolnika. Kao što je to prikazano na slici 5., nedavno istraživanje Ma i sur. pokazalo je da ugradnja RAP-a u rasponu od 20 % do 60 %, osobito u kombinaciji s visokomodularnim aditivima, dovodi do znatnog povećanja dinamičkog modula i otpornosti na stvaranje kolotruga, koji su ključni parametri ponašanja kolnika pod prometnim opterećenjem [47]. Međutim, prisutnost starog veziva u RAP-u može povećati njegovu krutost, što potencijalno smanjuje otpornost na nastanak temperaturnih pukotina i pukotina uslijed zamora. Ti štetni učinci mogu se ublažiti primjenom većeg udjela veziva i odgovarajućih aditiva u tim mješavinama s visokim modulom čvrstoće poboljšanjem otpornosti na vlagu i produljenjem vijeka trajanja.



Slika 5. Rezultati ispitivanja za procjenu otpornosti na nastanak temperaturnih pukotina [47]

Nadalje, Issmael i sur. ispitivali su hladno reciklirane mješavine s udjelom RAP-a i do 90 %, pri čemu su zabilježili minimalne negativne učinke na mehanička svojstva poput čvrstoće i trajnosti, uz zadržavanje znatnih ekoloških i ekonomskih koristi [48]. To otkriće ističe fleksibilnost i otpornost RAP-a kao materijala koji se može učinkovito prilagoditi različitim tehnologijama recikliranja i izvedbenim zahtjevima.

Ukupno gledano, ti rezultati potvrđuju da RAP ne samo da doprinosi smanjenju opterećenja okoliša i troškova gradnje, već pruža i znatne mogućnosti primjene u građevinarstvu, kada se njegova mehanička svojstva odgovarajuće uzmu u obzir pri projektiranju mješavina.

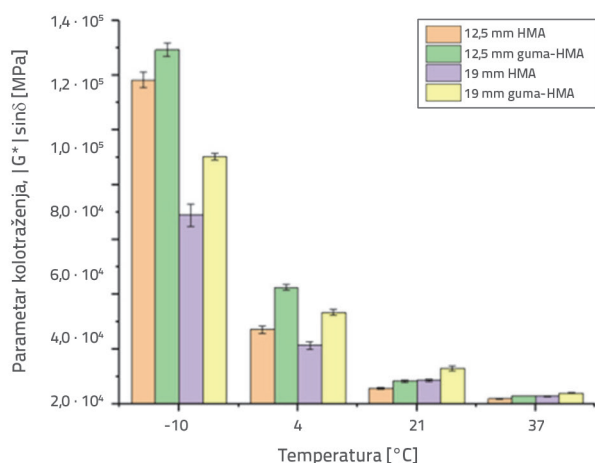
### 3.3. Gumeni granulat

Gumeni granulat, reciklirani materijal dobiven od otpadnih guma, sve više privlači pozornost u gradnji kolnika zahvaljujući svojem potencijalu za poboljšanje svojstava bitumenske mješavine, a istodobno rješava probleme povezane s okolišem u pogledu guma na kraju životnog vijeka [49]. Obično se gumeni granulat ugrađuje u bitumenske mješavine mokrim ili suhim postupkom, a primarno se primjenjuje u habajućim i nosivim slojevima savitljive kolničke konstrukcije.

Posebno je učinkovit u HMA mješavinama, gdje poboljšava mehanička svojstva, produljuje vijek trajanja i smanjuje emisiju buke, što ga čini posebno prikladnim za gradske prometnice i kolnike s gustim prometom.

S ekološkog stajališta, primjena gumenoga granulata doprinosi gospodarenju otpadnim gumama preusmjeravanjem znatne količine biološki nerazgradivog materijala s odlagališta i iz procesa spaljivanja. Osim toga asfaltne mješavine obogaćene gumom imaju dulji vijek trajanja i smanjene potrebe za održavanjem, što posredno rezultira smanjenom potrošnjom energije tijekom životnog ciklusa i nižim emisijama stakleničkih plinova [50, 51]. Taj je pristup u skladu s načelima kružnoga gospodarstva i osigurava način za smanjenje ovisnosti o modifikatorima neobrađenih polimera. Zabilježene su i ekonomske prednosti; produljeni vijek trajanja kolnika i rjeđa potreba za održavanjem mogu donijeti dugoročne uštede, unatoč višim početnim troškovima proizvodnje povezanim s modifikacijom gume [52].

Brojna istraživanja ispitivala su mehaničko ponašanje bitumenskih mješavina modificiranih gumenim granulatom (engl. *crumb rubber modified asphalt* - CRMA). Liang i sur. [53] analizirali su učinke različitih aktivacijskih tretmana (visoka temperatura, prethodno bubrenje i mikrovalno zračenje) na performanse CRMA-e. Rezultati su pokazali znatna poboljšanja viskoznosti, stabilnosti na visokim temperaturama i otpornosti na stvaranje kolotraga. Obradena guma poboljšala je dinamičku stabilnost bitumenskih mješavina i poboljšala kompatibilnost između gume i veziva, što je potvrđeno homogenijim mikrostrukturama uočenima mikroskopskom analizom. Ta poboljšanja ključna su za otpornost na deformacije u uvjetima prometnog opterećenja i pri povišenim temperaturama.



Slika 6. Parametar kolotraga ( $G^*/\sin\delta$ ) pri 10 Hz kod različitih tipova vrućih bitumenskih mješavina [54]

Daljnja istraživanja Youa i sur. [54] pokazala su da mješavine obogaćene gumom primjenom suhog postupka znatno nadmašuju svojstva tradicionalnih HMA-ova. Kao što je to prikazano na slici 6., mješavine obogaćene gumom imale su

za od 29 do 50 % veću energiju loma i do 19 % bolji dinamički modul, što je dovelo do superiorne otpornosti na nastanak pukotina i stvaranje kolotraga pri različitim temperaturama. Osim mehaničkih svojstava mješavine obogaćene gumom pokazale su smanjenje razine buke za 2 do 3 dB u uvjetima gradskog prometa, što upućuje na dodatne prednosti u urbanim okružjima. Simulacije mehanističko-empirijskog projektiranja kolnika pokazale su poboljšane dugoročne pokazatelje ponašanja, uključujući smanjene vrijednosti međunarodnog indeksa ravnosti (IRI) te povećanu otpornost na nastanak kolotraga i pukotina uzrokovanih zamorom materijala.

Procjene životnog ciklusa dodatno su potvrdile potencijal održivosti bitumenskih mješavina modificiranih gumenim granulatom. Riekstins i sur. [55] zaključili su da kolnici koji sadržavaju gumeni granulat moraju imati životni vijek dulji od dvije do četiri godine po ciklusu kako bi postigli bolje okolišne učinke u odnosu na tradicionalne vrste bitumenskih mješavina. Nadalje, Xiao i sur. [56] istaknuli su dugoročne uštede energije i prednosti emisija primjenom gumenoga granulata, posebno u kombinaciji s tehnologijom vrućih bitumenskih mješavina. Iako proizvodnja bitumenskih mješavina s dodatkom gumenoga granulata u početku može zahtijevati više temperature miješanja, smanjenje potrošnje goriva i emisija tijekom održavanja nadoknađuje tu početno višu potrošnju energije [57-60].

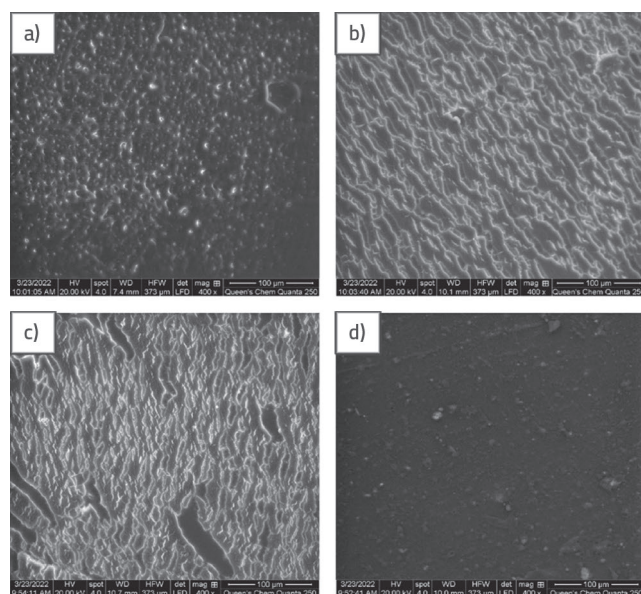
Sveukupno, dodavanje gumenoga granulata u bitumenske mješavine održiva je strategija za poboljšanje mehaničkih performansi, smanjenje opterećenja za okoliš i povećanje ekonomske učinkovitosti. Ipak, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se optimirala interakcija gume i bitumena, ublažili visoki troškovi obrade te potvrdila dugoročna svojstva na terenu pod različitim klimatskim i prometnim uvjetima.

### 3.4. Reciklirana plastika

Reciklirana plastika odnosi se na polimerne materijale dobivene iz otpadnih tokova nakon upotrebe ili proizvodnje, koji se ponovno iskorištavaju za izgradnju kolnika. Dodavanje reciklirane plastike u bitumenske mješavine obećavajući je iskorak prema održivoj infrastrukturi, rješavajući i rastuću globalnu krizu plastičnog otpada i sve veću potražnju za materijalima koji poboljšavaju performanse u cestogradnji. Snimka elektronskog mikroskopa u standardnim uvjetima okoline (engl. *environmental scanning electron microscope* - ESEM) na slici 7. prikazuje morfološke razlike između bitumenskih mješavina modificiranih različitim plastikama kao što su polipropilen (PP), PS, HDPE i LDPE, ističući njihov utjecaj na homogenost i teksturu bitumske matrice [61]. Ti se materijali ponajprije upotrebljavaju u habajućim i nosivim slojevima savitljivih kolničkih konstrukcija i uvode se ili kao modifikatori bitumenskog veziva ili kao zamjena za agregat [62-64].

Reciklirana plastika dodaje se u bitumenske mješavine dvama primarnim postupcima [65]. Mokri postupak uključuje taljenje plastike i miješanje s bitumenom na visokim temperaturama kako bi se stvorilo modificirano vezivo prije miješanja s

agregatom. To zahtijeva posebnu opremu za pravilno rukovanje i miješanje materijala. S druge strane, suhim se postupkom reciklirana plastika izravno dodaje bitumenskoj mješavini kao modifikator ili zamjena za agregat. Takav je pristup osobito energetski učinkovit i može se primijeniti s različitim vrstama plastike kako bi se poboljšala fizikalna svojstva konačnog proizvoda. Iako je mokri postupak prikladan za plastiku s nižom temperaturom taljenja poput polietilena, suhi postupak može se primijeniti na materijale s višom temperaturom taljenja poput polietilen-tereftalata (PET) i polistirena (PS). Ti procesi ne samo da odražavaju predanost održivosti, već su i inovativan iskorak u području inženjeringa materijala, ističući svestranost i prilagodljivost reciklirane plastike u izgradnji kolnika.



Slika 7. ESEM prikaz četiriju bitumenskih mješavina modificiranih plastikom: a) 5 % PP; b) 5 % PS; c) 5 % HDPE; d) 5 % LDPE [61]

S mehaničkog aspekta, brojna istraživanja pokazala su da asfaltni kolnik modificiran plastikom karakteriziraju poboljšana trajnost, fleksibilnost i otpornost na deformacije [66]. Naprimjer, Sabina i sur. proveli su usporednu procjenu asfaltnobetonskih mješavina modificiranih s 8 % i 15 % otpadnog PP-a po težini bitumena i izvijestili o znatnim poboljšanjima Marshallove stabilnosti, indirektna vlačna čvrstoća i otpornosti na stvaranje kolotragova u odnosu na tradicionalne mješavine. Ta su poboljšanja ponajprije posljedica poboljšane adhezije između agregata obloženih PP-om i bitumena, što je poboljšalo ukupnu čvrstoću, trajnost i otpornost na vlagu [67]. Općenito, uključivanje plastike u bitumenske mješavine povećava fleksibilnost, čime se smanjuje nastanak pukotina i stvaranje kolotragova u uvjetima opetovanoga prometnog opterećenja [68].

Shin i sur. [69] ispitali su svojstva bitumenskih mješavina ojačanih različitim vlaknima dobivenima iz plastike, uključujući PP, poliestar (PE), karbonska vlakna i najlon. Najlon u volumnom udjelu od 1,0 % određen je kao optimalan aditiv, koji vrhunski poboljšava vlačnu čvrstoću, otpornost na vlagu i vijek trajanja

pri više uvjeta ispitivanja. Silva i sur. [44] također su primijetili da određene plastike znatno poboljšavaju viskoznost i krutost veziva, osobito pri povišenim temperaturama, što doprinosi većoj otpornosti na stvaranje kolotragova i strukturnoj izvedbi pod utjecajem klimatskih razlika. Ta su poboljšanja ključna za visokoučinkovite kolnike izložene ekstremnim okolišnim i prometnim uvjetima.

S ekološkog i ekonomskog stajališta, primjena reciklirane plastike u kolnicima donosi znatne prednosti. Navedena praksa smanjuje onečišćenje okoliša i potiče protok resursa preusmjeravanjem plastičnog otpada s odlagališta na spaljivanje. Nadalje, omogućuje uštedu materijala djelomičnom zamjenom čistog bitumena ili agregata, što rezultira nižim troškovima proizvodnje i produljenim vijekom trajanja kolnika. Leng i sur. [70] proveli su analizu životnog ciklusa kombinirajući PET modificirani bitumen i reciklirani asfaltni kolnik (RAP) te izvijestili o smanjenju troškova životnog ciklusa od 26,2 % i smanjenju emisija stakleničkih plinova od 29,0 % u projektima obnove cesta. Te su prednosti osobito izražene u urbanim područjima s ograničenom dostupnošću materijala, što naglašava potencijal primjene reciklirane plastike u regijama s ograničenim resursima.

Unatoč pozitivnim pokazateljima, određeni izazovi još uvijek sprječavaju široku primjenu te metode. Među njima su heterogenost izvora plastičnog otpada, problemi s kompatibilnošću s bitumenom te zabrinutost za dugoročnu trajnost i ekološku sigurnost, uključujući moguću emisiju mikroplastike. Nedostatak standardiziranih protokola ispitivanja i projektnih smjernica otežava dosljednu procjenu učinkovitosti. Da bi se navedeni izazovi riješili, trenutačna istraživanja usmjerena su na optimiranje vrste i udjela plastike, poboljšanje kompatibilnosti veziva kroz prethodnu obradu ili kemijske aditive te provođenje terenskih ispitivanja za potvrdu laboratorijskih rezultata. Razvoj energetski učinkovitih proizvodnih metoda i provođenje cjelovitih procjena životnog ciklusa ključno je za ocjenu izvedivosti i ekološke prihvatljivosti ovih sustava.

Ukratko, primjena reciklirane plastike u asfaltnim kolnicima donosi znatne ekološke i ekonomske koristi, a istodobno poboljšava ključne pokazatelje učinkovitosti. Kontinuirano istraživanje ponašanja materijala, metoda obrade i validacije polja ključno je za ostvarenje punog potencijala reciklirane plastike u održivoj gradnji kolnika.

### 3.5. Čelična zgura

Čelična zgura, nusproizvod procesa proizvodnje čelika poput rada s kisikom i elektrolučnim pećima, postala je vrijedan materijal u izgradnji kolnika. Umjesto da se odbacuje kao industrijski otpad, čelična zgura može se ponovno upotrijebiti kao agregat u bitumenskim mješavinama, čime se ostvaruju koristi u pogledu učinkovitosti i održivosti. Zbog svoje visoke tvrdoće, uglata oblika i hrapave površine agregat od čelične zgure (engl. *steel slag aggregate* - SSA) posebno je prikladan za habajuće i nosive slojeve u savitljivim kolničkim konstrukcijama, gdje su otpornost

na stvaranje kolotragova i mehanička trajnost presudni [71-73]. Osim svojih tehničkih svojstava, SSA ekološki je privlačan jer smanjuje potrebu za vađenjem prirodnih agregata i omogućuje preusmjeravanje velikih količina nusproizvoda čeličane s odlagališta. Takav pristup kružnome gospodarstvu doprinosi smanjenju ukupnoga ugljičnog otiska materijala za kolnike, uz očuvanje ograničenih prirodnih resursa. Štoviše, lokalna dostupnost troske u blizini urbanih i industrijskih središta može doprinijeti smanjenju emisija i troškova prijevoza, dodatno povećavajući ekološku i ekonomsku vrijednost SSA-e [74-76].

Brojna istraživanja ispitivala su učinkovitost SSA-e u vrućim bitumenskim mješavinama, dosljedno pokazujući poboljšano mehaničko ponašanje [77, 78]. Mješavine s udjelom SSA-e od 20 do 35 % pokazale su veću krutost, poboljšanu otpornost na trajne deformacije i dulji vijek trajanja u odnosu na zamor u usporedbi s tradicionalnom vrućom bitumenskom mješavinom. Poboljšanja se uglavnom pripisuju superiornim svojstvima međusobnog prijanjanja i raspodjele opterećenja koja omogućuju hrapave i ugate površine SSA-e. Osim toga njegov mineralni sastav doprinosi povećanoj otpornosti na vlagu, što je važno za dugoročnu učinkovitost kolnika u vlažnim uvjetima ili uvjetima smrzavanja i odmrzavanja [16].

Kada se primjenjuje u poroznome asfaltu, tada SSA pokazuje obećavajuće rezultate. Iako njegova primjena može blago smanjiti propusnost zbog guste raspodjele čestica zgre, istodobno poboljšava otpornost na stvaranje kolotragova i elastični modul, koji su ključni parametri za visokoučinkovite propusne kolnike [79]. Bitumenske mješavine koje sadržavaju SSA nadmašile su one s prirodnim agregatima u nekoliko mehaničkih parametara, što potvrđuje njihovu prikladnost za konvencionalne i specijalne primjene u kolniku [80].

Iako SSA nudi brojne prednosti, potrebno je prevladati određene izazove kako bi se omogućila njezina široka primjena. Prisutnost nestabilnih komponenti poput slobodnog vapna (CaO) i periklaza (MgO) u neobrađenoj zguri može dovesti do povećanja volumena i nastanka pukotina. Zato se često primjenjuju tehnike prethodne obrade poput vremenskog izlaganja, starenja ili kemijske stabilizacije, kako bi se osigurala volumetrijska stabilnost. Nadalje, kemijska i fizička varijabilnost zgre iz različitih čeličana zahtijeva dosljednu kontrolu kvalitete kako bi se osigurala zahtijevana svojstva kolnika.

Za potpuno iskorištavanje potencijala SSA-e u izgradnji kolnika potrebna su daljnja istraživanja radi standardizacije postupaka obrade, procjene dugoročnog ponašanja na terenu te ispitivanja izvedbe u kombinaciji s drugim recikliranim materijalima. Terenska ispitivanja pri različitim klimatskim uvjetima i prometnim opterećenjima posebno su vrijedna za potvrdu laboratorijskih rezultata.

Ukratko, čelična zgura uvjerljiva je prilika za pretvorbu industrijskog otpada u učinkovite materijale za kolnike. Njezina povoljna mehanička svojstva, u kombinaciji s ekološkim i gospodarskim prednostima, čine je obećavajućom zamjenom za tradicionalne agregate, znatno doprinoseći razvoju održivijih i otpornijih cestovnih mreža.

### 3.6. Građevni otpad i otpad od rušenja

Građevni otpad i otpad od rušenja (engl. *Construction and demolition waste* - CDW) sastoje se od heterogene mješavine materijala poput betona, opeke, keramike, morta, drva i komada asfalta nastalih gradnjom, obnovom i rušenjem zgrada i infrastrukture. Kada se pravilno obradi, tada se građevni otpad može pretvoriti u reciklirane agregate (RA), što je održiva alternativa prirodnim agregatima u primjeni na kolnicima. Ti reciklirani agregati obično se primjenjuju u nasipima, podlogama, a sve više i u nevezanim nosivim i vezanim slojevima, doprinoseći kružnome gospodarstvu preusmjeravanjem otpada s odlagališta i smanjenjem ovisnosti o prirodnim materijalima [81-85].

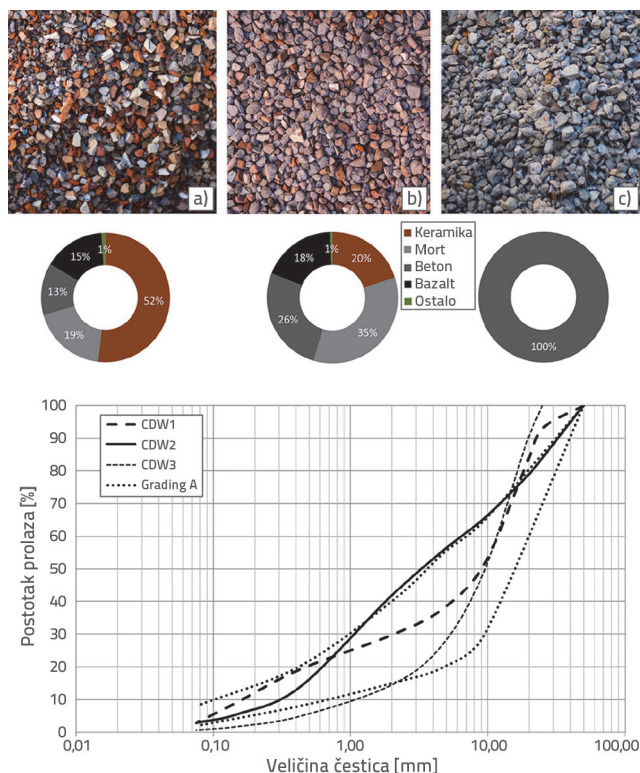
Glavna ekološka prednost ponovne upotrebe građevnog otpada jest znatno smanjenje količine otpada koji završava na odlagalištima te smanjenje iskorištavanja prirodnih sirovina. S ekonomskog stajališta, primjena lokalno dostupnih recikliranih agregata može smanjiti troškove materijala i transporta, osobito u urbanim sredinama s ograničenim resursima. Međutim, agregati građevnog otpada i otpada od rušenja često se odlikuju većom heterogenošću i apsorpcijom vode u odnosu na prirodne agregate, što je izazov za dosljednu mehaničku učinkovitost.

Bernucci je 2011. razvio laboratorijski program za procjenu izvedivosti primjene recikliranih agregata od građevnog otpada u kolnicima [86]. Rezultati su pokazali da se upojnost znatno razlikovala ovisno o sastavu materijala, pri čemu su visokoporozne keramike pokazale povećanu apsorpciju. Osim toga oblik zrna može se povezati sa sastavom, pri čemu cementni materijali imaju pretežno kubična zrna, a manje porozna keramika ravna zrna. Također, zbijanje je promijenilo raspodjelu veličine i oblik zrna, s povećanom energijom, što je rezultiralo većim lomom i većim postotkom kubičnih zrna. Reciklirani agregat iz građevnog otpada (CDW) pokazao je ponašanje elastičnog modula usporedivo s dobro razvrstanim drobljenim kamenjem, pri čemu je veći napor pri zbijanju smanjio elastičnu deformaciju za 10 do 20 %.

Ossa i suradnici proveli su sveobuhvatnu evaluaciju recikliranih agregata iz građevnog otpada u vrućim bitumenskim mješavinama za gradske ceste, s težištem na ekološkoj održivosti i praktičnoj primjeni [87]. Niz eksperimentalnih ispitivanja, uključujući procjene osjetljivosti na oštećenja uzrokovana vlagom i trajne deformacije, pokazala su da se do 20 % agregata iz građevnog i ruševnog otpada može ugraditi u bitumenske mješavine bez znatnog narušavanja njihove strukturne cjelovitosti ili svojstava. U ispitivanjima upotrijebljeni su različiti udjeli CDW agregata (10 do 40 %), a uzorci asfaltnog betona ocijenjeni su u kontroliranim uvjetima kako bi se odredili njihova volumetrijska svojstva i otpornost na različite naprezajuće čimbenike prema Superpave standardima. Raspodjela veličine čestica agregata iz građevnog otpada, koja znatno utječe na njihovo mehaničko ponašanje u primjeni na kolnicima, prikazana je na slici 8. Na slici su različiti granulometrijski sastavi (CDW1, CDW2 i CDW3) uspoređeni s referentnom granulometrijskom krivuljom (Gradacija A), ističući varijabilnost veličina zrna i potrebu za pozornom kontrolom



granulometrije pri ugradnji CDW-a u slojeve kolnika. Ti su rezultati obećavajući za održivu gradnju i naglašavaju potencijal za smanjenje problema zbrinjavanja otpada i potražnje za prirodnim materijalima. Međutim, rezultati također upućuju na potrebu za daljnjim prilagodbama ili dodacima pri primjeni većih postotaka agregata iz građevnog otpada, posebno radi održavanja učinkovitosti u uvjetima s gustim prometom. Ovo istraživanje ističe važnost poboljšanja upotrebe recikliranih materijala u izgradnji kolnika kako bi se proširila primjena održivih resursa u urbanoj infrastrukturi.



Slika 8. Sastav CDW1, CDW2 i CD3 u kombinaciji s odgovarajućim krivuljama raspodjele veličine zrna i granicama "Gradacije A" [87]

Iako znanstvena istraživanja sve više podupiru primjenu građevnog i ruševnog otpada (CDW), za njegovu primjenu u kolnicima potrebno je prevladati određene izazove. Među njima su promjenjivost svojstava materijala ovisno o izvoru rušenja, rizik od kontaminacije te potreba za prethodnom obradom, uključujući sortiranje, drobljenje i prosijavanje. Osim toga nedostatak ujednačenih tehničkih normi između regija otežava širu primjenu agregata dobivenih iz građevnog i ruševnog otpada.

Buduća istraživanja trebala bi se usredotočiti na optimiranje tehnika stabilizacije (npr. dodataka cementa, letećeg pepela ili polimera), procjenu dugoročnog ponašanja na terenu pod različitim klimatskim i prometnim uvjetima te na primjenu alata za procjenu životnog ciklusa (LCA) radi kvantifikacije ekoloških i gospodarskih ušteda. Građevinski i ruševni otpad (CDW)

čini znatan potencijal za izgradnju održivijih kolnika, uz uvjet pozornog upravljanja njegovim specifičnim svojstvima kroz precizne projektne i izvedbene postupke.

#### 4. Rasprava

Uključivanje recikliranih materijala u izgradnju kolnika ključna je strategija za unapređenje održive infrastrukture. Provedena je analiza literature na temu upotrebe raznih materijala: RCA-e, RAP-a, gumenoga granulata, reciklirane plastike, čelične zgure te građevnog otpada i otpada od rušenja, kao potencijalnih zamjena za tradicionalne agregate i veziva. Ti materijali imaju različite prednosti u skladu s načelima kružnoga gospodarstva, no svaki od njih ima specifična ograničenja koja je potrebno riješiti kako bi se omogućila njihova šira primjena.

RCA, koji se ponajprije dobiva rušenjem betonskih građevina, nudi znatne ekološke prednosti jer se građevni otpad preusmjerava s odlagališta i ujedno smanjuje ovisnost o prirodnim agregatima. Mogućnost njegove primjene u vezanim i nevezanim slojevima kolnika čini je svestranim materijalom. Ipak, porozna struktura i prisutnost preostalog morta često dovode do veće apsorpcije vode i smanjene mehaničke čvrstoće, što ograničava primjenu u visokoučinkovitim konstrukcijama, osim ako se ne primijene odgovarajuće metode obrade. Osim toga razlika u kvaliteti izvora može otežati predviđanje svojstava i kontrolu kvalitete.

RAP predstavlja jedan od najučinkovitijih načina očuvanja resursa u recikliranju asfaltnih kolnika, omogućujući ponovnu upotrebu i agregata i starog veziva. Time se smanjuju energetska potrošnja i emisija stakleničkih plinova, uz potencijalne gospodarske koristi. Ipak, starenje bitumena unutar RAP-a može dovesti do povećane krutosti recikliranih mješavina, što može rezultirati smanjenom otpornošću na zamor ako se ne primijene metode modifikacije ili pomlađivanja. Nadalje, nedostatak konsenzusa o optimalnim udjelima RAP-a koji bi rezultirao jedinstvenim svojstvima i dalje otežava njegovu primjenu u različitim klimatskim uvjetima i pod različitim prometnim opterećenjima [88].

Gumeni granulati, dobiveni iz iskorištenih guma, poboljšava elastičnost koja povećava otpornost na stvaranje kolotragova i pukotina. Također doprinosi smanjenju razine buke i podržava gospodarenje otpadnim gumama. Unatoč tim prednostima, izazovi uključuju više temperature proizvodnje, potencijalno odvajanje faza u mješavinama dobivenima mokrim postupkom i neujednačenu kompatibilnost gume i bitumena. Ti čimbenici mogu negativno utjecati na homogenost mješavine i dugoročnu trajnost.

Reciklirana plastika, primijenjena mokrim ili suhim postupkom, može rezultirati poboljšanjem svojstava bitumenskih mješavina i znatno smanjuje količinu plastičnog otpada. Također može poboljšati krutost, otpornost na deformacije i svojstva starenja veziva. Međutim, i dalje postoje izazovi u vezi s kompatibilnošću različitih vrsta plastike, mogućim oslobađanjem mikroplastike te, dugoročno gledano, pitanjem recikliranja asfaltnih kolnika modificiranih plastikom. Osim toga nedostatak standardiziranih

postupaka obrade i kriterija izvedbe otežava dosljednu primjenu. Čelična zgura, nusproizvod proizvodnje čelika, odlikuje se izvrsnom uglatošću, tvrdoćom i adhezivnim svojstvima, što je čini pogodnom za primjenu u asfaltu i betonskim kolnicima. Njezina visoka mehanička čvrstoća i otpornost na klizanje čine je idealnim za habajuće i nosive slojeve. Ipak, prisutnost slobodnog vapna ili magnezija može uzrokovati volumetrijsku nestabilnost, dok potencijalni rizici od ispiranja teških metala zahtijevaju stroge postupke kondicioniranja i ispitivanja materijala.

Građevni i ruševni otpad (CDW), koji je dostupan u velikim količinama i ekonomski isplativ, često je vrlo heterogen. Ti materijali pokazali su prikladnost za donje slojeve kolnika (npr. nasipi i tamponski slojevi), dok za slojeve s većim zahtjevima nosivosti obično zahtijevaju stabilizaciju ili miješanje kako bi zadovoljili kriterije izvedbe. Problemi s trajnošću, neujednačeni sastav i povećani udio sitnih čestica mogu narušiti mehanička svojstva, no to se može ublažiti pravilnom obradom i optimiranjem sastava mješavine.

Ukratko, iako svaki reciklirani materijal ima jedinstvene prednosti u pogledu održivosti i izgradnje, njihova ograničenja ističu potrebu za prilagođenim pristupima odabiru materijala, obradi i projektiranju. Za njihovu učinkovitu primjenu u izgradnji kolnika neophodan je sustavni pristup koji uzima u obzir

cjelokupni životni ciklus, utjecaj na okoliš, ekonomsku isplativost i građevinsku praksu. Buduća istraživanja trebaju staviti težište na sinergijsku upotrebu više materijala, dugoročna terenska ispitivanja te standardizaciju kako bi se osigurala održive prednosti, a da se ne ugrožava učinkovitost infrastrukture.

## 5. Zaključak

Ovaj sveobuhvatni pregled ističe rastuću upotrebu raznih recikliranih materijala u izgradnji kolnika, što svjedoči o predanosti građevinske industrije održivosti i zaštiti okoliša. Preispitivanjem tradicionalnih praksi i materijala industrija aktivno traži inovativna rješenja za smanjenje ekološkog otiska, istodobno poboljšavajući funkcionalnost i trajnost kolničke infrastrukture. Reciklirani materijali predstavljaju održiv put u evoluciji izgradnje kolnika. Usmjeravanjem sektora prema održivijim praksama, ti materijali postaju ključni čimbenici u razvoju ekološki prihvatljivih, ekonomski isplativih i tehnički pouzdanih kolnika. Sinergija između ekološke održivosti i inženjerskih inovacija i dalje usmjerava industriju prema zelenijim rješenjima, što dokazuje da reciklirani materijali mogu revolucionirati izgradnju kolnika i pridonijeti održivome razvoju urbanih sredina.

## LITERATURA

- [1] Lee, J.C., Edil, T.B., Tinjum, J.M., Benson, C.H.: Quantitative assessment of environmental and economic benefits of recycled materials in highway construction, *Transp. Res. Rec.*, (2010), p. 2158., <https://doi.org/10.3141/2158-17>.
- [2] Park, K., Hwang, Y., Seo, S., Seo, H.: Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways, *J. Constr. Eng. Manag.*, 129 (2003) 1, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2003\)129:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2003)129:1(25)).
- [3] Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A.: Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review, 2011., <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.
- [4] Alaloul, W.S., Altaf, M., Musarat, M.A., Javed, M.F., Mosavi, A.: Systematic review of life cycle assessment and life cycle cost analysis for pavement and a case study, 2021., <https://doi.org/10.3390/su13084377>.
- [5] Velvizhi, G., et al.: Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy, *Science of the Total Environment*, 731 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>.
- [6] Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., Guppy, R.: Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>.
- [7] Raouf Dar, A., Singh, E.S.: Use of recycled materials in pavement construction, *IJSDR2008038 International Journal of Scientific Development and Research*, 2020.
- [8] Al-Mosawe, H., Albayati, A., Wang, Y., Mashaan, N.S.: An Experimental study of granular material using recycled concrete waste for pavement roadbed construction, *Buildings*, 12 (2022) 11, <https://doi.org/10.3390/buildings12111926>.
- [9] Pereira, P.M., Vieira, C.S.: A literature review on the use of recycled construction and demolition materials in unbound pavement applications, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142113918>.
- [10] Xiao, Y., Dong, Q., Chang, X., Cui, P., Liu, G.: Research hotspots and development trends on recycled construction materials in pavement engineering: A bibliometric evaluation, 2021., <https://doi.org/10.3390/ma14092170>.
- [11] Jakhar, A., Meena, R.: Sustainable pavement construction: A Comprehensive review on the use of recycled materials and their impact on performance, *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, 44 (2023) 3, <https://doi.org/10.52783/tjpt.v44.i3.2078>.
- [12] Tam, V.W.Y., Soomro, M., Evangelista, A.C.J.: A review of recycled aggregate in concrete applications (2000 - 2017), *Constr. Build. Mater.*, 172 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [13] Bu, C., et al.: The durability of recycled fine aggregate concrete: A Review, 2022., <https://doi.org/10.3390/ma15031110>.
- [14] Ouyang, K., et al.: Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete: A review, 2023., <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106717>.
- [15] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Investigation of Use potential of fiber added concretes as road pavement on weak soils, *Građevinar*, 75 (2023) 7, pp. 665–678

- [16] Neves, J., Crucho, J.: Performance evaluation of steel slag asphalt mixtures for sustainable road pavement rehabilitation, *Applied Sciences (Switzerland)*, 13 (2023) 9, <https://doi.org/10.3390/app13095716>.
- [17] Danish, A., Mosaberpanah, M.A.: A review on recycled concrete aggregates (RCA) characteristics to promote RCA utilization in developing sustainable recycled aggregate concrete (RAC), 2022. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1946721>.
- [18] Behera, M., Bhattacharyya, S.K., Minocha, A.K., Deoliya, R., Maiti, S.: Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, 2014., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
- [19] Strieder, H.L., Dutra, V.F.P., Graeff, Â.G., Núñez, W.P., Merten, F.R.M.: Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 315 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125384>.
- [20] Fanijo, E.O., Kolawole, J.T., Babafemi, A.J., Liu, J.: A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability, 2023., <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>.
- [21] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., Xie, Z.: Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review, 2016., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.
- [22] Mills-Beale, J., You, Z.: The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 3, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046>.
- [23] Zheng, Y., Zhang, Y., Zhang, P.: Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.085>.
- [24] Katz, A.: Treatments for the improvement of recycled aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (2024) 6, pp. 597–603, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597)).
- [25] Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Le, K.N.: Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resour. Conserv. Recycl.*, 50 (2007) 1, pp. 82–101, <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2006.05.012>.
- [26] Kou, S.C., Poon, C.S.: Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.*, 32 (2010) 8, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>.
- [27] Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., Jiang, J.: Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 5, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038>.
- [28] Shaban, W.M., et al.: Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry, *Constr. Build. Mater.*, 216 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.231>.
- [29] Wu, C.R., Zhu, Y.G., Zhang, X.T., Kou, S.C.: Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach, *Cem. Concr. Compos.*, 94 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.012>.
- [30] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J.A., Alaejos, P., Sánchez De Juan, M.: Durability of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.*, 40 (2013), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>.
- [31] Khaoula, N., Bouyahyaoui, A., Cherradi, T.: Durability of recycled aggregate concrete, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 6 (2021) 1, <https://doi.org/10.25046/aj060180>.
- [32] Guo, H., et al.: Durability of recycled aggregate concrete - A review, *Cem. Concr. Compos.*, 89 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>.
- [33] Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S.: Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.*, 84 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015>.
- [34] Sagheer, A.M., Tabsh, S.W.: Shear Strength of concrete beams without stirrups made with recycled coarse aggregate, *Buildings*, 13 (2023) 1, <https://doi.org/10.3390/buildings13010075>.
- [35] Lei, B., Yu, L., Chen Z., Yang, W., Deng, C., Tang, Z.: Carbon emission evaluation of recycled fine aggregate concrete based on life cycle assessment, *Sustainability (Switzerland)*, 14 (2022), p. 21, <https://doi.org/10.3390/su142114448>.
- [36] Raza, S.S., Fahad, M., Ali, B., Amir, M.T., Alashker, Y., Elhag, A.B.: Enhancing the performance of recycled aggregate concrete using micro-carbon fiber and secondary binding material, *Sustainability (Switzerland)*, 14 (2022), pp. 21, <https://doi.org/10.3390/su142114613>.
- [37] Ashraf, M.J., Idrees, M., Akbar, A.: Performance of silica fume slurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbon fibers, *Journal of Building Engineering*, 66 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105892>.
- [38] Stojanovic, M., Radonjanin, V., Malesev, M., Milovic, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, *Građevinar*, 73 (2021) 8, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>.
- [39] Feng, D., Cao, J., Gao, L., Yi, J.: Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.07.002>.
- [40] Mariyappan, R., Palammal, J.S., Balu, S.: Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications-a review, 2023., <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25847-3>.
- [41] Jahanbakhsh, H., Karimi, M.M., Naseri, H., Nejad, F.M.: Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact, *J. Clean. Prod.*, 244 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837>.
- [42] Karthikeyan, K., Kothandaraman, S., Sarang, G.: Perspectives on the utilization of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement construction: A critical review, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02242>.
- [43] Zaumanis, M., Mallick, R.B., Poulikakos, L., Frank, R.: Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100 % recycled asphalt mixtures, *Comput. Chem. Eng.*, 71 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>.
- [44] Gouveia, B.G., Donato, M., da Silva, M.A.V.: Life cycle assessment in road pavement infrastructures: A Review, *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8 (2022) 6, <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-015>.
- [45] Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., Zhan, Y.: Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2 (2015) 2, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.005>.
- [46] FHWA: Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice, Report No. FHWA-HRT-11-021, 2011.
- [47] Ma, T., Ding, X., Zhang, D., Huang, X., Chen, J.: Experimental study of recycled asphalt concrete modified by high-modulus agent, *Constr. Build. Mater.*, 128 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.078>.

- [48] Al-Jumaili, M.A., Issmael, O.D.: Cold asphalt mixtures with high reclaimed pavement material percentages response to local traffic loading and environmental conditions, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018., <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012013>.
- [49] Li, J., Saberian, M., Nguyen, B.T.: Effect of crumb rubber on the mechanical properties of crushed recycled pavement materials, *J. Environ. Manage.*, 218 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.062>.
- [50] Liang, M., et al.: The effects of activation treatments for crumb rubber on the compatibility and mechanical performance of modified asphalt binder and mixture by the dry method, *Front. Mater.*, 9 (2022), <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.845718>.
- [51] Shu, X., Huang, B.: Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, *Constr. Build. Mater.* - PART B, 67 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>.
- [52] Lo Presti, D.: Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, 2013., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>.
- [53] Liang, M., et al.: Microscopic analysis of activated crumb rubber and its effect on mechanical performance of asphalt mixtures using dry process, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35 (2023) 12, <https://doi.org/10.1061/jmce7.mteng-15081>.
- [54] Jin, D., Ge, D., Wang, J., Malburg, L., You, Z.: Reconstruction of asphalt pavements with crumb rubber modified asphalt mixture in cold region: Material characterization, construction, and performance, *Materials*, 16 (2023) 5, <https://doi.org/10.3390/ma16051874>.
- [55] Riekstins, A., Haritonovs, V., Straupe, V.: Economic and environmental analysis of crumb rubber modified asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 335 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127468>.
- [56] Wang, T., Xiao, F., Zhu, X., Huang, B., Wang, J., Amirkhanian, S.: Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086>.
- [57] Mavridou, S., Kehagia, F.: Environmental noise performance of rubberized asphalt mixtures: Lamia's case study, *Procedia Environ. Sci.*, 38 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.165>.
- [59] Tehrani, F.M.: Noise abatement of rubberized hot mix asphalt: A brief review, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8 (2015) 1, [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(1\).58](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(1).58).
- [59] Wang, T., Lee, I.S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.B., Kim, C.: Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance, *J. Clean. Prod.*, 33 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.
- [60] Wang, T., Xiao, F., Amirkhanian, S., Huang, W., Zheng, M.: A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials, 2017., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.031>.
- [61] Ma, J., Nawarathna, H.M.C., Hesp, S.A.M.: On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements, *J. Clean. Prod.*, 359 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132081>.
- [62] Hao, G., He, M., Lim, S.M., Ong, G.P., Zulkati, A., Kapilan, S.: Recycling of plastic waste in porous asphalt pavement: Engineering, environmental, and economic implications, *J. Clean. Prod.*, 440 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140865>.
- [63] Ma, Y., et al.: The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>.
- [64] You, L., et al.: Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>.
- [65] Daniel, G.: Assessing the impact of the incorporation of aramid and polyolefin to hot and warm asphaltic mixture using dry and wet process: A Review, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012062>.
- [66] Pacheco-Torgal, F., Khatib, J., Colangelo, F., Tuladhar, R.: Use of recycled plastics in eco-efficient concrete, 2018., <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.01001-X>.
- [67] Sabina, T., Khan, A., Sangita, D., Sharma, K., Sharma, B.M.: Performance evaluation of waste plastic/polymer modified bituminous concrete mixes, *J. Sci. Ind. Res.*, (India), 68 (2009) 11, 2009.
- [68] White, G.: A synthesis on the effects of two commercial recycled plastics on the properties of bitumen and asphalt, *Sustainability* (Switzerland), 12 (2020) 20, 2020, <https://doi.org/10.3390/su12208594>.
- [69] Kim, M.J., Kim, S., Yoo, D.Y., Shin, H.O.: Enhancing mechanical properties of asphalt concrete using synthetic fibers, *Constr. Build. Mater.*, 178 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.070>.
- [70] Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R., Jiang, J.: Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong, *J. Clean. Prod.*, 336 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>.
- [71] Es-Samlali, L., El Haloui, Y., Amrani, M., Oudhiri-Hassani, F., Tlidi, A., Bekri, A.: Potential valorisation of steel slag waste as an alternative material for pavement layers, *Građevinar*, 75 (2023) 2, 2023, <https://doi.org/10.14256/JCE.3571.2022>.
- [72] Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., Pasquini, E.: The use of steel slags in asphalt pavements: A State-of-the-Art Review, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15118817>.
- [73] Liu, J., et al.: 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 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01722>.
- [74] Bonoli, A., Degli Esposti, A., Magrini, C.: A case study of industrial symbiosis to reduce GHG Emissions: Performance analysis and LCA of asphalt concretes made with RAP aggregates and steel slags, *Front. Mater.*, 7 (2020), <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.572955>.
- [75] Li, J., Xiao, F., Zhang, L., Amirkhanian, S.N.: Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review, 2019., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.
- [76] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit - cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *Građevinar*, 75 (2023) 1, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>.
- [77] Ozcanan, S., Firat, T., Ozcan, O.: Investigating the use of concrete and RCC instead of HMA in highway pavement in hot regions, *Građevinar*, 76 (2024), pp. 813–827, <https://doi.org/10.14256/JCE.4024.2024>.
- [78] Chen, X., Wang, L.: Temperature-water - load coupling study on stress characteristics of BFRP-CRCP pavement, *Građevinar*, 76 (2024) 3, pp. 247 - 256, <https://doi.org/10.14256/JCE.3547.2022>.
- [79] Loureiro, C.D.A., Moura, C.F.N., Rodrigues, M., Martinho, F.C.G., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M.: Steel slag and recycled concrete aggregates: Replacing quarries to supply sustainable materials for the asphalt paving industry, 2022., <https://doi.org/10.3390/su14095022>.



- [80] Dondi, G., Mazzotta, F., Lantieri, C., Cuppi, F., Vignali, V., Sangiovanni, C.: Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements, *Materials*, 14 (2021) 2, <https://doi.org/10.3390/ma14020345>.
- [81] Barroqueiro, T., da Silva, P.R., de Brito, J.: High-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry: Durability assessment, *Buildings*, 10 (2020) 6, <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10060113>.
- [82] Vieira, T., Alves, A., de Brito, J., Correia, J.R., Silva, R.V.: Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware, *Mater. Des.*, 90 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.023>.
- [83] Alexandridou, C., Angelopoulos, G.N., Coutelieris, F.A.: Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants, *J.Clean. Prod.*, 176 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.081>.
- [84] Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L.: Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Constr. Build. Mater.*, 77 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>.
- [85] Dimter, S., Kuburić, G., Ević, E., Vrhovac, G.: Road building using wood ash, *Građevinar*, 76 (2024) 12, pp. 1077–1086, <https://doi.org/10.14256/JCE.4157.2024>.
- [86] Leite, F.D.C., Motta, R.D.S., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.: Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 6, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>.
- [87] Ossa, A., García, J.L., Botero, E.: Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry, *J. Clean. Prod.*, 135 (2016) 11, pp. 379–386, <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.06.088>.
- [88] Yaro, N.S.A., et al.: A comprehensive overview of the utilization of recycled waste materials and technologies in asphalt pavements: Towards environmental and sustainable low-carbon roads, 2023., <https://doi.org/10.3390/pr11072095>.