Mjere prevencije i sanacije reflektirajućih pukotina u savitljivim kolnicima

Zvonarić, Matija; Dimter, Sanja

Source / Izvornik: **Građevinar, 2022, 74, 189 - 197**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

https://doi.org/10.14256/JCE.3427.2021

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:498380

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

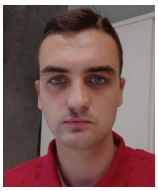
SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primljen / Received: 27.12.2021.
Ispravljen / Corrected: 15.3.2022.
Prihvaćen / Accepted: 21.3.2022.
Dostupno online / Available online: 10.4.2022.

Mjere prevencije i sanacije reflektirajućih pukotina u savitljivim kolnicima

Autori:



Matija Zvonarić, mag.ing.aedif.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
mzvonaric@gfos.hr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Sanja Dimter**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
sdimter@gfos.hr

Pregledni rad

Matija Zvonarić, Sanja Dimter

Mjere prevencije i sanacije reflektirajućih pukotina u savitljivim kolnicima

S obzirom na visoku cijenu i količinu prirodnih resursa koji se koriste u prometnoj infrastrukturi, produljenje uporabljivosti kolničkih konstrukcija prioritet je za inženjere. Jedan od najvećih izazova u održavanju savitljivih kolničkih konstrukcija je sprječavanje pojave reflektirajućih pukotina koje smanjuju udobnost i sigurnost vožnje. Reflektirajuće pukotine se prema načinu nastanka dijele na pukotine nastale kao posljedica skupljanja cementom stabiliziranog nosivog sloja i pukotine "reflektirajuće" sa starog kolnika na novu asfaltnu prevlaku. Tijekom održavanja kolnika, najčešće mjere sanacije su izvođenje asfaltne prevlake preko starog, istrošenog habajućeg sloja kolnika. Nakon postavljanja novog asfaltnog sloja preko starog kolnika, asfaltna prevlaka može razviti pukotine identičnog uzorka kao na sloju ispod. Osnovni uzrok nastanka reflektirajućih pukotina je u cementom stabiliziranom nosivom sloju, u kojem tijekom hidratacije cementa, a uslijed prometnog opterećenja i temperaturnih oscilacija, mogu nastati pukotine i proširiti se na gornje slojeve. Brojna su istraživanja provedena u svrhu sprječavanja pojave i širenja reflektirajućih pukotina, a neka od njih provedena na recikliranim materijalima, opisana su u ovom radu. Osim toga, opisana je sanacija reflektirajućih pukotina koja uključuje izvođenje tanjih i debljih asfaltnih međuslojeva te neki od načina kojima je moguće modificirati svojstva asfaltnih mješavina za prevlake u svrhu poboljšanja njihove otpornosti na pojavu reflektirajućih pukotina.

Ključne riječi:
cementom stabilizirani nosivi sloj, reflektirajuće pukotine, reciklirani materijali, međuslojevi

Subject review

Matija Zvonarić, Sanja Dimter

Prevention and remediation measures for reflective cracks in flexible pavements

Considering the high price and the number of natural resources used in transport infrastructure, extending pavement lifetime is a priority for engineers. One of the most common issues in flexible pavement maintenance are reflective cracks, which reduce driving comfort and passenger safety. These cracks have two main origins, those initiated by shrinkage of the cement stabilized layer and the cracks reflected from the old pavement to a new overlay. During road maintenance, the usual remediation measure is to overlay and place a new asphalt wearing course over the old, deteriorated pavement surface. After an asphalt overlay is placed on the deteriorated pavement, the overlay can exhibit an identical crack pattern as the layer below. The main cause of reflective cracks is in the cement bound base course (CBC). Due to cement hydration, traffic load, and temperature oscillations, cracks may occur and propagate through upper layers. Much research has been conducted to prevent this problem. Some research, with an emphasis on recycled materials, is presented in this paper. The remediation measures include thin and thick interlayers and modification of the asphalt overlay characteristics.

Key words:
cement bound base course, recycled materials, reflective cracks, thick interlayer, thin interlayer

1. Uvod

Poznato je da se asfaltni kolnici obično projektiraju na projektno razdoblje od 20 godina. Projektno razdoblje je vrijeme u kojem će cesta služiti uz optimalno održavanje. Po isteku tog razdoblja, kolnička konstrukcija se još može relativno jednostavno popraviti [1]. Dobro održavanje kolničke konstrukcije je važan faktor kojim se povećava njezino trajanje i omogućava siguran i neometan promet. Značajna sredstva se troše na održavanje kolničke konstrukcije, no bez obzira na to, uslijed povećanja prometnog opterećenja, utjecaja klimatskih činitelja te nepravovremenog i nestručnog održavanja, dolazi do narušavanja njezine kvalitete. Posljedično, deformacije koje se pojavljuju na površini kolnika smanjuju udobnost i sigurnost vožnje. Kada iz različitih razloga rekonstrukcija kolnika nije opcija, inženjeri pribjegavaju mjerama sanacije kolnika od kojih je najčešća mjera sanacije dotrajalih kolnika asfaltnim prevlakama [2, 3]. Kako je iskustvo pokazalo, postojeće pukotine na starom kolniku se brzo šire kroz novu asfaltnu prevlaku pod utjecajem klimatskih uvjeta [4], što se posebno uočava u proljetnom razdoblju kada zbog povišenja temperatura dolazi do otapanja ledenih leća u već oštećenom kolniku. Kao posljedica ove pojave, dolazi do ozbiljnog narušavanja nosivosti kolničke konstrukcije te stvaranja reflektirajućih pukotina. Pojava reflektirajućih pukotina može se prepoznati kada nakon presvlačenja dotrajalog kolnika, nova asfaltna prevlaka poprimi isti raspored pukotina kakav je u starom sloju ispod [5]. Pukotine na asfaltu, izazvane širenjem pukotina iz cementom stabiliziranog nosivog sloja, također se nazivaju reflektirajućim pukotinama.

Asfaltne mješavine za izvođenje prevlaka sastoje se od prirodnih materijala, poput kvalitetnog kamenog materijala i odgovarajućeg bitumenskog veziva, za proizvodnju kojih se troše velike količine energije. S ekološkog stajališta, pri izgradnji i održavanju kolnika potrebno je smanjiti korištenje prirodnih materijala i potrošnju energije.

Reflektirajuće pukotine i njihov nastanak u cementom stabiliziranom nosivom sloju bile su predmetom brojnih istraživanja [2-5, 7-11]. Nakon ugradnje, cementom stabilizirani nosivi sloj prolazi kroz prvu fazu očvršćivanja tijekom koje dolazi do hidratacije cementa s molekulama vode tako stvarajući veze između cementne paste i čestica agregata. Tijekom očvršćivanja dolazi do skupljanja cementne paste što dovodi do pojave vlačnih naprezanja. Kada vlačna naprezanja premaše vlačnu čvrstoću mješavine, dolazi do nastanka pukotina. Nadalje, zbog prometnog opterećenja dolazi do koncentracije naprezanja u zoni pukotine, jer nema materijala koji bi ih mogao preuzeti [3]. Koncentrirana naprezanja prenose se na gornji sloj gdje uzrokuju nastanak pukotine. Na opisani način se tako, pukotine šire kroz slojeve sve do habajućeg sloja asfalta. Nakon prijelaska vozila preko mjesta iznad pukotine, vozilo opterećuje jednu stranu pukotine vlastitom težinom, što uzrokuje posmična naprezanja na dodirnoj površini pukotine. Iako najveći utjecaj na širenje pukotina ima prometno opterećenje [1], na tako nastale pukotine utječu i temperaturne oscilacije koje iniciraju temperaturno širenje i skupljanje u cementom stabiliziranom nosivom sloju. Osim toga, ponašanje posteljice, posebno slabo nosivih tala, može značajno doprinijeti razvoju pukotina uslijed bubrenja i skupljanja prouzročenih temperaturnim oscilacijama i promjeni vlage u temeljnom tlu [6]. Wang i suradnici [7] navode kako inicijalna duljina pukotine uvelike utječe na razvoj pukotine pod utjecajem temperaturnih oscilacija. Oni također tvrde kako veći stupanj nagiba inicijalne pukotine pozitivno utječe na smanjenje brzine širenja pukotine zbog projekcije sile na postojeću pukotinu. Najveća vlačna naprezanja su koncentrirana oko vertikalne pukotine. Uslijed kombinacije prometnog opterećenja i temperaturnih naprezanja, mehanizam širenja pukotina postaje nepredvidljiv. Pukotine se reflektiraju na asfaltne slojeve i omogućavaju procjeđivanje vode u sve slojeve kolničke konstrukcije. Pod utjecajem smrzavice, procijeđena voda formira ledene leće koje dalje narušavaju strukturu nosivog sloja. Ove se pukotine također mogu širiti i prema dolje, što izaziva drugu negativnu pojavu - ispumpavanje materijala. Pojava ispumpavanja materijala može narušiti nosivost posteljice. Na RILEM konferenciji održanoj 1993. godine [3] usvojeni su prijedlozi sanacije reflektirajućih pukotina koji su podijeljeni u četiri skupine:

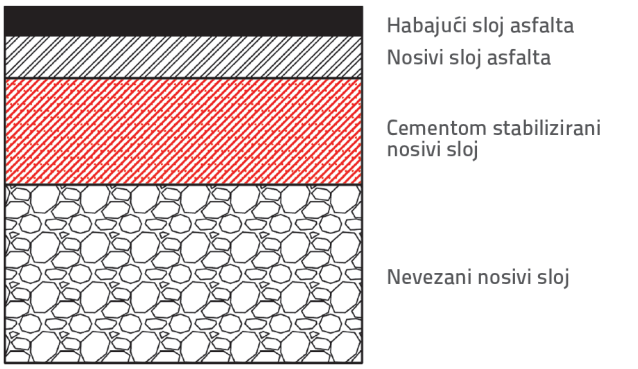
- mjere protiv nastanka reflektirajućih pukotina
- međusloj između starog i novog sloja kolnika
- promjena karakteristika asfaltnih prevlaka
- temperaturna ograničenja pri korištenju vlakana u asfaltnim mješavinama.

Noori i suradnici [8] saželi su i rangirali najpraktičnije metode smanjenja pojave reflektirajućih pukotina. Kao prvu mjeru istakli su zamjenu postojeće površine asfaltnog kolnika, druga mjera je obrada postojećeg kolnika, treća mjera je ugradnja međuslojeva, dok je četvrta mjera armiranje asfaltne prevlake. Mjere sprječavanja nastanka reflektirajućih pukotina podrazumjevaju mjere sprječavanja nastanka pukotina u nosivom sloju i mjere sprječavanja širenja postojećih pukotina sa starog kolnika na novi asfaltni sloj. U nastavku rada opisat će se novija istraživanja vezana za sanaciju reflektirajućih pukotina s naglaskom na prevenciji njihovog nastanka u cementom stabiliziranom nosivom sloju, a u skladu s tvrdnjom kako se nastanak pukotina može izbjeći ili odgoditi uz temeljito razumijevanje mehanizma njihovog nastanka [9]. Autori [9] ovu mjeru ističu kao odgovorniji pristup od dopuštanja nastanka reflektirajućih pukotina te njihove naknadne sanacije.

2. Mjere sprječavanja nastanka reflektirajućih pukotina

Unatoč prednostima cementom stabiliziranog nosivog sloja koje se ogledaju u ravnosti i odgovarajućoj tlačnoj čvrstoći, a čime čine dobru podlogu gornjim slojevima kolničke konstrukcije, taj sloj ima i nedostatke, kao što su skupljanje uslijed hidratacije cementa i osjetljivost na temperaturne oscilacije [10]. Skupljanje cementom stabiliziranog sloja uslijed sušenja usko je povezano

s režimom njege, rasporedom šupljina, termodinamičkim ponašanjem vode i morfologijom proizvoda hidratacije. Četiri su mehanizma nastanka unutarnjih naprezanja: promjene u površinskoj energiji (Gibbs-Banghamov efekt), kapilarna napetost, razdvajajući tlak i međuslojno kretanje vode iz C-S-H gela [11]. Provedena su brojna istraživanja kako bi se dokazale prednosti ugradnje cementom stabiliziranog nosivog sloja, ali i kako bi se umanjili njegovi nedostatci. Dio istraživanja obuhvatio je ispitivanja mogućnosti primjene različitih otpadnih ili recikliranih materijala u izgradnji kolničkih konstrukcija, opravdanu i s financijskoga i s ekološkoga gledišta, a što će biti opisano u nastavku. Na slici 1. je prikazan položaj cementom stabiliziranog nosivog sloja u kolničkoj konstrukciji.



Slika 1. Položaj cementom stabiliziranog nosivog sloja u kolničkoj konstrukciji

2.1. Zgura iz čeličana

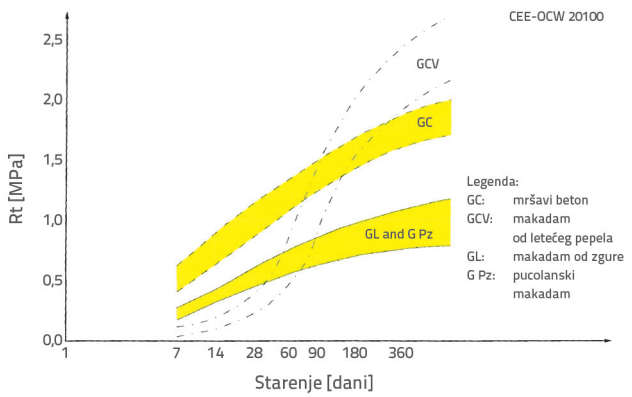
Uporaba zgure nastale kao nusproizvod pri proizvodnji čelika ima opravdanje za korištenje u građevinarstvu i s ekološkoga i s ekonomskoga stajališta, osobito u područjima s razvijenom industrijom čelika. Liu i suradnici [12] istraživali su mogućnost upotrebe čeličanske zgure u cementom stabiliziranom nosivom sloju od vapnenačkog agregata pri čemu su ispitivali više svojstava: nosivost, krutost, trajnost, skupljanje, otpornosti na utjecaj smrzavice i habanje. Jedan od zaključaka istraživanja bio je kako čeličanska zgura smanjuje skupljanje sloja. S druge strane, visoka upojnost zgure uzrokuje povećanje optimalne vlažnosti i maksimalne suhe prostorne mase čime negativno utječe na čvrstoću i krutost, a najveći udio u kojem zgura može zamijeniti agregat iznosi 50 %. Li i suradnici [13] istražili su mogućnost zamjene agregata od drobljenog kamena zgurom iz čeličane različite granulacije, a na temelju rezultata skupljanja prouzročenog sušenjem, temperaturnim oscilacijama i gubitkom vlage. Autori su zaključili kako se primjenom krupnije granulacije zgure postiže manje skupljanje sloja u odnosu na cementom stabilizirani drobljeni kamen. Barišić i suradnici [14, 15] su zaključili kako čeličanska zgura kao djelomična zamjena za šljunak u cementom stabiliziranom sloju, doprinosi povećanju tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti. Nadalje, mješavina šljunka s čeličanskom zgurom postiže veću tlačnu čvrstoću i veći dinamički modul elastičnosti nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja od mješavine čistog šljunka. Rezultat se pripisuje hrapavoj površini čestica zgure, a što omogućuje stvaranje jače veze pri povezivanju s cementom. Pasetto i Baldo [16] istraživali su mehanička svojstva mješavina sastavljenih od isključivo recikliranih materijala različitih udjela: zgure iz čeličana i zgure iz visokih peći, ljevaoničkog pijeska, otpadnog stakla i letećeg pepela nastalog izgaranjem ugljena u termoelektrani. Najveće čvrstoće ostvarile su mješavine sa čeličanskom zgurom i 4 % cementa. Ispitane su i toksikološke te fizikalne karakteristike mješavina te je naglašena važnost ispitivanja toksikoloških karakteristika industrijskih nusproizvoda za primjenu u izgradnji kolničkih konstrukcija.

2.2. Leteći pepeo

Leteći pepeo nastaje izgaranjem ugljena u termoelektranama u energetske svrhe i jedan je od prvih otpadnih materijala koji se počeo koristiti ne samo u cementom stabiliziranom nosivom sloju već i u graditeljstvu općenito. Pri izgaranju ugljena nastaju krupnija (pepeo donjeg ložišta) i sitnija frakcija (leteći pepeo) koje se međusobno, osim veličine čestica, razlikuju i u svojstvima. Za razliku od prethodno spomenute čeličanske zgure, leteći pepeo je osobito istraživan kao vezivo zbog svojih pucolanskih svojstava, a koja ovise o vrsti i porijeklu pepela.

Na temelju rezultata prethodno provedenih istraživanja, Jose i suradnici [17] su istraživali mogućnost primjene mješavine letećeg i ložišnog pepela u kombinaciji s cementom. Utvrdili su ovisnost hidratacije o omjeru pepela i cementa, temperaturi njege te razdoblju njege. Osim u termoelektranama, znatne količine letećeg pepela, nastaju i spaljivanjem čvrstog komunalnog otpada. Tako se u istraživanju [18] kao dodatak cementu u količinama od 5 % i 10 % koristio leteći pepeo nastao spaljivanjem komunalnog otpada. Rezultati su pokazali kako se tlačna čvrstoća cementom stabilizirane mješavine s dodatkom letećeg pepela povećava s povećanjem cementa, s povećanjem udjela pepela te s produljenjem njege te da 10 % letećeg pepela može zamijeniti 5 % cementa u mješavini. Utvrđeno je kako mješavina letećeg i ložišnog pepela također pozitivno utječe na proces hidratacije. Kako se navodi u izvješću [19], leteći pepeo iz ugljena u mješavini može usporiti proces hidratacije, ali u konačnici, s produljenom njegom može razviti tlačnu čvrstoću istu kao i cement. Razvoj vlačne čvrstoće u funkciji vremena za različite vrste veziva prikazan je na slici 2. [19]. Autori [20] istraživali su utjecaj različitih udjela letećeg pepela i cementa u složenom vezivu na tlačnu i indirektnu vlačnu čvrstoću mješavina pijeska, pri različitim temperaturama i duljinama njege. Zaključili su kako do 25 % cementa u složenom vezivu može biti zamijenjeno letećim pepelom, a da mehanička svojstva mješavine budu zadovoljavajuća. Također su naglasili sporiju hidrataciju letećeg pepela u odnosu na cement, što utječe na smanjenje tendencije pojave pukotina. U nastavku istraživanja mješavina istog sastava [21], pri određivanju dinamičkog modula elastičnosti primijenjene su dvije nerazorne metode: metoda

rezonantne frekvencije i metoda mjerenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa. Uočeno je kako udio letećeg pepela ima izravan utjecaj na vrijednost dinamičkog modula elastičnosti te kako se s povećanjem udjela letećeg pepela u stabilizacijskoj mješavini, vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti smanjuju.



Slika 2. Razvoj vlačne čvrstoće stabiliziranih mješavina u funkciji vremena [19]

Zhang i suradnici [22] istraživali su doprinos letećeg pepela u povećanje otpornosti na smrzavicu lesnog tla koje je stabilizirano letećim pepelom u udjelima od 10 %, 15 % i 20 %. Autori su zaključili kako leteći pepeo u količinama većim od 15 % povećava otpornost lesnog tla na utjecaj smrzavice u usporedbi s čistim lesnim tlom, ali da manje količine letećeg pepela (10 %) ne donose značajno poboljšanje. Tran i suradnici [11] detaljno su analizirali različite načine ublažavanja skupljanja u cementom stabiliziranim slojevima te istakli kako je zamjena cementa materijalima poput letećeg pepela učinkovit pristup za smanjenje skupljanja stabiliziranih slojeva.

2.3. Reciklirana guma

Reciklirana guma zahvaljujući svojoj elastičnosti, u cementom stabiliziranom nosivom sloju može poslužiti u sprječavanju nastanka reflektirajućih pukotina. Tako su Farhan i suradnici [23] istraživali mehanička svojstva mješavine vapnenačkog agregata s gumom stabilizirane cementom. Prirodni agregat je zamijenjen gumenim granulatom veličine frakcije od 6 mm u udjelima 0 %, 15 %, 30 % i 45 %. Pokazalo se kako udio reciklirane gume u mješavini značajno utječe na vrijednost maksimalne suhe prostorne mase. Na temelju izračuna zbijenosti, autori su zaključili kako na smanjenje maksimalne suhe prostorne mase ne utječe samo mala specifična težina gume, već i smanjenje učinkovitosti zbijanja kao rezultat prigušujućeg djelovanja čestica gume. Ispitivanje indirektne vlačne čvrstoće mješavine pokazalo je kako povećanje udjela reciklirane gume za 1 % smanjuje indirektnu vlačnu čvrstoću mješavine za 3 %. Na temelju promatranja razvoja pukotina, autori su pretpostavili da se pukotine šire kroz čestice gume koje apsorbiraju energiju i time produljuju put razvoja pukotina. U daljnjim istraživanjima isti su autori [24] pokazali razliku između smanjenja tlačne i vlačne čvrstoće mješavina s gumom. Proučavanjem distribucije čestica reciklirane gume u mješavinama s manjim udjelom gume, uočena je pravilna vertikalna i radijalna distribucija čestica. S druge strane, mješavine s većim udjelom gume pokazale su veću varijabilnost, a što direktno utječe na smanjenje tlačne i indirektne vlačne čvrstoće mješavine. Liu i suradnici [25] dokazali su kako se deformacija prouzročena skupljanjem smanjuje zamjenom određenog volumena sitnih čestica prirodnog agregata česticama gume. Dodatak gume obično rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava: tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i dinamičkog modula elastičnosti, što je posljedica nedostatka veza između cementne matrice i čestica gume. Pham i suradnici [26] ispitivali su učinak dodatka vezivu (kopolimera) za čestice gume u agresivnom okolišu. Zaključili su kako dodatak vezivu poboljšava učinak veziva u povezivanju čestica te ima pozitivan učinak na trajnost kolnika. Isti autori u radu [27] navode da dodatak gume povećava otpornost mješavine na utjecaj smrzavice u usporedbi s kontrolnom mješavinom te kako dodatak kopolimera vezivu dovodi do neznatnog povećanja promjene duljine uzorka.

2.4. Reciklirani asfalt

Reciklirani asfalt nastaje prilikom rekonstrukcije asfaltnog kolnika i također je predmet istraživanja za primjenu u nevezanim i stabiliziranim nosivim slojevima kolničkih konstrukcija. Kasu i suradnici [28] istraživali su mješavine sastavljene od recikliranog asfalta, agregata i cementa. U radu navode kako je optimalan omjer recikliranog asfalta i prirodnog agregata u mješavini 30 % prema 70 %. Također navode kako mješavine s dodatkom recikliranog asfalta ostvaruju veću duktilnost unatoč smanjenju vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti. Trajnost i tlačna čvrstoća mješavine smanjuju se s povećanjem količine recikliranog asfalta što autori pripisuju hidrofobnoj prirodi bitumena jer se razvijaju slabije veze u kontaktnoj zoni. Slično tome, Isola i suradnici [29] zaključuju kako stabilizacijske mješavine sa 70 % recikliranog asfalta zadovoljavaju zahtjeve za upotrebu u kolničkim konstrukcijama. Autori su proveli laboratorijska istraživanja kako bi definirali odgovarajući sastav mješavine s recikliranim asfaltom te su dobivene rezultate provjerili izgradnjom i praćenjem ponašanja pokusne dionice sa standardnim materijalima i s recikliranim asfaltom, na različitim podlogama. Nakon puštanja prometa, preko pokusne dionice proveden je kontinuirani nadzor tijekom 15 mjeseci. Na kraju ispitivanja, rezultati su pokazali kako je mješavina sa 70 % recikliranog asfalta pokazala bolju krutost od ostalih ispitivanih mješavina. Dobiveni rezultati temeljili su se na uobičajenim metodama ispitivanja: mjerenjem deflektometrom, ispitivanju s uređajem s padajućim teretom i georadarom. Tataranni i suradnici [30] proveli su laboratorijska i *in situ* ispitivanja pod prometnim opterećenjem kako bi istražili mogućnost primjene recikliranog asfalta s otpadnim keramičkim materijalom i drobljenim betonom. Dobiveni rezultati mehaničkih svojstava

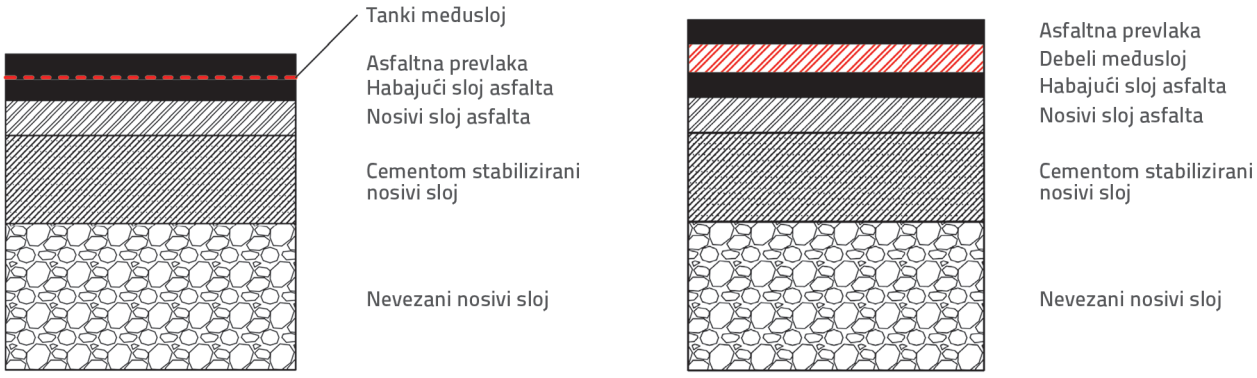
Tablica 1. Utjecaj različitih otpadnih materijala na svojstva cementom stabiliziranih nosivih slojeva

Materijal	Autori	Utjecaj
Zgura iz čeličana	Liu i suradnici [12] Li i suradnici [13] Barišić i suradnici [14, 15] Passeto i Baldo [16]	Smanjenje skupljanja sloja uslijed sušenja Povećanje tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti Povećanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja Poboljšanje veze između veziva i agregata Zamjena prirodnog agregata do 50 % Negativan utjecaj na krutost Mogući toksikološki nusproizvodi
Leteći pepeo	Liang i suradnici [18] Development of New Bituminous Pavement Design Method [19] Dimter i suradnici [20, 21] Zhang i suradnici [22]	Usporavanje hidratacije i ublažavanje skupljanja sloja Povećanje tlačne i vlačne čvrstoće te dinamičkih modula elastičnosti Moguća zamjena cementa u složenom vezivu do 25 % Bolji učinak na svojstva pri njezi uzoraka na nižim temperaturama Povećana otpornost na cikuse smrzavanja i odmrzavanja Moguće otpuštanje teških metala
Reciklirana guma	Farhan i suradnici [23, 24] Liu i suradnici [25] Pham i suradnici [26, 27]	Negativan utjecaj na mehanička svojstva Produljenje puta širenja pukotina Smanjenje naprezanja uslijed skupljanja Povećanje trajnosti uz primjenu dodataka Povećana otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja
Reciklirani asfalt	Kasu i suradnici [28] Isola i suradnici [29] Tataranni i suradnici [30]	Zamjena prirodnog agregata do 70 % Mogućnost kombinacije s drugim otpadnim materijalima

modificiranih mješavina bili su lošiji u usporedbi s referentnom mješavinom. Mješavina s drobljenim betonom postigla je veću krutost u odnosu na ostale ispitane mješavine. Osnovni cilj ovog pristupa bio je spriječiti pojavu pukotina prouzročenih skupljanjem uslijed procesa hidratacije cementom stabiliziranog nosivog sloja, a koje se šire pod utjecajem cikličnog prometnog opterećenja, temperaturnih oscilacija i formiranja ledenih leća u zimskim uvjetima. Sažeti učinci opisanih otpadnih materijala na cementom stabilizirane slojeve prikazani su u tablici 1.

3. Međusloj između starog i novog asfalta i armiranje asfaltnih prevlaka

Asfaltne prevlake su česta metoda sanacije dotrajalih kolnika. Novi asfaltni slojevi svojom ravnošću omogućuju udobnu i sigurnu vožnju, no problem se javlja kada se oštećenja starog i dotrajalog kolnika počnu preslikavati na površinu asfaltne prevlake. Položaj međusloja između asfaltne prevlake i starog kolnika, a čija je osnovna svrha ojačati vezu između ta dva sloja i smanjiti brzinu širenja pukotine u gornji sloj, prikazan je na slici 3.a. Kako bi se spriječilo širenje pukotina u gornji sloj, istraženo je nekoliko antireflektirajućih mjera. Kako navodi Francken [31], međuslojevi se mogu podijeliti na tanke i debele međuslojeve. Tanki slojevi asfaltnih prevlaka se razlikuju prema krutosti. Međuslojevi male krutosti ne ojačavaju kolničku konstrukciju, ali imaju značajnu ulogu u smanjenju koncentracije naprezanja (*engl.* SAMI - tankoslojne prevlake u svrhu sprječavanja reflektirajućih pukotina u sklopu postupka rehabilitacije kolnika). Za razliku od međuslojeva male krutosti, međuslojevi velike krutosti služe za ojačanje kolničke konstrukcije. Materijali prikladni za međuslojeve velike krutosti su geomreže i tkani geotekstili, a međuslojevi male krutosti rade se od netkanih geotekstila. Tanki međuslojevi se mogu promatrati kao dvodimenzionalni materijali, a debeli međuslojevi kao trodimenzionalne strukture. Wang i suradnici [32] istražili su tri vrste ljepljivih premaza koji se koriste: vrući bitumen, razrijeđeni bitumen i bitumensku emulziju (najčešće korištena). S bitumenskom emulzijom je najlakše rukovati, štedi energiju, ekološki je prihvatljiva i sigurna za rukovanje. Uobičajeni postupak za ocjenu ljepljivih premaza je određivanje posmične čvrstoće. Na posmičnu čvrstoću najviše utječe temperatura - povećanjem temperature dolazi do smanjenja posmične čvrstoće. Važan je faktor i odgovarajuća sposobnost tečenja bitumena, koja u kombinaciji s viskoznošću doprinosi povećanju posmične čvrstoće između ljepljivog premaza i asfaltnih slojeva [33]. Ovi zaključci su doneseni na osnovi rezultata ispitivanja posmika na dvije vrste bitumenskih emulzija korištenih kao premaz. Wang i Zhong [34] dokazali su kako smanjenje modula premaza doprinosi povećanju otpornosti na širenje pukotina u asfaltnom kolniku te istakli osjetljivost premaza na temperaturne promjene. Geotekstili i geomreže se u ovim slojevima upotrebljavaju u kombinaciji s bitumenom kako bi se osigurala potrebna povezanost među slojevima. Geotekstili smanjuju prijenos vršnih naprezanja na kontaktu dvaju materijala. Također, geotekstili u kombinaciji s materijalima za brtvljenje s vodonepropusnim svojstvima, štite cementom stabilizirane slojeve od procjeđivanja vode i posljedično negativnog utjecaja smrzavice [35]. Zamora Barraza i suradnici [36] ispitali su utjecaj geotekstila, geomreža



Slika 3. Položaj međuslojeva u kolničkoj konstrukciji: a) tankog međusloja b) debelog međusloja

i tankoslojnih prevlaka (engl. SAMI) na razvoj reflektirajućih pukotina. U dinamičkom ispitivanju koje je simuliralo prometno opterećenje, analizirano je šest antireflektirajućih sustava. Rezultati su pokazali da su svi tretirani uzorci odgodili nastanak reflektirajućih pukotina. Geomreže su se pokazale kao najbolja modifikacija, koja ovisi o modulu geomreže, krutosti i poprečnom presjeku. Walubita i suradnici [37] u in situ ispitivanju provedenom na cesti US Rute 59 u Atlanti (Texas USA), dokazali su pozitivan učinak armiranja asfaltnih prevlaka geomrežama. Autori su najprije ocijenili stanje starog i dotrajalog kolnika pomoću georadara, uređajem s padajućim teretom i dinamičkim penetrometrom. Praćene su tri dionice: kontrolna dionica (armirana geomrežom), dionica armirana staklenim vlaknima i poliesterom te dionica armirana polipropilenom.

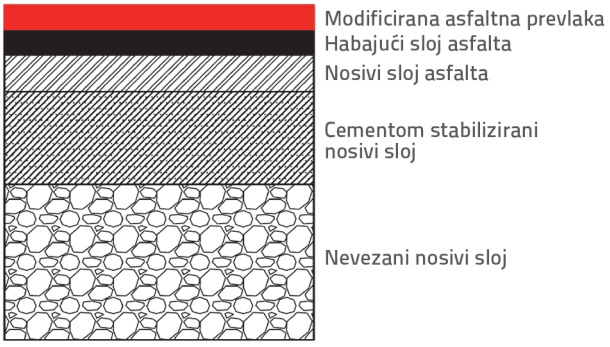
Uporaba geosintetika u međuslojevima može se smatrati armiranjem asfaltnog sloja. Debeli međuslojevi (slika 3.b) korišteni su za smanjivanje naprezanja te kao toplinska izolacija u područjima s hladnom klimom radi smanjenja skupljanja cementom stabiliziranog nosivog sloja [38]. Shafabakhsh i Ahmadi [39] istražili su utjecaj modificiranog međusloja izvedenog od pješčanog asfalta i asfaltne prevlake na širenje reflektirajućih pukotina. Tvrdi cestograđevni bitumen je modificiran kombinacijom granulirane gume i hidratiziranog vapna te kombinacijom granulirane gume i prirodnog zeolita. Količina gume je iznosila 15 % od ukupne mase veziva, dok je količina hidratiziranog vapna mijenjana u iznosima 1 %, 3 % i 5 % od ukupne mase mješavine, a količina prirodnog zeolita mijenjana je u iznosima 3 %, 5 % i 7 % od mase veziva. Osnovni zaključak provedenog ispitivanja bio je kako međusloj od pješčanog asfalta može apsorbirati energiju čime odgađa širenje reflektirajućih pukotina.

4. Modifikacija svojstava asfaltnih prevlaka

Ugrađena asfaltna prevlaka čini novi habajući sloj kolnika. Dotrajala površina starog asfaltnog kolnika se freza i tretira bitumenom na što se potom ugrađuje novi habajući sloj. Za asfaltne prevlake se obično koriste standardne asfaltne mješavine. Kako navode autori Sun i suradnici [38], najutjecajniji čimbenici na ponašanje prevlaka su debljina, svojstva asfaltne mješavine i stanje kolnika na koji se ugrađuje prevlaka. Osnovni cilj ove mjere je modificirati svojstva asfaltne mješavine i poboljšati njezinu otpornost na pojavu reflektirajućih pukotina. Svojstva asfaltne mješavine se mogu modificirati zamjenom prirodnog agregata s alternativnim materijalima, upotrebom novih veziva ili aditiva za obavijanje zrna agregata. Almaali i Al-Busaltan [40] modificirali su tanke asfaltne prevlake mijenjajući količinu granulirane gume i polietilena male gustoće. Zaključili su kako korišteni materijali pridonose otpornosti na pojavu trenutačnih deformacija. Radeef i suradnici [41] zaključili su kako asfaltna mješavina s gumom postiže niže vrijednosti vlačne čvrstoće nakon njege u vlažnim uvjetima, ali je za pojavu loma tih mješavina potrebna veća energija nego za kontrolnu mješavinu. Picado-Santos i suradnici [42] istražili su mogućnost korištenja granulirane gume u asfaltnim mješavinama proizvedenim različitim postupcima. Kod mokrog postupka, smrvljena guma je pomiješana s bitumenom na visokim temperaturama i služila je kao vezivo. U radu se navodi kako je kod ovakve mješavine dodatkom gume došlo do poboljšanja mehaničkih svojstava i trajnosti. U asfaltnim mješavinama proizvedenim suhim postupkom korištena je krupnija frakcija smrvljene gume koja se dodala u mješavinu agregata i punila, a prije dodavanja bitumena, te je imala funkciju agregata. Ta mješavina pokazala je bolju otpornost na zamor, bolju otpornost na pojavu trenutačnih deformacija i reflektirajućih pukotina pri visokim temperaturama. Asfaltna mješavina s recikliranom gumom koja se dodala u bitumen, pri tome potpuno otopila u bitumenu i prevezla na gradilište kao gotovo vezivo (engl. terminal blend process), pokazala je poboljšanje otpornosti na kolotraženje i zamor. Autori [42] su zaključili kako je asfaltna mješavina s recikliranom gumom nešto skuplja od standardne asfaltne mješavine, ali ima dobra svojstva, veću trajnost i prihvatljivija je s ekološkoga gledišta i može se reciklirati.

Jedan od načina modifikacije svojstava jest i dodavanje različitih vlakana (prirodnih ili sintetičkih) u asfaltnu mješavinu. Tako su Xianyang i suradnici [43] istraživali utjecaj četiri vrste različitih vlakana u asfaltnim mješavinama: ligninska, sepiolitna, bazaltna i aramidna vlakna. Na mješavinama su ispitani moduli elastičnosti pri indirektnom vlačnom opterećenju, zamor mješavina, indirektna vlačna čvrstoća, osjetljivost na utjecaj

vode, otpornost prema cikličnom opterećenju te je provedena i vizualna analiza. Autori su zaključili kako vlakna u asfaltnoj mješavini pozitivno utječu na žilavost pri lomu u usporedbi sa standardnim asfaltnim mješavinama. Glavni je zaključak ispitivanja [43] taj da vlakna poboljšavaju svojstva asfaltnih mješavina, produljuju im uporabljivost i da nemaju nikakav negativan utjecaj na asfaltnu mješavinu. Nadalje, istaknuto je kako dodatkom vlakana u asfaltnoj mješavini nije uočeno nikakvo poboljšanje u smislu osjetljivosti na vodu. Pozitivan učinak bazaltnih vlakana je istaknut i u radu autora Guoa i suradnika [44], gdje su istraženi faktor kritičnog intenziteta naprezanja i kritična energija loma. Udio bazaltnih vlakana iznosio je 0.5 % u asfaltnoj mješavini. Autori navode kako vlakna odgađaju dosezanje kritičnih naprezanja na srednjim temperaturama. Isto tako, dokazan je i doprinos vlakana duktilnosti te nosivosti asfalta nakon dosezanja vršnog opterećenja. Ispitivane su asfaltne mješavine s vlaknima šećerne trske koja su pridonijela povećanju otpornosti na pucanje pri niskim temperaturama, kako se navodi u radu [45]. Pomoću elektronskog mikroskopa je uočeno kako vlakna šećerne trske imaju korugiranu površinu koja povećava učinak "sidrenja" u vezivu. Polipropilenska vlakna u asfaltnoj mješavini također povećavaju otpornost na pucanje asfalta pri niskim temperaturama [46]. Autori navode kako duža vlakna i veća količina vlakana pridonose vlačnoj čvrstoći mješavina jer vlakna premošćuju moguće pukotine u asfaltnim mješavinama, a udio od 1 % vlakana određen je kao optimalan u asfaltnim mješavinama. Wang i suradnici [46] istraživali su asfaltnu mješavinu s 0,3 % bambusovih vlakana pod različitim opterećenjima i temperaturnim uvjetima.



Slika 4. Kolnička konstrukcija s modificiranom asfaltnom prevlakom

Provedena su ispitivanja dinamičkog modula, kolotraženja i zamora na temelju čega su autori zaključili kako bambusova vlakna poboljšavaju ponašanje asfalta prilikom razvoja pukotina na srednjim temperaturama, a na visokim ne donose značajno poboljšanje. Osim vlakana, radi poboljšanja svojstava asfaltnih mješavina, provedena su istraživanja s novom vrstom geoćelija, poboljšane otpornosti na visoke temperature [47]. Geoćelije su geosintetički materijal koji se sastoji od skupa polietilenskih traka visoke gustoće. U istraživanju [47] analizirao se utjecaj geoćelija u asfaltnoj mješavini na tlačnu i vlačnu čvrstoću, smicanje, osjetljivost na vodu te zamor mješavine. Rezultati su pokazali kako asfaltna mješavina armirana geoćelijama postiže veće čvrstoće, ima poboljšanu otpornost na smicanje i manji pad čvrstoće nakon ciklusa smrzavanja-odmrzavanja u usporedbi s asfaltnom mješavinom bez geoćelija. Dodatno su istraženi još neki materijali čija bi primjena u asfaltnim mješavinama mogla poboljšati svojstva, kao što su motorno i jestivo ulje i grafen [48-50]. Tako motorno i jestivo ulje u količinama između 1 % i 4 % pridonose otpornosti asfaltnih mješavina na starenje [48, 49]. Grafen u količini od 1 % mase mješavine snižava točku razmekšanja veziva i povećava mu viskoznost.

5. Zaključak

Cilj je ovog rada bio dati pregled mjera prevencije i sanacije reflektirajućih pukotina u asfaltnom kolniku s posebnim osvrtom na primjenu otpadnih materijala. Posljedica nastanka reflektirajućih pukotina je oštećena površina kolnika koja zahtijeva rekonstrukciju. Pregledom su obuhvaćene tri mjere sanacije reflektirajućih pukotina i jedna mjera sprječavanja nastanka reflektirajućih pukotina modifikacijom svojstava asfaltnih mješavina. Mjera sprječavanja nastanka pukotina se smatra ekonomski najprihvatljivijim modelom jer podrazumijeva sprječavanje nastanka pukotina i njihovo širenje, a time i sprječavanje narušavanja vozne sposobnosti kolnika. Modifikacija cementom stabiliziranih nosivih slojeva uključuje upotrebu otpadnih materijala kao što su čeličanska zgura, leteći pepeo, reciklirana guma, reciklirani asfalt, a koji mogu biti zamjena za prirodni agregat ili dopuna veziva. Upotrebom pojedinih otpadnih materijala moguće je postići manje skupljanje cementom stabiliziranog sloja te poboljšati neka od svojstava sloja, ali i sačuvati nalazišta prirodnih agregata te smanjiti količinu otpada na odlagalištu. Svrha ostalih spomenutih mjera izvođenje međuslojeva između starog i novog asfaltnog sloja te ojačanje i modifikacija asfaltne prevlake jest spriječiti širenje postojećih pukotina na površinski sloj kolnika. Spomenute mjere, osim upotrebe otpadnih materijala, uključuju i upotrebu geosintetika i bitumenskih veziva. Tanki međusloj između starog i novog asfaltnog sloja treba oponašati membranu koja štiti od širenja pukotina u gornji sloj asfalta, a što se postiže bitumenskim vezivom ili kombinacijom s geosinteticima (geotekstili i geomreže). Debeli međuslojevi izvode se od asfaltnih mješavina odgovarajućih svojstava te podrazumijevaju upotrebu prirodnih agregata u mješavini. Opće je poznato kako debljina asfaltnih slojeva povećava nosivost kolničke konstrukcije, ali zadatak inženjera je pronaći način kako osigurati dovoljnu nosivost kolnika pri čemu je potrebno voditi računa o odgovornoj upotrebi prirodnih resursa. Za prevenciju reflektirajućih pukotina u asfaltnim prevlakama, do danas je istraženo više različitih vrsta vlakana, prirodnog ili sintetičkog porijekla, otpadnih materijala, posebice reciklirane gume te dodataka koji modificiraju vezivo, a istraživanja novih materijala i/ili dodataka mješavinama se nastavljaju i dalje.

Zahvala

Izrada ovog rada financirana je sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u sklopu Uspostavnog istraživačkog projekta UIP - 2019 - 04 - 8195 "Cementom stabilizirani nosivi slojevi s otpadnom gumom za održive kolnike - RubSuPave".

LITERATURA

[1] Babić, B.: Projektiranje kolničkih konstrukcija. Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 1997.

[2] Haas, R., Joseph, Ponniah, E.: Design oriented evaluation af alternatives for reflection cracking through pavement overlays, In: First International Conferenec on Reflective Cracking in Pavements, 1989.

[3] Rigo, J.M., Degeimbre, R., Francken L. (eds): Reflective Cracking in Pavements. In: State of the Art and Design Recommendations, Liege, Belgium, 1993, pp. 672.

[4] Adaska, W.S., Luhr, D.R.: Control of reflective cracking in cement-stabilized pavements, In: Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements, Limoges, France, 2004.

[5] Pais, J.: The reflective cracking in flexible pavements, Romanian Journal of Transporat Infrastructure, 2 (2013), pp. 63-87.

[6] Mavar, R., Vrkljan, I., Štefanel, M.: Geotechnical Engineering in Transportation Projects, First edit. Novigrad, Croatia: Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1994.

[7] Wang, X., Li K., Zhong, Y., Xu, Q., Li, C.: XFEM simulation of reflective crack in asphalt pavement structure under cyclic temperature, Construction and Building Materials, 189 (2018), pp. 1035-1044.

[8] Noori, M., Tatari, O., Nam, B., Golestani, B., Greene, J.: A stochastic optimization approach for the selection of reflective cracking mitigation techniques, Transportation Research Part A, 69 (2014), pp. 367-378.

[9] Buttlar, W.G., Chabot, A., Dave, E.V., Petit, C., Tebaldi, G. (eds): Mechanisms of Cracking and Debonding in Asphalt and Composite Pavements, 2018, https://doi.org/10.1007/978-3-319-76849-6.

[10] Wang, X., Zhong, Y.: Reflective crack in semi-rigid base asphalt pavement under temperature-traffic coupled dynamics using XFEM, Construction and Building Materials, 214 (2019), pp. 280-289.

[11] Tran, N.P., Gunasekara, C., Law, D.W., Houshyar, S., Setunge, S., Cwirzen, A.: A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials, Journal of Building Engineering, 38 (2021), pp. 17.

[12] Liu, J, Yu, B, Wang, Q.: Application of steel slag in cement treated aggregate base course, Journal of Cleaner Production, 269 (2020), https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121733.

[13] Li, W., Lang, L., Lin, Z., Wang, Z., Zhang, F.: Characteristics of dry shrinkage and temperature shrinkage of cementstabilized steel slag, Construction and Building Materials, 134 (2017), pp. 540-548.

[14] Barišić, I., Marković, B., Zagvozda, M.: Freeze-thaw resistance assessment of cementbound steel slag aggregate for pavement structures, International Journal of Pavement Engineering, 20 (2017), pp. 448-457.

[15] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag, International Journal of Pavement Engineering, 17 (2015), pp. 753-762.

[16] Pasetto, M., Baldo, N.: Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases, Construction and Building Materials, 108 (2016), pp. 112-118.

[17] Jose, A., Nivitha, M.R., Krishnan, J.M., Robinson, R.G.: Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy, Construction and Building Materials, 263 (2020), pp. 13.

[18] Liang, S., Chen, J., Guo, M., Feng, D., Liu, L., Qi, T.: Utilization of pretreated municipal solid waste incineration fly ash for cement-stabilized soil, Waste management, 105 (2020), pp. 425-432.

[19] Development of New Bituminous Pavement Design Method, Brussels, 1999.

[20] Dimter, S., Rukavina, T., Dragčević, V.: Strength Properties of Fly Ash Stabilized Mixes, Road Materials and Pavement Design, 12 (2011), pp. 687-697.

[21] Dimter, S., Rukavina, T., Minažek, K.: Estimation of elastic properties of fly-ash stabilized mixes using nondestructive evaluation methods, Construction and Building Materials, 102 (2016), pp. 505-514.

[22] Zhang, Y., Johnson, A.E., White, D.J.: Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess, Transportation Geotechnics, 21 (2019), pp. 10.

[23] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis, Construction and Building Materials, 105 (2016), pp. 94-102.

[24] Farhan, A.H., Dawson, A.R., Thom, N.H.: Compressive behaviour of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, Construction and Building Materials, 262 (2020), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120038.

[25] Liu, Q., He, M., Wang, J.: Research on improving shrinkage performance of cement stabilized gravel with waste rubber particles, Advanced Materials Research, 963 (2014), pp. 1446-1450.

[26] Pham, N.P., Toumi, A., Turatsinze, A.: Evaluating damage of rubberized cement-based composites under aggresive environments, Construction and Building Materials, 217 (2019), pp. 234-241.

[27] Pham, N.P., Toumi, A., Turatsinze, A.: Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite, Construction and Building Materials, 207 (2019), pp. 528-534.

[28] Kasu, S.R., Manupati, K., Muppireddy, A.R.: Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers, Construction and Building Materials, 252 (2020), pp. 11.

[29] Isola, M., Betti, G., Marradi, A., Tebaldi, G.: Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement, Construction and Building Materials, 48(2013), pp. 238-247.

[30] Tataranni, P., Sangiorgi, C., Simone, A, Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G.: A laboratory and field study on 100% Recycled Cement Bound Mixture for base layers. International Journal of Pavement and Technology, 11(2018), pp. 427-434.

[31] Francken, L.: Laboratory simulation and modeling of overlay systems, In: Rigo JM, Degeimbre R, Francken L (eds) Reflective cracking in pavements. Liege, Belgium: W&FN Spon, 1993, p. 496.

[32] Wang, J., Xiao, F., Chen, Z., li X, Amirkhanian, S.: Application of tack coat in pavement engineering, Construction and Building Materials, 152 (2017), pp. 856-871.

[33] Hu, X., Lei, Y., Wang, H., Jiang, P., You, Z.: Effect of tack coat dosage and temperature on the interface shear properties of asphalt layers bonded with emulsified asphalt binders, Construction and Building Materials, 141 (2017), pp. 86-93.

[34] Wang, X., Zhong, Y.: Influence of tack coat on reflective cracking propagation in semi-rigid base asphalt pavement, Engineering Fracture Mechanics, 213 (2019), pp. 172-181.

[35] Jaecklin, F.P.: Geotextile Use in Asphalt overlays - Design and Installation Techniques for Successful Applications, In: Rigo J.M., Degeimbre R., Francken L. (eds) Reflective cracking in pavements, Liege, Belgium, 1993, p. 496.

[36] Zamora-Barraza, D., Calzada-Perez, M.A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A.: Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone, Geotextiles and Geomembranes, 29 (2011), pp. 130-136.

[37] Walubita, L.F., Mahmoud, E., Lee, S.I., Carrasco, G., Komba, J., Fuentes, L., Nyamuhokya, T.P.: Use of grid reinforcement in HMA overlays - A Texas field case study of highwayUS 59 in Atlanta District, Construction and Building Materials, 213 (2019), pp. 325-336.

[38] Sun, Z., Xu, Y., Tan, Y., Zhang, L., Xu, H., Meng, A.: Investigation of sand mixture interlayer reducing the thermal constraint strain in asphalt concret overlay, Construction and Building Materials, 171 (2018), pp. 357-366.

[39] Shafabakhsh, G., Ahmadi, S.: Reflective cracking reduction by a comparison between modifying asphalt overlay and sand asphalt interlayer: an experimanetal evaluation, International Journal of Pavement Engineering, 22 (2019), pp. 192-200.

[40] Almaali, Y.A., Al-Busaltan, S.: Permanent deformation characteristics of modified thin overlay bitumen mixtures comprising waste polymers, Materials Today: Proceedings, 42 (2021), pp. 2717-2724.

[41] Radeef, H.R., Hassan, N.A., Abidin, A.Z.R., Mahmud, A.M.H., Yaacob, H., Mashros, N., Mohamed, A.: Effect of aging and moisture damage on the cracking resistance of rubberized asphalt mixture, Materials Today: Proceedings, 42 (2021), pp. 2853-2858.

[42] Picado-Santos, L.G., Capitao, S.D., Neves, J.M.C.: Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review, Construction and Building Materials, 247 (2020), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577.

[43] Xianyang, X., Chen, S., Li, Y., Pei, J., Zhang, J., Wen, Y., Li, R., Cui, S.: Effect of different fibers on the properties of asphalt mastics, Construction and Building materials, 262 (2016) 8, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120005.

[44] Guo, Q., Chen, Z., Liu, P., Li, Y., Hu, J., Gao, Y., Li X.: Influence of basalt fiber on mode I and II fracture properties of asphalt mixtures at medium and low temperatures, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 112 (2021), https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102884.

[45] Li, Z., Zhang, X., Fa C., Zhang, Y., Xiaong, J., Chen, H.: Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers, Construction and Building Materials, 248 (2020), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118648.

[46] Wang, S., Mallick, R.B., Rahbar, N.: Toughening mechanisms in polypropylene fiber-reinforced asphalt mastic at low temperature, Construction and Building Materials, 248 (2020), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118690.

[47] Li, X., Zhu, Y., Su, T., Wang, X., Zhang, X.: Study on performance improvement of new geocell reinforced asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 273 (2021), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121693.

[48] Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., Zou, X.: Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture, Construction and Building Materials, 276 (2021), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122138.

[49] Li, X., Wang, Y.M., Wu, Y.L., Wang, H-R., Chen, M., Sun, H.D., Fan, L.: Properties and modification mechanism of asphalt graphene as modifier, Construction and Building Materials, 272 (2021), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121919.

[50] Phan, T.M., Nguyen, S.N., Seo, C.B., Park, D.W.: Effect of treated fibers on performace of asphalt mixture, Construction and Building Materials, 274 (2021), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122051.