

Primljen / Received: 31.8.2015.

Ispravljen / Corrected: 21.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 27.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.8.2016.

Modul elastičnosti asfalta s bitumenom modificiranim gumenim granulatom kao vezivom

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Lajos Kisgyörgy**, dipl.ing.građ.
Sveučilište tehnologije i ekonomije u
Budimpešti
Odjel za ceste i željeznice
kisgyorgy@uvt.bme.hu



Izv.prof.dr.sc. **Csaba Tóth**, dipl.ing.građ.
Sveučilište tehnologije i ekonomije u
Budimpešti
Odjel za ceste i željeznice
toth@uvt.bme.hu



Dr.sc. **András Geiger**, dipl.ing.kem.
MOL, Mađarska tvrtka za naftu i plin
ageiger@mol.hu

Prethodno priopćenje

Lajos Kisgyörgy, Csaba Tóth, András Geiger

Modul elastičnosti asfalta s bitumenom modificiranim gumenim granulatom kao vezivom

Bitumen modificiran gumenim granulatom (CSRB) razvili su istraživači tvrtke MOL i Panonskog sveučilišta (Mađarska). CSRB se proizvodi od rabljenih automobilskih guma, a njegovom se primjenom povećava kvaliteta kolnika i učinkovito postupa s rabljenim automobilskim gumama. Ovaj rad analizira mehaničke karakteristike asfalta s bitumenom koji je modificiran gumenim granulatom. Iako su rezultati ispitivanja pokazali da su svojstva CSRB-a slična svojstvima polimerom modificiranog bitumena, primjenom CSRB-a postižu se bolji rezultati pri niskim temperaturama.

Ključne riječi:

bitumen modificiran gumenim granulatom (CSRB), asfalt s dodatkom gume, modul elastičnosti, masterkrivulja

Preliminary report

Lajos Kisgyörgy, Csaba Tóth, András Geiger

Elastic modulus of asphalt with chemically stabilized rubber bitumen

The chemically stabilized rubber bitumen (CSRB) has been developed by researchers from the company MOL and the Pannonian University (Hungary). The CSRB is made of used automobile tyres, and it improves the quality of pavement, while also enabling an efficient use of used automobile tyres. Mechanical properties of the chemically stabilized crumb rubber bitumen are analysed in the paper. Although test results have shown that CSRB properties are similar to those of the polymer modified bitumen, the CSRB results have proven to be better at low temperatures.

Ključne riječi:

chemically stabilized crumb rubber bitumen (CSRB), crumb rubber asphalt, elastic modulus, master curve

Vorherige Mitteilung

Lajos Kisgyörgy, Csaba Tóth, András Geiger

Elastizitätsmodul von Asphalt mit durch Gummigranulat modifiziertem Bitumen als Bindemittel

Durch Gummigranulat modifizierter Bitumen (CSRB) wurde von den Forschern des Unternehmens MOL und der Panonischen Universität (Ungarn) entwickelt. CSRB wird aus gebrauchten Autoreifen hergestellt. Dabei wird durch seine Anwendung die Qualität des Fahrbahnbelags verbessert und ein wirkungsvoller Umgang mit gebrauchten Reifen ermöglicht. In dieser Arbeit werden mechanische Eigenschaften von Asphalt mit durch Gummigranulat modifiziertem Bitumen analysiert. Obwohl Testresultate gezeigt haben, dass CSRB und mit Polymeren modifizierter Bitumen ähnliche Eigenschaften haben, werden durch die Anwendung von CSRB bei tiefen Temperaturen bessere Resultate erzielt.

Ključne riječi:

durch Gummigranulat modifizierter Bitumen (CSRB), Asphalt mit Zusatz von Gummi, Elastizitätsmodul, Masterkurve

1. Uvod

1.1. Primjenjivost recikliranih automobilskih guma u kolničkim konstrukcijama

Svaka inovacija ili nova tehnologija koja pridonosi smanjenju troškova izgradnje i održavanja prometnica, pa čak i u malom postotku, rezultira uštedama od nekoliko milijardi eura na globalnoj razini. Provedena su značajna istraživanja u području tehnologije proizvodnje asfalta kako bi se pronašla rješenja za proizvodnju trajnijih asfaltnih kolnika uz što manji utrošak energije. Usvajanje rezultata spomenutih istraživanja moglo bi biti vrlo korisno s ekonomskog i tehničkog aspekta te zaštite okoliša.

Povećanje prometnog opterećenja, kao i klimatske promjene uvjetuju strože standarde za svojstva asfaltnih mješavina. Zato se istraživači i usredotočuju na asfaltne kolnike i bitumen. Rezultat toga je pojava različitih sintetičkih polimera u tehnologiji proizvodnje asfalta, kojima je značajno poboljšana kvaliteta cestograđevnog bitumena. Međutim, u zadnjih je nekoliko godina cijena modificiranog bitumena naglo porasla, zbog čega se javila potreba za alternativnim rješenjima.

Početak 20. stoljeća provedeni su prvi pokusi kako bi se poboljšala kvaliteta asfaltnih mješavina dodavanjem gumenog granulata prirodnom agregatu. Rezultati brojnih ispitivanja, kao i praktična iskustva, opravdali su dodavanje gumenog granulata u asfaltnu mješavinu, jer se na taj način smanjuje osjetljivost asfaltnih kolnika, nastanak pukotina te produžava uporabni vijek. Proces reciklaže istrošenih automobilskih guma pozitivan je i s gledišta odgovornoga gospodarenja otpadom te zaštite okoliša, upravo zbog činjenice da se automobilske gume proizvode u velikim količinama te se ubrajaju u najproblematičniju kategoriju otpada. Zasad postoji nekoliko međunarodnih primjera primjene reciklirane automobilske gume. U tehnologiji asfalta dva su glavna postupka proizvodnje kod kojih se primjenjuje reciklirana automobilska guma: takozvani suhi i mokri postupak [1, 2].

1.2. "Suhi postupak": asfaltna mješavina modificirana gumenim granulatom

Ovaj postupak se odnosi na dodavanje manje količine gume asfaltnoj mješavini, kao zamjena za određeni udio prirodnog agregata. Guma se miješa zajedno s prirodnim agregatom, a tek nakon toga se dodaje vezivo. Prednost ovog postupka je u tome da proizvođač asfalta može modificirati mješavine neovisno o proizvođaču bitumena. Međutim, tim postupkom se potencijalne prednosti gumenog granulata ne mogu iskoristiti (ili se koriste u minimalnoj mjeri), jer gumeni granulati postaju neaktivni u asfaltnoj mješavini [3-5]. Iako je u međunarodnoj praksi "suhi" postupak primjenjiviji od "mokr" postupak još uvijek nisu dostupni rezultati značajnih ispitivanja provedenih u Mađarskoj.

1.3. "Mokri postupak": asfaltna mješavina modificirana gumenim granulatom

Ovaj postupak se odnosi na postupno miješanje gumenog granulata vrućim bitumenom, a vrijeme reakcije je približno jedan sat. Gumeni granulati se djelomično otapa te na taj način postaje aktivni sastojak u modificiranom bitumenu. Takav bitumen modificiran gumenim granulatom, koji ima korisna inženjerska svojstva oba sastojka, primjenjuje se za pripremu asfaltnih mješavina [3, 4, 6]. Zasad su svojstva asfaltnih mješavina koje se pripremaju "mokrim" postupkom bolja od onih pripremljenih "suhim" postupkom [7, 8].

Iako se primjena bitumena s dodatkom gumenog granulata dobivenim "mokrim" postupkom pokazala uspješnom, što dokazuju brojne ceste izgrađene tijekom posljednja tri desetljeća, još uvijek postoje značajne poteškoće koje sprječavaju širu primjenu [9]. Naime, potrebna je posebna oprema zbog znatno veće viskoznosti bitumena stabiliziranog gumenim granulatom (eng. *chemically stabilized crumb rubber bitumen - CSRB*) u odnosu na cestograđevni bitumen [7, 10]. Promjenjiva kvaliteta gumenog granulata utječe na kvalitetu bitumena [11, 12]. Zbog taloženja gumenog granulata, preporučuje se primjena modificiranog bitumena u roku četiri sata od trenutka proizvodnje, pa se time ograničava transportna udaljenost [7, 10]. Zbog toga se u SAD-u koriste mobilna postrojenja za proizvodnju bitumena modificiranog gumom, a proces proizvodnje se odvija u neposrednoj blizini mjesta ugradnje.

2. Bitumen modificiran gumenim granulatom (CSRB)

2.1. Opis

U novije vrijeme, nakon nekoliko godina istraživanja i razvoja, znanstvenici MOL-a i Panonskog sveučilišta osmislili su novu vrstu veziva za asfalt – to je bitumen modificiran gumenim granulatom-CSRB. CSRB je 2008. godine dobio nacionalno tehničko odobrenje za primjenu u cestogradnji (ÉME 13/2008 H1), a sam proizvod i proizvodni proces su zaštićeni patentom 2009. godine (HU 226481) [13-15].

Tijekom procesa proizvodnje, kojim se eliminiraju nedostaci tradicionalnog "mokr" postupka, spajanjem bitumena i gumenog granulata dobiva se posebna vrsta gumom modificiranog bitumena [7, 8]. CSRB je vezivo koje se sastoji od bitumena (85 ± 2 m/m%), gumenog granulata (15 ± 2 m/m%) i posebnog multifunkcionalnog aditiva ($0,3 \pm 0,2$ m/m%). Taj aditiv djelomično reagira s gumenim granulatom i ostalim sastojcima bitumena, što rezultira poboljšanjem kvalitete (poboljšava se stabilnost bitumena tijekom skladištenja te smanjuje viskoznost), a primjenjuje se slično kao polimerom modificirani bitumeni. Zbog svoje velike molekularne težine, ovaj aditiv ne isparava iz veziva čak ni pri visokim temperaturama za vrijeme proizvodnje asfalta. Proizvodni proces zahtijeva koloidni mlin i uključuje dva tehnološka postupka koji se provode pri različitim temperaturama. Proizvod se može transportirati i skladištiti

ograničeno vrijeme u asfaltnoj bazi. Gumeni granulati proizvodi se, pri normalnoj temperaturi, od istrošenih guma osobnih vozila i kamiona. Maksimalna veličina zrna iznosi 1,25 mm. Treba napomenuti da zasad u Europi ne postoji službena norma za klasifikaciju gumenog granulata prema veličini zrna. Maseni omjer gumenog granulata točno je određen kako bi se mogao odrediti konstantni kemijski sastav.

Tijekom proizvodnje CSRB-a reakcija između bitumena i gumenog granulata kontrolira se pomoću temperature miješanja i/ili vremenom miješanja te intenzitetom miješanja, s ciljem da se gumeni granulati djelomično otopi u bitumenu. Pojedini organski polimerni sastojci gumenog granulata se spajaju s bitumenom i na taj način modificiraju njegovu kvalitetu. Gumeni granulati se uglavnom sastoje od mješavine prirodne i sintetičke gume, a također sadrži čađu, ulja (komponente plastifikatora) te anorganska punila. Gumeni granulati mogu sadržavati i druge aditive koji se koriste u proizvodnji automobilske gume, poput sumpora i cinkovog oksida, čiji je udio manji od 2 % ukupne mase gumenog granulata.

Posebne karakteristike CSRB-a zahtijevaju određene izmjene u tradicionalnom postupku proizvodnje asfalta. Nakon dopremanja u asfaltnu bazu CSRB je spreman za upotrebu, a temperatura mu ne smije biti niža od 170 °C. Temperatura miješanja asfalta je između 175 i 190 °C. Kapacitet crpke i dimenzije cjevovoda za dovoz veziva do miješalice treba odrediti s obzirom na viskoznost CSRB-a. Nakon proizvodnje asfalta, crpku i cijeli cjevovod treba temeljito očistiti pomoću najmanje 150 litara cestograđevnog bitumena tipa 50/70 ili 70/100. U slučaju sustava za miješanje po šaržama to podrazumijeva proizvodnju dvije ili tri šarže asfalta s cestograđevnim bitumenom.

Zbog trenutačne separacije sastojaka tijekom skladištenja, preporučljivo je iskoristiti CSRB u roku 24 sata od njegove dopreme u asfaltnu bazu. Ova činjenica zahtijeva precizno planiranje asfaltnih radova i organizaciju logistike. Ako se

CSRB skladišti, onda je to potrebno napraviti u uspravnim spremnicima opremljenim uređajima za miješanje [13-15].

MOL je osnovao prototip tvornice koja proizvodi 5000 tona CSRB-a godišnje u rafineriji Zala u Mađarskoj. Količina proizvedene i ugrađene CSRB asfaltne mješavine u posljednjih nekoliko godina je veća od 45.000 tona. Iskustva pokazuju da asfaltne mješavine s CSRB-om zadovoljavaju sve relevantne zahtjeve.

2.2. Propisi

Nakon potvrde i prihvaćanja proizvoda u Mađarskoj, službeno tijelo Udruge mađarskih cesta oblikovalo je smjernice za primjenu CSRB-a [16]. Smjernice objedinjuju sve zahtjeve vezane uz primjenu CSRB-a prilikom izgradnje i održavanja cesta te ostalih prometnih površina, uzimajući u obzir prometno opterećenje i klimatske uvjete u Mađarskoj.

Prema tim smjernicama, upotrijebljena količina gumenog granulata u modificiranom bitumenu trebala bi iznositi 10 do 20 posto ukupne mase. MOL koristi gumeni granulati u koncentraciji 15 ± 2 posto ukupne mase, a točna vrijednost ovisi o zrnatosti gumenog granulata i točnoj vrijednosti indeksa penetracije primijenjenog bitumena. Gumeni granulati upotrijebljeni u proizvodnji veziva trebali bi se proizvesti mrvljenjem istrošenih automobilske gume pri sobnoj temperaturi ili procesom kriogenskog mljevenja, pri čemu maksimalna veličina zrna iznosi 1,25 mm. Tražena granulacija gumenog granulata je prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva raspodjele čestica usitnjene gume

Otvor sita [mm]	Prosijavanje (postotak prolaska kroz sito) [m/m%]
0,5	20 - 80
1,0	70 - 100
1,25	100

Tablica 2. Zahtjevi za bitumen modificiran gumenim granulatom

Svojstva	Svojstva konačnog proizvoda	Norma
Penetracija na 25 °C 0.1mm	45-80	MSZ EN 1426
Točka razmekšanja [°C]	≥ 55	MSZ EN 1427
Otpornost na očvršćivanje (RTFO test)	Promjena mase [m/m%]	≤ 0,5
	Zadržana penetracija [m/m%]	≥ 50
	Porast točke razmekšanja [°C]	≤ 8
Elastični povrat na 25 °C [%] ⁽¹⁾	≥ 50	MSZ EN 13 398
Točka loma po Fraassu [°C] ⁽²⁾	≤ -16	MSZ EN 12 593
Stabilnost pri skladištenju Razlika u točki razmekšanja [°C]	≤ 8	MSZ EN 13 399 MSZ EN 1427
Točka paljenja [°C]	≥ 235	MSZ EN ISO 2592
Dinamička viskoznost pri 180 °C [mPa·s]	≤ 500	MSZ EN 13 302
Napomena: ⁽¹⁾ Produljenje ispitivanog RmB uzorka je 100 mm, ⁽²⁾ Vrijeme skladištenja je 24 sata		

Gumeni granulati koji se koristi za proizvodnju CSR-a proizvodi se isključivo od istrošenih automobilske gume (od osobnih vozila i kamiona) i ne smije sadržavati čestice nikakvih drugih proizvoda od gume. Gumeni granulati ne smije sadržavati nikakve štetne tvari poput minerala, gline itd., ili metalna vlakna koja služe za izradu automobilske gume. Udio tekstila u gumenom granulatu može biti najviše 0,1 posto ukupne mase. Zahtjevi za CSR-e koji se primjenjuju u Mađarskoj prikazani su u tablici 2. Parametri kvalitete proizvoda također trebaju biti u skladu sa zahtjevima propisanim mjerodavnom normom (*MSZ 930 Bitumen and bituminous binder. Rubber modified bitumen*), koju je objavio mađarski Institut za standardizaciju u prosincu 2015.

2.3. Ispitivanje veziva

CSR koji je proizveo MOL (RmB 45/80-55), testiran je i uspoređen s drugim vrstama bitumena koji se primjenjuju u praksi. Ispitivanje je proveo Laboratorij mađarskih javnih cesta LTC u Vezspremu. Rezultati su prikazani u tablicama 3. i 4.

Tablica 3. Usporedba rezultata ispitivanja triju veziva

	RmB 45/80-55	50/70	PmB 25/55-65
Penetracija na 25 °C 0,1mm	66	53	40
Točka razmekšanja [°C]	58	52	79
Točka loma po Fraasu [°C]	-24	-15	-17
Elastični povrat na 25 °C [%]	63	-	90
Stabilnost pri skladištenju Razlika u točki razmekšanja [°C]	6	-	3
Dinamička viskoznost na 180 °C [mPa·s]	440	95	380

Tablica 4. Usporedba svojstava triju veziva

	RmB 45/80-55	50/70	PmB 25/55-65
Izvorni uzorak			
G*/sinδ, na 58 °C [kPa] (min 1,0)	6,3	3,5	13,9
Nakon RTFOT			
G*/sinδ, na 58 °C, [kPa] (min 2,2)	9,7	8,2	22,0
Nakon RTFOT + PAV			
G* sinδ na 22 °C [kPa] (max 5000)	1780	4950	4440
Krutost na 12 °C [MPa] (max 300)	73	177	158
m-vrijednost na 12 °C (min 0,300)	0,352	0,326	0,326
Klasa ponašanja (PG)	PG 76-28	PG 64-22	PG 84-22
*Ispitivanje je provedeno s obzirom na klimatske uvjete u Mađarskoj. U Mađarskoj se zahtijeva klasa ponašanja bitumena (PG) 58-22. Izvorni i RTFOT uzorci su ispitivani pri temperaturi od 58 °C. Nakon RTFOT + PAV starenja, 22°C i -12 °C su temperature pri kojima se provodi ispitivanje.			

2.4. Prednosti

Prednosti CSR-a, koji je proizveo MOL, su sljedeće [13-15, 17-18]:

- Zbog tehnologije primijenjene u procesu proizvodnje, otprilike polovica količine gumenog granulata se otopi u bitumenu i tako postaje stvarni modifikator koji poboljšava fizikalna i kemijska svojstva bitumena, tj. gumeni granulati nije neaktivno punilo.
- Gumeni granulati značajno utječe na tehnička svojstva CSR-a. Najznačajnije komponente gumenog granulata su poliozopren i stirenbutadien.
- U proizvodnji CSR-a primjenjuje se specijalni multifunkcionalni aditiv, približno 0,3 posto ukupne mase, koji pospješuje disperziju i otapanje gumenog granulata u bitumenu. Aditiv također poboljšava stabilnost veziva pri skladištenju, zbog disperzije čađe i anorganskih punila koji ostaju nakon otapanja gumenog granulata. Istovremeno taj aditiv smanjuje viskoznost CSR-a, vrijednost viskoznosti postaje slična onoj kod polimerom modificiranog bitumena.
- CSR se proizvodi u zatvorenom proizvodnom sustavu, pa nema otpuštanja štetnih plinova u atmosferu. Proizvođač veziva treba tretirati topljene i razgrađene plinove u skladu s odgovarajućim propisima.

CSR je testiran u sklopu mehaničkih ispitivanja asfalta, a primjenjivao se kod pilot projekata kolničke konstrukcije. Najznačajniji takav projekt, koji je financirala *Hungarian Infrastructure Developing Ltd*, ostvaren je tijekom kolovoza i rujna 2014. Više od 900 tona CSR-a iskorišteno je pri proizvodnji 22000 tona asfaltne mješavine za izgradnju nove ceste u blizini Villanya, na jugu Mađarske. Ukupna duljina ceste je 4,4 km. Iskustva stečena ovim projektom su izvrsna. Važnost ovog projekta, osim u dosada najvećoj primijenjenoj količini CSR-a, ogleda se u činjenici da se za izradu svih asfaltnih slojeva (AC32 nosivi sloj, AC22 vezivni sloj, AC 16 habajući sloj) koristilo isključivo CSR vezivo.

Rezultati su pokazali da je kvaliteta CSRb-a puno veća u odnosu na cestograđevne bitumene te da je njegova primjenjivost odlična. Primjena CSRb-a produljuje uporabni vijek te povećava kvalitetu kolnika. Korištenje recikliranih otpadnih materijala pri proizvodnji CSRb-a je pozitivno u smislu ekonomičnosti, zaštite okoliša i tehničkih aspekata. Iako sadašnji propisi omogućuju raširenu primjenu CSRb-a, temeljita mehanička analiza CSRb asfaltnih mješavina još uvijek traje. Ovaj rad je dio tog procesa, uspoređuje module elastičnosti asfaltnih mješavina proizvedenih s bitumenom modificiranim gumenim granulatom (CSRb), polimerom modificiranim bitumenom i cestograđevnim bitumenom 50/70.

3. Modul elastičnosti CSRb-a

3.1. Plan istraživanja

Razlike u mehaničkim svojstvima asfaltnih mješavina proizvedenih s CSRb-om i asfaltnih mješavina s konvencionalnim vrstama bitumena istražene su na Zavodu za ceste i željeznice Sveučilišta za tehnologiju i ekonomiju u Budimpešti. Tri asfaltnje mješavine su uspoređene u okviru ovog istraživanja:

- AC22 vezivo tip 50/70, kao referentna mješavina
- AC22 vezivo tip PmB 25/55-65, kao referentna mješavina
- AC22 vezivo tip RmB 45/80-55, kao glavna mješavina za ispitivanja.

U svim je mješavinama upotrijebljen isti prirodni agregat, a udio bitumena je iznosio 4,5 posto ukupne mase. Tablice 5. i

6. prikazuju projektiranu raspodjelu čestica i spojeva prirodnog agregata.

Cilj je bio proizvesti različite asfaltnje mješavine s istom gustoćom kako bi kvaliteta veziva bila jedini promjenjivi parametar. U slučaju mješavine AC 22 vezivo tip 50/70, koja je pripravljena s cestograđevnim bitumenom, viskoznost pri miješanju je iznosila 0,17 Pa, dok je viskoznost pri zbijanju iznosila 0,28 Pa. Vrijednosti viskoznosti su u skladu s propisima Instituta za asfalte. Temperatura miješanja je iznosila 160 °C, a zbijanja 148 °C.

Kako bi gustoća mješavina bila istovjetna referentnoj Marshalllovoj gustoći mješavine AC 22 vezivo tip 50/70, asfaltnje mješavine s modificiranim bitumenom su zbijane pri različitim temperaturama prema japanskoj metodi [19]. Ispitivanjem su utvrđene vrijednosti temperatura pri kojima je gustoća asfalta s modificiranim bitumenom bila približno jednaka gustoći asfalta s cestograđevnim bitumenom. Temperatura miješanja i zbijanja mješavine AC 22 vezivo tip PmB 25/55-65 iznosila je 175 °C, dok je mješavina AC 22 vezivo tip RmB 45/80-55 bila miješana pri temperaturi od 175 °C, a temperatura zbijanja je iznosila 165 °C.

Podatke o vrijednostima viskoznosti primijenjenih veziva ustupio je MOL, a prikazani su u tablici 7. MOL je ustupio i vrijednosti G^* kompleksnog posmičnog modula i δ faznog kuta za tri vrste bitumena, određene dinamičkim reometrom (eng. *dynamic shear rheometer* - DSR). Njihove temperature ovisnosti su prikazane na slici 1. Ti podaci pružaju informacije o ponašanju bitumena pri srednjim temperaturama (zamor materijala) i pri visokim temperaturama (osjetljivost na plastične deformacije).

Tablica 5. Planirani sastav AC 22

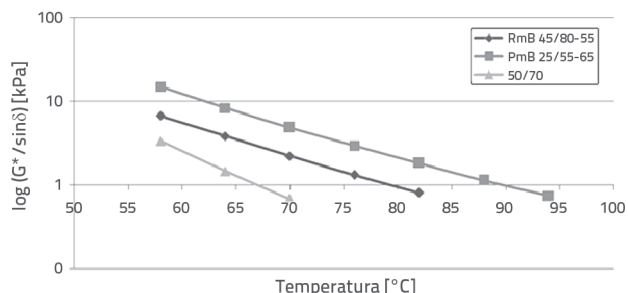
Otvor sita [mm]	Prosijavanje (postotak prolaska kroz sito) [m/m%]	Specifične vrijednosti (e-UT 05.02.11:2010)
0,0	0,0	Punilo 6,7 4,0-8,0
0,063	6,7	Sitni agregat 14,3 4,0-8,0
0,125	8	
0,25	9	
1,0	14	
2,0	21	
4,0	33	Krupni agregat 79 20-40
5,6	38	
8,0	45	
11,2	54	
16,0	79	
22,4	99	
31,5	100	
		90-100
		≤100

Tablica 6. Sastav agregata

Opis	ML. Vapnenačko brašno	NZ 0/4 Dolomit	NZ 4/11 Dolomit	NZ 11/22 Dolomit
Pozajmište	Tatabánya	Iszka	Iszka	Iszka
Udio [%]	4	30	21	45

Tablica 7. Dinamička viskoznost mjerena pri različitim temperaturama (mPa-s)

Temperatura ispitivanja [°C]	50/70	PmB 25/55-65	RmB 45/80-55
135	527	3767	2727
160	170	987	930
180	86	428	477



Slika 1. Temperaturna ovisnost o $G^* / \sin\delta$

3.2. Masterkrivulja mješavina

Dodatne informacije, koje pružaju masterkrivulje ovih mješavina, analizirane su u sklopu ovog istraživanja. Kompleksni modul i fazni kut mješavine utvrđene su *Simple Performance Testerom* (SPT). Vrijednosti krutosti su izmjerene za svaku mješavinu pri tri različite temperature i šest različitih frekvencija:

- temperature: 10 °C, 20 °C, 30 °C
- frekvencije: 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz.

Na temelju izmjerenih vrijednosti krutosti određeni su moduli elastičnosti prema Huet - Sayeghovom modelu [20].

Opća jednadžba modela je sljedeća (1):

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta \cdot (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-k} + (i \cdot \omega \cdot \tau)^{-h}} \quad (1)$$

gdje je:

- E^* - kompleksni modul [MPa]
- E_0 - granična vrijednost kompleksnog modula za $\omega\tau \rightarrow 0$
- E_∞ - granična vrijednost kompleksnog modula za $\omega\tau \rightarrow \infty$ (Glassyev modul)
- ω - 2π *frekvencija
- τ - karakteristično vrijeme promjenjivosti temperaturom proračunato prema načelu vremensko-temperaturne superpozicije
- δ - bezdimenzionalna konstanta
- k, h - eksponenti s obzirom na kriterij: $0 < k < h < 1$.

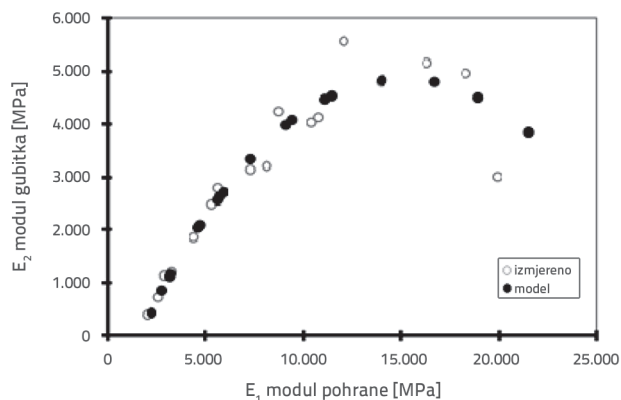
Model koristi rezultate testova provedenih u isto vrijeme pri različitim temperaturama i ove vrijednosti su uzete u obzir primjenom takozvane (τ) *time decay constant*. Primjena *time decay constant* temelji se na načelu superpozicije, a može se izraziti kvadratnim odnosom na sljedeći način (2):

$$\tau = e^{a \cdot T^2 + b \cdot T + c} \quad (2)$$

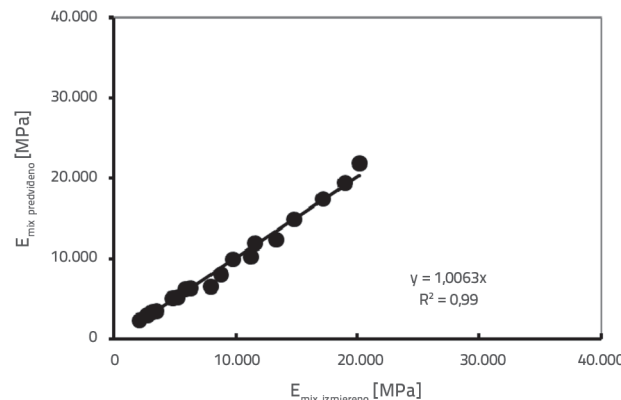
gdje je:

- τ - konstanta smanjenja (gubitka) vremena
- T - temperatura
- a, b, c - konstante.

Huet-Sayeghov model je optimiziran primjenom *Microsoft Excel Solver* modula. Rezultati asfaltnih mješavina s CSRB-om prikazani su na sljedećim slikama: slika 2. prikazuje dobiveni i predviđeni Cole-Coleov dijagram, slika 3. prikazuje odnos dobivenih i predviđenih modula, a na slici 4. prikazan je dobiveni i predviđeni fazni kut.



Slika 2. Usporedba izmjerenog i predviđenog Cole-Coleovog dijagrama



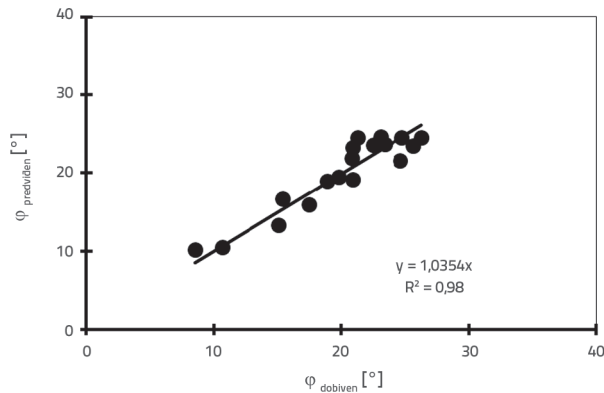
Slika 3. Odnos izmjerenih i predviđenih modula

Dobivena je dobra podudarnost između izmjerenih i predviđenih vrijednosti. Koeficijent determinacije (R^2) viši je od 0,98 za promatrane i procijenjene vrijednosti krutosti kao i za promatrane i procijenjene vrijednosti faznih kutova. Procijenjeni

Tablica 8. Svojstva HS (Huet-Sayeghov) modela

	E_0	E_{inf}	D	k	h	a	b	c
AC22 vezivo tip RmB 45/80-55	1 925	28 425	0,00302	1	0,4452498	-0,5161	-0,2475	0,00019
AC22 vezivo tip PmB 25/55-65	1 573	34 520	$1 \cdot 10^{-6}$	-2,9295	0,4383	1,0756	-0,2248	-0,0002
AC22 vezivo tip 50/70	1	34 124	$1 \cdot 10^{-6}$	0,6051	0,4179	0,021	-0,0954	-0,0026

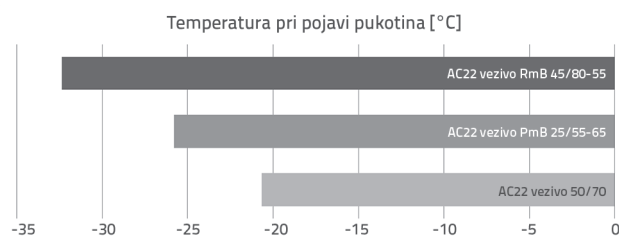
parametri optimiziranih modela su prikazani u tablici 8. za svaku od tri mješavine za Huet-Sayeghov (HS) model.



Slika 4. Usporedba dobivenih i predviđenih faznih kutova

3.3. Svojstva asfaltnih mješavina s dodatkom CSRB bitumena

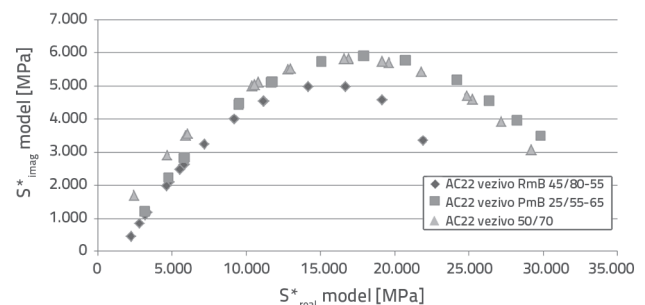
Na temelju vrijednosti iz tablice 8. može se zaključiti da je vrijednost parametra E_0 , koji je izravno povezan s unutarnjim trenjem prirodnog agregata i indirektno s osjetljivošću na plastičnu deformaciju vrlo visoka. Također, vrijednost parametra E_0 asfaltnje mješavine s CSRB-om znatno je veća nego kod mješavine s cestograđevnim bitumenom, a također prelazi vrijednost E_0 mješavine od modificiranog bitumena. To dokazuje dobru otpornost na kolotražnje pri visokim temperaturama. Vrijednost parametra E_{inf} , koji upućuje na ponašanje mješavine pri niskim temperaturama, niža je nego u ostalim mješavinama. Ta činjenica ukazuje na manju krutost, što podrazumijeva bolju otpornost na nastanak pukotina. Pretpostavke koje se temelje na rezultatima modeliranja provjerene su kroz laboratorijska ispitivanja. Ponašanje mješavine s CSRB-om pri niskim temperaturama bilo je iznimno dobro (slika 5.) [21].



Slika 5. Dijagram temperatura pri pojavi pukotina, određen ARH ispitivanjem

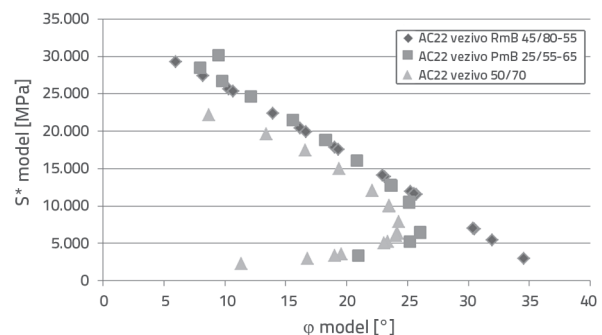
Ispitivanje je provedeno primjenom ARH ispitivanja koje je razvijeno na Sveučilištu za tehnologiju u Budimpešti 1980-ih. ARH ispitivanje je potpuno kompatibilno s TSRST ispitivanjem koje je definirano normom EN 12697-46:2012 [22].

Jedan od mogućih načina prikaza kompleksnog modula je pomoću takozvanog Cole-Coleovog dijagrama, na kojem se prikazuje modul gubitka (E_2) određen pri različitim temperaturama u funkciji akumulacijskog modula (E_1). Na slici 6. prikazan je Cole-Coleov dijagram za tri uzorka asfaltnih mješavina.



Slika 6. Rezultati HS modela na Cole-Coleovom dijagramu

Vrijednosti kompleksnog modula mogu su prikazati pomoću *black dijagrama*, na kojemu su vidljive promjene faznog kuta s promjenom kompleksnog modula (slika 7.).



Slika 7. Rezultati HS modela na black dijagramu

Na temelju svojstava i karakteristika triju različitih vrsta veziva u asfaltnim mješavinama zaključeno je sljedeće:

- Trajna deformacija asfaltnih mješavina predvidiva je pomoću vrijednosti $G^*/\sin\delta$. S obzirom na to CSRB (RmB 45/80-55) se, prema svojim svojstvima, može svrstati između druga dva veziva. Očekivana otpornost na kolotražnje je veća nego kod mješavine s cestograđevnim bitumenom 50/70, a lošija u

odnosu na mješavinu s polimerom modificiranim bitumenom (PmB).

- Faktor zamora asfaltnih mješavina predvidiv je pomoću vrijednosti $G^* \sin \delta$ pri srednjoj temperaturi (22 °C u skladu s mađarskim klimatskim uvjetima) nakon ispitivanja starenja bitumena laboratorijskim metodama RTFOT i PAV. S obzirom na navedeno, CSRB ima bolja svojstva od cestograđevnog bitumena 50/70 i polimerom modificiranog bitumena 25/55-65.
- Ponašanje asfaltnih mješavina pri niskim temperaturama predvidljivo je pomoću krutosti bitumena i m-vrijednosti. Kod CSRB veziva je izmjerena manja krutost i veća m-vrijednost. To upućuje na činjenicu da asfaltnih mješavina sa CSRB-om imaju najbolja svojstva pri niskim temperaturama usporedno s drugim ispitanim asfaltnim mješavinama. Određivanje točka loma po Fraassu također upućuje na najbolja svojstva CSRB-a pri niskim temperaturama, što odgovara reološkim rezultatima.

4. Zaključak

Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti:

- Reološka svojstva asfaltnih mješavina s CSRB-om ispravno odražavaju iskustva stečena pri ispitivanju bitumenskih veziva. Rezultati ispitivanja su pokazali da se svojstva asfaltnih mješavina s CSRB-om značajno razlikuju od mješavina pripremljenih s cestograđevnim bitumenom.
- Ponašanje asfaltnih mješavina pri niskim temperaturama u potpunosti odgovara ponašanju veziva pri niskim temperaturama. Iako mješavina s CSRB-om ima slične

karakteristike kao i mješavina s PmB-om smjese, ispitivanja su pokazala da pri niskim temperaturama smjesa s CSRB-om ima najbolje karakteristike.

- Primjena CSRB-a poboljšava otpornost na trajne deformacije asfaltnih mješavina. Iako se primjenom PmB bitumena mogu postići bolji rezultati, CSRB ima povoljnija svojstva pri visokim temperaturama.
- Rezultati ispitivanja jasno pokazuju da su mješavine sa CSRB-om otpornije na zamor nego ostale vrste mješavina.
- Proizvodnja CSRB-a i njegova primjena u cestogradnji ne omogućava samo povećanje kvalitete kolnika, u odnosu na kolnike izgrađene cestograđevnim bitumenom, nego nudi i rješenje za postupanje s rabljenim automobilskim gumama. Osim ekonomske isplativosti, ovaj proces je vrlo povoljan u smislu odgovornoga gospodarenja otpadom.

Glavne prednosti primjene CSRB-a, na temelju rezultata ispitivanja, su sljedeće:

- S obzirom na bolja svojstva asfaltnih mješavina, može se očekivati duži uporabni vijek kolnika u odnosu na asfaltnih kolnike s cestograđevnim bitumenom.
- Zbog odlične otpornosti na zamor materijala, takvi kolnici imaju veću otpornost na nastanak pukotina.
- Kolnici mogu podnijeti veće prometno opterećenje te su manje osjetljivi na kolotražnje.
- Kolnici imaju duži uporabni vijek i smanjene troškove održavanja.
- Istrošene automobilske gume su iskorištene na ekonomičan i ekološki prihvatljiv način.

LITERATURA

- [1] Lo Presti, D.: Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49 (2013), pp. 863-881, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
- [2] Bíró, Sz.: Kémiaiilag stabilizált gumibitumenek előállítás és vizsgálata. PhD dissertation, 2005.
- [3] Zareh, A., Way, G.B.: 35 Years of Asphalt-Rubber Use in Arizona, *Proceedings of Asphalt Rubber 2006 Conference*, Palm Springs, California, pp. 17-37, 2006.
- [4] Zanzotto, L., Kennepohl, G.J.: Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt, *Transportation Research Record, Materials and Construction*, Vol. 1530 (1996), pp. 51-58
- [5] Pinheiro, J., Soares, J.: The effect of crumb rubber and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (Dry process), *Proceedings Asphalt Rubber 2003 Conference*, Brasilia, Brazil, ISBN: 85-903997-1-0, pp. 707-718, 2003.
- [6] Gawel, I., Stepkowski R., Czechowski, F.: Molecular interactions between rubber and asphalt, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45 (2006), pp. 3044-3049, <http://dx.doi.org/10.1021/ie050905r>
- [7] State of California Department of Transportation, Materials Engineering and Testing Services: *Asphalt Rubber Usage Guide*, 2006.
- [8] Choubane, B., Sholar, G.A., Musselman, J. A., Page G.C.: Ten -Year Performance Evaluation of Asphalt-Rubber Surface Mixes, *Transportation Research Record*, 1681 (1999), pp. 10-18
- [9] Holló, A., Geiger, A., Thernesz, A.: Kémiaiilag stabilizált gumibitumenek alkalmazása. Innováció és fenntartható felszíni közlekedés IFFK-Konferencia, 2009.
- [10] Kandhal, P.S.: Quality control requirements for using crumb rubber modified bitumen (CRMB) in bituminous mixtures, *Journal of the Indian Roads Congress*, No. 522, Vol. 67-1, April-June 2006.
- [11] Hicks, R.G., Epps, J.A.: Quality Control for Asphalt Rubber Binders and Mixes, *Proceedings of Asphalt Rubber 2000*, Portugal, 13-17, November, 2000.
- [12] Fontes, L., Pereira, P., Pais, J., Triches, G.: Behaviour of Asphalt Rubber Mixtures with Different Crumb Rubber and Asphalt Binder Sources, *Proceedings of Asphalt Rubber 2006 Conference*, Palm Springs, California, pp. 619-639, 2006.
- [13] Geiger, A., Holló, A., Szalmásné Pécsvári, G., Fehér, P.: MOL Rubber bitumen - Part 1, *MOL Scientific Magazine*, 2 (2012), pp. 54-61.

- [14] Geiger, A., Gáspár, L., Holló, A., Péter, M., Durgó, R., Csőke, Cs., Czibor, S.: MOL Rubber bitumen - Part 2, MOL Scientific Magazine, 2 (2014), pp. 74-83
- [15] Geiger, A., Holló, A., Szalmásné Pécsvári, G., Fehér, P., Gergő, P., Bartha, L.: MOL Gumibitumen, Magyar KémikusokLapja, 68. évf., 9. szám, 258-261. old., 2013.
- [16] Hungarian Road Association: Gumival modifikált bitumen (GmB) eUT 05.01.25:2013. *Design guidelines*, 2013.
- [17] Geiger, A.: Gumival modifikált bitumen (GmB) gyártása, és a felhasználásával készült aszfaltok beépítési tapasztalatai. *Az aszfalt*, XIX. 2014/1, 2014.
- [18] Geiger, A., Baladincz, J.: MOL case study: Improving bitumen quality and durability with the production of rubber modified bitumen, 6th *Argus Europe Bitumen Conference*, Istanbul, 10-11 June, 2015
- [19] Japan Modified Asphalt Association: Quality and Test Methods of Polymer Modified Asphalt for Road Pavement. JMAAS-01:2007.
- [20] Pronk, A.: The Huet-Sayegh Model: A Simple and Excellent Rheological Model for Master Curves of Asphaltic Mixes. *Asphalt Concrete*, pp. 73-82, 2005, [http://dx.doi.org/10.1061/40825\(185\)8](http://dx.doi.org/10.1061/40825(185)8)
- [21] Pászti, R.: Gumibitumennel készített aszfaltkeverékek mechanikai tulajdonságai. Master diploma thesis, Budapest University of Technology and Economics, Department of Highway and Railway Engineering, 2014.
- [22] Török, K., Pallós, I.: Az aszfaltok téli hidegviselkedését befolyásoló anyagtulajdonságok laboratóriumi vizsgálata (in Hungarian), (Laboratory tests of factors determining the low temperature behaviour of asphalt mixes), *Útügyi Lapok: A Közlekedésépítési Szakterület Mérnöki és Tudományos Folyóirata*, Vol. 5, 2015. ISSN: 2064-0919.