

## КРУТОСТ АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА СА ДОДАТКОМ СТРУГАНОГ АСФАЛТА

**Марко Орешковић**, дипл.инж.грађ.-мастер

E-mail: oreskovic1988@gmail.com

Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Србија

**Доц. др Горан Младеновић**, дипл.инж.грађ.

E-mail: emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Србија

Оригинални научни рад

**Резиме:** Стругани асфалтни материјал (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) се у развијеним земљама у значајној мери користи при производњи асфалтних мешавина по врућем поступку. Једна од најзначајнијих карактеристика асфалтних мешавина је њихова крутост, која зависи од температуре и фреквенције оптерећења. Мастер криве дефинишу промену модула крутости са фреквенцијом оптерећења на одређеној температури и користе се за упоређење асфалтних мешавина и за димензионисање коловозних конструкција. У оквиру рада су испитане три мешавине: мешавина без струганог материјала, са 15% и са 30% струганог материјала. Испитивање је вршено при температурама од 0 °C до 30 °C и при трајању оптерећења од 200 и 300 ms коришћењем опита индиректног затезања. Добијени резултати указују да додатак струганог материјала од 30 % у значајној мери повећава крутост мешавине, док додатак од 15 % релативно мало утиче на повећање крутости што значи да примена до 15 % струганог материјала нема значајног ефекта на промене карактеристика мешавине.

**Кључне речи:** модул крутости, асфална мешавина, рециклирани асфалтни материјал, мастер криве

## STIFFNESS OF ASPHALT MIXTURES WITH ADDITION OF RECYCLED ASPHALT MATERIAL

**Marko Oreskovic, M.Sc. CE.**

E-mail: oreskovic1988@gmail.com

Faculty of Civil Engineering University of Belgrade, Serbia

**Goran Mladenovic, Ph.D. CE.**

E-mail: emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Faculty of Civil Engineering University of Belgrade, Serbia

Original scientific paper

**Abstract:** Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is largely used in developed countries in the hot-asphalt mixtures. One of the most important characteristics of asphalt mixtures is their stiffness which depends on temperature and loading frequency. Master curves define the change of stiffness with frequency for the specified temperature and they are used for comparison of asphalt mixtures and for pavement design.

The paper presents the testing of three asphalt mixtures: a mixture without RAP and with 15% and 30% of RAP. The indirect tensile test was performed at temperatures of 0 °C to 30 °C and the load duration was 200 and 300 ms to obtain stiffness moduli. The results indicate that the addition of 30% RAP significantly increases the stiffness of the mixture, while the addition of 15% RAP results in relatively small increase of stiffness, which means that the use of up to 15% RAP has no significant effect on the characteristics of the mixture.

**Key words:** stiffness modulus, asphalt mixture, reclaimed asphalt pavement, master curves

## УВОД

Рециклажа представља поступак прераде старог, већ употребљеног материјала, при чему се добија нов квалитет материјала за поновну употребу.

Стругани асфалтни материјал се у Србији доминантно користи за насипање банклина, израду подлога на путевима или за израду асфалтних мешавина по хладном поступку.

У развијеним земљама овај материјал се у значајној мери користи при производњи асфалтних мешавина по врућем поступку, где је његова употребна вредност највећа. Поред тога, примена струганог материјала омогућава уштеду природних ресурса, уштеду енергије и смањење загађења ваздуха.

Процент RAP-а који се може користити зависи од неколико фактора: метода рециклаже, врсте асфалтне базе, величине саобраћајног оптерећења, слоја коловозне конструкције у којем се користи рециклирани материјал и износи од 20 до 50% [1].

Приликом разматрања могућности примене рециклираног асфалтног материјала мора се водити рачуна да сам процес буде технички и технолошки изводљив. Постојећа техничка регулатива (SRPS EN 13108-8:2011) дефинише техничке услове за примену рециклираног струганог материјала [2].

Циљ рада је био да се истражи утицај струганог асфалтног материјала на крутост асфалтних мешавина справљених по врућем поступку. У раду су анализирани асфалтне мешавине са различитим процентима струганог материјала, од 0 до 30 %.

## ИСПИТИВАЊЕ МОДУЛА КРУТОСТИ АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА

### Конструкција мастер кривих

За линеарно вискоеластичне материјале (асфалтне мешавине се могу третирати као такви материјали), однос напона и деформације при континуалном синусоидалном оптерећењу се дефинише преко комплексног модула који представља однос амплитуде синусоидалног напона (у било ком тренутку времена и при одређеној фреквенцији оптерећења) и амплитуде синусоидалне деформације, у истом тренутку времена и при истој фреквенцији (слика 1).

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad (1)$$

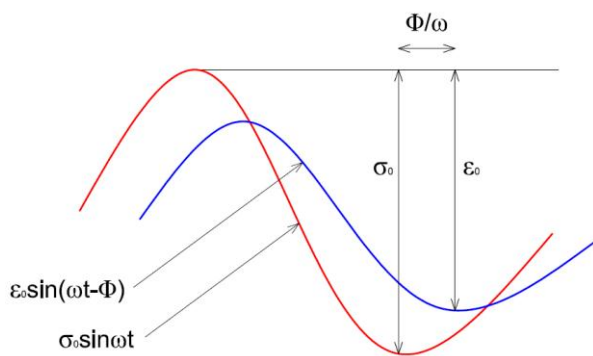
где су:

- $\sigma_0$  - максимални напон,
- $\varepsilon_0$  - максимална деформација,
- $\phi$  - фазни угао [°],
- $\omega$  - угаона фреквенција [°/s],
- t - време [s].

Динамички модул се дефинише као апсолутна вредност комплексног модула према једначини:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Крутост мешавине зависи од температуре и фреквенције оптерећења и утиче на стање напона и деформација у слојевима коловозне конструкције. У новом упутству AASHTO за димензионисање коловозних конструкција мастер криве се користе као улазни параметар којим се дефинише промена крутости у функцији од фреквенције оптерећења на референтној температури [3].



Слика 1. Комплексни модул

За линеарно вискоеластичне материјале важи принцип суперпозиције фреквенција-температура, што омогућава да се мастер криве конструишу на бази испитивања на одређеном

сету предефинисаних температура при одређеним фреквенцијама.

Такав принцип омогућава да се добијени подаци сакупљени при различитим температурама или фреквенцијама хоризонтално транспирају до референтне температуре и тако омогуће формирање једне мастер криве како би могли да се упореде модули крутости и изван опсега температура или фреквенција на којима је вршено испитивање.

На слици 2 је приказан принцип конструкције мастер криве.

### Фактори померања (Shift factors)

Фактор померања  $\alpha(T)$  дефинише захтевано померање у односу на задату, референтну температуру. Посматрана фреквенција се множи фактором померања како би се добила редукована фреквенција  $f_r$ , за мастер криву:

$$f_r = f \cdot \alpha(T) \quad (3)$$

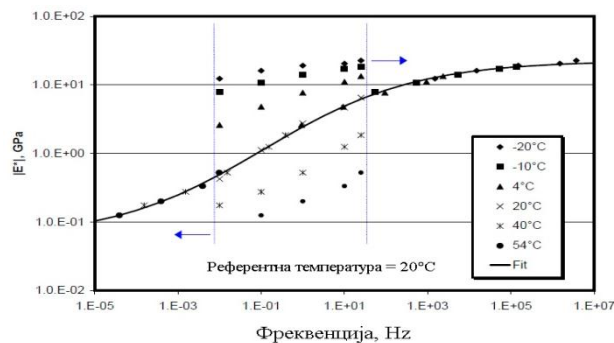
или

$$\log(f_r) = \log(f) + \log[\alpha(T)] \quad (4)$$

где је:

- $\alpha(T)$  – фактор положаја у функцији од температуре,
- f – фреквенција оптерећења на жељеној температури,
- $f_T$  – фреквенција оптерећења на референтној температури,
- T – температура.

Фактор померања се може одредити и у односу на време трајања оптерећења. За референтну температуру фактор померања једнак је јединици  $\alpha(T)=1$ .



Слика 2. Принцип конструкције мастер криве за референтну температуру од 20 °C

За добијање фактора померања код вискоеластичних материјала користи се неколико различитих модела:

- померање експерименталних резултата по *Germann-у* [4],

- *William-Landel-Ferry*-јева једначина (*WLF*) [5]

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (5)$$

- *Arrhenius*-ова једначина [6-8]

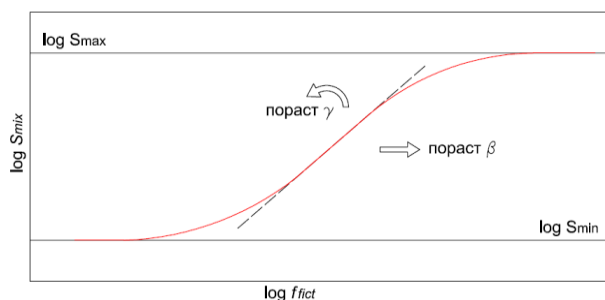
$$\log \alpha_T = \log e \cdot \frac{\Delta H}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (6)$$

где су:

$C_1, C_2$  - емпиријске константе,  
 $T_{ref}$  - референтна температура [ $^{\circ}\text{K}$ ],  
 $T$  - температура испитивања [ $^{\circ}\text{K}$ ],  
 $\Delta H$  - активациона енергија [ $\text{J/mol}$ ],  
 $R$  - идеална гасна константа [ $R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ].

### Конструкција мастер кривих употребом сигмоидалног модела

У циљу што бољег описивања понашања асфалтних мешавина при ниским и средњим температурама, у зависности од времена трајања оптерећења, уобичајено је да се користи општи сигмоидални модел. У овом раду коришћен је сигмоидални модел који су предложили *Medani* и ост. [9] када су модификовали раније уведен модел *Pellinen*-а и *Wiczak*-а [10] (слика 3). Такође, постоји и модел у облику полинома, али он није меродаван изван опсега температура и фреквенција на којима су вршена испитивања, што су доказали *Medani* и *Huurman* [11].



Слика 3. Сигмоидална функција [10]

Модул крутости  $S_{mix}$  (MPa) на температури  $T$  и фреквенцији оптерећења  $f$  се може одредити на основу једначине (7) коју су предложили *Medani* и ост. [9], или на основу једначине (8) коју је предложио *Jacobs* [7].

$$\log S_{mix} = \log S_{min} + (\log S_{max} - \log S_{min}) \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{10 + \log f_{fict}}{\beta} \right)^{\gamma}} \right) \quad (7)$$

$$\log S_{mix} = \log S_{min} + (\log S_{max} - \log S_{min}) \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{f_{fict}}{f_{rot}} \right)^{\gamma}} \right) \quad (8)$$

где су:

$S_{mix}$  - крутоост мешавине [MPa],  
 $S_{min}$  - најмања крутоост мешавине [MPa],  
 $S_{max}$  - највећа крутоост мешавине [MPa],  
 $\beta, \gamma$  - фактори закривљености,  
 $f_{rot}$  - фреквенција ротације [Hz],  
 $f_{fict}$  - редукована фреквенција [Hz].

### Одређивање модула крутости

Према стандарду *EN 12697-26:2012*, који дефинише испитивање модула крутости асфалтних мешавина, постоји више опита за одређивање модула крутости:

- индиректно затезање цилиндричног узорка,
- савијање призматичног узорка (гредице) оптерећеног у три или четири тачке,
- савијање трапезоидног или призматичног узорка оптерећеног у две тачке,
- директно затезање-притисак цилиндричног узорка,
- директно затезање цилиндричног или призматичног узорка [12].

Стандард *AASHTO TP62* дефинише могућност одређивања динамичког модула у једно-аксијалном или триаксијалном опиту у *SPT* (Simple Performance Tester) [13].

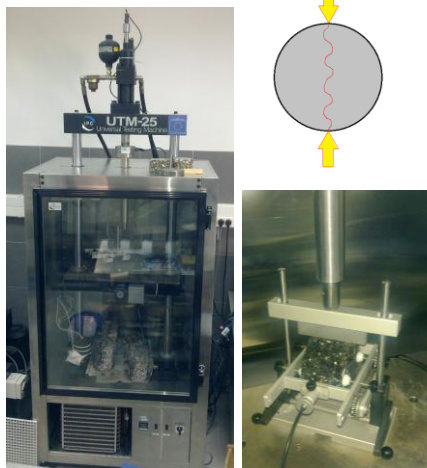
У раду је описан опит индиректног затезања цилиндричног узорка (*EN 12697-26:2012*, додаток C) који је коришћен за мерење модула крутости и израду мастер кривих у овом раду.

### Индиректно затезања цилиндричног узорка (*EN 12697-26:2012*, додаток C)

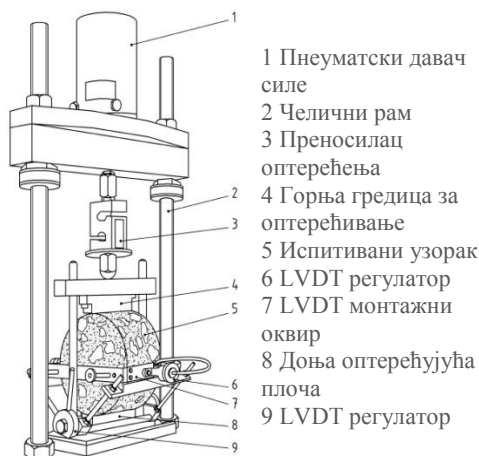
Одређивање модула крутости је вршено на уређају за универзално испитивање – *UTM-25* (слика 4).

Узорак се поставља у апаратуру за испитивање тако да се оптерећење преноси вертикално дуж пречника (слика 4). Детаљи опреме за испитивање су приказани на слици 5.

Сигнал оптерећења којем се излаже узорак треба да буде таласног облика („haversine“) (слика 6). Време доношења оптерећења треба да се контролише током испитивања.

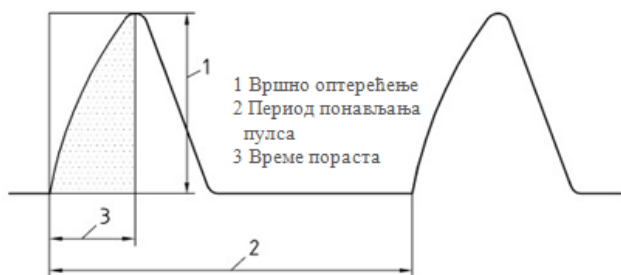


Слика 4. Опрема за испитивање асфалтних мешавина опитом на индиректно затезање



Слика 5. Делови опреме за испитивање

Време пораста оптерећења (ознака 3 на слици 6) је време за које примењена сила порасте од нуле до максималне вредности и оно треба да износи  $(124 \pm 4)$  ms. Период понављања пулса оптерећења (ознака 2 на слици 6) треба да износи  $(3,0 \pm 0,1)$  s.



Слика 6. Облик пулса оптерећења, који показује време пораста и вршно оптерећење

Фактор оптерећене површине је однос осенчене површине и производа времена раста оптерећења и вршног оптерећења. Када се овај фактор разликује од 0,60, измерени модул крутости треба да се коригује у складу са једначином:

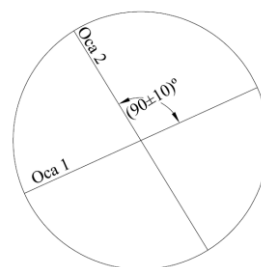
$$S'_m = S_m \times (1 - 0.322 \times (\log(S_m) - 1.82) \times (0.60 - k)) \quad (9)$$

где је:

$S'_m$  - редуковани модул крутости [MPa],  
 $k$  - измерени фактор површине оптерећења,  
 $S_m$  - измерени модул крутости [MPa] са фактором оптерећења  $k$ .

Узорци који се испитују могу бити узети из коловоза, из плоча набијених у лабораторији или припремљени у одговарајућим лабораторијским калупима.

Дебљина узорка треба да буде између 30 и 75 mm, а номинални пречник 80, 100, 120, 150 или 200 mm. Обе величине треба да се одреде у зависности од номиналне величине максималног зрна агрегата у асфалтној мешавини.



Слика 7. Начин обележавања узорка

На равном делу сваког узорка одговарајућим маркером треба да се нацртају пречници под углом од  $(90 \pm 10)^\circ$ . Оба пречника морају бити адекватно обележена (слика 7).

Температура узорка се мери помоћу два сензора који се налазе на површини и унутар узорка. Мора се пратити температура на површини узорка све док се не постигне захтевана температура и док разлика између те температуре и температуре унутар узорка не буде мања од  $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средња вредност ових температура се узима као стварна температура испитивањам која мора бити у границама од  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  у односу на циљну температуру.

Препоручене температуре испитивања су  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , али испитивања се могу вршити и на осталим температурама. На високим температурама може доћи до оштећења узорка услед великих деформација.

Након што се узорак доведе до одређене температуре, треба да се припреми за испитивање на једној од две обележене осе.

Потребно је најмање 10 пулсева оптерећења заредом како би било омогућено да се подеси величина и трајање оптерећења да би се добиле одговарајуће хоризонталне деформације.

За сваки од следећих 5 пулсева оптерећења мере се и бележе хоризонталне деформације и употребљена сила, док се фактор површине оптерећења аутоматски срачунава.

Гредица која је наслоњена на узорак, а преко које се преноси сила (ознака број 4 на слици 5), поставља се тако да обезбеди фактор површине оптерећења између 0,50 и 0,70. Ако ова вредност не може да се постигне, узорак треба одбацити и занемарити добијени резултат. Ако је хоризонтална деформација мања од 3  $\mu\text{m}$  или већа од 20  $\mu\text{m}$ , следи да температура испитивања или метода испитивања нису одговарајући.

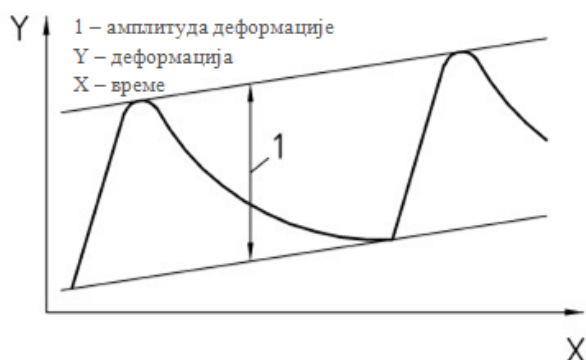
Измерени модул крутости израчунава се за сваки од 5 пулсева оптерећења применом следеће једначине:

$$S_m = \frac{F \times (v + 0.27)}{(z + h)} \quad (10)$$

где је:

- $S_m$  - измерени модул крутости [MPa],
- $F$  - вршна вредност употребљеног вертикалног оптерећења [N],
- $z$  - амплитуда хоризонталне деформације (слика 8) добијене током циклуса оптерећења [mm],
- $h$  - средња вредност дебљине узорка [mm],
- $v$  - Поасонов коефицијент. Ако Поасонов коефицијент није израчунат, користи се вредност 0.35 за све температуре.

Након завршеног испитивања, узорак треба уклонити из опреме, заротирати га за  $(90 \pm 10)^\circ$  око хоризонталне осе и поновити поступак испитивања.



Слика 8. Амплитуда деформација

Ако је средња вредност модула крутости другог мерења у границама од -20% до +10% у односу на модул крутости добијен првим мерењем, треба узети средњу вредност као модул крутости узорка.

Ако је разлика између две вредности већа него што је претходно наведено, резултате треба одбацити.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА СТРУГАНОГ АСФАЛТНОГ МАТЕРИЈАЛА НА КРУТОСТ АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА

У експерименталном делу истраживања у оквиру овог рада испитиване су 3 асфалтне мешавине за горњи носећи слој коловозне конструкције:

1. БНС 22сА – са агрегатом Подбукови и битуменом БИТ 50/70, без додатка струганог асфалтног материјала,
2. БНС 22сА – са агрегатом Подбукови и битуменом БИТ 50/70, са додатком од 15% струганог асфалтног материјала,
3. БНС 22сА – са агрегатом Подбукови и битуменом БИТ 50/70, са додатком од 30% струганог асфалтног материјала.

Рециклирани, стругани материјал који је коришћен за справљање мешавина је добијен стругањем асфалтних слојева приликом рехабилитације аутопута кроз Београд.

Температура на којој су се припремале мешавине је била различита – расла је са порастом процента додатог струганог материјала, како би се што боље измешао стругани материјал са остатком мешавине и ангажовао битумен који се налази у оквиру њега. Тако је мешавина без додатка струганог асфалта справљана на 150  $^\circ\text{C}$ , са додатком од 15% на 155  $^\circ\text{C}$ , а са додатком од 30% на 160  $^\circ\text{C}$ .

Из сваке серије узорака испитано је по 6 узорака, који су претходно справљени у Маршаловој преси (2x50 удараца) како би се добила средња вредност модула крутости асфалтне мешавине.

Све три серије узорака су након справљања чуване у лабораторији на собној температури. Пре почетка испитивања на свакој од температура, узорци су били кондиционирани у комори најмање 4 сата након достизања циљне температуре.

Како би се конструисале мастер криве које што боље описују понашање материјала на различитим температурама и фреквенцијама оптерећења, потребно је вршити испитивања у што већем распону температура и фреквенција.

Мањи број фреквенција на којима се испитују узорци могуће је „покрити“ испитивањем на већем броју температура и обратно, како би се добиле мастер криве које што тачније описују понашање материјала.

Испитивања су вршена на седам различитих температура (0, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 °C) и две фреквенције (200 ms и 300 ms), а добијени модули крутости су приказани у табели 1.

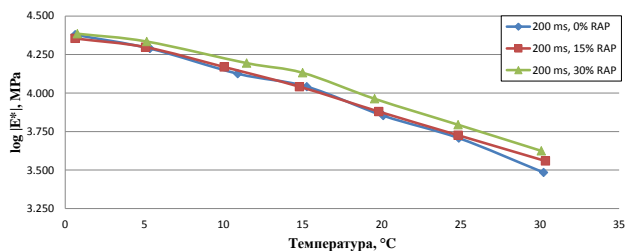
**Табела 1.** Табеларни приказ добијених резултата испитивања:

		Фреквенција [ms]			
		200		300	
Циљна темп. [°C]	RAP-a	E*  [MPa]	log E*  [MPa]	E*  [MPa]	log E*  [MPa]
		0	23879.3	4.378	22435.1
5	19443.0	4.289	17929.6	4.254	
10	13348.3	4.125	12138.6	4.084	
15	10992.3	4.041	9656.3	3.985	
20	7126.8	3.853	6604.3	3.820	
25	5097.3	3.707	4403.6	3.644	
30	3050.0	3.484	2823.8	3.451	
0	22610.3	4.354	21392.3	4.330	
5	19847.6	4.298	18575.6	4.269	
10	14756.5	4.169	13323.1	4.125	
15	10995.6	4.041	9767.0	3.990	
20	7576.1	3.879	6859.6	3.836	
25	5323.3	3.726	4662.8	3.669	
30	3620.8	3.559	3302.6	3.519	
0	24267.6	4.385	22906.5	4.360	
5	21599.5	4.334	20105.3	4.303	
10	15640.1	4.194	14302.8	4.155	
15	13534.1	4.131	12177.5	4.086	
20	9177.6	3.963	8194.5	3.914	
25	6222.5	3.794	5488.5	3.739	
30	4214.2	3.625	3779.8	3.577	

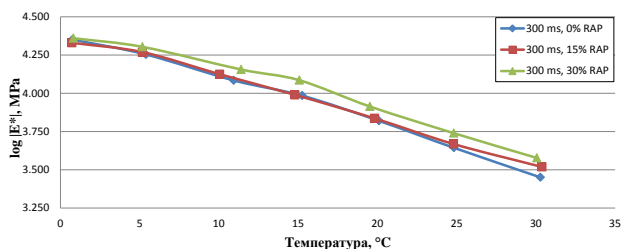
На сликама 9 и 10 су дате изохроне за све три мешавине које дефинишу промену модула крутости у зависности од температуре при трајању сигнала оптерећења од 200 ms и 300 ms.

Приликом обраде података примењени су следећи елементи:

- за прорачун фактора померања је коришћена Arrhenius-ова једначина (једначина 6),
- за сигмоидални модел је одабран Medani - Molenaar-ов модел из 2004. године (једначина 7),
- изабрана је референтна температура од 20 °C
- одређивање активационе енергије ΔH и параметара сигмоидалног модела β и γ је извршено коришћењем методе најмањих квадрата употребом Solver функције у MS Excel®-у. Исти поступак може да се спроведе и употребом софтверског пакета Matlab. Да је коришћена WLF једначина (једначина 5), поступак би био идентичан.



**Слика 9:** Изохроне за све три мешавине при трајању сигнала оптерећења од 200 ms



**Слика 10:** Изохроне за све три мешавине при трајању сигнала оптерећења од 300 ms

У табели 2 дат је приказ параметара потребних за израду сигмоидалних модела.

На дијаграмима 11, 12 и 13 су приказани модули крутости који су добијени испитивањем у лабораторији, као и одговарајуће мастер криве за асфалтне мешавине са 0, 15 и 30 % струганог материјала, респективно.

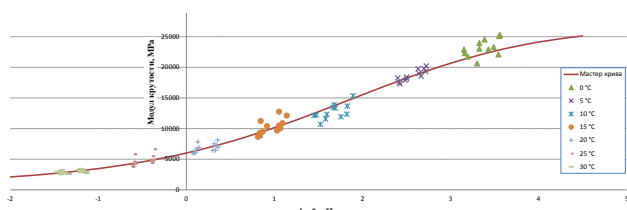
Крајњи десни делови се асимптотски приближавају одређеној вредности која представља теоретску максималну вредност за модул крутости при довољно високим фреквенцијама и ниским температурама.

**Табела 2.** Приказ параметара потребних за израду сигмоидалног модела

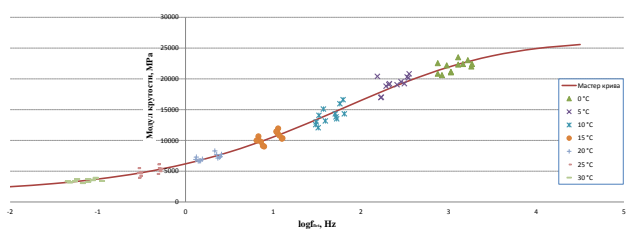
Мешав.	ΔH [J/mol]	β	γ	log S <sub>min</sub>	log S <sub>max</sub>
0% RAP	250.69	10.3294	4.2574	2.8850	4.4226
15% RAP	226.54	10.6619	5.2357	3.1398	4.4164
30% RAP	233.28	10.0256	4.3901	2.2940	4.4293

На слици 14 су приказане мастер криве за све три мешавине са које се може уочити да мешавина са највећим процентом рециклираног асфалтног материјала има највећу крутост, а мешавина без додатка рециклираног материјала има најмању крутост, што је најизраженије у делу мастер кривих у опсегу температура и фреквенција на којима је вршено испитивање.

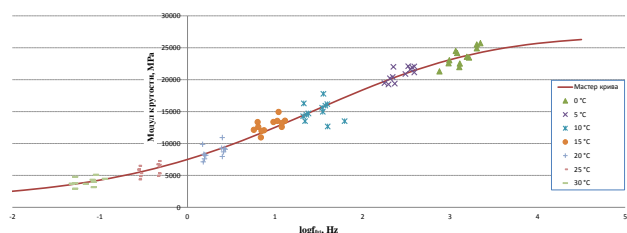
Изван тог опсега, поготово на нижим фреквенцијама и вишим температурама, та разлика је минимална.



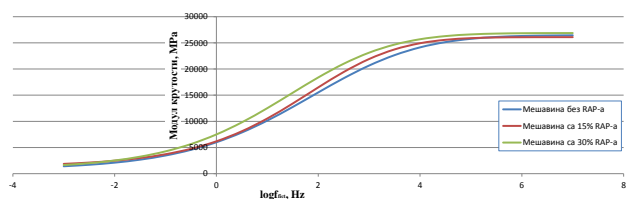
Слика 11. Мастер крива за мешавину без додатка струганог асфалтног материјала



Слика 12. Мастер крива за мешавину са додатком од 15% струганог асфалтног материјала



Слика 13. Мастер крива за мешавину са додатком од 30% струганог асфалтног материјала



Слика 14. Упоредни приказ мастер кривих за све три мешавине

## ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан поступак развоја мастер кривих за модул крутоће асфалтних мешавина са различитим садржајем струганог асфалтног материјала. За испитивање модула крутоће коришћен је опит индиректног затезања. Мастер

криве су конструисане за референтну температуру од 20 °C.

Мешавина са 30% струганог материјала на целом опсегу фреквенција и температура показује већу крутоћ у односу на друге две мешавине, што је последица већег учешћа остарелог везива у мешавини.

Мешавина са 15% струганог материјала показује одређено повећање крутоће у распону фреквенција од 100 до 10000 Hz, док је на осталим фреквенцијама разлика у односу на мешавину без додатка струганог материјала релативно мала.

Делови мастер кривих који одговарају врло ниским или врло високим фреквенцијама се асимптотски приближавају теоретским вредностима модула крутоће и у тим деловима криве имају скоро линеарни облик.

На основу извршених испитивања може се закључити да се асфалтној мешавини може додати до 15% струганог асфалтног материјала, а да се тиме не промени знатно крутоћ мешавине, док се за мешавине са већим процентом морају извршити додатна испитивања применом неких од опита наведених у стандарду *AASHTO TP-62* или *SRPS EN 12697-26*, на већем опсегу температура и фреквенција, како би се што тачније описало њихово понашање.

## ЗАХВАЛНОСТ

У раду је приказан део истраживања које је помогло Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије у оквиру технолошког пројекта TP 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] Copeland, A. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Publication No. FHWA-HRT-11-021, Washington D.C.: FHWA
- [2] EN 13108-8 (2005). Bituminous mixtures – Material specifications – Part 8: Reclaimed asphalt
- [3] Baus, R.L., Stires, N.R. (2010). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Implementation, Report No. GT06-10, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Carolina
- [4] Germann, F.P., Lytton, R.L. (1979). Methodology for Predicting the Reflection Cracking Life of Asphalt Concrete Overlays, Report No. TTI-2-8-75-207-5, Texas Transportation Institute of the Texas A&M University, College Station
- [5] Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D. (1955). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and other Glass Forming Liquid, Journal of ACS, Volume 77, pp 3701-3707.
- [6] Francken, L., Clauwaert, C, (1987). Characterization and Structural Assessment of Bound Materials for Flexible Road Structures, Proceedings 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1987; University of Michigan, pp 130-144, Ann Arbor, MI, USA
- [7] Jacobs, Maarten M.J. (1995). Crack growth in asphaltic mixes, Thesis, Delft University of Technology,
- [8] Lytton, R.L., Uzan, J., Fernando, E.M., Roque, R., Hiltunen, D. and Stoffels, S.M. (1993). Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, SHRP Report A-357, SHRP/NRC, Washington DC, USA.
- [9] Medani, T.O. Huurman, M. Molenaar, A.A.A. (2004). On the Computation of Master Curves for Bituminous Mixes, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> EuroBitume Congress, Vienna
- [10] Pellinen, T.K., and Witczak, M.W. (2002). Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 71. Colorado Spring, CO.
- [11] Medani T.O., Huurman M. (2003). Constructing the Stiffness Master Curves for Asphaltic Mixes, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Road and Railroad Research
- [12] EN 12697-26 (2012), Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness
- [13] AASHTO TP 62-07 (2007). Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures, American Association of State Highway Officials
- [14] Mladenović, G. (2009). Development of the software for pavement life cycle cost analysis: Life Cycle Cost Analysis Graph Tool (LCCAGT). Put i saobraćaj, 56(1), 10-17.
- [15] Čurović, T., Mladenović, G., & Milićević, R. (2009). The methodology of analysis regarding the results of interlaboratory testing. Put i saobraćaj, 56(2), 5-10.
- [16] Miljković, M., & Mladenović, G. (2009). Warm-mix asphalt technologies in Europe and USA. Put i saobraćaj, 56(3), 11-22.
- [17] Mladenović, G., Knežević, I., Đukić, D., & Đureković, A. (2008). Application of the bitumen classification according to Superpave methodology in Serbia. Put i saobraćaj, 55(2), 12-22.
- [18] Mladenović, G., & Stanković, S. (2008). COST 354: European harmonization of Performance Indicators for Road Pavements. Put i saobraćaj, 55(4), 24-33.