

Primljen / Received: 21.11.2018.

Ispravljen / Corrected: 28.3.2019.

Prihvaćen / Accepted: 8.7.2019.

Dostupno online / Available online: 10.7.2020.

Ispitivanje utjecaja nano čestica minerala uleksita na mehaničko ponašanje toplih asfaltnih mješavina

Autori:

Doc.dr.sc. **Tuba Kütük-Sert**, dipl.ing.građ.Sveučilište Recep Tayyip Erdogan, Turska
Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

tuba.kutuk@erdogan.edu.tr

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Resul Ekrem Günbey**, dipl.ing.građ.Kvantum inženjering, Rize, Turska
resulekremgunbey@hotmail.com

Prethodno priopćenje

Tuba Kütük-Sert, Resul Ekrem Günbey

Ispitivanje utjecaja nano čestica minerala uleksita na mehaničko ponašanje toplih asfaltnih mješavina

U radu je prikazano istraživanje pokazalo je da su potrebna daljnja ispitivanja aditiva u tehnologiji proizvodnje toplih asfaltnih mješavina. Uočeno je da se negativni učinak gubitka adhezije u asfaltnim mješavinama proizvedenim toplim postupkom može smanjiti dodatkom nanočestica minerala uleksita komercijalnom aditivu. U tu svrhu provedena ispitivanja stabilnosti po Marshallu, indirektno ispitivanje modula vlačne čvrstoće i ispitivanja osjetljivosti na vlagu. Na temelju analize dobivenih rezultata vidljivo je da se temperatura proizvodnje WMA mješavine može dodatno smanjiti, a prilikom ugradnje takvih mješavina potrebna je manja energija zbijanja, čime se osigurava ušteda energije.

Ključne riječi:

tople asfaltnje mješavine, mineral uleksit, stabilnost po Marshallu, osjetljivost na vlagu, vlačna čvrstoća

Research paper

Tuba Kütük-Sert, Resul Ekrem Günbey

Investigation of nano ulexite mineral effects on mechanical behaviour of warm mix asphalt pavements

The research presented in the paper shows that further investigations on additives used in the warm mix asphalt technology are needed. It was observed that the negative effect of adhesion loss in asphalt mixes produced by warm process can be reduced by adding ulexite mineral nano particles to a commercial additive. The Marshall stability, Indirect tensile strength modulus, and moisture susceptibility, were tested for this purpose. Based on the analysis of results, it can be seen that the WMA mixture production temperature can additionally be reduced, and that lower compaction energy is needed during placement of such mixtures, which results in energy savings.

Key words:

warm mix asphalts, ulexite mineral, Marshall stability, moisture susceptibility, tensile strength

Vorherige Mitteilung

Tuba Kütük-Sert, Resul Ekrem Günbey

Untersuchung des Einflusses von Nanopartikeln des Minerals Ulexit auf das mechanische Verhalten heißer Asphaltmischungen

In der Abhandlung hat die Untersuchung gezeigt, dass weitere Untersuchungen von Zusätzen in der Technologie der Herstellung von heißen Asphaltmischungen erforderlich sind. Festgestellt wurde, dass der negative Effekt des Adhäsionsverlustes in Asphaltmischungen, hergestellt durch ein heißes Verfahren, durch die Zugabe des Minerals Ulexit zum kommerziellen Zusatz verringert werden kann. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen der Stabilität gemäß Marshall, indirekte Untersuchungen des Zugmodells und die Untersuchung auf Feuchtigkeitsempfindlichkeit durchgeführt. Aufgrund der Analyse der erhaltenen Ergebnisse ist ersichtlich, dass die Produktionstemperatur von WMA-Mischungen zusätzlich gesenkt werden kann, und bei Einbau solcher Mischungen ist eine geringere Verdichtungsenergie erforderlich, was Energieeinsparungen gewährleistet.

Schlüsselwörter:

heiße Asphaltmischungen, Mineral Ulexit, Stabilität nach Marshall, Feuchtigkeitsempfindlichkeit, Zugfestigkeit

1. Uvod

Oko 63 % svjetskih zaliha bora u količini od 803 milijuna tona nalazi se u Turskoj [1]. Na godišnjoj razini u Turskoj se iskoristi oko 1,3 milijuna tona borove rude. U istraživanju prikazanom u ovom radu kao aditiv pri proizvodnji WMA toplih asfaltnih mješavina (eng. *warm-mix asphalt* - WMA) korišten je mineral bora uleksit, kemijske formule $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$. Iako i ostali minerali bora poput kernita ili probertita imaju značajnu komercijalnu vrijednost, uleksit, u komercijalnom smislu, među tim mineralima zauzima prvo mjesto [2]. Pokušao se prevladati nedostatak u mnogim područjima uleksitnih minerala u asfaltnoj industriji, posebno u proizvodnji asfaltnih mješavine proizvedene toplim postupkom, gdje je uleksit vrlo atraktivan kao WMA aditiv te mogući komercijalni proizvod.

Zbog svojih svojstava, kao što su bolja obradivost i zbijanje, asfaltnih mješavine proizvedene toplim postupkom posljednjih godina postaju sve atraktivnije [3]. Primjena novih tehnologija omogućila je snižavanje temperature proizvodnje i ugradnje asfaltnih mješavina. Proizvodnja asfaltnih mješavina pri temperaturama nižim od onih potrebnih za proizvodnju vrućih asfaltnih mješavina omogućena je smanjenjem viskoznosti bitumena. Tople asfaltnih mješavine su bitumenske mješavine pripremljene prikladnom metodom, pri čemu je temperatura proizvodnje smanjena za najmanje 20 - 30 °C u odnosu na temperaturu proizvodnje vruće asfaltnih mješavine, što rezultira znatnom uštedom energije i smanjenjem emisije štetnih plinova u okoliš [4].

Smanjenjem temperature proizvodnje asfaltnih mješavina za 10 °C, emisija štetnih plinova se smanjuje za 50 %, zbog čega se može očekivati da će ova tehnologija u budućnosti dobiti još veću važnost [5]. Ideja upotrebe aditiva radi smanjenja temperature proizvodnje i ugradnje asfaltnih mješavina razvijena je u Europi početkom 1990-ih. Prva istraživanja asfaltnih mješavina proizvedenih toplim postupkom provedena su u Europi, a usmjerena su na smanjenje učinka zagađenja kao odgovor na Kyoto protokol. Od prvih istraživanja do danas mogućnosti zbijanja i zadržavanje ili poboljšanje mehaničkih svojstava asfaltnih mješavina proizvedenih toplim postupkom znatno su poboljšane [6]. Osim toga, budući da se mješavine proizvode na nižim temperaturama nego u slučaju vrućih asfaltnih mješavina, bitumen je manje izložen starenju te je otporniji na pojavu temperaturnih pukotina kao i pukotina uslijed zamora [7]. Toplim asfaltnim mješavinama daje se prednost tijekom gradnje pred vrućim asfaltnim mješavinama zbog jednostavnije ugradnje, kao i smanjenja emisija štetnih plinova. Dokazano je da tehnologija proizvodnje toplih asfaltnih mješavina smanjuje emisiju neugodnih mirisa, para i poliaromatskih ugljikovodika (PAH) za 30 % do 50 % u usporedbi s konvencionalnim vrućim asfaltnim mješavinama [6]. Primjena toplih asfaltnih mješavina idealan je način (NCAT) da se radnicima u cestogradnji osigura čišće radno okruženje. Polutople asfaltnih mješavine proizvedene uz mali utrošak energije dovode do uštede goriva od najmanje 50 %.

To je rezultat smanjene adhezije između agregata i bitumena, što se očituje u prisutnosti vode koja se otpušta u postupku pjenjenja u okviru WMA tehnologije.

Kako bi se riješio taj problem, bilo je potrebno upotrijebiti aditive [8]. U ovom je istraživanju dana prednost aditivu čestica nanoveličine. Materijali s česticama nanoveličine koriste se kako bi se dobili stabilniji i izdržljiviji materijali poboljšanih svojstava [9].

Provedena su istraživanja toplih asfaltnih mješavina za pripremu kojih su korišteni materijali čestica mikronskih i nanoveličina. Prethodna istraživanja obuhvatila su između ostalog ispitivanja osjetljivosti na vlagu tople asfaltnih mješavine koja sadrži hidratizirano vapno nanoveličine [10]. Pretpostavka je bila da nano vlakna, koja su jednoliko raspodijeljena unutar bitumena, imaju adhezijsku ulogu između bitumena i agregata, odnosno da poboljšavaju prianjanje [11]. Istražena je upotrebljivost nanomaterijala u asfaltnim mješavinama i bitumenu [12].

Kad se veličina čestica materijala smanji na nanoveličinu, mijenja se ponašanje materijala, npr. njegovo talište, magnetska svojstva i boja. Upotrebom nanotehnologije mogu se poboljšati različita svojstva asfaltnih mješavina i bitumena. Modifikacijom bitumena nanoglinom povećava se prianjanje i posmična čvrstoća, a poboljšava se i njegova otpornost na deformacije. Osim toga, dodavanje nano-gline smanjuje zamor pri niskim temperaturama. Na temelju rezultata o istraživanju ponašanja asfaltnih mješavina s dodatkom nanomaterijala pri niskim temperaturama, može se zaključiti da će nanoaditivi poboljšati svojstva asfaltnih mješavina proizvedenih toplim postupkom.

Ispitivanjem svojstva asfaltnih mješavina s dodatkom nanokalcijevog karbonata [13] utvrđeno je da 6 % nanoaditiva poboljšava dinamičku stabilnost mješavine. U istraživanju [14] je naglašeno da je primjena nanotehnologije u građevinarstvu prilično nova, a u okviru istraživanja ispitana su svojstva bitumena koji sadrže 0 %, 0,5 %, 1 % i 1,5 % ugljikovih nanočestica. Rezultati istraživanja su pokazali da se dodatkom nanoaditiva povećava otpornost na deformacije.

Istražena je promjena svojstava splitmastiks asfaltna modificiranog s nano-SiO₂ [15]. SiO₂ srednje veličine samljeven je na čestice veličine 15 nm. Mješavine modificirane sa SBS/nano SiO₂ pokazale su veću stabilnost i vlačnu čvrstoću u odnosu na kontrolnu mješavinu, te su povećana adhezijska i kohezijska svojstva mješavina sa SBS/nano SiO₂ aditivom.

Ispitivana je uporaba različitih nanomaterijala u asfaltnim mješavinama [16]. U ovom istraživanju nano-glina uočeno je da se posmična čvrstoća asfaltna mješavina a 2 % aditiva nanogline povećala za 184 %, a također je poboljšana otpornost mješavine na kolotražnje.

Istražena su reološka svojstva toplih asfaltnih mješavina modificiranih nanohidratiziranim vapnom [17]. U ovom istraživanju korišteno je hidratizirano vapno veličine čestica 50 nm i 100 nm. Mješavine su pripremljene dodavanjem 5 %, 10 % i 20 % nanohidratiziranog vapna bitumenu te dodavanjem 3 %, 4,5 % i 6 % aditiva za upjenjivanje. Na mješavinama su provedena ispitivanja razvoja pukotina u tragovima kotača, razvoja pukotina od zamora i pojave temperaturnih pukotina. Rezultati ispitivanja su pokazali da dodatak nanogline i ugljikovih mikrovlakana poboljšava svojstva osjetljivosti asfaltna

na vlagu i u mnogim situacijama smanjuju potencijal nastanka oštećenja uslijed djelovanja vlage [18]. Uočeno je da je upotreba nanočestica imala pozitivne učinke s obzirom na osjetljivost na vlagu. Dodavanje 1,5 % nanogline i 1,5 % aditiva od ugljikovih mikrovlakana rezultiralo je povećanjem vlačne čvrstoće.

Kao što je poznato, tople asfaltne mješavine proizvode se primjenom brojnih aditiva. U istraživanju su korišteni razni komercijalni aditivi, a provedena su opetovana ispitivanja svojstava puzanja, pri čemu je utvrđena izražena otpornost na pojavu kolotruga i vertikalne deformacije. Tople asfaltne mješavine postižu odgovarajuću obradivost i pri niskim temperaturama. Istraživanje je obuhvatilo kemijski aditiv koji je tekući na sobnoj temperaturi, aditiv za upjenjivanje koji sadrži zeolit i aditiv na bazi voska (jedna vrsta kemijskog aditiva) koji se sastoje od dugolančanih ugljikovodika [19]. Jedan zanimljiv aspekt tople asfaltne mješavine dobivene s aditivima za upjenjivanje jest taj što su mješavine s 3-postotnom vodom upjenjenog veziva manje osjetljive na temperaturne promjene u odnosu na mješavine s 1-postotnom ili 2-postotnom vodom upjenjenog veziva. Rezultati ispitivanja pokazuju da se nemodificirana i SBS-modificirana bitumenska veziva razlikuju u pogledu upjenjivanja [20].

U radu [21] laboratorijski su ispitana svojstva sumporom modificirane tople asfaltne mješavine. Ispitivanja su provedena na tri asfaltne mješavine: dvije proizvedene po vrućem i jedna proizvedena toplim postupkom. Sumporom modificirana topla asfaltna mješavina pokazuje izvrsna svojstva u pogledu vlačnih čvrstoća, kao i s obzirom na dubinu kolotruga u usporedbi s vrućim asfaltnim mješavinama bez dodatka. Istražena je i primjena aditiva od recikliranog asfalta (eng. *recycled asphalt - RAP*) u toploj asfaltnoj mješavini [22]. Utvrđeno je da optimalni udio RAP-a u mješavini ne bi trebao prelaziti 30 %. U istraživanju, koje se bavilo ispitivanjem otpornosti toplih asfaltnih mješavina na kolotražanje primijenjena su dva različita aditiva, a pokazalo se da je dubina kolotruga manja na mješavinama u kojima su korišteni aditivi na bazi voska [23]. U istraživanju učinkovitosti aktivnog ugljena u modifikaciji bitumena uočeno je da se pri modifikaciji bitumena aktivnim ugljenom viskoznost povećava, a obradivost smanjuje [24].

U literaturi se mogu pronaći istraživanja u kojima su minerali bora korišteni kao dodatak bitumenu. Minerali bora služili su za

poboljšanje svojstava bitumena [25]. Uočeno je da novi aditiv minerala bora, zvan CBE, poboljšava otpornost na starenje i otpornost na pojavu pukotina pri niskim temperaturama, ali ne i na koheziju. U drugom istraživanju ispitivana su svojstva asfaltne mješavine koja sadrži ostatke bora kao mineralnog punila. Zaključeno je da se ostatak bora može koristiti u asfaltni mješavinama za izgradnju kolnika sa srednjim i lakim prometnim opterećenjem [26].

Polazeći od toga, u ovom istraživanju mineral bora submikronske veličine čestica, u različitim je omjerima dodan toploj asfaltnoj mješavini proizvedenoj tehnologijom upjenjivanja. U istraživanju su ispitana svojstva prijanjanja, čvrstoće i pogodnosti dobivanja stabilnijih struktura smanjenjem veličine čestica minerala do veličine submikrona. Činjenica je da se kemijska sredstva za poboljšanje prijanjanja često koriste kako bi se povećala učinkovitost aditiva za tople asfaltne mješavine. Ovim se istraživanjem ispituju poboljšanja mehaničkih svojstava materijala na temelju smanjenja veličine materijala, a bez upotrebe kemijskih aditiva. Ovo istraživanje, u kojem se istražuje utjecaj nanočestica minerala bora (uleksit) na svojstva toplih asfaltnih mješavina, jedinstveno je u literaturi.

2. Materijali i metode

2.1. Priprema toplih asfaltnih mješavina

Provedena su laboratorijska ispitivanja kako bi se utvrdilo postoje li značajne razlike u projektiranju tople asfaltne mješavine (WMA) proizvedene upotrebom različitih omjera i veličine uleksita. Uzorci WMA pripremljeni su s vapnencem kao agregatom, B50/70 bitumenom kao vezivom, i uleksitnim mineralima kao aditivima za modificiranje mješavine. Projektiranje mješavine provedeno je za habajući sloj tipa 1 (AC16 50/70). Tablica 1. prikazuje rezultate ispitivanja fizikalnih svojstava mješavine te granične vrijednosti pojedinog svojstva prema specifikacijama.

2.2. Analiza agregata

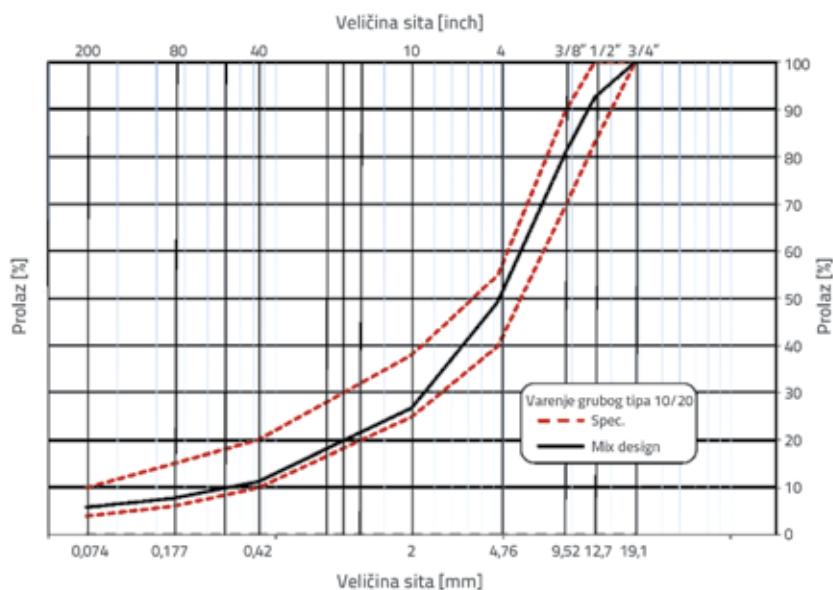
Granulometrijski sastav agregata za pripremu asfaltne mješavine prikazan je na slici 1. Kako bi se utvrdila fizikalno-

Tablica 1. Fizikalna svojstva mješavine

Parametri	Ispitna norma	Rezultat	Specifikacija
Udio bitumena [%]	TS EN 12697-1	4,6	4,0-7,0
Specifična težina [g/cm ³]	TS EN 12697-6	2,43	
Stabilnost po Marshallu [kg]	TS EN 12697-34	1220	Minimalno 900
Udio šupljina ispunjenih zrakom [%]	TS EN 12697-8	4,0	3-5
Udio šupljina ispunjenih bitumenom [%]	TS EN 12697-8	70,0	65-75
Udio šupljina u agregatu (VMA) [%]	TS EN 12697-8	14,05	14-16
Indeks tečenja [mm]	TS EN 12697-34	3,50	2-4
Omjer punilo/bitumen		1,2	Maksimalno 1,5

Tablica 2. Rezultati ispitivanja agregata

Parametri	Jedinica	Ispitna metoda	Specifikacija	Rezultati ispitivanja
Indeks plosnatosti	[%]	TS EN 933-3	-	17
Otpornost na drobljenje i habanje	[%]	TS EN 1097-2	maks. 30	22
Upijanje vode	[%]	TS EN 1097-6	maks. 2,0	0,62
Ispitivanje magnezijevim sulfatom	[%]	TS EN 1367-2	maks. 16	8,8
Otpornost na ljuštenje	[%]	Nicholson	maks. 50	60-70
Gustoća krupnog agregata	[g/cm ³]	TS EN 1097-6	-	2,71
Gustoća sitnog agregata	[g/cm ³]	TS EN 1097-6	-	2,68
Gustoća punila	[g/cm ³]	TS EN 1097-7	-	2,745



Slika 1. Granulometrijska krivulja agregata za tople asfaltne mješavine

mehanička svojstva agregata, provedena su neka standardna ispitivanja. Cilj je tih ispitivanja bio utvrditi svojstvo agregata vapnenca (krupnih i sitnih frakcija) i odrediti njihove pogodnosti za izradu asfaltne mješavine. Gustoća punila, procijenjena je na 2,745 g/cm³. Rezultati ispitivanja krupnih i sitnih frakcija prikazani su u tablici 2. Za potrebe istraživanja odabrana je granulometrijska krivulja asfaltne mješavine za habajući sloj tipa 1, prema specifikacijama *Turkish Road Authority*. Kvaliteta

Tablica 3. Rezultati ispitivanja veziva

Parametri	Jedinica	Ispitna metoda	B 50/70 kontrola
Penetracija	0,1 mm	TS EN 1426	61,6
Točka omekšanja	[°C]	TS EN 1427	49,2
Točka loma po Fraassu	[°C]	TS EN 12593	-12
Točka paljenja	[°C]	TS EN 2592	326
Gustoća	[g/cm ³]	TS EN 15326	1,029
Kinematička viskoznost	[mm ² /s]	TS EN 12595	467,5
Promjena mase	[%]	TS EN 12607-2	0,4

i vrsta korištenog agregata uglavnom određuju svojstva asfaltnih kolnika kao što je hvatljivost [27].

2.3. Karakterizacija bitumena (B 50/70)

Za potrebe istraživanja odabrano je vezivo (B 50/70 bitumen) proizvođača Turkish Petroleum Refineries. Uzorci veziva klasificirani su kao bitumen penetracije 50/70 (B 50/70). Na uzorcima veziva provedena su standardna ispitivanja bitumena. U prvoj skupini uzorci B 50/70 bitumena ispitani su kao kontrolni uzorci. Provedena ispitivanja bitumena uključuju određivanje penetracije, točke razmekšanja, točke loma po Fraassu, točke paljenja, gustoće, kinematičke viskoznosti i ispitivanja trajnosti pokusom otvrdnjavanja. Rezultati ispitivanja kontrolnog bitumena prikazani su u tablici 3.

2.4. Specifikacija minerala uleksita i aditiva Advera

Komercijalni mineral uleksit (U-3 m), koji isporučuje *Eti Mine Works General Management* Bigadic Bor (rudnik bora) prikazan je na slici 2.a. Mineral U-3 m, zbog svoje strukture ima težinski



Slika 2. Stereooptička mikroskopska slika: a) nesamljevenog (U-3 m) minerala uleksita; b) samljevenog (U-25 μ) × 45 uvećanja

postotak B_2O_3 $25,50 \pm 1,50$. U visokoenergetskom kugličnom mlinu na Sveučilištu Recep Tayyip Erdogan, mineral U-3 m mljeven je odabirom odgovarajućih parametara mljevenja. Svojstva uleksita i detalji provedenih ispitivanja dostupni su u drugim istraživanjima [28-30]. Mljeveni mineral uleksit (slika 2.b) prosijan je pomoću standardnih sita ASTM 25 μm (br. 500) i 53 μm (br. 270). Prah veličine podzrnja 25 μm nazvan je U-25 μ, a prah nadzrnja 53 μm nazvan je U+53 μ. Prah U+53 μ i U-25 μ imaju veličinu kristala od 25,7 nm odnosno 28,7 nm. Osim toga, u literaturi se mogu naći detaljna ispitivanja prosijanih prahova u kontekstu fizikalnih i inženjerskih svojstava materijala.

Advera, aditiv koji se primjenjuje za proizvodnju upjenjenih WMA, sintetički je proizvod od zeolita. Radi se o vrlo sitnom prahu bijele boje koji prolazi kroz sito 75 μm (br. 200). Sastoji se od hidrotermalno kristaliziranih silikata koji u svojoj strukturi imaju velike šupljine. Udio vode koji unutar kristalne strukture zadržava Advera zeolit iznosi 21 maseni postotak i opušta se pri temperaturi od približno 100 °C. Kad se Advera umiješa u vezivna sredstva, ona se pretvara u mjehuriće vlage i dolazi do ekspanzije volumena veziva, što dovodi do upjenjivanja bitumena i omogućuje bolju obavijenost agregata vezivom i veću obradivost mješavine pri niskim temperaturama proizvodnje. Postupno otpuštanje vode može produžiti vrijeme obrade na približno sedam sati. U ovom istraživanju dodana je Advera u udjelu od 5 % mase veziva.

3. Provedena ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja provedena su na uzorcima asfaltna mješavine proizvedene toplim postupkom (WMA) kako bi se utvrdila svojstva i provela usporedba sa svojstvima vruće asfaltna mješavine (tipično granulometrijskog sastava najveće gustoće u skladu sa specifikacijama *Turkish Road Authority*, za habajući sloj tipa 1 0/20).

Agregat se zagrijava na otprilike 120-125 °C, a bitumen se zagrijava na 150 °C, tako da je približna temperatura mješavine 135 °C. WMA aditiv Advera (do 5 % masenog udjela bitumena) dodan je bitumenu neposredno prije miješanja, a zatim je u

bitumen dodan uleksit. Bitumen s dodacima (Advera + uleksit) potom je pomiješan sa zagrijanim agregatom, na način da su pripremljene mješavine s optimalnim udjelom bitumena od 4,76 %. Uzorci su pripremljeni zbijanjem sa 35 udaraca po svakoj strani uzorka, sve dok svi uzorci nisu imali manje od 6 % šupljina u skladu s projektnim kriterijima. Bitumenu je dodano 5 % odnosno 10 % minerala uleksita dimenzija ispod 25 mikrona (U-25 μ) i iznad 53 mikrona (U+53 μ) i Advera aditiv u količini od 5 % mase bitumena. Pripremljeno je šest različitih mješavina, uključujući četiri mješavine koje su sadržavale uleksit i aditiv Advera, jedna mješavina koja je sadržavala samo aditiv Advera u udjelu 5 % mase bitumena i jedna referentna mješavina bez aditiva. Miješanje je provedeno na način da je aditiv Advera dodan kad je započelo miješanje agregata i bitumena, a u dobivenu mješavinu dodan je uleksit.

3.1. Ispitivanja reometrom sa savitljivom gredicom (BBR)

Ispitivanje reometrom sa savitljivom gredicom (eng. *Bending Beam Rheometer* - BBR) provodi se kako bi se utvrdila otpornost na pojavu pukotina pri niskim radnim temperaturama, tj. temperaturnih pukotina, koje se javljaju uslijed vremenskih uvjeta i uvjeta okoline ali ne ovise o opterećenju u savitljivim kolnicima koji se izvode u predjelima s hladnom klimom.

Ispitivanjem se mjeri koliki će biti odklon uzorka veziva pod određenom temperaturom i stalnim opterećenjem, te se pokušava odrediti elastično ponašanje na najnižim temperaturama s kojima se asfaltni kolnik može susresti. Budući da se to ispitivanje može izvesti i na vezivu podvrgnutom procesu starenja RTFOT i PAV metodama, moguće je odrediti i promjenu svojstva veziva tijekom vremena. Osim toga, ispitivanjem ponašanja veziva pri visokim temperaturama DSR-om (reometrom s dinamičkim smicanjem) uz ispitivanja BBR-om dobiva se raspon radnih temperatura veziva. Tijekom ispitivanja uzorak bitumena standardne veličine 12,5 x 125 x 6,25 mm (gredica) optereći se silom; krutost pri trajnom opterećenju i vrijednost m , a to

je promjena krutosti s vremenom opterećenja, izračunavaju se mjerenjem otklona nastalog u sredini gredice tijekom ispitivanja. Opterećenje tijekom pokusa predstavlja temperaturna naprežanja kojima je kolnik bio izložen pri vrlo niskim temperaturama.

3.2. Ispitivanja stabilnosti po Marshallu

Ispitivanja stabilnosti po Marshallu za WMA provedena su uporabom zbijenih uzoraka u svrhu utvrđivanja stabilnosti i indeksa tečenja. Rezultati laboratorijskih ispitivanja ocijenjeni su na osnovi vrijednosti korelacijskog omjera stabilnosti ako visina uzorka nije točno 63,5 mm. Stabilnost po Marshallu je maksimalno opterećenje koje uzorak može podnijeti, odnosno opterećenje koje se mora nanijeti na uzorak da bi se uzorak slomio, a vrijednost deformacija ili indeksa tečenja je ukupna vertikalna deformacija uzorka pri maksimalnom opterećenju. Svrha je Marshallovog ispitivanja utvrditi stabilnost uzorka u trenutku njegovog sloma pod opterećenjem.

Za ispitivanje se upotrebljava uređaj koji aksijalno lomi uzorak. Najveća specifična težina asfaltnih mješavina određena je prema normama TS EN 12697-34 i 12697-8. Udio šupljina ispunjenih zrakom (Va), šupljina u agregatu (VMA) i šupljina ispunjenih bitumenom (VFA), u asfaltnoj mješavini određeni se prema izrazima danim u Priručniku Instituta za asfalt.

3.3. Ispitivanje osjetljivosti na vlagu

Osjetljivost mješavina na vlagu iznimno je važna zbog štetnog utjecaja vlage na asfaltnu mješavinu odnosno njenog utjecaja na ponašanje asfaltnog kolnika tijekom upotrebe. Prisutnost vode u asfaltnim mješavinama je neželjeno stanje koje oštećuje strukturu kolnika, dovodeći do slabljenja veze između agregata i bitumena. Priprema uzorka, kondicioniranje i faze ispitivanje osjetljivosti na vodu provedeni su u skladu s normom TS EN12697-12 ITSR.

Pripremljena su tri kondicionirana asfaltna uzorka i tri nekondicionirana asfaltna uzorka. Tijekom kondicioniranja uzorci su držani u vodi na 40 °C tijekom 72 sata, a zatim su dva sata držani na 25 °C. Za nekondicionirane suhe uzorke uzorci su držani dva sata na 25 °C. Nakon ovog koraka, kondicionirani i nekondicionirani uzorci postavljeni su u Marshallov uređaju za ispitivanje kako bi se odredila njihova čvrstoća. Posebno su za ovo ispitivanje proizvedene mješavine koje sadrže isključivo borove minerale, a ispitivanja su provedena bez upotrebe aditiva Advera.

3.4. Indirektno ispitivanje modula vlačne čvrstoće (ITSM)

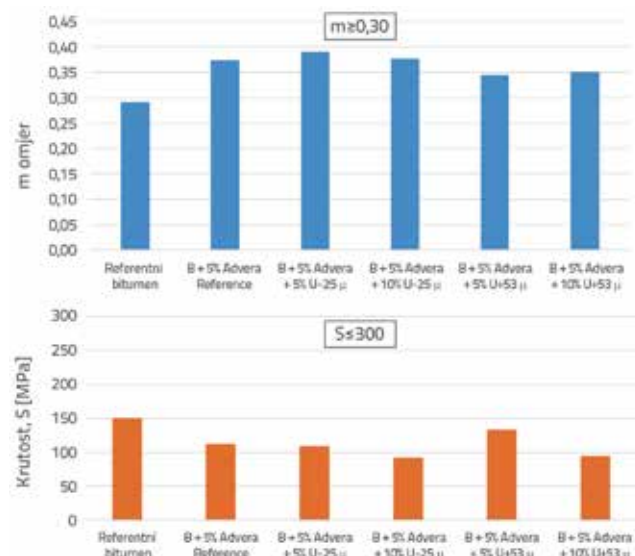
Modul krutosti smatra se vrlo važnim svojstvom kolnika i površinskih slojeva. ITSM ispitivanje (eng. *Indirect Tensile Strength Modulus* - ITSM) označeno s BS DD213, primjenjuje

se za određivanje modula krutosti, a provodi se univerzalnim uređajem za ispitivanje (Universal Testing Machine, UTM-5P). Uzorci pripremljeni za ispitivanje stavljaju se u taj uređaj na način koji osigurava postizanje jednoosnog opterećenja, a zatim se na uzorak postavljaju senzori. Vrijeme prirasta opterećenja određuje se ovisno o očekivanim brzinama vozila. Procijenjeni Poissonov koeficijent mješavine (0,35), željena deformacija (srednja vrijednost 4 μm) i vrijeme prirasta opterećenja unose se kao podaci u računalo nakon čega započinje ispitivanje. Ispitivanje se sastoji od nanošenja pet impulsa pri temperaturama od 0 °C, 10 °C i 20 °C u periodu od 3000 ms i vremenu opterećenja od 126 ms, s kontrolom deformacija.

4. Rezultati i rasprava

4.1. Rezultati ispitivanja reometrom sa savitljivom gredicom

Rezultati ispitivanjem m vrijednosti prikazani su na slici 3. Vidljivo je da svi uzorci bitumena s dodanim nano uleksitom pri -6 °C imaju m vrijednost veću od minimalno zahtijevane vrijednosti 0,3. Nadalje, kriterij nije zadovoljen na referentnom uzorku, što znači da je povećanje m vrijednosti posljedica dodavanja nanouleksita izvornom bitumenu. Dobiveni rezultati pokazuju da materijal s dodatkom nanouleksita povećava otpornost bitumena smanjujući sklonost pucanju na niskim temperaturama, a najveći učinak postignut je s udjelom 5 % U-25 μ. Kad se na isti način razmatraju vrijednosti krutosti, vidljivo je da pripremljeni uzorci neovisno o udjelu aditiva zadovoljavaju kriterij krutosti, a dobivene vrijednosti krutosti su ispod najviše dopuštene vrijednosti od 300 MPa.



Slika 3. Grafički prikaz rezultata krutosti i m vrijednosti

Tablica 4. Va, VMA i VFA vrijednosti za referentna i modificirana veziva

Svojstva mješavine	Specifikacija za referentni bitumen	Vrsta modificiranog veziva				
		B + 5 % Adv	B + 5 % Adv 5 % U-25 μ	B + 5 % Adv 10 % U-25 μ	B + 5 % Adv 5 % U+53 μ	B + 5 % Adv 10 % U+53 μ
Udio šupljina ispunjenih zrakom (Va), [%]	4,00	4,66	4,35	3,88	2,21	5,14
Udio šupljine u agregatu (VMA), [%]	14,05	15,05	14,77	14,35	12,86	14,80
Udio šupljina ispunjenih bitumenom (VFA), [%]	70,00	69,01	70,54	72,96	82,79	65,26

4.2. Rezultati ispitivanja stabilnosti po Marshallu

Tablica 4. prikazuje vrijednosti Va, VMA i VFA asfaltnih mješavina. Šupljine u agregatu (VMA) i šupljine ispunjene bitumenom (VFA) dobivene ispitivanjem stabilnosti po Marshallu uvelike utječu na svojstva mješavina. U usporedbi s referentnom asfaltnom mješavinom, samo mješavina koja sadrži aditiv Advera bez uleksita ima više šupljina ispunjenih zrakom. Kod mješavina s U+53 μ vrijednost šupljina ispunjenih zrakom varira ovisno o količini uleksita dodanog mješavinama. Za mješavine koje sadrže U-25 μ dobiveni su rezultati ekvivalentni onima dobivenim za referentnu bitumensku mješavinu. Povećanjem udjela šupljina ispunjenih zrakom uočeno je na mješavinama koje sadrže 5 % U-25 μ i 10 % U+53 μ .

S obzirom na strukturna svojstva, minerali uleksita mogu pokazati svojstva upjenjivanja. Upjenjivanje u WMA je važno jer pomaže u smanjenju temperature i povećanju obradivosti. U tom je kontekstu za tople asfaltno mješavine upjenjivanje vrlo važno svojstvo uleksita. Ova se značajka može objasniti zapažanjem većih šupljina u mješavinama koje sadrže vezivo B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ i velikom specifičnom površinom čestica veličine mikrona pri ispitivanju mješavina minerala uleksita od 25 μ i 53 μ .

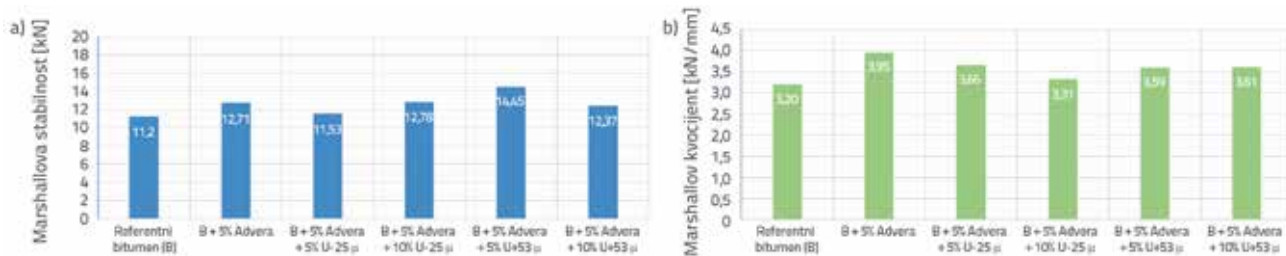
Općenito, rezultati manji od maksimalne vrijednosti šupljina ispunjenih zrakom od 6 % dobiveni su za sve mješavine, što pokazuje da su rezultati unutar prihvatljivih granica [31].

Kao što se vidi iz tablice 4., vrijednosti VMA i VFA su određene za sve mješavine s obzirom na udio aditiva. Za mješavine s B + 5 % Advera + 5 % U-25 μ i B + 5 % Advera + 10 % U-25 μ dobiveni

su gotovo slični rezultati, a rezultati variraju za aditiv U+53 μ ovisno o postotku, (5 % ili 10 %). Najniže vrijednosti VMA i najviše VFA dobivene su zamješavinu sa B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ . Prema "Turskim specifikacijama za granične vrijednosti na autocestama", rasponi vrijednosti VFA i VMA su u granicama 60 %-75 % odnosno 13 % -15 %. Prema kriteriju ocjenjivanja, može se reći da su rezultati ispitivanja u granicama specifikacija.

Na temelju rezultata ispitivanja vrijednosti stabilnosti po Marshallu može se reći da se stabilnost poboljšava povećanjem količine uleksita, osim kod B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ . Najveća vrijednost stabilnosti dobivena je u mješavini B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ . Stabilnost mješavine dobivene s ovim aditivom bila je 29 % bolja od referentne mješavine i 13 % bolja od mješavine s vezivom B + 5 % Advera. Dodatkom 10 % uleksita dobivena je ista vrijednost stabilnosti za obje veličine minerala. Dodani omjer u obliku nanočestica bolje je djelovao na stabilnost od čestica mikronske veličine (-25 μ , +53 μ). Stoga se može reći da je važna i veličina uleksita. Dakle, mješavine s udjelom uleksita od 5 % imaju bolja svojstva od mješavina s 10-postotnim udjelom, a to je uočeno i s rezultatima udjela šupljina. To pokazuje da je optimalna količina udjela minerala uleksita gotovo blizu optimalne količine bitumena, koja iznosi 4,76 %.

Kad se uzmu u obzir vrijednosti indeksa tečenja, vidi se da se najveća vrijednost dobiva za mješavinu B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ . To pokazuje da dobivena mješavina ima fleksibilniju strukturu. Iako mješavina B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ ima najveću vrijednost tečenja, ta mješavina ima i najveću vrijednost stabilnosti. Budući da se stabilnost povećala za približno 13 %, a indeks tečenja porastao je za 24,84 %, sačuvana je i vrijednost



Slika 4. a) Vrijednosti stabilnosti po Marshallu; b) Vrijednosti Marshallovog indeksa krutosti

Marshallovog indeksa krutosti. Vrijednosti indeksa tečenja dobivene sa svim vrstama aditiva nalaze se unutar granica propisanih specifikacija [31].

Omjer Marshallove stabilnosti i indeksa tečenja definiran je kao Marshallov indeks krutosti (MQ). To je vrijednost koja se zasebno izračunava za svaki uzorak i pokazatelj je krutosti mješavina. Općenito, vrijednosti MQ služe kao mjerilo otpornosti materijala na posmična naprezanja, trajne deformacije i otpornosti na kolotražnje [32]. Veće vrijednosti MQ upućuju na veću otpornost prema trajnim deformacijama, sposobnost rasprostiranja primijenjenog opterećenja na veću površinu i povećanje krutosti [33]. U ovom istraživanju, minerali U + 53 μ u udjelu 5 i 10 % imaju visoke vrijednosti ako se usporede s mineralima U-25 μ . Marshallov indeks krutosti za oba aditiva je veći od vrijednosti referentne mješavine (slike 4.a i 4.b), a najveća vrijednost stabilnosti po Marshallu dobivena je za mješavinu B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ .

4.3. Rezultati ispitivanja osjetljivosti na vlagu

U analizi osjetljivosti na vlagu određene su vrijednosti vlačne čvrstoće za kondicionirane (ITS_m) i nekondicionirane uzorke (ITS_s). Omjer indirektno vlačne čvrstoće (ITS_s) nekondicioniranih uzoraka i indirektno vlačne čvrstoće (ITS_m) kondicioniranih uzoraka izračunava se primjenom izraza (1):

$$ITSR = ITS_m / ITS_s \quad (1)$$

gdje je:

ITS_m - prosječna vrijednost indirektno vlačne čvrstoće kondicioniranih uzoraka [kPa]

ITS_s - prosječna vrijednost indirektno vlačne čvrstoće nekondicioniranih uzoraka [kPa].

Vrijednosti indirektno vlačne čvrstoće kondicioniranih uzoraka (mokrih) podijeljene su s vrijednostima indirektno vlačne čvrstoće nekondicioniranih (suhih) uzoraka i izračunan je omjer indirektno vlačne čvrstoće (ITSR) koji predstavlja mjeru osjetljivosti asfaltnih mješavina na vlagu.

Kod aditiva s Adverom uočena je vrlo niska osjetljivost na vlagu, pa je zbog toga istraživački tim odlučio analizirati samo djelotvornost uleksita bez dodatka Advera.

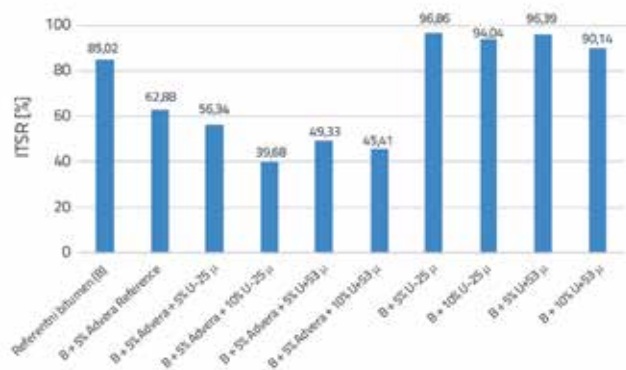
Zanimljivo je da su na mješavinama pripremljenima samo s borovim mineralima, bez dodatka Advere (samo bitumen), zabilježene slične vrijednosti osjetljivosti na vlagu. Također se može zaključiti da na tim mješavinama, kondicioniranje ne utječe previše na osjetljivost uzoraka na vlagu i nije vidljiv veliki gubitak čvrstoće. Gubitak čvrstoće s kondicioniranjem iznosi oko 15 % za referentne uzorke, ali samo oko 3-4 % za uzorke s dodanim uleksitom.

Prikazani rezultati dobiveni su na osnovi brojnih ispitivanja koja su provedena na mješavinama kojima je kao aditiv dodan samo mineral uleksit bez dodatka Advere. To je važno u vrlo kišovitim

klimatskim uvjetima [34], zbog čega tamo prevladavaju asfaltni kolnici. Međutim, unatoč neznatnom povećanju vlačne čvrstoće na uzorcima s dodatkom Advera, čvrstoće se kondicioniranjem značajno smanjuju.

Analizom rezultata prikazanih u tablici 5, količine 5 % i 10 % aditiva U-25 μ i 5 % i 10 % aditiva U+53 μ povećavaju vrijednosti omjera indirektno vlačne čvrstoće. Primijećeno je da veće količine uleksita rezultiraju smanjenjem indirektno vlačne čvrstoće. To pokazuje da je idealan omjer dodavanja uleksita neovisno o njegovoj veličini oko 5 % u odnosu na masu bitumena.

Iako su vrijednosti ITS-a uglavnom smanjene u mješavinama proizvedenima s borovim mineralima, gubitak čvrstoće zbog kondicioniranja nije značajan. Ovaj rezultat odražava činjenicu da borovni minerali nanovećine pridonose postizanju konzistentnijih rezultata otpornosti na ljuštenje. U eksperimentima s aditivom Advera (B + 5 % Advera + 5 % U-25 μ ; B + 5 % Advera + 10 % U-25 μ ; B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ ; B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ), a radi se o aditivu za tople asfaltne mješavine, uočeno je da su vrijednosti ITS prilično bliske. Ipak, utvrđeno je da su rezultati ITSR, tj. rezultati omjera neizravne vlačne čvrstoće, znatno ispod prihvatljive granice (Slika 5.).



Slika 5. ITSR vrijednosti mješavina s Adverom i bez nje

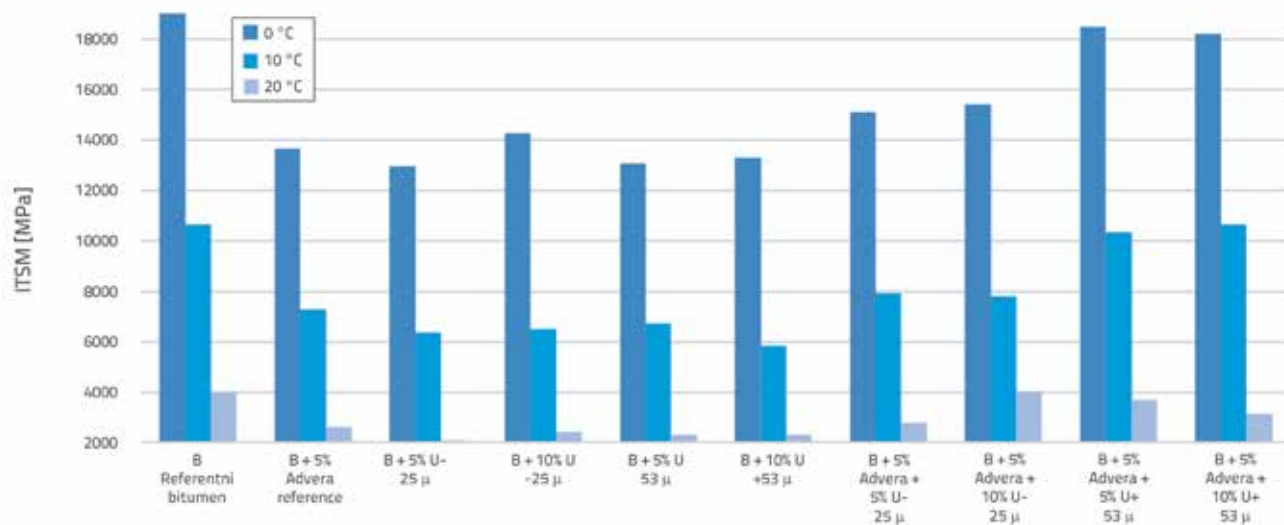
Povoljno ponašanje, s obzirom na osjetljivost na vlagu asfaltnih mješavina s mineralima bora bez Advera, ispitano je u [35], te su naglašena hidrofobna (vodoodbojna) svojstva minerala bora. U navedenom istraživanju zaključeno je da su različiti modificirani materijali, otapala i njihova kompatibilnost rezultirali hidrofobnim proizvodom. Ovo poboljšanje minerala bora dalo je vrijedne rezultate o činjenici da kondicionirani uzorci u svojoj strukturi uopće ne sadrže vodu i stoga nema štetnog utjecaja na čvrstoću.

4.4. Rezultati indirektnog ispitivanja modula vlačne čvrstoće (ITSM)

ITSM vrijednosti toplih asfaltnih mješavina koje sadrže Adveru i mineral uleksita značajno su se smanjile porastom temperature. Promjena ITSM vrijednosti s promjenom temperature prikazana je na slici 6.

Tablica 5. ITS i izračunane ITSR vrijednosti svih mješavina

Tip mješavine	Vrijednosti indirektna vlačne čvrstoće [kPa]		ITSR vrijednosti [%]
	Nekondicionirani	Kondicionirani	
B referentni bitumen	1290,3	1097,1	85,03
B + 5 % Advera referentna	1205,8	758,3	62,89
B + 5 % Advera + 5 % U-25 μ	1042	587,1	56,34
B + 5 % Advera + 10 % U-25 μ	1107,5	439,5	39,68
B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ	1215	599,4	49,33
B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ	1010,3	458,8	45,41
B + 5 % U-25 μ	937,4	908	96,86
B + 10 % U-25 μ	748,3	703,7	94,04
B + 5 % U+53 μ	877,9	846,2	96,39
B + 10 % U+53 μ	780,1	703,2	90,14



Slika 6. ITSM vrijednosti mješavina ovisno o temperaturi (ITSM - Indirektno ispitivanje modula vlačne čvrstoće)

Tablica 6. ITSM vrijednosti mješavina pri različitim temperaturama

Tip mješavine	0 °C	10 °C	20 °C
B Referentni bitumen	19138	10640	4004
B + 5 % Advera referentna	13646	7286	2597
B + 5 % Advera + 5 % U-25 μ	15085	7910	2765
B + 5 % Advera + 10 % U-25 μ	15400	7821	4042
B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ	18488	10328	3696
B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ	18195	10654	3128

Prema tablici 6., kako temperatura raste od 0 °C do 10 °C, vrijednost ITSM smanjila se za 44,40 %, odnosno za 46,61 % za WMA uzorke s dodatkom Advere i referentne uzroke. Smanjenje vrijednosti ITSM za mješavine s dodatkom 5 % U-25 μ , 10 % U-25 μ i 5 % U+53 μ , iznosi 47,56 %, 49,21 % i 44,13 %, pri porastu temperature od 10 °C. Modul krutosti na 0 °C za 5 % U+53 μ asfaltna mješavina bio je 1,35 puta veći od

modula krutosti referentne asfaltna mješavina s dodatkom Advere.

Na referentnom uzorku s dodatkom Advere opaženo je smanjenje modula krutosti. Budući da se tople asfaltna mješavine ne mogu proizvesti bez uporabe aditiva, problem smanjenja modula krutosti zbog primjene aditiva, može se riješiti dodavanjem minerala bora. Naime, vrijednost modula

krutosti mješavina koje sadrže 5 % uleksita U+53 μ poboljšane su 1,35 puta pri 0 °C, 1,43 pri 10 °C i 1,31 puta pri 20 °C, u usporedbi samo s referentnim asfaltnim mješavinama s Advera aditivom. Upotreba minerala bora nanoveličine u toplim asfaltnim mješavinama radi povećanja otpornosti na ljuštenja i gubitka čvrstoće, već je prepoznata. Iz dobivenih rezultata se može vidjeti da čestice nanoveličine minerala uleksita potvrđuju svrhu primjene. Referentni bitumen je malo poboljšán dodavanjem samo 5 % U-25 μ i 10 % U-25 μ ; veće poboljšanje je vidljivo s dodatkom 5 % U+53 μ i 10 % U+53 μ .

Na osnovi rezultata ispitivanja ITSM vrijednosti mješavina s referentnim bitumenom i bitumenom s aditivom Advera, vidljivo je da aditiv Advera smanjuje krutost mješavina; s druge strane dodatak uleksita povećava krutost mješavina koje sadrže aditiv Advera.

5. Zaključak

U ovom su radu provedena ispitivanja otpornosti na pojavu pukotina pri niskim temperaturama (reometar sa savitljivom gredicom-BBR), stabilnost po Marshallu, indirektno ispitivanje modula vlačne čvrstoće i ispitivanja osjetljivosti na vlagu, na toplim asfaltnim mješavinama s dodatkom minerala uleksita nanoveličine. Istraživanjem utjecaja minerala uleksita na svojstva toplih asfaltnih mješavina dobiveni su sljedeći rezultati:

- Osim veličine čestica minerala uleksita, na svojstva mješavina utječe i njegov udio u mješavini. Rezultati ispitivanja pokazuju da je 5 % uleksita rezultiralo povoljnijim utjecajem na svojstva mješavina u odnosu na dodatak od 10 % uleksita.
- Aditiv nanouleksit povećava otpornost toplih asfaltnih mješavina na pojavu pukotina pri niskim temperaturama.
- Najveće vrijednosti VFA i najniže vrijednosti VMA dobivene su za tople asfaltnje mješavine s vezivom B + 5 % Advera + 5

% U+53 μ , najveće vrijednosti zračnih šupljina (Va) s vezivom B + 5 % Advera + 10 % U+53 μ .

- Veći udio šupljina ispunjenih zrakom u mješavinama sa B + 5 % Advera + 10 % U + 53 μ može se objasniti povećanjem udjela čestica veličine submikrona koje imaju veliku specifičnu površinu.
- Vrijednost Marshallovog omjera, a radi se o omjeru stabilnosti i tečenja, očuvana je u mješavini B + 5 % Advera + 5 % U+53 μ . Nepovoljni rezultati su nešto niže vrijednosti VMA i VFA u odnosu na vrijednosti dobivene za referentne mješavine. S druge strane, pozitivni rezultati su mogućnost smanjenja temperature proizvodnje toplih asfaltnih mješavina na 120 °C i poboljšana obradivost.
- Dodatkom nanominerala uleksita toplim asfaltnim mješavinama mogu se prevladati nedostaci tih mješavina, poput gubitka adhezije između veziva i agregata te smanjenje čvrstoće.
- Gubitak čvrstoće nakon kondicioniranja iznosi oko 3-4 % samo za uzorke koji sadrže uleksit.
- Utvrđeno je da su rezultati omjera indirektno vlačne čvrstoće na toplim asfaltnim mješavinama s dodatkom Advera aditiva znatno ispod granice prihvatljivosti.
- Rezultati indirektnog ispitivanja modula vlačne čvrstoće pri temperaturama od 0 °C, 10 °C i 20 °C pokazuju da je najveća vrijednost ITSM pri 20 °C postignuta s mješavinom 5 % U+53 μ , a pri 10 °C s mješavinom 10 % U+53 μ . Kod mješavina kod kojih je kao aditiv korišten samo nano bor ili samo Advera aditiv, vidljivo je malo smanjenje dinamičkog opterećenja u odnosu na mješavine s čistim bitumenom. Iako je to negativan utjecaj u odnosu na neobrađeni bitumen, kombiniranjem dvaju aditiva postižu se opća poboljšanja. To pokazuje da se i jedan i drugi aditiv treba koristiti u izradi toplih asfaltnih mješavina.

LITERATURA

- [1] Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M.M., Kocadağistan, E., Yilmaz, M.T.: Recovery of boron of the sieve reject in the production of borax, *Resour. Conserv. Recycl.*, 3 (2003), 7, pp. 147-157, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00072-1)
- [2] Kütük-Sert, T., Kütük, S.: Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 266-273 (2013), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000580)
- [3] Kusam, A., Malladi, H., Tayebali, A.A., Khosla, N.P.: Laboratory evaluation of workability and moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing recycled asphalt pavements, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29 (2016), pp. 4016-4276, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001121](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001121)
- [4] Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F.: Warm Mix Asphalt: An overview, 2012.
- [5] Ilık Karışım Asfalt, Eapa Durum Tespit Dokümanı, Türkiye Asfalt Mühendisleri Derneği, 2016.
- [6] Temren, Z.: Ilık Karışım Asfalt Uygulamaları ve Performansı, In: Ilık Karışım Asfalt Uygulamaları ve Performansı, pp. 50-60, 2009, Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı
- [7] Toraldo, E., Brovelli, C., Mariani, E.: Laboratory investigation into the effects of working temperatures on wax-based warm mix asphalt, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013), pp. 774-780, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.085>
- [8] Rühl, R., Lindemeier, B.: Progress Report 2006.
- [9] Kutuk-Sert, T.: Stability analyses of submicron-boron mineral prepared by mechanical milling process in concrete roads, *Constr. Build. Mater.*, 121 (2016), pp. 255-264, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.156>
- [10] Cheng, J., Shen, J., Xiao, F.: Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime, *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2013), pp. 1552-1559, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533)

- [11] Partl M.N., Gubler R., H.M.: Road Engineering/Sealing Components, EMPA Swiss Fed. Lab. Mater. Res., Überlandst, 2003.
- [12] Parviz, A.: Nano Materials in Asphalt and Tar. Aust. J. Basic Appl. Sci., 5 (2011) 12, pp. 3270-3273,
- [13] Hao, X.H., Zhang, A.Q., Yang, W., Zheng, J.J., Du, X.L., Yan, W., Li, Y., Zhang, J.W.: Study on the Performance of Nano Calcium Carbonate Modified Asphalt Concrete AC-13, Adv. Mater. Res., 503 (2012), pp. 450-451, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.503>
- [14] Xiao, F., Amirkhani, A.N., A.S.N.: Long-term Ageing Influence on Rheological Characteristics of Asphalt Binders Containing Carbon Nanoparticles, Int. J. Pavement Eng., 12 (2011), pp. 533-541, <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.560267>
- [15] Ghasemi, M., Marandi, S.M., Tahmooreesi, M., Kamali, R.J., T.R.: Modification of Stone Matrix Asphalt with Nano-SiO₂, J. Basic Appl. Sci. Res., 2 (2012), pp. 1338-1344.
- [16] You, Z.: Nanomaterials in Asphalt Pavements, Int. J. Pavement Res. Technol., 6 (2013), [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(3\).iv](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(3).iv)
- [17] Diab, A., You, Z., Wang, H.: Rheological Evaluation of Foamed WMA Modified with Nano Hydrated Lime, Procedia - Soc. Behav. Sci., 96 (2013), pp. 2858-2866, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.318>
- [18] Goh, S.W., Akin, M., You, Z., Shi, X.: Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture, Constr. Build. Mater., 25 (2011), pp. 195-200, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.038>
- [19] Deniz, M.T., Yildirim, S.A., Eren, B.K., Topcu, A., Girit S., S.İ.: The Effect Of Different Agents On Warm Mix Asphalt Pavements, 5th Eurasphalt Eurobitume Congr, İstanbul, 2012.
- [20] Yu, X., Wang, Y., Luo, Y.: Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviors of foamed warm-mix asphalt, Constr. Build. Mater., 48 (2013), pp. 203-209, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.018>
- [21] Cooper III, S.B., Mohammad, L.N., Elseifi, M.A.: Laboratory Performance Characteristics of Sulfur-Modified Warm-Mix Asphalt, J. Mater. Civ. Eng., 23 (2011), pp. 1338-1345, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000303](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000303)
- [22] Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Woods, M.: Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement, Constr. Build. Mater., 44 (2013), pp. 92-100, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010>
- [23] Zhang, H., Zhao, Y., Meng, T., Shah, S.P.: The modification effects of a nano-silica slurry on microstructure, strength and strain development of recycled aggregate concrete applied in an enlarged structural test, Constr. Build. Mater., 95 (2015), pp. 721-735, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.089>
- [24] Bostancıoğlu, M., Oruç, Ş.: Optimizing activated carbon size and ratio in bitumen modification, GRADEVINAR, 69 (2017) 3, pp. 215-220, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.1461.2015>
- [25] Oruç, Ş., Yılmaz, B.: Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive, Constr. Build. Mater., 123 (2016), pp. 207-213, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.003>
- [26] Gurer, C., Selman, G.Ş.: Investigation of Properties of Asphalt Concrete Containing Boron Waste as Mineral Filler, Mater. Sci., 22 (2016), 118-125, <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.12596>
- [27] Wang, D., Wang, G.: Designing a Skid-Resistant and Durable Asphalt Mixture Based on the Stress Concentration Distribution Rate, Arab. J. Sci. Eng., 42 (2017), pp. 4131-4144, <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2579-y>
- [28] Kutuk, S.: Influence of milling parameters on particle size of ulexite material. Powder Technol, 301 (2016), pp. 421-428, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.020>
- [29] Kutuk, S., Kutuk-Sert, T.: Partcile size distribution of nanoscale ulexite mineral prepared by ball milling, MATTER Int. J. Sci. Technol., 3 (2017), pp. 86-103, <https://doi.org/10.20319/mijst.2017.33.86103>
- [30] Kutuk, S., Kutuk-Sert, T.: Effect of PCA on Nanosized Ulexite Material Prepared by Mechanical Milling, Arab. J. Sci. Eng., 42 (2017), pp. 4801-4809, <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2643-7>
- [31] Turkish highway specification limits. Turkish General Highway Directorate, 2013.
- [32] Yılmaz, M., Çeloğlu, M.E.: Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures, Constr. Build. Mater., 44 (2013), pp. 533-540, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.036>
- [33] Zoorob, S.E., Suparna, L.B.: Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt), Cem. Concr. Compos., 22 (2000), pp. 233-242, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00026-3)
- [34] Kutuk-Sert, T.: Sub-Mikron Boyutlarında Üleksit Mineralinin Asfalt Karışımların Suyu Hassasiyetine Etkisinin İncelenmesi, GÜFBED/GUSTIJ, 7 (2017), pp. 141-152 <https://doi.org/10.17714/gufbed.2017.07.009>
- [35] Bardakçı M.: Çeşitli Bor Minerallerinden Hidrofobik Çinko Borat Üretim Yöntemlerinin Geliştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 214s, 2011.