

ИСПИТИВАЊЕ РЕОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА БИТУМЕНА – ZERO SHEAR VISCOSITY

Марко Орешковић, магистар инжењерства грађевинарства.

Грађевински факултет Универзитета у Београду,
moreskovic@grf.bg.ac.rs

Стефан Трифуновић, студент

Грађевински факултет Универзитета у Београду,
trifunovic94@outlook.com

в. проф. др Горан Младеновић, дипломирани инжењер.

Грађевински факултет Универзитета у Београду,
emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Оригинални научни рад

Резиме: Колотрази представљају једно од доминантних оштећења флексибилних коловозних конструкција које негативно утиче на безбедност саобраћаја и удобност вожње. Отпорност асфалтних мешавина на трајну деформацију значајно зависи од реолошких карактеристика битумена. Циљ овог рада је поређење отпорности на трајну деформацију битумена испитивањем вискозитета при нултом смицању – ZSV (Zero Shear Viscosity) коришћењем осцилаторног опита и опита оптерећења и растерећења, и применом Кросовог, Кароовог и Бургерсовог реолошког модела. У оквиру истраживања испитана су два обична битумена (БИТ 50/70 и БИТ 70/100) и два полимер-модификована битумена (PmB 25/55-55 и PmB 45/80-65). Резултати истраживања су показали да полимер-модификовани битумени, као што је очекивано, имају већу отпорност на трајну деформацију од обичних битумена и да употреба параметра ZSV омогућава њихово упоређивање и рангирање без обзира на примењени реолошки модел.

Кључне речи: вискозитет битумена, трајна деформација, вискозитет при нултом смицању.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDER- ZERO SHEAR VISCOSITY

Marko Orešković, M. Sc. CE

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade,
moreskovic@grf.bg.ac.rs

Stefan Trifunović, student,

Faculty of Civil Engineering, University of
Belgrade, trifunovic94@outlook.com

Assoc. Prof. Goran Mladenović, Ph. D. CE

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade,
emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Scientific paper

Abstract: Rutting is one of the most common distresses of flexible pavements that has a negative impact on traffic safety and ride comfort. The rutting resistance of asphalt mixtures depends substantially on the bitumen rheological properties. The objective of this paper is to compare the resistance to permanent deformation of bitumen, by using Zero Shear Viscosity (ZSV), tested with frequency sweep and creep and recovery tests, and using Cross, Carreau and Burgers rheological models. Two straight-run bitumens (BIT 50/70 and BIT 70/100) and two polymer modified bitumens (PmB 25 / 55-55 and PmB 45 / 80-65) were tested. The results of the study showed, as expected, that polymer-modified bitumen, has a higher resistance to permanent deformation than straight-run bitumen, and that the use of the ZSV enables comparison and ranking of different bitumens, regardless of the applied model.

Key words: bitumen viscosity, permanent deformation, zero shear viscosity

1. УВОД

Трајна деформација асфалтних слојева у флексибилним коловозним конструкцијама (колотрази) настаје на високим експлоатационим температурама услед преласка тешких возила. Присуство колотрага представља озбиљан проблем за безбедно одвијање саобраћаја, посебно по кишном времену, због могуће појаве аквапланинг ефекта (појава при којој између пнеуматика и подлоге остаје танак слој воде, што може узроковати губитак контроле над возилом). До појаве колотрага у асфалтним слојевима долази услед подужних и попречних померања битуменског везива и зрна агрегата у слоју услед напона смицања. Отпорност асфалтних мешавина на трајну деформацију (колотраге) зависи од реолошких карактеристика битумена, састава асфалтне мешавине (нпр. од количине битумена, заобљености и степена изломљених површина зрна агрегата, њиховог распореда итд.), степена збијености итд.

Како би се побољшале карактеристике битумена, а самим тим и карактеристике асфалтних мешавина, врши се његова модификација употребом полимера: еластомера, пластомера и др. Примена полимера у битуменима је отворила велики број питања и области које треба истражити. Досадашња истраживања из области реологије битумена су спроведена са циљем да се предвиди понашање битумена и асфалтних мешавина на основу реолошких карактеристика битумена.

Програм за стратешко истраживање у путевима (*SHRP – Strategic Highway Research Program*) је дефинисао параметар $G^*/\sin\delta$ као показатељ отпорности битумена на трајну деформацију, где је G^* комплексни модул, а δ фазни угао битумена [1]. *SHRP* препоручује употребу поменутих фактора на фиксној температури и фреквенцији испитивања, што на непотпун начин представља оно што се дешава у реалним условима одвијања саобраћаја, посебно када су у питању полимер-модификовани (ПМ) битумени [2]. Због непоузданих резултата ове методе, истраживања су била концентрисана на проналажење алтернативне методе за одређивање отпорности битумена на трајну деформацију. 1979. године први пут су се појавили подаци о методи која је најпре развијена за потребе испитивања полимера: одређивање вискозитета при нултом смицању – *ZSV (Zero Shear Viscosity)*. Вискозитет при нултом смицању представља физичку особину битумена - вискозитет одређен на нивоу деформације смицања која је приближно једнака нули и означава се са η_0 [3].

Циљ овог рада је био да се одреде вредности *ZSV*-а, употребом различитих опита и модела, код битумена који се користе у путоградњи и да се на тај начин омогући рангирање битумена у погледу отпорности на трајну деформацију и предвиђање понашање битумена и асфалтних мешавина у коловозној конструкцији у погледу отпорности на колотраге. За потребе овог рада испитана су два обична битумена (БИТ 50/70 и БИТ 70/700) и два полимер-модификована битумена (PmB 25/55-55 и PmB 45/80-65).

2. ВИСКОЗИТЕТ ПРИ НУЛТОМ СМИЦАЊУ - *ZSV*

Већ дуги низ година истражују се различите методе за одређивање отпорности битумена на трајну деформацију[4-8]. Стандардни опит одређивања тачке размекшања по методи прстена и куглице, као ни температура изведена из фактора $G^*/\sin\delta$ нису адекватни за поуздано одређивање отпорности ПМ битумена на трајну деформацију, посебно уколико је висок садржај полимера.

Карсвел[6] је утврдио да акумулирана деформација при опиту течења има много бољу корелацију са трајном деформацијом него параметар $G^*/\sin\delta$ код обичних и битумена са већим садржајем полимера, док је нешто лошија зависност добијена код битумена са мање полимера и битумена са специјалним адитивима.

За карактеризацију ПМ битумена у погледу отпорности на трајну деформацију, посматра се зависност вискозитета од нивоа смицања и фреквенције оптерећења.

Типична промена вискозитета битумена у функцији од нивоа смицања је дата на слици 1, а слична зависност се добија и у функцији од фреквенције оптерећења.

Када се обични битумени изложе малим напонима смицања, (реда величине до 5000 Pa) они се налазе у линеарном опсегу и њихов вискозитет независи од нивоа смицања. Насупрот томе, ПМ битумени се понашају као псеудо-пластични флуиди, код којих привидни вискозитет опада са порастом напона, па зато њихове реолошке особине зависе од нивоа смицања коме су изложени. Међутим, при довољно ниским нивоима смицања, (реда величине 20 - 50 Pa) они се понашају слично као и обични битумени.

На кривој промене вискозитета на Слици 1 се могу уочити два параметра: вискозитет при малим напонима и деформацијама (*LSV – Low Shear Viscosity*) и вискозитет при нултом смицању (*ZSV*). Разлика између ова два параметра је у томе што се вредност параметра *LSV* добија директним мерењем у линеарном вискоеластичном опсегу у условима малих напона смицања и малих фреквенција оптерећења, док се *ZSV* добија екстраполацијом добијених резултата употребом различитих модела.



Слика 1. Дефиниција параметара *LSV* и *ZSV*, прилагођено из [9]

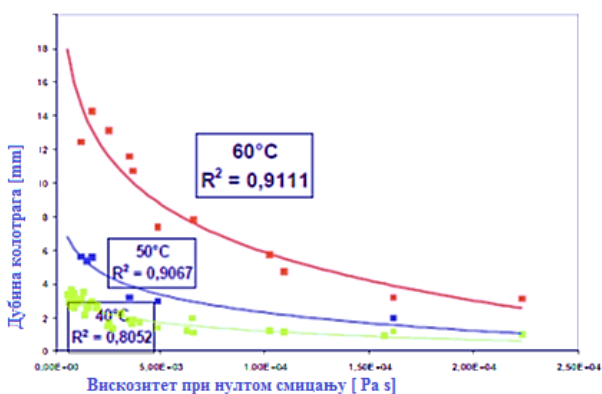
Приликом одређивања *LSV*-а, узорци битумена се испитују у нискофреквентном режиму осциловања у реометру за динамичко смицање и на основу тога се такође одређују и еквивискозне температуре које су показатељ делимичног доприноса битумена отпорности на колотраге. У литератури је могуће пронаћи радове који су повезали еквивискозне температуре са тачком размекшавања по методи прстена и куглице[10,11].

Постоји неколико опита који се користе за одређивање ZSV-а: опит течења (Creep test), опит течења при оптерећењу и растерећењу (Creep and Recovery test), осцилаторни опит (Oscillation test) и др. У литератури се могу наћи различити називи за исте опите, па се тако осцилаторни опит назива још и опит са променљивим фреквенцијама (Frequency sweep test), докопит течења при оптерећењу и растерећењу има више назива: поновљени опит пузања (Repeated creep test), пулсни опит течења (Pulse creep test), а постоји и модификовани опит течења на више нивоа оптерећења (Multi creep test).

У више истраживања је утврђено да је вискозитет при нултом смицању добар показатељ крутости битумена и његове отпорности на трајну деформацију, две карактеристике битумена које утичу на појаву колотрага [12-13].

Сибилски је упоређивао ZSV на 60 °C са бројем циклуса који проузрокују дубину колотрага од 10 mm током спровођења опита точком на 45 °C [4] и дошао до закључка да је отпорност асфалтних мешавина на појаву колотрага у знатној мери повезана са ZSV-ом код ПМ битумена. У оквиру истог истраживања дошао је до закључка да се боља зависност добија када се отпорност на појаву колотрага пореди истовремено са ZSV-ом, пенетрацијом и индексом пенетрације.

Гуерике и Шламе [10] су упоредили ZSV и дубину колотрага код СМА (скелетни мастикс асфалт) мешавине на 40, 50 и 60 °C и добили врло добре корелације (Слика 2).

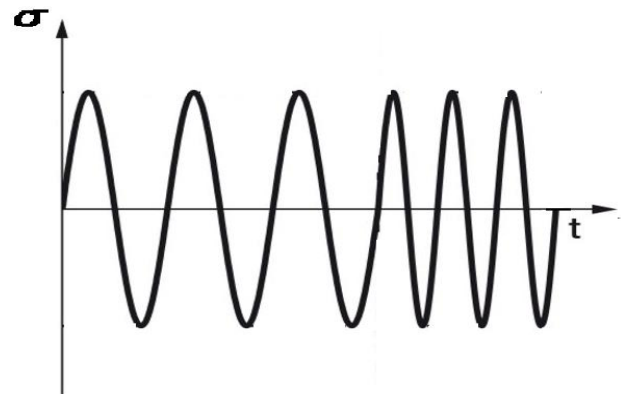


Слика 2. Дубина колотрага СМА мешавине у поређењу са ZSV краткотрајно остарелог битумена на 40, 50 и 60 °C – прилагођено из [10]

3. МЕТОДОЛОГИЈА РАДА

У оквиру овог рада коришћени су осцилаторни опит и опит течења при оптерећењу и растерећењу.

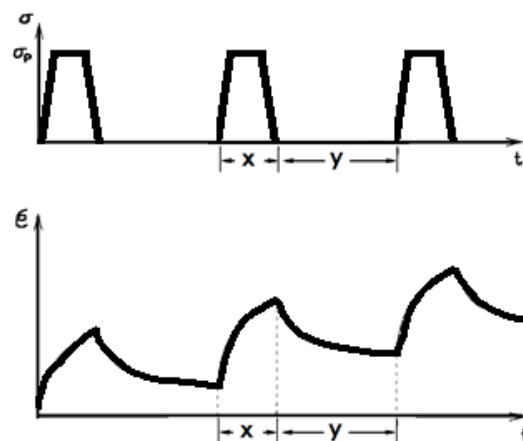
Опит при којем се одређује вискозитет на фиксној температури и амплитуди оптерећења, при сету различитих фреквенција, назива се осцилаторни опит (Слика 3).



Слика 3. Приказ осцилаторног опита

Опит који је развијен како би се што боље симулирали услови који се дешавају у коловозној конструкцији приликом експлоатације, назива се опит течења при оптерећењу и растерећењу и његова матрица је следећа (Слика 4):

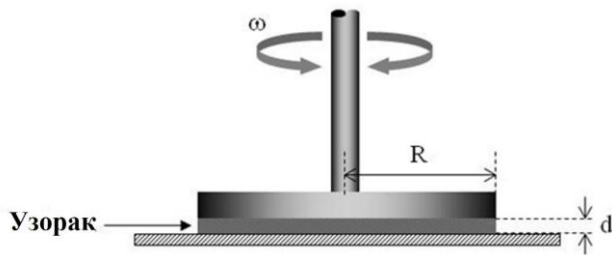
- Наношење оптерећења (σ_p Pa) у одређеном временском периоду 'x',
- Уклањање оптерећења и омогућавање узорку да се опорави у временском периоду 'y',
- Понављање оптерећења/растерећења укупно 'n' пута.



Слика 4. Приказ опита течења при оптерећењу и растерећењу

У извештају NCHRP-459 [2] прописано је да један циклус траје 10 s (1s оптерећење и 9s растерећење) и да се на једном узорку изврши 100 циклуса.

Оба опита су спроведена у реометру за динамичко смицање (Dynamic Shear Rheometer – DSR), на узорцима пречника 25 mm и дебљине 1 mm (Слика 5).



Слика 5. Узорак битумена изложен смицању [14]

Испитивања су спроведена на температури од 60 °C, што представља репрезентативну температуру за испитивање отпорности на колотраге у Србији и региону.

Основне карактеристике четири типа битумена коришћених у истраживању су приказане у Табели 1.

Табела 1. Карактеристике испитаних битумена

Врста битумена	Пенетрација	Тачка размешања по ПК	Вискозитет на 135°C	Вискозитет на 165°C
Стандард	SRPS EN 1426	SRPS EN 1427	SRPS EN 13302	
БИТ 70/100	84.9	47.9	0.284	0.086
БИТ 50/70	53.9	51.7	0.352	0.100
PmB 25/55-55	53.3	55.0	1.113	0.283
PmB 45/80-65	68.6	71.1	1.849	0.417

За обраду резултата испитивања коришћени су Бургерсов, Кросов и Кароов модел.

Као крајњи резултат употребе наведених модела добијене су вредности вискозитета при нултом смицању. Како је нулто смицање скоро немогуће постићи, па чак и употребом модела, за нулту вредност је усвојена фреквенција од 0.0001 Hz.

3.1. Бургерсов модел

У Бургерсовом моделу се током опита течења (или опита течења при оптерећењу и растерећењу) разликују две фазе, па се деформација $\epsilon(t)$ у тренутку t може описати помоћу следећих једначина:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0 t}{\eta_M} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}} \right) \quad (1)$$

за деформације у фази оптерећења, односно

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 t}{\eta_M} + \frac{\sigma_0}{E_K} e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}} \left(e^{\frac{E_K t}{\eta_K}} - 1 \right) \quad (2)$$

за деформације у фази растерећења, где се сматра да је оптерећење уклоњено у тренутку $t = t$ (Слика 4).

У једначинама (1) и (2) σ_0 представља напон коме је узорак изложен у фази оптерећења. E_M , η_M , E_K , и η_K представљају параметре модела који се односе на модул и вискозитет Максвеловог и Келвиновог елемента, респективно. Параметар η_M карактерише вискозно течење и важан је за одређивање отпорности битумена на колотраге, па се поистовећује са параметром η_0 који се добија употребом других модела.

3.2. Кросов модел

Како се битумени понашају као не-Њутновске течности, њихово понашање се може описати помоћу четворо параметарског Кросовог (Cross) модела који описује криву течења псеудо пластичне течности.

У литератури се може пронаћи неколико различитих варијација модела [4,13]. Основни облик модела је следећи:

$$\frac{\eta - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \frac{1}{1 + (K \dot{\gamma})^m} \quad (3)$$

или исказано преко вискозитета:

$$\eta = \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (K \dot{\gamma})^m} + \mu_\infty \quad (4)$$

где је:

η - вискозитет,

$\dot{\gamma}$ - ниво смицања/фреквенција,

η_0 - вискозитет при нултом смицању (апсолутни вискозитет),

η_∞ - вискозитет при бесконачном нивоу смицања,

K - константа, параметар везан за материјал у јединици времена,

m - константа, бездимензионални параметар материјала.

Вредност параметра μ_∞ је тешко израчунати, поготово за високо вискозне системе. Пошто се битумени испитују у релативно ниском опсегу фреквенција, могуће је претпоставити да је $\eta \gg \eta_\infty$, па се претходни модел може упростити и записати на следећи начин:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (K \dot{\gamma})^m} \quad (5)$$

Кросов модел, који се у литератури може пронаћи и у нешто измењеним облицима као што су, Крос/Вилијамсонов и Крос/Сибилски модел [14], најчешће се употребљава када се користи осцилаторни опит.

3.3. Кароовмодел

Код Кароовог (*Carreau*)модела вискозитет зависи од смицања. Како би се добио ZSV, подаци добијени испитивањем се уклапају помоћу нелинеарне регресије и једначине:

$$\mu_a = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{[1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^2]^N} \quad (6)$$

где је:

η_a - вискозитет при равнотежном стању,
 η_0 - вискозитет при нултом смицању,
 μ_∞ - вискозитет при бесконачном смицању,
 $\dot{\gamma}$ - ниво смицања,
 λ_c, N - константе.

У литератури се може наћи и другачији облик Кароовог модела [14]:

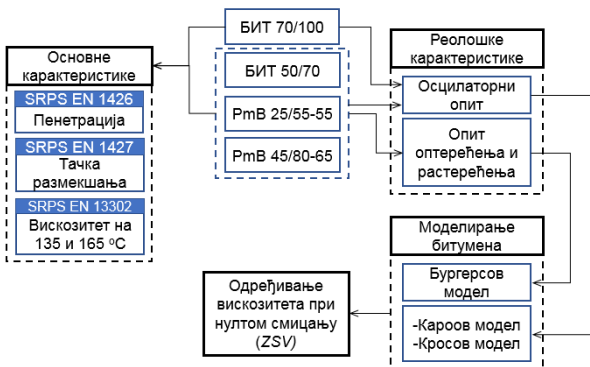
$$\eta^* = \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{(1 + (K\omega)^2)^{m/2}} + \mu_\infty \quad (7)$$

где је:

η^* - комплексни вискозитет,
 μ_0 - апсолутни вискозитет (у првом Њутновом опсегу),
 μ_∞ - вискозитет при бесконачном смицању,
 ω - фреквенција испитивања (*rad/s*),
 K, m - константе материјала.

Употреба Кароовог модела се препоручује код опита течења и код осцилаторног опита.

Имајући карактеристике модела у виду, формиран је план истраживања (Слика 6).



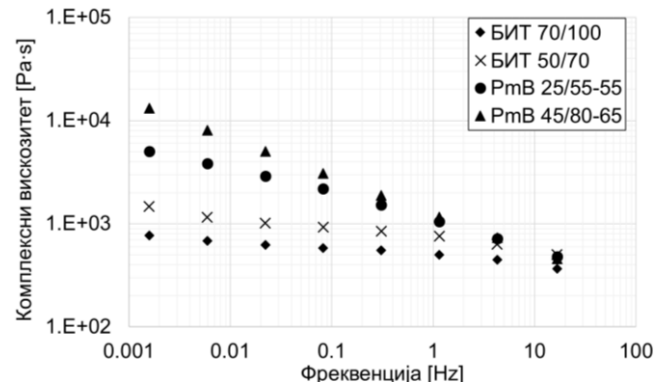
Слика 6. Матрица испитивања

4. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

4.1. Осцилаторни опит

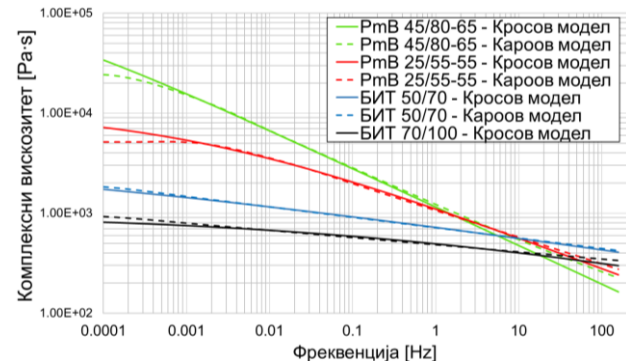
Фреквенција на којима су узорци испитани се кретала од 0.001 Hz до 16.67 Hz. Како теоретски није могуће извршити испитивања на 0 Hz, коришћени су Кросов и Кароов модел за екстраполацију измерених комплексних вискозитета до нулте фреквенције, тј. до фреквенције од 0.0001 Hz

применом методе најмањих квадрата. На Слици 7 приказани су резултати испитивања сва четири битумена.



Слика 7. Резултати осцилаторног опита испитаних битумена

На Слици 8 су приказане предвиђене вредности комплексних вискозитета испитаних битумена коришћењем различитих модела. Са дијаграма се уочава да полимер-модификовани битумени имају знатно више вредности комплексног вискозитета од обичних битумена. Кросов и Кароов модел дају приближно исте резултате код обичних битумена, док то није случај са полимер-модификованим битуменима, где Кароов модел доводи до формирања тзв. платоа на релативно ниским фреквенцијама, што је потврђено и у ранијим испитивањима [14].

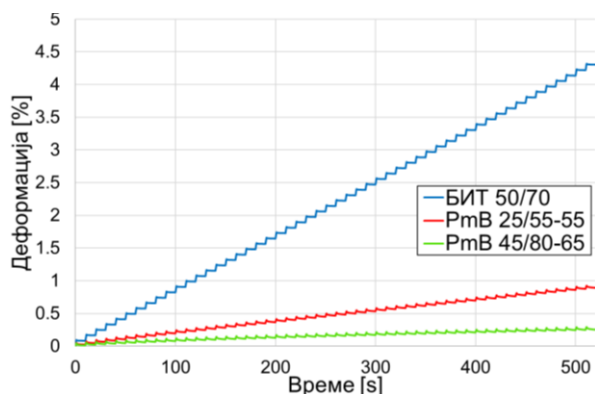


Слика 8. Предвиђене вредности вискозитета за испитане битумене

4.2. Опит течења при оптерећењу и растерећењу (Creep&recovery)

Температура испитивања битумена је износила 60 °C, како би резултати могли да се упореде са резултатима добијеним коришћењем осцилаторног опита. Услед ниског вискозитета на испитној температури, битумен са пенетрацијом 70/100 није могао бити испитан.

Опит оптерећења и растерећења се састоји од укупно 100 циклуса оптерећења и растерећења, с тим да један циклус траје 10 секунди (1s оптерећења и 9s растерећења). Напон смицања је био исти за сва три битумена и износио је 100 Pa.

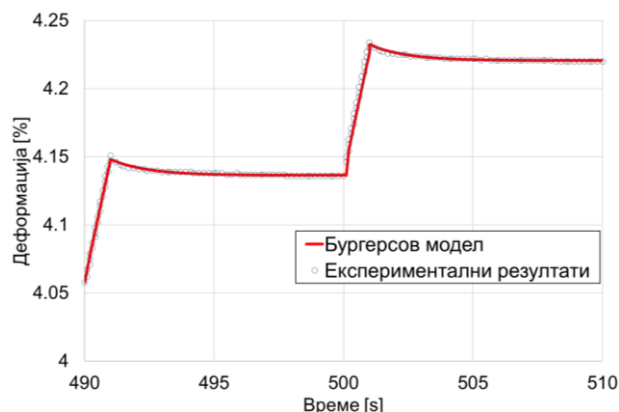


Слика 9. Резултати опита оптерећења и растерећења испитаних битумена

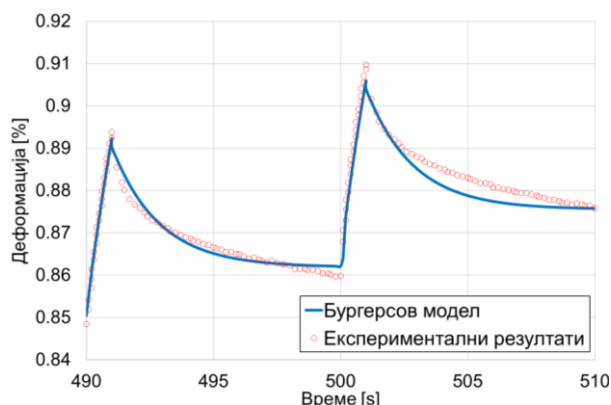
Са Сликe 9 се јасно може уочити да обичан путни битумен 50/70 има највећу акумулирану деформацију, док је битумен РmВ 45/80-65 најеластичнији. Са аспекта отпорности на трајну деформацију, повољније је да битумен има што већу повратну, а што мању акумулирану деформацију. Већ на основу резултата овог опита се може закључити да модификовани битумен РmВ 45/80-65 има највећу отпорност на појаву колотрага, што је потврђено коришћењем Бургерсовог модела.

Параметар η_m , који је заправо исто што и η_0 , је добијен уклапањем експерименталних података добијених приликом 50. и 51. циклуса у Бургерсов модел. На Сликама 10 до 12 приказани су 50. и 51. циклус опита оптерећења и растерећења три испитана битумена, као и дијаграми добијени употребом Бургерсовог модела.

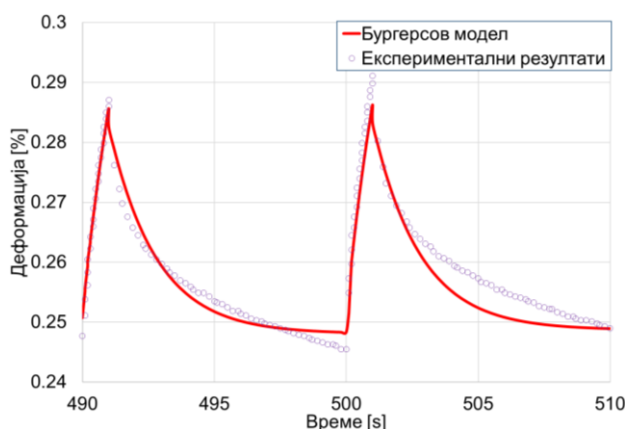
Са слика се може закључити да Бургерсов модел одлично описује понашање обичног битумена, што није случај са ПМ битуменима. Разлог лошијег уклапања модела код модификованог битумена лежи у самој реологији битумена. Наиме, модификатори који се користе, као и њихова количина, знатно мењају карактеристике битумена, па стога модел не може у потпуности да опише његово понашање.



Слика 10. 50. и 51. циклус опита течења при оптерећењу и растерећењу за битумен 50/70



Слика 11. 50. и 51. циклус опита течења при оптерећењу и растерећењу за битумен РmВ 25/55-55



Слика 12. 50. и 51. циклус опита течења при оптерећењу и растерећењу за битумен РmВ 45/80-65

У литератури [15,16]се такође указује на проблем са уклапањем експерименталних резултата у Бургерсов модел код ПМ битумена.

5. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

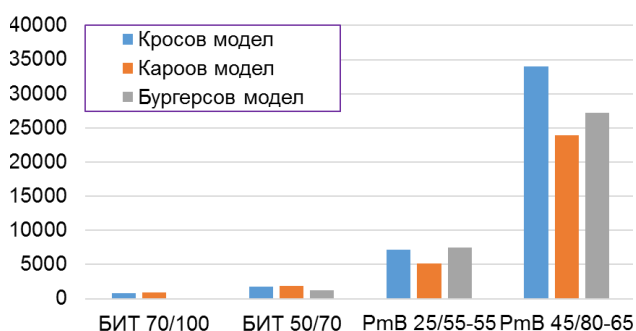
На Слици 13 приказане су процењене вредности вискозитета при нултом смицању добијене употребом различитих модела за испитане битумене.

Резултати показују да употреба полимера доприноси знатном повећању вредности ZSV, па самим тим повећању отпорности на трајну деформацију таквих битумена.

Употребом Кросовог и Кароовог модела добијају се приближно исте вредности ZSV-а код обичних битумена. Код ПМ битумена, Кросов модел даје нешто веће вредности ZSV-а од Кароовог модела (око 43%).

Коришћењем Бургерсовог модела, вредности ZSV-а код ПМ битумена су ниже од вредности добијених употребом Кросовог модела (око 25%), а веће од вредности добијених употребом Кароовог модела (око 14%). Код обичног битумена употребом Бургерсовог модела је добијена најнижа вредност ZSV-а (у просеку око 40%).

На основу прегледа релевантне литературе из ове области, као и након експерименталног истраживања и моделирања понашања битумена, може се закључити да битумен PmB 45/80-65 има највећу отпорност на дејство колотрага у поређењу са осталим битуменима који су испитани, без обзира на опит и модел који је коришћен.



Слика 13. Упоредни приказ ZSV-а испитаних битумена добијених употребом различитих модела

6. ЗАКЉУЧАК

Вискозитет при нултом смицању је врло поуздан показатељ отпорности асфалтних мешавина на колотраге: битумени са већом вредношћу ZSV-а имају већу отпорност на појаву колотрага. Због тога је циљ испитивања био да се упореде вредности вискозитета при нултом смицању добијене употребом различитих опита и модела за четири типа битумена.

За потребе овог рада испитана су два обична битумена (БИТ 70/100 и БИТ 50/70) и два полимер-модификована битумена (PmB 25/55-55 и PmB 45/80-65). Након одређивања основних карактеристика, битумени су испитани у реометру за динамичко смицање на 60 степени коришћењем осцилаторног опита, као и опита оптерећења и растерећења, с тим што битумен БИТ 70/100 није испитан коришћењем друго поменутог опита услед ниског вискозитета.

Након испитивања, добијени резултати су обрађени коришћењем различитих модела, у зависности од врсте опита.

Тако су за резултате добијене помоћу осцилаторног опита коришћени Кросов и Кароов модел, а за резултате добијене помоћу опита оптерећења и растерећења је коришћен Бургерсов модел.

Резултати испитивања су показали да полимер-модификовани битумени имају знатно већу отпорност на трајну деформацију, што је уопштено и познато како из праксе, тако и из научних истраживања. Битумен PmB 45/80-65 има највећу вредност вискозитета при нултом смицању, па је стога најпогоднији за употребу у климатским пределима који су приближно слични подручју у којем се налази Србија.

Вискозитет при нултом смицању је добар показатељ отпорности на појаву колотрага и у исто време веома поуздана алатка која инжењерима може бити од велике користи за избор битумена приликом пројектовања коловозних конструкција. Наиме, уколико је доступна иста врста битумена од различитих произвођача, одређивањем вискозитета при нултом смицању се лако може закључити који битумен има најповољнија својства у погледу отпорности на трајну деформацију.

ЗАХВАЛНОСТ

У раду је приказан део истраживања које је помогло Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије у оквиру технолошког пројекта ТР 36017 под називом: "Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anderson, D.A., Kennedy, T.W. (1993) Development of SHRP binder specifications. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 62, 481-507.
- [2] Bahia, H., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. & Anderson, R. (2001) Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design. National Cooperative Highway Research Program Report 459.
- [3] Morea, F., Agnusdei, J.O., & Zerbino, R. (2010) Comparison of methods for measuring zero shear viscosity in asphalts, Materials and Structures, 43, 499-507.
- [4] Sybilski, D. (1996) Zero-Shear Viscosity of Bituminous Binder and Its Relation to Bituminous Mixture's Rutting Resistance, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1535, 15-21.
- [5] Van Rooijen, R.C. & de Vondt, A.H. (2004) Experience with the zero-shear viscosity concept to characterise rutting. Proceedings of 3rd Eurasphalt&Eurobitume Congress Vienna 2004. Volume 2, 1588-1598.
- [6] Carswell, J. (2004) Assessment of the pulse creep test to predict asphalt mixture rutting behaviour, Proceedings of 3rd Eurasphalt&Eurobitume Congress Vienna 2004. Volume 2: 1539-1552.
- [7] Desmazes, C., Lecomte, M., Lesueur, D. & Phillips, M. (2000) A protocol for reliable measurement of zero-shear-viscosity in order to evaluate the anti-rutting performance of binders. Proceedings of 2nd Eurasphalt&Eurobitume Congress Barcelona 2000. 1, 203-211.
- [8] Le Hir, Y., Anderson, D., Planche, J.P. & Martin, D. (2003) Rheological characterization of bituminous binder to predict pavement rutting. Proceeding of 6th RILEM Symposium PTEBM'03. Zurich.
- [9] CEN/TS 15324:2008 Bitumen and bituminous binders – Determination of equiviscous temperature based on Low Shear Viscosity using a Dynamic Shear Rheometer in low frequency oscillation mode
- [10] Guericke, R. & Schlame, K. (2008) A new softening-point based on asphalt pavement performance figures. Proceedings of 4th Eurasphalt&Eurobitume Congress Copenhagen. Paper No.402-089.
- [11] Zoorob, S.E., Castro-Gomes, J.P. & Pereira Oliveira, L.A. (2012) Assessing low shear viscosity as the new bitumen Softening Point test. Construction and Building Materials. 27, 357-367.
- [12] De Visscher, J., Soenen, H., Vanelstraete, A. & Redelius, P. (2004). A comparison of the zero shear viscosity from oscillation tests and the repeated creep test. Proceedings of 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004. 2, 1501-1513.
- [13] Anderson, D., Le Hir, Y., Planche, J.P. & Martin, D. (2001) Zero Shear Viscosity of Asphalt Binders. The Transportation Research Board, Paper number: 02-4113.
- [14] Biro, S., Gandhi, T. & Amirhanian, S. (2009) Determination of zero shear viscosity of warm asphalt binders. Construction and Building Materials. 3 (5), 2080-2086.
- [15] Saboo N. & Kumar, P. (2015). A study on creep and recovery behavior of asphalt binders. Construction and Building Materials. 96, 632-640.
- [16] Dongre, R. & D'Angelo, J. (2002). Evaluation of Different Parameters for Superpave High Temperature Binder Specification Based on Rutting Performance in the Accelerated Loading Facility at FHWA, 82nd Annual Meeting of TRB, Washington.
- [17] CEN/TS 15325:2008 Bitumen and bituminous binders – Determination of Zero-Shear Viscosity (ZSV) using a Shear Stress Rheometer in creep mode
- [18] De Souza Gomes, A. (2012) Polymerization. Chapter 17: Theory and Application to Biomaterials.
- [19] Binard, C., Anderson, D., Lapalu L. & Planche J.P. (2004). Zero shear viscosity of modified and unmodified binders. Proceedings of 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004. 2, 1721-1733.