

Primljen / Received: 12.2.2023.

Ispravljen / Corrected: 20.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 30.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.9.2023.

Upotreba vlakana celuloze u splitmastiksasfaltu

Autor:

Izv.prof.dr.sc. **Abdulgazi Gedik**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Malatya Turgut Ozal, Turska

Tehnički i prirodoslovni fakultet

Odjel za građevinarstvo

abdulgazi.gedik@ozal.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Abdulgazi Gedik

Upotreba vlakana celuloze u splitmastiksasfaltu

U ovom istraživanju su utvrđene optimalne količine vlakana celuloze (engl. *cellulose fibre* - CF) kako bi se bolje razumio njihov utjecaj na volumetrijske projektne parametre splitmastiksasfalta (engl. *stone mastic asphalt* - SMA) s bitumenom modificiranim polimerom (engl. *polymer-modified bitumen* - PMB). Proizvedeni su uzorci SMA-PMB, a njihova primarna volumetrijska svojstva uspoređene su s onima u mješavinama SMA-PMB bez vlakana celuloze (CF). Rezultati su otkrili da je dodavanjem CF-a kao stabilizirajućeg aditiva došlo do povećanja optimalnog udjela veziva, šupljina u agregatu minerala te udio šupljina ispunjen vezivom, ali je došlo do smanjenja udjela šupljina i specifične mase. Rezultati pokazuju da upotreba CF-a, zajedno s povećanim optimalnim udjelom veziva neznatno povećavaju primarne troškove proizvodnje SMA.

Ključne riječi:

vlakna celuloze, stabilizator, splitmastiksasfalt, volumetrijski projekt

Research Paper

Abdulgazi Gedik

Utilising cellulose fibre in stone mastic asphalt

In this study, the optimum amount of cellulose fibre (CF) use was evaluated to better understand its influence on the volumetric design parameters of stone mastic asphalt (SMA) with polymer-modified bitumen (PMB). SMA-PMB specimens were manufactured, and their primary volumetric properties were compared with those of the respective SMA-PMB mixtures without CF. The results revealed that the addition of CF as a stabilising agent increased the optimal binder content, voids in the mineral aggregate, and voids filled with binder but decreased air voids and bulk specific gravity. The results suggest that the utilisation of CF, along with an increased optimum binder content, slightly increased the primary manufacturing cost of SMAs.

Key words:

cellulose fibre, stabilizer, stone mastic asphalt, volumetric design

1. Uvod

Osim razvoja i rasta u ekonomskom smislu, globalni se prijevoz u zadnjih nekoliko desetljeća povećao. Neviđeno povećanje potražnje za putničkim i teretnim prijevozom zahtijevalo je izgradnju dodatnih cesta koje su i dalje najpristupačniji i široko rasprostranjeni načini prijevoza diljem svijeta u usporedbi s drugim načinima prijevoza poput zračnih linija, željeznica, obalnih i drugih multidisciplinarnih načina. Izgradnja trajnih cesta s fleksibilnim kolnicima koji se sastoje od asfaltnih slojeva zahtijeva veliko financiranje od strane vlade. Osim inicijalnih troškova izgradnje, znatan iznos financiranja koji se ponekad previdi periodično se dodjeljuje za djelovanje, očuvanje, održavanje, popravak i rehabilitaciju kolnika koji su već otvoreni za odvijanje prometa [1, 2]. Zato se projektiranje kolničkih konstrukcija bez pogrešaka koji utječu na sveukupne troškove smatra prioriteta u inženjerstvu jedne od najvažnijih javnih imovina.

U novije vrijeme, asfaltne ceste pokrivene konvencionalnim bitumenskim mješavinama ispunile su tražene tehničke specifikacije te su prethodno dobro podnijele osovinska opterećenja. Međutim, zbog većeg pritiska koji čine gume te zbog povećanja osovinskih opterećenja koja su posljedica povećanog broja teških teretnih vozila, uobičajeni kolnici ograničene čvrstoće ne uspijevaju funkcionirati kad su izloženi svim vrstama opterećenja i toplinskih uvjeta [3, 4]. Ranija pogoršanja koja izazivaju štetu poput kolotražnja i niske temperature te pucanja uslijed zamora materijala koji nastaje u takvim kolnicima na kraju rezultira prijevremenim slomom. S obzirom na to, zbog pojave tih lomova unaprijedeno je istraživanje u tehnologiji kolnika kako bi se proučile metode poboljšanja cestograđevnog bitumena i klasičnog tipa asfalta.

Modifikacija polimera obično se provodi kako bi poboljšala reološka svojstva cestograđevnog bitumena. Najčešći polimeri uključuju stiren-butadien kaučuk (engl. *Styrene Butadiene Rubber* - SBR), stiren-butadien-stiren (engl. *Styrene Butadiene Styrene* - SBS) i polietilen (PE). Zbog ponovljenih lanaca malih molekula, ti polimeri čine bitumen krućim, otpornijim na kolotražnje te manje osjetljivim na temperaturu, što povećava njegov učinak kad je izložen djelovanju prometa teških vozila i u uvjetima toplog vremena. Štoviše, polimerni modifikatori pomažu mekšim vezivima da zadrže svoju obradivost i fleksibilnost u odnosu na pucanje izazvano niskom temperaturom u uvjetima hladnog vremena [5]. Osim polimerne modifikacije, druga značajna svojstva uključuju povećanu čvrstoću, adheziju, koheziju i otpornost na trajnu deformaciju i zamor [6].

Ovisno o gradaciji agregata, asfaltne mješavine mogu se kategorizirati u dvije glavne skupine: vruće asfaltne mješavine tipa asfaltbeton (engl. *hot mix asphalt* - HMA) i splitmastiksasfalt (SMA) [7]. SMA, mješavina diskontinuiranog sastava (70-80 % grubi agregati, 8-12 % punilo, 6-7 % bitumen) razvila se u Njemačkoj ranih 1960-ih te je zatim pronašla svoju široku primjenu u Europi, Australiji, Japanu i SAD-u te drugim dijelovima svijeta [8, 9]. U usporedbi s konvencionalnom HMA, primjena

SMA mješavina ima svojih prednosti i nedostataka. Zbog svoje velike frakcije grubog agregata i čvrste skeletne strukture, SMA mješavine imaju prednost u smislu izvanredne trajnosti, povećane otpornosti na proklizavanje, poboljšane izvedbe u odnosu na reflektivne pukotine, zamor, kolotražnje, prednost u smislu smanjenog onečišćenja bukom izazvanom prometom te smanjeni hidroplaning. Ipak, uključivanje relativno prekomjerne količine bitumena u SMA izaziva neke nedostatke poput većih inicijalnih troškova proizvodnje i problema vezanih uz drenažu veziva [10]. Upotreba veće količine bitumena pripisivala se prisutnosti relativno velikog udjela grubog agregata i mineralnog punila. Zato je održavanje veziva oko agregata u SMA mješavinama ključno za prevenciju prodiranja vode i štete izazvane vlagom. Upotreba raznih recikliranih punila, posebice letećeg pepela razreda C, pokazalo se da značajno poboljšava otpornost na štetu izazvanu vlagom [11, 12]. Brojna istraživanja pokušala su nadvladati ograničenje izazvano razdvajanjem i drenažom bitumena u SMA mješavinama, a znanstvenici su postigli dogovor vezan uz primjenu bitumena modificiranog polimerom (PMB) i/ili uz dodavanje stabilizirajućih aditiva. Iako se za obični PMB kaže da zamjenjuje stabilizirajuće aditive, zbog njihove termodinamičke nekompatibilnosti i ograničene izvedbe kad se koristi samo u SMA mješavini, oni se neadekvatno nose s destruktivnim kolničkim nepravilnostima poput pucanja, kolotražnja i štete izazvane vlagom [13-15]. Međutim, pokazalo se da upotreba stabilizatora u SMA mješavini vodi do zgasnutog i rasutog bitumena, umjerene drenaže, morta ojačanog bitumenom, homogenije strukture i značajnog povećanja u ukupnoj izvedbi mješavine [16-18].

Uzimajući u obzir potencijalne koristi u upotrebi polimera i stabilizatora zajedno, cilj je ovog istraživanja procijeniti utjecaj stabilizirajućeg aditiva na projektna svojstva SMA s PMB. Kako bi se postigao taj cilj, određena su najčešća volumetrijska svojstva uključujući ukupan udio šupljina, šupljine u mineralnom agregatu, šupljine ispunjene bitumenom, nasipna gustoća i optimalna količina bitumena. Štoviše, provedena je usporedna analiza troškova koja se tiče učinka koji ima uvođenje stabilizirajućeg aditiva.

2. Pregled literature

Mineralna vlakna i vlakna celuloze (CF) najčešći su stabilizirajući aditivi u proizvodnji SMA kako bi spriječili i smanjili dreniranje odnosno ocjeđivanje veziva za vrijeme prijevoza i ugradnje bitumenskih mješavina. Općenito se dodaju u rasponu od 0,3 do 0,4 %, ovisno o prirodi vlakana i njihovih oblika. Dosad su provedena brojna istraživanja s ciljem razvoja jeftinijih, izdašnih, održivih materijala i materijala koji su ekološki prihvatljivi kao aditivi ojačanja za SMA mješavine. Prema tome, ispitan je širok raspon organskih, sintetičkih, otpadnih i prirodnih materijala kako bi se procijenila njihova izvedivost u proizvodnji SMA. Dokazano je da kamena vuna kao mineralno vlakno i poliester kao organsko vlakno učvršćuju izvedbu SMA ispunjavanjem šupljina i povećanjem spoja kamen-na-kamen. Optimalna količina veziva bila je veća za SMA mješavine s poliesterom

nego one s kamenom vunom [9]. Koefteci [19] je naglasio da će ugrađivanje 4 % vulkanskog mineralnog vlakna u SMA mješavinu osigurati poželjnu izvedbu u asfaltnim kolnicima. U istraživanju koje se temelji na izvedbi predlaže se upotreba 3 % keramičkih vlakana kako bi se poboljšala otpornost kolotražnja SMA [20]. García-Travé i dr. ispitali su održivost uvođenja obnovljenih geomembrana u SMA kako bi odredili isplative stabilizirajuće aditive [21]. Rezultati ispitivanja pokazali su da je geomembranski otpad, zbog toga što sadrži polimere i vlakna u fazi bitumena, naprijedio izvedbu SMA mješavine u smislu poboljšane otpornosti na štetu izazvanu vlagom i na kolotražnje te na ublažene probleme koji se tiču dreniranja veziva. Kako bi se riješio sve veći teret odlaganja opušaka (engl. *cigarette butt* - CB), inkapsulirani CB-i uključeni su u velike asfaltna istraživačke projekte. Uočena poboljšanja u stabilnosti, modulu otpornosti i otpornosti na ocjeđivanje bitumena predlažu CB kao obećavajuću zamjenu za netaknuti CF (vlakna celuloze) i grube agregate u SMA mješavinama [7, 22]. Putman i Amirkhanian istražili su mogućnost uključivanja otpadnih vlakana u SMA [23]. Iz perspektive izvedbe, SMA mješavine koje imaju vlakna tepiha i otpadne gume pokazale su povećanu žilavost, obećavajuću osjetljivost na vlagu te otpornost na trajnu deformaciju. Štoviše, uočilo se da mješavine s vlaknima gume imaju 0,1 % niži optimalni udio bitumena, odnosno mješavine s vlaknima tepiha imaju 0,45 % niži optimalni udio bitumena nego SMA mješavine s CF-om. U drugom istraživanju, Oner i Ozdas tvrdili su da upotreba tekstilnog otpada umjesto CF-a u SMA mješavinama povećava Marshallovu stabilnost i smanjuje dreniranje veziva, trošak asfaltnog kolnika te onečišćenje okoliša [24].

Recikliranje prirodnih vlakana smatra se ekološki prihvatljivom metodom za proizvodnju SMA mješavina. Iz tog razloga ispitana su različita vlakna kao stabilizirajući aditivi. U jednom istraživanju, vlakna banane (pri 0,3 %) duljine 15-20 mm rezultirale su očito produljenim zamornim rokom trajanja SMA mješavina te povećanjem otpornosti na pojavu kolotražnja [25]. Ipak, taj scenarij je obratan kad su koristila vlakna kokosa i jute. SMA s vlaknima kokosa je pokazala kraći zamorni rok trajanja zbog svoje niže otpornosti na pucanje, a SMA s vlaknima jute se pokazala ranjivijom na trajne deformacije zbog svojih niskih vrijednosti akumulirane deformacije u ispitivanju dinamičkog puzanja [26, 27]. Ostali značajni primjeri ispitanih prirodnih vlakana su kokosovo vlakno [28], sisal [29], kukuruzna stabljika [30] i palmino ulje [31].

Nedavnim istraživanjem utvrđeno je da zrela vlakna celuloze smanjuju plastične deformacije pri visokoj temperaturi, kao i pucanje i otpornost na zamor bitumenskog morta koji u konačnici stvara potencijalnu barijeru za olakšavanje recikliranja SMA i njezine ponovne upotrebe [32]. Što se tiče toga, istraživanje mogućnosti proizvodnje mješavine SMA bez vlakana pokazalo je da bi primjena gume (istrošene gume) u bitumenu modificiranim SBS-om imala značajan učinak na performanse SMA [33]. Rezultati osjetljivosti na vodu, indirektna vlačna čvrstoća, dreniranja veziva i ispitivanja trajne deformacije potvrdili su pretpostavku da zajednički učinak gume

i SBS modifikacije poboljšava ekonomičnu proizvodnju SMA bez potrebe za vlaknima celuloze.

3. Materijali i metode

3.1. Bitumen i njegova modifikacija

U istraživanju se koristilo čisto konvencionalno vezivo čiji je razred penetracije 50/70, a proizvela ga je Turska korporacija nafte. Tipična sintetična guma SBR služila je za modifikaciju bitumena. Kako bi se odredila optimalna količina ovog modificirajućeg aditiva, dvije su različite količine SBR-a dodane čistom bitumenu (8 % i 10 % po težini veziva). Nakon dodavanja SBR-a čistom vezivu razreda B50/70 u ravnomjernoj raspodjeli, modifikacija bitumena provedena je primjenom digitalnog elektromehaničkog miksera pri stalnoj temperaturi miješanja koja iznosi 160 °C i stalnoj brzini miksanja koja iznosi 1000 rotacija (rpm) u trajanju jednog sata. Kako bi se spriječilo ili smanjilo starenje veziva, ishlapljivanje, lako isparavanje i oksidacija koja se može dogoditi tijekom miksanja, te kako bi se dobio okoliš za miješanje pri stalnoj temperaturi, mikser je pokriven poklopcem; štoviše, spriječen je svaki doticaj sa zrakom. Nakon što je završio proces modifikacije, označena su veziva modificirana gumom s različitim kodovima te su stavljena u zatvorene spremnike za skladištenje, a bili su udaljeni od visokih temperatura i ultraljubičastih zraka.

Kako bi se oponašalo kratkoročno starenje modificiranog bitumena tijekom skladištenja, prijenos na asfaltnu bazu, miješanje s agregatom u postrojenju, prijevoz proizvedene asfaltna mješavine na radno mjesto, ugradnja slojeva i zbijanje, uzorci su izloženi RTFOT metodi prema normi EN 12607-1 [34]. Kako bi se simuliralo dugoročno starenje modificiranog bitumena u asfaltnim cestama koje su već u uporabi, provedeno je ispitivanje u posudi pod tlakom (PAV) u skladu s normom EN 14769 na uzorcima modificiranog veziva koji su prethodno starjeli RTFOT metodom [35].

Najčešće primjenjivana konvencionalna i reološka ispitivanja veziva (penetracija, točka omekšavanja, elastični povrat, točka plamišta i točka paljenja, specifična težina, stabilnost skladištenja, promjena težine, dinamički smični reometar i reometar savijajućeg snopa) provedena su kako bi se procijenila tehnička svojstva uzoraka modificiranog bitumena u fazi kad nema starenja, u fazi kratkoročnog starenja i fazi dugoročnog starenja. Tablica 1. prikazuje ispitivanja, relevantne norme i dobivene rezultate.

Nakon eksperimenata provedenih s bitumenom koji nije stario, onim koji je stario RTFOT metodom i onog koji je stario RTFOT i PAV metodom, a uključivao je 8 % i 10 % udjela SBR-a, nije se uočila značajna razlika između tradicionalnih i reoloških svojstava modificiranih uzoraka. Zato je zaključeno u ovom istraživanju da bi modifikacija s 8 % SBR-a bila najekonomičnija. Štoviše, smatralo se da će 8-postotna SBR modifikacija osigurati manju upotrebu polimera i zbog toga manju potrošnju energije te emisiju plinova tijekom miješanja kako bi postigla homogenu

Tablica 1. Inženjerska svojstva modificiranih veziva

Ispitivanje	Norma	Jedinica	B50/70 8 % SBR	B50/70 10 % SBR
Penetracija (25 °C, 100 g, 5 sec)	EN 1426 [36]	0,1 mm	33	30
Temperatura točke omekšavanja	EN 1427 [37]	°C	65,9	69,8
Elastični povrat (25 °C)	EN 13398 [38]	%	63,3	76,3
Točka plamišta i točka paljenja	EN ISO 2592 [39]	°C	241	242
Specifična težina (Destilirana voda, 25 °C)	EN 15326 [40]	-	1,047	1,052
Dinamički smični reometar ($G^*/\sin\delta > 1$ kPa)	EN 14770 [41]	°C	92,7	97,9
Stabilnost skladištenja	EN 13399 [42]			
Razlike u temperaturi točke omekšavanja	EN 1427 [37]	°C	4,8	4,5
Razlike u penetraciji	EN 1426 [36]	0,1 mm	11	10
Ispitivanje otvrdnjavanja u tankom filmu s vertikalnom vrtnjom	EN 12607-1 [34]			
Promjena mase	EN 12607-1 [34]	%	0,48	0,49
Povećanje u temperaturi točke omekšavanja	EN 1427 [37]	°C	12,4	11,8
Zadržana penetracija	EN 1426 [36]	%	87,9	93,3
Dinamički smični reometar ($G^*/\sin\delta > 2,2$ kPa)	EN 14770 [41]	°C	95,5	100,8
Ispitivanje otvrdnjavanja u tankom filmu s vertikalnom vrtnjom + Posuda za starenje pod pritiskom	EN 14769 [35]			
Dinamički smični reometar ($G^*\sin\delta < 5000$ kPa)	EN 14770 [41]	°C	19,5	19,7
Reometar savijajućeg snopa ($S \leq 300$ MPa, $m \geq 0,300$)	EN 14771 [43]	°C	-12	-12

vezivo. Jednako tako, pokazalo je povećanu kompatibilnost između faza bitumena i polimera te smanjenu stabilnost skladištenja.

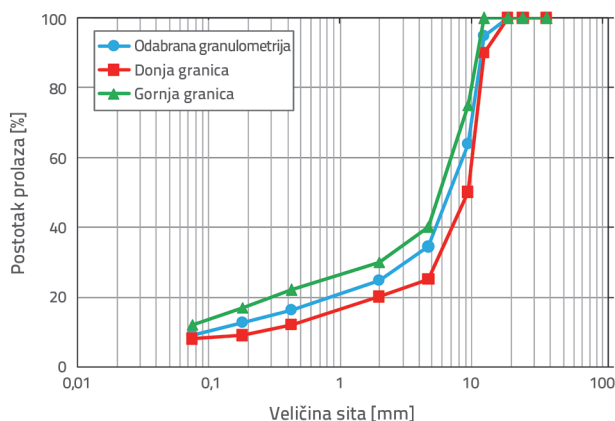
3.2. Granulometrijski sastav agregata i svojstva

U ovom istraživanju koristilo se drobljeno bazaltno kamenje kao grubi i fini agregat, a mrvljena bazaltna kamena prašina kao mineralno punilo. Oni su proizvedeni u kamenolomu Harput koji se nalazi u gradu Elazig u istočnom dijelu Turske. Granulometrijski sastav agregata ključan je za površinu agregata, a u kombinaciji s vezivom i upijanjem, imaju značajnu ulogu u određivanju količine slobodnog bitumena kojim se mogu pokriti agregati u SMA [44].

Slika 1. prikazuje gornje i donje limite granulometrijskog sastava koje preporučuje Glavna uprava za autoceste Republike Turske (KGM) u projektiranju SMA; granulometrijski sastav odabran u ovom istraživanju nalazi se između tih limita [45]. Najveća veličina čestice u SMA mješavini iznosila je 19 mm (0,74 inča).

Da bi nastala kontaktna površina kamen-na-kamen, u proizvodnji SMA trebali bi se upotrebljavati visokokvalitetni agregati koji imaju vrhunska fizikalna i mehanička svojstva.

Tablica 2. prikazuje glavne karakteristike agregata (grubi i fini) te mineralna punila koja se upotrebljavaju u ovom istraživanju (vrijednost Los Angeles metode, indeks ljuskavosti, čvrstoća, otpornost na ispadanje zrnja, specifična gustoća, vrijednost metilenskog modrila i upijanje vode). Rezultati su potvrdili da su odabrani agregati u skladu s tehničkim specifikacijama koje zahtijeva KGM te su prihvatljivi u proizvodnji SMA [45].



Slika 1. Raspodjela granulometrije na temelju veličine čestice

Tablica 2. Fizikalna svojstva agregata (grubi i fini) i mineralno punilo

Svojstvo	Jedinica	Rezultat	Metoda	Specifikacija
Grubi agregat				
Vrijednost Los Angeles metode za ispitivanje abrazije	[%]	12	ASTM C131 [46]	≤ 25
Pokazatelj ljuskavosti	[%]	11	BS EN 933-3 [47]	≤ 20
MgSO ₄ čvrstoća	[%]	4,1	ASTM C88 [48]	≤ 14
Otpornost na ispadanje zrnja	[%]	60-65	ASTM D1664 [49]	≥ 60
Skupna specifična težina	-	2,855	ASTM C127 [50]	-
Prividna specifična težina	-	2,911	ASTM C127 [50]	-
Apsorpcija vode	[%]	0,674	ASTM C127 [50]	≤ 2
Fini agregat				
Vrijednost plavog metilena	[g/kg]	1,0	ASTM C1777 [51]	≤ 1,5
Skupna specifična težina	-	2,808	ASTM C128 [52]	-
Prividna specifična težina	-	2,901	ASTM C128 [52]	-
Apsorpcija vode	[%]	1,142	ASTM C128 [52]	≤ 2
Mineralno punilo				
Prividna specifična težina	-	2,730	ASTM D854 [53]	-

3.3. Stabilizator i njegova svojstva

Ovo istraživanje koristilo je komercijalni CF (Enfalt Fibrocel) u udjelu od 0,35 % (po težini SMA proizvedenog s B50/70+8 %SBR). CF je organsko vlakno koje potječe iz kemijski obrađenog prirodnog drva. Uglavnom se sastoji od celuloze, hemiceluloze, lignina i drugih nečistoća [32]. Tablica 3. prikazuje temeljna inženjerska svojstva CF-a koji se koristi u ovom istraživanju.

Tablica 3. Glavne karakteristike CF-a (Enfalt Cibrofel)

Svojstvo	Jedinica	Vrijednost
Oblik	-	zrnat
pH vrijednost	[5 g/100 ml]	7,5 ± 1 %
Prosječan dijametar kuglice	[mm]	7
Prosječna duljina kuglice	[mm]	2
Gustoća	[kg/m ³]	450
Toplinska izdržljivost	[°C]	> 250
Udio pepela	[%]	18
Apsorpcija ulja	-	5 ± 1 težine vlakana
Apsorpcija vode	[%]	5

U asfaltnim postrojenjima u kojima se šaržno miješa, vlakna se obično dodaju kroz odvojeni ulazni otvor izravno u spremnik za težinu iznad mlina, a u asfaltnim postrojenjima u kojima se nalazi bubanj za miješanje, odvojena se oprema za hranjenje vlakana pokreće kako bi integrirala labava vlakna upuhivanjem u

bubanj. U ovom se istraživanju CF izravno dodaje SMA mješavini suhim postupkom (metoda miješanja vlakana s agregatima te potom dodavanje veziva).

4. Priprema SMA uzorka

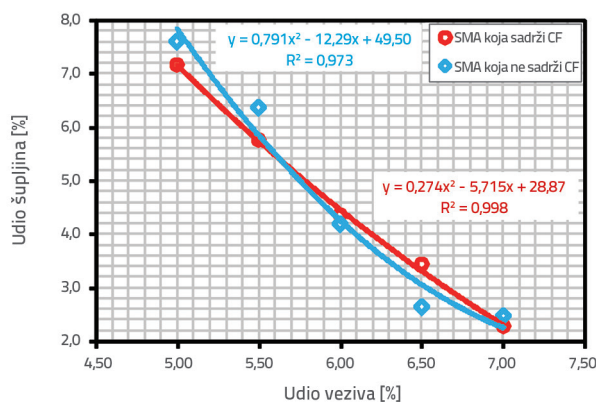
U ovom su istraživanju proizvedene SMA mješavine pri 145 °C u skladu s metodom projektiranja Marshallove mješavine kako je detaljno opisano u ASMT D6926 [54]. U usporedbi sa standardnim HMA mješavinama, potrebno je manje truda kako bi SMA mješavine postigle željeni prvotni stupanj zbijenosti [55]. Uzimajući u obzir da je pretjerana kompresija ograničena u smislu postizanja primjetnog povećanja gustoće te će vjerojatno zdrobiti agregate, 50 je udarača primijenjeno na svakoj strani svake mješavine tijekom zbijanja. Kako bi se nepristrano usporedile volumetrijske karakteristike SMA s CF-om i bez CF-a, glavni izvori (agregat, punilo i modificirani bitumen) te odabrana granulometrijska krivulja zadržane su kao konstante u projektu mješavine. Koristilo se pet udjela veziva (B50/70 + 8% SBR) s 0,5 % dodatka (5,0 %, 5,5 %, 6,0 %, 6,5 % i 7,0 %) kako bi se proizvele obje vrste SMA mješavina. Pripremljena su tri paralelna uzorka za svaku razinu veziva; zato se zasebno projektiralo 30 (15 x 2) Marshallovih uzoraka za SMA s CF-om i bez CF-a.

5. Utjecaj vlakana na projektne parametre SMA

Udio šupljina (engl. *Air voids* - AV) u zbijenom asfaltnom uzorku odnosi se na ukupni volumen malih zračnih prostora između prekrivenih zrna agregata. Kako vezivo ima tendenciju protoka uglavnom ovisno o prisutnosti malih zračnih džepova, AV se

smatra glavnim volumetrijskim parametrom kojim se određuje optimalna količina veziva u SMA. Zbog malog udjela AV-a, ceste izvedene SMA-om osjetljive su na isplivavanje bitumena, a pretjerana količina AV-a može pogoršati prodiranje zraka i vode u asfaltnu mješavinu [56]. Uzimajući u obzir njegov direktan utjecaj na zadržavanje stabilnosti i trajnosti, općenito se predlaže da bi AV trebao iznositi 2-4 % za odgovarajući sastav SMA.

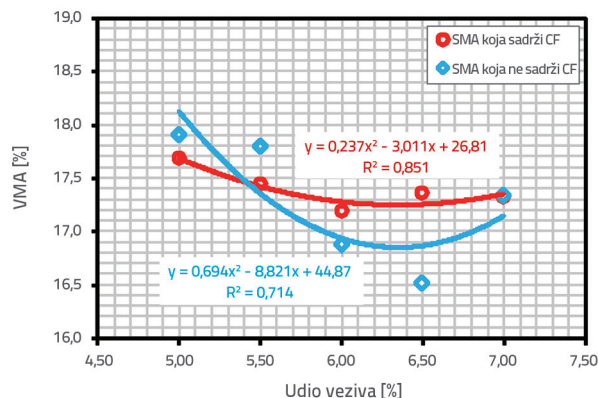
Utjecaj CF-a na razinu AV-a procijenjen je za svaki uzorak bitumena, a rezultati su prikazani na slici 2. Neovisno o upotrebi CF-a, povećanje količine veziva u mješavinama uzrokom je drastičnog smanjenja AV vrijednosti. Vrijednost AV u objema vrstama SMA, i to sa 5 %, 5,5 % i 6 % udjela veziva, nije ostala u okviru željenog raspona. Kao što se može zaključiti iz te slike, integracija CF-a donosi bitno povećanje vrijednosti AV u SMA mješavini sa 6,5 % udjela veziva (AV u iznosu 2,63 %, odnosno 3,43 % za SMA mješavine bez CF-a). To otkriće potvrdila su prethodna istraživanja [25, 57], tj. da je viša vrijednost AV-a usko povezana s većom apsorpcijom bitumena. To posljedično vodi do povećanja površine agregata prekrivenog bitumenom, a izazvano je dodavanjem CF-a.



Slika 2. Rezultati udjela šupljina (AV)

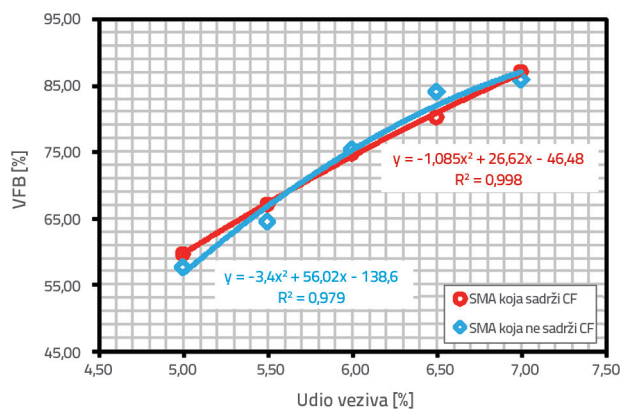
Uzimajući u obzir AV i efektivni udio bitumena (koji nije ispunjen agregatima), šupljine u mineralnom agregatu (engl. *voids in mineral aggregate* - VMA) su povezane s ukupnim volumenom međuzrnatog praznog prostora između čestica agregata [58]. U većini slučajeva preporučuje se minimalno 16 % VMA kako bi se osiguralo dovoljno prilagođavanja za bitumen i AV u SMA mješavinama. Slika 3. prikazuje promjene u VMA kao funkciju količine veziva, što jednako tako upućuje na uključivanje CF-a zbog kontrole SMA mješavine. Pri tome najprije dolazi do smanjenja VMA kad je razina bitumena niska, a zatim do značajnog povećanja VMA s povećanjem udjela bitumena. To se povećanje pripisuje homogenom utjecaju koji CF ima na bitumen modificiran gumom. Povećanjem postotka zračnog prostora u bitumenskom mortu SMA, CF djelomično sprječava da grubi agregati međusobno dođu u kontakt, a što u konačnici stvara više međuprostora dostupnog finim agregatima. Ta su otkrića u skladu s prethodnim istraživanjima [59-61]. Iako je SMA mješavina otporna na pucanje zbog veće vrijednosti VMA kad je izložena cikličnom opterećenju, pretjerana VMA može rezultirati upotrebom

suviše količine veziva, a to vodi do dodatnih troškova i problema sa stabilnošću SMA mješavine.



Slika 3. Rezultati šupljina u mineralnim agregatima (VMA)

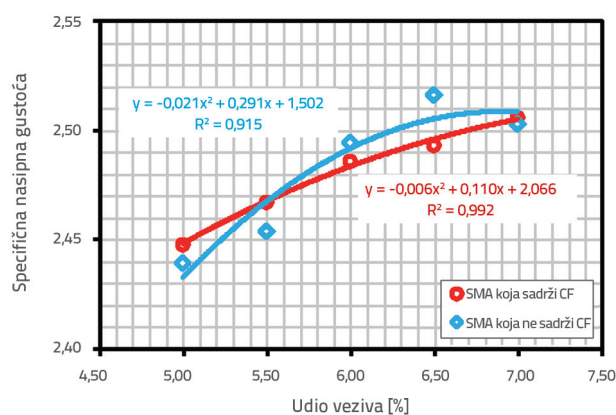
Šupljine ispunjene vezivom (engl. *voids filled with binder* - VFB) postotak su volumena VMA ispunjene bitumenskim vezivom. VFB je obrnuto proporcionalan AV-u; kad se AV smanjuje, VFB se povećava. U slučaju poprilično niskog udjela AV-a, VFB kompenzira kako bi spriječio kolotražnje asfaltnih mješavina, kao i pomicanje izazvano opterećenjem teretnih vozila. Slika 4. pokazuje promjenu vrijednosti VFB-a odgovarajućeg osnovnog SMA i SMA s CF-om u rasponu bitumena. Očekivano, povećanje udjela veziva u objema mješavinama SMA izaziva prividno povećanje VFB vrijednosti. Vrijednosti VFB za SMA s CF-om su 59,5 %, 67 %, 74,7 %, 80,2 % i 86,9 % pri odgovarajućem udjelu veziva. U usporedbi s kontrolnom mješavinom, udio VFB bio je 0,5 % niži za SMA mješavine koje imaju 6 % CF-a, odnosno 3,8 % niži za SMA mješavine koje imaju 6,5 % CF-a. Iako se čini da uvođenjem CF-a dolazi do smanjenja VFB-a pri relativno visokom udjelu veziva, opći trend gotovo savršene krivulje potvrđuje da se VFB vrijednosti obiju mješavina slažu.



Slika 4. Rezultati šupljina punjenih vezivom (VFB)

Nasipna specifična gustoća (engl. *Bulk specific gravity* - BSG) omjer je mase u zraku jediničnog volumena propusne mješavine (koja se sastoji od propusnih i nepropusnih šupljina koje su normalne

u odnosu na mješavinu) pri zadanoj temperaturi u odnosu na masu u zraku (jednake gustoće) jednakog volumena destilirane vode pri zadanoj temperaturi. Kako bi se izračunala težina po jediničnom volumenu zbijene SMA mješavine, BSG je ključna za pretvaranje težina u volumene [58]. Vrijednosti BSG-a za svaku SMA mješavinu procijenjene su, a relevantne krivulje prikazane su na slici 5. Konkavni oblik krivulje nacrtane za kontrolnu mješavinu pokazuje da su BSG vrijednosti najprije povećale a zatim smanjile povećanjem udjela veziva. Gotovo linearna krivulja SMA s CF-om pokazuje da BSG vrijednosti imaju tendenciju povećavanja kako se razina bitumena povećava u mješavini. Zbog prisutnosti vlakana, krivulja koja prikazuje SMA s CF-om nacrtana je ispod one koja prikazuje kontrolnu mješavinu, a pri većem sadržaju bitumena uočile su male razlike u vrijednosti BSG-a. U slučaju kad je razina bitumena 6 %, vrijednost BSG-a smanjit će se za 0,008, a kad je razina bitumena 6,5 % ta će se vrijednost BSG-a smanjiti za 0,023 %. To smanjenje pripisuje se CF-u jer sprječava agregate da se međusobno dotiču, stvarajući time više mjesta u SMA mješavini. Obratno, prethodno istraživanje koje su proveli Brown i Manglorkar pokazalo je da upotreba mineralnih vlakana nije rezultirala smanjenjem gustoće [62].



Slika 5. Rezultati nasipne specifične težine (BSG)

Marshallovim postupkom određeno je da je optimalni udio veziva (engl. *optimal binder content* - OBC) 6,5 % po težini agregata za SMA mješavinu s CF-om, odnosno 6,6 % po težini agregata za SMA mješavine bez CF-a. Pri svakom optimalnom udjelu veziva u ovom istraživanju procijenjeni su konačni volumetrijski projektni parametri SMA mješavina (AV, VMA, VFB i BSG) koji su dobiveni iz odgovarajućih grafikona. Svojstva svakog tipa mješavine sažeta su u tablici 4.

Kada se u SMA mješavini koristilo 6,5 % OBC-a, vrijednost AV-a iznosila je 3,07 %, VMA-e 16,9 %, VFB-a 81,8 %, odnosno BSG-a 2,505 %. Kad se u SMA mješavinu ubacilo CF-a i relativno velike količine OBC-a, došlo je do smanjenja vrijednosti AV-a i BSG-a te povećanja vrijednosti VMA i VFB. Vrijednost AV koja bi trebala biti u rasponu 2-4 % prema tehničkim specifikacijama, iznosila je 3,01 % za SMA mješavinu s CF-om, kao što prikazuje tablica 4. To dokazuje da upotreba CF-a vodi do poželjne vrijednosti AV-a u SMA. Neprimjetno smanjenje gustoće SMA može se

pripisati povećanju količine bitumenskog veziva te učinka čestica CF-a tako što postoji više međuprostora između čestica agregata. Veća vrijednost VMA u SMA, a zbog CF-a, upućuje na povećani udio veziva, točnije, na povećanu debljinu premaza. To daje povećani efektivni volumen bitumena, a istovremeno zadržava šupljine, te daje poboljšanu trajnost i otporan je na kolotražnje. Vrijednost VFB-a povećala se s 81,8 % na 82,5 %, što može biti posljedica učinka preračunavanja CF-a na postotak apsorbiranog PMB-a u SMA. S odgovarajućim OBC-om najvažnija volumetrijska svojstva (AV, VMA i VFB) mješavine SMA s CF-om u skladu su sa specifičnim tehničkim zahtjevima; stoga se dodavanje CF-a kao stabilizirajućeg aditiva smatra prikladnim pristupom u projektiranju SMA.

Tablica 4. Volumetrijska projektna svojstva SMA mješavina

Parametar	SMA koja ne sadrži CF	SMA koja sadrži CF	Specifikacija
OBC	6,5 %	6,6 %	min. 5,8 %
AV	3,07 %	3,01 %	2 % - 4 %
VMA	16,9 %	17,2 %	min. 16 %
VFB	81,8 %	82,5 %	75 % - 85 %
BSG	2,505	2,500	-

OBC - optimalni udio veziva, AV - udio šupljina, VMA - šupljine u mineralnom agregatu, VFB - šupljine ispunjene vezivom, BSG - nasipna specifična gustoća

6. Analiza troškova

Uvođenje CF-a analizirano je u financijskom smislu računanjem ukupnog troška potrebnog kako bi se proizvela tona SMA mješavine. Količina svakog sastojka u ovom istraživanju (agregat, punilo i modificirani bitumen) temeljena je na projektnim parametrima SMA. Prosječna jedinična cijena svake sastavnice (uključujući i troškove dostave) te trošak proizvodnje SMA za 2021. godinu dobiveni su od KGM-a. Prosječna prijevozna udaljenost za agregate i punilo iznosila je 30 km, za cestograđevni bitumen 260 km, odnosno za SBR i CF 1250 km. Činjenica je da zahtjevi tržišta znatno utječu na cijenu bitumena, kao i vrhunac sezonske potrošnje. Nedavna cijena cestograđevnog bitumena razreda B50/70 u Turskoj iznosila je približno 556 \$/t (uključujući poreze i dostavu). Tablica 5. detaljno prikazuje ukupne troškove za temeljni SMA i SMA s CF-om.

Rezultati analize troškova jasno pokazuju da je SMA koja sadrži CF značajno skuplja nego kontrolna SMA mješavina. Glavni razlozi su povećanje troškova uključivanjem CF-a i upotreba relativno velike količine veziva. Uzimajući u obzir proizvodnju jedne tone SMA došlo je do povećanja od gotovo \$ 0,9 kad se dodalo 0,35 % CF-a u svojstvu stabilizatora. Prema izvješću EAPA-e (Asphalt in Figures, 2020.), u Turskoj je 2020. godine proizvedeno približno

Tablica 5. Usporedba troškova SMA bez CF-a i SMA s CF-om

Opis	SMA koja ne sadrži CF			SMA koja sadrži CF		
	Količina [t]	Cijena po toni [\$/t]	Trošak [\$]	Količina [t]	Cijena po toni [\$/t]	Trošak [\$]
Agregat (19-9,5 mm)	0,3366	5,17	1,74	0,3362	5,17	1,74
Agregat (9,5-4,75 mm)	0,2767	5,48	1,52	0,2764	5,48	1,52
Agregat (4,75-0,075 mm)	0,2356	5,67	1,34	0,2353	5,67	1,34
Mineralno punilo	0,0860	6,03	0,52	0,0859	6,03	0,52
Veživo razreda B50/70	0,0650	556,34	36,16	0,0660	556,34	36,72
SBR modifikator	0,0052	1989,86	10,35	0,0052	1989,86	10,51
Modifikacija bitumena	0,0650	25,83	1,68	0,0660	25,84	1,71
CF stabilizirajući aditiv				0,0002	546,19	0,13
Proizvodnja SMA	1,0000	4,31	4,31	1,0000	4,31	4,31
Ukupni trošak (\$/t)			57,62			58,50

32 milijuna tona bitumenskih mješavina [63]. Pet milijuna tona od tog ukupnog materijala za kolnike trebalo ju odvojiti za kolnike primjenom SMA mješavine, a što upućuje na to da se godišnji ukupni rast troška u proizvodnji SMA u Turskoj može povećati na 4.5 milijuna američkih dolara ako se doda CF. Međutim, taj inicijalni rast troška može se tolerirati uzimajući u obzir da primjena SMA s CF-om rezultira relativno tanjim slojevima, duljim rokom uporabe te nižim troškovima održavanja.

7. Zaključak

Budući da je splitmastiksasfalt (SMA) diskontinuirane granulometrije te je gusto zbijena mješavina, obično se upotrebljava kao habajući sloj za kolnike koji su izloženi velikom prometnom opterećenju. Naime, SMA ima odlično svojstvo koje je rezultat njegovog izražajnog bitumenskog mastiksa i guste strukture okvira. Zbog toga što je mješavina diskontinuirane granulometrije, SMA zahtijeva neku vrstu vlakana koja mogu upiti i stabilizirati veživo kako bi se izbjeglo dreniranje, odnosno ocjeđivanje bitumena kroz zračne šupljine u mješavini. U ovom istraživanju trebalo ispitati utjecaj 0,35 % vlakana celuloze (CF) na volumetrijski projekt SMA s bitumenom modificiranim polimerom (PMB, B50/70+8%SBR). Na temelju rezultata ispitivanja zaključili su sljedeći:

- Dodavanjem CF-a u SMA s PMB-om izazvalo je 0,1 % povećanja (sa 6,5 % na 6,6 %) veživa što je sporna činjenica u smislu utjecaja na inicijalni trošak.

- Primjenom CF-a i značajnog povećanja optimalnog udjela bitumena povećava se trošak jedne tone SMA za 1,5 %.
- Kad je povoljna vrijednost AV-a, primjena CF-a omogućit će kolnicima izvedenim sa SMA da se njihove površine prošire i skupe kad su izloženi promjenjivim prometnim opterećenjima i temperaturama bez ikakva isplivavanja bitumena ili habanja.
- CF omogućava povećanje vrijednosti VMA zbog čega se u konačnici poboljšava izvedba SMA, a to je zbog povećane trajnosti, niže osjetljivosti na varijacije u udjelu veživa, veće fleksibilnosti te povećane otpornosti na pucanja uslijed skupljanja pri niskim temperaturama.
- U usporedbi s odgovarajućim kontrolnim mješavinama, SMA s CF-om pokazala je blago povećanje (0,7 %) kad je u pitanju vrijednost VFB, što je razumljivo kad se uzmu u obzir tehničke specifikacije.
- Stvaranjem više mjesta kako bi se prevladao problem dreniranja veživa, ugrađivanje CF-a rezultira neznatnim smanjenjem gustoće SMA mješavine.

Ukratko, vlakna celuloze smatraju se okosnicom u stabilizaciji SMA, posebice u smislu prevencije i/ili smanjenja dreniranja bitumenskih veživa iz mješavine. Međutim, zbog njihovih velikih troškova, buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na štedljivije, održivije i ekološki prihvatljivije alternativne dodatke u proizvodnji SMA.

LITERATURA

- [1] Gedik, A., Selcuk, S., Lav, A.H.: Investigation of recycled fluorescent lamps waste as mineral filler in highway construction: A case of asphaltic pavement layers, Resources, Conservation and Recycling, 168 (2021), p. 105290, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105290>.
- [2] Gedik, A.: A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements, Resources, Conservation and Recycling, 161 (2020), pp. 104956, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104956>.

- [3] Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Ahmadinia, E.: Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, 36 (2012), pp. 984-989, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>.
- [4] Kordi, Z., Shafabakhsh, G.: Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 530-539, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.202>.
- [5] Honarmand, M., Tanzadeh, J., Beiranvand, M.: Bitumen and its modifier for use in pavement engineering, *Sustainable Construction and Building Materials*, (2019), pp. 249-270, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82489>.
- [6] Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafiq, P.: Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, 32 (2011) 10, pp. 4844-4849, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>.
- [7] Rahman, M.T., Mohajerani, A.: Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, 261 (2020), pp. 120530, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120530>.
- [8] Durga Prashanth, L., Palankar, N., Ravi Shankar, A.U.: A study on the effect of rejuvenators in reclaimed asphalt pavement based stone mastic asphalt mixes, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12 (2019) 1, pp. 9-16, <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0002-7>.
- [9] Lavasani, M., Namin, M.L., Fartash, H.: Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels, *Construction and Building Materials*, 95 (2015), pp. 232-242, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.146>.
- [10] Fernandes, S.R., Silva, H.M., Oliveira, J.R.: Recycled stone mastic asphalt mixtures incorporating high rates of waste materials, *Construction and Building Materials*, 187 (2018), pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.157>.
- [11] Androjić, I., Kaluder, G.: Influence of recycled filler on asphalt mix properties, *Građevinar*, 69 (2017) 3, pp. 207-214, <https://doi.org/10.14256/JCE.1601.2016>.
- [12] Çetin, A.: The effect of filler additives on moisture damage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Građevinar*, 73 (2021) 12, pp. 1209-1221, <https://doi.org/10.14256/JCE.3321.2021>.
- [13] Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M., Molayem, M.: Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 156 (2017), pp. 107-113, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.055>.
- [14] Nazari, M., Mirbaha, B., Abdi Kordani, A., Mojabi, S.A.: Laboratory Investigation of the Effect of Stone Mastic Asphalt Modified with SEBS Polymer and Cellulose Fibers on the Moisture Susceptibility, *International Journal of Pavement Research and Technology*, (2021), pp. 1-10, <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00090-6>.
- [15] Luo, Y., Zhang, K., Li, P., Yang, J., Xie, X.: Performance evaluation of stone mastic asphalt mixture with different high viscosity modified asphalt based on laboratory tests, *Construction and Building Materials*, 225 (2019), pp. 214-222, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.119>.
- [16] Sengul, C.E., Oruc, S., Iskender, E., Aksoy, A.: Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 777-783, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.065>.
- [17] Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S.M.: Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 6, pp. 871-877, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009>.
- [18] Ranadive, M.S., Hadole, H.P., Padamwar, S.V.: Performance of stone matrix asphalt and asphaltic concrete using modifiers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 1, pp. 04017250, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002107](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002107).
- [19] Kofteci, S.: Investigation on the usability of pumice as mineral fibre in stone mastic asphalt, *Građevinar*, 70 (2018) 8, pp. 695-701, <https://doi.org/10.14256/JCE.2310.2017>.
- [20] Hamed, G.H., Sakanlou, F., Omari, B., Azarhoosh, A.: Laboratory Investigation of the Effect of Ceramic Fiber on Stone Matrix Asphalt Rutting Performance, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (2021) 1, pp. 04020431, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003556).
- [21] García-Travé, G., Tauste, R., Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C.: Mechanical performance of SMA mixtures manufactured with reclaimed geomembrane-modified binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 2, pp. 04017284, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002149](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002149).
- [22] Rahman, M.T., Mohajerani, A., Giustozzi, F.: Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, 263 (2020), pp. 120134, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120134>.
- [23] Putman, B.J., Amirkhanian, S.N.: Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures, *Resources, Conservation and Recycling*, 42 (2004) 3, pp. 265-274, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.005>.
- [24] Oner, J., Ozdas, F.: Investigation of textile waste usage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Građevinar*, 73 (2021) 5, pp. 469-481, <https://doi.org/10.14256/JCE.3135.2020>.
- [25] Ferreira da Costa, L., Lucena, L.C.D.F.L., Lucena, A.E.D.F.L., Grangeiro de Barros, A.: Use of Banana Fibers in SMA Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (2020) 1, pp. 04019341, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002994](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002994).
- [26] Vale, A.C.D., Casagrande, M.D.T., Soares, J.B.: Behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2014) 3, pp. 457-465, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000815](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000815).
- [27] Pawan, K., Sikdar, P.K., Bose, S., Chandra, S.: Use of Jute Fibre in Stone Matrix Asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 5 (2004) 2, pp. 239-249, <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689971>.
- [28] Kumar, N.K., Ravitheja, A.: Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives, *Materials Today: Proceedings*, 19 (2019), pp. 397-402, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.624>.
- [29] Oda, S., Fernandes Jr, J.L., Ildefonso, J.S.: Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 26 (2012) 1, pp. 13-20, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.030>.
- [30] Chen, Z., Chen, Z., Yi, J., Feng, D.: Application of Corn Stalk Fibers in SMA Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (2021) 7, pp. 04021147, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003762](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003762).
- [31] Yaro, N.S.A., Napiah, M.B., Sutanto, M.H., Usman, A., Saeed, S.M.: Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional and Sequential Mixing Processes, *Case Studies in Construction Materials*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00783>.

- [32] Li, N., Zhan, H., Yu, X., Tang, W., Xue, Q.: Investigation of the aging behavior of cellulose fiber in reclaimed asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 271 (2021), pp. 121559, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121559>.
- [33] Manosalvas-Paredes, M., Gallego, J., Saiz, L., Bermejo, J.M.: Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber-SBS polymers in Stone Matrix Asphalt, *Construction and Building Materials*, 121 (2016), pp. 727-732, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028>.
- [34] EN 12607-1.: Bitumen and bituminous binders, Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air, RTFOT method, 2014.
- [35] EN 14769.: Bitumen and bituminous binders, Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV), 2012.
- [36] EN 1426.: Bitumen and bituminous binders, Determination of needle penetration, 2015.
- [37] EN 1427.: Bitumen and bituminous binders, Determination of the softening point, Ring and Ball method, 2015.
- [38] EN 13398.: Bitumen and bituminous binders, Determination of the elastic recovery of modified bitumen, 2017.
- [39] EN ISO 2592.: Petroleum and related products, Determination of flash and fire points, Cleveland open cup method, 2017.
- [40] EN 15326.: Bitumen and bituminous binders, Measurement of density and specific gravity, Capillary-stoppered pycnometer method, 2007.
- [41] EN 14770.: Bitumen and bituminous binders, Determination of complex shear modulus and phase angle, Dynamic Shear Rheometer (DSR), 2012.
- [42] EN 13399.: Bitumen and bituminous binders, Determination of storage stability of modified bitumen, 2017.
- [43] EN 14771.: Bitumen and bituminous binders, Determination of the flexural creep stiffness, Bending Beam Rheometer (BBR), 2012.
- [44] Qiu, Y.F., Lum, K.M.: Design and performance of stone mastic asphalt, *Journal of Transportation Engineering*, 132 (2006) 12, pp. 956-963, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:12\(956\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:12(956)),
- [45] KGM.: Turkey General Directorate of Highways (KGM), Turkish highway technical specification (in Turkish), Ankara, Turkey, 2013.
- [46] ASTM C131/C131M-20.: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine, ASTM International, West Conshohocken, PA, https://www.astm.org/c0131_c0131m-20.html, 16.12.2020.
- [47] BS EN 933-3.: Tests for geometrical properties of aggregates, Determination of particle shape, Flakiness index, British Standards, 2012., <https://doi.org/10.3403/30241876>
- [48] ASTM C88/C88M-18.: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, ASTM International, West Conshohocken, PA, https://www.astm.org/c0088_c0088m-18.html, 16.12. 2018.
- [49] ASTM D1664.: Test method for coating and stripping of bitumen aggregate mixtures (withdrawn 1992), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1985.
- [50] ASTM C127-15.: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/c0127-15.html>, 16.12.2015.
- [51] ASTM C1777-20.: Standard test method for rapid determination of the methylene blue value for fine aggregate or mineral filler using a colorimeter, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/c1777-20.html>, 16.12.2020.
- [52] ASTM C128-22.: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/standards/c128,1.1.2022>.
- [53] ASTM D854-14.: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/d0854-14.html>, 2014.
- [54] ASTM D6926-20.: Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using marshall apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/d6926-20.html>, 16.12.2020.
- [55] Asi, I.M.: Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 10, pp. 982-989, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.011>
- [56] Colorado Asphalt Pavement Association: Volumetrics in Asphalt Mixtures, <https://www.co-asphalt.com/assets/docs/vma-justification.pdf>, 16.12.2021.
- [57] Chen, H., Xu, Q., Chen, S., Zhang, Z.: Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures, *Materials & Design*, 30 (2009) 7, pp. 2595-2603, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.030>.
- [58] Pavement Interactive: HMA Weight-Volume Terms and Relationships, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/hma-weight-volume-terms-and-relationships/>, 20.12.2021.
- [59] Esfahani, M.A., Jahromi, M.N.: Optimum parafibre length according to mechanical properties in hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 21 (2020) 3, pp. 683-700, <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1527240>.
- [60] Al-Shamsi, K., Hassan, H.F., Mohammed, L.N.: Effect of low VMA in hot mix asphalt on load-related cracking resistance, *Construction and Building Materials*, 149 (2017), pp. 386-394, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.120>.
- [61] Noura, S., Al-Sabaeei, A.M., Safaeldeen, G.I., Muniandy, R., Carter, A.: Evaluation of measured and predicted resilient modulus of rubberized Stone Mastic Asphalt (SMA) modified with truck tire rubber powder, *Case Studies in Construction Materials*, 15 (2021). pp. e00633, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00633>.
- [62] Brown, E.R., Manglorkar, H.: Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures, Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, 1993.
- [63] European Asphalt Pavement Association: Asphalt in Figures, 2020.