

Primljen / Received: 25.7.2021.

Ispravljen / Corrected: 18.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 30.10.2021.

Dostupno online / Available online: 10.1.2022.

Učinak aditiva punilu na otpornost djelovanja vode u mješavinama splitmastiksasfalta (SMA)

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Altan Çetin**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Bartin, Turska

Fakultet inženjerskih konstrukcija i dizajna

Odjel za građevinarstvo

acetin@bartin.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Altan Çetin

Učinak aditiva punilu na otpornost djelovanja vode u mješavinama splitmastiksasfalta (SMA)

SMA mješavine poboljšavaju trajnu otpornost na deformacije vruće miješanih asfaltnih mješavina. U ovom istraživanju ispituju se učinci aditiva za punila na oštećenje SMA mješavina od djelovanja vode. Kao aditivi za punila koriste se leteći pepeo C i F razreda i hidratizirano vapno. Oni se zamjenjuju materijalima za punjenje (punilima) – 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % i 4 % ukupne težine mješavine. U miješanju aditiva za punila primjenjuju se suhe i vlažne (slurry) metode. Leteći pepeo razreda C značajno poboljšava otpornost oštećenja zbog djelovanja vode. Međutim, učinak tekućeg sredstva protiv ljuštenja pomoću aditiva za punilo je beznačajan.

Ključne riječi:

splitmastiksasfalt (SMA), oštećenje zbog djelovanja vode, ljuštenje, leteći pepeo, hidratizirano vapno

Research Paper

Altan Çetin

The effect of filler additives on moisture damage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures

SMA mixtures improve the permanent deformation resistance of hot-mixed asphalt mixtures. The effects of filler additives on moisture damage of SMA mixtures are investigated in this study. The class C and class F fly ashes and hydrated lime are used as filler additives. These are replaced with filler material at 0.5%, 1.0%, 2.0%, and 4% of the total weight of the mixture. Dry and wet (slurry) methods are used in mixing the filler additives. Class C fly ash significantly improved resistance to moisture damage. However, the effect of using liquid antistripping agent with filler additives is insignificant.

Key words:

stone mastic asphalt (SMA), moisture damage, stripping, fly ash, hydrated lime

1. Uvod

Na bitumenskom kolniku najčešće se može vidjeti ljuštenje koje je posljedica slabljenja povezivanja između agregata i bitumena zbog oštećenja od djelovanja vode. Vлага također uzrokuje smanjenje jačine kohezivnog povezivanja u bitumenu. Oštećenje zbog djelovanja vode smanjuje čvrstoću asfaltnih mješavina uzrokujući oštećenja kao što su kolotrazi i pucanje na asfaltnom kolniku [1, 2]. Osim klimatskih i prometnih utjecaja, i svojstva asfaltnih mješavina imaju važan utjecaj na oštećenja asfaltnih mješavina zbog djelovanja vode. Materijali aditiva mogu se koristiti za poboljšanje prijanjanja između bitumena i agregata te za smanjenje oštećenja zbog vlage u asfaltnim mješavinama. Aditivi, koji se upotrebljavaju s tom namjerom u mnogim kemijskim tekućim sredstvima protiv ljuštenja, pripadaju skupini amina ili amidomamina [3, 4]. Razvijaju se i ispituju aditivi protiv ljuštenja zbog oštećenja uslijed djelovanja vode. Tekuća sredstva protiv ljuštenja, razvijena na bazi amina (LAA), poboljšavaju otpornost na nastanak kolotruga i ljuštenje asfaltnih mješavina [5, 6].

Neki prikladni materijali mogu se koristiti i za smanjenje hidrofilnih svojstava agregata premazivanjem. Punilo od mineralnog praha (koji prolazi kroz sito veličine 0,063 mm) poboljšava neka negativna svojstva između agregata i bitumena [7]. Materijali punila ispunjavaju šupljine unutar asfaltnih mješavina i tako nastaje manje propusna struktura. Oni utječu na svojstva splitmastiksasfalta na visokoj i niskoj temperature [8]. Portland cement, koji se koristi kao materijal za punilo, povećava čvrstoću asfaltnih mješavina protiv apsorpcije vode [9]. Leteći pepeo, koji se koristi kao mineralno punilo, poboljšava otpornost na djelovanje vode vruće miješanih asfaltnih mješavina [10]. Među takvim materijalom vapno ima vrlo široku primjenu. Hidratizirano vapno može se uporabiti u količini 1 do 2 % ukupne agregatne mase kao materijal za punila u asfaltnim mješavinama [11-14]. Takvo se vapno može pomiješati sa suhim ili mokrim agregatom, a također miješati i kao pasta (slurry). Hidratizirano vapno široko se i učinkovito koristi miješanjem s mokrim agregatom ili u obliku kaše [15]. Dokazano je da hidratizirano vapno značajno mijenja reološka svojstva asfaltnih mješavina. Mnogi eksperimentalni rezultati pokazali su da dodavanje hidratiziranog vapna u asfaltnu mješavinu poboljšava čvrstoću na oštećenja od djelovanja vode kada se mora izložiti mokr-suhom procesu [16, 17]. Mnogi su istraživači naveli da hidratizirano vapno također poboljšava čvrstoću na djelovanja vode i prijanjanje između agregata i bitumena [18-20].

U novije vrijeme, za leteći pepeo, koji se koristi kao alternativni aditiv za punilo, postoji veliko zanimanje kada je riječ o asfaltnom kolniku. Razlog tome je što je leteći pepeo ekonomičniji i obradiv od hidratiziranog vapna. Leteći pepeo, dobiven iz termoelektrane teško je zbrinuti, a također je i mnogo skuplje organizirati područje za redovno odlaganje. Uporaba pepela u asfaltnim mješavinama korisna je i za okoliš i smanjuje količinu otpadnog materijala. Kada se umjesto mineralnog upotrijebi punilo s letećim pepelom, ono djelotvornije sprečava nastanak

kolotruga i oštećenja zbog vlage. Leteći pepeo, koji ima slobodno vapno i hidrofobnu prirodu, smanjuje potencijalno ljuštenje asfaltnih mješavina. Mješavine asfaltnih kolnika kao i SMA imaju grubi granulometrijski sastav kako bi podnijeli intenzivna i teška prometna opterećenja. Stoga je potreban leteći pepeo koji služi kao mineralno punilo kako bi mješavina bila tvrda i kako bi se smanjilo ocjeđivanje bitumena [21].

Neke prethodne studije pokazale su da dodavanje pepela poboljšava svojstva vruće miješanih asfaltnih mješavina. Dodavanje 3 do 6 % pepela u asfaltnu mješavinu daje usporedive rezultate s drugim sredstvima protiv ljuštenja zbog vlage [22]. Navodi se da leteći pepeo djeluje i kao učvršćivač i punilo šupljina [23, 24]. Ali i suradnici [25] naveli su da leteći pepeo dodan u količini 2 % ukupne mase agregata u asfaltnu mješavinu poboljšava ne samo svojstva krutosti, već i čvrstoću i otpornost mješavina na ljuštenje. Huang i suradnici [26] dodali su 1,0 % pepela F razreda u asfaltnu mješavinu. Dobili su slične rezultate za modul elastičnosti u usporedbi s rezultatima kontrolnih uzoraka. Međutim, vrijednosti modula elastičnosti miješanih uzoraka letećeg pepela su niže od vrijednosti miješanih uzoraka vapna. Prema indirektnim rezultatima vlačnog testa, vlačna čvrstoća uzoraka dodanog pepela ima 15 % veću čvrstoću od čvrstoće kontrolnih uzoraka. Međutim, vlačna čvrstoća uzoraka dodanog vapna ima 25 % veću čvrstoću od čvrstoće kontrolnih uzoraka.

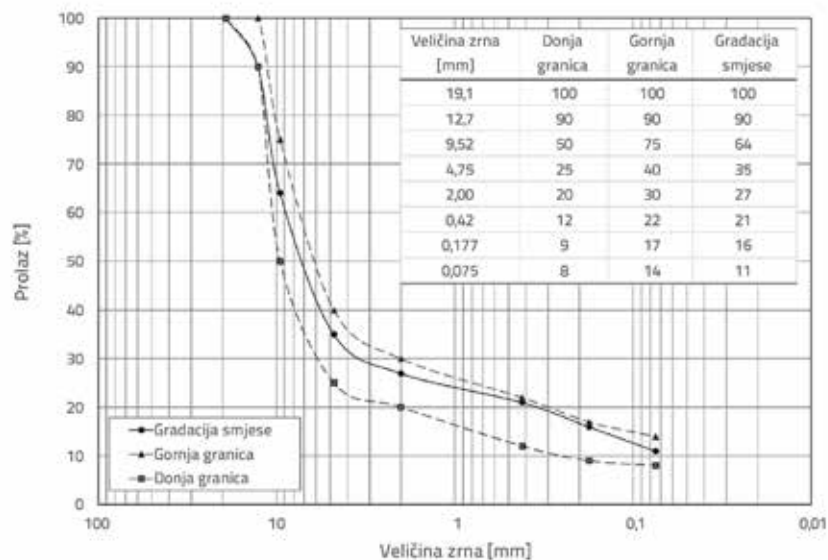
SMA je bitumenska vruća mješavina diskontinuiranog sastava i popularna je širom svijeta. SMA je prvi put razvijena u Njemačkoj šezdesetih godina i od 1990-ih široko se koristi zbog visoke potencijalne otpornosti na trajnu deformaciju ili pojavu kolotruga [27]. Međutim, procjenjivanje SMA u pogledu ljuštenja i oštećenja zbog djelovanja vode je ograničeno. SMA ima ne samo strukturu diskontinuiranog sastava, već i manji udio sitnog agregata. Stoga je potrebna stabilizacija kako bi se spriječilo ocjeđivanje bitumena. To se može postići tako da se mješavini dodaju modifikatori kao što su vlakna ili polimeri [28]. Debljina bitumenskog filma važan je parametar protiv ljuštenja asfaltnog kolnika. Povećanje debljine sloja u mješavinama splitmastiksasfalta ima pozitivan učinak na ljuštenje. Mješavine splitmastiks-asfalta razvijene su za poboljšanje otpornosti na kolotragove jer zbog visokog udjela bitumena postaju manje osjetljive na djelovanje vode. Prijanjanje između agregata i bitumena postaje važno zbog visokog omjera krupnog agregata u SMA mješavinama. Aditivi za punila potrebni su zbog smanjenja količine sitnog agregata finih materijala u SMA mješavinama. U ovom radu, aditivi za punilo odabrani kao funkcionalni u smislu oštećenja zbog djelovanja vode, koji se koriste u SMA mješavinama, imaju neke pozitivne učinke, produžujući početak oštećenja zbog djelovanja vode. Današnji je razvoj tipova asfaltnih kolnika pokazao da se tipovi materijali punila moraju ocijeniti prema oštećenjima zbog djelovanja vode. Kako bi se smanjila šteta od djelovanja vode, leteći pepeo dobiven iz termoelektrane poznat je kao učinkovit aditiv za punilo, a korištenje letećeg pepela ekonomično je za Tursku i svijet.

U ovom radu istražuju se učinci aditiva punilo protiv oštećenja zbog djelovanja vode za vruće asfaltna mješavina diskontinuiranog sastava. Leteći pepeo razreda C i razreda F, s obzirom na količinu vapna i pucolanska svojstva, smatraju se alternativom hidratiziranom vapnu koje se koristi protiv oštećenja zbog djelovanja vode. Učinci pepela (razred C), koji sadrži veliku količinu živog vapna, uspoređuju se s učincima drugih aditiva punilo. Također se istražuju učinci količine aditiva za punilo i metoda miješanja (suha i mokra). Učinak komercijalnog sredstva protiv ljuštenja također se istražuje u pogledu osjetljivosti na djelovanje vode. Uzorci se pripremaju prema tehničkim specifikacijama organizacije Turkish Highways/Turske autoceste i zbijaju pomoću Gyratory udarnog zbijčača. Za određivanje osjetljivosti na djelovanje vode koriste se Nicholsonov test ljuštenja i metoda AASHTO T283 [29]. Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće provodi se kako bi se odredila debljina sloja bitumena.

2. Eksperimentalna ispitivanja

2.1. Materijali

Za projektiranje SMA mješavina korištena je jedna vrsta agregata i bitumena. Celulozna vlakna služe za stabilizaciju bitumena u mješavinama. Kao aditiv za punilo korišteni su leteći pepeo razreda C i F i hidratizirano vapno. Neka od



Slika 1. Granulometrijski sastav agregata i granične vrijednosti u specifikaciji za SMA mješavinu

svojevremeno drobljenog vapnenačkog agregata navedena su u tablici 1. Vrijednosti specifične težine i apsorpcije vode agregata navedene su u tablici 2. Raspodjela veličine zrna agregata, uključujući specifikacije gornje i donje granice za SMA tip-1, navedena je na slici 1. Razred B bitumena 50/70 primjenjen je u fazama izrade svih uzoraka jer se često upotrebljava kao vezivo u asfaltnim mješavinama zbog klimatskih uvjeta u Turskoj. Neka od svojstava bitumenskog veziva navedena su u tablici 3. U ovom radu kao aditiv za punilo korišteni su leteći pepeo razreda C i F i hidratizirano vapno. Hidratizirano vapno koje sadrži 90 % Ca(OH)₂ korišteno je kao sredstvo protiv ljuštenja asfaltnih mješavina. Leteći pepeo razreda C i F dobiven je iz termoelektrane Soma i termoelektrane Catalagzi. Neka fizikalna

Tablica 1. Fizikalna svojstva drobljenog vapnenačkog agregata

Svojstva	Specifikacije	Vrijednosti	Specifikacija granične vrijednosti*
Los Angeles predrobljavanje [%]	TS EN 1097-2	18	< 25
Djelovanje natrijeva sulfata [%]	TS EN 1367-1	0,85	< 14
Vrijednost udjela drobljenih zrna [%]	TS EN 933-5	100	< 25
Indeks plosnatosti [%]	TS EN 933-3	7,8	100
Vrijednost polirnosti kamena	EN 1097-8	53.1	> 50
Prionjivost bitumenskog veziva [%]	EN 12697-11	45-50	> 50

*Tehničke specifikacije Turskih autocesta - SMA mješavine

Tablica 2. Vrijednosti specifične težine i apsorpcije vode frakcija agregata

Frakcije agregata	Norme	Stvarna specifična težina	Volumna specifična težina	Apsorpcija vode [%]
Krupni agregat	TS EN 1097-6	2,863	2,795	0,39
Sitni agregat	TS EN 1097-6	2,881	2,796	1,54
Punilo	TS EN 1097-7	2,786	—	—

Tablica 3. Fizikalna svojstva bitumenskog veziva (B 50/70)

Svojstva	Norme	Rezultati	Granične vrijednosti
Penetracija na 25 °C, 0,1 mm	TS EN 1426	65	50-70
Točka razmekšanja, °C	TS EN 1427	49,2	46-54
Točka paljenja, °C	TS EN 12593	304	> 230
Gustoća	TS EN 15326	1,037	1,00 to 1,05
Indeks penetracije	EN 12591-Annex A	-0,682	-1,5 to +0,7

Tablica 4. Fizikalna svojstva dodatnih materijala za punilo

Svojstva	Leteći pepeo (razred C)	Leteći pepeo (razred F)	Hidratizirano vapno
Specifična gustoća [g/cm ³]	2,41	2,00	2,24
Udio zadržanog [%] (90 µm)	33,7	21,4	4,89
Udio zadržanog [%] (45 µm)	52,6	38,7	15,4

Tablica 5. Kemijski sastav letećeg pepela razreda C i F

Oksid [%]	Leteći pepeo (razred C)	Leteći pepeo (razred F)	ASTM C 618	
			Razred F	Razred C
SiO ₂	41,26	58,48		
Al ₂ O ₃	19,50	25,34		
Fe ₂ O ₃	4,25	5,77		
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	65,01	89,59	> 70,00 %	> 50,00 %
CaO	26,80	1,48	< 10,00 %	> 10,00 %
MgO	1,82	2,22		
SO ₃	1,10	0,12	< 5,00	<5,00
K ₂ O	1,15	4,09		
Na ₂ O	0,32	0,59		
Gubitak po zapaljenju	3,05	1,01	< 5,00	< 6,00
Cl-	0,009	0,027		

svojstva aditiva korištenih u ovom istraživanju navedena su u tablici 4. Kemijski sastav letećeg pepela razreda C i F prikazan je u tablici 5. Leteći pepeo razreda C razvrstan je kao leteći pepeo s visokim udjelom vapna prema ASTM C-618. Budući da je udio SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ veći od 50 % (65,01 %), a CaO veći od 10 % (26,50 %), leteći pepeo razreda F razvrstan je kao leteći pepeo s niskim udjelom vapna, jer je udio SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ iznad 70 % (89,59 %), a udio CaO manji od 10 % (1,48 %).

Tekuća kemijska sredstva protiv ljuštenja široko se koriste za smanjenje oštećenja zbog djelovanja vode u asfaltnim mješavinama. Tekuća sredstva protiv ljuštenja koriste se za povećanje kohezivne čvrstoće između bitumena i agregata. U ovom ispitivanju upotrebljava se komercijalno sredstvo protiv ljuštenja (eng. *Liquid Antistripping Agent* - LAA) iz skupine amidoamina i žute je boje, a specifične težine 0,96 g/cm³ i plamistem na 160°C. Predložene vrijednosti koje daje proizvođač su između 0,1 % i 0,4 %, a odabrana vrijednost je 0,3 % i koristi se kao modifikator bitumena. Bitumen se najprije zagrijavao do 150°C,

a zatim je dodan aditiv i na kraju miješan 20 minuta pomoću miješalice s visokim brojem smicanja pri brzini od 600 o/min.

2.2. Priprema uzoraka

Uzorci su pripremljeni u skladu s Tehničkim specifikacijama Turkish Highway. Uzorci SMA pripremljeni su pomoću kružnog nabijača (slika 2.) prema postupku miješanja Superpave (kratica za asfaltnu kolniku vrhunske izvedbe) koji je predložio NAPA, gdje je tlak 600 kPa i 4,0 % količina ciljane vrijednosti udjela šupljina. Udio od 0,6 % celuloznih vlakana ukupne težine ugrađenog u bitumen kako bi se spriječilo ocjeđivanje bitumena iz mješavine pomiješan je sa suhim agregatom kako bi se dobila homogena mješavina. Kontrolni uzorci pripremljeni su u omjerima bitumena od 5 %, 5,5 %, 6,0 %, 6,5 % i 7 % s ciljem da omjer šupljina bude 4,0 %. Optimalni omjer bitumena određen je kao 6,5 %. Volumetrijska specifična težina zbijenih uzoraka i teorijska maksimalna gustoća rastresitih uzoraka asfalta utvrđeni su prema AASHTO T166 [30]

i AASHTO T209 [31]. Parametri projektirane mješavine, kao što su udio šupljina u zbijenoj mješavini (eng. *air voids* - VA), šupljine u mineralnom agregatu (eng. *voids in mineral aggregate* - VMA) i šupljine ispunjene bitumenom (eng. *voids filled with bitumen* - VFA), određuju se prema rezultatima ispitivanja.



Slika 2. Kružni nabijač i zbijeni uzorak

Za modifikaciju asfaltnih mješavina općenito postoje dvije metode: mokra i suha. U suhoj metodi, aditivi su dodani prema težini agregata u udjelima od 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % i 4,0 %, sa zamjenom kamenog praškastog punila u mješavinu. U mokroj metodi kašasti se oblik aditiva miješa s agregatom. Prvo, kaša (eng. *slurry*) je nastala miješanjem vode (težinskim) pomoću jedne trećine letećeg pepela razreda C i F i hidratiziranog vapna, a zatim je pomiješana s krupnim agregatom. Uzorci pripremljeni

na ovaj način sušili su se na 160 °C 24 sata u peći, a korišteno je i tekuće sredstvo protiv ljuštenja s istim udjelima i istim metodama, suhom i mokrom. Stoga su uzorci pripremljeni u optimalnom omjeru bitumena od 6,5 % za aditive (leteći pepeo razreda C i F, hidratizirano vapno i sredstvo protiv ljuštenja). U pripremi uzoraka s miješanim aditivima, 1200 g agregata najprije je miješano s celuloznim vlaknima najmanje dva sata, a zatim zagrijano na 170°C. Bitumen je zagrijan do 145°C, a zatim miješan s agregatom oko 2,0 minute pri optimalnom udjelu bitumena. Za svaki aditiv ispitana su najmanje tri uzorka.

2.3. Ispitne metode

2.3.1. Ispitivanje ljuštenja (odvajanja) po Nicholsonu

Ljuštenje znači da je bitumen odvojen od agregata zbog djelovanja vode i prometnog opterećenja. Osobito u Turskoj je propadanje asfaltnih kolnika nakon zimske sezone posljedica nedovoljne otpornosti agregata na ljuštenje. U ovom radu istražuju se učinci vrsta aditiva za punilo, omjera i metoda miješanja na čvrstoću asfaltnih veziva s LAA-om i bez nje na ljuštenje. Utvrđuju se učinci suhog i vlažnog oblika letećeg pepela (razreda C i razreda F) i hidratiziranog vapna dodanih u količini od 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % i 4,0 % mase agregata na otpornost agregata na ljuštenje. Ispitano je ukupno 25 uzoraka. Nicholsonovo ispitivanje ljuštenja provedeno je prema normi ASTM D 1664 [32]. U ovom ispitivanju, prvih 600 g agregata, dimenzija 10 do 6,3 mm, prosijano je sitom od 6,3 mm. Nakon prosijavanja oprano je 150 agregata ostalih na situ od 6,3 mm, a zatim stavljeno u peć na 110±5 °C.

Bitumen je također stavljen u postupak zagrijavanja na 150 ± 5 °C. Dodano je 5 % bitumena po težini agregata i zatim homogeno miješano (slika 3.a).

Mješavina je stavljena u Petrijevu posudu, dodaje se voda povrh mješavine oko 3 cm i stavlja u peć na 60 °C (slika 3.b). Zatim se



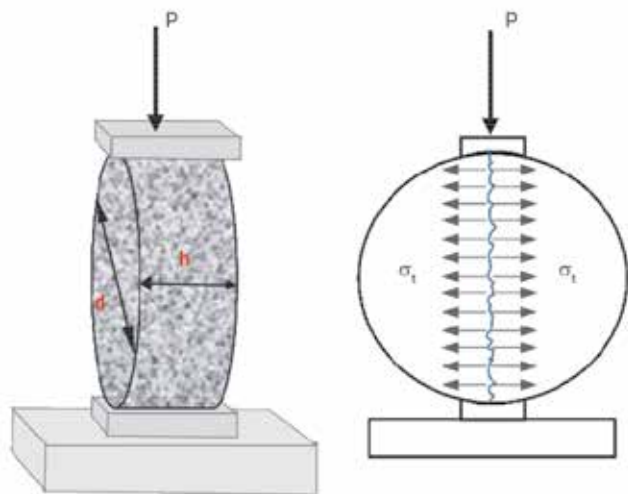
Slika 3. Faze ispitivanja po Nicholsonu: a) miješanja bitumen-agregata; b) kondicioniranje uzorka; c) promatranje uzorka

voda izlije u Petrijev poklopac i promatra okom (slika 3.c). Dio od 60 % ukupnog preostalog agregata ostalo je bez ljuštenja (odvajanja) prema Tehničkoj specifikaciji Turkish Highway [33].

2.3.2. Indirektna metoda ispitivanja vlačne čvrstoće

Čvrstoća asfaltnih mješavina ovisi o vlačnoj čvrstoći bitumenskog sloja. Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće široko se primjenjuje za određivanje ponašanja vezanja bitumena i bitumske matrice pod opterećenjem. To ispitivanje se izvodi pomoću uređaja za ispitivanje vlačne čvrstoće prema Marshallovom ispitivanju stabilnosti, uz brzinu deformacije od 50 mm/minute i na temperaturi od 25 °C. Ispitivanje je provedeno prema normi ASTM D 6931. Cilindrični uzorak postavljen je između zakrivljenih opteretnih ploča i podvrgnut opterećenju (slika 4.). Vlačna čvrstoća (σ_t) izračunava se pomoću odnosa maksimalne sile lomnog opterećenja (P), visine uzorka (h) i promjera uzorka (d):

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (1)$$



Slika 4. Uvjeti opterećenja u indirektnom ispitivanju vlačne čvrstoće

2.3.3. Otpornost na oštećenja od djelovanja vode

Kada voda prodre u asfaltnu mješavinu, uzrokuje oštećenje veza između agregata i bitumenskog veziva, te stoga ubrzava propadanje asfaltnog kolnika [34]. Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće jedna je od djelotvornih metoda za određivanje učinka vode na prijanjanje između agregata i bitumena i čvrstoću bitumenskog sloja. Ispitivanje osjetljivosti na djelovanje vode provedeno je u skladu s postupkom opisanim u normi AASHTO T-283. Modificirano Lottmanovo ispitivanje je jedno od široko primjenjivanih ispitivanja za određivanje oštećenja od vode na asfaltnom kolniku. Tada se neizravno određuju vlačne čvrstoće dviju skupina zbijenih uzoraka.

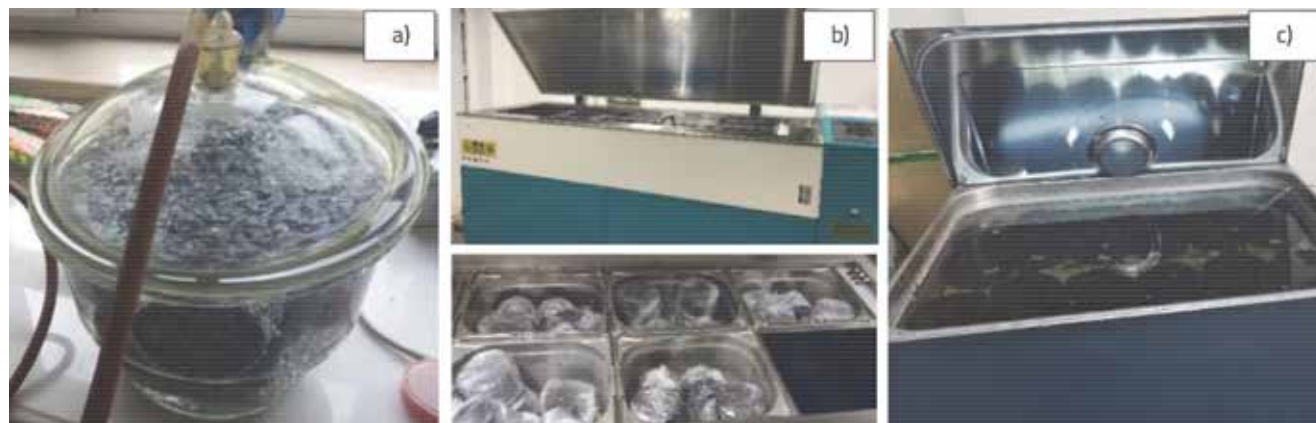
Kondicionirani uzorci zasićeni su petminutnom primjenom vakuuma (slika 5.a) i čvrsto umotani u sloj plastične folije. Zatim je svaki omotani uzorak stavljen u plastičnu vrećicu koja sadrži 10 ml vode. Nakon toga, uzorci su držani unutar stroja za zamrzavanje i odmrzavanje 16 sati na -18 °C (slika 5.b) i 24 sata na 60 °C u vodenoj kupelji (slika 5.c). Konačno, uzorci su podvrgnuti indirektnom vlačnom ispitivanju nakon 2,0 sata čekanja na 25 °C u vodenoj kupelji. Izvorna čvrstoća (s_c) i čvrstoće nakon smrzavanja i odmrzavanja (s_{uc}) naspram vode:

$$TSR = \frac{\sigma_c}{\sigma_{uc}} \quad (2)$$

3. Rezultati

3.1. Izrada mješavine i analiza

Parametri izrade mješavine kontrolnih uzoraka i uzoraka s miješanim aditivima prikazani su u tablici 6. Kada se ispituju volumetrijska svojstva kontrolnih i uzoraka s miješanim aditivima, praznine (šupljine) u mješavini (VA) i između agregata (VMA) povećavaju se s povećanjem količine punila. Međutim, šupljine ispunjene bitumenom (VFA) i jedinične težine smanjuju se s povećanjem količine punila. To je zbog manje veličine zrna



Slika 5. Faze kondicioniranja uzorka za ispitivanje osjetljivosti na djelovanje vode: a) usisavanje; b) zamrzavanje i odmrzavanje; c) grijanje u vodenoj kupelji

Tablica 6. Projektirana SMA mješavina i volumetrijska svojstva SMA mješavina s dodanim punilom

	Udio dodanog punila [%]	OAC [%]	VA [%]	VMA [%]	VFA [%]	Gustoća
Kontrolna mješavina	0,0	6,5	4,01	16,30	75,4	2,509
Specifikacija ^a	-	≥ 5,8	3-4	≥ 16,0	-	-
Leteći pepeo (razred C)	0,5	6,5	3,98	16,23	75,6	2,511
	1,0	6,5	4,02	16,27	75,1	2,508
	2,0	6,5	4,17	16,40	74,6	2,505
	4,0	6,5	4,32	16,53	73,7	2,498
Leteći pepeo (razred F)	0,5	6,5	3,96	16,20	75,2	2,510
	1,0	6,5	4,07	16,31	74,8	2,507
	2,0	6,5	4,37	16,57	73,6	2,497
	4,0	6,5	4,65	16,52	73,7	2,991
Hidratizirano vapno	0,5	6,5	4,10	16,34	74,9	2,508
	1,0	6,5	4,17	16,40	74,6	2,503
	2,0	6,5	4,46	16,48	74,2	2,496
	4,0	6,5	4,99	17,10	70,9	2,483

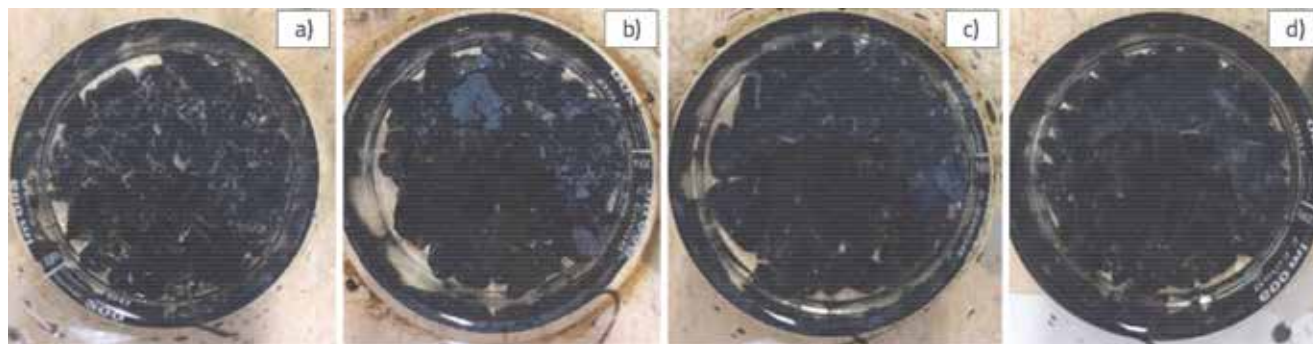
^aTehnička specifikacija za izgradnju autoceste [33].

letećeg pepela u usporedbi s veličinom kamenog praha i ovisi o primjeni optimalnog udjela bitumena (eng. *optimum bitumen content* - OAC) i energije zbijanja. Iako nema velike razlike između projektiranih vrijednosti punila dodanih mješavini, vrijednosti šupljina od 2 % i 4 % aditiva dobivaju se iznad granične vrijednosti od 4 %. Aditivi se zamjenjuju kamenim prahom u različitim postocima i miješaju s optimalnim bitumenom od 6,5 % određenim pomoću kontrolnih uzoraka. Optimalni omjer bitumena pokazuje malu promjenu zbog promjena u jediničnoj težini i raspodjeli veličine zrna aditiva korištenih u ovom istraživanju. Ovisno o ovom slučaju, vrijednosti šupljina u mješavini i između agregata mijenjaju se s dodavanjem aditivnih vrsta i povećanjem količine aditiva, kao što se i očekivalo.

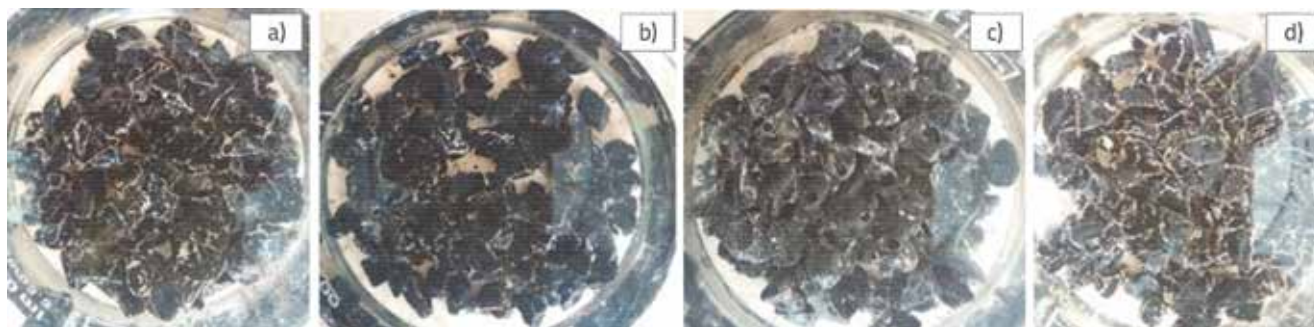
3.2. ispitivanje ljuštenja (odvajanja) po Nicholsonu

Ovo ispitivanje provedeno je prema normi ASTM D 1664. Učinci vrste aditiva, količina i metode miješanja određuju se za čvrstoće asfaltnih mješavina na ljuštenje. Mješavine pripremljene

miješanjem hidratiziranog vapna suhom metodom prikazane su na slici 6. Najbolja vrijednost postiže se hidratiziranim vapnom kao aditivom u Nicholsonovu ispitivanju ljuštenja. Najbolja vrijednost ljuštenja dobiva se dodavanjem 1,0 % do 2,0 % hidratiziranog vapna prikazanog na slici 6. Mješavine pripremljene dodatkom letećeg pepela razreda C mokrom metodom prikazane su na slici 7. Suha metoda daje bolji rezultat od mokre metode za mješavine a letećeg pepela razreda C za čvrstoću na ljuštenje. Dok dodavanje LAA, kao aditiva bitumenu relativno poboljšava svojstva mješavina za čvrstoću na ljuštenje, to poboljšanje vrijednosti indirektnih vlačnih ispitivanja ne može se vidjeti. Rezultati za ljuštenje drugih aditiva navedeni su u tablici 7. Dodavanje LAA u asfaltnu mješavinu značajno poboljšava svojstva uzoraka pripremljenih dodavanjem letećeg pepela razreda C i razreda F. Mokra metoda djelomično je uspješna u usporedbi s uzorcima kojima se dodaje vapno pripremljeno suhom metodom. Međutim, korištenje LAA s vapnom ne poboljšava svojstva uzoraka. U mokroj metodi, uzorci pomiješani s LAA-om i bez njega ne mogu se poboljšati u usporedbi s kontrolnim uzorcima.



Slika 6. Nicholsonovo ispitivanje ljuštenja - hidratizirano vapno bez LAA za suhu metodu: a) 0,5 %; b) 1,0 %; c) 2,0 %; d) 4,0 %



Slika 7. Nicholsonovo ispitivanje ljuštenja - leteći pepeo razreda C bez LAA za mokru metodu: a) 0,5 %; b) 1,0 %; c) 2,0 %; d) 4,0 %

Tablica 7. Rezultat Nicholsonova ispitivanja ljuštenja

Vrsta aditiva u mješavinama	Sastojci dodanog punila [%]	Suha metoda		Mokra metoda	
		bez LAA	s LAA	bez LAA	s LAA
Kontrolna mješavina	0,0	50-55	65-70	50-55	80-85
Leteći pepeo (razred C)	0,5	60-65	75-80	50-55	75-80
	1,0	85-90	90-95	75-80	85-90
	2,0	80-85	90-95	70-80	80-85
	4,0	75-80	85-90	60-65	75-80
Leteći pepeo (razred F)	0,5	65-70	75-80	60-65	70-75
	1,0	75-80	85-90	75-80	85-90
	2,0	85-90	95-100	80-85	90-95
	4,0	80-85	85-90	75-80	85-90
Hidratizirano vapno	0,5	80-85	85-90	85-90	90-95
	1,0	90-95	90-95	95-100	95-100
	2,0	95-100	95-100	90-95	90-95
	4,0	85-90	90-95	90-95	85-90

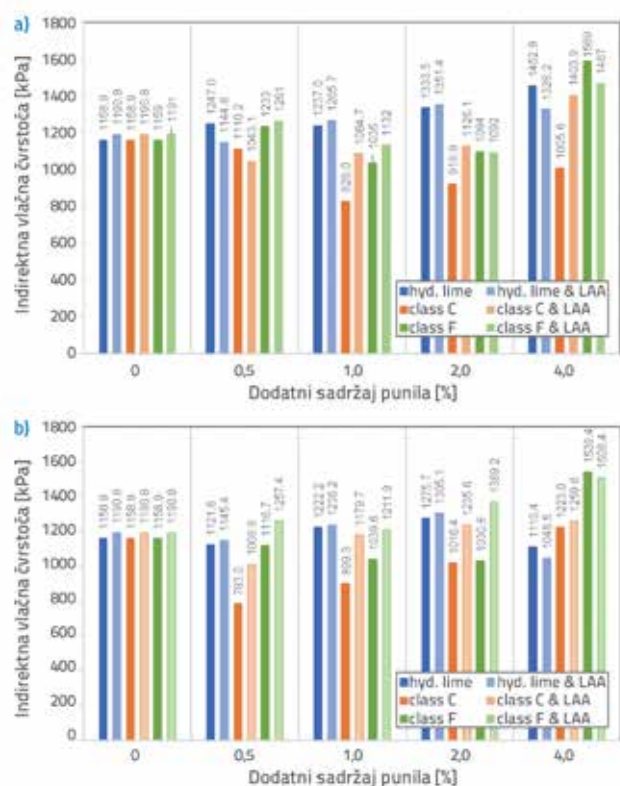
Može se zapaziti da se područja vizualnog ljuštenja ne mogu smanjiti na mješavinama pripremljenim mokrom metodom s letećim pepelom razreda C i razreda F. U metodi s kašom (eng. *slurry*) nema dovoljno formiranih veza između letećeg pepela i agregata zbog pojave gruda (eng. *clumping*). Međutim, poboljšanje se može vidjeti u uzorcima pripremljenih od obje vrste pepela pomoću sredstva protiv ljuštenja. Metoda kaše (eng. *slurry*) djelomično je učinkovitija od suhe metode u slučaju hidratiziranih mješavina s dodatkom vapna. Primijećeno je da korištenje sredstva protiv ljuštenja s vapnom ne poboljšava čvrstoću mješavina.

3.3. Indirektna metoda ispitivanja vlačne čvrstoće

Indirektna metoda ispitivanja vlačne čvrstoće posebno se primjenjuje za razumijevanje učinka bitumenskog sloja na svojstva čvrstoće asfaltnih mješavina. Svojstva aditiva važan su parametar za debljinu bitumenskog sloja. Suha metoda učinkovita je za pripremu mješavina s aditivima punila. U ovom dijelu istražuju se učinci vrsta punila, količina punila i metoda

miješanja na indirektnu vlačnu čvrstoću mješavina. Određuje se i čvrstoća uzoraka pripremljenih koristeći LAA s pepelom i vapnom.

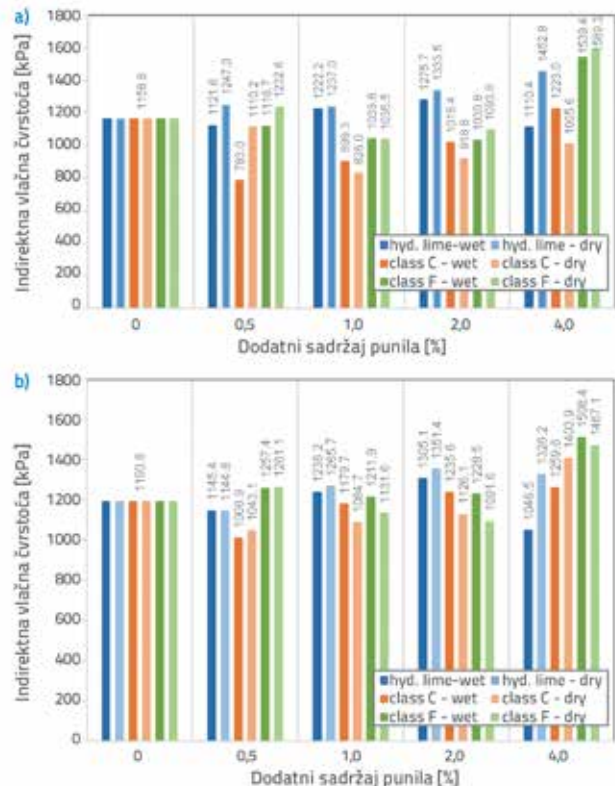
Može se vidjeti da se čvrstoća uzoraka pripremljenih dodavanjem letećeg pepela razreda C, u svim udjelima, suhom metodom smanjuje u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Čvrstoća pripremljenih uzoraka gdje se dodaje LAA sa 4 % letećeg pepela razreda C, povećava se za 15 % od snage kontroliranih uzoraka (slika 8a). Pri ocjenjivanju eksperimentalnih rezultata, čvrstoća letećeg pepela razreda C dodanog uzorcima pripremljenih suhom metodom smanjena je u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Čvrstoća uzoraka pripremljenih korištenjem LAA, s dodavanjem 4 % letećeg pepela razreda C, povećana je za 15 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Dodavanje LAA u mješavine samo po sebi povećava čvrstoću uzoraka (slika 8a). Čvrstoća uzoraka pripremljenih dodavanjem letećeg pepela razreda F blago se smanjuje u usporedbi s jačinom kontrolnih uzoraka općenito. Međutim, 4 % letećeg pepela razreda F, dodanog pripremljenoj mješavini, povećava čvrstoću uzoraka na približno 37 %. Vrijednosti čvrstoće uzoraka pripremljenih s LAA-om



Slika 8. Rezultati indirektnog ispitivanja vlačne čvrstoće: a) suha metoda; b) mokra metoda

više-manje su blizu jedna drugoj (slika 8.a). Međutim, čvrstoća uzoraka pripremljenih pomoću hidratiziranog vapna povećava se s povećanjem količina aditiva. Četiri posto dodanih hidratiziranih mješavina pripremljenih od vapna povećava čvrstoću uzoraka za približno 25 %. Dodavanje LAA u mješavine ne povećava značajno čvrstoću mješavina (slika 8.a). Čvrstoća hidratiziranih uzoraka dodanog vapna uvijek se povećava, a najbolji rezultati čvrstoće postižu se uzorcima s dodanim vapnom. Međutim, čvrstoća mješavine pripremljene s letećim pepelom razreda F (4 %) ostvarila je u važan skok (slika 9.a). Čvrstoća uzoraka pripremljenih s letećim pepelom razreda C daje najnižu vrijednost među njima i smanjila se u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Dodavanje LAA uzorcima pripremljenim s pepelom letećeg pepela razreda C značajno poboljšava neizravnu vlačnu čvrstoću mješavina (slika 9.b).

Rezultati indirektnog vlačnog ispitivanja uzoraka pripremljenih mokrom metodom dani su na slici 8.b i 9. Vrijednosti čvrstoće razreda C dodanih (sa svim postocima) uzoraka smanjene su u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Međutim, dodavanje 4 % letećeg pepela (razred C) povećava čvrstoću uzoraka. Dodavanje LAA u mješavine općenito poboljšava čvrstoću uzoraka kojima je dodan leteći pepeo (razred C). Međutim, dodavanjem 4 % letećeg pepela (razred C) poboljšava se čvrstoćavrlo malo. Dodavanjem LAA-e mješavinama ne poboljšava se znatno u usporedbi s kontrolnim uzorcima (slika. 8b). Čvrstoća uzoraka pripremljenih sa svim udjelima letećeg pepela (razred F), osim



Slika 9. Rezultati indirektnog ispitivanja vlačne čvrstoće dodatnog punila: a) bez LAA; b) s LAA-om

4 %, primjenom mokre metode bez LAA općenito se smanjuje u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Dodavanje 4 % letećeg pepela (razred F) povećava čvrstoću na 33 %. Dodavanje svih udjela letećeg pepela (razred F), osim 4 %, mokrom metodom s LAA-om, općenito poboljšava svojstva čvrstoće mješavina (slika 8b). U mokroj metodi, dodavanje letećeg pepela razreda F i razreda C općenito daje niže vrijednosti u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Vrijednosti indirektno metode ispitivanja vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom razreda C s LAA značajno su poboljšane. Dodavanje hidratiziranog vapna povećava čvrstoću uzoraka. Međutim, nagli pad čvrstoće može se vidjeti na uzorcima pripremljenim dodavanjem 4 % vapna. To pokazuje da je optimalna vrijednost za vapno oko 1,0-2,0 %. Ne može se vidjeti veliki utjecaj dodavanja LAA u mješavine (slika 8.b).

Najbolji rezultati postižu se dodavanjem svih postotaka vapna (osim 4 %) u mješavine s LAA. Najbolji rezultat postiže se dodavanjem 4 % letećeg pepela (razred F) koji ima 33 % povećanja u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Međutim, čvrstoća uzoraka pripremljenih s malim postotkom letećeg pepela (razred F) smanjena je u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Čvrstoća 4 % miješanih uzoraka s letećim pepelom (razred C) povećava se za 5,5 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Čvrstoća uzorka s dodanim letećim pepelom (razred C) ima najnižu vrijednost među aditivima i pokazuje trend smanjenja u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Međutim, čvrstoća je znatno pala dodavanjem 4 %

vapna u mješavine (slika 9.a). Indirektna vlačna čvrstoća uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred C) pripremljenih s LAA-om i primjenom mokre metode znatno je poboljšana. Međutim, vrijednosti čvrstoće svih dodanih materijala u svim postocima, osim 4 %, više su ili manje blizu jedna drugoj (slika 10.b). Dodavanje letećeg pepela razreda F u mješavinu daje dobar rezultat, a to je vidljivo u slučaju 4 % dodanog letećeg pepela (slika 9.b). Međutim, čvrstoća mješavina s 4 % dodanog vapna znatno je smanjena kad je pripremljena mokrom metodom za razliku od suhe metode (slika 9.b).

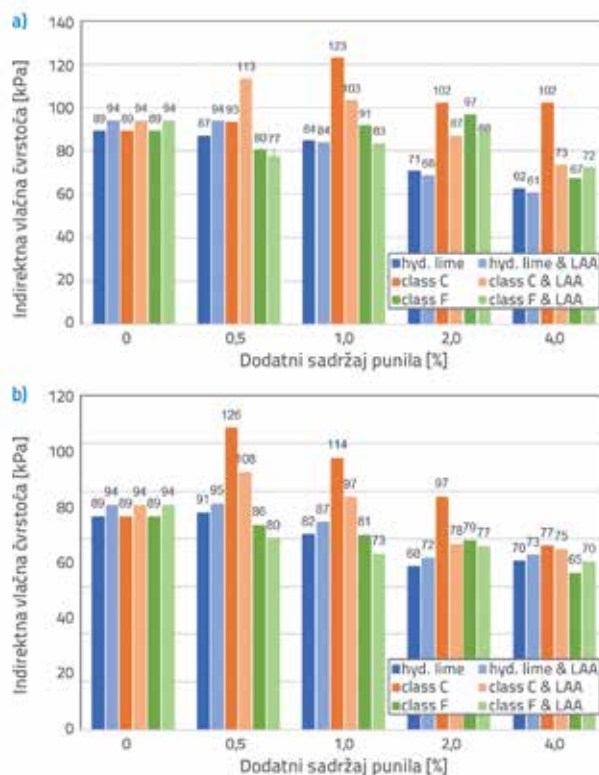
Čvrstoća mješavina s dodanim letećim pepelom (razred C) bez LAA veća je od čvrstoće pripremljene suhom metodom. Čvrstoća uzoraka pripremljenih mokrom metodom uvijek se povećava za jedan poto nakon dodavanja letećeg pepela razreda C. Čvrstoća uzoraka s dodanih 4 % pripremljenih mokrom metodom je 18 % veća od čvrstoće onih pripremljenih suhom metodom (slika 11.a). Uzorci pripremljeni mokrom metodom s LAA-om daju bolji rezultat od rezultata suhe metode, osim uzoraka s dodanih 4 % (slika 11.b).

Najveći rezultati za čvrstoću dobiveni su za uzorke pripremljene s letećim pepelom razreda F, mokrom metodom s LAA-om, u usporedbi s onima pripremljenih suhom metodom s LAA-om (slika 11.). Međutim, rezultati čvrstoće uzoraka bez LAA i pripremljenih mokrim i suhim metodama prilično su blizu jedan drugome. Iako je čvrstoća uzoraka s dodanim vapnom pripremljenih suhom metodom bez LAA visoka, ali niske razine, ta razlika nestaje kod uzoraka s dodanim LAA-oma. Čvrstoća uzoraka pripremljenih mokrom metodom dodavanjem 4 % hidratiziranog vapna znatno se smanjuje u usporedbi s onom pripremljenih suhom metodom (slika 11.). Mokra metoda ne poboljšava svojstva ljuštenja uzoraka asfalta pripremljenih dodavanjem letećeg pepela u obliku kaše (eng. *slurry*). Taj oblik kaše ne stvara dovoljno prijanjanja između čestica. Stoga se u mješavini nalaze nagomilane čestice i one se ne mogu homogeno rasporediti u bitumen te se stoga može smanjiti utjecaj letećeg pepela.

3.4. Otpornost na oštećenje zbog djelovanja vode

Modificirano Lottmanovo ispitivanje provodi se kako bi se utvrdila osjetljivost asfaltnih mješavina na djelovanja vode. Indirektna vrijednosti vlačne čvrstoće razmjernje su određivanju čvrstoće kondicioniranih i nekondicioniranih uzoraka naspram oštećenju od vode prema normi AASHTO T-283, a izračunava se i numerički indeks. Na slikama 10a i 11 prikazane su indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka s miješanim aditivima pripremljenim suhom metodom. Neizravne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanih 1,0 %, 2,0 % i 4 % letećeg pepela (razred C), pripremljenih bez LAA, poboljšane su u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Suprotno očekivanjima, dobivaju se niže indirektna vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s LAA-om u usporedbi s ostalim vrijednostima čvrstoće uzoraka s dodanih 1,0 %, i 2,0 % letećeg pepela. Međutim, uzorci s 4 % dodanog letećeg pepela daju indirektnu neizravnu vrijednost

vlačne čvrstoće koja prelazi graničnu vrijednost od 80 % (slika 10a). Indirektna vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred F) bez LAA-e veće su 3-4 % od vrijednosti uzoraka s LAA-om. Indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka s mješovitim aditivima i kontrolnih uzoraka blizu su jedna drugoj. Međutim, vrijednosti čvrstoće uzoraka s 4 % dodanog letećeg pepela pokazuju značajno niske vrijednosti i padaju ispod granične vrijednosti od 80 % (slika 10a). Indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka s dodanim vapnom uvijek su smanjene. Ne može se vidjeti poboljšanje u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Vrijednosti osjetljivosti na djelovanje vode uzoraka kojima je dodano 2,0 % i 4 % vapna ostaju ispod graničnih vrijednosti. Ne može se uočiti učinak LAA na poboljšanje osjetljivosti uzoraka na djelovanje vode (slika 10.a). Indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka s miješanim aditivima pripremljenih mokrom metodom navedene su na slikama 10.b i 11. Uzorci pripremljeni dodavanjem letećeg pepela razreda C bez LAA daju bolje rezultate u usporedbi s drugim aditivima. Indirektna vlačna vrijednosti uzoraka kojima je dodano 0,5 %, 1,0 % i 2 % letećeg pepela (razred C), pripremljeni bez LAA-e, poboljšani su u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka kojima je dodano 0,5 %, 1,0 % i 2 % letećeg pepela (razred C), pripremljeni s LAA-om, pokazuju malo poboljšanje. Indirektna vlačna vrijednosti čvrstoće uzoraka kojima je dodano 4 % letećeg pepela (razred C), pripremljenih s LAA-om i bez njega, ostaju ispod granične vrijednosti od 80 % (slika 10.b).



Slika 10. Omjer indirektna vlačna čvrstoće: a) suha metoda; b) mokra metoda

Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred F) smanjuju se s povećanjem postotka aditiva (slika 10.b). Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim 4 % letećeg pepela (razred F), pripremljenih bez LAA, malo su veće od onih s LAA-om. Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim vapnom smanjuju se s povećanjem postotka aditiva. Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim vapnom su niže od onih bez LAA. Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim vapnom, pripremljenim s LAA-om i bez njega ostaju ispod onih za kontrolne uzorke. Vrijednosti osjetljivosti na djelovanje vode uzoraka kojima je dodano 2,0 % i 4 % vapna ostaju ispod graničnih vrijednosti od 80 % (slika 10.b).

Uspoređujući aditive u pogledu osjetljivosti na djelovanje vode, indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred C), bez LAA, osim 4,0 %, izračunane su iznad 100 % i pokazuju važno poboljšanje u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Najbolji rezultat dobiven je za uzorak s 1,0 % dodanog letećeg pepela (razred C). Dok indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred F) dodanih pokazuju čak i malo poboljšanja, indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim vapnom se smanjuju i imaju najniže vrijednosti (slika 11.a). Dok su indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred C) s LAA-om smanjene, vrijednosti čvrstoće uzoraka s drugim dodanim aditivima pokazuju slične vrijednosti u usporedbi s vrijednostima uzoraka bez LAA (slika 11.b).

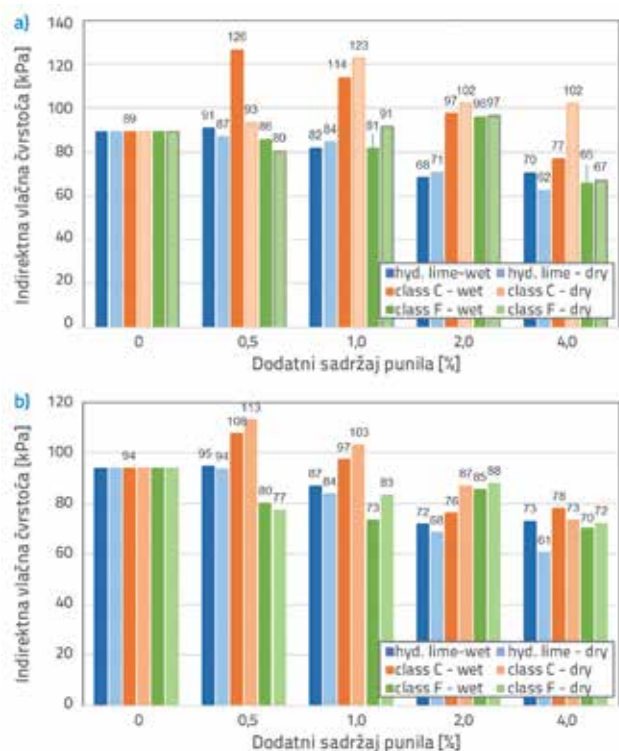
U istraživanju učinaka materijala za punila na osjetljivost uzoraka pripremljenih mokrom metodom, indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka s dodanim letećim pepelom (razred C) bez LAA-e, bolje su od uzoraka pripremljenih suhom metodom, osim uzoraka s dodanim 0,5 % letećeg pepela razreda C. Uzorci s dodanim letećim pepelom razreda C (osim 4,0%) pokazuju značajno poboljšanje. Najbolji rezultati dobiveni su za uzorke s dodanim 0,5 % letećeg pepela razreda C, pripremljeni mokrom metodom i za uzorke s dodanim 1,0 % letećeg pepela razreda C, pripremljene suhom metodom. Uzorci pripremljeni suhom metodom s LAA-om daju bolje rezultate od rezultata za mokru metodu. Može se vidjeti da obje metode daju više ili manje slične rezultate (slika 11). Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka poboljšavaju se dodavanjem 2,0 % letećeg pepela razreda F uzorcima pripremljenim bez LAA. Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka pripremljenih suhim i mokrim metodama s LAA-om i bez njega blizu su jedna drugoj (slika 11.a).

Indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće uzoraka smanjuju se povećanjem postotka vapna, a to je isto za obje metode. Uzorci pripremljeni s LAA-om, koristeći mokru metodu, daju bolje rezultate od onih bez LAA (sl.11a). Općenito, učinci metoda miješanja u slučajevima letećeg pepela razreda F i uzoraka dodanog hidratiziranog vapna nisu vidljivi. Učinci LAA-om i bez njega na osjetljivost uzoraka na vlagu također se ne mogu primijetiti.

4. Zaključak i preporuke

Istražuju se učinci aditiva punilu, kao što su leteći pepeo razreda C i razreda F te hidratizirano vapno, na čvrstoću i otpornost djelovanja vode kod uzoraka asfalta pripremljenih u laboratoriju. Ovdje se navode neki rezultati i preporuke:

- Dodavanje hidratiziranog vapna učinkovitije je od ostalih aditiva po Nicholsonovoj otpornosti na ljuštenje uzoraka asfalta pripremljenih suhom metodom. Međutim, uzimajući u obzir druge aditive, rezultati ispitivanja ljuštenja ne podudaraju se s rezultatima ispitivanja osjetljivosti na djelovanje vode.
- Rezultati indirektnog vlačnog ispitivanja za suhu metodu, dodavanje vapna u asfaltne mješavine pripremljene bez LAA, povećavaju čvrstoću s povećanjem postotka aditiva. U ovom slučaju, promjer čestica vapna je manji od promjera drugih aditiva. Stoga povećanje površine stvara fini sloj čestica, a time se povećavaju indirektne vrijednosti vlačne čvrstoće.
- Nema mnogo razlika u rezultatima indirektnog vlačnog ispitivanja dodavanja malih postotaka letećeg pepela razreda F u asfaltne mješavine. Međutim, dodavanje 4,0 % letećeg pepela razreda F bitno poboljšava svojstva čvrstoće asfaltnih mješavina. Dodavanje letećeg pepela razreda C smanjuje čvrstoću uzoraka u usporedbi s drugim aditivima. Čvrstoća uzoraka kojima je dodan leteći pepeo razreda C također je manja od kontrolnih uzoraka. Međutim, dodavanje LAA mješavinama pripremljenim dodavanjem letećeg pepela razreda C poboljšava svojstva čvrstoće mješavina.



Slika 11. Omjer indirektna vlačne čvrstoće letećeg pepela razreda C: a) bez LAA; b) s LAA-om

- Rezultati pokazuju da je optimalna vrijednost za vapno oko 1,0 do 2,0 %. Dodavanje 4,0 % vapna u asfaltnu mješavinu mokrom metodom mnogo je u mješavini i te se čestice nagomilavaju i ne može doći do prijanjanja pa se stoga čvrstoća smanjuje.
- Nicolsonova otpornost na ljuštenje relativno se poboljšava dodavanjem komercijalnog tekućeg sredstva protiv ljuštenja. Međutim, osjetljivost na djelovanje vode dobivena indirektnim vrijednostima vlačne čvrstoće ne može se značajnije poboljšati
- Dok indirektna vrijednosti vlačne čvrstoće nekondicioniranih uzoraka pokazuju niska svojstva i relativno poboljšanje, indirektni vlačni omjeri su iznad 100 %. Leteći pepeo razreda C kao aditiv može poboljšati osjetljivost na djelovanje vode SMA mješavina.
- Općenito, učinci metoda miješanja za pepeo razreda F i hidratizirano vapno nisu bili zapaženi u ispitivanju osjetljivosti na djelovanje vode.
- Metoda kaše (eng. *slurry*) (mokre) ne može pokazati očekivana svojstva. Mogu se istražiti praktične metode za pronalaženje aditiva koji učinkovito pokrivaju površinu agregata.
- Svakako je potrebno istražiti učinke na agregat silikatnog sastava, koji se općenito koristi u SMA.

LITERATURA

- [1] Caro, S., Masad, E., Airey, G., Bhasin, A., Little, D.: Probabilistic analysis of fracture in asphalt mixtures caused by moisture damage, *Transp. Res. Rec., J. of Transp. Res. Bord*, 2057 (2008), pp. 28-36, <https://doi.org/10.3141/2057-04>
- [2] Khodaii, A., Haghshenas, H.F., Kazemi Tehrani, H., Khedmati, M.: Application of response surface methodology to evaluate stone matrix asphalt stripping potential, *KSCE J. of Civil Eng.*, 17 (2013) 1, pp. 117-121, <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1698-6>
- [3] Arabani, M., Hamed, G.H.: Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt, *Inter. J. of Pave. Eng.*, 15 (2014) 1, pp. 66-78, <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.778410>
- [4] Lu, Q., Harvey, J.T.: Investigations for conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods, University of California Pavement Research Center, Research Report: UCPRC-RR-2005-15, 2005
- [5] Chen, X., Huang, B.: Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests, *Construction and Building Material*, 22 (2008) 9, pp. 1950-1962, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.014>
- [6] Park, D.W., Seo, W.J., Kim, J., Vo, H.V.: Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixture using liquid anti-stripping agents, *Construction and Building Material*, 144 (2017), pp. 399-405, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.214>
- [7] Pasandín, A.R., Pérez, I.: The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen, *Inter. J. of Adh. & Adhesives*, 58 (2015), pp. 53-58, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.01.005>
- [8] Zhou, S.B., Liu, S., Xiang, Y.: Effects of filler Svojstva on the performance of asphalt mastic: A statistical analysis of the laboratory testing results, *Inter. J. of Civil Eng.*, 16 (2018), pp.1175-1183, <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0272-x>
- [9] AbuEl-Maaty, B.A.E.: Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures, *Ain Shams Eng. J.*, 4 (2013), pp. 351-363, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.10.009>
- [10] Epps, J., Berger, E., Anagnos, J.N.: Treatments. In: *Proceedings of the national seminar on moisture sensitivity of asphalt pavements*. Transportation Research Board, 2003
- [11] Airey, G.D., Collop, A.C., Zoorob, S.E., Elliot R.C.: The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage, *Constr. Build. Mater.*, 22 (2008) 9, pp. 2015-2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.009>
- [12] Jahromi, S.G.: Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009), pp. 2324-2331, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.007>
- [13] Kim, Y.R., Pinto, I., Park, S.W.: Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results, *Constr. Build. Mater.*, 29 (2012), pp. 383-393, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.012>
- [14] Nejad, F.M., Hamed, G.H., Azarhoosh, A.: The use of surface free energy method to evaluate the mechanism of the effect of hydrate lime on moisture damage of hot mix asphalt, *J. Mater. Civil Eng.*, 25 (2012) 8, pp. 1119-1126, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000650](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000650)
- [15] National Lime Association: How to add hydrated lime to asphalt, an overview of current methods. National Lime Association, 2003.
- [16] Fwa, T.F., Ong, B.K.: Effect of moisture in aggregates on performance of asphalt, *Trans. Res. Rec.*, 1454 (1994), pp. 28-35.
- [17] McCann, M., Sebaaly, P.E.: Evaluation of moisture sensitivity and performance of lime in hot-mix asphalt, *Transp. Res. Rec.*, 1832 (2003), pp. 9-16, <https://doi.org/10.3141/1832-02>
- [18] Gorkem, C., Sengoz, B.: Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Constr. and Build. Mater.*, 23 (2009) 6, pp. 2227-2236.
- [19] Little, D.N., Epps, J.A.: The benefits of hydrated lime in HMA, National Lime Association, 2001.
- [20] Esarwi, M.A., Hainin, M.R., Chik, A.A.: Stripping resistance of Malaysian hot mix asphalt mixture using hydrated lime as filler, *EASTS Inter. Symp. on Sustainable Transp. Incorpor. Malaysian Universities Transport Res. Forum Conference (MUTRFC08)*. Universiti Teknologi Malaysia. 12-13 August, 2008.
- [21] American Coal Ash Association: Fly ash facts for highway engineers, Washington D.C., Federal Highway Administration, 2003.
- [22] Rosner, J.C., Chehovits, J.G., Morris, G.R.: Fly ash as a mineral filler and antistrip agent for asphalt concrete, *Challenge of change - 6th international ash utilization symposium*, In: *Proceedings of the US Dept of Energy, Morgantown, West Virginia*, 1982.
- [23] Henning, N.E.: Evaluation of lignite fly ash as a mineral filler in asphaltic concrete. Report No. (2)-73, Twin City Testing and Engineering Laboratory, St. Paul, Minneapolis, 1974.

- [24] Dougan, C.: Past and current use of recycling materials by the Connecticut Department of Transportation, Report No. 343-26-91-1, Connecticut DOT, Wethersfield, Connecticut, 1991.
- [25] Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A.T.: Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures, *J. Mater. Civil Eng.*, 8 (1996) 1, pp. 19–25, [https://doi.org/ 10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(19))
- [26] Huang, B., Shu, X., Dong, Q., Shen, J.: Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers, *J. of Mater. in Civil Eng.*, (2010), pp. 667-673, [https://doi.org/ 10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000064)
- [27] Moghadas Nejad, F., Aflaki, E., Mohammadi, M.A.: Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. *J of Constr. and Build. Mater.*, 24 (2010) 7, pp. 1158-1165, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.025](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.025)
- [28] Serfass, J.P., Samanos, J.: Fiber-modified asphalt concrete Svojstva, application and behavior. *J. Ass oC. Asph. Pav.Tech. AAPT*, 65 (1996), pp. 193-230.
- [29] AASHTO T283. Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2014.
- [30] AASHTO T166. Standard method of test for bulk specific gravity (Gmb) of compacted hot mix asphalt (HMA) using saturated surface-dry specimens, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2016.
- [31] AASHTO T 209 (2012) Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- [32] ASTM D1664-80. Test method for coating and stripping of bitumen-aggregate mixtures, Annual Book of ASTM Norms, 1985.
- [33] Turkish State Highways Technical Specifications. General Directorate of Highways, Ankara, Turkey, 2013.
- [34] Shen, D.H., Wu, C.M., Du, J.C.: Performance evaluation of porous asphalt with granulated synthetic lightweight aggregate. *Constr and Buil Mater.*, 22 (2008) 5, pp. 902-910.