

Ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovom sastavu

Zdravko Ramljak, Andrea Strineka, Krešo Šafran

Ključne riječi

asfaltna mješavina,
sastav asfalta,
svojstvo asfalta,
asfaltni uzorak,
koncentracija punila,
koncentracija bitumena

Key words

asphalt mix,
asphalt composition,
asphalt property,
asphalt sample,
filler concentration,
bitumen concentration

Mots clés

mélange d'asphalte,
composition d'asphalte,
caractéristique d'asphalte,
échantillon d'asphalte,
concentration de filler,
concentration de bitume

Ключевые слова

асфальтная смесь,
состав асфальта,
свойство асфальта,
асфальтный образец,
концентрация
заполнителя,
концентрация битума

Schlüsselworte

Asphaltmischung,
Asphaltzusammensetzung,
Asphalteeigenschaft,
Asphaltprüfkörper,
Füllerkonzentration,
Bitumenkonzentration

Z. Ramljak, A. Strineka, K. Šafran

Izvorni znanstveni rad

Ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovom sastavu

Opisana je obrada rezultata mjerenja vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka različitog sastava kojom je nađena ovisnost čvrstoće o sastavu asfaltnog uzorka. Vlačna čvrstoća mjerena je indirektnom metodom, a sastav asfaltnog uzorka definiran je prema prostornom modelu u kojem su komponente izražene volumnim koncentracijama. Traženjem trenda međusobne ovisnosti i statističkom obradom rezultata mjerenja nađena je funkcionalna ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovu sastavu.

Z. Ramljak, A. Strineka, K. Šafran

Original scientific paper

Dependence of the asphalt sample composition on its tensile strength

The analysis of results obtained by measuring tensile strength of asphalt samples of different composition, is described. It was established that the tensile strength is dependent on the asphalt sample composition. The tensile strength was measured by indirect method, and the asphalt sample composition was defined based on the space model in which components were presented by volume concentrations. After analysis of interaction patterns and following statistical processing of measurement results, it was established that the asphalt sample tensile strength is functionally dependent on its composition.

Z. Ramljak, A. Strineka, K. Šafran

Ouvrage scientifique original

Corrélation entre la composition de l'échantillon d'asphalte et sa résistance à la traction

L'analyse des résultats obtenus lors de mesure de la résistance à la traction des échantillons d'asphalte des compositions différentes, est décrite. Il a été constaté que la résistance à la traction est dépendante de la composition de l'échantillon d'asphalte. La résistance à la traction a été mesurée par la méthode indirecte, et la composition de l'échantillon d'asphalte a été définie en utilisant le modèle spatial dont les composantes ont été exprimées par concentrations de volume. Suite à l'analyse des principes d'interaction, et après le traitement statistique de résultats de mesure, il a été conclu que la résistance de l'échantillon d'asphalte à la traction est fonctionnellement dépendante de sa composition.

З. Рамљак, А. Стринека, К. Шафран

Оригинална научна работа

Зависимость прочности на растяжение асфальтного образца от его состава

В работе описана обработка результатов измерения прочности на растяжение асфальтных образцов различного состава, при помощи которой обнаружена зависимость прочности от состава асфальтного образца. Прочность на растяжение измерялась косвенным методом, а состав асфальтного образца определен по пространственной модели, в котором компоненты выражены объемными концентрациями. Поиском тенденции взаимосвязи и статистической обработкой результатов измерения установлена функциональная зависимость прочности на растяжение асфальтного образца от его состава.

Z. Ramljak, A. Strineka, K. Šafran

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Abhängigkeit der Zugfestigkeit des Asphaltprüfkörpers von dessen Zusammensetzung

Beschrieben ist die Bearbeitung der Messungsergebnisse der Zugfestigkeit von Asphaltprüfkörpern verschiedener Zusammensetzung, wodurch die Abhängigkeit der Festigkeit von der Zusammensetzung des Asphaltprüfkörpers festgestellt wurde. Die Zugfestigkeit wurde mit der indirekten Methode gemessen, und die Zusammensetzung des Prüfkörpers bestimmte man nach dem räumlichen Modell in dem die Komponenten durch Volumenkonzentrationen ausgedrückt waren. Durch Suche des Trends gegenseitiger Abhängigkeit und statistische Bearbeitung der Messungsergebnisse fand man die funktionale Abhängigkeit der Zugfestigkeit des Asphaltprüfkörpers von dessen Zusammensetzung.

Autori: Dr. sc. **Zdravko Ramljak**, dipl. ing. tehnol., Ramtech d.o.o., Zagreb; **Andrea Strineka**, dipl. ing. tehnol., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; **Krešo Šafran**, prom. tehn., Ramtech d.o.o. Zagreb

1 Uvod

U studiji ovisnosti fizikalnih svojstava asfaltnog uzorka o njegovu sastavu potrebno je prije svega definirati model sastava asfaltnog uzorka. Potom je potrebno načiniti skup uzoraka različitog sastava i njima odrediti neko fizikalno svojstvo. Obradom rezultata mjerenja potrebno je naći funkciju koja povezuje sastav i svojstvo asfaltnog uzorka. Prema tom obrascu provedeno je istraživanje ovisnosti vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovu sastavu.

2 Model i opis sastava asfaltnog uzorka

Za opis sastava asfaltnog uzorka razvijeni su različiti modeli od kojih je najpoznatiji volumenski trokomponentni model razrađen u Američkom asfaltnom institutu [1]. Taj je model, nažalost, ostao samo kao slikovni prikaz sastava bez značajnijih pokušaja primjene tog modela za interpretaciju svojstava asfaltnog uzorka. Pojava prostornog modela [2, 7, 8, 11 do 21] sastava asfaltnog uzorka bitno je doprinijela razvoju prikaza sastava asfaltnog uzorka i njegovoj primjeni u stvaranju funkcionalnih veza svojstava i sastava asfaltnog uzorka. Taj model ima sedam komponenata (kameni skelet, punilo, adsorbirani bitumen, slobodni bitumen, vezani bitumen te otvorene i zatvorene šupljine) i daje mogućnost interpretacije mnogih ponašanja asfaltnog sistema [3, 4, 5, 6, 9, 15].

U ovom istraživanju primijenjen je model sastava asfaltnog uzorka koji se sastoji od tri komponente različitoga agregatnog stanja:

1. Kameni materijal (kruto agregatno stanje) su sve čestice kamenog materijala, a dijeli se na kameni skelet ($d > 0,09$ mm) i punilo ($d < 0,09$ mm)
2. Bitumen (na normalnoj temperaturi tekuće agregatno stanje), prema ovom modelu, jest vezivo čestica kamenog materijala u asfaltnom uzorku i to bez obzira gdje se nalazi (u porama čestica ili u međučestičnom prostoru)
3. Zrak u šupljinama asfaltnog uzorka (plinovito agregatno stanje)

Navedene komponente u predmetnom modelu sastava asfaltnog uzorka prikazane su kao njihove volumne koncentracije (slika 1.):

- $C_{KM/AU}$ je volumna koncentracija kamenog materijala u asfaltnom uzorku, a predstavlja zbroj koncentracija kamenog skeleta ($C_{KS/AU}$) i punila ($C_{P/AU}$):

$$C_{KS/AU} = \frac{(100 - \%mas_{P/KM}) * (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_{KS}} * \rho_{AU} \quad (1)$$

$$C_{P/AU} = \frac{\%mas_{P/KM} * (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_P} * \rho_{AU} \quad (2)$$

$$C_{KM/AU} = C_{KS/AU} + C_{P/AU} \quad (3)$$

- $C_{B/AU}$ je volumna koncentracija bitumena u asfaltnom uzorku:

$$C_{B/AU} = \frac{\%mas_{B/AM}}{\rho_{KS}} * \rho_{AU} \quad (4)$$

- $C_{\$/AU}$ je volumna koncentracija šupljina (zraka) u asfaltnom uzorku, a za njezin izračun potrebni su podaci o gustoći asfaltnog uzorka (ρ_{AU}) te gustoća asfaltne mješavine (ρ_{AM}) koja se izračunava:

$$C_{\$/AU} = (1 - \frac{\rho_{AU}}{\rho_{AM}}) * 100 \quad (5)$$

- Gustoća asfaltne mješavine mjeri se [22] ili izračunava iz podataka o udjelima komponenata u asfaltnoj mješavini i njihovih gustoća:

$$\rho_{AM} = 1 \quad (\text{vidjeti fusnotu}) \quad (6)$$

Osim navedenih karakteristika prepoznatljivi su još i sljedeći elementi prostora asfaltnog uzorka koji definiraju sastav asfaltnog uzorka:

- $C_{\$/KM/AU}$ je koncentracija šupljina, odnosno koncentracija slobodnog prostora između čestica kamenog materijala koje su raspoređene u prostoru asfaltnog uzorka:

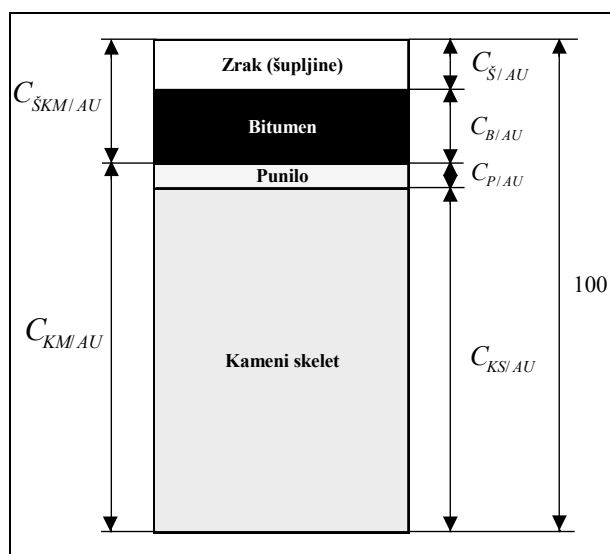
$$C_{\$/KM/AU} = 100 - C_{KM/AU} = C_{\$/AU} + C_{B/AU} \quad (7)$$

- ISP_{KMsBIT} je ispunjena šupljina kamenog materijala (KM) s bitumenom (BIT), a predstavlja odnos volumena bitumena i šupljina kamenog materijala u asfaltnom uzorku:

$$ISP_{KMsBIT} = \frac{C_{B/AU}}{C_{B/AU} + C_{\$/AU}} * 100 \quad (8)$$

- Prethodno navedena ispunjena (ISP_{KMsBIT}) prelazi u ispunu šupljina kamenog skeleta s bitumenom (ISP_{KSsBIT}) u slučaju kad kameni materijal nema punila ($\%mas_{P/KM} = 0$).

$$1 = \frac{100}{\frac{(100 - \%mas_{P/KM}) * (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_{KS}} + \frac{\%mas_{P/KM} * (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_P} + \frac{\%mas_{B/AM}}{\rho_B}}$$



Slika 1. Model asfaltnog uzorka

Za jednoznačno definiranje sastava asfaltnog uzorka potrebno je imati najmanje dva od prethodno navedenih elemenata, a nakon toga ostali elementi sastava jednostavno se izračunaju primjenom za to razrađenih relacija [21].

3 Ovisnost svojstava asfaltnog uzorka o njegovu sastavu

Jedno od najpoznatijih svojstava asfaltnog uzorka je njegova stabilnost mjerena prema Marshallovu postupku [26]. Ta je karakteristika bila predmetom mnogih istraživanja, no malo se istraživanja sustavno bavilo traženjem funkcionalne ovisnosti tog svojstva o sastavu asfaltnog uzorka [5, 9, 10 i 17]. Slično se može ustvrditi za traženje funkcionalne ovisnosti vlačne čvrstoće o sastavu asfaltnog uzorka, iako je bilo dosta autora koji su se bavili teorijom mjerenja [27] ili mjerenjem vlačne čvrstoće pojedinačnih asfaltnih uzoraka [27 do 33]. No, rezultati u ovom radu opisanog istraživanja definitivno pokazuju da je moguće naći funkcionalnu ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovu sastavu.

3.1 Program istraživanja

Programom istraživanja predviđen je skup uzoraka različitog sastava koji se sastoji od dvije serije koje se međusobno razlikuju po granulometriji kamenog skeleta u asfaltnoj mješavini.

Za svaku od serija predviđene su po tri skupine mješavina različite koncentracije bitumena ($C_{B/AM}$), tako da to čini ukupno šest skupina asfaltnih mješavina.

U svakoj se skupini pojedine mješavine razlikuju po udjelu punila u kamenom materijalu, s napomenom da se taj udio kretao u nekom rasponu. Prva mješavina u svakoj skupini ima samo kameni skelet, dakle kameni ma-

terijal bez punila ($\% mas_{P/KM} = 0$). U svakoj od skupina predviđeno je od 6 do 8 mješavina, što konačno čini skup od ukupno 42 asfaltna mješavine različitog sastava. Za svaku od mješavina predviđena je izrada laboratorijskih probnih tijela (uzoraka) prema postupku opisanom u za to predviđenoj europskoj normi [26]. Tako priređenim uzorcima programom je predviđeno odrediti sastav i vlačnu čvrstoću prema standardiziranom postupku [24]. Analizom rezultata dobivenih prethodno opisanim programom istraživanja bilo je potrebno pronaći funkcionalnu ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovom sastavu.

3.2 Eksperimentalni dio

3.2.1 Sastavni materijali asfaltna mješavine

Za izradu asfaltnih mješavina odabrane su dvije vrste kamenog materijala, i to kameno brašno iz kamenoloma Ivanec (sediment karbonatnog sastava), te frakcije kamenog materijala iz kamenoloma Fužinski Bekovac (eruptiv silikatnog sastava). Granulometrija frakcija i gustoće pripadnih potfrakcija navedenih materijala su u tablicama 1. i 2. Za svaki od odabranih materijala priređene su veće količine potfrakcija definiranog raspona veličine zrna koje su služile za izradu asfaltnih mješavina.

Tablica 1. Prikaz granulometrije frakcija kamenog materijala

Granulometrijski sastav frakcija kamenog materijala				
Kamenolom	Ivanec	Fužinski Benkovac	Fužinski Benkovac	Fužinski Benkovac
Oznaka frakcije	KB	0/4	4/8	8/11
0,09	90,0	8,0	1,5	0,5
0,25	95,0	15,0	1,8	0,5
0,71	100,0	33,0	2,2	0,6
2		65,0	5,1	0,6
4		100,0	10,0	0,6
8			95,0	3,9
11,2			100,0	95,0
16				100,0
22,4				
31,5				

Tablica 2. Prikaz gustoća potfrakcija kamenog materijala

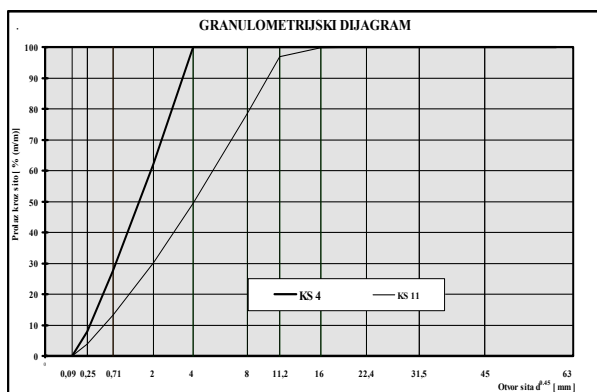
Gustoće potfrakcija kamenog materijala		
Otvor sita [mm]	Ivanec	Fužinski Benkovac
	[g/cm ³]	[g/cm ³]
0,09	2,851	2,728
0,25	2,848	2,695
0,71	2,849	2,692
2,00	2,851	2,714
4,00		2,716
8,00		2,705
11,20		2,719
16,00		2,713

Kao vezivo odabran je standardni bitumen tipa BIT 60 proizveden u rafineriji nafte INA u Rijeci. Navedenom bitumenu određena su standardna svojstva ($\rho_B = 1,016 \text{ g/cm}^3$, $PK = 49,9^\circ\text{C}$ i $PEN = 51,7 \text{ 1/10 mm}$) [35, 36 i 37].

3.2.2 Projektiranje sastava skupa asfaltnih mješavina

Na osnovi prethodno opisanih sastavnih materijala projektirane su asfaltne mješavine različitog sastava uz respektiranje već navedenih principa:

- Projektirana su dva kamena skeleta ($d > 0,09 \text{ mm}$) različite granulometrije (slika 2.) koji čine osnovu dviju serija asfaltnih mješavina različitog sastava:
 - seriju asfaltnih mješavina s kamenim skeletom najvećeg zrna od 4 mm (KS 4)
 - seriju asfaltnih mješavina s kamenim skeletom najvećeg zrna od 11 mm (KS 11).



Slika 2. Grafički prikaz granulometrijskog sastava kamenog skeleta u dvije serije asfaltnih uzoraka

- Na osnovi kamenog skeleta oznake KS 4 projektirane su tri skupine asfaltnih mješavina koje se međusobno razlikuju po volumnoj koncentraciji bitumena u asfaltnoj mješavini:
 - skupina 1: projektirana koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini jest 11,71 [% (v/v)]
 - skupina 2: projektirana koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini jest 13,53 [% (v/v)]
 - skupina 3: projektirana koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini jest 16,36 [% (v/v)].

Isto tako, na temelju kamenog skeleta oznake KS 11 projektirane su tri skupine asfaltnih mješavina koje imaju volumnu koncentraciju bitumena kao i prethodne tri skupine mješavina:

- skupina 4: projektirana je koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini 11,71 [% (v/v)]
 - skupina 5: projektirana je koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini 13,53 [% (v/v)]
 - skupina 6: projektirana je koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini 16,36 [% (v/v)].
- Daljnijim postupkom projektiranja u pojedine mješavine u skupinama dodavano je punilo. Tako projektirani sastavi asfaltnih mješavina izraženi kao udio punila u kamenom materijalu ($\%masP/KM$) i udio bitumena u asfaltnoj mješavini ($\%masB/AM$) prikazani su u tablicama 3. i 4.

U postupku projektiranja sastava prethodno prikazanog skupa asfaltnih mješavina uporabljen je računalni program za projektiranje asfaltnog uzorka unaprijed definirana

Tablica 3. Prikaz sastava asfaltnih mješavina serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 4 mm

	SKUPINA 1			SKUPINA 2			SKUPINA 3		
	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$
AM1	11,71	4,74	0,0	13,53	5,54	0,0	16,36	6,84	0,0
AM2	11,71	4,74	3,2	13,53	5,54	3,2	16,36	6,83	3,2
AM3	11,71	4,73	6,3	13,53	5,54	6,3	16,36	6,83	6,3
AM4	11,71	4,73	9,5	13,53	5,53	9,5	16,36	6,82	9,5
AM5	11,71	4,72	12,6	13,53	5,52	12,6	16,36	6,81	12,6
AM6	11,71	4,71	15,8	13,53	5,51	15,8	16,36	6,80	15,8

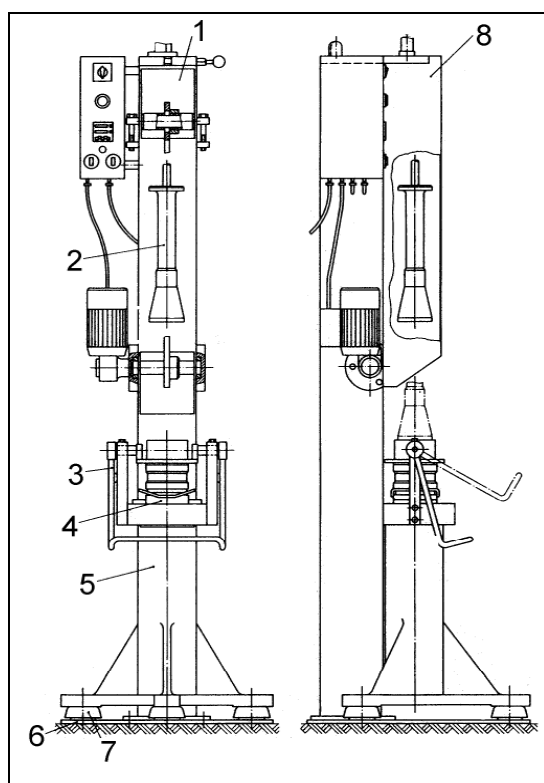
Tablica 4. Prikaz sastava asfaltnih mješavina serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 11 mm

	SKUPINA 4			SKUPINA 5			SKUPINA 6		
	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$	$C_{B/AM}$	$\%mas_{B/AM}$	$\%mas_{P/KM}$
AM1	11,71	4,73	0,0	13,53	5,54	0,0	16,36	6,82	0,0
AM2	11,71	4,73	1,0	13,53	5,54	1,0	16,36	6,82	1,0
AM3	11,71	4,73	3,3	13,53	5,54	2,0	16,36	6,82	2,0
AM4	11,71	4,73	5,4	13,53	5,53	3,6	16,36	6,82	2,7
AM5	11,71	4,72	7,5	13,53	5,53	5,2	16,36	6,82	3,3
AM6	11,71	4,72	9,7	13,53	5,53	6,8	16,36	6,82	4,0
AM7	11,71	4,71	11,8	13,53	5,52	8,5	16,36	6,82	4,7
AM8	11,71	4,71	13,9	13,53	5,52	10,1	16,36	6,82	5,4

nog sastava [38]. Izlazni podatak iz postupka projektiranja su podaci dostatni za pripremu asfaltne mješavine potrebne za pripremu asfaltnog uzorka projektiranog sastava, i to na osnovi prikladno pripremljenih sastavnih materijala. Na temelju tih podataka u laboratoriju su priređene asfaltne mješavine na temperaturi koja je prikladna za daljnji postupak pripreme laboratorijskog asfaltnog uzorka ($T = 150^{\circ}\text{C}$).

3.2.3 Izrada skupa asfaltnih uzorka

Za svaku od prikazanih asfaltnih mješavina priređena su po dva paralelna asfaltna uzorka i to prema standardiziranom [26] postupku zbijanjem na nabijaču s padajućim batom (slika 3.). Tako je priređen skup asfaltnih uzoraka.



- 1 Osnova aparata sa napravom za dizanje padajućeg bata
- 2 Bat sa vodicom
- 3 Naprava za učvršćenje kalupe
- 4 Podložna ploča sa pričvršćenim kalupom
- 5 Postolje aparata za zbijanje uzoraka asfalta
- 6 Čelična podna ploča
- 7 Gumene noge aparata
- 8 Poklopac aparata

Slika 3. Prikaz aparata za pripremu asfaltnog uzorka

3.2.4 Određivanje gustoće i izračunavanje sastava asfaltnog uzorka

Nakon hlađenja pripremljenih asfaltnih uzoraka na sobnu temperaturu, uzorcima su određene sljedeće karakteristike mjerenjem na hidrostatskoj vazi:

1. masa [g] suhog uzorka (m_1)
2. masa [g] uzorka umanjena za masu njegovim volumenom istisnute vode i to nakon jednog sata njegovanja u vodi (m_2)
3. masa [g] vlažnog uzorka (m_3)

Na temelju podataka dobivenih mjerenjem izračunana je gustoća asfaltnog uzorka primjenom sljedeće relacije:

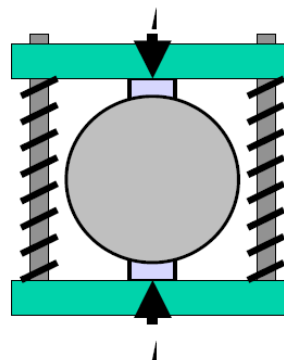
$$\rho_{AU} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \rho_{H_2O(25^{\circ}\text{C})} \quad (9)$$

Primjenom tako izračunane gustoće asfaltnog uzorka u relacijama (1), (2), (4) i (5) dobiju se osnovni elementi sastava asfaltnog uzorka ($C_{KS/AU}$, $C_{P/AU}$, $C_{B/AU}$ i $C_{S/AU}$). Upotrebom pak tih elemenata sastava u relaciji (8) dobije se ispunja šupljina kamenog materijala s bitumenom, (ISP_{KMSBIT}) kao jedan od izvedenih elemenata sastava. Posljednje navedeni element sastava prelazi u ispunju šupljina kamenog skeleta (ISP_{KSSBIT}) s bitumenom, i to u slučaju kad kameni materijal nema punila ($\%mas_{PKM} = 0$).

Na taj je način pripremljen skup asfaltnih uzoraka potpuno definiranog sastava kojima je, potrebno odrediti vlačnu čvrstoću.

3.2.5 Određivanje vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka

Asfaltnom uzorku mjeri se vlačna čvrstoća standardiziranim postupkom [24], i to indirektnom metodom, a shematski prikaz nanošenja sile na uzorak prikazan je na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz uzorka i nanošenja sile na uzorak u postupku mjerenja vlačne čvrstoće indirektnom metodom

Mjerenje je provedeno na termostatisanim uzorcima ($+5^{\circ}\text{C}$) asfalta na kompjutoriziranoj Marshalllovoj preši (slika 5.) koja je opskrbljena sljedećim uređajima:

- uređajem za nanošenje sile uzduž vertikalne dijametralne ravnine, uz konstantnu brzinu deformacije (50 ± 2) mm/min
- čeljusti za mjerenje vlačne čvrstoće indirektnim postupkom koja dimenzijama odgovara obliku i veličini pripremljenih uzoraka asfalta
- uređajem za mjerenje veličine sile točnosti $\pm 0,2$ kN.



Slika 5. Kompjutorizirani aparat za određivanje vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka

Postupak mjerenja vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka indirektnom metodom sastoji se od sljedećih faza:

- valjkastom uzorku odredi se visina (L [mm]) i promjer (D [mm])
- uzorak se termostatira u prikladnoj komori na temperaturu od $+5^{\circ}\text{C}$
- termostatirani uzorak uloži se u aparaturu za ispitivanje vlačne čvrstoće
- tokom ispitivanja mjeri se sila koja djeluje na uzorak uz konstantnu brzinu deformacije
- zabilježi se najveća vrijednost primijenjene sile (P [kN]), i to u trenutku sloma uzorka (nagli pad sile)
- vlačna se čvrstoća ($V\check{C}$ [N/mm^2]) izračunava iz podataka dobivenih mjerenjem prema relaciji:

$$V\check{C} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (10)$$

4 Rezultati ispitivanja

4.1 Prikaz sastava i vlačne čvrstoće skupa asfaltnih uzoraka

Za cijeli skup asfaltnih uzoraka koji se sastoji od dvije serije, a svaka serija od po tri skupine uzoraka, određeni su sastav i vlačna čvrstoća. Rezultati tih ispitivanja su u tablicama 5. i 6.

4.2 Diskusija

4.2.1 Ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o koncentraciji punila u asfaltnom uzorku

Analizom trenda ovisnosti vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o koncentraciji punila u asfaltnom uzorku nađeno je sljedeće:

Tablica 5. Prikaz sastava i svojstava asfaltnih uzoraka iz serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 4 mm

Oznaka skupine u seriji	Oznaka mješavine u skupini	ASFALJNI UZORAK					SVOJSTVO VČ [N/mm ²]
		SASTAV					
		C _{KSAU} [%(v/v)]	C _{PIAU} [%(v/v)]	C _{BIAU} [%(v/v)]	C _{SIAU} [%(v/v)]	ISP _{KMBIT} [%(v/v)]	
SKUPINA 1 CB/AM = 11,71 [%(v/v)]	AM 1	68,89	0,00	9,01	22,10	28,96	1,5
	AM 2	68,59	2,24	9,27	19,90	31,78	2,0
	AM 3	68,44	4,59	9,57	17,40	35,48	2,3
	AM 4	67,70	6,91	9,79	15,60	38,56	2,8
	AM 5	66,31	9,26	9,93	14,50	40,65	3,1
	AM 6	65,17	11,80	10,13	12,90	43,99	3,1
SKUPINA 2 CB/AM = 13,63 [%(v/v)]	AM 1	69,66	0,00	10,74	19,60	35,40	1,9
	AM 2	69,72	2,28	11,10	16,90	39,64	2,4
	AM 3	69,40	4,58	11,42	14,60	43,89	2,9
	AM 4	68,85	7,03	11,72	12,40	48,59	3,2
	AM 5	68,02	9,49	12,00	10,50	53,33	3,2
	AM 6	65,79	11,90	12,04	10,30	53,89	3,2
SKUPINA 3 CB/AM = 16,36 [%(v/v)]	AM 1	69,75	0,00	13,45	16,80	44,46	2,1
	AM 2	69,24	2,26	13,80	14,70	48,42	2,7
	AM 3	69,12	4,64	14,24	12,00	54,27	3,2
	AM 4	68,96	7,04	14,70	9,30	61,25	3,3
	AM 5	67,62	9,53	14,95	7,90	65,43	3,4
	AM 6	67,29	12,18	15,43	5,10	75,16	3,2

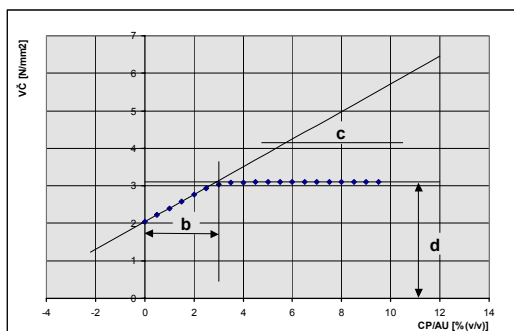
Tablica 6. Prikaz sastava i svojstava asfaltnih uzoraka iz serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 11 mm

Oznaka skupine u seriji	Oznaka mješavine u skupini	ASFALJNI UZORAK					SVOJSTVO VČ [N/mm ²]
		SASTAV					
		C _{KSAU} [%(v/v)]	C _{PIAU} [%(v/v)]	C _{BIAU} [%(v/v)]	C _{SIAU} [%(v/v)]	ISP _{KMBIT} [%(v/v)]	
SKUPINA 1 C _{total} = 11,71 [%(v/v)]	AM 1	74,73	0,00	9,77	15,60	38,66	1,7
	AM 2	75,56	0,76	9,98	13,70	42,15	1,9
	AM 3	74,34	2,51	10,05	13,10	43,41	2,2
	AM 4	74,10	4,16	10,24	11,50	47,10	2,7
	AM 5	72,86	5,75	10,29	11,10	48,11	3,1
	AM 6	72,79	7,57	10,54	9,10	53,67	3,1
	AM 7	72,29	9,34	10,67	7,70	58,08	3,2
	AM 8	70,91	11,02	10,77	7,30	59,60	3,2
SKUPINA 2 C _{total} = 13,63 [%(v/v)]	AM 1	74,76	0,00	11,54	13,70	45,72	1,9
	AM 2	74,19	0,74	11,57	13,50	46,15	2,1
	AM 3	74,98	1,51	11,81	11,70	50,23	2,4
	AM 4	74,43	2,75	11,92	10,90	52,23	2,7
	AM 5	74,38	4,01	12,11	9,50	56,04	3,1
	AM 6	74,55	5,30	12,35	7,80	61,29	3,2
	AM 7	74,59	6,72	12,59	6,10	67,36	3,2
	AM 8	74,43	8,08	12,79	4,70	73,13	3,2
SKUPINA 3 C _{total} = 16,36 [%(v/v)]	AM 1	75,05	0,00	14,45	10,50	57,92	2,0
	AM 2	74,94	0,74	14,52	9,80	59,70	2,4
	AM 3	74,86	1,51	14,63	9,00	61,91	2,5
	AM 4	74,89	2,05	14,76	8,30	64,01	2,8
	AM 5	74,73	2,59	14,86	7,82	65,52	3,0
	AM 6	74,73	3,03	14,94	7,30	67,18	3,0
	AM 7	74,92	3,59	15,15	6,34	70,50	3,1
	AM 8	74,93	4,12	15,16	5,79	72,36	3,1

1. Sve analizirane skupine uzoraka (jednaka granulometrija kamenog skeleta i jednaka koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini) pokazuju slični trend promatrane ovisnosti
2. Vlačna čvrstoća raste s porastom koncentracije punila do neke vrijednosti, nakon čega ostaje konstantnom i ne mijenja se daljnjim porastom koncentracije punila
3. Prvi dio trenda (rast vlačne čvrstoće) isto kao i drugi dio (bez promjena vlačne čvrstoće) izgleda linearna, pa to podsjeća na pravac paralelan s apscisom koji se siječe s pravcem pozitivnog koeficijenta smjera (slika 6.).
4. Daljnjom analizom trenda pronađena je relacija čije se asimptote ponašaju kao prethodno opisana dva pravca. Ta relacija ima sljedeći oblik:

$$V\check{C} = \frac{(C_{PIAU} - b)}{1 - e^{a(C_{PIAU} - b)}} * c + d \quad (11)$$

5. Značenje koeficijenata objašnjeno je na slici 6., uz napomenu da je koeficijent 'a' konstantan, a njegova vrijednost ne utječe na vrijednost funkcije nego mijenja samo vrijednost koeficijenta 'b'



Slika 6. Prikaz trenda ovisnosti vlačne čvrstoće o koncentraciji punila u asfaltnom uzorku

6. Statističkom obradom [40] podataka dobivenih mjerenjem za svaku od skupina asfaltnih uzoraka (jedna granulometrija kamenog skeleta i jednaka koncentracija bitumena u asfaltnoj mješavini) koje pripadaju seriji uzoraka s kamenim skeletom najvećeg promjera zrna 4 mm, određeni su karakteristični koeficijenti a, b, c i d (tablica 7.).

Tablica 7. Prikaz regresijom određenih koeficijenata a, b, c i d te odnosa mjerenih i na bazi koeficijenata izračunanih vlačnih čvrstoća asfaltnih uzoraka iz serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 4 mm

Oznaka skupine u seriji	Oznaka mješavine u skupini	ASFALJNI UZORAK				SVOJSTVO	
		SASTAV C _{P/AV} [% (v/v)]	Koeficijenti			VC _(RAC) [N/mm ²]	VC _(MER) [N/mm ²]
SKUPINA 1 CB/AM = 11,71 [% (v/v)]	AM 1	0,00	8,65996	0,18184	3,10010	1,5	1,5
	AM 2	2,24				1,9	2,0
	AM 3	4,59				2,4	2,3
	AM 4	6,91				2,8	2,8
	AM 5	9,26				3,1	3,1
	AM 6	11,80				3,1	3,1
SKUPINA 2 CB/AM = 13,53 [% (v/v)]	AM 1	0,00	5,95116	0,21837	3,20026	1,9	1,9
	AM 2	2,28				2,4	2,4
	AM 3	4,58				2,9	2,9
	AM 4	7,03				3,2	3,2
	AM 5	9,49				3,2	3,2
	AM 6	11,90				3,2	3,2
SKUPINA 3 CB/AM = 16,36 [% (v/v)]	AM 1	0,00	4,51923	0,26553	3,30001	2,1	2,1
	AM 2	2,26				2,7	2,7
	AM 3	4,64				3,3	3,3
	AM 4	7,04				3,3	3,3
	AM 5	9,53				3,3	3,4
	AM 6	12,18				3,3	3,2

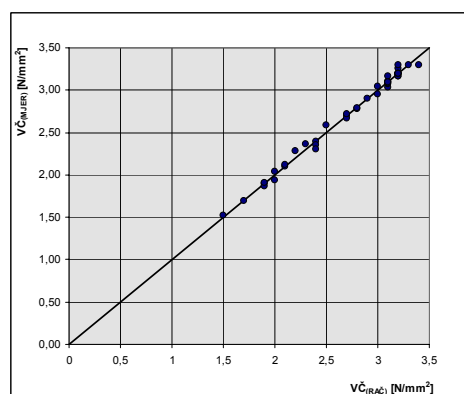
7. Isto je načinjeno za sve skupine uzoraka koje pripadaju seriji uzoraka sa kamenim skeletom najvećeg promjera zrna 11 mm (tablica 8.).

8. Usporedbom (tablice 7. i 8. te slika 7.) rezultata vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka dobivenih mjerenjem s rezultatima dobivenih izračunom prema relaciji (11), uz upotrebu statistikom određenih koeficijenata, nađeno je sljedeće:

- izvanredno slaganje mjerenih i izračunom dobivenih rezultata (faktor korelacije 0,997) upućuje na zaključak da je predloženi oblik funkcionalne veze vlačne čvrstoće i sastava uzorka dobro odabran
- koeficijenti (a, b, c, i d) evidentno imaju daljnju funkcionalnu vezu sa ostalim elementima sastava asfaltnog uzorka
- tu vezu potrebno je istražiti daljnjom analizom rezultata dobivenih mjerenjem.

Tablica 8. Prikaz regresijom određenih koeficijenata a, b, c i d te odnosa mjerenih i na bazi koeficijenata izračunanih vlačnih čvrstoća asfaltnih uzoraka iz serije s kamenim skeletom najvećeg zrna 11 mm

Oznaka skupine u seriji	Oznaka mješavine u skupini	ASFALJNI UZORAK				SVOJSTVO		
		SASTAV C _{P/AV} [% (v/v)]	Koeficijenti			VC _(RAC) [N/mm ²]	VC _(MER) [N/mm ²]	
SKUPINA 1 CB/AM = 11,71 [% (v/v)]	AM 1	0,00	6,26364	0,23565	3,16579	1,7	1,7	
	AM 2	0,76				1,9	1,9	
	AM 3	2,51				2,3	2,2	
	AM 4	4,16				2,7	2,7	
	AM 5	5,75				3,0	3,1	
	AM 6	7,57				3,2	3,1	
	AM 7	9,34				3,2	3,2	
	AM 8	11,02				3,2	3,2	
SKUPINA 2 CB/AM = 13,53 [% (v/v)]	AM 1	0,00	5,00	4,34955	0,28804	3,19932	1,9	1,9
	AM 2	0,74					2,1	2,1
	AM 3	1,51					2,4	2,4
	AM 4	2,75					2,7	2,7
	AM 5	4,01					3,1	3,1
	AM 6	5,30					3,2	3,2
	AM 7	6,72					3,2	3,2
	AM 8	8,08					3,2	3,2
SKUPINA 3 CB/AM = 16,36 [% (v/v)]	AM 1	0,00	2,88302	0,36836	3,09657	2,0	2,0	
	AM 2	0,74				2,3	2,4	
	AM 3	1,51				2,6	2,5	
	AM 4	2,05				2,8	2,8	
	AM 5	2,59				3,0	3,0	
	AM 6	3,03				3,0	3,0	
	AM 7	3,59				3,1	3,1	
	AM 8	4,12				3,1	3,1	



Slika 7. Prikaz odnosa mjerenih i izračunanih vlačnih čvrstoća asfaltnog uzorka

4.2.2 Ovisnost koeficijenata funkcionalne veze čvrstoće i koncentracije punila u asfaltnom uzorku o ostalim elementima njegova sastava

Analizom vrijednosti koeficijenata a, b, c i d funkcionalne ovisnosti vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o koncentraciji punila u uzorku tražena je veza vrijednosti tih koeficijenata s ostalim elementima sastava. Iz prikaza koeficijenata (tablica 9.) evidentno je da su koeficijenti karakteristični za pojedinu skupinu uzoraka (koncentraciju bitumena u asfaltnoj mješavini), s napomenom da se koeficijenti jednake oznake skupine razlikuju s obzirom na pripadnu seriju uzoraka (granulometrija kamenog skeleta).

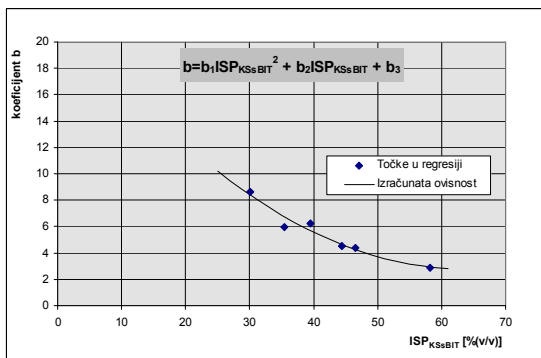
Iz tog je razloga načinjena daljnja analiza prikazanih rezultata ispitivanja sa zadatkom da se pronade eventualna

Tablica 9. Prikaz regresijom dobivenih koeficijenata a, b, c i d, te njihova ovisnost o ostalim elementima sastava asfaltnog uzorka

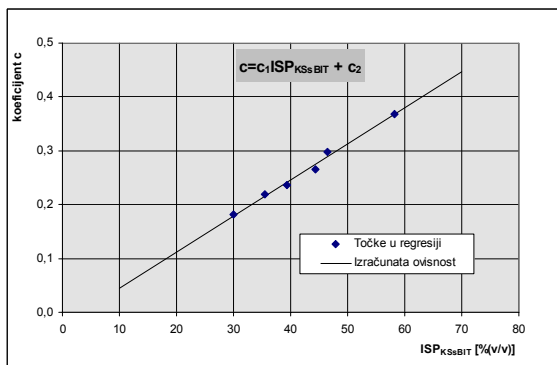
Oznaka serije	Oznaka skupine u seriji	ISP _{KSSBIT} [% (v/v)]	Koeficijenti			
			a	b	c	d
Serija 1	skupina 1	30,08	5,00	8,65996	0,18184	3,10
	skupina 2	35,49	5,00	5,95116	0,21837	3,20
	skupina 3	44,36	5,00	4,51923	0,26553	3,30
Serija 2	skupina 1	39,43	5,00	6,26364	0,23565	3,17
	skupina 2	46,52	5,00	4,34955	0,29804	3,20
	skupina 3	58,15	5,00	2,88174	0,36848	3,10

veza vrijednosti koeficijenata s ostalim elementima sastava predmetnih serija i skupina asfaltnih uzoraka. Tom je analizom nađeno sljedeće:

1. Koeficijent 'a' je konstantan i ne ovisi ni o kakvim elementima sastava
2. Koeficijenti 'b' je kvadratna funkcija (slika 8.) ispune šupljina kamenog skeleta s bitumenom (ISP_{KSSBIT}) u uzorku čiji kameni materijal nema punila ($\%mas_{PKM} = 0$). To su uzorci koji karakteriziraju skupinu kao njihovi prvi članovi (tablice 10. i 11.).
3. Koeficijent 'c' linearno je ovisan o istoj ispuni kamenog skeleta s bitumenom (ISP_{KSSBIT}).



Slika 8. Prikaz ovisnosti koeficijenta 'b' o ispuni kamenog skeleta s bitumenom (ISP_{KSSBIT})



Slika 9. Prikaz ovisnosti koeficijenta 'c' o ispuni kamenog skeleta s bitumenom (ISP_{KSSBIT})

4. Koeficijent 'd' vjerojatno ne ovisi ni o jednom elementu sastava asfaltnog uzorka i u ovoj analizi uzet je kao konstanta (srednja vrijednost svih koeficijenata 'd').

Na taj su način dobivene relacije koje definiraju vrijednosti koeficijenata kao funkcije ispune šupljina kamenog skeleta s bitumenom u uzorku čiji kameni materijal nema punila. Relacije su sljedećeg tipa:

- $a = 5,0000$
- $b = b_1 * ISP_{KSSBIT}^2 + b_2 * ISP_{KSSBIT} + b_3$,
s time da je: $b1=0,0046$, $b2=-0,5889$, $b3=21,7294$
- $c = c_1 * ISP_{KSSBIT} + c_2$,
s time da je: $c1=0,0066$ i $c2=-0,0141$
- $d = 3,1737$.

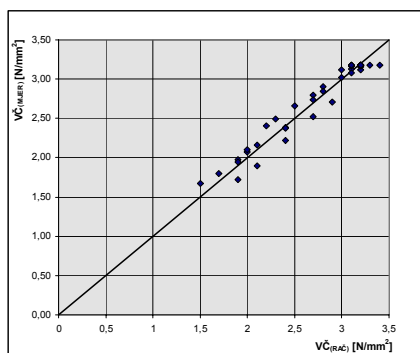
Izvedene vrijednosti koeficijenata a, b, c i d prikazane su u tablicama 10. i 11. u kojima se između ostalog, nalaze i vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka ($VČ_{(RAC)}$) izračunane na osnovi predmetnih vrijednosti koeficijenata.

Tablica 10. Prikaz izračunatih koeficijenata a, b, c i d iz njihove ovisnosti o ISP_{KSSBIT} te odnosa mjerenih i na bazi tako dobivenih koeficijenata izračunatih vlačnih čvrstoća asfaltnih uzoraka iz serije sa kamenim skeletom najvećeg zrna 4 mm

Oznaka serije	Oznaka skupine u seriji	ASFALJNI UZORAK							
		SASTAV		Koeficijenti				SVOJSTVO	
		C _{RAU} [% (v/v)]	ISP _{KSSBIT} [% (v/v)]	a _{rac}	b _{rac}	c _{rac}	d _{rac}	VČ _(RAC) [N/mm]	VČ _(MJE) [N/mm]
SKUPINA 1 CB _(M) 1,71	AM1	0,00	30,08	5,00	8,3070	0,17914	3,10	1,7	1,5
	AM2	2,24						2,1	2,0
	AM3	4,59						2,5	2,3
	AM4	6,91						2,9	2,8
	AM5	9,26						3,2	3,1
	AM6	11,80						3,2	3,1
SKUPINA 2 CB _(M) 3,63	AM1	0,00	35,49	5,00	6,7960	0,21539	3,17371	1,7	1,9
	AM2	2,28						2,2	2,4
	AM3	4,58						2,7	2,9
	AM4	7,03						3,2	3,2
	AM5	9,49						3,2	3,2
	AM6	11,90						3,2	3,2
SKUPINA 3 CB _(M) 16,36	AM1	0,00	44,36	5,00	4,6344	0,27488	3,10	1,9	2,1
	AM2	2,26						2,5	2,7
	AM3	4,61						3,1	3,2
	AM4	7,04						3,2	3,3
	AM5	9,53						3,2	3,4
	AM6	12,18						3,2	3,2

Usporedbom tako računanih ($VČ_{(RAC)}$) i stvarno mjerenih vlačnih čvrstoća ($VČ_{(MJE)}$) asfaltnih uzoraka nađeno je sljedeće:

1. Izvanredno slaganje mjerenih i izračunom dobivenih rezultata (faktor korelacije 0,979) upućuje na zaključak da je predloženi oblik funkcionalne veze koeficijenata 'b' i 'c' o ISP_{KSSBIT} dobro odabran
2. Shodno tome i konačni je oblik funkcionalne ovisnosti vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovu sastavu zadovoljavajući i potpuno prihvatljiv.



Slika 10. Prikaz odnosa mjerenih i izračunanih vlačnih čvrstoća asfaltnog uzorka

Tablica 11. Prikaz izračunanih koeficijenata a, b, c i d iz njihove ovisnosti o *ISP_{KSSBIT}* te odnosa mjerenih i na bazi tako dobivenih koeficijenata izračunanih vlačnih čvrstoća asfaltnih uzoraka iz serije sa kamenim skeletom najvećeg zrna 11 mm

Oznaka skupine seriji	Oznaka mješavine skupini	ASFALJNI UZORAK						SUSISVO	
		SASTAV		Koeficijenti				VČ _{PRAC} [Nmmf]	VČ _{MJEŠ} [Nmmf]
		C _{PAU} [%(M)]	ISP _{SST} [%(M)]	a _{PRAC}	b _{PRAC}	c _{PRAC}	d _{PRAC}		
SKUPINA 1 C _{0,PAU} = 11,71 [%(M)]	AM1	0,00	39,43	5,70365	0,24183	3,17371	18	17	
	AM2	0,76					20	19	
	AM3	2,51					24	22	
	AM4	4,16					28	27	
	AM5	5,75					31	31	
	AM6	7,57					32	31	
	AM7	9,34					32	32	
	AM8	11,02					32	32	
SKUPINA 2 C _{0,PAU} = 13,53 [%(M)]	AM1	0,00	46,52	5,00	4,24225	0,28894	19	19	
	AM2	0,74					22	21	
	AM3	1,51					24	24	
	AM4	2,75					27	27	
	AM5	4,01					31	31	
	AM6	5,30					32	32	
	AM7	6,72					32	32	
	AM8	8,08					32	32	
SKUPINA 3 C _{0,PAU} = 16,36 [%(M)]	AM1	0,00	58,15	2,92160	0,36733		21	20	
	AM2	0,74					24	24	
	AM3	1,51					27	25	
	AM4	2,05					28	28	
	AM5	2,59					30	30	
	AM6	3,03					31	30	
	AM7	3,59					32	31	
	AM8	4,12					32	31	

LITERATURA

- [1] The American Asphalt Institute, *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types*, 3rd Edition 1963.
- [2] Ramljak, Z.; Pejnović, V.: *Model i prostorne karakteristike asfaltnog uzorka*, Građevinar 34 (1982) (4) 151-160.
- [3] Pejnović, V.; Ramljak, Z.; Cipek, V.; Barlek, M.: *Utjecaj koncentracije komponenata asfalta na naponsko-deformacijsko ponašanje asfaltnog uzorka u sistemu sa spriječenom lateralnom deformacijom*, Zbornik radova drugog jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu, Poreč travnja 1981, Znanstveni savjet za naftu JAZU, Serija C, knjiga 5, str. 157-170.
- [4] Ramljak, Z.; Pejnović, V.; Fučić, B.: *Utjecaj vrste punila i bitumena na fizikalna svojstva bitumenskih mortova*, ibid., 225-242.
- [5] Pejnović, V.; Ramljak, Z.; Besedeš, D.; Mikulić, N.: *Utjecaj viskoznosti veziva i prostornih karakteristika asfaltnog uzorka na stabilitet određen Marshall metodom*, Ceste i mostovi 27 (1981) (7/8) 195-201.
- [6] Ramljak, Z.; Pejnović, V.: *Ovisnost pojave trajnih deformacija o prostornim karakteristikama asfaltnog sloja*, Ceste i mostovi 29 (1983) (9) 273-280.
- [7] Ramljak, Z.; Pejnović, V.: *Practical Mechanical Test for the Design and Control of Asphaltic Mixes*, Yugoslav National Report, RILEM Third International Symposium "Testing of Hydrocarbon Binders and Materials", Beograd, 12-16. September 1983., pp. 1-27.
- [8] Ramljak, Z.: *Principi prostornog projektiranja asfaltnih mješavina optimalnog sastava (uvodno predavanje)*, Zbornik radova trećeg jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu, Poreč listopada 1984., Znanstveni savjet za naftu JAZU, Serija C, knjiga 8, str. 135-144.
- [9] Pejnović, V.; Punda, D.; Ramljak, Z.; Klajn, I.: *Ovisnost stabilneta o koncentraciji vode u asfaltnom uzorku*, ibid., str. 145-150.

4.2.3 Ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovu sastavu

Ako se prethodno navedene spoznaje (vrijednosti koeficijenata 'b' i 'c' ovise o ispuni šupljina u kamenom skeletu s bitumenom) uključe u osnovnu relaciju (11) ovisnosti vlačne čvrstoće o koncentraciji punila u uzorku, dobije se konačni oblik funkcionalne ovisnosti vlačne čvrstoće o sastavu asfaltnog uzorka:

$$V\check{C} = \frac{\left[C_{P/AU} - (b_1 * ISP_{KSSBIT}^2 + b_2 * ISP_{KSSBIT} + b_3) \right]}{1 - e^{a \left[C_{P/AU} - (b_1 * ISP_{KSSBIT}^2 + b_2 * ISP_{KSSBIT} + b_3) \right]}} * (c_1 * ISP_{KSSBIT} + c_2) + d \quad (12)$$

Navedena relacija ima valjanost za cijeli skup ispitanih uzoraka asfalta. U daljnjem istraživanju bilo bi potrebno potvrditi valjanost nađene funkcije i za druge tipove asfalta šireg raspona sastava asfaltnih uzoraka.

5 Zaključak

Skupu asfaltnih uzoraka koji se sastoji od dvije serije (različite granulometrije) i šest skupina uzoraka (različite koncentracije bitumena u mješavini) čiji se uzorci međusobno razlikuju po koncentraciji punila, određeni su sastav i vlačna čvrstoća. Analizom trenda ovisnosti vlačne čvrstoće o koncentraciji punila u uzorku nađen je oblik funkcije koja na zadovoljavajući način opisuje ponašanje. Statističkom analizom nađeni su koeficijenti te funkcionalne veze. Daljnjom analizom rezultata mjerenja nađena je ovisnost spomenutih koeficijenata o ostalim elementima sastava. Usporedbom veličine vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka dobivenih mjerenjem s veličinom dobivenom izračunom prema nađenoj funkciji potvrđena je opća valjanost te funkcije za cijeli skup ispitanih asfaltnih uzoraka.

U daljnjem istraživanju potrebno je potvrditi valjanost te funkcije i za druge tipove asfalta šireg raspona sastava asfaltnih uzoraka.

- [10] Ramljak, Z.; Barac, I.; Pejnović, V.; Milčić, R.: *Ovisnost optimalne koncentracije intergranularnog slobodnog bitumena određene marshallovom metodom o granulometrijskom sastavu kamenog skeleta*, ibid., str. 195-204.
- [11] Ramljak, Z.: *Principles for the Spatial Design of Optimally Composed Asphalt Mixtures*, Proceedings of 3rd Eurobitume Symposium, 11-13. Septembere 1985., The Haque, pp. 333-339.
- [12] Ramljak, Z.: *Analytical Approach to Asphalt Mix Design*, Colloque sur invitation: Methodes de formulation et controle de qualite de enrobes bitumineux, Rilem, Olivet (Francuska) 24-26. Septembere 1986, pp. 126-128.
- [13] Ramljak, Z.: *Composition de l'echantillon de beton bitumineux define par les concentrations volumiques des sept composants principaux*, 4th Eurobitume simposium 1989., Madrid octobre 1989., p. 576-580.
- [14] Ramljak, Z.; Emery, J.: *Spatial Design of Optimal Asphalt Mixes*, Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, Montreal, Quebec, Canada, 1989, 324-340.
- [15] Ramljak, Z.: *Laboratorijski postupak prostornog projektiranja asfalta* (Uvodno predavanje). Zbornik radova četvrtog jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu, JAZU, Znanstveni savjet za naftu, Serija C, Knjiga 9, Dubrovnik 1990., 111-120.
- [16] Ramljak, Z.; Emery, J.: *Spatial Design of Optimal Asphalt Mixes*, 71th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, 12-16, January 1992.
- [17] Ramljak, Z.; Ladika, J.; Barlek, Emery, M. J.: *Dependance of Asphalt Cement Oxidation Rate on Asphalt Mix Composition*, Proceedings of the 39th Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, Quebec, Canada (1994), pp304.
- [18] Ramljak, Z.: *One of Croatian Approaches to Asphalt Mix Design*, Proceedings of International Regional Conference on the Results of Euroasphalt & Eurobitume Congress, EAPA and SAAV, Bratislava 1997, pp 143.
- [19] Ramljak, Z.: *Bitumen Content Calculation in Designed Asphalt Mixture*, Proceedings of 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000., pp 704.
- [20] Ramljak, Z.: *Výpočet obsahu asfaltového spojiva pri navrhú asfaltových zmesí*, Zbornik z celoštátneho seminára s medzinárodnou účasťou Poznatky z kongresu euroasphalt 2000., SAAV, Stara Lesna, marca 2001, str. 46.
- [21] Ramljak, Z.: *Funkcionalna ovisnost optimalnog udjela bitumena u asfaltnoj mješavini o uvjetima projektiranja te o gustoći ingredijenata*, Zbornik referatov 7. kolokvija o bitumnih, Gozd Martuljek, 2002, str 44 – 54.
- [22] prEN 12697-5, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density
- [23] prEN 12697-6, Bituminous mixtures . Test methods for hot mix asphalt . Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimen by hydrostatic method
- [24] prEN 12697-8, Bituminous mixtures . Test methods for hot mix asphalt . Part 8: Determination of the air voids content of bituminous mixtures
- [25] prEN 12697-23, Bituminous mixtures . Test methods for hot mix asphalt . Part 23: Indirect tensile test
- [26] prEN 12697-30, Bituminous mixtures . Test methods for hot mix asphalt . Part 30: Preparation of specimen by impact compactor
- [27] prEN 12697-34, Bituminous mixtures . Test methods for hot mix asphalt . Part 34: Marshall test
- [28] Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, Dah-Yinn; Kennedy, T. W.: *Vruće asfaltnje mješavine: materijali, projektiranje i ugradnja*, Zagreb 2003.
- [29] Al-Khateeb, Ghazi G.; Buttlar, W. G.: *Hollow-Cylinder Tensile Tester for Asphaltic Paving Mixtures*. Mid Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings, str. 14-19.
- [30] Poulidakos, Lily D.; Takahashi, Shigeki; Partl, M. N.; *A Comparison of Swiss and Japanese Porous Asphalt Through Various Mechanical Tests*. 4th Swiss Transport Research Conference, 2004.
- [31] Noesler, I.; Beckedahl, H.: *Adhesion Between Aggregates and Bitumen – Performance Testing of Compacted Asphalt Specimens by Means of the Dynamic Indirect Tensile Test*. 3th Euroasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.
- [32] Zaniewski, J. P.; Srinivasan, G.: *Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential*. Asphalt Tehnology Program Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 2004.
- [33] W. Arand. On the Crack Resistance and the Fatigue Behavior of Asphalt for Pavements. 7. kolokvij o bitumnih, Združenja asfalterjev Slovenije, Gozd Martuljek 2002. str 3 – 15.
- [34] Martinez, F.; Angelone, S.: *Determination of Fracture Parameters of Asphalt Mixes by the Repeated Indirect Tensile Test*. 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003. str 387 – 393.
- [35] Olard, F.: *Properties of Bituminous Mixtures at Low Temperatures and Relations with Binder Characteristics*. ibid.str. 450 – 457.
- [36] HRN EN 1425
- [37] HRN EN 1426
- [28] HRN EN ISO 3838
- [39] Ramljak, Z.: *Kompjuterski program za projektiranje asfaltnog uzorka unaprijed definiranog sastava*, Ramtech d.o.o., Zagreb 1997.
- [40] Ramljak, Z.; Jeras, M.: *Kompjuterski program za statističku obradu skupa podataka u svrhu pronalaženja koeficijenata funkcije unaprijed zadanog oblika*, Ramtech d.o.o., Zagreb 1998.
- [41] Fiaco, A. V.; McCormic, G. P.: *Nonlinear Sequential Unconstrained Minimization Techniques*, John Eilley and Sons, INC., New York 1968.