



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U NOVOM  
SADU



**Radomir D. JAKOVLJEVIĆ**

**OPTIMIZACIJA SASTAVA NOSEĆEG SLOJA  
KOLOVOZNE KONSTRUKCIJE NA BAZI  
AGREGATA OD HLADNO RECIKLIRANOG  
ASFALTA SA ASPEKTA MEHANIČKIH  
KARAKTERISTIKA**

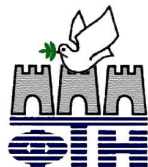
**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Novi Sad, 2016.**



## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, <b>RBR</b> :	
Identifikacioni broj, <b>IBR</b> :	
Tip dokumentacije, <b>TD</b> :	Monografska publikacija
Tip zapisa, <b>TZ</b> :	Štampana građa
Vrsta rada, <b>VR</b> :	Doktorska disertacija
Autor, <b>AU</b> :	Radimir Jakovljević
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. dr Vlastimir Radonjanin
Naslov rada, <b>NR</b> :	Optimizacija sastava nosećeg sloja kolovozne konstrukcije na bazi agregata od hladno recikliranog asfalta sa aspekta mehaničkih karakteristika
Jezik publikacije, <b>JP</b> :	Srpski
Jezik izvoda, <b>JL</b> :	Srpski/Engleski
Zemlja publikovanja, <b>ZP</b> :	Srbija
Uže geografsko područje, <b>UGP</b> :	Vojvodina
Godina, <b>GO</b> :	2016.
Izdavač, <b>IZ</b> :	Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Mesto i adresa, <b>MA</b> :	Novi Sad, 21000, Trg Dositeja Obradovića 6
Fizički opis rada, <b>FO</b> : (poglavlja/strana/citata/tabela/slika/grafika/priloga)	8/198/168/102/104/0/0
Naučna oblast, <b>NO</b> :	Građevinsko inženjerstvo
Naučna disciplina, <b>ND</b> :	Građevinski materijali
Predmetna odrednica/ Ključne reči, <b>PO</b> :	Kolovozna konstrukcija, hladno recikliranje, otpornost na zamor, čvrstoća pri pritisku, indirektna zatezna čvrstoća, cementna stabilizacija, stabilizacija bitumenskom emulzijom
<b>UDK</b>	
Čuva se, <b>ČU</b> :	Biblioteka FTN
Važna napomena, <b>VN</b> :	-
Izvod, <b>IZ</b> :	<i>U disertaciji su prikazani rezultati sopstvenog eksperimentalnog istraživanja izvršenog na uzorcima pripremljenim sa različitim učešćem struganog asfalta (RAP) i dodatnog - "novog" drobljenog kamenog agregata. Variranjem učešća struganog asfalta i dodatnog drobljenog kamenog agregata i variranjem učešća oba veziva omogućeno je praćenje uticaja sastava na mehaničke karakteristike mešavine. Uticaj vrste i količine upotrebljenog veziva na mehaničke karakteristike nosećeg sloja kolovoza sagledano je kroz variranje sadržaja cementa i bitumenske emulzije. Predmet istraživanja je definisanje međusobne zavisnosti odnosno korelacije, određenih mehaničkih karakteristika mešavine u funkciji vrste i količine komponentnih materijala i veziva i ocena njihovih fundamentalnih mehaničkih karakteristika.</i>
Datum prihvatanja teme, <b>DP</b> :	
Datum odbrane, <b>DO</b> :	
Članovi komisije, <b>KO</b> :	Predsednik: dr Milan Trivunić, red. prof.
	Član: dr Goran Mladenović, vanr. prof.
	Član: dr Mirjana Malešev, red. prof. Potpis mentora
	Član: dr Nebojša Radović, vanr. prof.
	Član, mentor: dr Vlastimir Radonjanin, red. prof.



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral dissertation
Author, <b>AU</b> :	Radomir Jakovljević
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. dr Vlastimir Radonjanin
Title, <b>TI</b> :	Optimization of the pavement base layer content on the basis of the reclaimed asphalt pavement aggregate in terms of mechanical properties
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian / English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2016
Publisher, <b>PB</b> :	Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, 21000, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/append.)	8/198/168 /102/104/0/0
Scientific field, <b>SF</b> :	Civil Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Building materials
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Pavement, cold recycling, fatigue resistance, compressive strength, indirect tensile strength, cement stabilization, bitumen emulsion stabilization.
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	<i>In dissertation are resented results of own experimental research on samples that have been prepared with different amount of reclaimed asphalt (RAP) and the additional - "new" crushed stone aggregate. By varying participation of reclaimed asphalt and additional crushed stone and varying participation of both binders monitoring of the impact of the composition on the mechanical properties of the mixture was enabled. The influence of type and amount of binder on the mechanical properties of the pavement base layer is seen through variation in the content of cement and bitumen emulsion. The subject of the research is to define the mutual dependence and correlation of certain mechanical characteristics of the mixture as a function of the types and quantities of component materials and binders and evaluation of their fundamental mechanical properties.</i>
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: dr Milan Trivunić, full professor
	Member: dr Goran Mladenović, associate professor
	Member: dr Mirjana Malešev, full professor      Mentor's sign
	Member: dr Nebojša Radović, associate professor
	Mentor: dr Vlastimir Radonjanin, full professor

## **Rezime:**

Osnovni cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije je analiza mogućnosti primene agregata koji se dobija postupkom hladnog recikliranja asfalta, kao komponentnog materijala za dobijanje novog nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija. Optimizacija sastava novog nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija, kojoj je prethodila analiza obimnih eksperimentalnih istraživanja bazirane se na mehaničkim karakteristikama. Nove mešavine spravljajuće se upotrebom cementa i bitumenske emulzije kao veziva.

Mehanistički pristup (Mechanistic approach) projektovanju odnosno dimenzionisanju recikliranih kolovoznih konstrukcija zahteva kao neophodno poznavanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih materijala. Proračun trajnosti podrazumeva poznavanje zakonitosti zamora recikliranog materijala u merodavnom nosećem sloju u kolovozu. Istraživanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih materijala se danas intenzivno vrše u mnogim nacionalnim laboratorijama i postrojenjima za ubrzano opterećivanje i ispitivanje trajnosti kolovoza. Međutim, laboratorijsko ispitivanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika, zamora i modula, zahteva sprovođenje dugotrajnih laboratorijskih opita koji često nisu dostupni ili ih u datom momentu nije moguće sprovesti.

Poznavanje međusobne zavisnosti i korelacije između mehaničkih karakteristika koje se dobijaju kao rezultat sprovođenja "jednostavnijih" odnosno bržih opita čija je primena široko raspostranjena (pritisna čvrstoća, indirektna zatezna čvrstoća) i fundamentalnih mehaničkih karakteristika ("zamor" i "moduli") umnogome bi učinila postupak mehanističkog pristupa dimenzionisanju recikliranih kolovoza primenljivijim i u svakom slučaju uspešnijim.

Istraživanje je izvršeno na uzorcima koji su pripremljeni sa različitim učešćem struganog asfalta (RAP) i dodatnog - "novog" drobljenog kamenog agregata. Variranjem učešća struganog asfalta i dodatnog drobljenog kamenog agregata i variranjem učešća oba veziva omogućeno je praćenje uticaja sastava na mehaničke karakteristike mešavine. Uticaj vrste i količine upotrebljenog veziva na mehaničke karakteristike nosećeg sloja kolovoza sagledano je kroz variranje sadržaja cementa i bitumenske emulzije. Predmet istraživanja je definisanje međusobne zavisnosti odnosno korelacije, određenih mehaničkih karakteristika mešavine u funkciji vrste i količine komponentnih materijala i veziva i ocena njihovih fundamentalnih mehaničkih karakteristika. Rezultati istraživanja će omogućiti efikasnije projektovanje recikliranih kolovoznih konstrukcija primenom mehanističkog pristupa i predstavljaju veliku podršku u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

**Ključne reči:** Kolovozna konstrukcija, hladno recikliranje, otpornost na zamor, čvrstoća pri pritisku, indirektna zatezna čvrstoća, cementna stabilizacija, stabilizacija bitumenskom emulzijom.

## **Summary:**

*Basic aim of the research in doctoral dissertation is to analyze the possibilities of application of aggregates which are obtained by cold recycling of asphalt, as a component material for a new pavement base layer. Optimization of a new pavement base layer, which was preceded by an analysis of extensive experimental investigations will be based on the mechanical properties. New mixtures shall be prepared with cement and bitumen emulsion as a binder.*

*Mechanistic approach to design and dimensioning of recycled pavements requires as necessary knowledge of the fundamental mechanical properties of recycled materials. Durability calculations means knowing of fatigue law in recycled material in the characteristic pavement base layer. Research of fundamental mechanical properties of recycled materials is currently extensively performed in many national laboratories and accelerated pavement testing facilities for pavement durability. However, laboratory testing of fundamental mechanical properties, fatigue and modules, requires the implementation of long-term laboratory testing that are often not available or at a given moment can not be implemented.*

*Knowing the mutual dependence and correlation between mechanical characteristics that are obtained as a result of the implementation of "simple" or faster testing whose application is more prevalent (compressive strength, indirect tensile strength) and the fundamental mechanical properties ("fatigue" and "modulus") would greatly make procedure of mechanistic approach to dimensioning of recycled pavements more applicable and in any case more successful.*

*The research was carried out on samples that have been prepared with different amount of reclaimed asphalt (RAP) and the additional - "new" crushed stone aggregate. By varying participation of reclaimed asphalt and additional crushed stone and varying participation of both binders enable monitoring the impact of the composition on the mechanical properties of the mixture. The influence of type and amount of binder on the mechanical properties of the pavement base layer is seen through variation in the content of cement and bitumen emulsion. The subject of the research is to define the mutual dependence and correlation of certain mechanical characteristics of the mixture as a function of the types and quantities of component materials and binders and evaluation of their fundamental mechanical properties. The research results will enable more efficient design of recycled pavements using the mechanistic approach and represent great support in everyday engineering practice.*

**Keywords:** *Pavement, cold recycling, fatigue resistance, compressive strength, indirect tensile strength, cement stabilization, bitumen emulsion stabilization.*

## SPISAK SLIKA:

<b>Slika 1</b> Stepenasti koncept (Koncept lestvica) [1].....	22
<b>Slika 2</b> Raspon struktura kolovoznih konstrukcija za različita saobraćajna opterećenja [1].....	27
<b>Slika 3</b> Doziranje cementa kao vodene suspenzije sa Wirtgen WM1000. [17].....	37
<b>Slika 4</b> Tipična kompozicija savremenih postrojenja za hladno recikliranje na licu mesta. [16].....	38
<b>Slika 5</b> Izgled standardnog bubnja za frezovanje na mašinama za hladno recikliranje na licu mesta. [17].....	39
<b>Slika 6</b> Jednodelni voz za hladno recikliranje na licu mesta. [16].....	39
<b>Slika 7</b> Dvodelni voz za hladnu reciklažu na licu mesta. [16].....	40
<b>Slika 8</b> Višedelni voz za hladnu reciklažu na licu mesta. [16].....	40
<b>Slika 9</b> Ugrađivanje finišerom na recikleru sa inicijalnim zbijanjem sloja Hladne reciklaže na licu mesta. [17].....	41
<b>Slika 10</b> Wirtgen 2200 CR recikler sa finišerom za ugradnju i inicijalno zbijanje. [17].....	41
<b>Slika 11</b> Wirtgen 4200 CR recikler sa finišerom za ugradnju i inicijalno zbijanje vrši recikliranje trake autoputa od 4.2m širine u jednom prolazu. [17].....	41
<b>Slika 12</b> Zbijanje sloja Hladne reciklaže na licu mesta [16].....	42
<b>Slika 13</b> Centralno postrojenje za hladno recikliranje. [16].....	44
<b>Slika 14</b> Voz za hladnu reciklažu na licu mesta postavljen kao centralno postrojenje za hladno recikliranje. [17].....	45
<b>Slika 15</b> Ugrađivanje mešavine hladno reciklirane u centralnom postrojenju. [16].....	45
<b>Slika 16</b> Evaluacija podobnosti granulometrijskog sastava [39].....	53
<b>Slika 17</b> Smernice za izbor veziva u funkciji karakteristika sloja [5].....	54
<b>Slika 18</b> Algoritam izbora veziva [29].....	56
<b>Slika 19</b> Algoritam postupka izrade prethodne mešavine sa bitumenskim vezivima [39].....	57
<b>Slika 21</b> Rezultati pritiskne čvrstoće hladno recikliranih mešavina na licu mesta sa cementom kao vezivom [47].....	59
<b>Slika 22</b> Odnos Stabilnosti i Tečenja po Marshall-u i vremena negovanja za zasićene i nezasićene vodom hladno reciklirane uzorke vezane bitumenskom emulzijom [22].....	64
<b>Slika 23</b> Postignuta Stabilnost po Marshall-u u odnosu na vreme nakon izvođenja radova. [51].....	64
<b>Slika 24</b> Rezultati ispitivanja ITS-a: Penušavi bitumen vs. (a) ITS u suvom stanju, (b) ITS vodom zasićenom stanju, (c) odnos ITS, i (d) šupljine [53].....	65
<b>Slika 25</b> Odnos rezilijentnih modula i procenta učešća bitumenske emulzije hladno recikliranih mešavina [34].....	66
<b>Slika 26</b> Rezilijentni moduli mešavina sa penušavim bitumenom na različitim temperaturama [52].....	66
<b>Slika 27</b> ITS i rezilijentni moduli kod mešavina stabilizovanih penušavim bitumenom. [52].....	67
<b>Slika 28</b> Otpornost na zamor hladno recikliranih mešavina sa penušavim bitumenom [52].....	68
<b>Slika 29</b> Karakteristike zamora CBEM-ova negovanih na 60 °C preko 96 sati, pripremljenih i zbijenih na 32 °C, ispitanih na 20 °C [54].....	70
<b>Slika 30</b> Karakteristike zamora CBEM-ova negovanih na 60°C preko 96 sati, pripremljenih i zbijenih na 32 °C, ispitanih na 30 °C [54].....	70
<b>Slika 31</b> Merene dilatacije zatezanja tokom prolaza opterećenja. [55].....	72
<b>Slika 32</b> Gubitak vlažnosti mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59].....	74
<b>Slika 33</b> Razvoj čvrstoće mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59].....	75
<b>Slika 35</b> CAEM karakteristike zamora u poređenju sa klasičnim – vrućim asfaltnim mešavinama. [60].....	76
<b>Slika 36</b> ITS u suvom stanju hladno recikliranih mešavina stabilizovanih sa (A) penušavim bitumenom i (B) bitumenskom emulzijom. [63].....	77
<b>Slika 37</b> Poređenje efekata cementa na vrednosti $M_r$ -a. [64].....	80
<b>Slika 38</b> Poređenje između merenih i procenjenih vrednosti $M_r$ -a. [64].....	80
<b>Slika 39</b> Međusobni odnos rezilijentnih modula i životnog veka zamora za pucolanski cement na 25, 5 i -10 °C. [65].....	82
<b>Slika 40</b> Zamor CBEM-ova u poređenju sa vrućim asfaltnim mešavinama [60].....	85
<b>Slika 41</b> Uticaj vrste bitumena na krutost hladne reciklirane mešavine sa RAP-om u odnosu na vreme [60].....	85
<b>Slika 42</b> Tipične strukture recikliranih kolovoznih konstrukcija [17].....	87
<b>Slika 43</b> Tipične strukture recikliranih kolovoznih konstrukcija [67].....	88
<b>Slika 44</b> Katalog za projektovanje kolovoznih konstrukcija sa recikliranim mešavinama sa bitumenskim vezivima za nosivost do 1.0 mil.st.os. [39].....	89
<b>Slika 45</b> Minimalna debljina habajućeg sloja za kolovozne konstrukcije sa recikliranim mešavinama sa bitumenskim vezivima. [39].....	90
<b>Slika 46</b> Dijagram za dimenzionisanje hladno reciklirane mešavine Tipa A. [68].....	91
<b>Slika 47</b> Dijagram za dimenzionisanje hladno reciklirane mešavine Tipa B. [68].....	91
<b>Slika 48</b> Projektni kriterijumi i specifikacije za reciklirane mešavine na licu mesta sa cementom kao vezivom [29].....	95
<b>Slika 49</b> Projektni kriterijumi i specifikacije za reciklirane mešavine na licu mesta sa bitumenom kao vezivom [29].....	96
<b>Slika 50</b> Debljine slojeva kolovoza recikliranih na licu mesta stabilizovanih sa cementom [29].....	98
<b>Slika 51</b> Debljine slojeva kolovoza recikliranih na licu mesta stabilizovanih sa penušavim bitumenom [29].....	99
<b>Slika 53</b> Kolotrazi na deonicama hladno recikliranih kolovoza na licu mesta u Nevadi (a) SAD- 50, (b) SAD-95 [71].....	104
<b>Slika 54</b> FWD ispitivanja na hladno recikliranom kolovozu na putu u Ontariju [28].....	104
<b>Slika 57</b> Granulometrijski sastav RAP-a.....	108
<b>Slika 58</b> Granulometrijska kriva Drobljenog kamenog agregata 0/22mm, "Kovilovača", Despotovac (prosečna kriva od 6 prosejanih uzoraka).....	110
<b>Slika 59</b> Generalni plan za realizaciju sopstvenog eksperimentalnog istraživanja.....	113
<b>Slika 60</b> Algoritam sopstvenog eksperimentalnog dela istraživanja.....	114
<b>Slika 61</b> Pripremljeni uzorak za ispitivanje pritiskne čvrstoće pre izvođenja ispitivanja, na merenju dimenzija i u presi.....	117
<b>Slika 62</b> Uzorak nakon loma odnosno nakon završenog ispitivanja pritiskne čvrstoće u presi.....	117
<b>Slika 63</b> Pripremljeni uzorak za ispitivanje indirektno zatezne čvrstoće pre izvođenja ispitivanja, na merenju dimenzija i u presi.....	118
<b>Slika 64a</b> Dijagram vrednosti pritisknih čvrstoća - $\beta_{28}$ za sve ispitivane mešavine sa obeleženim usvojenim optimalnim sadržajima veziva.....	123
<b>Slika 64b</b> Dijagram vrednosti indirektnih zateznih čvrstoća - ITS <sub>28</sub> za sve ispitivane mešavine sa obeleženim usvojenim optimalnim sadržajima veziva.....	123
<b>Slika 65</b> Grafikon intervala poverenja fizičko mehaničkih karakteristika po DK.....	130

<b>Slika 66</b> Dendogram analiziranih karakteristika.....	132
<b>Slika 67</b> Grafikon Elipse (intervala poverenja) DK kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.....	133
<b>Slika 68</b> Grafikon Elipse (intervala poverenja) DK kod zapreminska masa i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.....	133
<b>Slika 69</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), DK uzorka kod čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.....	134
<b>Slika 70</b> 3D prikaz intervala poverenja za DK podgrupe.....	134
<b>Slika 71</b> Grafikon Interval poverenja fizičko mehaničkih karakteristika po učešću cementa.....	138
<b>Slika 72</b> Dendogram analiziranih karakteristika.....	140
<b>Slika 74</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), cement podgrupa za čvrstoća pri indirektnom zatezanju i zapreminska masa.....	141
<b>Slika 75</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), cement uzoraka kod čvrstoća pri indirektnom zatezanju i čvrstoća pri pritisku.....	141
<b>Slika 76</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), cement uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.....	142
<b>Slika 77</b> 3D prikaz intervala poverenja za cement podgrupe.....	142
<b>Slika 78</b> Grafikon intervala poverenja fizičko mehaničkih karakteristika uzorka za podgrupe RAP-a.....	145
<b>Slika 79</b> Dendogram analiziranih karakteristika.....	147
<b>Slika 80</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.....	148
<b>Slika 81</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.....	148
<b>Slika 82</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.....	149
<b>Slika 83</b> 3D prikaz intervala poverenja za RAP podgrupe.....	149
<b>Slika 84</b> Grafikon interval poverenja fizičko mehaničkih karakteristika uzorka po učešću bitumsne emulzije.....	152
<b>Slika 85</b> Dendogram analiziranih karakteristika.....	154
<b>Slika 86</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), podgrupa bitumsne emulzije za zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.....	155
<b>Slika 87</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), uzoraka bitumsne emulzije kod zapreminske mase i čvrstoće pri indirektnom zatezanju.....	155
<b>Slika 88</b> Grafikon elipse (intervala poverenja), uzoraka bitumsne emulzije kod čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri indirektnom zatezanju.....	156
<b>Slika 89</b> 3D prikaz intervala poverenja za podgrupe bitumsne emulzije.....	156
<b>Slika 90</b> Šematski prikaz ITS opreme.....	164
<b>Slika 91</b> Šematski prikaz ispitnog modula – ITFT.....	164
<b>Slika 92</b> Oprema za ispitivanje zamora i modula ITSFT i ITSM na Građevinskom fakultetu u Beogradu.....	165
<b>Slika 93</b> Položaj uzorka u kalupu za montiranje traka.....	167
<b>Slika 94</b> Postupak kondicioniranja uzoraka u klima komori uređaja na temperaturu izvođenja opita.....	167
<b>Slika 95</b> Položaj uzorka u instrumentu.....	167
<b>Slika 96</b> Oblik "Haversine" tip signala.....	168
<b>Slika 97</b> Nekoliko karakterističnih tipova započetih lomova uzoraka prilikom ispitivanja.....	169
<b>Slika 98</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 1 – 100% drobljeni kameni agregat sa 4% cementa.....	172
<b>Slika 99</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 2 – 50% drobljeni kameni agregat + 50% RAP sa 5% cementa.....	174
<b>Slika 100</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 3 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 6% cementa.....	176
<b>Slika 100</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 3 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 6% cementa.....	176
<b>Slika 101</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 4 – 100% Drobljeni kameni agregat sa 4% cementa i 3.5% bitumsne emulzije.....	178
<b>Slika 102</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 5 – 50% drobljeni kameni agregat + 50% RAP sa 4% cementa i 3.5% bitumsne emulzije.....	180
<b>Slika 103</b> Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 6 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 3% cementa i 3.5% bitumsne emulzije.....	182
<b>Slika 104</b> Dijagram Zakona zamora za sve ispitivane mešavine.....	183

## SPISAK TABELA:

<b>Tabela 1</b> Pregled stanja i aktivnosti recikliranja u zemljama članovima u AIPCR - PIARC [2].....	18
<b>Tabela 2</b> Količina termički recikliranog asfalta u asfaltnim slojevima u Evropi 1996. godine (EAPA 1996) [1].....	19
<b>Tabela 3</b> Potencijalno recikliranje/ponovno korišćenje nevezanih materijala iz kolovoza [1].....	31
<b>Tabela 4</b> Prednosti i nedostaci veziva za hladno recikliranje na licu mesta.....	50
<b>Tabela 5</b> Preporučeni granulometrijski sastav nevezanih materijala za hladnu reciklažu na licu mesta [29].....	52
<b>Tabela 6</b> Vrednosti modula elastičnosti (posle 365 dana) predloženih za projektovanje kolovoza sa cementom recikliranim slojevima. [19].....	60
<b>Tabela 7</b> Primer korelacije između rezultata Duriez-ovog testa i procene Young-ovog modula za materijale reciklirane sa bitumenskom emulzijom ugrađenih u kolovoz (Francuska) [50].....	62
<b>Tabela 8</b> Sistem klasifikacije za materijale reciklirane sa penušavim bitumenom [21].....	62
<b>Tabela 9</b> Karakteristike mešavina sa penušavim bitumenom tokom procesa izrade prethodne mešavine [52].....	65
<b>Tabela 10</b> Pregledna tabela rezultata sprovedenih ispitivanja [54].....	69
<b>Tabela 11</b> Pregled sračunatih vrednosti modula [55].....	72
<b>Tabela 12</b> Rezultati otpornosti na uticaj vlažnosti za hladno reciklirane mešavine, [26].....	73
<b>Tabela 12</b> Vrednosti linearne regresije zamora mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59].....	75
<b>Tabela 13</b> Jednačine krive zamora (eksponencijalna linija regresije – trend) i koeficijent korelacije (R2) [60].....	76
<b>Tabela 14</b> Efekat proučavanih parametara na karakteristike recikliranih mešavina. [65].....	82
<b>Tabela 15</b> Karakteristike CBEM-ova u poređenju sa vrućim asfaltnim mešavinama [60].....	84
<b>Tabela 16</b> Povoljni efekti dodavanja cementa u CBEM-ove [60].....	84
<b>Tabela 17</b> Povoljni efekti dodavanja cementa u CBEM-ove [60].....	85
<b>Tabela 18</b> Smernice za granulometrijski sastav za hladnu reciklažu. [69].....	92
<b>Tabela 19</b> Minimalna debljina asfaltnog habajućeg sloja preko sloja hladne reciklaže. [18].....	92
<b>Tabela 20</b> Faktori konverzije u funkciji vrste materijala u sloju kolovozne konstrukcije. [18].....	92
<b>Tabela 21</b> Tipični AASHTO strukturni koeficijenti slojeva. [70].....	93
<b>Tabela 22</b> AASHTO koeficijenti zamene hladno recikliranih slojeva [71].....	94
<b>Tabela 23</b> Kategorija puta [29].....	96
<b>Tabela 24</b> Pretpostavljena debljina nevezanog nosećeg sloja postojećeg kolovoza za puteve Tipa 1 i Tipa 2 [29].....	97
<b>Tabela 25</b> Faktori ekvivalencije i Faktori nedostajućih debljina [29].....	100

<b>Tabela 26</b> Debljine recikliranih na lcu mesta slojeva kolovoza za Tip 3 i Tip 4 [29].....	100
<b>Tabela 27</b> Hladno recikliranje na licu mesta u Ajovi [27].....	103
<b>Tabela 28</b> PSI skala za rangiranje stanja [27].....	103
<b>Tabela 29</b> Karakteristike hladno recikliranih materijala [67].....	105
<b>Tabela 30</b> Komponentni materijali za izradu prethodnih mešavina.....	107
<b>Tabela 31</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja drobljenog kamenog agregata 0/22mm "Kovilovača", Despotovac.....	109
<b>Tabela 32</b> Granulometrijski sastav Drobljenog kamenog agregata 0/22mm, "Kovilovača", Despotovac.....	110
<b>Tabela 33</b> Granulometrijski sastav drobljenog peska – Drobljenog kamenog agregata 0/2mm, "Kovilovača", Despotovac.....	110
<b>Tabela 34</b> Laboratorijska ispitivanja cementa CEM II 32.5R, CEMENTARA: "LAFARGE", BEOČIN.....	111
<b>Tabela 35</b> Laboratorijska ispitivanja bitumenske emulzije iz fabrike emulzije VIALIT iz Austrije.....	112
<b>Tabela 36</b> Određivanje čvrstoće epruveta pri pritisku – Ispitivanje prema standardu SRPS EN 13286-41.....	119
<b>Tabela 37</b> Određivanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju – Ispitivanje prema standardu SRPS EN 13286-42.....	121
<b>Tabela 38</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka za 100% DK.....	128
<b>Tabela 39</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 50% DK.....	129
<b>Tabela 40</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 20% DK.....	129
<b>Tabela 41</b> Značajnost razlike između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	130
<b>Tabela 42</b> Značajnost razlike između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	130
<b>Tabela 43</b> Karakteristike i homogenost DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	131
<b>Tabela 44</b> Distanca (Mahalanobisova) između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	132
<b>Tabela 45</b> Grupisanje DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	132
<b>Tabela 45</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 2% cement (18).....	135
<b>Tabela 46</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 3% cement (27).....	136
<b>Tabela 47</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 4% cement (27).....	136
<b>Tabela 48</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 5% cement (9).....	137
<b>Tabela 49</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 6% cement (6).....	137
<b>Tabela 50</b> Značajnost razlike između učešća cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	138
<b>Tabela 51</b> Značajnost razlike između cement uzoraka u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	138
<b>Tabela 52</b> Karakteristike i homogenost cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	139
<b>Tabela 53</b> Distanca (Mahalanobisova) između cement uzorka u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	140
<b>Tabela 54</b> Grupisanje cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	140
<b>Tabela 55</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 0% RAP (27).....	143
<b>Tabela 56</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 50% RAP (30).....	144
<b>Tabela 57</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 80% RAP (30).....	144
<b>Tabela 58</b> Značajnost razlike između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	145
<b>Tabela 59</b> Značajnost razlike između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	145
<b>Tabela 60</b> Karakteristike i homogenost RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	146
<b>Tabela 61</b> Distanca (Mahalanobisova) između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	147
<b>Tabela 62</b> Grupisanje RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	147
<b>Tabela 63</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika podgrupe 0% bit em (33).....	150
<b>Tabela 64</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 3.5% bit em (27).....	151
<b>Tabela 65</b> Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika 5.5% bit em (27).....	151
<b>Tabela 66</b> Značajnost razlike između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	152
<b>Tabela 67</b> Značajnost razlike između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	152
<b>Tabela 68</b> Karakteristike i homogenost podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	153
<b>Tabela 69</b> Distanca (Mahalanobisova) između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	154
<b>Tabela 70</b> Grupisanje podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	154
<b>Tabela 71</b> Doprinos prostora karakteristikama.....	158
<b>Tabela 72</b> Karakteristike i homogenost cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	158
<b>Tabela 73</b> Karakteristike i homogenost podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	159
<b>Tabela 74</b> Karakteristike i homogenost DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	160
<b>Tabela 75</b> Karakteristike i homogenost RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.....	160
<b>Tabela 76</b> Planirani program nivoa opterećenja tokom ispitivanja (KPa).....	170
<b>Tabela 77</b> Planirani program nivoa opterećenja tokom ispitivanja (N).....	170
<b>Tabela 78</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).....	171
<b>Tabela 79</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	172
<b>Tabela 80</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.....	172
<b>Tabela 81</b> Zakon zamora za $1 \times 10^5$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	172
<b>Tabela 82</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).....	173
<b>Tabela 83</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	173
<b>Tabela 84</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.....	173
<b>Tabela 85</b> Zakon zamora za $1 \times 10^5$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	174
<b>Tabela 86</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).....	175
<b>Tabela 87</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	175
<b>Tabela 88</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.....	175



<b>Tabela 89</b> Zakon zamora za $1 \times 10^6$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	176
<b>Tabela 90</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev). .....	177
<b>Tabela 91</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	177
<b>Tabela 92</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora. ....	177
<b>Tabela 93</b> Zakon zamora za $1 \times 10^6$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	178
<b>Tabela 94</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev). .....	179
<b>Tabela 95</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	179
<b>Tabela 96</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora. ....	179
<b>Tabela 97</b> Zakon zamora za $1 \times 10^6$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	180
<b>Tabela 98</b> Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev). .....	181
<b>Tabela 99</b> Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.....	181
<b>Tabela 100</b> Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora. ....	181
<b>Tabela 101</b> Zakon zamora za $1 \times 10^6$ ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.....	182
<b>Tabela 102</b> Pregledna tabela parametara zakonitosti zamora i modul za sve ispitivane mešavine.....	183

## SADRŽAJ:

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>13</b>
1.1	DEFINISANJE I OPIS PREDMETA (PROBLEMA) ISTRAŽIVANJA.....	13
1.2	OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA.....	13
1.3	CILJ ISTRAŽIVANJA SA NAGLASKOM NA REZULTATE KOJE SE OČEKUJU .....	14
1.4	NAUČNE METODE KOJE ĆE BITI PRIMENJENE .....	14
1.5	SADRŽAJ DOKTORSKE DISERTACIJE .....	15
<b>2</b>	<b>SADAŠNJE STANJE U PODRUČJU HLADNOG RECIKLIRANJA ASFALTNIH KOLOVOZNIH KONTRUKCIJA</b> .....	<b>16</b>
2.1	RASTUĆE POTREBE ZA RECIKLIRANJEM KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA.....	16
2.2	BILANS ISKUSTVA I KOLIČINA .....	18
2.2.1	BILANS KOLIČINA.....	18
2.2.2	ISKUSTVA .....	20
2.3	PODRŠKA RECIKLIRANJU .....	21
2.3.1	ZAHTEVI ZAŠTITE ŽIVOTNE OKOLINE I EKONOMSKI ZAHTEVI .....	21
2.3.2	EDUKACIJA.....	22
2.3.3	ZAKONODAVSTVO.....	23
2.3.4	ISTRAŽIVANJA.....	23
2.4	TEHNIČKE MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA .....	27
2.5	KARAKTERISTIKE METODA I KONCEPT PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA .....	29
2.5.1	RECIKLIRANJE ASFALTNIH SLOJEVA U VEZANE NOSEĆE SLOJEVE PO HLADNOM POSTUPKU .....	29
2.5.2	RECIKLIRANJE ASFALTNIH SLOJEVA U NEVEZANE NOSEĆE SLOJEVE.....	30
2.5.3	RECIKLIRANJE NEVEZANIH NOSEĆIH SLOJEVA.....	30
2.5.4	RECIKLIRANJE NEVEZANIH MATERIJALA POSTELJICE .....	32
2.6	KLASIFIKACIJA POSTUPAKA RECIKLIRANJA .....	33
2.6.1	PREMA MESTU OBAVLJANJA PROCESA .....	33
2.6.2	PREMA TEMPERATURI PROCESA .....	33
2.6.3	PREMA KARAKTERISTIKAMA MATERIJALA .....	33
2.6.4	PREMA VRSTI VEZIVA.....	34
2.6.5	PODVRSTE .....	34
2.6.6	KLASIFIKACIJA U SAD .....	35
2.7	KASIFIKACIJE U EVROPI.....	35
<b>3</b>	<b>KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA</b> .....	<b>37</b>
3.1	TEHNOLOGIJA I MOGUĆNOST PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA .....	37
3.1.1	TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA RADOVA.....	37
3.1.2	MOGUĆNOSTI PRIMENE .....	42
3.2	TEHNOLOGIJA I MOGUĆNOST PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA U CENTRALNOM POSTROJENJU .....	44
3.2.1	TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA RADOVA.....	44
3.2.2	MOGUĆNOSTI PRIMENE .....	45
3.3	PREDNOSTI I NEDOSTACI TEHNOLOGIJE HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA .....	46
3.4	KOMPONENTNI MATERIJALI HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA.....	47
3.5	VEZIVA.....	48

3.5.1	HIDRAULIČNA VEZIVA .....	48
3.5.2	BITUMENSKA VEZIVA .....	49
3.5.3	KOMBINACIJA HIDRAULIČNIH I BITUMENSKIH VEZIVA .....	49
3.5.4	ODABIR VEZIVA .....	50
<b>3.6</b>	<b>PROJEKTOVANJE PRETHODNE MEŠAVINE .....</b>	<b>51</b>
3.6.1	OBRADA UZORAKA .....	51
3.6.2	ISPITIVANJE RAP-A .....	52
3.6.3	GRANULOMETRIJSKI SASTAV .....	52
3.6.4	IZBOR VEZIVA .....	54
3.6.5	PRETHODNA MEŠAVINA .....	54
<b>3.7</b>	<b>MEHANIČKE KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH MEŠAVINA .....</b>	<b>58</b>
3.7.1	BITUMENOM STABILIZOVANI RECIKLIRANI MATERIJALI IZ FLEKSIBILNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA .....	60
<b>3.8</b>	<b>DIMENZIONISANJE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA .....</b>	<b>86</b>
3.8.1	DIMENZIONISANJE POMOĆU KATALOGA KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA .....	87
3.8.2	CBR METODA ZA DIMENZIONISANJE .....	90
3.8.3	METOD INSTITUTA ZA ASFALT .....	90
3.8.4	AASHTO METODA .....	92
3.8.5	METODA DIMENZIONISANJA HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA U VELIKOJ BRITANJI .....	94
3.8.6	MEHANIČKE METODE DIMENZIONISANJA HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZA .....	101
<b>3.9</b>	<b>MEHANIČKE KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA .....</b>	<b>101</b>
<b>3.10</b>	<b>KRITERIJUMI ZA HLADNO RECIKLIRANE KOMPONENTNE MATERIJALE NA LICU MESTA .....</b>	<b>104</b>
<b>4</b>	<b>KOMPONENTNI MATERIJALI KORIŠĆENI U SOPSTVENOM EKSPERIMENTALNOM ISTRAŽIVANJU .....</b>	<b>106</b>
4.1	UZORKOVANJE I POREKLO KOMPONENTNIH MATERIJALA .....	106
4.2	RAP – STRUGANI ASFALJNI KOLOVOZ .....	107
4.3	DROBLJENI KAMENI AGREGAT 0/22MM, KAMENOLOM KOVILOVAČA, DESPOTOVAC .....	109
4.4	CEMENT CEM II 32.5R, CEMENTARA: "LAFARGE", BEOČIN .....	111
4.5	BITUMENSKA EMULZIJA KP 60 (C-60), "VIALIT", AUSTRIJA .....	111
<b>5</b>	<b>REALIZACIJA SOPSTVENOG EKSPERIMENTALNOG DELA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>112</b>
5.1	PLAN, ALGORITAM I PROGRAM INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA .....	112
5.2	PRIPREMA UZORAKA .....	114
5.2.1	PRETHODNA MEŠAVINA OD 100% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM .....	114
5.2.2	PRETHODNA MEŠAVINA OD 50% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM + 50% RAP .....	115
5.2.3	PRETHODNA MEŠAVINA OD 20% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM + 80% RAP .....	116
<b>6</b>	<b>PRIKAZ REZULTATA EKSPERIMENTA .....</b>	<b>119</b>
6.1	PRVI DEO EKSPERIMENTA – ISPITIVANJE FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA, PRITISNA ČVRSTOĆA I ITS .....	119
6.2	ANALIZA SA STATISTIČKOM OBRADOM REZULTATA .....	124
6.2.1	PREDMET STATISTIČKE OBRADU .....	124
6.2.2	HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA .....	125
6.2.3	METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....	125
6.2.4	ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE DK .....	128
6.2.5	ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE CEMENTA .....	135

6.2.6	ANALIZA RAZLIKA UČEŠĆA CEMENTA U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE .....	138
6.2.7	ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE RAP-A .....	143
6.2.8	ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE BITUMENSKE EMULZIJE .....	150
6.2.9	ZAVRŠNA RAZMATRANJA .....	157
<b>6.3</b>	<b>PARCIJALNI ZAKLJUČCI I DISKUSIJA REZULTATA PRVOG DELA EKSPERIMENTA .....</b>	<b>161</b>
<b>6.4</b>	<b>USVOJENE OPTIMALNE MEŠAVINE ZA SPROVOĐENJE DRUGOG DELA EKSPERIMENTA .....</b>	<b>163</b>
<b>6.5</b>	<b>DRUGI DEO EKSPERIMENTA – ISPITIVANJE FUNDAMENTALNIH MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA .....</b>	<b>164</b>
6.5.1	METODOLOGIJA ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ZAMOR .....	164
6.5.2	REZULTATI ISPITIVANJA – OTPORNOST NA ZAMOR PREMA EN 12697-24 .....	171
<b>6.6</b>	<b>PARCIJALNI ZAKLJUČCI I DISKUSIJA REZULTATA DRUGOG DELA EKSPERIMENTA .....</b>	<b>184</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>188</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>193</b>

# 1 UVOD

## 1.1 DEFINISANJE I OPIS PREDMETA (PROBLEMA) ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja u okviru ove doktorske disertacije je analiza mogućnosti primene agregata koji se dobija postupkom hladnog recikliranja asfalta (RAP), kao komponentnog materijala za dobijanje novog nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija sa ciljem definisanja međusobne zavisnosti odnosno korelacije, određenih mehaničkih karakteristika mešavine u funkciji vrste i količine komponentnih materijala.

Optimizacija sastava novog nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija, kojoj prethodi analiza obimnih eksperimentalnih istraživanja baziraće se na mehaničkim karakteristikama.

Mešavine će se spravljati upotrebom cementa i bitumenske emulzije kao veziva.

Projektovanje kolovoznih konstrukcija se danas odvija na dva načina, empirijskim i mehanističkim pristupom. Sve veća primena mehanističkog pristupa projektovanju odnosno dimenzionisanju recikliranih kolovoznih konstrukcija zahteva kao neophodno poznavanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih materijala. Kod sprovođenja proračuna trajnosti kao neophodnost se podrazumeva poznavanje zakonitosti zamora recikliranog materijala u merodavnom nosećem sloju u kolovozu. Posledično, istraživanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih materijala se danas intenzivno vrše u mnogim nacionalnim laboratorijama i postrojenjima za ubrzano opterećivanje i ispitivanje trajnosti kolovoza. Laboratorijsko ispitivanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika, zamora i modula, zahteva sprovođenje dugotrajnih laboratorijskih opita koji često nisu dostupni ili ih u datom momentu nije moguće sprovesti.

Postupak mehanističkog pristupa dimenzionisanju recikliranih kolovoza će postati primenljiviji i u svakom slučaju uspešniji ukoliko se definišu međusobne zavisnosti i korelacije između mehaničkih karakteristika koje se dobijaju kao rezultat sprovođenja "jednostavnijih" odnosno brzih opita čija je primena široko raspostranjena (*pritisna čvrstoća, indirektna zatezna čvrstoća*) i fundamentalnih mehaničkih karakteristika (*"zamor" i "moduli"*).

Za izvođenje sopstvenog eksperimentalnog istraživanja pripremiće se uzorci sa različitim učešćem struganog asfalta (RAP) i dodatnog - "novog" drobljenog kamenog agregata. Variranjem učešća struganog asfalta i dodatnog drobljenog kamenog agregata i variranjem učešća oba veziva omogućeno je praćenje uticaja sastava na mehaničke karakteristike mešavine dok će se sa druge strane kroz variranje sadržaja cementa i bitumenske emulzije sagledati uticaj vrste i količine upotrebljenog veziva na mehaničke karakteristike nosećeg sloja kolovoza.

## 1.2 OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA

Potrebe za izvođenjem istraživanja se prvenstveno ogledaju u neophodnosti poznavanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika hladno recikliranih slojeva kolovoza sa ciljem primene mehanističkog postupka projektovanja kolovoznih konstrukcija u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Definisanje otpornosti na zamor i modula recikliranih slojeva kolovoza će takođe omogućiti korišćenje priznatih softverskih paketa za mehanističko projektovanje kolovoznih konstrukcija.

Ostvarenje postavljenog cilja istraživanja podrazumeva rešavanje sledećih kompleksnih zadataka:

- Definisane uticaja međusobnog odnosa učešća komponentnih materijala (strugani asfalt i drobljeni kameni agregat) na mehaničke karakteristike mešavine sa određenim sadržajem veziva,
- Definisane uticaja učešća veziva (pojedinačni uticaj primenjenog veziva i njihova kombinacija) na mehaničke karakteristike mešavine sa određenim sastavom komponentnih materijala,
- Opisivanje i definisanje generalnih međusobnih zavisnosti variranih parametara sastava i mehaničkih karakteristika mešavine,
- Određivanje međusobne zavisnosti i korelacija mehaničkih karakteristika "pritisna čvrstoća i ITS" i "zamora i modula" na uzorcima nakon 28 dana.

### **1.3 CILJ ISTRAŽIVANJA SA NAGLASKOM NA REZULTATE KOJE SE OČEKUJU**

Cilj istraživanja u ovom radu je definisanje međusobne zavisnosti odnosno korelacije određenih mehaničkih karakteristika u funkciji vrste i količine pojedinih komponentnih materijala (RAP i drobljeni kameni agregat) i veziva (cement i bitumenska emulzija) koje će omogućiti mehanistički pristup projektovanju recikliranih kolovoznih konstrukcija.

Dostizanje postavljenog cilja zasnivaće se na rezultatima parcijalnih istraživanja koja će se odnositi na određivanje sledećih uticaja sastava na mehaničke karakteristike mešavine:

- Učešće komponentnih materijala (strugani asfalt i drobljeni kameni agregat) i njihovog međusobnog odnosa,
- Učešće veziva (cement i bitumenska emulzija), samo cement i zajedno u različitim iznosima.

Rezultati ispitivanja različitih tipova mešavina će biti sagledani i sa aspekta fizičko mehaničkih karakteristika budućeg nosećeg sloja u kolovozu. Jedan od zaključaka istraživanja će biti i definisanje mogućnosti primene analiziranih mešavina u novim kolovoznim konstrukcijama sa aspekta dobijanja zahtevanih mehaničkih karakteristika.

### **1.4 NAUČNE METODE KOJE ĆE BITI PRIMENJENE**

Koristiće se naučne metode istraživanja primerene ciljevima i zadacima ovog rada. To pretpostavlja prvenstveno prikupljanje relevantne literature i upoznavanje sa dostignutim nivoom istraživanja predmetne problematike. Naučna analiza rezultata, podataka i informacija biće postavljena na način da omogući potpunu spoznaju o postojećem stanju stvari.

Analiza rezultata istraživanja drugih autora u ovoj oblasti, pretstavljaje osnovu za definisanje polaznih hipoteza i planiranje sopstvenog eksperimentalnog istraživanja.

Prilikom istraživanja u ovom radu primenjivaće se induktivno deduktivni metod sastavljen iz sledećih faza:

- definisanje ciljeva istraživanja i radnih hipoteza, koje će omogućiti izvođenje validnih zaključaka,
- realizaciju sopstvenog eksperimentalnog istraživanja (eksperimentalna metoda) i analiza dobijenih rezultata (statističke metode, odnosno teorija verovatnoće i korelacije).

## 1.5 SADRŽAJ DOKTORSKE DISERTACIJE

Doktorska disertacija je sačinjena od 10 poglavlja.

Poglavlje 1 predstavlja opis predmeta odnosno problema istraživanja i obrazloženje o potrebama istraživanja sa opisom osnovnih ciljeva i očekivanih rezultata. Navedene su i naučne metode koje će se primenjivati i dat je kratak opis sadržaja i svakog od poglavlja disertacije.

U Poglavljima 2 i 3 prikazan je sveobuhvatan pregled aktuelne literature koja se odnosi na problem istraživanja. U Poglavlju 2 izvršena je analiza recikliranja kolovoznih konstrukcija sa prikazom rastućih potreba za recikliranjem u svetu, bilansa iskustva i količina, društvene i zakonske podrške recikliranju sa osvrtom na tehničke mogućnosti, koncept primene i karakteristike metoda hladnog recikliranja sa klasifikacijom postupaka recikliranja, prednosti i mana tehnologije hladnog recikliranja, a sve sa ciljem jednoznačnog svrstavanja predmeta istraživanja u odgovarajući kontekst. U Poglavlju 3 dat je detaljan pregled raspoložive literature i trenutnog stanja saznanja o komponentnim materijalima, vezivima, prethodnim mešavinama i fizičko mehaničkim i fundamentalnim mehaničkim karakteristikama recikliranih materijala.

U Poglavlju 4 prikazani su komponentni materijali koji su korišćeni za eksperimentalno istraživanje sa rezultatima svih obavljenih laboratorijskih ispitivanja komponentnih materijala i samih mešavina.

Poglavlje 5 predstavlja opis izvedenog eksperimentalnog istraživanja i sadrži prikaz svih ključnih faza. Opisan je plan, algoritam i program inženjerskog eksperimenta sa detaljnim opisom načina priprema uzoraka koji su specificirani po vrsti i količini za dalje potrebe izvođenja eksperimenta.

Poglavlje 6 predstavlja kompletan prikaz rezultata izvedenih eksperimentalnih istraživanja. Prikazani su rezultati Prvog dela – ispitivanja fizičko mehaničkih karakteristika pripremljenih mešavina i Drugog dela – ispitivanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika pripremljenih mešavina tokom eksperimentalnog istraživanja. U poglavlju 6, nakon Prvog dela eksperimenta prikazani su rezultati obrade podataka odgovarajućim matematičko – statističkim postupcima u skladu sa temom istraživanja. Vođeno je računa da se što je moguće manje izgube informacije do kojih se došlo u toku istraživanja. Redosled primene postupaka je od izuzetne važnosti kako za zaključivanje tako i za blagovremenu eliminaciju i uključivanje pojedinih obeležja, koja će omogućiti kvalitetnije istraživanje. Analiza je sprovedena u tri koraka i to: testiranje hipoteza o sličnostima ili razlikama, određivanjem mere razlika sa definisanjem karakteristika i grafičkim prikazom. Prikazani su i parcijalni zaključci sa diskusijom rezultata prvog i drugog dela sopstvenog eksperimentalnog istraživanja.

U Poglavlju 7 su prikazana zaključna razmatranja i mogući pravci za dalje istraživanje.

Poglavlje 8 predstavlja prikaz korišćene literature.

## **2 SADAŠNJE STANJE U PODRUČJU HLADNOG RECIKLIRANJA ASFALTNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA**

### **2.1 RASTUĆE POTREBE ZA RECIKLIRANJEM KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA**

Pretpostavke opšteg, a posebno ekonomskog razvoja čovečanstva, istorijski su se zasnivale na razvoju transporta i putnih saobraćajnih sistema. Masovno investiranje u izgradnju dovelo je do velikog razvoja putnih mreža u brojnim zemljama sveta. Enormni i kontinuirani rast broja transportnih vozila na putevima i njihovih osovinskih opterećenja, zahtevali su neprekidno prilagođavanje izgrađenih kapaciteta puteva i kolovoznih konstrukcija. Posledice su bile evidentne u povećanju debljina kolovoza i shodno tome, u ubrzanom povećanju korišćenja i inače velikih količina prirodnih materijala i veziva.

U takvim okolnostima ekonomski razlozi za recikliranjem postojećih kolovoza bili su posebno značajni krajem 1970 g. Javili su se, tada, kao posledica više naftnih šokova, koji su prouzrokovali enormno povećanje cene bitumena. U današnje vreme, zahtevi za zaštitom prirodne sredine, potpuno valorizovanje prirodnih resursa i poboljšanje uslova življenja, postali su preduslovi održivog razvoja, čiji je osnovni stav definisan tako, da se sadašnjim ljudskim aktivnostima ne sme ugroziti budućnost novih generacija i njihov dalji razvoj. UN su 1992 g. ustanovile program takvog razvoja za ovaj vek. U odnosu na kolovozne konstrukcije osnovni ciljevi tog programa pretpostavljaju dugoročnu potrebu štednje kamenih materijala-agregata i drugih prirodnih sirovina, što bi se moglo postići izborom adekvatnih tehničkih rešenja, uključujući i recikliranje, kada god je to moguće.

Posledično, u brojnim zemljama sveta doneti su zakoni i tehnički propisi kojima se nalaže obavezna valorizacija postojećih materijala u kolovozima i ograničenje dodavanja "novih", materijala pri njihovom održavanju, rekonstrukciji i rehabilitaciji. Svuda po svetu, a posebno u Evropi, svedoci smo evolucije recikliranja koja, pri tom, vodi računa o ciljevima održivog razvoja: kvalitet, bezbednost, okolina (Q,S,E).

Recikliranje kolovoznih konstrukcija je tako postalo poželjno i nužno, ali je za njegovu primenu bilo potrebno razviti izvodljiva tehnička rešenja. Aksiom tog razvoja zasnovan je na cilju obezbeđenja ponovnog korišćenja materijala, na način, da oni odgovore zahtevima predviđenog životnog veka, uz minimum dodavanja novih materijala. Na ovim ciljevima do sada razvijena tehnička rešenja se mogu, generalno, grupisati kao "topli" i "hladni" postupci, koji se izvode na "licu mesta" ili u "centralnom postrojenju". U okviru ovih grupa nalaze se brojne tehničke mogućnosti, a najnovije tehnologije omogućavaju korišćenje čak 90% recikliranih asfaltnih materijala u novim asfaltnim slojevima. Taj proces, zbog svoje velike kompleksnosti, nije još široko korišćen. Kod uobičajenih postupaka procenat je mnogo skromniji. Međutim, budući da su rapoložive količine asfaltnih slojeva velike, nema sumnje da će dalji razvoj tehnologija recikliranja obeležiti naponi za obezbeđenje kvalitetnog recikliranog asfaltnog sloja, uz visoko proporcionalno učešće postojećeg materijala.

Nevezani materijali donjih i gornjih nosećih slojeva asfaltnih kolovoznih konstrukcija mogu se ponovo koristiti bez većih poteškoća. Ta laka mogućnost je donekle ograničena, budući da je ponovno korišćenje, u nekim zemljama, limitirano specifikacijama koje zahtevaju nove materijale, ali i zbog nedostatka garancije o obezbeđenju zahtevanog kvaliteta pri novogradnji.

Bitna evidentirana činjenica, koja osnovnu pretpostavku primene rezultata istraživanja iz ovog rada, pokazuje da se sve razvijene tehnologije, kao i one koje će se tek razviti, ne



mogu koristiti i primenjivati automatski u svim, različitim, stanjima asfaltnih kolovoznih konstrukcija i lokalnim uslovima. Dakle, ne postoji generalni recept. Optimalno tehničko rešenje recikliranja, pored tehničkih kvaliteta, moralo bi, u konkurenciji sa ostalim tehničkim merama, biti i ekonomski opravdano.

Sa druge strane, svaka pretpostavka projektovanja i izvođenja recikliranja trebalo bi da bude zasnovana na preciznim i metodološki jednoznačno određenim prethodnim, istraživanjima. Njihovi rezultati bi predstavljali osnov svake odluke. Donosioci odluka se, u ovom slučaju, nalaze na nivou administrativnih - upravljačkih funkcija (Investitor) i tehničkih struktura (Projektant – Laboratorija, Izvođač, Nadzor).

Ovo poglavlje prikazuje bitne odrednice stadašnjeg stanja u oblasti recikliranja asfaltnih kolovoznih konstrukcija, onako kako je evidentirano u raspoloživoj literaturi i informacijama o sakupljenim iskustvima zemalja širom sveta. Iz tih informacija je jasno da recikliranje ima značajne prednosti koje se, prvenstveno, ogledaju u ispunjavanju opšte prihvaćenih ciljeva u pogledu minimiziranja upotrebe prirodnih resursa, što promovise recikliranje kao opciju u održavanju, rehabilitaciji i rekonstrukciji kolovoznih konstrukcija. Međutim, isto tako, uočavaju se i prepreke njegovom daljem razvoju i implementaciji koje se ogledaju u nedostatku svesti, zakonodavstva, odgovarajućih metoda ispitivanja, kontrole kvaliteta i standarda i specifikacija. Uspesna iskustva raznih zemalja, preporučuju, u tom smislu sledeće mere za njihovo prevazilaženje:

- ohrabrivanje putnih administracija da propisima i drugim sredstvima obezbede rešenja sa ciljem zaštite životne sredine pri projektovanju,
- povećavanje informacija o primeni recikliranja i dobrim primerima iz zemalja gde se ono već decenijama koristi,
- izdavanje priručnika, standarda i specifikacija kao podrške implementacije tehnika recikliranja,
- ustanovljavanje zakonskih podsticaja za recikliranje, kao što je porez za deponovanje ili porez na korišćenje novih prirodnih agregata.

Još tokom 2002. "Svetski samit o održivom razvoju" pri Ujedinjenim nacijama održan u Johaneshburgu fokusirao je pažnju svetske javnosti na teške izazove u pogledu poboljšanja standarda ljudi i konzerviranju prirodnih resursa pred sve većim porastom populacije i povećanom tražnjom za hranom, vodom, sanitarnim objektima, energijom, transportom, zdravstvenim uslugama i ekonomskom bezbednošću. U tom smislu putna privreda je kao najvažnije razloge za recikliranje i korišćenje alternativnih materijala evidentirala smanjenje otpada i očuvanje prirodne okoline za buduće generacije. Na potrebe održivog razvoja, putne administracije širom sveta su odgovorile povećanjem upotrebe tehnika za recikliranje i povećanom upotrebom recikliranih agregata. Time se obezbeđuje uravnotežena izgradnja kolovoznih konstrukcija i efikasna upotreba materijala. Povećanje količine recikliranja i upotrebe alternativnih materijala će uravnotežiti taj razvoj, smanjiti potražnju za primarnim agregatima, smanjiti njihov transporta i loš uticaj na okolinu. Anketa AIPCR-PIARC o recikliranju i ponovnoj upotrebi materijala iz kolovoza pokazala je rezultate prikazane u tabeli 1. [1], [2], [3]

**Tabela 1** Pregled stanja i aktivnosti recikliranja u zemljama članovima u AIPCR - PIARC [2]

Znanje	Aktivnosti	Zemlje koje recikliraju materijale iz postojećih kolovoza	Zemlje koje upotrebljavaju alternativne otpadne materijale u kolovozima
Nema	Nema	-	Austrija, Hrvatska, Estonia, Litvanija,
Malo	Nema	-	Južna Afrika
Malo	Ograničene	Burkina Faso, Hrvatska, Portugalija	Australija, Kanada, Nemačka, Italija, Portugalija, Švajcarska,
Intenzivno	Ograničena količina, srazmerno znanju u stručnoj javnosti.	Australija, Kanada-Québec, Italija, Južna Afrika, Engleska	Japan*, Engleska, Južna Afrika
Intenzivno	Intenzivno	Austrija, Australija, Estonija, Nemačka, Japan, Litvanija, Holandija, Južna Afrika, Švajcarska	Holandija
Intenzivno	Nema	Podsticaj i podrška	-

\* Japan veruje da je u stanju da koristi mnogo više alternativnih otpadnih materijala u građenju kolovoza nego što mu je navedena pozicija u tabeli.

## 2.2 BILANS ISKUSTVA I KOLIČINA

### 2.2.1 BILANS KOLIČINA

Bilansi korišćenja recikliranih asfaltnih slojeva u pojedinim zemljama pokazuju visoko učešće recikliranih materijala. Kao primer se, često, navodi Holandija u kojoj je količina recikliranog asfalt betona dostigla polovinu ukupne proizvodnje ovog materijala, a sličan je slučaj i u drugim evropskim zemljama. Količine ponovno korišćenih materijala iz nevezanih nosećih slojeva su još veće. U Francuskoj, količina recikliranih asfaltnih slojeva svake godine iznosi 5 mil. tona u odnosu na 40 mil. tona koji se proizvedu u centralnim postrojenjima. Oko 40 % materijala je valorizovano bez posebne obrade (u noseće slojeve, bankine itd), a 10% je integrisano u nove asfaltne slojeve. Godišnja proizvodnja asfaltnih mešavina u Evropi premašuje 270 mil. tona. Asfalt beton je, pri tom, tehnički moguće u potpunosti reciklirati. Zapaža se da je od materijala dobijenog pri radovima održavanja (struganje, rušenje itd.) koji može biti ugrađen u nove asfaltne slojeve, iskorišćen samo jedan manji deo.

U R. Srbiji je recikliranje kolovoznih konstrukcija započelo pre oko petnaestak godina, a bilansi uspešnosti primenjenih tehnologija analizirani su sa više aspekata. Do sada su primenjivane tehnologije hladnog recikliranja na licu mesta, dubokog hladnog recikliranja na licu mesta, termičkog recikliranja na licu mesta, termičkog recikliranja u centralnom postrojenju i hladnog recikliranja u centralnom postrojenju. Izvođenje sa ovim tehnologijama je vršeno na svim klasama puteva u R. Srbiji, od autoputeva do lokalne putne mreže. Zvanični podaci o količinama izvedenih radova nisu publikovani niti su dostupni na bilo koji način za potrebe analize u ovom radu. Međutim, jedno je sigurno, da dosadašnja pozitivna iskustva ukazuju na veliku potrebu za većim korišćenjem ovih tehnologija.

U Evropi godišnja proizvodnja toplih asfaltnih mešavina prelazi 270 miliona tona. Asfalt beton se, tehnički gledano, danas može kompletno reciklirati. Međutim, i ako je veći deo asfalta struganog tokom održavanja i rekonstrukcije kolovoza pogodan da se ugradi u nove asfaltne slojeve putem "toplog procesa", samo se mali deo reciklira na ovaj način. Ukupna

proizvodnja asfalta i količine raspoloživog struganog asfalta, kao i procenat toplo recikliranog asfalta u 1996. su prikazani u Tabeli 2. Količine pokazuju da postoje značajne varijacije u primeni recikliranja struganog asfalta u evropskim zemljama. Danska i Nemačka su zemlje u kojima se veliki deo asfalta iz postojećih kolovoza koristi za proizvodnju novih asfaltnih slojeva. Ipak, napravljen je veliki napredak u recikliranju fleksibilnih kolovoza. Danas, većina zemalja rutinski reciklira materijale iz postojećih kolovoza. Statistike sa drugih kontinenata pokazuju slične trendove u zemljama kao što su Japan, Kanada i Tajland.

**Tabela 2** Količina termički recikliranog asfalta u asfaltnim slojevima u Evropi 1996. godine (EAPA 1996) [1]

Zemlja	Strugani asfalt beton (miliona tona)	Toplo reciklirani asfalt beton (%)	Ukupna proizvodnja asfalta (miliona tona)
Austrija	0.50	25	6.4
Belgija	1.50	10	3.8
Hrvatska	0.04	15	1.5
Češka	0.20	30	4.5
Danska	0.27	67	3.6
Finska	0.30	50	5.2
Francuska	>1.00	25	38.0
Nemačka	15.00	80	62.0
Grčka	1.20	-	5.0
Mađarska	1.20	0	2.3
Irska	-	-	2.1
Italija	-	-	37.0
Japan*	35.70	24.9	69.9
Holandija	3.00	50	7.7
Norveška	0.50	-	4.1
Poljska	-	20-75	7.5
Portugal	Malo	<1	5.9
Rumunija*	0.60	<10	3.2
Španija	0.70**	-	27.3
Švedska	0.90	5	5.8
Švajcarska	0.60	30	4.5
UK	5.00	-	30.0
Ukrajina*	Malo	Malo	-

Legenda:

\* nije dato u pregledu u EAPA

\*\* sve je korišćeno za hladno recikliranje

Još tokom 1993. ukupna količina frezovanog asfalta iznosila je oko 2.5 miliona tona od čega je 35% bilo toplo reciklirano, a 10% hladno reciklirano. Tokom 1996. ukupna proizvodnja asfalta je bila 7.7 miliona tona i količina frezovanog asfalta se povećala za 3.0 miliona tona od čega je 50% toplo reciklirano.

Sve zemlje u kojima se obavlja recikliranje asfaltnih kolovznih konstrukcija promovišu tu tehničku meru kao ideju održivog razvoja i deo javne kulture u odgovornom nacionalnom ponašanju. Ta promocija se prvenstveno ogleda u isticanju ekonomičnosti recikliranja, a potom, u razvoju tehnologija i njihovoj inovaciji, specifikiranju laboratorijskih ispitivanja, standardizaciji postupaka i materijala i na kraju, u poštovanju zahteva zaštite životne sredine, prvenstveno kroz neposrednu zaštitu okoline i očuvanje prirodnih resursa.

Troškovi i koristi tokom građenja i održavanja asfaltnih kolovoznih konstrukcija tokom njihovog životnog veka su osnova za mnoge inicijative recikliranja u Evropi. Slobodno tržište, podrška putnih administracija i posebno struktura poreza i kaznene mere imaju, najseče,

veliku ulogu u promovisanju recikliranja. Takvi su, na primer, porezi na korišćenje prirodnih materijala u Švedskoj, Danskoj i Holandiji. Tome se mogu dodati restriktivni porezi koji se plaćaju prilikom deponovanja materijala u Holandiji, Danskoj, Francuskoj i Švedskoj kao i odrednice Direktive Evropske Zajednice za 2002. koja ograničava to deponovanje.

Sa druge strane putne administracije ohrabruju recikliranje, propisuju standade, izrađuju i definišu odgovarajuća laboratorijska ispitivanja i, na kraju, svojim izveštajima o bilansima primene ovih tehničkih mera informišu javno mnjenje. U brojnim zemljama tehničke specifikacije za reciklirane materijale pretpostavljaju ostvarivanje jednakog kvaliteta kao za prirodne materijale, a generalni koncept podrazumeva da se reciklirani materijali primenjuju da bi se ostvario njihov najbolji mogući učinak. [1], [2],

## 2.2.2 ISKUSTVA

AIPCR-PIARC je u svom dokumentu "Recikliranje postojećih fleksibilnih kolovoza" [1] dao zbirne informacije o recikliranju u putnoj privredi mnogih zemalja. Očigledno je da se na globalnom nivou recikliranje koristi u velikoj meri, a danas je u mnogim slučajevima ono i obavezno. Smatra se da je za ohrabrivanje recikliranja presudno zakonodavstvo, a da je glavna prepreka recikliranju odustvo svesti o koristima koje dugoročnom cilju o uravnoteženom razvoju donosi recikliranje asfaltnih kolovoznih konstrukcija. Promovisanje upotrebe recikliranih agregata u izgradnji kolovoznih konstrukcija bi trebalo obezbediti edukacijom koja bi upoznala merodavne sa najnovijim dostignućima u ovoj oblasti. Time bi se obezbedilo da recikliranje uvek bude opcija u održavanju, rehabilitaciji i rekonstrukciji kolovoznih konstrukcija.

Tako, na primer, Južna Afrika ima mnogo godina iskustva u recikliranju nosećih slojeva bitumenskom emulzijom, penušavim bitumenom i cementom. Korišćenje dubokog recikliranja licu mesta je dalo bogate informacije o različitim materijalima kvalitetu mešanja, sadržaju vlage, zbijanju, debljini itd. Recikliranje se pokazalo kao ekonomičan metod za rehabilitaciju kolovoza i to kako za prerano degradirane kolovoze, tako i za one koji su dostigli kraj svog životnog veka. To iskustvo je dovelo do formulisanja uputstava za projektovanje i pokazalo da je ekonomičnost važan faktor u odabiru optimalne tehničke mere. U Južno Afričkom mehaničko-empirijskom metodu projektovanja kolovoza reciklirani materijali se nalaze kao alternativa.

Recikliranje "in situ", koje se u Australiji koristi još od 1960. godine, smatra se pouzdanom tehničkom merom rehabilitacije kolovoza puteva za lak i teški saobraćaj. Recikliranje "in situ" se često odabira u slučaju potrebe izvođenja radova u kratkom vremenskom periodu. Takvo recikliranje, takođe, nudi uštede i u materijalu i transportu, i smanjuje potrebu korišćenja novih minerala. Međutim, relativno niske cene prirodnih agregata utiču na rast primene recikliranja. U tom smislu se očekuje da će skoro uvođenje odgovarajućih zakonskih odredaba o zaštiti prirodnih resursa dovesti do favorizovanja prednosti korišćenja recikliranih materijala. U Holandiji i Engleskoj politika zaštite životne sredine je dovela do uvođenja dodatnih taksi na agregate i deponije, što je doprinelo stavu da se recikliranje smatra ekonomičnom opcijom. Takođe, u Engleskoj, postoje smernice za projektovanje hladnog recikliranja. One se stalno inoviraju i ohrabruju inovacije recikliranih materijala u kolovoznim konstrukcijama što dovodi do daljeg povećanja verovanja u ukupnu uspešnost "in situ" i "ex situ" (u centralnom postrojenju) metoda i na kolovozima za teška opterećenja. Sa uvođenjem pomenutih taksi, te metode su postale ekonomski isplativije alternative od konvencionalnog pristupa.

Sprovođenje programa održavanja puteva u Austriji dovelo je do povećanog struganja asfaltnih slojeva na putevima sa teškim saobraćajem, što se reperkutovalo povećanom količinom struganog asfaltnog materijala. Njegovo korišćenje u novom sloju na licu mesta je bilo isplativije od dodatnog transporta koje bi pretpostavilo recikliranje u centralnom

postrojenju. Recikliranje nosećih asfaltnih slojeva smatra se isplativom alternativom za sve puteve sa malim obimom saobraćaja.

Iskustvo u Italiji sa termičkim recikliranjem pokazalo je da je za smanjenje negativnog efekta "plavog dima" koji nastaje pri zagrevanju recikliranog asfalta, način i mehanizam njegovog unošenja u asfaltna postrojenja veoma bitan. U svakom slučaju smatra se da je kvalitet termički reciklirane asfaltne mešavine isti kao kod konvencionalne nove asfaltne mešavine.

Slični problemi onima koji su zapaženi sa unosom recikliranog materijala u asfaltna postrojenja u Italiji, potvrđeni su i u Engleskoj. Skorašnja iskustva sa termičkim recikliranjem habajućih slojeva i njihovim korišćenjem u novi sloj iste namene, pokazala su da je takav proces moguć i da je to najbolja ponovna upotreba materijala visoke vrednosti.

Najznačajnijim faktorom koji je u Holandiji doveo do tridesetogodišnje uspešne primene recikliranja, smatra se kombinacija ekonomske i vladine politike koja je obezbedila uslove za investiranje u tehnologije recikliranja. I dalje, međutim, postoji potreba podstrekivanja istraživanja koja bi u potpunosti definisala tehnički i učinak sa aspekta zaštite životne sredine ovih materijala.

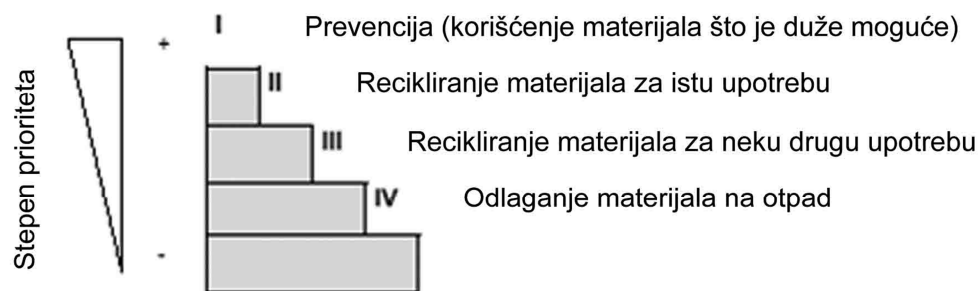
Takođe, postoje brojni primeri o uspešnom korišćenju gume iz pneumatika u izgradnji, održavanju i rehabilitaciji kolovoznih konstrukcija. Primeri SAD, Južne Afrike i Portugalije, Francuske i drugih zemalja pokazuju tu mogućnost kao zanimljivu alternativu oslobađanja od starih guma i poboljšanja mehaničkog ponašanja asfaltnih materijala. Ta iskustva govore da treba obratiti posebnu pažnju pri modifikaciji veziva kao posledice reakcije sa mlevenom gumom. Odnos između gume i novog bitumena, vreme reakcije i temperatura bitumena su presudni za ponašanje asfaltne mešavine u eksploataciji. [1], [3], [4]

## **2.3 PODRŠKA RECIKLIRANJU**

### **2.3.1 ZAHTEVI ZAŠTITE ŽIVOTNE OKOLINE I EKONOMSKI ZAHTEVI**

Zaštita životne okoline i očuvanje prirodnih resursa su zahtevi koji se danas dominantno uvažavaju kao opšti zahtev, izražen u odluci da pristup "upotrebi i baci" nije pravi put koji treba slediti. Situacija gde blagostanje jedne generacije može da negativno utiče na buduće generacije više nije prihvatljiva. Prema tome, postoje moralne obaveze da se dalje zagađivanje i osiromašenje okoline svede na minimum. Pri izgradnji asfaltnih kolovoza se koriste ogromne količine prirodnog materijala. U Evropi, godišnja proizvodnja (novog + starog) asfalt betona iznosi preko 270 miliona tona. Milioni tona prirodnih materijala iz nezvanih nosećih slojeva i posteljice se takođe koriste za izradu nosećih slojeva. Sa stanovišta okoline i ograničenja korišćenja prirodnih resursa, recikliranje predstavlja najpoželjnije rešenje. Suprotno, odluke da se materijali iz kolovoza ne recikliraju dovele bi do nepotrebnog gubitka značajnih količina materijala kao što su bitumen, šljunak, drobljeni kamen i pesak. Istovremeno, značajne površine zemljišta bi bile zauzete skladištenjem ovog otpadnog materijala.

Ekonomska razmatranja, zajedno ekološkim takođe deluju stimulatивно na sve veće korišćenje recikliranih materijala iz asfaltnih kolovoznih konstrukcija. Ti združeni zahtevi dovode do "zatvorenog građevinskog kruga" koji je ilustrativno prikazan na slici 1.



**Slika 1** Stepenasti koncept (Koncept lestvica) [1]

Očigledno je da se danas planiranje budućih nabavka agregata i veziva mora razmatrati u kontekstu održivog razvoja. Očekuje se, takođe, da će propisi koji se odnose na eksploataciju mineralnih izvora i proizvodnju veziva postati restriktivniji.

Koncept lestvica sa slike 1 je široko rasprostranjen. Prema njemu, treba učiniti napor da se građenje novih kolovoznih konstrukcija sprovodi sa najkvalitetnijim materijalima, što bi trebalo da im obezbedi najduži životni vek. U momentu rekonstrukcije, ti materijali bi se reciklirali sa identičnim svojstvima onim u originalnoj kolovoznoj konstrukciji. Ako to, iz nekih razloga ne bi bilo moguće, poželjna je njihova ponovna upotreba za neku drugu namenu (slabija namena) na primer u nevezanim ili vezanim nosećim slojevima kolovoza. Takav pristup obezbeđuje da se samo ograničena količina postojećeg materijala deponuje. Ta opcija je manje prihvatljiva sa aspekata zaštite životne sredine i ekonomičnosti i treba je izbeći uvek kada je to moguće. "Koncept lestvica" se koristi u mnogim zemljama, a naročito u onima koje i inače imaju nedostatak prirodnih materijala. Tako je na primer u Holandiji objavljena namera iskazana u "Memorandumu o prevenciji" kojom se postepeno povećava procenat recikliranih materijala kolovoza. Već tokom 2000. godine je čak 90% materijala iz kolovoza ponovno upotrebljeno odnosno reciklirano.

### 2.3.2 EDUKACIJA

Odsustvo edukacije, obaveštenja javnosti i ukupne svesti o svrsishodnosti recikliranja se u mnogim zemljama smatra glavnom preprekom za primenu ovih tehničkih mera. Zbog toga je ohrabrivanje recikliranja prvenstveni zadatak, prihvaćen u mnogim zemljama. Dokument "Osnovni zakon za osnivanje udruženja za recikliranje 2000" pokazuje koliko se, na primer, u Japanu recikliranje ozbiljno shvata i ukazuje na nameru da se Japan od "potrošačkog društva" usmeri ka "društvu baziranom na recikliranju". U Engleskoj je 2002 godine Odeljenje za trgovinu i industriju je preuzelo veću odgovornost za promovisanje održivog razvoja u engleskoj industriji. To je, potom, dovelo do toga da se odmah zatim, 2002/2003 godine, donese dokument "Održiva izgradnja u putnoj praksi - SCiP", a potom 2003/2004 i "SCiP 2", dokument "Korišćenje recikliranih i sekundarnih agregata u građevinarstvu". Tokom 2005. godine izdat je "SCiP 3" dokument o valorizovanju vrednosti materijala tokom celokupnog života u infrastrukturi i građevinarstvu. "SCiP 4" u 2006. prikazuje primere uspešnog recikliranja širom Engleske. Pored ovoga, postavljeno je i nekoliko internet sajtova koji pružaju informacije o recikliranim i sekundarnim agregatima. Od 2001. godine Agencije za autoputeve i industriju izdaje rezultate učinka recikliranja koji su publikovani 2004. godine kao SMART projekat (Sustainable Maintenance of roads using cold Recycling Techniques – Održivo održavanje puteva korišćenjem tehnika za hladno recikliranje).

U Kanadi u Kvebeku izdaje se posebna dokumentacija koja ima za cilj isticanje najbolje prakse u projektovanju, izgradnji i kontroli kvaliteta pri recikliranju kolovoza. Ministarstvo transporta je izdalo čitav niz smernica, standarda, specifikacija i uvelo neprestanu obuku kadrova. Smatra se da je upravo publikovanje standarda i specifikacija bio najvažniji korak u implementaciji i promovisanju recikliranja. Takođe su prikupljeni i objavljeni podaci o test deonicama koje su imle najuspešnije rezultate primene različitih tehnika i metoda recikliranja.

U Australiji udruženja, AAPA (Australijsko udruženje za asfaltne kolovoze) i Austroads (Udruženje australijskih i novozelandskih transportnih i saobraćajnih vlasti) promovišu recikliranje materijala kolovoza putem publikovanja smernica i materijala za obuku.

Estonija se uzima kao primer zemlje u kojoj je vlada probijala put recikliranju. Ta zemlja ima veoma malo agregata pogodnih za izgradnju kolovoznih konstrukcija, a uz to, posle dobijanja nezavisnosti 1990. godine i vrlo malo novca za uvoz pogodnih novih prirodnih agregata. Iz toga je proizašlo da je najekonomičniji način poboljšanja putne mreže upravo recikliranje kolovoznih konstrukcija. Razvijene su nove tehnologije recikliranja i sada se skoro svi materijali iz postojećih kolovoznih konstrukcija rutinski recikliraju.

U Danskoj je odavno dat prioritet recikliranju kolovoznih konstrukcija. Svojevremeno je Holandija izvela sveobuhvatni istraživački program o ponovnoj upotrebi i recikliranju materijala, uključujući u to obuku kadrova, transfer znanja, seminare i smernice.

### 2.3.3 ZAKONODAVSTVO

U skladu sa opštim ciljevima koji podstiču recikliranje Japan je doneo "Zakon o recikliranju građevinskog materijala" kojim posebno ohrabruje recikliranje kolovoza. U Kanadi u Kvebeku, Ministarstvo za životnu sredinu i održivi razvoj donelo je pravila po kojima je potrebno smanjiti broj deponija. Otvaranje novih deponija će biti samo izuzetno dozvoljeno, a zahtevi za zaštitom životne sredine će biti znatno pooštreni. To će povećati troškove deponovanja otpada i, kao posledicu, imati podsticanje ponovne upotrebe putnih materijala i razvoju metoda recikliranja.

U Australiji, takođe, većina lokalnih vlada naplaćuje visoke takse za deponovanje otpada, ali ne postoji zakon koji bi forsirao ponovnu upotrebu materijala iz kolovoza i drugog otpada u izgradnji puteva. U Engleskoj je uvođenje taksi za deponovanje i taksi za korišćenje novih agregate dalo podstrek recikliranju. Slično je i u Holandiji gde je ekonomski "nivo" uspostavljen uvođenjem visokih troškova deponovanja i/ili zabranom deponovanja. U ovoj zemlji je, generalno, recikliranje prva opcija u projektima rehabilitacije i rekonstrukcije kolovoznih konstrukcija. U Holandiji, kao i u Engleskoj, specifikacije zasnovane na ukupnom učinku daju veću slobodu za inovacije i uvođenje sekundarnih i alternativnih materijala u građevinarstvu.

U Nemačkoj se koristi 100% recikliranog materijala iz postojećih kolovoznih konstrukcija. Ovo se postiže korišćenjem različitih metoda recikliranja, kao što je remix, i drugim pogodnim metodama recikliranja vezanih i nevezanih slojeva kolovoza. "Zakon o cirkulisanju otpada" i "Smernice za primenu podobnih recikliranih materijala u putnoj privredi sa aspekta zaštite životne sredine" se primenjuju u svim ugovorima između javnih i privatnih investitora i izvođača. Propisi zahtevaju ponovno korišćenje resursa i taj zahtev je uključen u tendersku dokumentaciju. Uslovi za ponovnu upotrebu i procenat dodavanja recikliranih materijala u vezanim i nevezanim slojevima kolovoznih konstrukcija su regulisani po pojedinačnim Federalnim državama i mogu biti neznatno različiti.

### 2.3.4 ISTRAŽIVANJA

Skoro u svim zemljama sveta se istražuje primerenost klasičnih metoda laboratorijskih i terenskih ispitivanja materijala kolovozne konstrukcije sa stanovišta pogodnosti i adekvatnosti njihove primene na reciklirane materijale asfaltnih kolovoznih konstrukcija. Uz usavršavanje i prilagođavanje klasičnih metoda laboratorijskog ispitivanja u te svrhe, identifikuju se, razvijaju i formulišu da sada nekorišćene ispitne metode koje bi, kako se veruje, pouzdanije procenile kvalitete recikliranih materijala u eksploataciji reciklirane kolovozne konstrukcije.

Istraživački projekat CEDR finansiran od strane Danske, Nemačke, Finske, Irske, Holandije i Norveške kao deo internacionalnog putnog istraživačkog programa, u 2012. godini kao temu je izabrao *Recikliranje: Građenje puteva u društvu post fosilnih goriva*.

U Švedskoj takva istraživanja zajednički vode VTI i SGI u saradnji sa npr. ALT-MAT programom. Istraživanja se odnose na utvrđivanje relacija između rezultata laboratorijskih ispitivanja i stvarnog učinka na terenu. Jedan od ciljeva je i razvoj funkcionalnijih opita koji bolje odražavaju stvarni učinak recikliranih materijala i smanjenje oslanjanja na empirijska merenja koja, možda, nisu zadovoljavajuća za reciklirane materijale. Drugi cilj je bolja karakterizacija inženjerskih svojstva recikliranih materijala u pogledu uticaja na životnu okolinu. Sva ova istraživanja koriste simulator za ubrzano ispitivanje kolovozne konstrukcije pod delovanjem opterećenja koji je konstruisan u Južnoj Africi, a u zajedničkom je vlasništvu sa Finskim VTT-om, i uređaje kao što su FWD, deflektograf, simulator teških vozila HVS, laserski tester kolovozne površine, i drugu opremu, a obavljaju se i opsežna istraživanja zakona zamora materijala ispitivanjima direktne i indirektno čvrstoće na zatezanje, dinamička triaksijalna ispitivanja itd.

U Nemačkoj se istraživanja obavljaju pod vođstvom Bundesanstalt für Straßenwesen (Nemački federalni institut za ispitivanje autoputeva - BASt). Ona uključuju laboratorijska ispitivanja, ponašanje konstrukcije na simulatoru ubranog opterećenja i osetljivosti na mraz. U tom smislu se grade test deonice sa recikliranim materijalima na kojima se simulira opterećenje, uticaj podzemne vode i promena temperaturnih ciklusa da bi se na ubrzan način procenili efekti ciklusa mržnjenje-kravljenje.

U skladu sa impresivnim količinama primene recikliranih materijala, impresivan je i proces razvoja tehničkih specifikacija i smernica za njihovu primenu, koji je nastao kao posledica obimnih istraživanja adekvatnosti pojedinih laboratorijskih ispitivanja. Specifikacije se baziraju na osnovnim svojstvima materijala, ali kao u Švedskoj i Danskoj, i u Holandiji se smatra da tradicionalni opiti koji se koriste za procenu svojstava prirodnih materijala nisu, u svakom slučaju, pogodni za mnoge reciklirane materijale i proizvode od njih. Smatra se, na primer, da Marshall-ov test nije prilagođen određivanju fundamentalnih mehaničkih svojstava reciklirane asfaltne mešavine. U nekim slučajevima je ponašanje recikliranih materijala bilo bolje nego što se iz rezultata ovog opita moglo očekivati. Zbog toga je osnovni cilj istraživanja koja se aktuelno obavljaju, utvrđivanje valjanosti klasičnih laboratorijskih ispitivanja i razvoj novih adekvatnih metoda laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Francuska ima dugu istoriju korišćenja recikliranog materijala u asfaltnim kolovoznim konstrukcijama, a u današnje vreme se reciklira više od 2.0 miliona kvadratnih metara asfaltnih kolovoza godišnje. I ako ima sveobuhvatne tehničke reference, specifikacije i standarde za materijale koji se koriste za izgradnju puteva koji sadže sve potrebne principe i smernice za projektovanje recikliranih asfaltnih materijala, LCPC aktivno učestvuje u ALT-MAT programu i istraživanju novih adekvatnih metoda laboratorijskih ispitivanja.

U SAD, reciklirani materijali moraju da ispune zadate specifikacije, ali se i dalje radi na usavršavanju postojećih i razvoju novih metoda laboratorijskog ispitivanja. SAD se takođe priključuju zaključcima mnogih zemljama da je znatan broj standarda i testova, kojima se karakteriše i meri učinak recikliranih materijala i njihovih proizvoda, neadekvatan. Veruje se da su potrebni funkcionalniji opiti. Takođe, kao i u SAD, mnogi veruju da sadašnji laboratorijski opiti ne mogu adekvatno da predvide ponašanje recikliranih materijala u eksploataciji. Što se zaštite životne sredine tiče, brojne nacionalne putne laboratorije razvijaju metode ispitivanja i traže adekvatne pristupe za procenu uticaja na okolinu koji se potom, unose u standardne specifikacije. Postoji opšta saglasnost da se rezultati ovih ispitivanja koriste i u proizvodnji asfaltnih baza i ostale mehanizacije koja se koristi prilikom recikliranja. [1], [2], [3]



U okviru transnacionalnog istraživačkog programa evropske konferencije direkcija za puteve (CEDR) projekat COREPASOL (*Characterization of Advanced Cold Recycled Bitumen Stabilized Pavement Solutions – Karakterizacija naprednih hladno recikliranih bitumenom stabilizovanih rešenja za kolovoze*) izvodi se tokom 2013 i 2014. godine. Ovaj projekat se ralizuje od strane internacionalnog tima Češkom Tehničkom Univerzitetu u Pragu, Univerzitet u Kassel-u, University College Dublin, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC) i industrijski partner Wirtgen GmbH. [5]

Projekat se fokusira na harmonizovanju projektovanja prethodnih mešavina hladno recikliranih bitumenom vezanih materijala u skladu sa postojećim naučnim i inženjerskim iskustvom i pristupom. Glavni cilj u ovom smislu je da se razvije i usvoji odgovarajuća metodologija projektovanja prethodnih mešavina i ispitivanja proučavanjem metoda zbijanja uzoraka, procedura negovanja i ispitivanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika. Pored ostalih tema u fokusu Projekta parcijalni rezultati koji se odnose na metodologiju zbijanja uzoraka za hladno reciklirane mešavine se ovde predstavlja.

Prateći fokus CEDR projekta se koncentrisao na istraživačke ciljeve definisane u programu za optimizaciju recikliranja kolovoza. Proučavajući evropske tehnike hladnog recikliranja kolovoza i specifične nacionalne tehničke specifikacije potrebno je napraviti odgovarajuću harmonizaciju i uvođenje koncepta projektovanja prethodne mešavine bazirane na ispitivanjima fundamentalnih mehaničkih karakteristika koje bi bile primenjive u većini EU zemalja. [5]

COREPASOL će imati u vidu i zaključke svih prethodnih evropskih projekata sa sličnom temom kao što su SAMARIS, SCORE, DirectMat, i sl.

Zaključci i rezultati bi trebali da budu primenjivi za sve varijante i vrste hladno recikliranih mešavina koje sadrže bitumenska veziva sa ostalim vezivima i alternativnim finim frakcijama. Posebno će biti obrađena i specifična alternativa upotrebe recikliranih mešavina, mešavine koje su stabilizovane samo sa hidrauličnim vezivom. Aspekt trajnosti hladno recikliranih mešavina je analiziran i postavljen kao drugi važan cilj projekta.

Postojeći fokus u praksi se odnosi samo na uticaj vode i krutost. Obe karakteristike nisu standardni deo ni u jednoj standardnoj proceduri u Evropi. Naime, kako bi se hladno recikliranje promovisalo u standardnu tehničku meru rehabilitacije mora se omogućiti da trajnost bude poznata i predvidiva. Zbog ovih razloga projekat se fokusirao na određivanje krutosti, zamora, otpornosti na pojavu pukotina i na dogotrajne efekte uticaja vlažnosti. Različiti opiti će se primenjivati i najbolji pristup će biti preporučen uključujući i preporučene kriterijumske vrednosti. To će omogućiti primenu postupka projektovanja prethodnih mešavina zasnovanog na fundamentalnim mehaničkim karakteristikama.

Detaljni ciljevi se mogu definisati prema sledećem:

- Harmonizovane napredne procedure projektovanja prethodnih mešavina koje se baziraju na tradicionalnim mehaničkim karakteristikama sa mogućnošću predviđanja ponašanja tokom eksploatacije, a koje su primenjive u svim EU zemljama,
- Uvođenje postupka projektovanja prethodnih mešavina zasnovanih na fundamentalnim mehaničkim karakteristikama za optimalnu upotrebu hladno recikliranih materijala,
- Procedure za određivanje karakteristika komponentnih materijala za upotrebu u metodama projektovanja kolovoza,
- Određivanje podobnosti za ponovljeno recikliranje sa uticajem na prethodnu mešavinu,
- Alati za verifikaciju uticaja na životnu okolinu i eventualno zagađenje i za ustanovljavanje održivosti tehnika hladnog recikliranja.

Kao što je ranije rečeno, slični istraživački ciljevi su istraživani širom sveta u poslednjih 20-tak godina. U EU u okviru 5. i 7. okvirnog programa fokus je bio na karakterizaciji hladnog recikliranja.

U slučaju prethodnih mešavina za hladno recikliranje prihvaćen je stav da nedostatak prihvaćene i harmonizovane metodologije sprečava širu primenu same tehnologije. U Direct-Mat projektu (7. FP EU) zaključeno je metodologija projektovanja prethodnih mešavina i dalje značajno varira u Evropskim zemljama.

Nekoliko činjenica je identifikovano kao ključne za potrebe budućeg istraživanja:

- Uticaj nehomogenosti i različitih veziva u recikliranoj mešavini,
- Uticaj tipa i sadržaja bitumeniziranog veziva i korektivnih materijala,
- Evaluacija različitih metodologija projektovanja prethodnih mešavina, uključujući laboratorijsko zbijanje i procedure ubrzanog negovanja, ključne fundamentalne mehaničke karakteristike, kontrola kvaliteta i ocena stanja. [6]

SCORE projekat (**S**uperior **C**Old **R**ecycling) je bio deo FP EU (2002 – 2005). Proučavani su različiti aspekti recikliranja, od karakterizacije struganih materijala do prethodnih mešavina i njihovih karakteristika. Krutost i čvrstoća kod mešavina sa emulzijom i penušavim bitumenom su ispitivane u različitim uslovima negovanja. Uticaj dodavanja malih količina cementa je istraživano. Generalno u nekim zemljama češće se dodaju količine cementa u iznosu od 3% do 5%. Istraživanje je fokusirano na licu mesta reciklirane habajuće asfaltne slojeve dok recikliranje nosećih slojeva nije posebno proučavano. [7]

Određivanje karakteristika zasnovanih na fundamentalnim mehaničkim karakteristikama za vruće asfaltne mešavine prema EN 12697 i za hidraulične stabilizacije i nevezane noseće slojeve prema EN 13286 predstavlja ključni deo funkcionalnog projektovanja prethodnih mešavina za hladno reciklirane mešavine samo u ograničenoj primeni u nekoliko zemalja. Generalno prethodna mešavina se bazira na čvrstoćama (prema EN 13286-41, 42). To predstavlja ograničavajući faktor u smislu definisanja ponašanja hladnih recikliranih mešavina kod kojih je i pritisna i zatezna čvrstoća tipična i važna. Za unapređenje metodologije projektovanja prethodnih mešavina nekoliko zemalja je razvilo nezavisno svaka za sebe strategiju razvoja:

- U Francuskoj Duriez opit se primenjuje za određivanje sadržaja šupljina i pritisnu čvrstoću kao i krutost (na 15°C, rezultirajući sa vrednostima između 1.500 – 4.000 Mpa u zavisnosti od projektovanog tipa I – IV), Eckman i Soliman (2008).
- U Velikoj Britaniji dinamički moduli krutosti, za hladne mešavine stabilizovane penušavim bitumenom, su određeni na 20°C i iznosili su oko 1.500 Mpa (Khweir et al, 2001).
- U Češkoj krutost se određuje IT-CY i 4PB opitom na različitim temperaturama i dobijaju se vrednosti od 3.500 do 4.500 Mpa (na 15°C) (Valentin, 2009).
- U Nemačkoj krutost se određuje IDT opitom sa kontinualnim opterećenjem prema EN 13286-43.
- U Portugaliji, zahtevi za hladne mešavine sa bitumenskom emulzijom se odnose na pritisnu čvrstoću negovanih uzoraka i njihovu vrednost nakon potapanja u vodu (Estradas de Portugal, 2012). Pored toga krutosti u vrednosti od 3.000 Mpa na 20°C (IT CY opit) su dobijani u nekim istraživanjima (Batista, 2004).

Pored krutosti, dodatne fundamentalne mehaničke karakteristike su ispitivane - smičuća čvrstoća i zamor u triaksijalnom uređaju u Južnoj Africi (Collings i Jenkins, 2008). Proučavano je i u SCORE projektu sa 2PB opitom (problem sa pripremom uzorka), u Češkoj sa 4PB opitom na zamor i ITT opitom na zamor (Chamot i Romero, 2009), u Portugaliji IT-CY

opitom (Estradas de Portugal, 2012) i IDT opitom u Velikoj Britaniji (Khweir et al, 2001, Fordyce i Khweir, 2002).

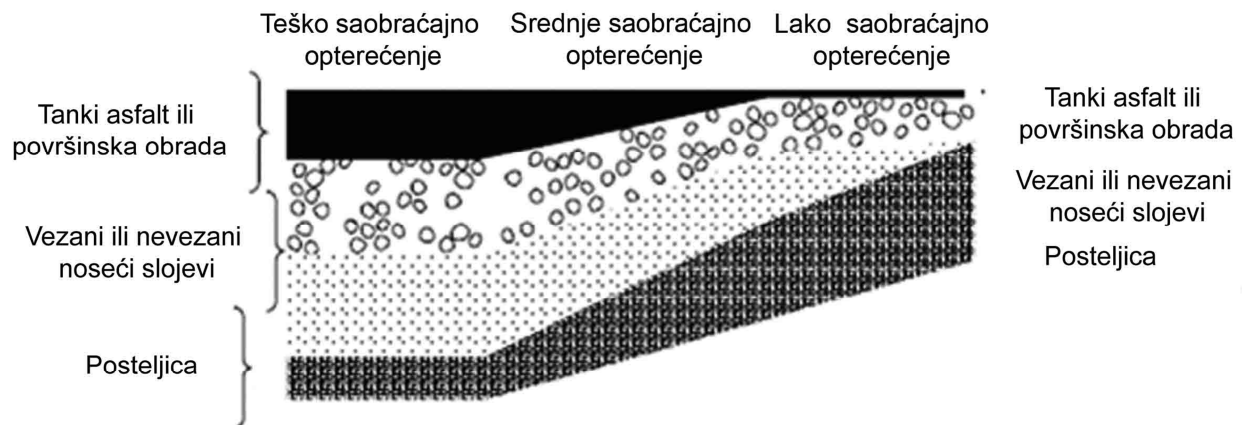
Reciklirani materijali ne ostvaruju nikakve negativne uticaje na životnu sredinu, jedino kako je moguće ostaviti određeni negativni uticaj je prolaženjem zagađene vode kroz kolovoz i reciklirani sloj. Ovaj uticaj je važan i motra biti u potpunosti ispitan u skladu sa novim propisima. Pregled i određene preporuke su prikazane u projektu SAMARIS u okviru GROWTH programa kao dela 5. FP EU. Na osnovu rada u TC292 procedure za ispitivanje su standardizovane u okviru EN 12457. Primenjene procedure ipak nisu primenjive za zbijene mešavine. Zajedničke kriterijumske vrednosti nisu definisane.

Svrha 2009 – 2011 Evropskog projekta DIRECT MAT je minimiziranje otpadnog materijala u okviru održavanja i izgradnje puteva, na Evropskom nivou, korišćenjem znanja i pozitivne prakse, povećanjem ponovne upotrebe materijala i recikliranjem. U okviru projekta radna grupa Asfaltni materijali je prikazala detaljan pregled EU regulative, trendova i stanja o recikliranju u vrućim i toplim asfaltnim mešavinama (HMA/WMA).

Na primer CEDR – Internacionalni Putni Istraživački program, 2012 – 2014, Recikliranje, obnovano od strane Danske, Finske, Nemačke, Irske, Holandije i Norveške, i drugi su se bavili sličnom tematikom, što pokazuje konstantnu aktuelnost predmetne tematike širom sveta. [7]

## 2.4 TEHNIČKE MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA

Sa osloncem na iskustva i tehnike recikliranja asfaltnih kolovoznih konstrukcija, za različita saobraćajna opterećenja, koje se koriste u brojnim zemljama sveta mogu se, u pogledu mogućnosti recikliranja uočiti njihove bitne razlike koje su prikazane na Slici 2.



**Slika 2** Raspon struktura kolovoznih konstrukcija za različita saobraćajna opterećenja [1]

Konstrukcije za teška saobraćajna opterećenja poseduju debele asfaltno slojeve (>250mm) ili hidraulički vezane slojeve. Konstrukcije za niske intezitete saobraćaja karakterišu, sa druge strane, tanki slojevi asfalta (<30mm) ili kolovozni zastori od površinskih obrada. One, takođe karakteristično, imaju jedan nevezani ili vezani noseći sloj koji je postavljen na posteljicu. U rasponu između ova dva ekstremna kolovoza, u praksi postoji bezbroj kombinacija debljine asfalta i donjih nevezanih nosećih slojeva.

Upravo i zbog razlika u materijalima i debljini slojeva, recikliranje svake pojedinačne kolovozne konstrukcije može biti značajno drugačije. Kod konstrukcije za teška opterećenja prirodno je očekivati usmerenje ka recikliranju asfaltnih slojeva, dok je u konstrukcijama za mala opterećenja, zbog male količine postojećih asfaltnih materijala, recikliranje granularnih

materijala kao i nevezanih ili vezanih nosećih slojeva, pretstavlja dominantni interes. Recikliranje bitumeniziranih materijala u nove asfaltne slojeve je od manje važnosti zbog ograničenog kvaliteta materijala, tako da je njegova ponovna upotreba kao nevezanog agregata u nosećim slojevima dominantna.

U svakom od ovih slučajeva može se očekivati i velika raznolikost kvaliteta i vrsta bitumena i agregata. S obzirom na to da se materijali iz postojećih kolovoza mogu uslovno klasifikovati u tri grupe na osnovu: a) potencijala materijala za ponovnu upotrebu u istoj kolovoznoj konstrukciji, b) potencijala za ponovnu upotrebu na drugom mestu i c) ne postojanja bilo kakve mogućnosti recikliranja, pri čemu je potrebno svesti količine otpadnog materijala na minimum.

Kod toga se ima u vidu da recikliranje postojećeg asfaltnog kolovoza uključuje recikliranje odnosno ponovnu upotrebu slojeva bitumeniziranih materijala, ali i nevezanih nosećih slojeva, pa i posteljice. Bitumenizirani materijali se mogu ponovo koristiti bilo za nove asfaltne slojeve (termičko recikliranje), bilo kao vezani ili nevezani materijal za nove noseće slojeve (hladno recikliranje). Postojeći nevezani noseći slojevi se mogu koristiti za nove vezane ili nevezane noseće slojeve, dok se, na primer pesak iz posteljice, takođe, može reciklirati u novu vezanu ili nevezanu posteljicu. U ovim slučajevima, vezani materijali pesak i agregati mešaju se sa hidrauličnim i/ili ugljovodoničnim vezivima. Postupak recikliranja, u tim slučajevima može biti na licu mesta ili u centralnom postrojenju.

Kako se vidi iz prikazanog, savremeni tehnološki postupci omogućavaju recikliranje svih slojeva i posteljice asfaltnih kolovoznih konstrukcija, a primena pojedinog od njih zavisi od konkretnih okolnosti koje uključuju: a) tehničke mogućnosti, b) zakonsku regulativu i tehničke propise i c) ekonomske aspekte.

Sa svoje strane razvoj metoda i opreme za recikliranje materijala iz slojeva kolovoza je stalno u toku. Nove tehnologije dozvoljavaju da se sve veći broj materijala iz kolovoza može ponovo koristiti. One najrazvijenije omogućavaju da se čak i skoro 100% postojećih materijala iz asfaltnih slojeva koristi za proizvodnju novog asfalt betona. Taj, krajnje efikasan proces još uvek se ne koristi široko, ali je njegovo usavršavanje je izazovno za istraživanje za dalje inovacije i novi razvoj efikasnijih metoda recikliranja.

Međutim, pored ovih generalnih predodređenosti i tehničkih mogućnosti recikliranja asfaltnih kolovoznih konstrukcija, treba imati u vidu i opšti društveni interes o potrebi recikliranja, koji su, preventivno sa aspekta zaštite životne sredine. [1], [3], [4]

## **2.5 KARAKTERISTIKE METODA I KONCEPT PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA**

### **2.5.1 RECIKLIRANJE ASFALTNIH SLOJEVA U VEZANE NOSEĆE SLOJEVE PO HLADNOM POSTUPKU**

U zemljama sa jeftinim bitumenom i agregatima, asfalt se u velikoj meri reciklira putem hladnog recikliranja. Razlog za hladno recikliranje bi mogao biti taj što postojeće asfaltne baze u osnovi nisu opremljene za visoke stope termičkog recikliranja. Inače hladno recikliranje asfaltnih materijala je postupak koji se u nekim zemljama koristi u velikoj meri. To je slučaj kada su ispunjeni jedan, ili svi sledeći uslovi:

- niske cene bitumena i agregata,
- nema pravog problema u vezi s uklanjanjem (struganjem) asfaltnih materijala iz kolovoza,
- postojeće asfaltne baze nisu dovoljno opremljene za termičko recikliranje (u Francuskoj, na primer, habajući asfaltni slojevi 0/20mm se recikliraju sa cementom kao vezivom i smatraju se dobrim rešenjem za recikliranje),
- postoje velike transportne daljine koje predstavljaju važnu komponentu troška.

Reciklirani asfalt se može stabilizovati u novim nosećim slojevima korišćenjem hidrauličnog veziva ili cementa (i/ili nekih ugljovodoničnih veziva). Reciklirani asfalt, koji se drobi i potom tretira hidrauličnim vezivom je materijal s mehaničkim karakteristikama koje se mogu uporediti sa slojevima hidraulične stabilizacije. Istovremeno, njegova relativno visoka fleksibilnost omogućuje smanjenje potrebne minimalne debljine slojeva asfalta iznad, bez brige o reflektovanju pukotina, a njegove uopštene karakteristike su takve da se može koristiti za sve nivoje saobraćajnog opterećenja.

Reciklirani materijali iz nekoliko izvora mogu se obrađivati u pogonu za drobljenje-usitnjavanje kako bi se dobio materijal relativno doslednog kvaliteta. Proizvod drobljenje-usitnjavanja može se prilagoditi tako da se dobija materijal sa odgovarajućim granulometrijskim karakteristikama, obično uz dodavanje peska. Uvođenje peska ima dvostruku svrhu: popravljavanje granulometrijske krive i bolja mogućnost dobrog zbijanja (ugradljivost). Da bi se dobila zahtevana zapreminska težina materijala sadržaj vode i postupak zbijanja pri ugradnji se moraju optimizovati.

Stabilizovani reciklirani materijali imaju dve ekonomične prednosti:

- cena materijala nakon struganja u osnovi je niža od novih agregata,
- cena recikliranog nosećeg sloja mnogo je niža od novog bitumeniziranog nosećeg sloja.

Smatra se da ova vrsta materijala treba ponovo da se koristi u povoljnim ekonomskim uslovima, uz očigledne prednosti po životnu sredinu, čak i ako se reciklirani materijali ne koriste ponovo u istim slojevima kao kod originalne kolovozne konstrukcije.

Druga tehnologija, "in situ" stabilizacija prethodno nevezanog granularnog sloja može da koristi cement kao vezivo (može i druga veziva kao što su penušavi bitumen ili bitumenska emulzija). Ta se tehnika sastoji od dodavanja cementa u materijal koji se dobija usitnjavanjem svih slojeva stare kolovozne konstrukcije (duboko hladno "in situ" recikliranje). Prilagođavanje granulometrije i vlažnosti može se vršiti "in situ" dok se ne dobije homogeni materijal. Taj in situ sloj cementne stabilizacije se primenjuje ako kolovozna konstrukcija ima relativno tanak sloj asfalta. Međutim, asfaltni slojevi iznad ovog sloja treba da budu dovoljno debeli da spreče reflektovanje pukotina.

Ekonomске prednosti hladnog recikliranja na licu mesta su:

- lokalna tehnologija i dostupnost cementa (ili drugih veziva),
- ušteda u potrošnji energije – metoda hladnog recikliranja ponovo koristi materijale sa lica mesta i smanjuje korišćenje novih agregata i trošak njihovog transporta. Nadalje, smanjenje transporta agregata pogoduje očuvanju okolne putne mreže,
- smanjenje troškova (to je veoma konkurentna tehnika). Na primer za francuske uslove, u poređenju sa standardnim pojačanjem kolovoza, ušteda iznosi od 15% do 30%. [1], [2], [7]

## 2.5.2 RECIKLIRANJE ASFALJNIH SLOJEVA U NEVEZANE NOSEĆE SLOJEVE

U većini slučajeva, recikliranje asfaltnih slojeva u nevezane noseće slojeve kolovoza najčešće se primenjuje za puteve sa malim saobraćajnim opterećenjem budući da se na njima nalaze tanki asfaltni slojevi.

Međutim, potrebno je težiti maksimalnom smanjenju ponovnog korišćenja recikliranog asfalta u takve svrhe. Sa stanovišta zaštite životne sredine bolje je ugraditi materijale manjeg kvaliteta u nevezane noseće slojeve kolovoza.

## 2.5.3 RECIKLIRANJE NEVEZANIH NOSEĆIH SLOJEVA

### 2.5.3.1 RECIKLIRANJE GRAĐEVINSKOG OTPADA U NEVEZANE NOSEĆE SLOJEVE

Građevinski otpad se može koristiti za vezane ili nevezane slojeve asfaltnih kolovoznih konstrukcija. Materijali koji proističu iz procesa i pogona usitnjavanja i obrade takvih materijala su:

- pesak (pesak od struganja), sitne čestice prosejane iz ulaznog materijala,
- drobljeni pesak, sitne čestice proizvedene tokom drobljenja,
- frakcije drobljenog agregata kao rezultat prosejavanja nakon procesa drobljenja.

Prilikom recikliranja nevezanih nosećih slojeva, najčešće, neće biti potrebe za njihovim drobljenjem, ali određeno sortiranje materijala je uvek neophodno. S tehničkog stanovišta poželjno je granulatu razdvojiti na fine frakcije, pesak i frakcije agregata određene krupnoće.

Tabela 4. prikazuje potencijalno recikliranje ili ponovno korišćenje drobljenog betona, drobljenog zida, mešavine agregata (drobljeni beton + zid) i peska. U mnogim zemljama nedostatak prirodnih agregata vodi do upotrebe velikih iznosa otpada od rušenja za izgradnju posteljice ili pojedinih slojeva kolovoznih konstrukcija, najčešće u nevezane noseće slojeve i posteljicu. Zbog razlike karakteristika materijala i lokalnih okolnosti i uslova, ne postoji uopšteno rešenje za recikliranje ili ponovno korišćenje ovakvih materijala, ali tabela 4 daje osnovna usmerenja za mogućnosti njihovog ponovnog korišćenja u kolovoznim konstrukcijama. [1], [8]

**Tabela 3** Potencijalno recikliranje/ponovno korišćenje nevezanih materijala iz kolovoza [1]

Sloj kolovoza ➤	Drobljeni beton	Drobljeni zidovi	Mešani agregati	Reciklirani pesak
<b>Korišćenje kod DNS kolovoza ▼</b>				
Nevezani noseći sloj	+	+	+	-
Slaba stabilizacija	+	+	-	-
Cementna stabilizacija peska	-	-	-	+
Cementom stabilizovan strugani asfalt	+	-	-	0
Posteljica od peska	-	-	-	+

Legenda:

- +
  - 
  - 0
- nevezani materijal za recikliranje odgovara pomenutim slojevima  
nevezani materijal za recikliranje ne odgovara pomenutom sloju  
nevezani materijal verovatno je pogodan ali njegova primena nije poželjna zbog slabog kvaliteta

#### 2.5.3.2 RECIKLIRANJE NEVEZANIH NOSEĆIH SLOJEVA U NEVEZANE NOSEĆE SLOJEVE

Prilikom recikliranja nevezanih nosećih slojeva asfaltnog kolovoza, mogu nastati sledeće situacije:

- *Materijal nevezanog nosećeg sloja ostaje na licu mestu, a dodaju se novi agregati radi poboljšanja mehaničkih karakteristika. Ovo je čest slučaj kod rekonstrukcija kolovoza kada je potrebno popraviti loš kvalitet nevezanog nosećeg sloja nastao zbog nedostatka određene frakcije agregata odnosno zbog problema u granulometrijskom sastavu. Najčešće nije neophodna potpuna zamena materijala već samo dodavanje određenog procenta nedostajućih frakcija agregata može poboljšati granulometrijski sastav.*
- *Materijal iz sloja se vadi iskopom i transportuje na novu lokaciju i ne zahteva se dodatno tretiranje. Kada materijal iz podloge zadovoljava specifikacije za recikliranje kao novi granularni noseći sloj, pretpostavlja se samo dalje ugrađivanje materijala, kao deo procesa izvođenja radova. Kada se materijal transportuje s jednog mesta na drugo, regulative koje se odnose na životnu sredinu mogu uticati na njegovu primenu.*
- *Materijal podloge se vadi iskopom i transportuje na deponiju gde se vrši neophodno recikliranje odnosno tretiranje (popravljanje). To se dešava ako nevezani materijal postojećeg sloja nije pogodan za ponovnu upotrebu bez popravljanja određenih karakteristika, ili ako in situ recikliranje nije poželjno.*

Postoje razne vrste opreme za in situ recikliranje materijala iz slojeva kolovoza. Karakteristika savremene preme je da omogućava tretiranje kolovoza do dubine od oko 0.3 m. Da bi se ostvario adekvatni kvalitet, tehnologija i snaga primenjene mehanizacije treba da garantuju konstantnu dubinu rada i poprečnu i podužnu doslednost doziranja veziva i dodatnih materijala.

#### 2.5.3.3 RECIKLIRANJE NEVEZANIH NOSEĆIH SLOJEVA U VEZANE NOSEĆE SLOJEVE - STABILIZACIJE

Stabilizacija nevezanih nosećih slojeva kolovoza je proces koji se dosta koristi posebno tokom rekonstrukcija kolovoznih konstrukcija, kada se, zbog ekonomskih razloga ili koristi po

životnu sredinu, postojeći nevezani sloj stabilizuje. Odluka o recikliranju nevezanog nosećeg sloja u vezani noseći sloj može se doneti iz sledećih razloga:

- *popravka nosivosti kolovoza*: dodavanje veziva za stabilizaciju poboljšava nosivost materijala i dovodi do veće nosivosti kolovozne konstrukcije. Poboljšanje nosivosti recikliranjem nosećeg sloja posebno je neophodno u slučajevima kada materijal sadrži višak sitnih čestica. Tada gubitak nosivosti nevezanog nosećeg sloja, usled viška sitnih čestica, dovodi do gubitka nosivosti kolovoza, posledično, smanjenja trajnosti kolovoza.
- *koristi po životnu sredinu*: stabilizacija nevezanog materijala dovešće do smanjenja lučenja zagađivača. Materijali nosećeg sloja mogu sadržati velike količine zagađivača npr. teške metale ili derivate nafte. Prilikom recikliranja takvih materijala, moraju se preduzeti mere na sprečavanju zagađenja novog okolnog zemljišta.

Veziva kao što su bitumenska emulzija, penušavi bitumen, cement ili kombinacija cementa i emulzije, se u velikoj meri koriste prilikom recikliranja nevezanih nosećih slojeva u kombinaciji sa nanošenjem novih habajućih slojeva pojačanja na sloj hladnog recikliranja. Izbor određenog aditiva zavisi od konkretne lokalne situacije. Na primer, bitumenske emulzije se koriste u Austriji, Francuskoj i Kanadi, cement u Finskoj, a u Australiji su napravljene deonice za ispitivanje mogućnosti korišćenja kombinacije penušavog bitumena i kreča kao veziva za stabilizaciju.

Da bi se ostvario noseći sloj dobrih karakteristika, važno je koristiti veziva koja imaju sposobnost za obradu od najmanje 2.5 časa tako da postoji dovoljno vremena za fino planiranje i zbijanje. Takođe, neophodna je zaštita recikliranog sloja od neprihvatljivih napona zatezanja, posebno tokom prvih dana nakon izgradnje. Ukoliko se ne bi preduzela nikakva mera zaštite došlo bi do pojave pukotina. Pukotine bi se reflektovale i na habajući sloj, što bi dovelo do povećanja troškova održavanja i skraćanja trajnosti kolovozne konstrukcije.

Formiranje pukotina smanjuje se odgovarajućom negom odnosno zalivanjem i održavanjem površine sloja vlažnom i izradom mikro prslina u sloju. Na taj način će se stvoriti mnoge nevidljive mikro pukotine u novom sloju umesto nekoliko relativno širokih pukotina. U Francuskoj se koristi metod pre cracking-a odnosno prethodnog sečenja CRAFT mašinom pre nastanka pukotina kao način sprečavanja reflektovanja pukotina kod slojeva vezanih cementom. Postoje i druge metode koje se ogledaju u korišćenju pojačanih geotekstila, veziva modifikovanih polimerima, peščanih asfalta i SAMI (međuslojevi od membrana za apsorbovanje naprezanja). [1], [8], [10], [11], [12], [13],

#### 2.5.4 RECIKLIRANJE NEVEZANIH MATERIJALA POSTELJICE

Recikliranje posteljice se, u praksi, ne događa često. U većini slučajeva, stepen zbijenosti posteljice biće veći kada se ne poremeti usled uticaja gradilišnog saobraćaja i opterećenja od nevezanih nosećih i asfaltnih slojeva koji se nalaze iznad. U nekim zemljama, regulativa otežava recikliranje posteljice ukoliko se dokaže da ne sadrži zagađivače, a ishod ispitivanja utvrđuje i pogodnost recikliranja materijala na drugoj lokaciji.

U nekim slučajevima, recikliranje materijala iz posteljice u vezane noseće slojeve kolovoza može biti od ekonomskog interesa. To zavisi od prvobitne strukture kolovozne konstrukcije i dostupnosti novih materijala. U osnovi, ponovno korišćenje posteljice tehnički je ostvarivo kada postoji dovoljan sadržaj finih čestica u materijalu. Međutim, nedovoljno finih čestica dovešće do potrebe za više veziva. Takav se nedostatak dešava kada:

- sloj koji se reciklira ne sadrži dovoljno finih čestica,
- se dodaje krupna frakcija agregata sloju koji se reciklira.



U oba slučaja, preporučuje se istraživanje kako bi se obezbedilo da li se može dobiti mešavina dobrog granulometrijskog sastava.

U slučaju in situ recikliranja, mora se povesti briga o debljini sloja. Kada se reciklira posteljica, ukupna debljina novog recikliranog sloja često je veća od 300 mm. Sa tom debljinom sloja, može doći do problema tokom umešavanja veziva ili se može ostvariti loša zbijenost, posebno na dnu novog sloja. U takvim situacijama najbolji rezultati se ostvaruju ili nanošenjem veziva u dva prolaza ili korišćenjem adekvatne opreme za zbijanje, kao što su teški vibrirajući valjci za puteve. Utvrđeno je da kod kolovoza zbijenih u pojedinačnim slojevima većim od 300 mm, prva donja trećina sloja ima gustinu od oko 5% manju od druge dve gornje trećine sloja. [1], [14],

## 2.6 KLASIFIKACIJA POSTUPAKA RECIKLIRANJA

Klasifikacija postupaka recikliranja najčešće se obavlja na osnovu :

- mesta obavljanja procesa,
- temperature procesa,
- karakteristika materijala koji se reciklira,
- tipova upotrebljenih veziva.

### 2.6.1 PREMA MESTU OBAVLJANJA PROCESA

#### **Na licu mesta ("*in situ*", "*in place*", "*en place*")**

Strugani materijal iz postojećeg kolovoza, dodatni materijali i veziva se mešaju na licu mesta. Vezivo se ili nanosi na površinu kolovoza (u slučaju praškastih materijala - cementa ili kreča) odgovarajućim razastiračima (ručno razastiranje je dozvoljeno samo na putevima manjeg značaja) ili dozatorima, direktno u opremu za recikliranje iz tankera - cisterni (cementna suspenzija, bitumenska emulzija, penušavi bitumen...) i nakon čega se kolovoz ili određeni slojevi stružu ili melju istovremeno sa umešavanjem veziva i dodatnim materijalima. Voda se, ukoliko je potrebna, dodaje u procesu mešanja, u momentu dodavanja veziva.

#### **U centralnom postrojenju ("*in plant*", "*in central plant*", "*en centrale*")**

Usitnjeni odnosno strugani materijal se lageruje na bazi - centralnom postrojenju i zatim naknadno obrađuje (dodatno drobljenje, frakcionisanje) sa ciljem dobijanja povoljnog granulometrijskog sastava, a potom tretira dodavanjem izabranog veziva (cement, bitumenska veziva) i, na kraju se, ili odlaže za naknadnu upotrebu, ili odmah transportuje na gradilište i ugrađuje.

### 2.6.2 PREMA TEMPERATURI PROCESA

#### **Hladno recikliranje**

Hladno recikliranje se odvija bez prethodnog zagrevanja materijala iz kolovoza. Može da se obavlja na licu mesta ili u centralnom postrojenju.

#### **Termičko recikliranje**

Materijali za recikliranje se pre ponovne upotrebe prethodno zagrevaju do određene temperature. U slučaju recikliranja u centralnom postrojenju, strugani materijal se umešava na toplo sa bitumenom i novim agregatom za korekciju granulacije. Asfaltne mešavine proizvedene po ovom postupku obično sadrže do 40% recikliranog asfaltnog materijala, međutim taj procenat se može kretati i do 100% recikliranog asfaltnog materijala.

### 2.6.3 PREMA KARAKTERISTIKAMA MATERIJALA

Recikliranje se može odvijati na relativno homogenim materijalima - slojevima kolovoza (na primer, nevezani noseći sloj od šljunka ili drobljenog kamenog agregata zajedno sa tankim asfaltnim slojem ili površinskom obradom) ili može da obuhvata slojeve sa različitim vrstama

materijala (na primer, nevezani noseći sloj od šljunka ili drobljenog kamenog agregata sa asfaltnim slojevima znatne debljine).

#### 2.6.4 PREMA VRSTI VEZIVA

##### **Cement**

Sadržaj cementa se određuje sa ciljem postizanja minimuma čvrstoće koje ima nova stabilizacija cementom, ali se, isto tako, u zavisnosti od procenta dodatog cementa mogu dobiti čvrstoće slične novim cementnim stabilizacijama šljunka i drobljenog kamenog agregata. U slučaju da je u kolovozu prisutan relativno čist nevezani noseći sloj, sa pravilnim doziranjem cementa, može se nakon recikliranja dobiti sloj cementne stabilizacije.

##### **Kreč i cement**

Tretman sa krečom i cementom ili kombinovano može biti upotrebljiv na materijalima koji imaju visoku plastičnost i vlažnost, kao što su kameni agregati sa visokim sadržajem visokoplastične gline. Svako vezivo u ovoj kombinaciji ima svoju ulogu:

- Kreč vezuje fine čestice smanjujući im plastičnost sa momentalnom jonskom razmenom. Istovremeno se smanjuje sadržaj vlage u materijalu.
- Cement služi za poboljšanje mehaničkih karakteristika recikliranog materijala.

##### **Bitumenska emulzija**

Usitnjeni materijal iz kolovoza se umešava sa bitumenskom emulzijom i neophodnom količinom vode. Nakon ugradnje i zbijanja materijal se ponaša slično kao formirani sloj asfaltnih mehaničkih karakteristika.

##### **Penušavi bitumen**

Penušanje bitumena je posledica kontrolisanog ubrizgavanja hladne vode (obično oko 2 do 3% težinski) i vazduha u topao bitumen. Viskoznost bitumena znatno opada i stvara se pena od bitumena koja omogućava umešavanje u usitnjeni materijal iz kolovozne konstrukcije.

##### **Cement i bitumenska emulzija ili penušavi bitumen**

Upotrebom kombinacije veziva, cementa i nekog ugljovodoničnog veziva (bitumenske emulzije ili penušavog bitumena), dobija se stabilizacija sa dobrom čvrstoćom, ali se istovremeno postiže i fleksibilnost samog sloja odnosno smanjuje skupljanje i pojava pukotina u odnosu na klasične stabilizacije agregata cementom.

##### **Bitumen**

Termičko recikliranje usitnjenog asfalta iz postojećeg kolovoza u centralnom postrojenju vrši se uz upotrebu bitumena kao veziva. [15]

#### 2.6.5 PODVRSTE

Među pomenutim opštim vrstama recikliranja fleksibilnih kolovoza postoje i sledeće podvrste koje bliže definišu recikliranje asfaltnih slojeva:

- Termičko recikliranje na licu mesta

- *Reshape postupak* podrazumeva obradu i ponovno ugrađivanje i profilisanje asfaltne mešavine iz postojećeg asfaltnog sloja,
- *Repave postupak* podrazumeva obradu i ponovno ugrađivanje asfaltne mešavine iz postojećeg asfaltnog sloja sa dodavanjem novog, tankog asfaltnog sloja,
- *Remix postupak* podrazumeva obnovu asfaltne mešavine iz postojećih asfaltnih slojeva sa dodacima za poboljšanje karakteristika (bitumen, agregat, rejuvinatori),

- *Remix plus postupak* podrazumeva obnovu asfaltne mešavine iz postojećih asfaltnih slojeva sa dodacima za poboljšanje karakteristika i istovremenu izgradnju novog asfaltnog sloja.

Terminologija za vrste hladnog recikliranja nije u potpunosti usaglašena pa se dešava da se istovetni tehnološki postupci zovu različitim imenima, na primer u Evropi postoji samo termin hladno recikliranje koja ima dve pod vrste, a to je hladno recikliranje na licu mesta i hladno recikliranje u centralnom postrojenju, dok se duboko hladno recikliranje svrstava u jednu od ove dve vrste, u zavisnosti od tehnologije izvođenja odnosno dubine intervencije u kolovozu i vrste materijala (vezani i nevezani materijali) koji se recikliraju. [15]

## 2.6.6 KLASIFIKACIJA U SAD

U SAD se koristi podela na pet opštih vrsta recikliranja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija (definisano od strane ARRA - "*Asphalt Recycling and Reclaiming Association*" i FHWA - "*Federal Highway Administration*"):

- Profilisanje kolovoza, (*Cold Planing - CP*)
- Termičko recikliranje u centralnom postrojenju, (*Hot Central Plant Recycling - HCPR*)
- Termičko recikliranje na licu mesta (*Hot In-Place Recycling - HIR*)
- Hladno recikliranje (*Cold Recycling - CR*)
- Duboko hladno recikliranje (*Full Depth Reclamation - FDR*)

Među opštim vrstama asfaltnog recikliranja postoje i podvrste koje ga bliže definišu:

- *Termičko recikliranje na licu mesta (Hot In-Place Recycling - HIR)*
  - *Resurfacing postupak* podrazumeva obradu i ponovno ugrađivanje i profilisanje asfaltne mešavine iz postojećeg asfaltnog sloja - od dodataka se upotrebljavaju samo rejuvinatori za bitumen,
  - *Remixing postupak* podrazumeva obradu i ponovno ugrađivanje asfaltne mešavine iz postojećeg asfaltnog sloja sa dodavanjem novih materijala (vezivo, agregat, rejuvinatori) sa ciljem poboljšanja fizičko mehaničkih karakteristika asfaltne mešavine,
  - *Repaving postupak* podrazumeva obnovu asfaltne mešavine iz postojećih asfaltnih slojeva sa dodacima za poboljšanje karakteristika (Resurfacing ili Remixing postupkom) uz nanošenje novog sloja asfalt betona.
- *Hladno recikliranje (Cold Recycling - CR)*
  - Hladno recikliranje na licu mesta (*Cold In-Place Recycling*)
  - Hladno recikliranje u centralnom postrojenju (*Cold Central Plant Recycling*)
- *Duboko hladno recikliranje (Full Depth Reclamation - FDR)*
  - Profilisanje - usitnjavanje (*Pulverization*)
  - Mehanička stabilizacija
  - Bitumenska stabilizacija
  - Hemijska stabilizacija

Vrste asfaltnog recikliranja se mogu međusobno kombinovati, na primer struganje kojim se dobija strugani asfaltni materijal (*Reclaimed Asphalt Pavement - RAP*) uskladišten na asfaltnoj bazi radi ponovnog korišćenja za termičko recikliranje u centralnom postrojenju pri proizvodnji asfalta za sloj pojačanja.

## 2.7 KASIFIKACIJE U EVROPI

U Evropskim zemljama se koristi nešto drugačija opšta podela asfaltnog recikliranja:

- Termičko recikliranje na licu mesta ("Hot In Situ Recycling", "Recyclage en place a chaud"),
- Termičko recikliranje u centralnom postrojenju ("Hot Central Plant Recycling", "Recyclage a chaud en centrale"),
- Hladno recikliranje na licu mesta ("Cold In-Place Recycling", "Retraitement en place a froid"),
- Hladno recikliranje u centralnom postrojenju ("Cold Central Plant Recycling", "Retraitement en centrale a froid"), [2], [16],

### **3 KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA**

#### **3.1 TEHNOLOGIJA I MOGUĆNOST PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA**

##### **3.1.1 TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA RADOVA**

Hladno recikliranje predstavlja savremeni tehnološki postupak recikliranja slojeva asfaltnih kolovoza, bez zagrevanja, koji se sastoji od usitnjavanja (struganja), mešanja sa dodatnim materijalima i vezivima i ponovnog ugrađivanja sa ciljem dobijanja novog sloja kolovozne konstrukcije.

U zavisnosti tehnologije izvođenja, hladno recikliranje se može izvoditi na licu mesta ili u centralnom postrojenju.

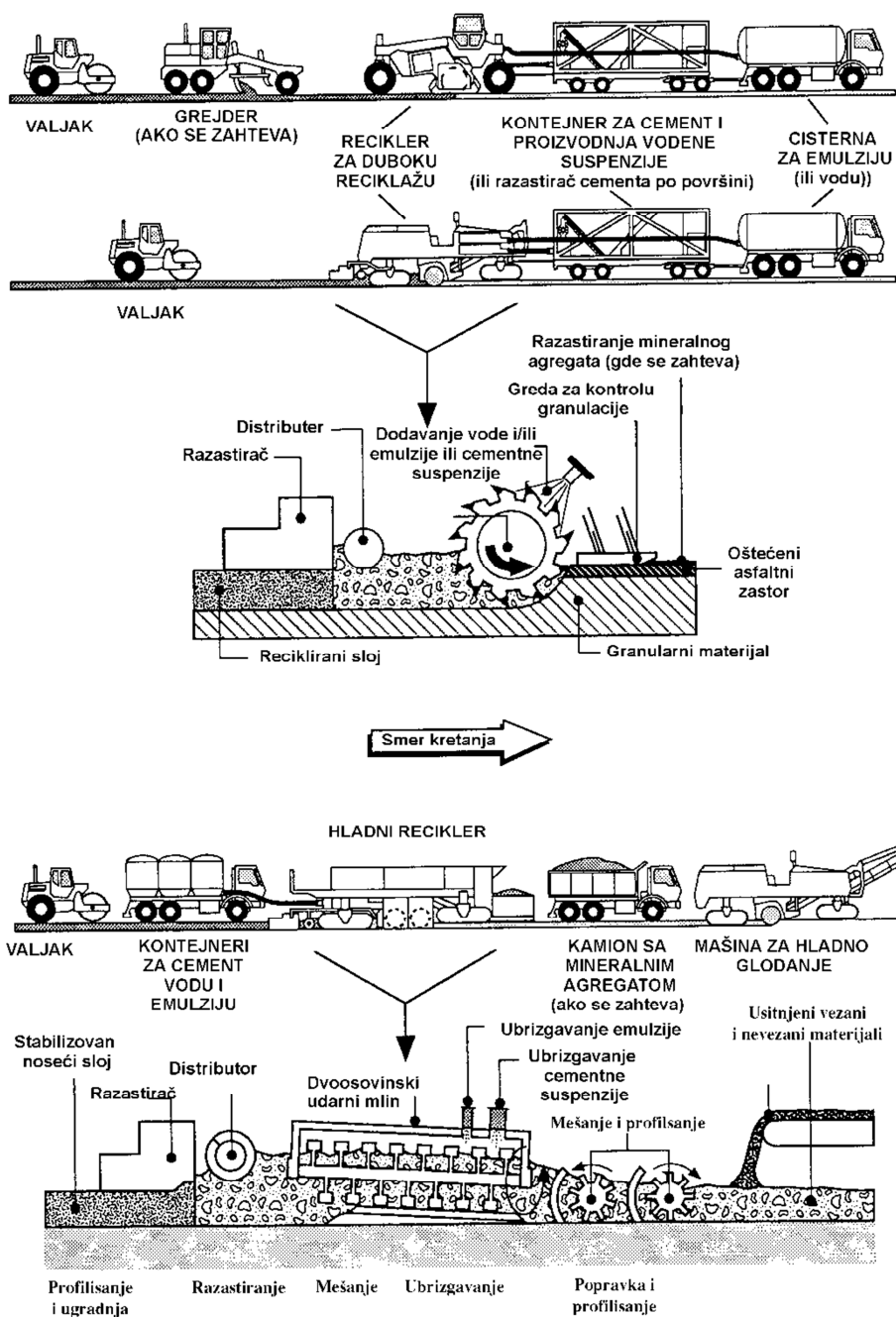
Izvođenje hladnog recikliranja na licu mesta podrazumeva upotrebu više mašina u koje spadaju cisterne, mašine za struganje kolovoza, freze, grejder i određene specijalizovane mašine koje se prostorno grupišu u "voz" za hladno recikliranje.

Pri recikliranju na licu mesta najčešće se koristi svih 100% struganog asfalta. Dubina tretmana se obično kreće od 50 do 300mm (i više sa izvođenjem u više slojeva). Cement i kreč se mogu dodavati u suvom stanju ili kao vodena suspenzija. Ako se radi sa vodenom suspenzijom izbegavaju se problemi vezani za raspršivanje, a i kontrola ugrađene količine je daleko preciznija.

Postoje razne konfiguracije mašina - vozova za hladno recikliranje. Vozovi se međusobno razlikuju u pogledu načina struganja i dodavanja dodatnih materijala i veziva, njihovog umešavanja i kontrole i na kraju načina ugrađivanja.



**Slika 3** Doziranje cementa kao vodene suspenzije sa Wirtgen WM1000. [17]



**Slika 4** Tipična kompozicija savremenih postrojenja za hladno recikliranje na licu mesta. [16]

U jednodelnom vozu, struganje se vrši donjim rotorom za struganje tako da se maksimalno zrno struganog asfalta može održavati na  $D_{max} < 50\text{mm}$  kontrolom brzine kretanja same mašine. Dodavanje veziva se vrši u bubnju mašine za mlevenje. Polaganje i ugradnja obrađene mešavine se vrši finišerom koji se nalazi integrisan na kraju voza (Slika 6).



**Slika 5** Izgled standardnog bubnja za frezovanje na mašinama za hladno recikliranje na licu mesta. [17]

U jednodelnom vozu doziranje veziva za recikliranje se vrši zapreminski na osnovu sračunate zapremine tretiranog materijala koja se dobija iz podataka o tretiranoj širini, dubini i brzini napredovanja same mašine. Ovakav način doziranja obezbeđuje najniži nivo kontrole procesa recikliranja zbog indirektnosti povezanosti zapremine recikliranja i količine veziva za recikliranje.



**Slika 6** Jednodelni voz za hladno recikliranje na licu mesta. [16]

Dvodelni voz se obično sastoji od velike mašine za struganje u punoj širini vozne trake i mešalice finišera. Mašina za struganje asfaltnog kolovoza struže asfaltni kolovoz i prebacuje ga u mešalicu finišera. Mešalica finišera ima traku za doziranje sa elektronskom vagom koja je povezana na centralni kompjuter za preciznu kontrolu doziranja aditiva i veziva za recikliranje. Neke mešalice finišeri su opremljeni sa sitima za odstranjivanje nadzrna struganog asfalta. Mešalica finišer sadrži bubanj za mešanje osnovnog i dodatnih materijala za recikliranje kao i finišer za polaganje reciklirane mešavine i početno zbijanje sa automatskim upravljanjem preko centralnog kompjutera (Slika 7).



**Slika 7** Dvodelni voz za hladnu reciklažu na licu mesta. [16]

U dvodelnom voz, doziranje veziva se vrši težinski u odnosu na strugani asfalt za recikliranje, nezavisno od širine tretmana, dubine i brzine kretanja mašine. Dvodelni vozovi imaju srednju do veoma visoku kontrolu procesa recikliranja zbog direktne veze između težine tretiranog materijala i količine dodatnih materijala za recikliranje.

Višedelni vozovi se sastoje od velike mašine za struganje asfaltnog kolovoza u punoj širini trake, vučene mašine za prosejavanje i drobljenje struganog asfaltnog materijala i vučene mašine za mešanje i obradu recikliranog materijala. Mašina za struganje asfalta struže asfalt i prebacuje ga u mašinu sa sitima i drobilicom. Tečna veziva se dodaju u mašini za mešanje u bubnju za obradu recikliranog materijala. Obradena mešavina se polaže konvencionalnim finišerom za polaganje asfalta. Kod nekih modela ove vrste vozova mašina za prosejavanje i drobljenje i mašina za mešanje i obradu recikliranog materijala su spojene u jednu veliku mašinu. Druga varijanta je da se mašina za mešanje i obradu recikliranog materijala spoji sa mašinom za polaganje mešavine - finišerom u jednu mašinu (Slika 8).



**Slika 8** Višedelni voz za hladnu reciklažu na licu mesta. [16]

Maksimalna veličina zrna struganog asfalta se kontroliše sitima na mašini za prosejavanje i drobljenje. Svako nad zrno se šalje na drobljenje i ponovno prosejavanje. Količina veziva za recikliranje se dozira uz pomoć elektronske vage na traci za doziranje i kompjutera na bubnju na mašini za mešanje. Doziranje veziva se vrši težinski u odnosu na strugani asfalt, nezavisno od širine tretmana, dubine i brzine kretanja mašine što predstavlja najviši nivo kontrole procesa hladnog recikliranja na licu mesta.





**Slika 9** Ugrađivanje finišerom na recikleru sa inicijalnim zbijanjem sloja Hladne reciklaže na licu mesta. [17]



**Slika 10** Wirtgen 2200 CR recikler sa finišerom za ugradnju i inicijalno zbijanje. [17]



**Slika 11** Wirtgen 4200 CR recikler sa finišerom za ugradnju i inicijalno zbijanje vrši recikliranje trake autoputa od 4.2m širine u jednom prolazu. [17]

Zbijanje hladno recikliranog sloja kolovoza zahteva veću energiju za zbijanje od konvencionalnih asfaltnih mešavina po toplom postupku. Ovo je posledica visokog

unutrašnjeg trenja između zrna u mešavini, visoke viskoznosti veziva usled starenja i niže temperature ugrađivanja. Zbijanje se obično vrši pneumatskim valjcima i čeličnim glatkim valjcima sa vibracijom (Slika 12).



**Slika 12** Zbijanje sloja Hladne reciklaže na licu mesta [16]

U slučaju korišćenja bitumenske emulzije, zbijanje hladno recikliranog sloja počinje u momentu loma emulzije, kada se boja promeni iz braon u crno. Ovaj proces može trajati u zavisnosti od vrste bitumenske emulzije i ostalih aditiva, debljine recikliranog sloja i klimatskih uslova, od 30 minuta do 2 sata. Zbijeni sloj takođe mora biti adekvatno odnegovan pre nego što se pristupi izradi sledećeg sloja kolovozne konstrukcije. Negovanje zavisi od nekoliko faktora uključujući klimatske karakteristike i stanje odvodnjavanja i karakteristike vlažnosti same mešavine. Tipično vreme negovanja iznosi od 24 sata pa čak i do dve nedelje, u zavisnosti od gore pomenutih faktora i vrste veziva za recikliranje i ostalih aditiva. [15], [16], [17], [18], [19]

### 3.1.2 MOGUĆNOSTI PRIMENE

Mogućnosti primene hladnog recikliranja na licu mesta su mnogobrojne i odnose se na rešenje sledećih problema postojeće asfaltno kolovozne konstrukcije:

- asfaltni slojevi su izgubili vezu sa nosećim slojevima,
- pojava termičkih i reflektovanih pukotina u asfaltnim slojevima,
- pojava termičkih pukotina u sloju cementne stabilizacije,
- povećanje nosivosti kolovoza i sanacija mrežastih pukotina od zamora:
  - recikliranje vezanih slojeva (asfaltni slojevi i/ili cementna stabilizacija koja nema rezidualnu nosivost),
  - recikliranje nevezanih nosećih slojeva kolovoza ,
  - recikliranje posteljice,
- korekcija nivelete i poprečnog profila kolovozne konstrukcije,
- popravka kolotruga.

#### 3.1.2.1 ASFALJNI SLOJEVI SA IZGUBLJENOM VEZOM SA PODLOGOM ILI NOSEĆIM SLOJEM CEMENTNE STABILIZACIJE

Sanacija loših međuslojnih kontakata sa ciljem povećanja ukupne nosivosti kolovozne konstrukcije tehnologijom hladnog recikliranja može da se vrši između samih asfaltnih slojeva kao i između asfaltnog sloja i sloja cementne stabilizacije. Dobre međuslojne veze u kolovozu produžavaju životni vek kolovoza obezbeđenjem da cela struktura kolovoza radi u mehaničkom smislu kao jedan sloj. Samim tim ovom intervencijom se uklanjaju i uzrok nastajanja oštećenja i propadanja kao i posledice tog procesa.

### 3.1.2.2 TERMIČKE I REFLEKTOVANE PUKOTINE U ASFALTNIM SLOJEVIMA

Prilikom rehabilitacije kolovoza i pre nanošenja asfaltnih slojeva pojačanja može se izvršiti sanacija reflektovanih pukotina u asfaltnim slojevima u određenoj debljini.

### 3.1.2.3 POVEĆANJE NOSIVOSTI KOLOVOZA I SANACIJA MREŽASTIH PUKOTINA OD ZAMORA

Tehnologija hladnog recikliranja se najčešće koristi u slučaju rehabilitacije - rekonstrukcije kolovoza koji imaju malu rezidualnu nosivost. U tim slučajevima jedno od dominantnih oštećenja su i mrežaste pukotine od zamora. Sanacija ovih oštećenja zahteva povećanje nosivosti kolovoza odnosno otklanjanje uzroka njihovog nastanka.

U zavisnosti od uzroka nastanka može se primeniti sledeće:

#### *Recikliranje vezanih slojeva:*

Oštećeni asfaltni slojevi i/ili cementna stabilizacija koja nema rezidualnu nosivost recikliraju se u potrebnoj debljini ili u celosti.

#### *Recikliranje nevezanih nosećih slojeva kolovoza:*

U slučajevima kada kolovozna konstrukcija ima probleme sa nevezanim nosećim slojevima koji se na primer ogledaju u sadržaju gline visoke plastičnosti, nedovoljnoj zbijenosti ili lošem granulometrijskom sastavu može se izvršiti njihova popravka recikliranjem. U slučaju "debljih" kolovoza vrši se prvo ustinjavanje i uklanjanje gornjih vezanih slojeva pa zatim recikliranje problematičnog nevezanog sloja u potrebnoj debljini. Usitnjeni materijal iz gornjih nosećih vezanih slojeva se može vratiti na trasu prethodno recikliran u centralnom postrojenju ili reciklirati na licu mesta po hladnom postupku.

#### *Recikliranje posteljice:*

Popravka neadekvatne posteljice (npr. mala nosivost, neodgovarajući materijal sa nedovoljnom zbijenosti) sa klasičnom rekonstrukcijom zahteva veoma velike i skupe radove. Primenom recikliranja ovaj postupak se može znatno ubrzati i učiniti ekonomski pristupačnijim. Prvo se izvrši uklanjanje gornjih i donjih nosećih slojeva kolovozne konstrukcije i zatim se izvrši recikliranje posteljice kolovoza u potrebnoj debljini.

Ovaj postupak se često primenjuje u slučajevima striktnih geometrijskih ograničenja izdizanja i promene nivelete odnosno na primer u gradskim sredinama.

### 3.1.2.4 KOREKCIJA NIVELETE I POPREČNOG PROFILA KOLOVOZNE KONSTRUKCIJE

U slučajevima velikih deformacija podužnog i poprečnog profila i vrlo česte pojave na putnoj mreži R Srbije, promene dvostranog u jednostrani nagib poprečnog profila u naseljenim mestima sa geometrijskim ograničenjem izdizanja nivelete, nameće se hladno recikliranje kao odgovarajuća tehnologija.

Kada promena geometrije zahteva sanaciju relativno velikih deformacija odnosno znatnu promenu geometrije puta primenjuje se recikliranje u dva prolaza. Prvo se vrši usitnjavanje kolovozne konstrukcije određene debljine, zatim se grejderom izvrši preraspodela postojećeg materijala uz eventualno dodavanje novog radi formiranja nove nivelete, pa zbijanje i na posletku recikliranje odnosno stabilizacija vezivom.

Primenom ovog postupka dobija se kolovozna konstrukcija koja ima homogenu nosivost u poprečnom smislu uz istovremeno ostvarivanje velikih ušteda u minimalizovanju upotrebe izravnavajućih asfaltnih slojeva. [15], [16], [17], [18], [19]

## 3.2 TEHNOLOGIJA I MOGUĆNOST PRIMENE HLADNOG RECIKLIRANJA U CENTRALNOM POSTROJENJU

### 3.2.1 TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA RADOVA

Hladno recikliranje u centralnom postrojenju je proces u kome se recikliranje asfalta vrši u centralnom stabilnom postrojenju na posebnoj lokaciji. Stabilno postrojenje može biti specijalno proizvedeno za ovu namenu ili voz za hladno recikliranje bez mašine za struganje asfalta, montiran kao stabilna konfiguracija. Reciklirana mešavina se može odmah ugrađivati ili može biti lagerovana za naknadnu upotrebu za održavanje kolovoza.

Asfaltni materijali koji se koriste za hladno recikliranje u centralnom postrojenju nastaju struganjem asfaltnih slojeva kolovoza, ripovanjem, uklanjanjem, rušenjem i transportom na deponiju u okviru centralnog postrojenja gde se drobi i prosejava. Recikliranje se obično vrši dodavanjem bitumenske emulzije kao veziva. Vrsta bitumenske emulzije, dodavanje novog kamenog agregata određene granulacije i ostalih aditiva određuju se pri izradi prethodne mešavine. Novi kameni agregat, ako se zahteva, se takođe deponuje u okviru centralnog postrojenja.

Centralno postrojenje za hladno recikliranje se obično sastoji od hladnih bunkera za frakcionisani strugani asfaltni materijal kao i za novi kameni agregat, traka za doziranje sa elektronskom vagom, kompjuterski kontrolisan sistem za doziranje veziva, bubanj za mešanje, bunker za privremeno skladištenje recikliranog materijala i uređaja za punjenje kamiona (Slike 13, 14 i 15).



**Slika 13** Centralno postrojenje za hladno recikliranje. [16]



**Slika 14** Voz za hladnu reciklažu na licu mesta postavljen kao centralno postrojenje za hladno recikliranje. [17]



**Slika 15** Ugrađivanje mešavine hladno reciklirane u centralnom postrojenju. [16]

Ugrađivanje hladno reciklirane mešavine vrši se konvencionalnim finišeima za asfalte po toplom postupku, ali može se koristiti i motorni grejder. Zbijanje se vrši sa velikim konvencionalnim pneumatskim valjcima i vibro glatkim čeličnim valjcima. Završeni sloj se obično pokriva sa slojem asfalt betona ili, za manja saobraćajna opterećenja, slojem jednostruke ili dvostruke površinske obrade. [15], [16], [17], [18], [19]

### 3.2.2 MOGUĆNOSTI PRIMENE

Hladnim recikliranjem u centralnom postrojenju se sa aspekta mogućnosti upotrebe kao tehnologije recikliranja može postići sve navedeno za hladno recikliranje na licu mesta. Međutim, hladno recikliranje ima svoje osobenosti koje se ogledaju u softiciranijoj obradi recikliranog materijala u centralnom postrojenju u odnosu na recikliranje na licu mesta.

Prednosti primene ovog tehnološkog postupka koji se najčešće obavlja sa ciljem recikliranja asfaltnih slojeva u novi vezani noseći sloj su:

- očuvanje ograničenih prirodnih resursa,
- ušteda energije u odnosu na ostale tradicionalne metode rekonstrukcije,

- eliminisanje problema otpada koji je veoma prisutan u konvencionalnim metodama rekonstrukcije,
- popravaka deformacije poprečnog profila kolovoza,
- popravka kolotruga sa eliminacijom udarnih rupa i čupanje zrna,
- neoštećivanje noseći slojevi i posteljica kolovozne konstrukcije,
- korekcija poprečni nagiba i podužnog profila,
- rešavanje problema sa postojećim granulometrijskim sastavom i/ili bitumenskim vezivom dodavanjem novog kamenog agregata i stabilizirajućih veziva i aditiva,
- osetno poboljšanje nosivosti kolovozne konstrukcije i poboljšanje ravnosti sloja,
- izvođenje na licu mesta i veliki dnevni učinci uz poboljšanu bezbednost zbog smanjenja ometanja saobraćaja,
- ekonomske uštede. [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]

Uzimajući u obzir sličnosti Hladnog recikliranja na licu mesta i Hladnog recikliranja u centralnom postrojenju sa aspekta problematike i predmeta istraživanja u ovom radu, na dalje će se termin hladno recikliranje odnositi na obe kategorije i analiziraće se isključivo hladno recikliranje sa upotrebom Bitumenske emulzije, Penušavog bitumena i Cementa, svakog posebno i zajedno, kao veziva. Penušavi bitumen će biti spominjan samo iz razloga navođenja rezultata koji se tiču predmeta istraživanja, a odnose se na sličnost metodološkog pristupa kako bi se uvažili korisni zaključci koji su primenljivi.

### **3.3 PREDNOSTI I NEDOSTACI TEHNOLOGIJE HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA**

Hladno recikliranje na licu mesta ima nekoliko prednosti. Neke prednosti koje su često navođene u literaturi [npr. [22] Epps, 1990, [23] Kearney i Huffman, 1999, [24] Forsberg i sar. 2002, [25] i [26] Mallick i sar. 2002a, 2002b] uključuju sledeće:

- Hladna reciklaža na licu mesta konzervira resurse. Kao i kod drugih recikliranih materijala tako i kod recikliranog kolovoza ponovo se koriste postojeći materijali (agregat i asfalt). Novi materijali koji se uvode u proces, ako ih uopšte ima, su u vrlo malim količinama. Tako da su ograničeni resursi konzervirani.
- Hladna reciklaža na licu mesta štedi energiju. Kako već samo ime govori, kod hladne reciklaže nije potrebno zagrevanje. Na taj način potrebna energija je svedena na minimum. Ona se vrši u potpunosti na licu mesta i na odgovarajućem tehnološkom nivou da je donošenje, ili nošenje materijala na deponiju, eliminisano ili u velikoj meri smanjeno.
- Hladna reciklaža je u skladu sa strategijom održivog razvoja odnosno očuvanja životne sredine. Bacanje materijala sa starog kolovoza je u velikoj meri smanjeno. Nema tolikog zagađivanja vazduha pošto nema zagrevanja i odnošenja materijala na deponiju.
- Hladnom reciklažom se proizvode debeli, vezani slojevi koji su veće nosivosti i trajnosti nego konvencionalna nevezana podloga. U mnogim stručnim radovima je konstatovano (npr. [25] i [26] Mallick i sar. 2002a, 2002b) da dodavanje cementa, kreča ili bitumena recikliranom materijalu poboljšava karakteristike mešavine.
- Hladna reciklaža na licu mesta može da smanji verovatnoću pojave pukotina tokom eksploatacije u odnosu na klasične noseće slojeve od cementom stabilizovang lokalnog sitnozrnog tla sa visokom plastičnosti gde pojava pukotina predstavlja jedan od dominantnih problema. Putevi sa nosećim slojem od recikliranog materijala su u

dobrom stanju i posle 10 godina eksploatacije sa malom količinom pukotina na asfaltnoj površini ([27] Jahren i sar. 1998).

- Hladna reciklaža na licu mesta je manje sklona pojavi pukotina usled skupljanja u poređenju sa klasičnim cementnim stabilizacijama kamenog agregata.
- Geometrija kolovoza se koriguje i zadržava uz minimalno korišćenje izravanavajućih asfaltnih slojeva.
- Hladna reciklaža na licu mesta je relativno brz tehnološki proces rehabilitacije čime se u značajnoj meri skraćuje vreme izvođenja radova u poređenju sa klasičnim metodama rehabilitacije.
- Postiže se visoki nivo bezbednosti saobraćaja tokom procesa izvođenja radova odnosno samog postupka recikliranja, jer je moguće izvoditi radove sa zatvaranjem samo jedne saobraćajne trake pa je samim tim neugodnost za korisnike puta svedena na minimum.
- Hladna reciklaža na licu mesta je dugoročno isplativa investicija jer se troškovi održavanja tokom eksploatacije smanjuju.

Takođe postoji i nekoliko nedostataka tehnike hladne reciklaže na licu mesta o koji su konstatovani u literaturi:

- Izvođenje radova se mora odvijati po toplom, relativno suvom vremenu tako da je izvođenje radova ograničeno na povoljne vremenske uslove ([28] Kazmierowski i sar, 2002).
- Hladno reciklirani slojevi su podložni dezintegraciji površine ukoliko su izloženi direktnom uticaju saobraćajnog opterećenja ([26] Mallick i sar. 2002b). Površina recikliranog sloja takođe nema potrebnu hrapavost i ravnost. Preporučuje se izrada asfaltnog habajućeg sloja ili bar površinska obrada.
- U praksi, proces recikliranja na licu mesta može da ima nekoliko problema uključujući: variranje granulacije agregata, neuniformnost distribucije i umešavanja veziva, variranje vlažnosti, varijacije u debljini sloja i teškoće pri zbijanju pri dnu debljih slojeva ([29] Milton i Earland, 1999). Prema tome ovaj proces zahteva pažljivo ispitivanje kako bi se izbegla neuniformnost materijala i posledično izrada sloja neuniformnih karakteristika.
- Opšte je poznato da svi materijali tretirani cementom imaju tendenciju da pucaju zbog skupljanja. Međutim, pucanje se može svesti na minimum putem pažljivog projektovanja prethodne mešavine, pravilnim doziranjem svih komponenti i izradoma mera za sprečavanje nastanka pukotina (mikropsline).

Međutim, ovi nedostaci nisu značajna smetnja i ne predstavljaju ograničenje za rastuću široko rasprostranjenu primenu. Prednosti su mnogo veće u odnosu na nedostatke tako da je hladna reciklaža veoma atraktivna proces za rehabilitaciju kolovoza u poređenju sa drugim konvencionalnim tehnologijama rehabilitacije.

### **3.4 KOMPONENTNI MATERIJALI HLADNOG RECIKLIRANJA NA LICU MESTA**

Materijali za recikliranje postojećeg asfaltnog kolovoza normalno uključuju tri glavne komponente: (1) RAP – strugani asfalt, (2) nevezani noseći sloj iz kolovoza (određena vrsta agregata) i (3) vezivo.

## **RAP - Strugani asfalt iz postojećeg kolovoza**

RAP je postojeći asfaltni sloj koji je struganjem - frezovanjem skinut sa kolovoza i može da se koristi delimično ili u celosti za recikliranje kolovoza mešanjem sa agregatom ili bitumenom, bitumenskom emulzijom, cementom, krečom ili drugim materijalima. Kod procesa hladne reciklaže, RAP se proizvodi frezovanjem postojećeg sloja asfalta mašinom za struganje. Upotreba RAP-a kao alternativnog materijala dobija sve više pažnje širom sveta pošto se na taj način štede ograničeni resursi i smanjuje se cena izgradnje puteva.

## **Nevezani Noseći Sloj iz postojećeg kolovoza**

Vrlo često se prilikom hladne reciklaže na licu mesta ceo sloj asfalta frezuje zajedno sa unapred određenom količinom nevezanog materijala iz sloja ispod asfalta i pri tom se stabilizuje sa ciljem dobijanja uniformnog sloja hladne reciklaže. Prema tome, agregat u postupku hladnog recikliranja je materijal iz nevezanog nosećeg sloja iz postojećeg kolovoza. Međutim, ukoliko količina materijala na licu mesta nije dovoljna da se proizvede željene debljina recikliranog sloja, novi dodatni agregat se može razastri preko površine postojećeg kolovoza i može biti uključen u proces recikliranja. Postoje i drugi razlozi za dodavanje novog agregata: korekcija granulometrijskog sastava, korekcija nivelete, homogenizacija sastava mešavine, i sl. ([22] Epps, 1990).

## **Veziva**

Cement ili kreč su korišćeni kao primarna veziva prilikom postupka hladne reciklaže na licu mesta. U skorije vreme koriste se razna dodatna veziva, uključujući i bitumensku emulziju i penušavi bitumen. Cement i kreč takođe se koriste i kao aditivi u kombinaciji sa bitumenskim vezivima.

### **3.5 VEZIVA**

U današnje vreme, koriste se razna veziva pri izgradnji kolovoza širom sveta kako bi se prevazišao nedostatak određenih prirodnih resursa. Dodavanjem male količine veziva, po relativno niskoj ceni, može se dobiti potrebna čvrstoća sloja u kolovozu stabilizacijom materijala iz postojećeg kolovoza. Pored toga što obezbeđuju povećanje čvrstoće, veziva poboljšavaju i vek trajanja kao i otpornost na uticaj vlage i vode ([25] i [26] Mallick i sar. 2002a, 2002b, [33] Tarefder i sar. 2005). Na sličan način se veziva koriste za recikliranje materijala u postojećim kolovozima. U mnogim slučajevima nema potrebe uvoditi nove dodatne materijale kako bi se proizveli kvalitetni reciklirani slojevi u rehabilitovanim kolovoznim konstrukcijama.

Veziva se mogu kategorizovati u dva tipa - hidraulična i ugljovodonična (bitumenska) ([23] Kearney i Huffman, 1999). Hidraulična stabilizacija koristi veziva kao što su cement, leteći pepeo ili hidratizovani kreč kao veziva za stabilizaciju. U slučaju bitumenske stabilizacije, penašavi bitumen i bitumenska emulzija se obično koriste kao bitumenska veziva za stabilizaciju.

Veliki broj veziva za stabilizaciju je dostupno sa različitim prednostima i manama. Međutim sva ona imaju isti cilj, a to je da povežu agregat i da poboljšaju fizičko mehaničke karakteristike i trajnost.

#### **3.5.1 HIDRAULIČNA VEZIVA**

Cement, kreč i kombinacija ovih materijala sa letećim peplom, mlevenom granulisanom šljakom i drugim sličnim materijalima su najčešće korišćena hidraulična veziva za stabilizaciju.



Cement i voda se mešaju u preciznim unapred određenim količinama kako bi se napravila cementna suspenzija. Suspenzija se meša i stavlja u mešač u vozu za reciklažu i ubrizgava se u komoru za mešanje. Alternativno, suvi cement se može razastri kao prah ispred mašine za reciklažu mada ovo može da stvori probleme zbog pojave prašine na mestu izgradnje (radzuvavanje usled uticaja vetra i sl.).

Potrebna količina cementa za proces stabilizacije se razlikuje od jednog do drugog kolovoza i generalno isto tako od zemlje do zemlje. Ove razlike zavise od standarda, specifikacija i željenih funkcija kolovoza na putevima. Najčešće, čvrstoća je kriterijum za određivanje sadržaja cementa. Sadržaj cementa je obično takav da daje dovoljnu čvrstoću na pritisak (CS), na određenoj starosti mešavine sa određenom vrednosti.

Hidratirani kreč ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) i nehidratirani - brzi kreč (CaO) su takođe efikasna veziva i racionalna sa ekonomskog aspekta kao veziva za stabilizaciju sitnozrnog koherentnog tla povećane plastičnosti ([30] Williams, 1986). Kao i cement, hidratirani kreč i nehidratirani - brzi kreč se mogu upotrebiti ili kao suvi prah ili kao suspenzija.

### 3.5.2 BITUMENSKA VEZIVA

Upotreba bitumena kao veziva je popularna zbog brzine izvođenja radova u tehnološkom smislu. Bitumenska veziva se primenjuju u obliku emulzije ili pene. Materijali vezani bitumenom daju fleksibilan sloj sa dobrim svojstvima u pogledu zamora u poređenju sa onima koji su tretirani samo sa hidrauličnim vezivima ([23] Kearney i Huffman, 1999).

Bitumenska emulzija se ubrizgava u komoru za mešanje gde se meša sa mlevenim materijalima. Sloj podloge stabilizovan emulzijom je fleksibilan, otporan na zamor sa smanjenom sklonosti na pojavu pukotina usled skupljanja. Međutim, obično je skuplja od cementa i treba vremena da se osuši i razvije punu čvrstoću ([26] Mallick i Sar, 2002b), a u slučaju kada je sadržaj vlage povećan na licu mesta, dodavanje bitumenske emulzije može dodatno da poveća sadržaj vlage iznad optimuma, što dovodi do smanjenja čvrstoće recikliranog sloja ([23] Kearney and Huffman, 1999).

Penušavi bitumen se dobija ubrizgavanjem vazduha i kapljica vode pod visokim pritiskom (5 bara) u topao ( $160-180^\circ\text{C}$ ) tečni bitumen i na taj način bitumen dobija formu pene. Volumen bitumena se povećava dok se viskozitet znatno smanjuje, a penušavi bitumen se meša sa frezovanim materijalima u komori za mešanje.

Stabilizacija penušavim bitumenom je u današnje vreme atraktivna u nekim zemljama jer proizvođači opreme danas nude i pružaju poboljšane sisteme za penušavi bitumen pa samim tim se trude da dobrim marketingom poboljšaju prodaju svojih proizvoda ([32] Moore, 2004).

### 3.5.3 KOMBINACIJA HIDRAULIČNIH I BITUMENSKIH VEZIVA

U mnogim slučajevima je utvrđeno da je kombinacija bitumenskih i hidrauličnih veziva veoma efikasna (npr. [33] Tarefder i sar. 2005, [25] [26] Mallick i sar. 2002a, 2002b). Penušavi bitumen i bitumenska emulzija poboljšavaju svoje karakteristike ako im se doda određeni procenat cementa ili kreča. Iako je to skuplje nego upotreba samo bitumenskog ili hidrauličnog agensa, njihova kombinacija poseduje sledeće prednosti:

- Prionljivost između bitumena i agregata je poboljšana ([26] Mallick i sar, 2002b),
- Ubrzava se priraštaj čvrstoće recikliranog sloja što omogućava da se put brže otvori za saobraćaj ([24] Forsberg i sar. 2002, [26] Mallick i sar. 2002b),
- Poboljšava se čvrstoća recikliranog materijala u sloju ([34] Cross i Fager, 1995),
- Performanse recikliranog materijala su poboljšane (otpornost na trajne deformacije - kolotrage i uticaj vlažnosti) ([35] Cross, 1999, [25] [26] Mallick i sar. 2002a, 2002b, [33] Tarefder i sar. 2005).

Hidraulična veziva se lako dodaju recikliranoj mešavini zajedno sa bitumenskim vezivom korišćenjem ranije opisanih tehnoloških postupaka.

### 3.5.4 ODABIR VEZIVA

Izbor najefikasnijeg veziva za pojedinačne potrebe zavisi od nekoliko faktora:

- Cene. (Cena za određeno vezivo);
- Dostupnosti. (Lakoća sa kojom se može doći do veziva u lokalnim uslovima);
- Prihvatljivosti. (Određena veziva su lokalno iz određenih razloga često prihvatljivija od nekih drugih);
- Tipa komponentnih materijala. (Različita veziva su različito efikasna u kombinaciji sa određenim komponentnim materijalima).

Tabela 4 sumira prednosti i nedostatke tri najčešće korišćena veziva za hladno recikliranje na licu mesta.

**Tabela 4** Prednosti i nedostaci veziva za hladno recikliranje na licu mesta.

<b>Cement</b>	
<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Obično jeftiniji od bitumena.</li><li>• Cement je dostupan širom sveta.</li><li>• Cement je poznat u građevinskoj industriji.</li><li>• Cement se može ručno razastri u odsustvu mašina za razastiranje suspenzija.</li><li>• Poboljšava čvrstoću na pritisak većine materijala.</li><li>• Poboljšava otpor materijala na oštećenja od vode i uticaj vlage.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pucanje usled skupljanja je neizbežno, ali se može kontrolisati.</li><li>• Povećanje krutosti, ali smanjenje otpora na zamor.</li><li>• Zahteva pravilno sušenje i negu pre otvaranja za saobraćaj.</li></ul>
<b>Bitumenska emulzija</b>	
<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Stabilizacija bitumenom stvara visko-elastični materijal sa dobrim karakteristikama na zamor.</li><li>• Recikler je vezan za cisternu pomoću šipke za sprejsanje.</li><li>• Bitumenska emulzija je relativno dobro poznata u građevinskoj industriji.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bitumenska emulzija se obično ne proizvodi na licu mesta. Proizvodnja zahteva strogu kontrolu kvaliteta. Emulgatori su skupi. Vodu takođe treba transportovati, a ne samo bitumen.</li><li>• Sadržaj vlage u materijalu postojećeg kolovoza je nekada jako visok i postaje zasićen kada se doda emulzija.</li><li>• Sušenje može dugo da traje. Razvoj čvrstoće se odvija uz gubitak vlage. Zahtevana vrsta emulzije za određene slučajeve recikliranja može da bude nedostupna.</li></ul>

<b>Penušavi bitumen</b>	
<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Kao i bitumenska emulzija, penušavi bitumen može da se nanese pomoću šipke za sprejisanje pošto se poveže sa cisternom.</li><li>• Materijal stabilizovan penušavim bitumenom daje fleksibilnu vezu sa krupnim agregatom.</li><li>• Penušavi bitumen koristi standardni stepen penetracije bitumena. Nema troškova proizvodnje.</li><li>• Troškovi izvođenja radova se mogu smanjiti pošto penušavi bitumen dozvoljava upotrebu otpadnog i lokalnog materijala.</li><li>• Materijal dozvoljava saobraćaj odmah nakon ugradnje.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Proces penušanja zahteva zagrevanje bitumena, što zahteva posebne uslove i bezbednosne mere.</li><li>• Kvalitet stabilizovanog materijala je određen karakteristikama penušanja što prvenstveno zavisi od kvaliteta bitumena.</li><li>• Zasićeni materijal i materijal u kome nema dovoljno finih čestica ne može da se tretira penastim bitumenom.</li></ul>

### 3.6 PROJEKTOVANJE PRETHODNE MEŠAVINE

Do sada, metodologiju projektovanja prethodnih mešavina od recikliranog materijala razvilo je nekoliko uprava za puteve, ali za svoje potrebe. Ne postoji univerzalno prihvaćen standardni metod za izradu prethodnih mešavina. Međutim, ipak se mogu navesti osnovni koraci koji se obično preduzimaju u procesu projektovanja i izrade prethodne mešavine: ([22] Epps, 1990):

- uzorkovanje reprezentativnih uzoraka sa terena ili deponija recikliranog materijala za izradu prethodne mešavine,
- obrada uzoraka koji će se koristiti za izradu prethodne mešavine,
- procena RAP-a,
  - Sadržaj bitumena,
  - Fizička svojstva bitumena (penetracija, viskozitet),
  - Granulometrijski sastav agregata,
  - Granulometrijski sastav RAP-a.
- odabir količine i granulometrijskog sastava novog agregata,
- odabir tipa i količine veziva,
- mešanje, zbijanje i ispitivanje prethodne mešavine,
- utvrđivanje radne mešavine JMF,
- prilagođavanje na terenu.

#### 3.6.1 OBRADA UZORAKA

Hladno reciklirani materijali koji se koriste za pravljenje mešavine uključuju sledeće: (1) RAP, (2) agregat, (3) vezivo.

Ispitni uzorci za određenu mešavinu treba da budu reprezentativni uzorci frezovanog kolovoza u pogledu granulometrijskog sastava i oblika zrna ([29] Milton i Earland, 1999). Idealno je da se uzorkuju frezovani uzorci sa terena. Međutim, pravi frezovani materijal obično nije dostupan za vreme ispitivanja pre izvođenja radova, pa izrada prethodne mešavine može da se izvrši na osnovu kernova iz kolovoza ili uzoraka koji su dobijeni drobljenjem u laboratoriji. Posle dobijanja reprezentativnih uzoraka sa terena, RAP se meša sa agregatom iz postojećeg kolovoza i/ili novim dodatnim agregatom.

### 3.6.2 ISPITIVANJE RAP-A

Emery (1993) [33] je sugerisao da treba da se odredi sadržaj vlage, granulometrijski sastav RAP-a, sadržaj bitumena uključujući i penetraciju.

Prema metodologiji za izradu mešavine od hladno recikliranog asfalta prema Institutu za Asfalt ([37] AI, 1983) ova informacija se koristi za određivanje količine novog bitumena koji treba da se doda u reciklirane mešavine vezane bitumenom.

### 3.6.3 GRANULOMETRIJSKI SASTAV

Milton i Earland (1999) [29] preporučili su granulometrijski pojas (gornju i donju granicu) za određivanje pogodnosti granulometrijskog sastava za frezovane materijale koji će se upotrebiti za izradu mešavine od hladno recikliranih materijala, uglavnom: Zona A i Zona B, kako je prikazano u tabeli 2.1.

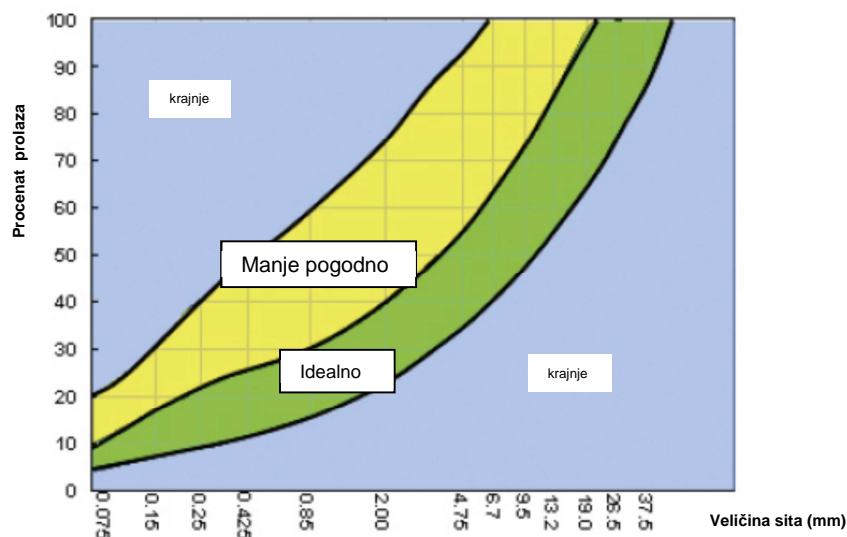
Granulometrijski sastav čestica frezovanog materijala treba uglavnom da odgovara Zoni A gradacije ili u nekim okolnostima, u okviru Zone B pod uslovom da rezultati izrade mešavine pokazuju da se mogu proizvesti prihvatljivi reciklirani materijali ([29] Milton i Earland, 1999).

**Tabela 5** Preporučeni granulometrijski sastav nevezanih materijala za hladnu reciklažu na licu mesta [29]

Veličina sita (mm)	Prolasci kroz sita (%)	
	Zone A	Zone B
50	100	-
37.5	94 – 100	-
20	66 – 100	100
10	48 – 75	75 – 100
5	35 – 57	57 – 95
2.36	25 – 42	42 – 77
0.6	13 – 28	28 – 52
0.3	10 – 24	24 – 45
0.075	5 – 20	20 – 35

Normalno, granulometrijski sastav agregata manje utiče na cementom vezane reciklirane materijale. S druge strane, materijali vezani bitumenom su više osetljivi na granulometrijski sastav struganog materijala, naročito na sadržaj fine frakcije ([29] Milton i Earland, 1999., [31] Wirtgen, 2002). Dodatni novi agregat može biti potreban kako bi se prilagodilo zahtevima veziva i kako bi se korigovao granulometrijski sastav ili povećala debljina recikliranog sloja kolovoza ([38] Wood i sar. 1988).

Ispitivanje ili pokazatelj	Materijal	Procena				CF
		1	2	3	4	
Klasifikacija	CS	Idealno	Manje pogodno	-	Krajnje	0,4
	NG	-	Idealno	Manje pogodno	Krajnje	
	GS	-	Idealno	Manje pogodno	Krajnje	



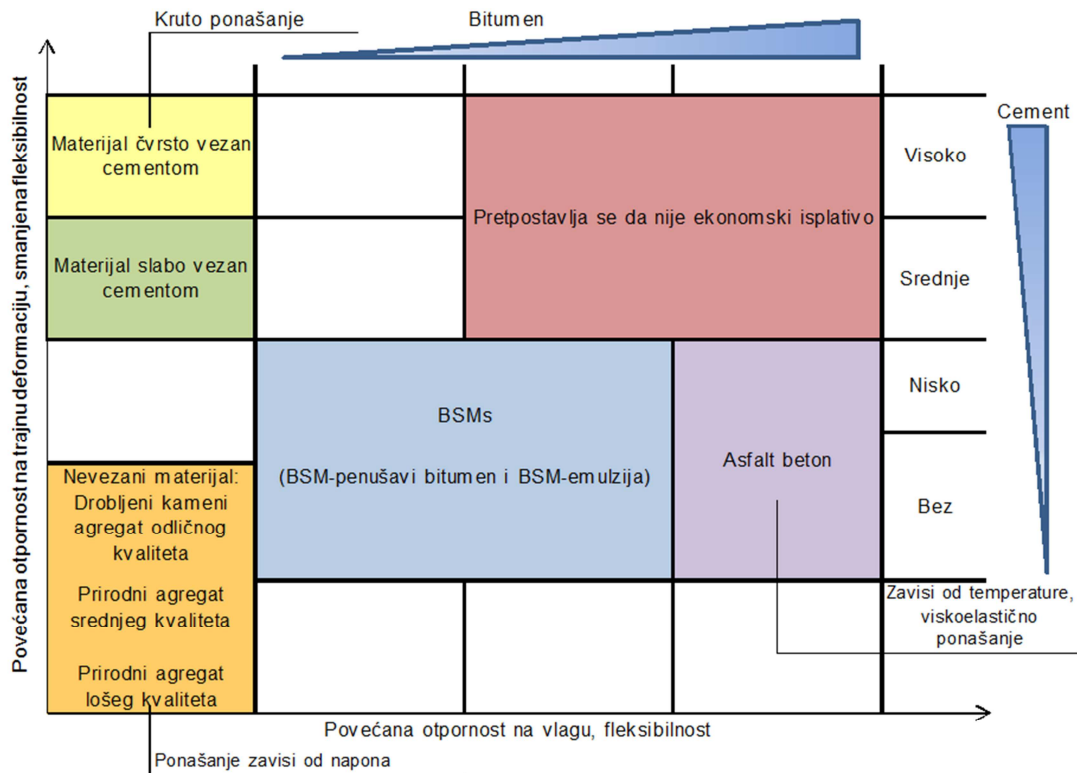
Veličina sita (mm)	Procenat prolaza			
	BSM - Emulzija		BSM – Penušavi bitumen	
	Idealno	Manje pogodno	Idealno	Manje pogodno
50	100		100	
37,5	87-100		87-100	
26,5	77-100	100	77-100	100
19,5	66-99	99-100	66-99	99-100
13,2	67-87	87-100	67-87	87-100
9,6	49-74	74-100	49-74	74-100
6,7	40-62	62-100	40-62	62-100
4,75	35-56	56-95	35-56	56-95
2,36	25-42	42-78	25-42	42-78
1,18	18-33	33-65	18-33	33-65
0,6	12-27	27-54	14-28	28-54
0,425	10-24	24-50	12-26	26-50
0,3	8-21	21-43	10-24	24-43
0,15	3-16	16-30	7-17	17-30
0,075	2-9	9-20	4-10	10-20

Razlika između zona granulometrijskog sastava BSM - emulzije i BSM – penušavog bitumena su dovoljno male da razlika ne može uočiti na slici.

**Slika 16** Evaluacija podobnosti granulometrijskog sastava [39]

### 3.6.4 IZBOR VEZIVA

Moguće je upotrebljavati više vrsta veziva u prilikom hladne reciklaže na licu mesta. U SAD, se koriste cement i bitumenske emulzije ili kombinacija ova dva veziva kako bi se proizvele nove mešavine od frezovanog materijala ([25] Mallick i sar. 2002a). U Evropi i Kanadi, cement i bitumenske emulzije su takođe korišćene i u kombinaciji kako bi se proizvele nove mešavine od frezovanog materijala ([40] Needham i Brown, 1996). U Velikoj Britaniji, osnovna veziva su cement i penušavi bitumen ([29] Milton i Earland, 1999). Šema odlučivanja koja ocrta proces selekcije između ova dva veziva prikazana je na Slici 17 ([29] Milton i Earland, 1999).



**Slika 17** Smernice za izbor veziva u funkciji karakteristika sloja [5]

### 3.6.5 PRETHODNA MEŠAVINA

Obično, pogotovo u SAD, odabir konačnog sadržaja veziva za hladno reciklirane mešavine na licu mesta se bazira na određivanju čvrstoće na pritisak za materijale stabilizovane cementom i Maršal testu sa određivanjem indirektno čvrstoće na zatezanje za materijale stabilizovane bitumenom.

Zbog sličnosti materijala, procedura izrade mešavine za cementom stabilizovane materijale se obično primenjuje i kod cementom stabilizovanih recikliranih materijala. Prethodne mešavine se zbijaju pri optimalnom sadržaju vlage. Zatim, čvrstoća na pritisak za određenu starost (obično 7 dana) se koristi za određivanje optimalnog sadržaja cementa ([41] Kennedy i Klark, 1990).

U slučaju mešavina vezanih bitumenom, [38] Wood i sar. (1988) su izvršili pregled procedura izrade mešavina za hladnu reciklažu na licu mesta koje su stabilizovane sa bitumenom. Ovaj pregled je otkrio da su mnoge putne agencije u SAD koristile Maršalov postupak pri zbijanju uzoraka u izradi mešavina od hladno recikliranog materijala na licu mesta. Procedura zbijanja i sušenja se razlikuje od agencije do agencije. Vrednosti čvrstoće i visko elastične

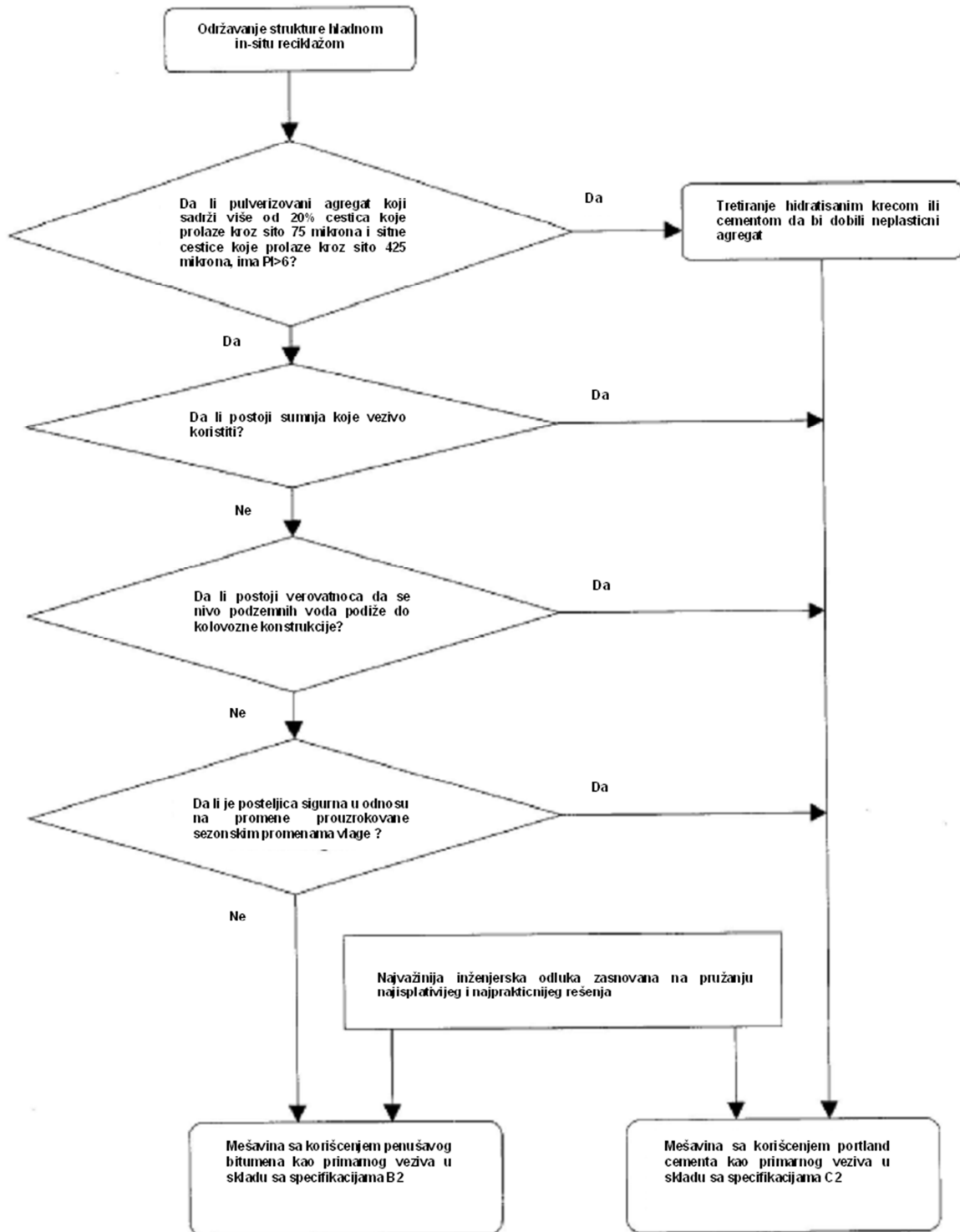
osobine izmerene su Maršalovim opitom. Gustina, stabilnost i sadržaj šupljina se i dalje često koriste kako bi se odredio optimalni sadržaj veziva. Opiti kao što su Hveem-ov rezilijentni moduli i indirektnog zatezanja koristile su i druge agencije ([38] Wood i sar. 1988). Detaljni opisi procedura Maršal, Hveem i opita indirektnog zatezanja opisani su u mnogim drugim izveštajima jer su široko rasprostranjene (npr. [42] Hunter, 2000)

Istraživači (npr. [25] [26] Mallick i sar. 2002a, [43] Cross, 2003) koristili su Gyrotory compactor - Rotirajući nabijač kao sredstvo za pripremu uzoraka za hladno reciklirane mešavine.

Procedure za izradu mešavina za hladno recikliranje na licu mesta su dostupne u sledećim dokumentima:

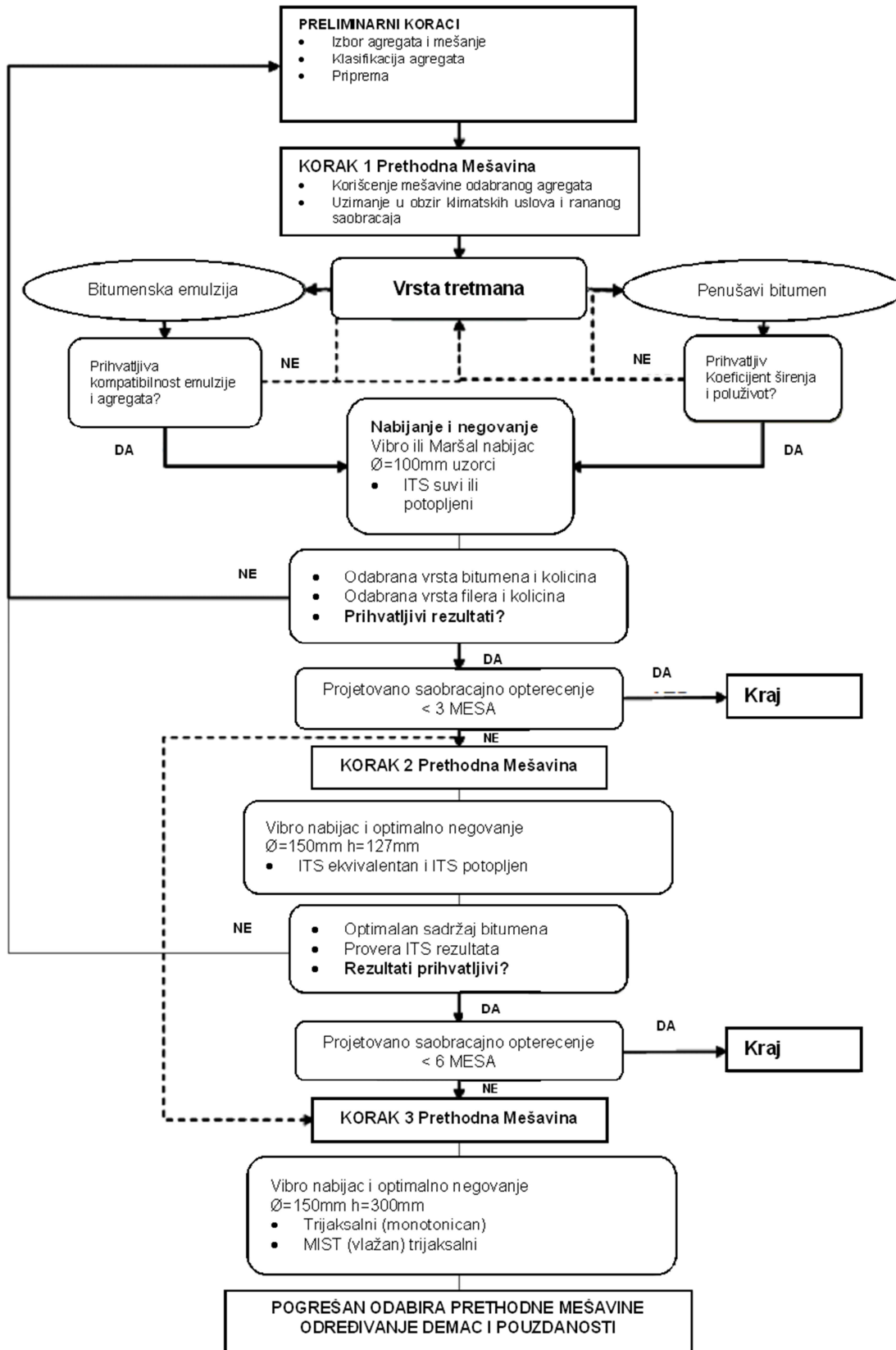
- RVS 08.17.01/2009 – Technische Vertragsbedingungen, Betondecken, mit bindemittel stabilisierte tragschichten – Technical contract conditions, Concrete pavements, Base and Sub-Bases stabilized with Binders, Technical specifications, FSV, Austria, - Tehnički ugovorni uslovi, Betonske kolovozne konstrukcije, Donji noseći slojevi stabilizovani sa vezivima, Tehničke specifikacije, FSV, Austrija,
- RVS 08S.05.13 – Technical contract conditions, Pavement construction (without asphalt construction), Base course, Base course stabilized with Binder, Technical specifications, FSV, Austria, - Tehnički ugovorni uslovi, Kolovozne konstrukcije, Noseći slojevi, Noseći slojevi stabilizovani sa vezivima, Tehničke specifikacije, FSV, Austrija,
- Mešavine sa penušavim bitumenom: Procedura izrade prethodne mešavine (Muthen, 1999),
- Wirtgen-ov priručnik za hladnu reciklažu ([17] [31] Wirtgen, 2012, 2009),
- Proces izrade prethodnih mešavina za hladnu reciklažu upotrebom penušavog bitumena ([44] Lee i Kim, 2003).

Usvajanje optimalnog sadržaja bitumena bazira se na vrednosti rezultata pritisne čvrstoće i/ili indirektno zatezne čvrstoće zbijenih uzoraka sa različitim sadržajima veziva u suvim i/ili u vodozasićenim uslovima. Međutim, Muthen (1999) [45] je predložio i druge opite kao što su rezilijentni moduli i dinamički opit puzanja kako bi se verifikovala usvojena optimalna mešavina i kako bi se obezbedile adekvatne performanse usvojene mešavine.



Slika 18 Algoritam izbora veziva [29]





Slika 19 Algoritam postupka izrade prethodne mešavine sa bitumenskim vezivima [39]

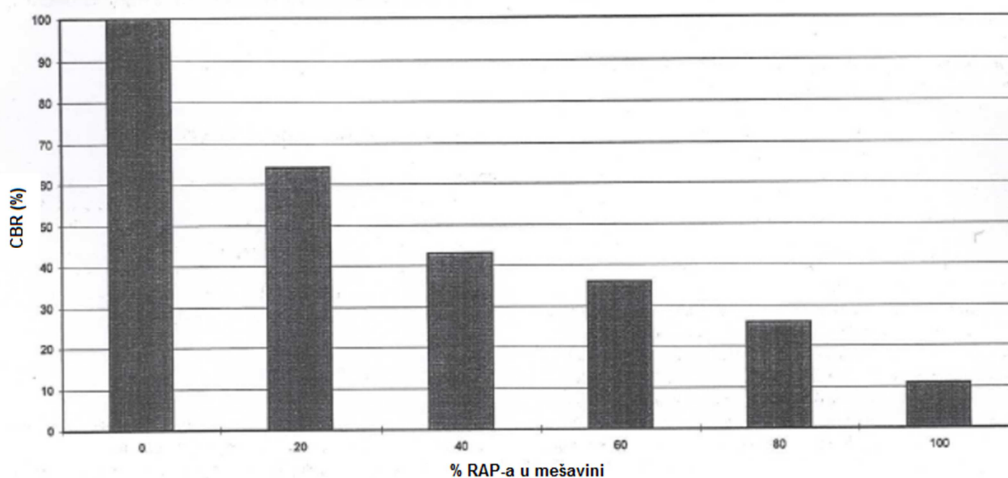
### 3.7 MEHANIČKE KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH MEŠAVINA

Najvažnije mehaničke karakteristike pri projektovanju prethodnih mešavina za hladno recikliranje na licu mesta su: čvrstoća na pritisak - za cementom vezane mešavine, i indirektna zatezna čvrstoća ili Marshall-ove karakteristike - za bitumenom vezane mešavine. Dodatne mehaničke karakteristike, kao što su moduli, otpornost na zamor i otpornost na uticaj vode su takođe važni za obe vrste mešavina.

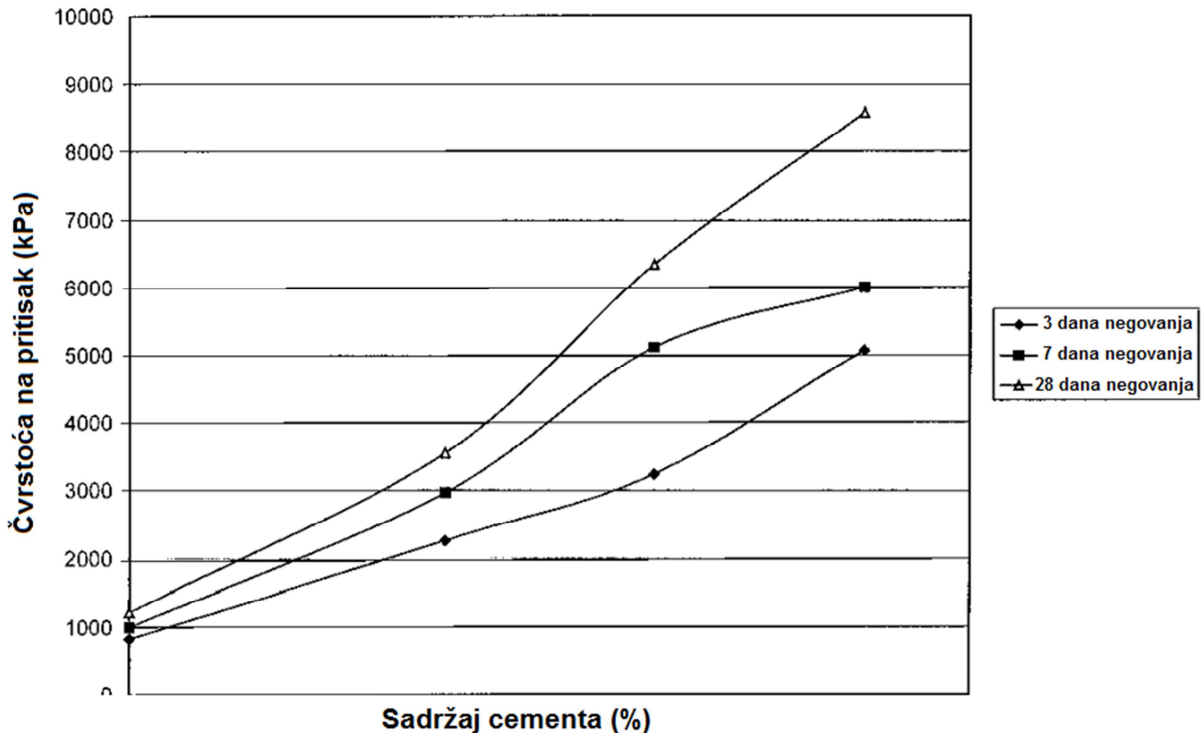
Prikupljeni podaci iz raspoložive literature o mehaničkim karakteristikama hladno recikliranih materijala su prikazani u nastavku.

#### Pritisna čvrstoća

Taha i saradnici (1999) [46] su istraživali mogućnost korišćenja RAP-a u izgradnji puteva. Prikazali su rezultate laboratorijskih CBR vrednosti RAP-a i mešavine kamenog agregata. Rezultati su prikazani na Slici 20. Niske vrednosti CBR-a su dobijane za visoko učešće RAP-a. Sa porastom učešća kamenog agregata zabeležen je i porast vrednosti CBR-a. To se objašnjava boljim mehanizmom prenosa opterećenja i boljom uklještenošću zrna kamenog agregata dok je kod RAP-a (bitumenom obavijena zrna) ona dosta slabija. Kasnije, Taha i dr. (2002) [47] dodaju cement u mešavinu RAP-a i kamenog agregata. Na mešavinama je izvršeno ispitivanje jednoaksijalne pritisne čvrstoće. Na Slici 21 je prikazan međusobni odnos pritisnih čvrstoća različitih mešavina u funkciji od vremena negovanja. Ustanovljeno je da pritisna čvrstoća raste sa porastom dužine vremena negovanja i/ili učešća cementa. Povećanje učešća kamenog agregata isto tako utiče na povećanje pritisne čvrstoće.



**Slika 20** CBR vrednosti različitih mešavina RAP-a i kamenog agregata [46]



**Slika 21** Rezultati pritise čvrstoće hladno recikliranih mešavina na licu mesta sa cementom kao vezivom [47]

### Krutost i Moduli elastičnosti

Poznavanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika cementom vezanih recikliranih materijala je jako važno i za projektovanje prethodnih receptura i za dimenzionisanje kolovoza, tj. Određivanje potrebne debljine recikliranog sloja i asfaltnog habajućeg / nosećeg sloja.

Prema tome, fundamentalne mehaničke osobine recikliranog materijala moraju biti poznate pre početka izvođenja radova. Ovo je glavna poteškoća kod recikliranja, pošto su materijali relativno heterogeni i teško je odrediti granulometrijski sastav recikliranih materijala koji će se dobiti posle frezovanja.

Zbog ove heterogenosti, rasponi varijacija različitih mehaničkih osobina cementom vezanih recikliranih materijala su veliki. Vrednosti sile zatezanja između 0.4 i 2.0 MPa tokom 1.0 – 2.0 godine dobijene su na kernovima izvađenim iz cementom recikliranih kolovoza. Odgovarajući moduli elastičnosti posedovali su raspon između 3.500 i 37.500 MPa.

Prema tome, isti cementom vezani reciklirani materijali su slični nevezanim nosećim slojevima tretiranim cementom, dok su neki drugi bliži stabilizaciji lokalnog tla, uprkos činjenice da, u mnogim slučajevima, sadžaj cementa (od 4.5 do 6.0%) prelazi uobičajeni sadržaj u cementom stabilizovanim nosećim slojevima.

U svakom slučaju, cementom reciklirani materijali imaju visoki modul elastičnosti i prema tome veliku nosivost što dovodi do smanjenja defleksija i oštećenja u posteljici u poređenju sa odgovarajućim vrednostima pre recikliranja.

U ovom pogledu treba spomenuti da su u Francuskoj vrednosti modula elastičnosti posle 365 dana između 11.000 i 20.000 MPa predložene za projektovanje cementom recikliranih slojeva, kako je prikazano u Tabeli 6.

**Tabela 6** Vrednosti modula elastičnosti (posle 365 dana) predloženih za projektovanje kolovoza sa cementom recikliranim slojevima. [19]

Karakteristike recikliranja		Modul elastičnosti (MPa)
Postojeći materijali	Izvođenje	
Agregati dobrog kvaliteta sa homogenim granulometrijskim sastavom	Vezivo visokog učinka sa razastiračima i reciklerima	<b>20.000</b>
Drugi slučajevi	Vezivo visokog učinka sa razastiračima i reciklerima	<b>16.000</b>
Agregati dobrog kvaliteta sa homogenim granulometrijskim sastavom	Drugi slučajevi	<b>16.000</b>
Drugi slučajevi	Drugi slučajevi	<b>11.000</b>

Važna opaska u pogledu vrednosti iz Tabele 6 je uticaj ne samo osobina postojećih materijala u kolovozu, već i opreme koja se koristi za rad, ukratko, od preciznosti i kvaliteta samog procesa izvođenja recikliranja. Vrednosti modula iz Tabele 6 su samo indikativne. Nekoliko laboratorijskih ispitivanja je jasno pokazalo da sadržaj strugane asfaltne mešavine ima uticaja i na pritisnu čvrstoću i na modul elastičnosti. Izgleda da kada je sadžaj asfaltnih materijala manji od 50%, pritisna čvrstoća, koja je najvažnija za učinak cementom recikliranog materijala nije naročito ugrožena, mada je primećeno smanjenje modula elastičnosti. Ovo treba da rezultira mešavinama koje su manje sklone nastanku pukotina. Međutim, ove nalaze treba potvrditi daljim laboratorijskim ispitivanjima.

Iz ovih rezultata i iskustva sa recikliranim kolovozima, može se zaključiti da je, u većini slučajeva, moguće reciklirati oštećeni kolovoz sa cementom bez uklanjanja u potpunosti ili delimično postojećih asfaltnih slojeva. Debljina asfaltnih slojeva koja nije veća od 1/3 ukupne reciklirane debljine izgleda kao dobar kompromis.

### Zakon zamora

Što se tiče zamora kod cementom recikliranih materijala, može se smatrati sličnim kao kod cementne stabilizacije, tj. kriva zamora koja predstavlja odnos između napona i ponovljenih opterećenja ima relativno mali pad. Posledično, nezatno povećanje napona recikliranog sloja, koje je npr. prouzrokovano smanjenjem stvarno izvedene debljine, dovodi do značajnog smanjenja sposobnosti prihvatanja saobraćajnog opterećenja u eksploatacionom periodu. Posledično, ciljna debljina cementom recikliranih slojeva ne bi trebalo da bude manja od 20cm, kako bi se izbeglo formiranje tanjih zona koje bi bile podložne prevremenom zamoru.

Odnosi zamora koji se razvijaju kod ovih materijala su obično prezentirani u formi:

$$\sigma/\sigma_0 = 1 - (1/a) \times \log N$$

gde je:

$\sigma$ : napon koji uzrokuje propadanje posle N ciklusa,

$\sigma_0$ : pritisna čvrstoća

a: koeficijent koji varira od 12 do 16

N: broj ciklusa opterećenja. [48], [49], [50]

#### 3.7.1 BITUMENOM STABILIZOVANI RECIKLIRANI MATERIJALI IZ FLEKSIBILNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA

U slučaju projektovanja novih materijala, projektant ima mogućnost da odabere komponentne materijale i da projektuje sastav asfaltne mešavine kako bi dobio unapred određene mehaničke karakteritike određene standardima i tehničkim specifikacijama. U slučaju hladne reciklaže na licu mesta sa bitumenskom emulzijom ili penušavim bitumenom,

prisutni materijali u postojećem kolovozu će u velikoj meri odrediti mehaničke karakteristike koje se mogu dobiti, uz uslov dobijanja korektne obavijenosti. Prema tome, ovde se mogu dati samo indikativni i prilično široki intervali za moguće vrednosti fundamentalnih mehaničkih karakteristika. Takođe je važno podsetiti da se, zbog promena tokom vremena mehaničkih karakteristika hladno recikliranog materijala u kolovozu, vrednosti koje su određene u laboratoriji posle konvencionalnog procesa starenja imaju simulacioni karakter.

Razlike u specificiranim vrednostima u različitim zemljama se objašnjavaju realnim materijalom koji se reciklira i ciljevima reciklaže (*uglavnom stabilizacija nevezanih materijala nasuprot reciklaži asfaltnih habajućih slojeva*).

Mehaničke karakteristike, koje se generalno razmatraju za projektovanje prethodne recepture, su sledeće:

- Čvrstoća na pritisak ili indirektna zatezna čvrstoća / stabilnost po Marshall-u, bez i sa potapanjem u vodu, uglavnom kao svojstvo trajnosti,
- Modul elastičnosti, kao svojstvo deformacije.

### **Materijali reciklirani sa bitumenskom emulzijom**

Generalno specifikacije pritisne čvrstoće odnose se na minimalnu vrednost čvrstoće pri pritisku. Kako bi se dopunile ove indikacije, vrednosti indirektna zatezne čvrstoće ITS koje su dobijene u Kanadi u Kvebeku imaju sledeći raspon:

- Za drobljeni kameni agregat i mešavine struganog asfalta i drobljenog agregata su od 0.40 do 0.80 MPa,
- Za strugani asfaltni materijal su od 0.25 do 0.50 MPa.

Što se tiče krutosti, vrednosti Young-ovog modula elastičnosti dobijenog u Francuskoj za reciklirane materijale, ugrađenih u kolovoz, imaju sledeći raspon:

- Nevezani granularni materijal stabilizovan bitumenskom emulzijom od 1.500 do 2.500 MPa,
- Reciklirani materijal sa bitumenskom emulzijom uključujući od 75 do 90% recikliranog asfaltnog materijala od 2.000 do 3.000 MPa,
- Reciklirani materijal sa bitumenskom emulzijom sa više od 90% recikliranog asfaltnog materijala, od 3.000 do 4.000 MPa.

Posle izvesnog vremena, koje može da iznosi nekoliko nedelja ili više od godinu dana, nakon zbivanja (*u zavisnosti od prirode bitumenske emulzije, afiniteta između veziva i emulzije, klimatskih uslova*) generalno, postaje moguće (ali ne i uvek) da se kernuju uzorci, a onda vrše laboratorijska ispitivanja za određivanje modula. Nega mešavine i starenje veziva praćeno je povećanjem modula sloja recikliranog materijala. Posle nekoliko godina, vrednosti od oko 4.000 MPa su dobijene kod eruptivnih agregata.

**Tabela 7** Primer korelacije između rezultata Duriez-ovog testa i procene Young-ovog modula za materijale reciklirane sa bitumenskom emulzijom ugrađenih u kolovoz (Francuska) [50]

Rezultati Duriez testa	Procena Young-ovog modula na 15°C i 10 Hz
Nevezani kameni agregat stabilizovan bitumenskom emulzijom:	
○ R na 14 dana između 1.5 i 2.2 MPa i	<b>1.500 MPa</b>
○ R na 14 dana između 2.2 i 3.0 MPa	<b>2.500 MPa</b>
Reciklirani materijal sa bitumenskom emulzijom uključujući 75 do 90% recikliranog asfaltnog materijala:	
○ R na 14 dana manji od 4 MPa	<b>2.000 MPa</b>
○ R na 14 dana veći od 4 MPa	<b>3.000 MPa</b>
Reciklirani materijal sa bitumenskom emulzijom sa više od 90% recikliranog asfaltnog materijala:	
○ R na 14 dana veći od 4MPa i $r/R \geq 0.70$	<b>4.000 MPa</b>
○ Drugi slučajevi	<b>3.000 MPa</b>

### Materijali reciklirani sa penušavim bitumenom

Za granulirane materijale reciklirane penušavim bitumenom, klasifikacija je predložena u Južnoj Africi, koja kombinuje rezultate ispitivanja indirektno zatezne čvrstoće i jednoosijalne pritisne čvrstoće. Klase su prikazane u tabeli 8. Klasa FB4 je ograničena na puteve sa niskim saobraćajnim opterećenjem, dok je klasa FB1 za najveće saobraćajno opterećenje.

Niske vrednosti zajedno sa niskim sadržajem veziva ne mogu da obezbede dobru trajnost recikliranih materijala u prisustvu vode.

**Tabela 8** Sistem klasifikacije za materijale reciklirane sa penušavim bitumenom [21]

		Indirektna zatezna čvrstoća na 25°C (KPa)	
		100 - 300	300 – 500
Jednoosijalna pritisna čvrstoća na 25°C	700 – 1400	<b>FB4</b>	<b>FB3</b>
	1400 – 2000	<b>FB2</b>	<b>FB1</b>

U Južnoj Africi je usvojeno da test indirektno zatezne čvrstoće i jednoosijalne pritisne čvrstoće nisu potpuno pouzdani opiti za karakterizaciju hladno recikliranih materijala. Triaksijalno ispitivanje daje pouzdanije fundamentalne mehaničke osobine mešavine, ali se ne koristi za uobičajene prethodne recepture zbog vremena izvođenja opita i troškova ispitivanja. Ipak, triaksijalno ispitivanje treba da se razmotri za hladne mešavine koje nemaju visoki sadržaj cementa (<1.5%). Zbog distribucije bitumena u kapljicama, stabilizovani materijal (kamen skelet podržan penušavim bitumenom bogatim sa bitumenskim mastiksom) neće pokazati istu osetljivost modula na temperature i frekvenciju opterećenja kao klasična asfaltna mešavina koja ima istu kompoziciju agregata i sadržaj veziva.

Za reciklažu asfaltnih slojeva, u Velikoj Britaniji, preporučene ciljne vrednosti za modul krutosti kako je odredio Nottingham Asphalt Tester (NAT) su minimalni modul na indirektno zatezanje od 2.000 MPa za individualne rezultate i 2.500 MPa za srednju vrednost na seriji kernova ([29] Milton, 1999).

Mehaničke karakteristike materijala recikliranih sa penušavim bitumenom se menjaju tokom vremena nakon ugrađivanja. Interpretacija merenih defleksija koja je napravljena u Australiji (u Kvinslendu, 2001) rezultirala je u dodeljivanju sledećih vrednosti materijalu recikliranom sa penušavim bitumenom:

- od 1.000 do 2.000 MPa kratkoročno (prvi meseci nakon završetka izvođenja radova),
- do 5.000 MPa u određenim slučajevima dugoročno (posle nekoliko godina).

Ove vrednosti su konzistentne sa onima koje su pomenute u drugim publikacijama, na primer:

- 2.500 do 5.000 MPa za reciklažu na licu mesta asfaltnog materijala pomešanog sa drobljenim agregatom ([31] Wirtgen, 2002),
- 2.500 MPa kao ciljna vrednost koja se koristi u Velikoj Britaniji i proverava proračunom "backcalculation" merenih defleksija na rehabilitovanim fleksibilnim kolovozima ([29] Milton, 1999).

### **Zakon zamora**

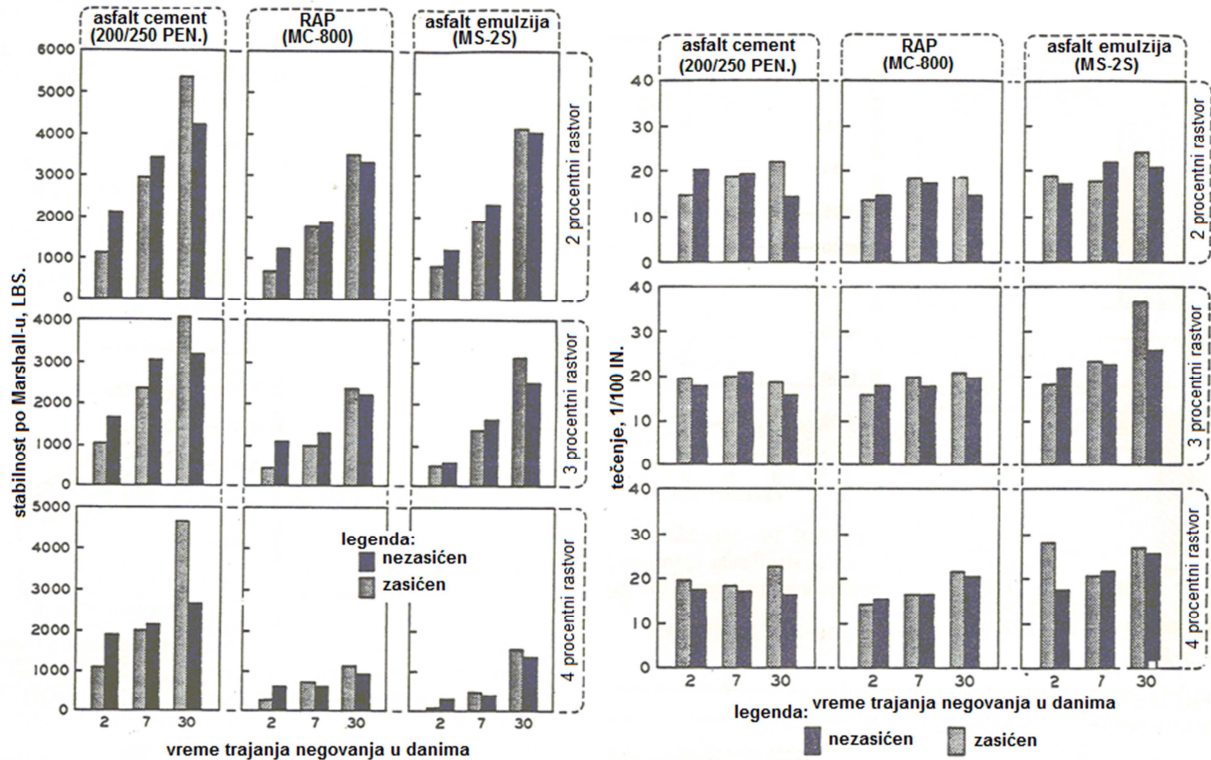
Za proračune u projektu sa višeslojnim elastičnim sistemom, neophodno je dodeliti sloju recikliranog materijala reprezentativne vrednosti Young-ovog modula i Poisson-ovog koeficijenta. Ako se izaberu vrednosti Young-ovog modula treba usvojiti i vrednost za Poisson-ov koeficijent od oko 0.35. Kako je već pomenuto, kriterijum projektovanja je često granična vrednost za vertikalnu deformaciju  $\epsilon_z$  na nivou posteljice. Na primer, u Francuskoj, kriterijum za lako saobraćajno opterećenje na putevima je:

$$\epsilon_{z,lim} = 1200 \times N^{-0.222}$$

gde je N - broj standardnih osovina od 130 kN.

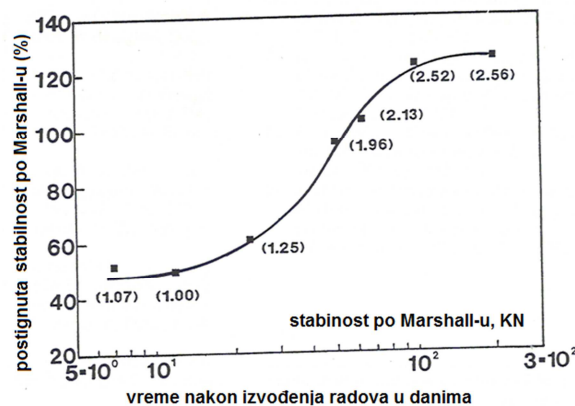
### **Stabilnost i Tečenje po Marshall-u**

Epps zveštava o Marshall-ovim karakteristikama, vremenu negovanja, upijanju vode, vrsti i sadržaju veziva bitumenom vezanih hladno recikliranih uzoraka kako je prikazano na Slici 22. Generalno, stabilnost raste sa vremenom negovanja. Upijanje tokom 24 sata uzrokuje gubitak čvrstoće dok se ne postigne dovoljno dugačko vreme negovanja. Uobičajeno, minimum jedna nedelja negovanja se zahteva za postizanje odgovarajuće čvrstoće i otpornosti na uticaj vode ([22] Epps, 1990).



**Slika 22** Odnos Stabilnosti i Tečenja po Marshall-u i vremena negovanja za zasićene i nezasićene vodom hladno reciklirane uzorke vezane bitumenskom emulzijom [22]

Cohen et al (1989) [51] je izvršio ispitivanje Stabilnosti po Marshall-u na kernovima iz hladno recikliranog kolovoza sa bitumenskom emulzijom kao vezivom. Odnos između vrednosti Stabilnosti koja je dobijena na uzorcima iz kolovoza i projektovane vrednosti tokom vremena je prikazan na Slici 23. Rezultati pokazuju da je inicijalna odnosno početna postignuta Stabilnost relativno niska, ali da ona znatno raste nakon 100 dana. Nakon toga vrednosti postaju konstantne. Znatna priraštaj čvrstoće se pripisuje gubitku vlažnosti i očvršćavanju bitumena iz bitumenske emulzije. U ovom slučaju reciklirani sloj postiže svoje trajne vrednosti nakon 100 dana ([51] Cohen et al, 1989).



**Slika 23** Postignuta Stabilnost po Marshall-u u odnosu na vreme nakon izvođenja radova. [51]



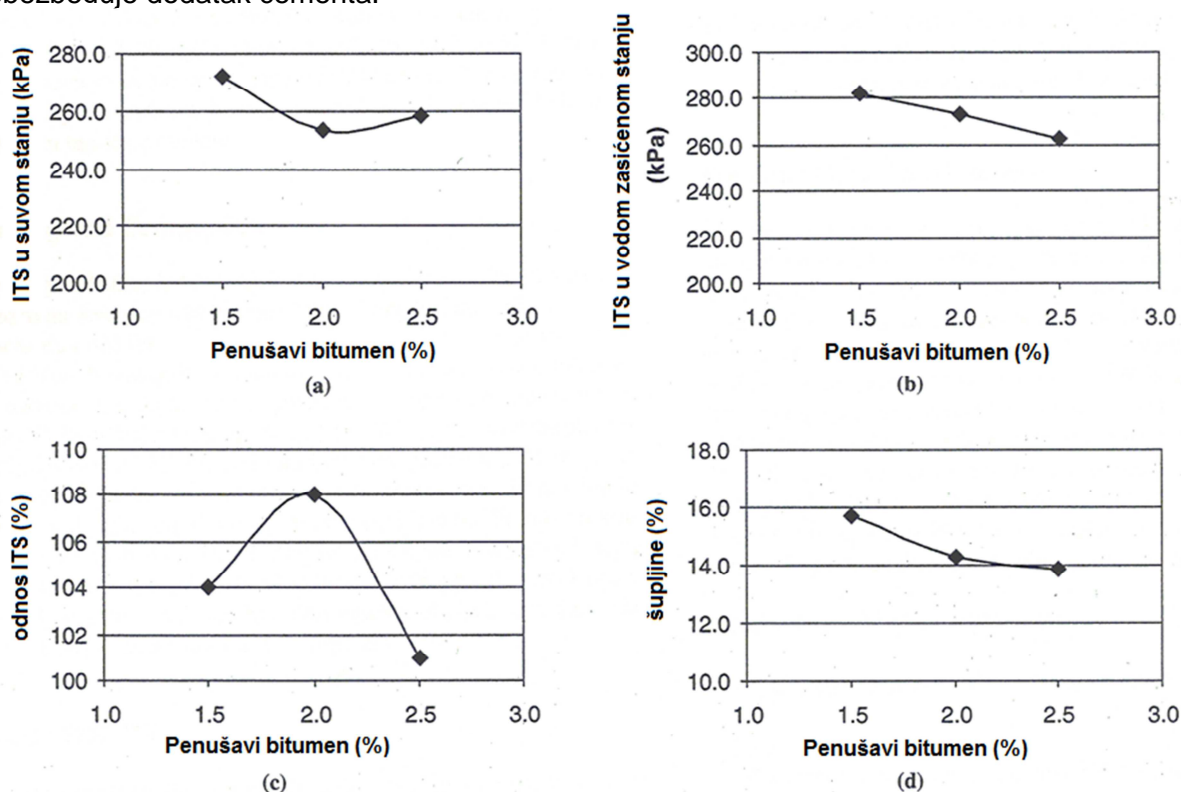
## Indirektna Zatezna Čvrstoća – ITS

Tabela 9 prikazuje rezultate ispitivanja mešavina sa različitim učešćem RAP-a i kamenog agregata vezanih penušavim bitumenom kao vezivom ([52] Ruenkraiters et al, 2004). Rezultati pokazuju da indirektna zatezna čvrstoća i u suvom i u vlažnom stanju opadaju sa povećanjem učešća RAP-a u mešavini. U svakom slučaju, sa porastom učešća RAP-a, otpornost na uticaj vlage se povećava što pokazuju vrednosti ITS-a.

**Tabela 9** Karakteristike mešavina sa penušavim bitumenom tokom procesa izrade prethodne mešavine [52]

Proporcije mešavine (Drobljeni kamen : RAP)	20 : 80	50 : 50	100 : 0
Optimalni sadržaj pene (%)	2.1	2.6	3.4
Nezasićen ITS (kPa)	453	465	540
Zasićen ITS (kPa)	366	348	390
Postignut ITS (%)	80	75	72
Gustina u suvom stanju (Mg/m <sup>3</sup> )	2.188	2.190	2.210

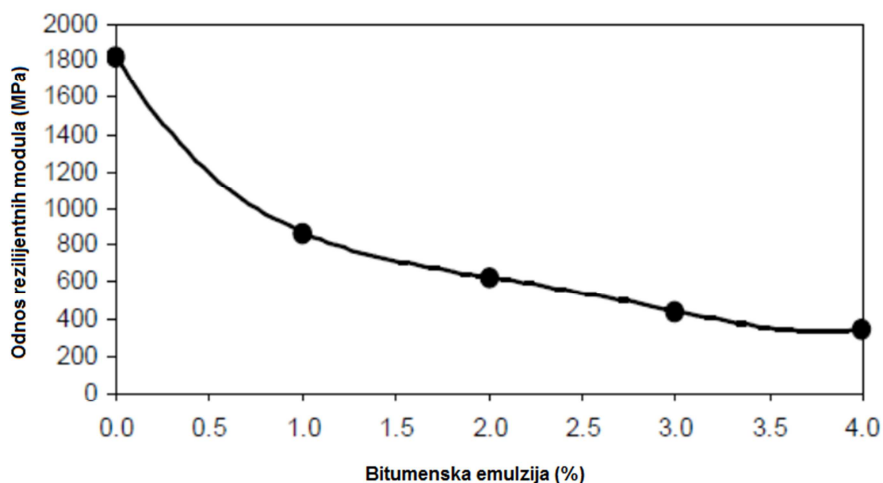
Muhammad i dr. (2003) [53] je predstavio rezultate ITS u suvom i vodom zasićenom stanju za mešavine stabilizovane sa penušavim bitumenom u različitim procentima i dodatkom 1.5% cementa što je prikazano na Slici 24. Čvrstoća vodom zasićenih uzoraka je generalno viša od čvrstoće kod suvih uzoraka. Oni smatraju da povećanje čvrstoće u vlažnom stanju obezbeđuje dodatak cementa.



**Slika 24** Rezultati ispitivanja ITS-a: Penušavi bitumen vs. (a) ITS u suvom stanju, (b) ITS vodom zasićenom stanju, (c) odnos ITS, i (d) šupljine [53]

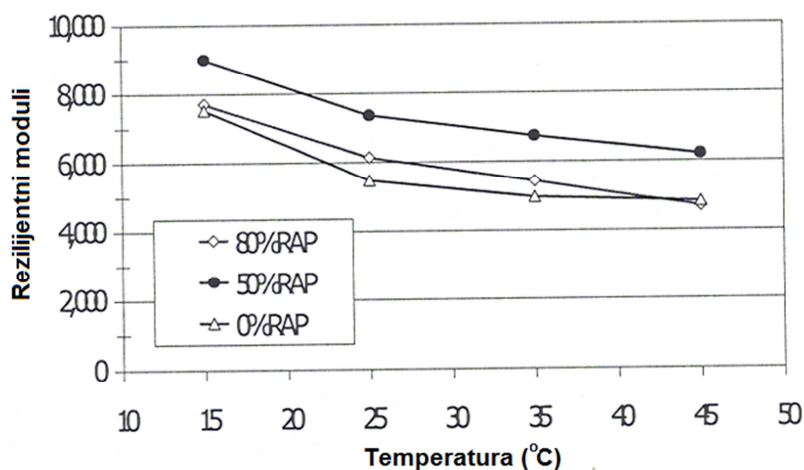
## Moduli krutosti

Cross and Fager (1995) [34] određuju module krutosti hladno recikliranih mešavina na licu mesta stabilizovanih bitumenskom emulzijom. Opit rezilijentnih modula je izveden na RAP-u pripremljenom u laboratoriji sa dodavanjem bitumenske emulzije. Rezultati su prikazani na Slici 25. Može se primetiti da sa porastom učešća bitumenske emulzije opada vrednost rezilijentnih modula.



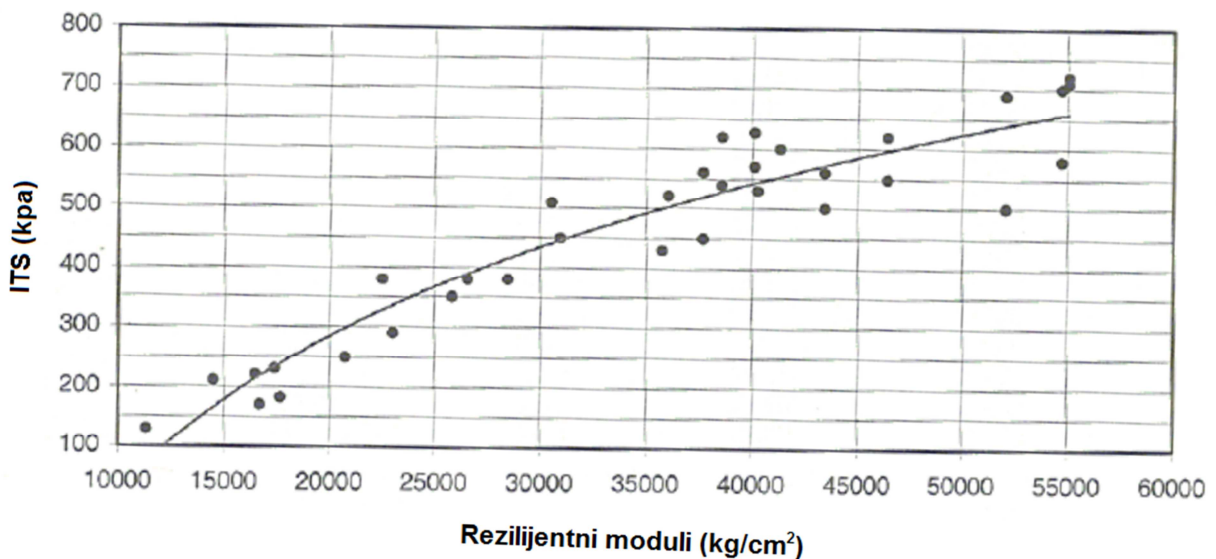
**Slika 25** Odnos rezilijentnih modula i procenta učešća bitumenske emulzije hladno recikliranih mešavina [34]

Ruenkrairergsa i dr. (2004) [52] je dobio kao krajnje iznenađujući rezultat da mešavine sa penušavim bitumenom koje sadrže 50% RAP-a i 50% kamenog agregata poseduju više vrednosti rezilijentnih modula u odnosu na mešavine koje sadrže 0% i 80% RAP-a. Ovaj rezultat je prikazan na Slici 26. Slika prikazuje uticaj temperature na rezilijentne module mešavine. Rezilijentni moduli mešavine opadaju sa porastom temperature. Rezultati pokazuju i da mešavine sa 80% RAP-a poseduju najveći pad rezilijentnih modula sa porastom temperature.



**Slika 26** Rezilijentni moduli mešavina sa penušavim bitumenom na različitim temperaturama [52]

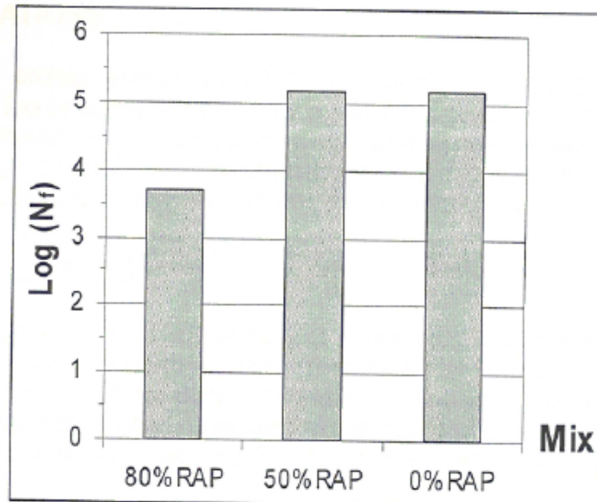
Sledeća slika prikazuje odnos između rezilijentnih modula iz triaksijalnog opita i ITS-a mešavina stabilizovanih sa penušavim bitumenom [52].



**Slika 27** ITS i rezilijentni moduli kod mešavina stabilizovanih penušavim bitumenom. [52]

### Otpornost na zamor

Otpornost na zamor mešavina sa penušavim bitumenom pripremljenih u laboratoriji je prikazana od strane Ruenkrairergsa i dr. (2004) [52]. Tri mešavine RAP-a i kamenog agregata sa različitim učešćima su stabilizovane bitumenom. Mešavine su ispitane na ITS - otpornost na zamor pri nivou napona od 250kPa na 25 °C do loma (*trenutni rezilijentni modul pada na 50% od početnog rezilijentnog modula*). Rezultati su prikazani na Slici 28. Mešavine koje sadrže 80% RAP-a i 20% kamenog agregata pokazuju nešto manju otpornost na zamor u odnosu na mešavine sa smanjenim učešćem RAP-a. Otpornost na zamor mešavina sa 50% i 0% RAP-a je slična, što ukazuje da RAP može da zameni kameni agregat do oko 50% bez gubitka otpornosti na zamor.



**Slika 28** Otpornost na zamor hladno recikliranih mešavina sa penušavim bitumenom [52]

Oke, Parry and Thom, (2014.) [54] su izveli eksperiment sa ciljem određivanja performansi mešavina stabilizovanih bitumenskom emulzijom. Četiri vrste materijala su ispitane. Ispitivanje je izvedeno na Nottingham asphalt tester-u - NAT u Indirect Tensile Fatigue Test - ITFT modu. Korišćeni su sledeći materijali za pripremu uzoraka za ispitivanje: RAP sa rezidualnim bitumenom sa penetracijom od 5dmm, 10dmm i 20dmm, Eruptivni pesak 5mm, Eruptivni filer, Eruptivni agregat različite frakcije, bitumenska emulzija sa rezidualnim bitumenom penetracije 48dmm i destilovanom vodom.

Ispitane su sledeće četiri mešavine (CBEM's):

1. VACBEM - 100% vezivo i kameni agregat,
2. 5dmmCBEM - 65% RAP (ekstrahovani bitumen pen = 5dmm)
3. 10dmmCBEM - 65% RAP (ekstrahovani bitumen pen = 10dmm)
4. 20dmmCBEM - 65% RAP (ekstrahovani bitumen pen = 20dmm)

Mešavine (CBEM-ovi) pod 2. i 4. su pripremljene laboratoriji u odnosu RAP-a, peska (do 5mm) i filera od 65:30:5 od postojećeg Bitumeniziranog nosećeg sloja sa maksimalnim zrnom od 20mm sa 4.25% bitumena. VACBEM je pripremljena na isti način osim što je RAP zamenjen kamenim agregatom maksimalnog zrna 20mm. Korišćen je eruptivni agregat.

Svi pripremljeni uzorci su posedovali isti granulometrijski sastav (10mmDBM) i ukupni sadržaj vode (voda iz agregata i iz bitumenske emulzije) kako bi rezultati bili uporedivi sa ciljem određivanja cilja istraživanja koji se ogleda u pronalaženju tačke u kojoj rezidualni stari bitumen (iz RAP-a) u mešavini počinje da utiče na mehaničke karakteristike mešavine.

**Tabela 10** Pregledna tabela rezultata sprovedenih ispitivanja [54]

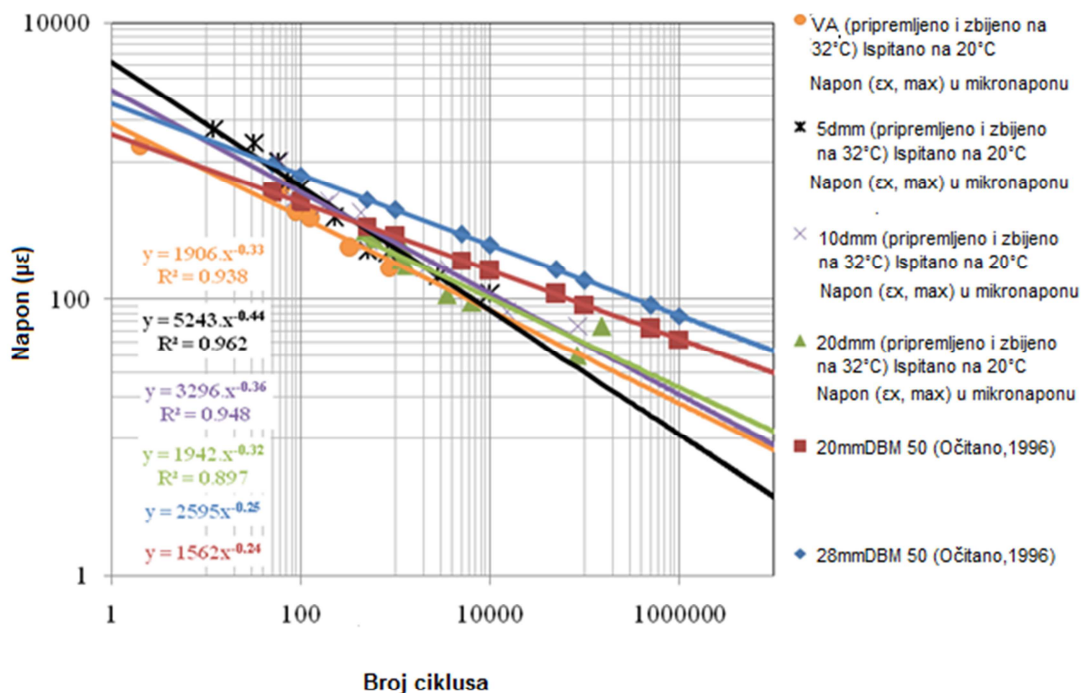
Vrsta mešavine	Formula za Napon	Formula za cikluse do loma	R <sup>2</sup>
VA (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 20°C	$1906,1N_f^{-0,338}$	$1,67 \times 10^9 \epsilon^{-2,776}$	0,94
VA (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 30°C	$69995N_f^{-0,916}$	$99856\epsilon^{-0,989}$	0,91
5dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 20°C	$5862,8N_f^{-0,45}$	$9,13 \times 10^8 \epsilon^{-2,082}$	0,94
5dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 20°C	$5243,2N_f^{-0,449}$	$1,13 \times 10^8 \epsilon^{-2,141}$	0,96
5dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 30°C	$6369,9N_f^{-0,453}$	$1,24 \times 10^8 \epsilon^{-2,101}$	0,95
5dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 30°C	$3217,1N_f^{-0,328}$	$1,7 \times 10^{10} \epsilon^{-2,878}$	0,94
10dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 20°C	$9431,8N_f^{-0,559}$	$8,04 \times 10^7 \epsilon^{-1,719}$	0,96
10dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 20°C	$3296,3N_f^{-0,367}$	$1,77 \times 10^9 \epsilon^{-2,585}$	0,95
10dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 30°C	$95090,4N_f^{-0,51}$	$4,3 \times 10^7 \epsilon^{-1,9}$	0,97
10dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 30°C	$7434N_f^{-0,518}$	$1,27 \times 10^7 \epsilon^{-1,799}$	0,93
20dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 20°C	$2623,1N_f^{-0,377}$	$6,93 \times 10^8 \epsilon^{-2,557}$	0,96
20dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 20°C	$1942N_f^{-0,32}$	$3,79 \times 10^9 \epsilon^{-2,803}$	0,90
20dmm (pripremljeno i zbijeno na 20°C) Ispitano na 30°C	$7581,3N_f^{-0,451}$	$1,24 \times 10^8 \epsilon^{-2,046}$	0,92
20dmm (pripremljeno i zbijeno na 32°C) Ispitano na 30°C	$7182,5N_f^{-0,465}$	$1,16 \times 10^8 \epsilon^{-2,068}$	0,96
20mmDBM	$1562N_f^{-0,246}$	$9,6 \times 10^{12} \epsilon^{-4,065}$	-
28mmDBM 50	$12595N_f^{-0,255}$	$2,45 \times 10^{13} \epsilon^{-3,922}$	-

Slike 29 i 30 prikazuju krive zamora za ispitivanja sprovedena na 20°C i 30°C. Slika 29 za opit na 20°C prikazuje da 20dmm CBEM poseduje najveću otpornost na zamor u odnosu na sve ispitivane mešavine, dok 5dmm poseduje najmanju otpornost na zamor. To je u suprotnosti sa logikom koju su sugerisali istraživači, da će mešavina sa najkrućim bitumenom posedovati najveću otpornost na zamor [54].

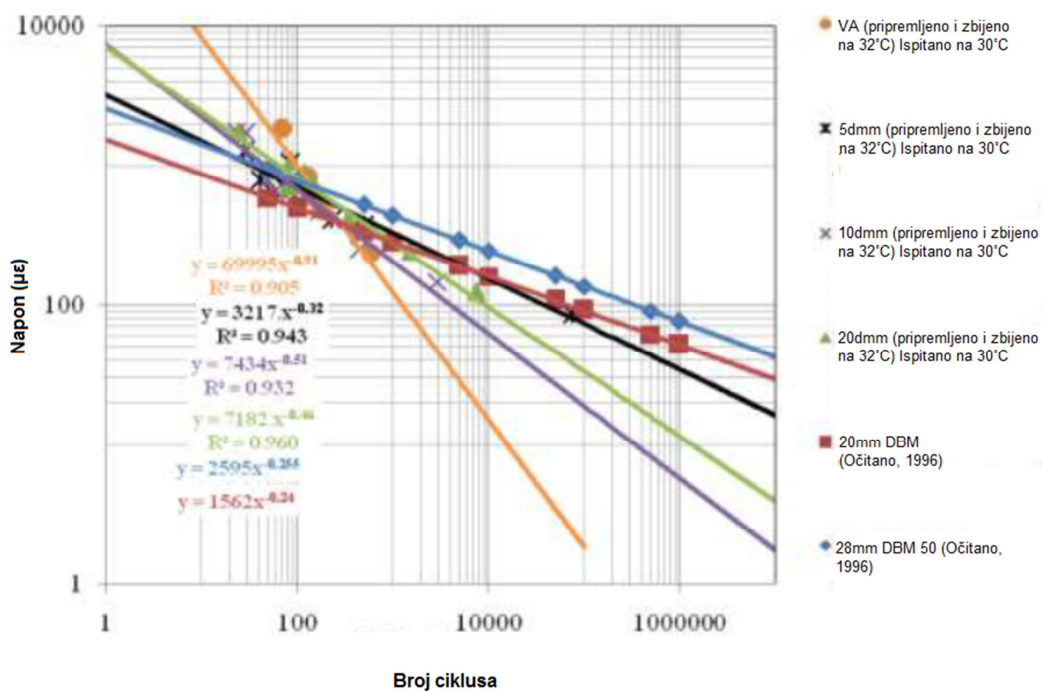
Objašnjenje za ovaj stav ogleda se u činjenici da je rezidualni bitumen iz emulzije odigrao najvažniju ulogu u karakteristikama na zamor za 5dmmCBEM. Aktivnost starog bitumena nije dovoljno značajna da utiče na karakteristike kompletnog veziva u mešavini.

Od mešavine VACBEM je izvorno očekivano da će posedovati najmanju otpornost na zamor, sledeće rangirana mešavina do 5dmmCBEM je bila mešavina 10dmmCBEM. Veće učešće rezidualnog starog bitumena iz 10dmm RAP-a je verovatno bilo osveženo (rejuvirano) u odnosu na 5dmmCBEM. Pa je stoga logično da 20dmmCBEM pokazuje najveću otpornost na zamor uzimajući u obzir da poseduje najveći potencijal za osvežavanje starog veziva (ukoliko će se ono desiti) što je posledica najaktivnijeg i najkrućeg veziva na temperaturi od 30°C na kojoj je vršena priprema mešavina.

Temperatura pripreme mešavine je verovatno bila dovoljna da aktivira značajnu količinu starog bitumena iz 20dmm RAP-a uzrokujući interakciju sa rezidualnim bitumenom iz emulzije i posle tokom procesa starenja kompletno vezivo u mešavini postaje kruće. Taj poredak bi se promenio ukoliko bi se kod pripreme uzoraka koristila dovoljno visoka temperatura da aktivira sve stare bitumen iz 5dmm i 10dmm RAP-ova.



**Slika 29** Karakteristike zamora CBEM-ova negovanih na 60 °C preko 96 sati, pripremljenih i zbijenih na 32 °C, ispitanih na 20 °C [54]



**Slika 30** Karakteristike zamora CBEM-ova negovanih na 60°C preko 96 sati, pripremljenih i zbijenih na 32 °C, ispitanih na 30 °C [54]

U ovom ograničenom eksperimentu je zaključeno da je otpornost na zamor generalno niža u odnosu na klasične - vruće asfaltne mešavine. Za ispitivanja izvršena na 30<sup>0</sup>C, u svim slučajevima je najbolju otpornost posedovala 5dmmCBEM praćena sa 20dmmCBEM, dok je VACBEM poseduje najmanju otpornost na zamor.

Za ispitivanja izvršena na 30<sup>0</sup>C, rezultat za  $1.0 \times 10^3$  ciklusa do loma ukazuje da VACBEM poeduje najmanju dilataciju dok su kod RAP CBEM-ova dobijene vrednosti generalno više od 200 $\mu\epsilon$ . Ovaj trend je sličan kod ispitivanja na 30<sup>0</sup>C. Rezultati pokazuju da VACBEM poseduje najbolju otpornost pri visokim nivoima napona u poređenju da svim ostalim mešavinama. Sa druge strane 5dmmCBEM poseduje najmanju dilataciju u odnosu na sve CBEM-ove pripremljene na 32<sup>0</sup>C i ispitane na 30<sup>0</sup>C. Generalno, RAP mešavine pripremljene na 32<sup>0</sup>C poseduju bolju otpornost na zamor od onih koje su pripremljene na 20<sup>0</sup>C.

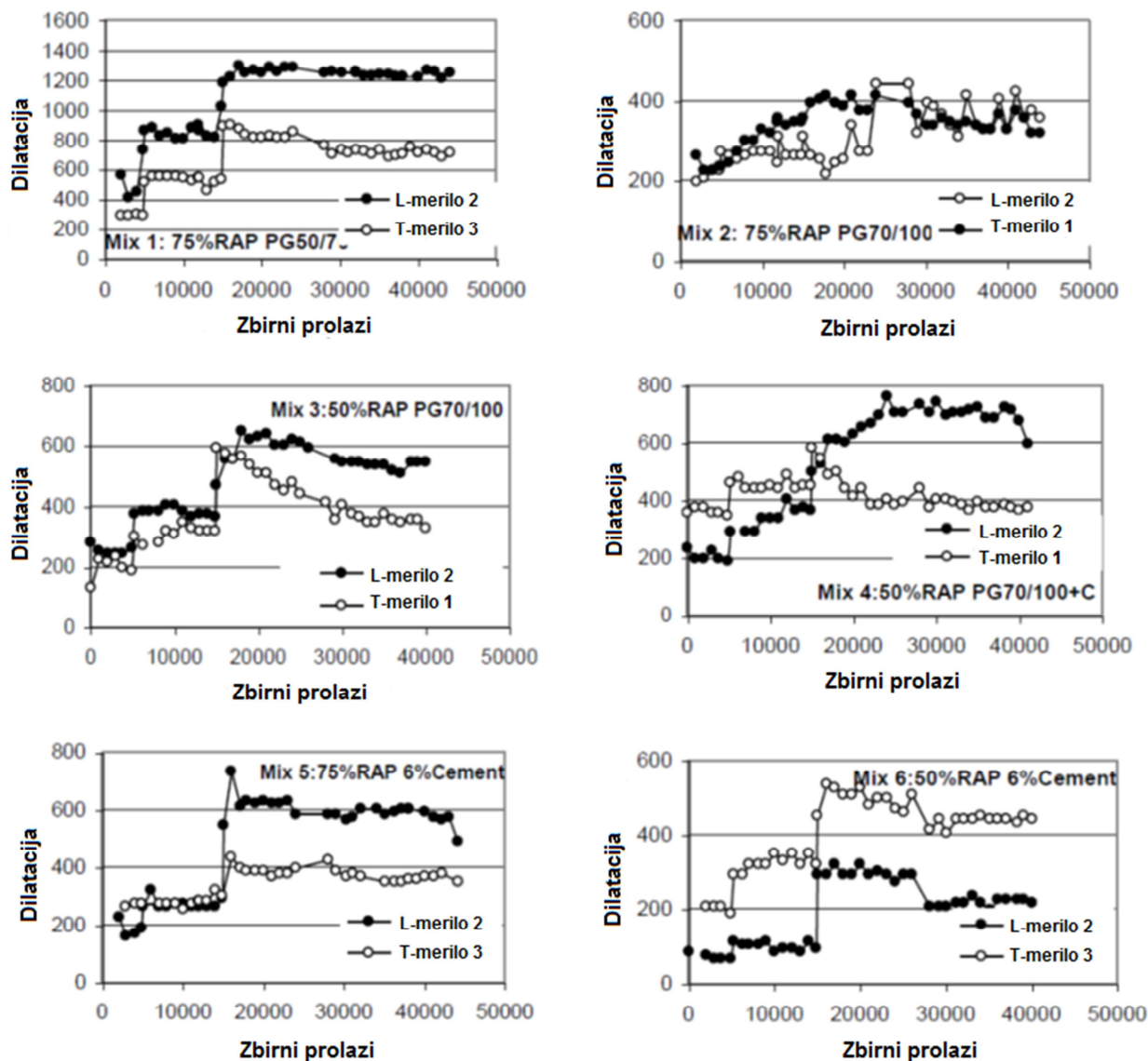
Kao deo ekeprimenta sprovedenog na RAP-u stabilizovanom sa bitumenskom emulzijom sa dodatkom cementa, Montepara i Giuliani (2002.) [56] su sprovedli analizu na molekularnom nivou i pokazali da se dodavanjem cementa ne generiše novo vezivo. Efekat krutosti se pojavljuje zbog dva simultana mehanizma, loma emulzije i hidratacije cementa u okviru faze oslobađanja vode iz bitumenske emulzije prilikom loma. Hidratacijom se formira komponenta koja ispunjava deo šupljina i samim tim povećava koheziju i krutost kompletne mešavine. Veoma slične zaključke možemo očekivati ukoliko bi se koristio penušavi bitumen umesto bitumenske emulzije.

Jitareekul, Sunarjono, Zoorob i Thom, (2012.) [55] su istraživali na recikliranom kolovozu koji je izgrađen u laboratoriji od mešavine RAP-a, drobljenog krečnjačkog agregata sa određenim vezivima. RAP i drobljeni krečnjački agregat su mešani u dva odnosa sa različitim vezivima: penušavi bitumen, cement i penušavi bitumen sa malim sadržajem cementa. Postrojenje za ubrzano ispitivanje kolovoznih konstrukcija u Nottingham-u je korišćeno za izlaganje uticajima realnog saobraćajnog opterećenja različitih kolovoznih konstrukcija korišćenjem opterećenog točka.

Mešavine RAP-a i kamenog agregata su stabilizovane sa penušavim bitumenom i/ili cementom. Četiri mešavine su pretežno stabilizovane sa penušavim bitumenom i dve sa cementom. U jednoj od mešavina sa penušavim bitumenom (Mešavina 4), 1.5% cementa je dodato u odnosu na masu agregata.

Ukupno šest mešavina je pripremljeno prema sledećem:

- Mešavina 1 – Mix 1: Penušavi bitumen PG50/70 sa 75%RAP,
- Mešavina 2 – Mix 2: Penušavi bitumen PG70/100 sa 75% RAP,
- Mešavina 3 – Mix 3: Penušavi bitumen PG70/100 sa 50% RAP,
- Mešavina 4 – Mix 4: Penušavi bitumen PG70/100 sa 50% RAP + cement 1.5 %,
- Mešavina 5 – Mix 5: Cement sa 75% RAP,
- Mešavina 6 – Mix 6: Cement sa 50% RAP.



**Slika 31** Merene dilatacije zatezanja tokom prolaza opterećenja. [55]

Proračun modula stabilizovanog sloja na osnovu merenih dilatacija zatezanja je izvršen programom BISAR i dobijeni su sledeći rezultati:

**Tabela 11** Pregled sračunatih vrednosti modula [55]

Mešavina	Sračunati moduli tokom prolaza (MPa)
1	300-800 (na početku) 350-1000 (na kraju)
2	Podatci nisu pouzdani
3	1000-1300 (na početku) 1500-2500 (na kraju)
4	500-1500 (na početku) 600-2500 (na kraju)
5	1000-1500 (na početku) 1500-2500 (na kraju)
6	1500-2000 (na početku) 2000-3000 (na kraju)



Ponašanje tokom početne faze životnog veka kolovoza je ispitivano pod uticajem saobraćajnog opterećenja na postrojenju za ubrzano ispitivanje kolovoznih konstrukcija. Iz rezultata analiza i eksperimenta može se zaključiti sledeće:

- Reciklirani materijali stabilizovani sa penušavim bitumenom, kada se izlože uticaju ponovljenog saobraćajnog opterećenja, skloniji su pojavi kolotruga nego pojavi pukotina od zamora.
- Otpornost na pojavu kolotruga recikliranih materijala stabilizovanih sa penušavim bitumenom je u direktnoj vezi sa količinom RAP-a u mešavini i isto tako sa penetracijom bitumena koji se koristi za proizvodnju penušavog bitumena.
- Na mešavinama sa penušavim bitumenom koje sadrže veće učešće RAP-a za mekše bitumene su se pojavljivale veće plastične deformacije. Ovaj efekat je manje značajan ukoliko se poveća nivo opterećenja i period negovanja produži.
- Dodatak male količine cementa u mešavine sa penušavim bitumenom značajno povećava otpornost mešavine na pojavu kolotruga.
- Ukupna analiza rezultata merenja dilatacija je pokazala da su moduli recikliranih mešavina sa penušavim bitumenom u ranoj fazi ekplaoatacije znatno veći od modula kod klasičnih nevezanih nosećih slojeva i čak mogu dostizati vrednosti koje su slične sa klasičnim – vrućim bitumeniziranim nosećim slojevima. Modul cementom vezanih mešavina se takođe kretao u nivou modula kod klasičnih – vrućih bitumeniziranih nosećih slojeva.

Sunarjono (2006.) [57] je ranije istraživao otpornost na zamor mešavina sa penušavim bitumenom opitom – ITFT (Indirect Tensile Fatigue mode of testing (ITFT)) i ustanovio je da inicijalne pukotine nastaju već kod veoma malog broja ciklusa opterećenja, ali da je to praćeno sa dugim periodom razvijanja pukotina (*oko 60% ukupne otpornosti na zamor*). Sa druge strane, period razvijanja pukotina utvrđen za klasične bitumenizirane noseće slojeve sa maksimalnim zrnom od 20mm tokom ITFT opita iznosi oko 10% od ukupne otpornosti na zamor ([58] Read, 1996). Ovakvi trendovi se mogu delimično objasniti niskim modulom materijala stabilizovanih penušavim bitumenom i činjenicom da vezivo nije kontinualno kao kod konvencionalnih asfatnih materijala, od oba faktora se očekuje da uspore proces razvijanja pukotina nakon njihovog nastanka.

### **Otpornost na vlažnost i negovanje**

Mallick i dr. (2002b) [26] su istraživali otpornost na uticaj vlažnosti kod hladno recikliranih mešavina na licu mesta. U toj studiji, uzorci mešavina su stabilizovani sa bitumenskom emulzijom i krečom, bitumenskom emulzijom i cementom i samo sa cementom. Ispitivani su na ITS u suvim i vlažnim uslovima i određen je odnos ITS-a za suvo i vlažno stanje. Rezultati su prikazani u Tebli 12.

**Tabela 12** Rezultati otpornosti na uticaj vlažnosti za hladno reciklirane mešavine, [26]

<b>Vezivo</b>	<b>Uslovi</b>	<b>Zatezna čvrstoća (kPa)</b>	<b>Odnos zatezne čvrstoće</b>
<b>Emulzija</b>	<b>Mokro</b>	56.2	0.20
	<b>Suvo</b>	274.3	
<b>Emulzija + kreč</b>	<b>Mokro</b>	189.1	0.72
	<b>Suvo</b>	263.0	
<b>Emulzija + cement</b>	<b>Mokro</b>	79.9	0.39
	<b>Suvo</b>	199.9	
<b>Cement</b>	<b>Mokro</b>	61.7	0.97
	<b>Suvo</b>	63.3	

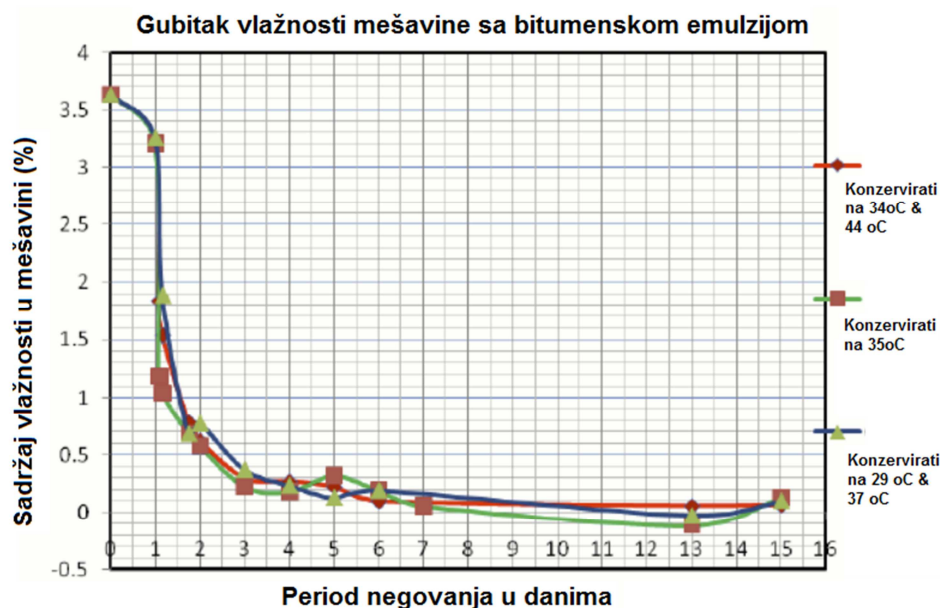
Viši odnos čvrstoća ukazuje na bolju otpornost mešavine na uticaj vlažnosti. U ovom slučaju, uzorci sa cementom poseduju najviši odnos ITS-a dok za njima odmah slede uzorci sa bitumenskom emulzijom i krečom. Očigledno je da se sa dodatkom hidrauličnog veziva u bitumenske stabilizacije povećava otpornost mešavine na uticaj vlažnosti.

Kiplagat (2010.) [59] je izveo istraživanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika mešavina sa tri različita načina negovanja, dva ciklična i jedan konstantan, sa ciljem ustanovljavanja potencijalne korisne korelacije između negovanja u laboratorijskim uslovima i negovanja na gradilištu u realnim uslovima izvođenja radova. Rezultati ove studije predstavljaju osnovu za detaljnije istraživanje ponašanja hladno recikliranih mešavina u različitim uslovima na gradilištu. Na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja zaključeno je sledeće:

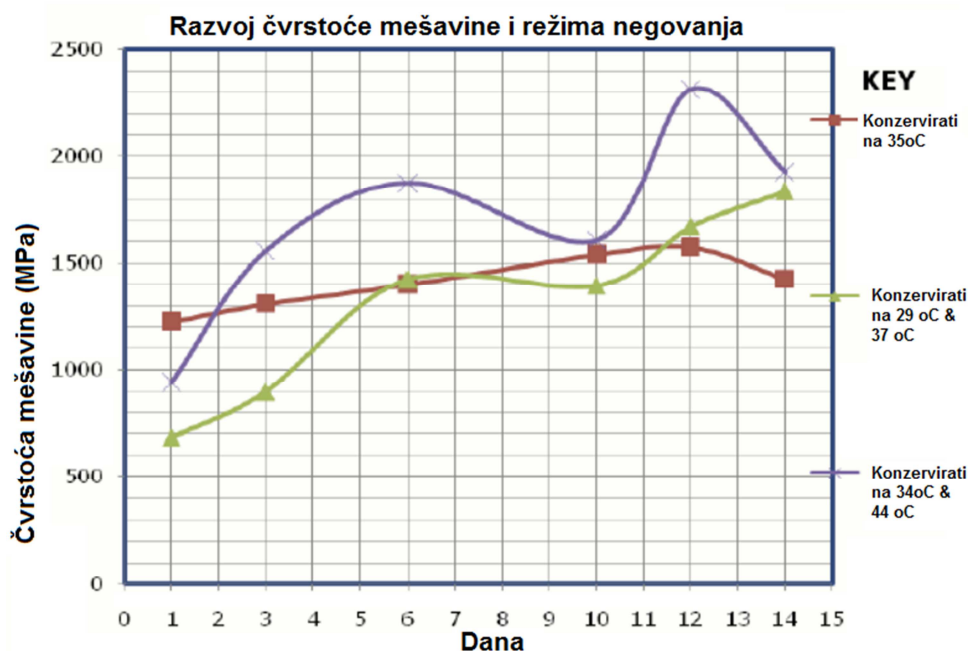
- Preovladavajuća temperatura kolovoza više utiče na aktiviranje starog bitumena u hladno recikliranim mešavinama nego na gubitak vlažnosti.
- Režim nege sa konstantnom temperaturom laboratorijskih uzoraka utiče na pojačano starenje veziva u hladno recikliranim mešavinama.

Sledeći zaključci i preporuke su navedeni za buduća istraživanja:

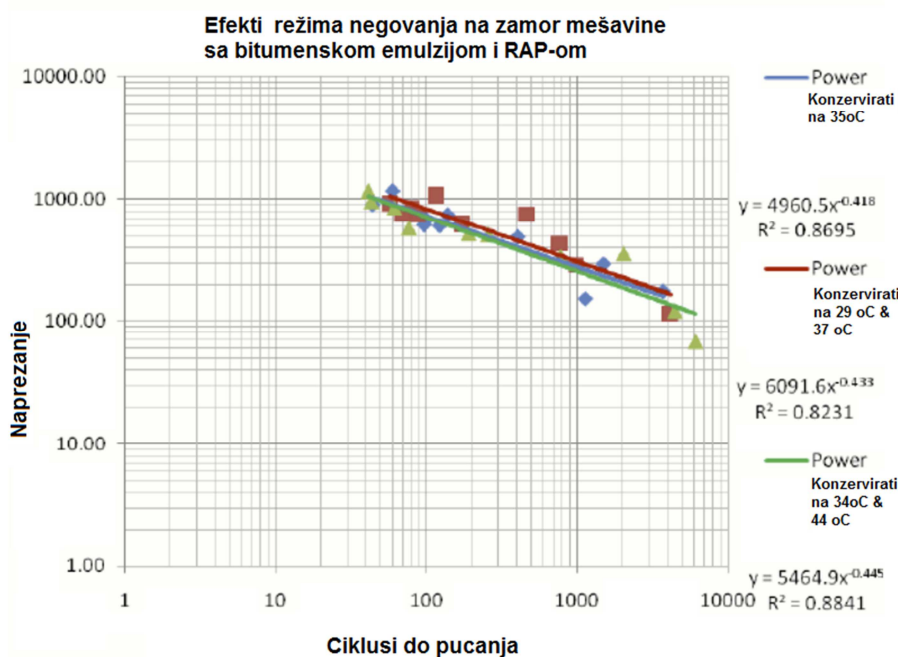
- Uzorci pripremljeni u laboratoriji se moraju svi zajedno staviti u komoru za negovanje kako bi se izbegla razlika u negovanju i dodatno upijanje vode u uzorke koji su već odnegovani do nekog stepena.
- Efekat vlažnosti vazduha se mora uključiti u laboratorijsko negovanje kako bi se simulirali što vernije uslovi koji odgovaraju gradilišnim uslovima.
- Ciklična nega u laboratoriji treba više da se primenjuje kako bi se vernije simulirali gradilišni uslovi (*varijacija temperature, dan – noć*).



**Slika 32** Gubitak vlažnosti mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59]



Slika 33 Razvoj čvrstoće mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59]



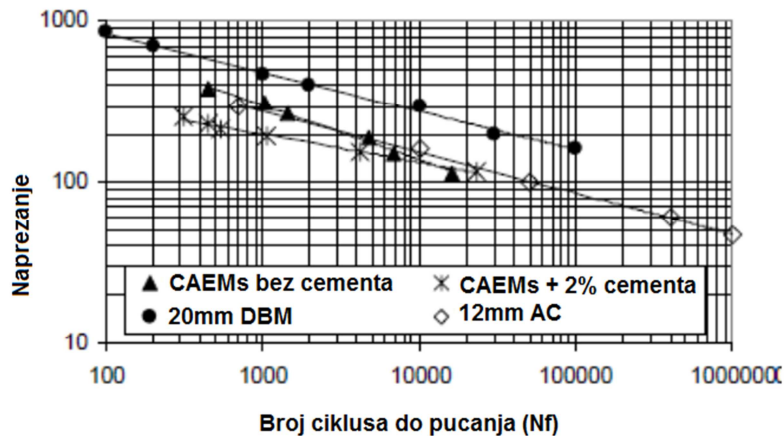
Slika 34 Poređenje kriva zamora mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59]

Tabela 12 Vrednosti linearne regresije zamora mešavine sa bitumenskom emulzijom i RAP-om. [59]

Protokol negovanja	Jednačina na osnovu $N_f$	$N_f$ na $100\mu\epsilon$	$R^2$
35°C	$y=4960,5x^{-0,418}$	11,384	0,87
29°C i 37°C	$y=6091,6x^{-0,433}$	13,237	0,82
34°C i 44°C	$y=5464,9x^{-0,445}$	8,026	0,88

Thanaya (2007.) [60] je izveo istraživanje karakteristika hladno recikliranih mešavina sa bitumenskom emulzijom (CAEM-ovi). Korišćena je katjonska emulzija. Istraživanje je izvedeno na Leeds Univerzitetu u Velikoj Britaniji.

Cilj eksperimenta je bio da se evaluiraju karakteristike hladno recikliranih mešavina u poređenju sa klasičnim asfaltnim mešavinama. Za optimizaciju karakteristika hladnih mešavina odabran je ciljni sadržaj šuljina između 5.0 i 10.0% i ciljni ITS modul krutosti u iznosu od 2.000 Mpa kao odgovarajući za lako do srednje saobraćajno opterećenje. Uprošćeni postupak izrade prethodne mešavine je korišćen za pripremu uzoraka hladne mešavine.



**Slika 35** CAEM karakteristike zamora u poređenju sa klasičnim – vrućim asfaltnim mešavinama. [60]

**Tabela 13** Jednačine krive zamora (eksponencijalna linija regresije – trend) i koeficijent korelacije (R2) [60]

Mešavina	Formula za Napon	Formula za cikluse do loma	$\epsilon_i$ ( $\mu\epsilon$ ) na $N_f=10^6$ ciklus	$N_f$ (ciklus) na $\epsilon=100\mu\epsilon$
CAEM bez cementa	$\epsilon=3152,2xN_f^{-0,3397}$ $R^2=0,9898$	$N_f=2,0x10^{10}\epsilon^{-2,91}$ $R^2=0,9898$	29	$3,03x10^4$
CAEM sa 2% cementa	$\epsilon=679,37xN_f^{0,0,1774}$ $R^2=0,9898$	$N_f=7,0x10^{15}\epsilon^{-5,58}$ $R^2=0,9899$	59	$4,84x10^4$
20mm DBM vruće (100 pen.)	$\epsilon=2532,1xN_f^{-0,2406}$ $R^2=0,9950$	$N_f=1,0x10^{14}\epsilon^{-4,14}$ $R^2=0,9850$	91	$5,25x10^5$
12mm A.C. vruće (100 pen.)	$\epsilon=1638,4xN_f^{-0,2567}$ $R^2=0,9991$	$N_f=3,0x10^{12}\epsilon^{-3,89}$ $R^2=0,9991$	47	$4,98x10^4$

Glavni zaključci iz ovog istraživanja su sledeći:

- Hladne mešavine sa emulzijom (CAEM-ovi) za koje je izvršeno odgovarajuće projektovanje prethodne mešavine sa uslovima nege, čak i bez dodatka cementa su uporedive sa krutošću (ITSM) klasičnih asfaltnih mešavina bez obzira što je sadržaj šupljina viši u odnosu na klasične asfaltno mešavine. To se pripisuje kvalitetu bitumenske emulzije.
- Dodatak jedan do dva procenta cementa u odnosu na masu agregata u hladne mešavine sa bitumenskom emulzijom znatno poboljšava ukupne mehaničke karakteristike CAEM-ova.
- Primena višeg nivoa energije zbijanja nije potrebna jer nakon što se emulzija raspadne, proces očvršćavanja počinje momentalno tokom zbijanja. [60]

Lynch and Jenkins (2007.) [61] su izvršili ispitivanje izgrađenih kolovoznih konstrukcija u okviru Long term Pavement Performance programa (LTPP) nosećih slojeva od hladno

recikliranih mešavina u eksploataciji, na test deonicama u Južnoj Africi. One su posedovale različite uslove: vrste nosećih slojeva (*nevezani, cementne stabilizacije i bitumenizirane hladne mešavine*), sastav odnosno recepture hladnih mešavina, debljine slojeva kolovoza i saobraćajnog opterećenja. Stanje kolovoznih konstrukcija je kvantifikovano merenjem FWD defleksija kroz vreme zajedno sa laboratorijskim ispitivanjima uzoraka uzoraka koji su pripremljeni u laboratoriji i uzoraka koji su dobijeni kernovanjem izvedenih slojeva. Moduli slojeva kolovoznih konstrukcija koji su dobijeni backcalculation proračunom pružili su uvid u priraštaj modula kroz vreme sa definisanjem jasnog uticaja sadržaja cementa, sadržaja bitumena i ostalih vrednosti (uticaja i uslova) koje su postizane tokom izvođenja radova.

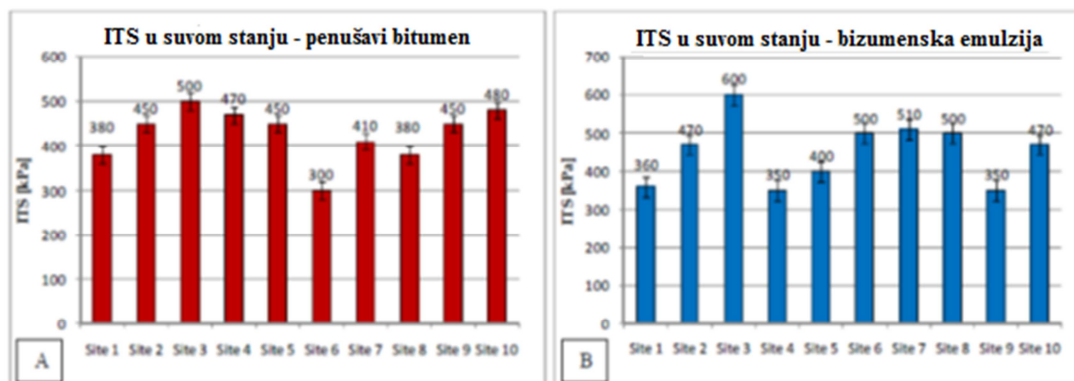
Kapacitet nosivosti slojeva stabilizovanih penušavim bitumenom na osnovu određenih modula je značajno viši od kapaciteta nevezanih nosećih slojeva i samim tim se postiže rasterećenje i zaštita od preopterećenja i loma slojeva koji se nalaze ispod recikliranog sloja kao i posteljice kolovoza (*smanjeni naponi i deformacije*).

Ndinyo, Gariy and Mulei, (2013.) [62] su istraživali primenljivost struganog / drobljenog betona (RAC) za izradu Hladno reciklirane mešavine za habajuće slojeve za puteve sa lakim saobraćajnim opterećenjem. U istraživanje je uključeno ispitivanje u laboratoriji i projektovanje. RAC, kameni agregat i katjonska bitumenska emulzija su ispitivani sa ciljem evaluacije mehaničkih karakteristika.

Granulometrijski sastav mešavine RAC-a i kamenog agregata je određen i izvršeno je projektovanje prethodne mešavine sa bitumenskom emulzijom modifikovanim Marshall postupkom. Usvojena je mešavina sa stabilnošću od 6.9kN i sadržajem veziva 5.2%. Studija je pokazala da vrednosti stabilnosti premašuju minimalno zahtevane za srednje saobraćajno opterećenje. Zaključeno je da je RAC hladna mešavina odgovarajuća za habajuće slojeve za puteve sa lakim saobraćajnim opterećenjem, pa je u skladu sa tim preporučena dalja upotreba kao ekonomično rešenje sa minimalnim negativnim uticajem na životnu sredinu.

Crispino and Brovelli (2012.) [63] su analizirali karakteristike, troškove i rizike upotrebe bitumenske emulzije i penušavog bitumena u kontekstu tržišta Italije. Troškovi opreme i održivosti sa aspekta zaštite životne sredine su poređeni na osnovu rezultata ispitivanja.

Na slici 36 su prikazane numeričke vrednosti (*ITS u suvom stanju na 25°C*) kako bi se prikazao ekvivalentan učinak bitumenske emulzije i penušavog bitumena. Rezultati se odnose na reciklirane noseće slojeve sa bitumenskom emulzijom i penušavim bitumenom kao vezivima. Važno je napomenuti da ne postoji podatak o broju deonica koje su bile ispitivane. Rezultati ukazuju da ne postoji značajan uticaj tipa veziva na vrednosti ITS-a, a prosečne vrednosti su im slične i bez velikih varijacija.



**Slika 36** ITS u suvom stanju hladno recikliranih mešavina stabilizovanih sa (A) penušavim bitumenom i (B) bitumenskom emulzijom. [63]

Može se zaključiti da emulzija i penušavi bitumen kao veziva postižu iste zatezne čvrstoće bez obzira na lokalne uslove, pa su u skladu sa tim u Italijanskom standardu definisane iste kriterijumske vrednosti za mešavine sa penušavim bitumenom i bitumenskom emulzijom za noseće nevezane slojeve. Sve nacionalne specifikacije se odnose na kratke periode nege, 12 – 24 – 72h jer je primećeno da efekat negovanja može smanjiti ITS u suvom stanju kod uzoraka sa bitumenskom emulzijom u odnosu na mešavine sa penušavim bitumenom.

Neki autori su prikazali međuzavisnost između  $M_r$  (rezilijentnih modula) i vremena negovanja hladnih mešavina i ITS-a sa procentom cementa. Generalno, nije ustanovljena velika razlika između ovih vrsta veziva. Vrsta bitumenske emulzije, katjonska ili anjonska nema uticaj na performanse mešavine.

Sa aspekta zamora mehaničko ponašanje mešavina sa bitumenskim emulzijama beleži priraštaj odnosno poboljšanje tokom vremena. Disperzovane čestice bitumena menjaju karakteristike sloja, povećavaju koheziju, ali malo utiču na ugao unutrašnjeg trenja. Zaključeno je da promena temperature ispitivanja, frekvencije, opterećenja znatno utiče na rezultate ispitivanja. Dodavanjem cementa u količinama do 3% ne postiže se značajnija promena osteljivosti na promenu temperature. Otpornost na zamor mešavina sa penušavim bitumenom je višlja od otpornosti na zamor mešavina sa bitumenskom emulzijom na nižim nivoima opterećenja - napona (kod ispitivanja u ITSFT modu). Mogući razlog može biti da su mešavine sa penušavim bitumenom kruće na niskim naponima. U suštini, na višim nivoima opterećenja duži životni vek i bolja otpornost na zamor je konstatovana kod mešavina sa bitumenskom emulzijom.

Na osnovu nekoliko istraživanja ustanovljeno je da lom usled zamora kod mešavina sa emulzijom poseduje plastične karakteristike, dok je kod mešavina sa penušavim bitumenom lom dosta krtilji. U radovima je zaključeno da je potrebno nastaviti sa istraživanjima na ovu temu.

Crispino i Brovelli (2012.) [63] zaključuju:

Hladno reciklirani materijali su dobra prilika za uštedu finansijskih sredstava i resursa. Bitumenska emulzija i penušavi bitumen su široko prihvaćena veziva za stabilizacije hladnim postupkom sa ekvivalentnim učinkom. Na osnovu istraživanja zaključuje se:

- Bitumenska emulzija i penušavi bitumen se potpuno različito ponašaju u mešavini. Bitumenska emulzija obavlja i sitnu i krupnu frakciju same mešavine. Penušavi bitumen samo delimično obavlja krupniju frakciju mešavine.
- Visoki sadržaji cementa ili kreča uzrokuju da mešavina poprima ponašanje slično betonu (*velika krutost, mala sklonost ka deformacijama*) smanjenjem kvaliteta mehaničkih karakteristika u dužem vremenskom periodu pa je potrebno pronaći finu ravnotežu između količine cementa i bitumena dodatkom ovih veziva. Optimalna čvrstoća i moduli se moraju imati u vidu tokom procesa projektovanja.
- Nije moguće primeniti jedinstvenu proceduru negovanja uzoraka u laboratoriji. Najčešće se primenjuje režim: 72h na 40°C ili 60°C.
- Temperatura ima značajan uticaj na vreme negovanja. Zadržavajući karakteristike na konstantnom nivou, povećanje temperature smanjuje potrebno vreme za negu uzoraka. Negovani uzorci su manje osetljivi na temperaturni uticaj u odnosu na klasične asfaltne mešavine zbog manjeg sadržaja bitumena i prisustva cementa.
- Bitumenska emulzija se dodaje u većim količinama zbog sadržaja vode u emulziji.
- Izbor veziva je ključan parametar za analizu ukupnih troškova hladnog recikliranja. Doziranje je u direktnoj vezi sa izabranom vrstom veziva.
- Penušavi bitumen je opasan tokom izvođenja radova zbog svoje visoke temperature. U poređenju sa emulzijom rad sa penušavim bitumenom može da izazove određene dodatne rizike po bezbednost radne okoline.

- Bitumenska emulzija može da izvrši zagađenje tla ukoliko se ne kontroliše oticanje vode nakon raspada emulzije.

Kavussi i Modares (2010) [64] su istraživali model za određivanje rezilijentnih modula recikliranih mešavina sa bitumenskom emulzijom i cementom na osnovu ispitivanja ITS-a. Tipično, rezilijentni moduli recikliranih mešavina sa bitumenskom emulzijom i cementom su beležili porast nakon negovanja. Zatim, propisivanje projektne vrednosti  $M_r$  za ove mešavine je kompleksnija materija u odnosu na klasične asfaltne mešavine. Oprema za ispitivanje  $M_r$ -a nije dostupna u mnogim slučajevima.

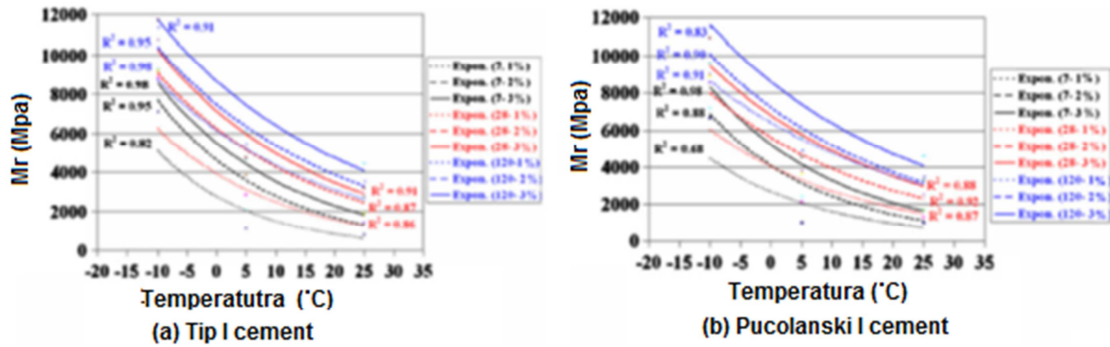
Uzimajući u obzir prethodne činjenice, razvoj modela na osnovu koga bi se mogao odrediti  $M_r$  na osnovu rezultata redovnih ispitivanja dobija na značaju. U ovom istraživanju, nakon izvođenja ITS i  $M_r$  ispitivanja na uzorcima na različitim temperaturama (10, 15 i 25 °C) i različitim vremenima negovanja (7, 28 i 120 dana), dva modela su razvijena za određivanje  $M_r$ -a za reciklirane mešavine sa bitumenskom emulzijom i cementom (*dve vrste cementa, Tip I i pucolanski cement*). Rezultati su pokazali da sa povećanjem vremena nege i količine cementa sa smanjenjem temperature ispitivanja rastu vrednosti ITS i  $M_r$ . Modeli su razvijani u dva koraka. Prvo je određena međuzavisnost ITS i  $M_r$  pri sličnim uslovima ispitivanja za svaku vrstu cementa sa linearnom regresionom krivom. U drugom koraku, međuzavisnost je korigovana uzimajući u obzir efekte uticaja temperature i vremena negovanja.

RAP pokazuje ponašanje nezavisno od nivoa opterećenja sa porastom rezilijentnih modula sa povećanjem napona pri ispitivanju, ali i redukciju rezilijentnih modula sa porastom smičućih napona. Generalno, zbog veza koje nastaju kristalizacijom, dodatak cementa povećava rezilijentne module, smičuću čvrstoću i otpornost na trajnu deformaciju dok istovremeno smanjuje osetljivost na uticaj vlažnosti materijala i može da smanji sposobnost materijala da podnese elastično savijanje. Dodatak bitumenske emulzije rezultira formiranjem elastičnih veza u RAP-u sa povećanjem kohezije i otpornosti na trajnu deformaciju.

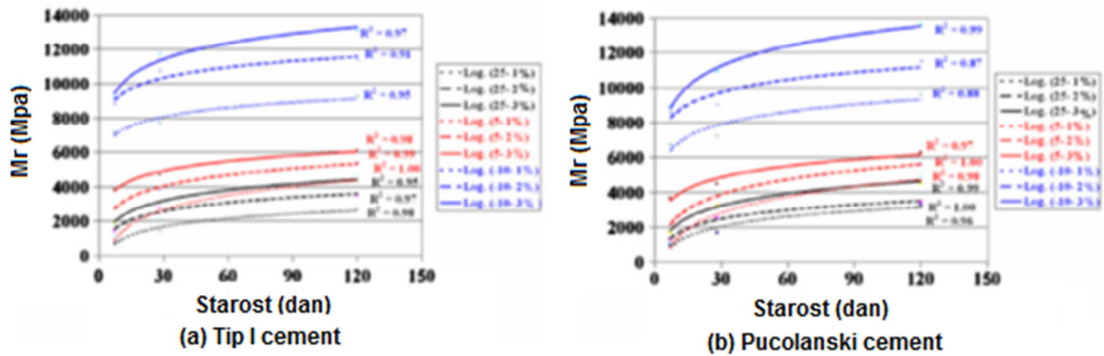
Međutim, zbog visko elastičnog ponašanja i temperaturne osetljivosti bitumenskih veziva, mešavine mogu biti sklone pojavi plastičnih deformacija pod dejstvom teškog i usporenog saobraćajnog opterećenja. Mešavine sa emulzijama kojima je dodat i cement poseduju kompleksnu kombinaciju osobina: karakteristike nevezanog RAP-a koje su u zavisnosti od nivoa napona, otpornost na pojavu plastične deformacije i fleksibilne karakteristike bitumenske emulzije. Nivo do kojeg će biti izražena neka od ovih osobina zavisi pre svega od količine dodatog veziva i njegovih pojedinačnih osobina.

Na osnovu studija koje su proučavale mikroskopske osobine materijala skeniranjem sa elektronskim mikroskopom (SEM) zaključeno je da se kod recikliranih mešavina sa bitumenskom emulzijom i cementom odvijaju slični procesi kao što je hidratacija kod normalnih betonskih mešavina. SEM fotografije pokazuju da mešavina koja sadrži cement poseduje vrlo grubu teksturu. Fotografije mešavina sa pucolanskim cementima pokazuju određene promene u prvim danima nege. Na osnovu nekoliko istraživačkih radova zaključeno je da pucolanske komponente nemaju značajniju aktivnost pre nego što se proizvede kreč iz hidratacije. Reakcija između pucolana i kreča počinje neposredno nakon hidratacije.

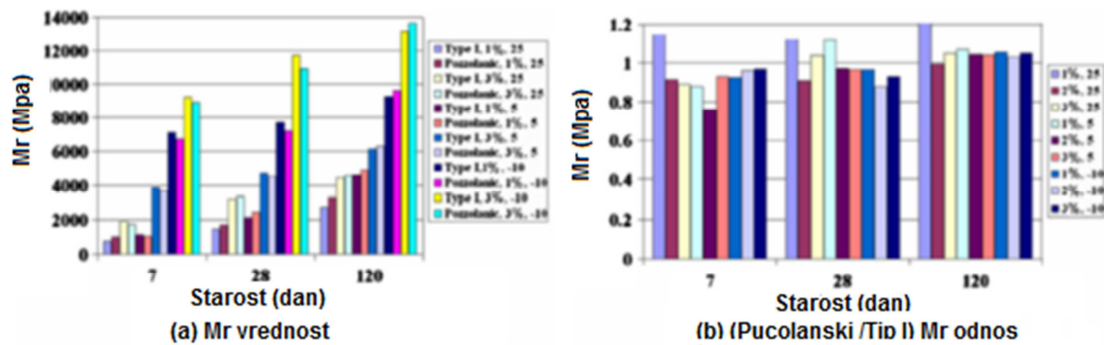
Međutim efekti pucolanske reakcije će biti vidljivi već nakon nekoliko dana. Uočeno je da u početnom periodu nege krutost mešavina sa pucolanskim cementima je niža nego kod mešavina sa Tipom I cementa. Istraživanja su pokazala da će krajnja čvrstoća pucolanskih mešavina biti jednaka ili čak i viša od mešavina sa cementom Tip I.



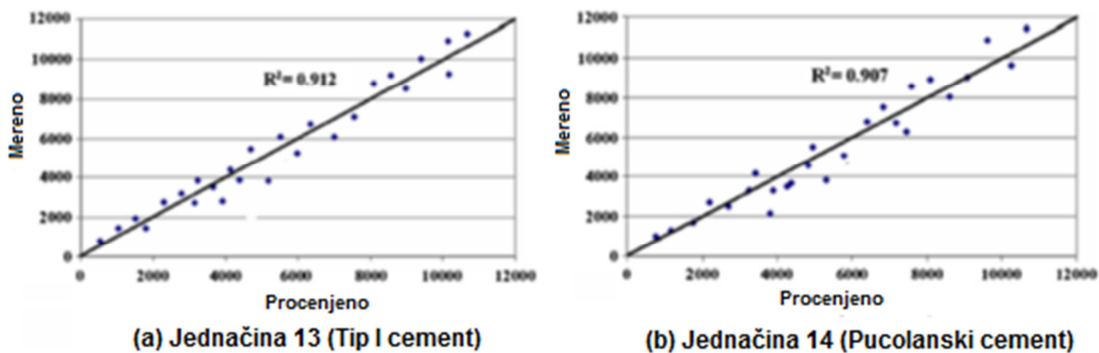
Slika 5.



Slika 6.



Slika 37 Poređenje efekata cementa na vrednosti  $M_r$ -a. [64]



Slika 38 Poređenje između merenih i procenjenih vrednosti  $M_r$ -a. [64]

Korišćenjem rezultata rezilijentnih modula i indirektna zatezne čvrstoće ispitanih na različitim temperaturama i starosti uzoraka, dva modela su predstavljena. Proračun rezilijentnih



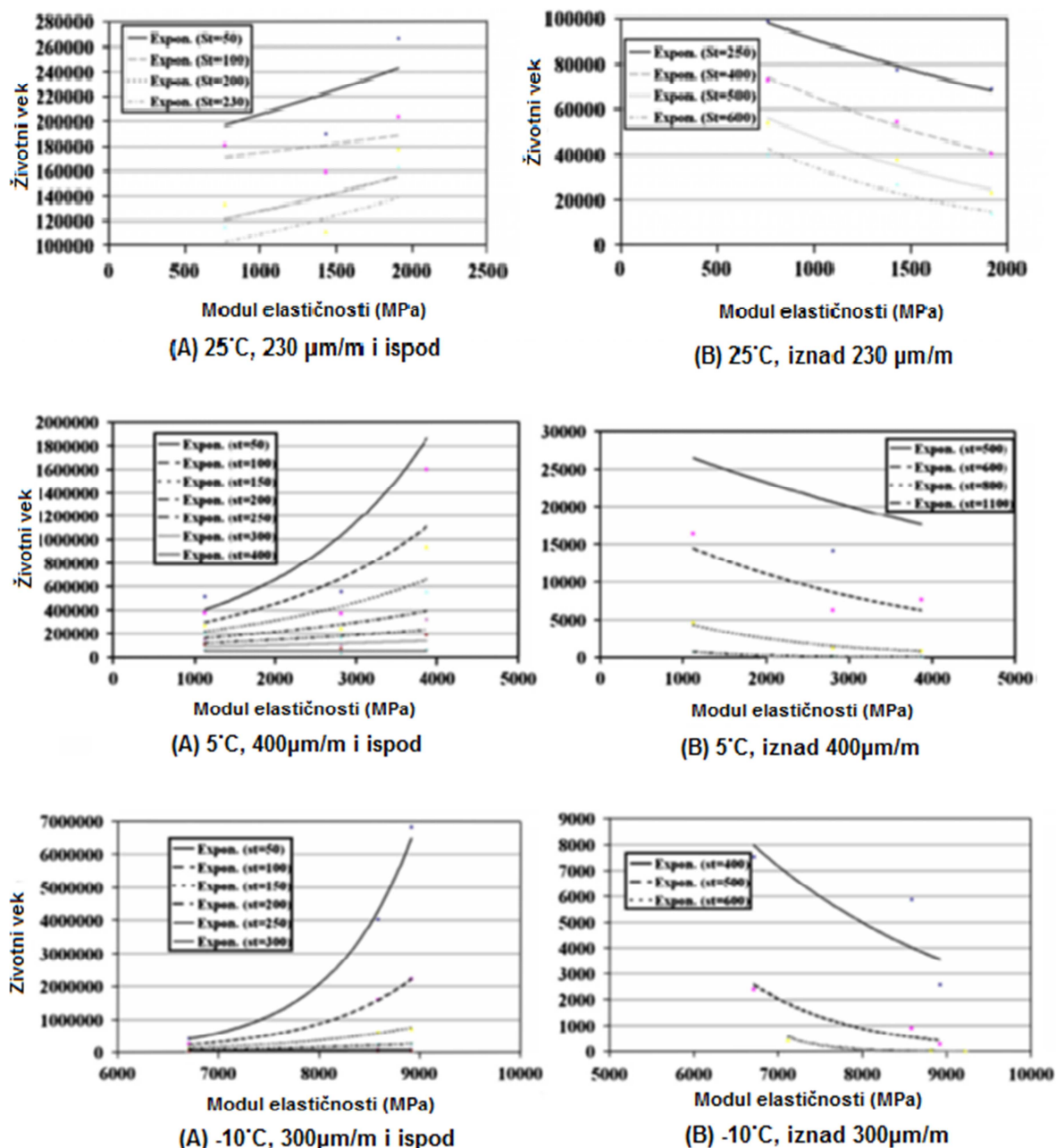
modula recikliranih mešavina koji sadrže bitumensku emulziju i dva tipa cementa iz rezultata njihovih ispitivanja ITS-a.

Iz rezultata ispitivanja izvedeni su sledeći zaključci:

- ITS i Mr rastu ukoliko se povećava vreme negovanja i smanjuje temperatura ispitivanja. Za oba opita, uticaj temperature je izraženiji od uticaja negovanja.
- U početnom vremenu negovanja, vrednosti ITS-a i Mr-a sa cementom Tip I su bile skoro 10-20% više u odnosu na mešavine sa pucolanskim cementom. Sa porastom vremena negovanja, razlika je nestajala dok je u nekim slučajevima mešavina sa pucolanskim cementom pokazivala i više vrednosti pogotovo nakon 120 dana negovanja.
- Poređenjem različitih međusobnih zavisnosti, zaključeno je da linerna međuzavisnost između Mr i ITS-a dominira u odnosu na ostale, u skladu sa postignutim višim stepenom determinacije ( $R^2$ ).
- Na osnovu rezultata ispitivanja, međuzavisnost Mr – temperatura i Mr – vreme negovanja su korelisani sa eksponencijalnim i logaritamskim funkcijama trenda.
- Za svaku vrstu cementa u istraživanju, konačni model je određen sumiranjem početnih linearnih međuzavisnosti i dve korekcije za temperaturu i vreme negovanja.
- Glavna primena modela će se ogledati u proračunu Mr vrednosti na osnovu ITS ispitivanja što bi imalo široku primenu u postupcima projektovanja kolovoznih konstrukcija. Korišćenjem ovog modela moguće je određivanje modula recikliranih slojeva na različitim temperaturama i vremenima negovanja ispitivanjima ITS-a na uzorcima iz kolovoza – kernovima.
- Sa ciljem opšte primene ustanovljenih modela, preporučeno je istraživanje efekata korišćenja različitih RAP-ova, kombinacije RAP-a i kamenog agregata i drugih tipova i sadržaja bitumenskih emulzija. [64]

Modarres, Nejad, Kavussi, Hassani i Shabanzadeh, (2011) [65] su izveli istraživanje laboratorijskih karakteristika zamora recikliranih mešavina pošto u literaturi nije postojalo dovoljno informacija o karakteristikama zamora recikliranih mešavina sa bitumenskom emulzijom i cementom. U ovom istraživanju ispitivani su uzorci sa bitumenskom emulzijom i dva tipa cementa (Tip I i pucolanski cement). Glavno ispitivanje čine Mr i ITSFT. Nakon pripreme i negovanja u laboratoriji izvršeno je ispitivanje tri različite starosti uzoraka i temperature ispitivanja.

Za svaki ispitani uzorak proučavani su podaci: tip cementa, temperatura ispitivanja i vreme negovanja. Na osnovu dobijenih rezultata povećanjem količine cementa i smanjenjem temperature ispitivanja, nagib krive zamora opada, ali nema značajne promene u karakteristikama zamora usled povećanja vremena negovanja. Dalje, u poređenju sa referentnim uzorcima bez cementa ustanovljeno je da cement poseduje srednje ponašanje zamora. Na niskom početnom nivou opterećenja životni vek zamora mešavine sa pucolanskim cementom je iznosio više nego kod referentnog uzorka i manje nego kod I tipa cementa, dok je kod viših nivoa opterećenja, životni vek zamora pucolanskog cementa bio viši nego kod Tipa I cementa i manji nego kod referentnog uzorka.



**Slika 39** Međusobni odnos rezlijentnih modula i životnog veka zamora za pucolanski cement na 25, 5 i -10 °C. [65]

**Tabela 14** Efekat proučavanih parametara na karakteristike recikliranih mešavina. [65]

Faktor	Promena faktora	Osobina		
		Modul elastičnosti	Nagib krive zamora	Životni vek
Sadržaj cementa	Povećanje	Povećanje	Smanjenje	
Vreme negovanja	Povećanje	Povećanje	Približno konstantno	Približno konstantno
Temperatura	Povećanje	Smanjenje	Smanjenje	

Na osnovu sprovedenih laboratorijskih istraživanja i dobijenih rezultata donešeni su sledeći zaključci:

- Postoje različiti kriterijumi za životni vek zamora kod ITSFT opita. Sa analizom rezultata dobijenih sa tri različita kriterijuma, cepanje uzorka se smatra lomom

uzorka. Kod ovog kriterijuma, dijagram kumulativnih horizontalnih deformacija poseduje vertikalnu asimptotu.

- Sa povećanjem vremena negovanja rezilijentni moduli recikliranih mešavina su značajno povećani kod obe vrste cementa. Rezilijentni modul beleži porast posle 28 dana za pucolanski cement više nego kod cementa Tipa I.
- Poređenjem između zamora uzoraka sa različitim vremenima negovanja otkriva da za specificiranu početnu deformaciju životni vek zamora skoro ostaje nepromenjen.
- U poređenju sa referentnim uzorcima bez cementa i Tip I cementa, uzorci sa pucolanskim cementom poseduju srednje karakteristike zamora. Na niskim početnim nivoima deformacija, životni vek zamora mešavine sa pucolanskim cementom je veći od referentnih uzoraka i manji od mešavine sa Tip I cementom, dok je kod visokih vrednosti početnih deformacija, životni vek zamora mešavina sa pucolanskim cementom bio veći nego kod mešavine sa cementom Tipa I i manji od referentnih uzoraka.
- Sa povećanjem sadržaja cementa i rezilijentnih modula nagib krive zamora opada. To ukazuje na promenu karakteristika mešavine sa klasične asfaltne mešavine na cementnu stabilizaciju.
- Dodatak cementa do 3% nema značajnijeg uticaja na temperaturnu osetljivost reciklirane mešavine. Niži sadržaji bitumena u recikliranim mešavinama su glavni razlozi ove pojave.
- Poređenjem dobijenih rezultata pokazuje se da između životnog veka zamora i rezilijentnih modula ne postoji jedinstveni odnos na svim nivoima deformacija. Za različite uslove, definisani su granični naponi. Iznad graničnih napona dodavanje cementa i rezilijentnih modula vode ka značajnom opadanju životnog veka na zamor. Za ispod graničnih napona važe drugačiji uslovi, dodavanjem cementa povećava se životni vek na zamor. [65]

Fu, Jones, Harvey i Halles, (2008.) [66] su istraživali Mehanizam negovanja mešavina sa penušavim bitumenom zasnovanih na principima mikromehanike i zaključili da penušavi bitumen počinje da vezuje tek nakon zbijanja i isparavanja vode, i dostiže svoj maksimum kada sva voda ispari. Ukoliko zbog određenih uticaja voda ne može da ispari iz zbijenog sloja (*zbog izrade sledećeg asfaltnog sloja i sl.*) vezivanje se neće razviti, čak i nakon dugačkog vremenskog perioda (*meseci ili godine*).

Međutim, jednom kada se veze formiraju, povremeno prodiranje vode u reciklirani sloj će samo parcijalno oštetiti veze u sloju, obezbeđujući da se spreči zasićenje sloja vodom uz simultani uticaj ponovljenog opterećenja. Stoga je ključno da se dozvoli da voda koja je potrebna za početno mešanje / zbijanje ispari pre izrade sledećeg sloja kolovozne konstrukcije, da se obezbedi odgovarajuće dreniranje kolovoza i izbegnu uticaji vode iz putnog pojasa (uticaj vode od odvodnjavanja ili navodnjavanja, i sl) na stanje vlažnosti u kolovoznoj konstrukciji.

Portland cement se pokazao kao veoma efektivno vezivo koje povećava čvrstoću, krutost i otpornost na trajnu deformaciju mešavina sa penušavim bitumenom pogotovo u ranim fazama dok penušavi bitumen nije počeo da vezuje.

Thanaya (2007) [60] je proučavao CBEM-ove i poredio ih sa klasičnim asfaltnim mešavinama po vrućem postupku sa aspekta mehaničkih karakteristika. Otkrio je da se kod mešavina priraštaj čvrstoće odigrava postepeno, npr. ITSM vrednost za 6mm asfalt beton (200pen emulzija) se kreće oko 600Mpa nakon 10 meseci i vrednost raste na skoro 800Mpa nakon 24 meseca. Thanaya (2007) [60] nastavlja istraživanje i konstatuje da nagibi kriva puzanja hladnih mešavina odgovaraju uslovima lakog i srednjeg saobraćajnog opterećenja i da dodatak 1 – 2% cementa znatno poboljšava mehaničke karakteristike mešavine CBEM-a.

Dodavanjem cementa u mešavinu sa bitumenskom emulzijom se ostvaruju pozitivni efekti. Otkrili su da bez cementa reciklirana mešavina dolazi do loma već na 1.000 ciklusa u opitu sa ponovljenim jednoaksijalnim opterećenjem (RLAT), ali sugerisali su da može biti bolje ukoliko se koriste triaksijalni uslovi opterećenja. Dalje su otkrili da cement nema pozitivan uticaj na karakteristike vruće asfaltne mešavine i da kod hladnih mešavina sa cementom postoji bolja otpornost na trajnu deformaciju. Cement se ponaša kao drugo vezivo i dodatak uzrokuje gubitak u životnom veku na zamor pri dilataciji preko 200 microstrain.

U svakom slučaju u realnoj situaciji u kolovoznoj konstrukciji sloj neće biti izložen tako visokom nivou deformacije, pa se smatra da doatak cementa produžava životni vek kolovoza. Thanaya (2007) [60] potvrđuje u svom radu (*određena međuzavisnost prikazana na Slici 40*) da nema konsenzusa oko zamora u hladnim mešavinama.

CBEM-ovi nastavljaju da budu potcenjeni u UK u poređenju sa ostalim Evropskim zemljama i pored njihovog značajnog ekonomskog i ekološkog potencijala. On je stava da je glavni razlog za smanjenu upotrebu verovanje u visoke troškove emulzija i kompleksnosti projektovanja i ispitivanja karakteristika CBEM-ova. Dodatno, projektanti kolovoznih konstrukcija teže da najčešće projektuju kolovoze koji svoje pune karakteristike u mehaničkom smislu poseduju momentalno nakon završetka izgradnje.

Kontatuje se da su hladne mešavine evolutivni materijal, posebno u njihovom ranom periodu i da njihovo jedinstveno ponašanje potiče od uticaja nekoliko faktora, prisustva vode, reakcije između agregata i emulzije, obavijenosti vezivom i razvijenom kohezijom. Na terenu, hladne mešavine dostižu svoju "zrelost" karakteristika isključivo posle određenog vremenskog perioda. U toplim klimatskim uslovima i pod uticajem srednjeg saobraćajnog opterećenja, najmanje jedan kompletan sezonski ciklus je neophodan da mešavina dostigne svoje stalne karakteristike. Potrebno vreme negovanja može biti duže ukoliko je klima hladnija i vlažnija, ili kraće ukoliko je uticaj saobraćajnog opterećenja slabiji. Ovaj problem je uspešno rešen dodavanjem hidrauličnih veziva mešavinama. Ukoliko se primenjuje ova opcija potrebno je voditi računa kod izbora hidrauličnog veziva - cementa jer ono može značajno da skрати vreme za puštanje u saobraćaj nakon završetka izgradnje.

**Tabela 15** Karakteristike CBEM-ova u poređenju sa vrućim asfaltnim mešavinama [60]

Tip mešavine	Energija zbijanja	Poroznost (%)	ITSM (MPa)
CBEM	2 x teško sabijanje	9,7	2275 (potpuna nega)
CBEM + 1% cementa*	2 x teško sabijanje	9,4	3378 (potpuna nega)
CBEM + 2% cementa*	2 x teško sabijanje	9,2	4970 (potpuna nega)
100pen vruće mešavine	srednje sabijanje	4,7	2150
100pen vruće mešavine	teško sabijanje	3,4	2520

\*Po masi agregata

**Tabela 16** Povoljni efekti dodavanja cementa u CBEM-ove [60]

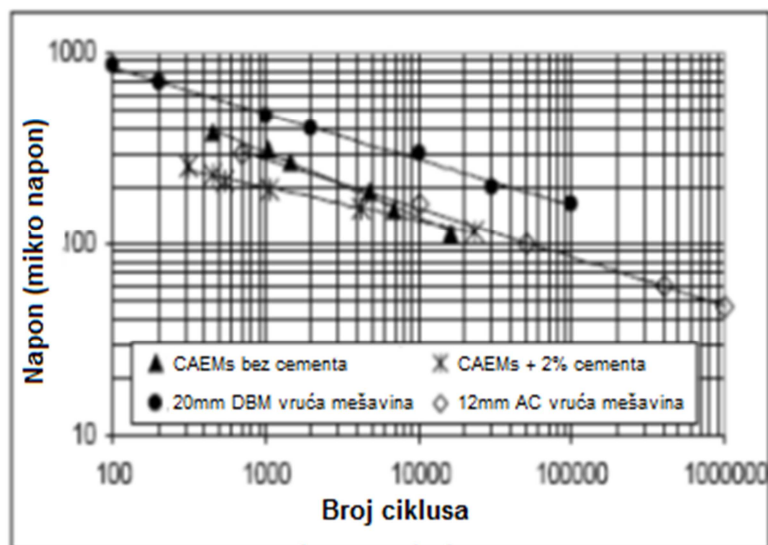
Broj	Tip mešavine, sa Nynas emulzijom	ITSM posle 1 mesec (MPa)	ITSM posle 2 meseca (MPa)
1	WC 1-RPS bez cementa	752,37	816,04
2	WC 1-RPS + 2% OPC	1691,1	2084*
3	WC 1-RPS + 2% prirodnog cementa	1456,95	1691
4	WC 1-RPS + 2% brzovezujućeg cementa	1769,45	2258*

\*postignut je cilj

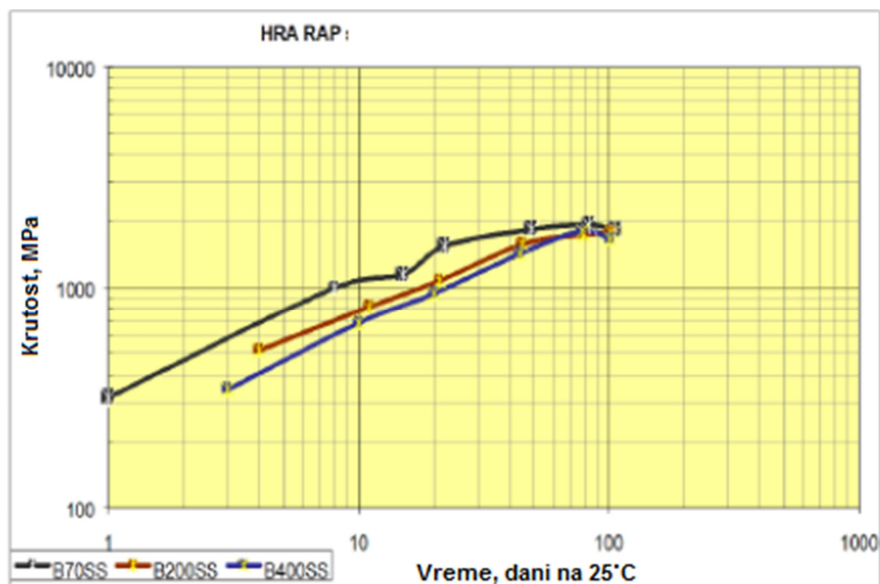
**Tabela 17** Povoljni efekti dodavanja cementa u CBEM-ove [60]

Broj	Tip mešavine	Poroznost (%)	ITSM (MPa)
<b>I CM sa Nynas emulzijom</b>			
I.1	CM bez cementa	9,2*	1595
I.2	CM + 2% OPC	8,7*	2581*
	CM + 2% brzovezujući cement	8,5*	2593*
<b>II CM sa TotalfinaElf emulzijom</b>			
II.1	CM bez cementa	8,2*	1346
II.2	CM + 2% OPC	7,8*	2327
	CM + 2% brzovezujući cement	7,9*	2696

\*Ispunjava cilj



**Slika 40** Zamor CBEM-ova u poređenju sa vrućim asfaltnim mešavinama [60]



**Slika 41** Uticaj vrste bitumena na krutost hladne reciklirane mešavine sa RAP-om u odnosu na vreme [60]

Glavni nedostaci hladnih mešavina na koje je potrebno obratiti pažnju tokom projektovanja i izvođenja su isto identifikovani. Na primer Thanaya i dr. (2007) [60] su ustanovili da pored visoke osetljivosti na uslove okoline prilikom ugradnje, tri najizraženija nedostatka za korišćenje hladnih recikliranih mešavina su:

- Visoka poroznost mešavine,
- Niske čvrstoće u početku životnog veka,
- Dugo potrebno vreme negovanja specijalno u hladnim i vlažnim uslovima.

Oni su identifikovali i druge nedostatke kao što su obavijenost zrna, prionljivost veziva i tanke debljine obavijanja zrna vezivom koji su sada prevaziđeni do određenog nivoa sa ubrzanim razvojem novih poboljšanih vrsta emulzije i napretkom u tehnologiji izvođenja radova.

Thanaya (2007) [60] je ustanovio da je ovaj problem obavijanja zrna vezivom posebno izražen na krupnijim frakcijama agregata i da karakteristike mešavine u mnogome zavise od karakteristika bitumenske emulzije.

Konstatovano je da je nedostatak hladno recikliranih mešavina loša kohezija finalne mešavine. Thanaya (2007) [60] otkriva da CBEM-ovi mogu imati probleme sa oticanjem veziva tokom skladištenja usled male viskoznosti veziva. Gubitak veziva može isto biti prouzrokovan slabom adhezijom i generalno, visokim sadržajem šupljina u zbijenom stanju.

Epps (1990) [22] smatra da hladno reciklirane mešavine treba da se upotrebljavaju samo za noseće slojeve za lako do srednje saobraćajno opterećenje, iz razloga što hladno reciklirane mešavine nisu strukturalno dovoljno "čvrste" kao klasične asfaltne mešavine po vrućem postupku i iz razloga što hladno reciklirane mešavine ne poseduju adekvatnu otpornost na uticaj saobraćajnog opterećenja, abraziju i nastanak oštećenja usled uticaja povećane vlažnosti.

Suprotno od prethodnih iskustava Thanaya [60] ne preporučuje primenu hladno recikliranih mešavina iz razloga što u Velikoj Britaniji one i posle 18 meseci od ugradnje ne poseduju zadovoljavajuće module krutosti. On je smatrao da hladno reciklirani asfalt poseduje znatno niže module krutosti od zahtevanih vrednosti. Međutim ništa nije zaključeno o upotrebljivosti materijala i kriterijumskim uslovima za njihov izbor i primenu.

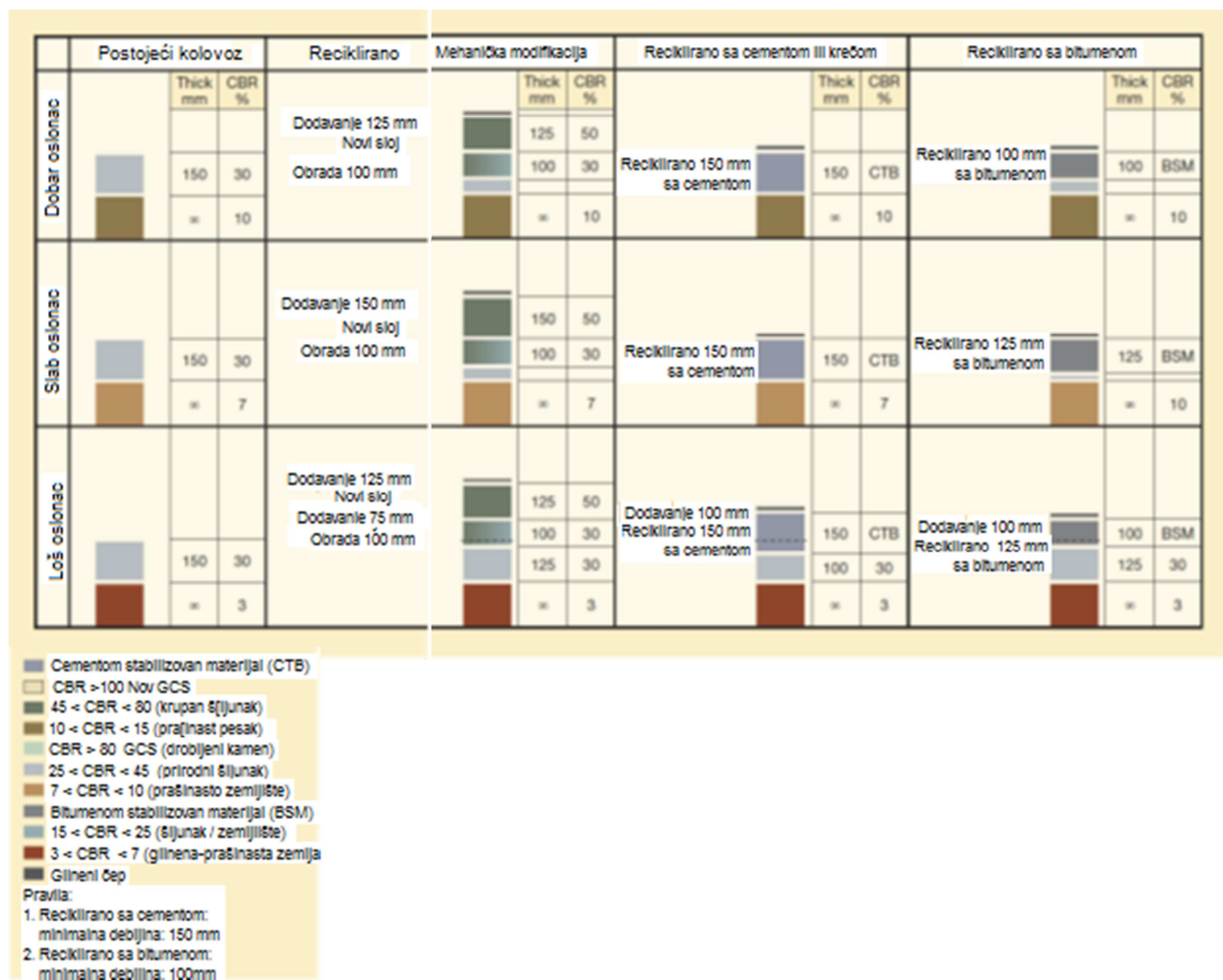
Iz ovog izvršenog pregleda literature se može zaključiti da još uvek postoje veliki izazovi koji treba da se prevaziđu kako bi se hladno reciklirane mešavine primenjivale u potpunosti u izgradnji puteva. Očigledno, sve ove konstatacije imaju za cilj određivanje karakteristika mešavina u funkciji od temperaturnih uslova. Tokom simulacije šta se dešava u toplim klimatskim uslovima jedan od izazova je kako odrediti koji laboratorijski opiti najviše odgovaraju za ispitivanje mehaničkih karakteristika recikliranih hladnih mešavina. Zaključeno je da ovakve mešavine poseduju kompozitne karakteristike, u početku tokom ugradnje i zbijanja se ponašaju kao nevezani materijali, dok se nakon izvođenja radova ponašaju kao vezani materijali jer počinje priraštaj čvrstoće.

### **3.8 DIMENZIONISANJE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA**

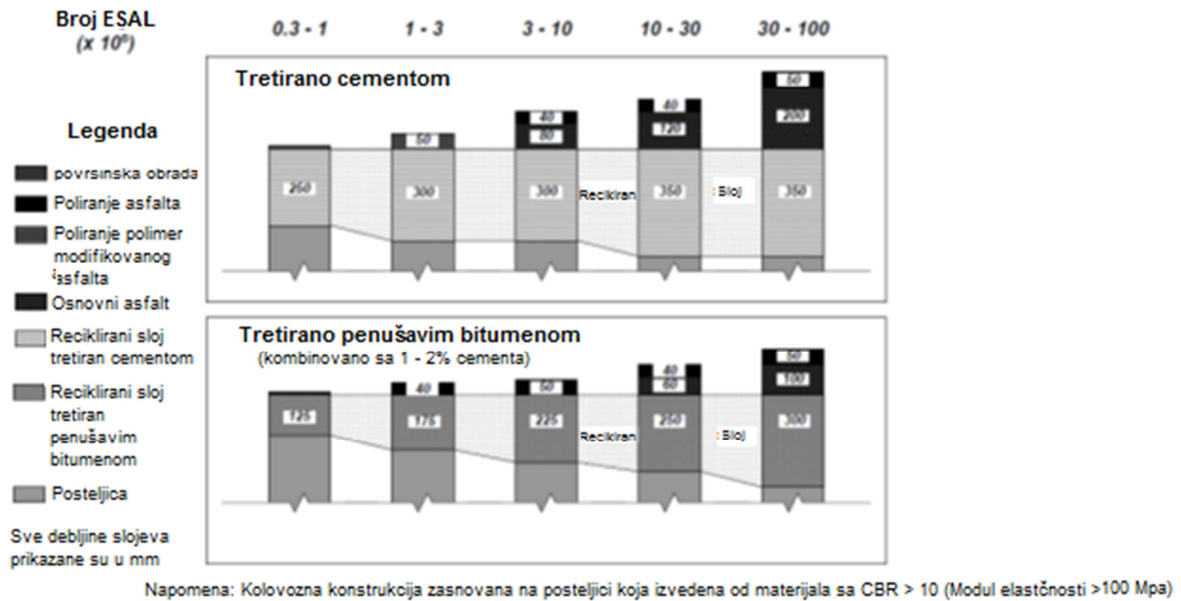
Kao sa projektovanjem prethodne mešavine, još uvek ne postoji široko prihvaćen metod za dimenzionisanje hladno recikliranih kolovoznih konstrukcija. U praksi, zahtevane debljine recikliranih slojeva se često određuju konvencionalnim metodama za klasične kolovozne konstrukcije. Neke procedure dimenzionisanja koje se mogu primeniti na kolovozne konstrukcije sa hladno recikliranim slojevima su prikazani u narednim poglavljima.

### 3.8.1 DIMENZIONISANJE POMOĆU KATALOGA KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA

Primer kataloga kolovoznih konstrukcija za tipične reciklirane kolovozne konstrukcije sa mešavinama sa cementnim i bitumenskim vezivima je prikazan na slici 42 ([31] Wirtgen 2012.). Katalog je izrađen na osnovu pretpostavljenih karakteristika materijala, pa se stoga može koristiti samo kao vodič za prethodno razmatranje i poređenje troškova izvođenja radova.



Slika 42 Tipične strukture recikliranih kolovoznih konstrukcija [17]



**Slika 43** Tipične strukture recikliranih kolovoznih konstrukcija [67]

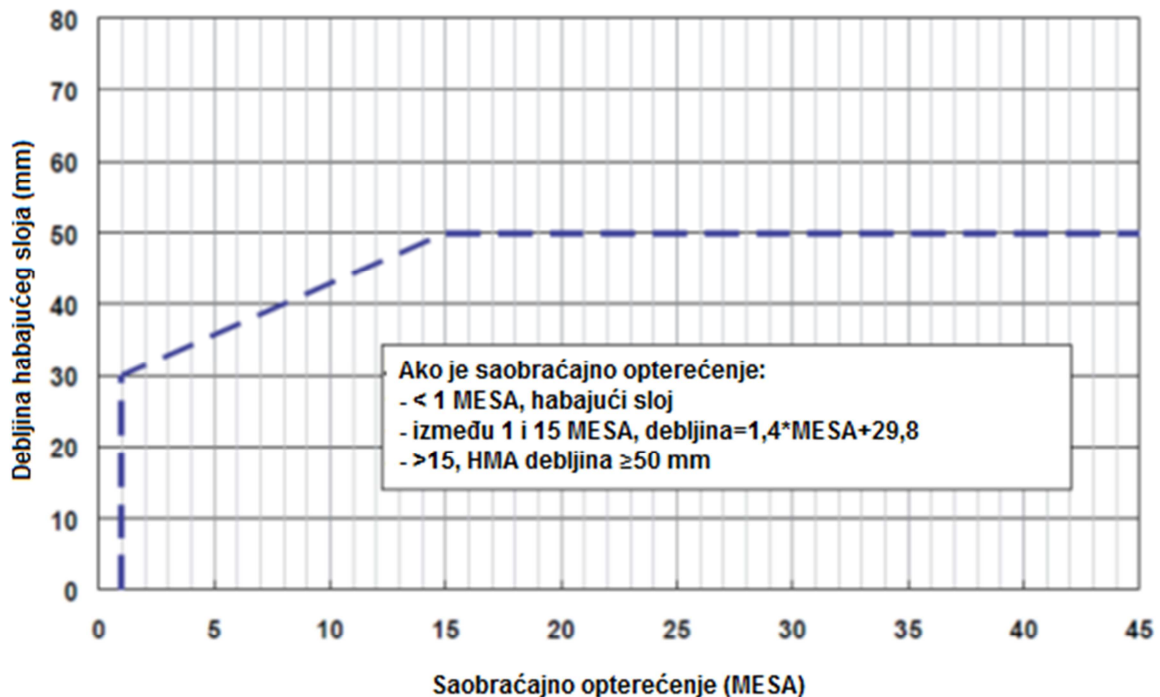
Iz kataloga Ministarstva za javne radove Španije za rešenja za pojačanje kolovoza uočava se da je faktor ekvivalencije između asfaltnih mešavina recikliranih sa bitumenskom emulzijom i klasičnih asfaltnih mešavina 0.75 (*1.0cm hladno recikliranog materijala na licu mesta = 0.75cm klasične asfaltnje mešavine*). Ovo se može uporediti sa predlogom iz AASHTO Guide-a. Takve vrednosti verovatno treba primeniti samo za recikliranje gornjih asfaltnih nosećih i habajućih asfaltnih slojeva.

Na sledećoj slici je dat prikaz kataloga za saobraćajna opterećenja do 1.000.000 ek.os.80kN koji je izrađen od strane Asfaltnje akademije 2, 2009. Second edition. [39]



Kategorija puta	Vrsta kolovoza i projektovana nosivost		Osnova (CBR)
	ES0.3 ≤ 300 000	ES1 300 000 to 1 000 000	
B (95% Pouzdanosti)			> 15
			7 to 15
			3 to 7
C (80% Pouzdanosti)			> 15
			7 to 15
			3 to 7
D (50% Pouzdanosti)			> 15
			7 to 15
			3 to 7

**Slika 44** Katalog za projektovanje kolovoznih konstrukcija sa recikliranim mešavinama sa bitumenskim vezivima za nosivost do 1.0 mil.st.os. [39]



**Slika 45** Minimalna debljina habajućeg sloja za kolovozne konstrukcije sa recikliranim mešavinama sa bitumenskim vezivima. [39]

### 3.8.2 CBR METODA ZA DIMENZIONISANJE

Ova metoda se zasniva na zasićenju vrednosti CBR-a materijala u slojevima kolovozne konstrukcije. Na primer CBR metoda je izrađena od strane Asfaltnog Instituta ([68] AI, 1970). U ovoj metodi ukupna debljina asfaltnih slojeva (TA) za određeni kolovoz se određuje empirijski na osnovu vrednosti CBR-a posteljice i predviđenog saobraćajnog opterećenja. TA se posle preračunava u ekvivalentnu debljinu različitih materijala u slojevima kolovoza koji se zasniva na Odnosu zamene (Sr). Na primer, odnos zamene za asfalt beton : nevezani sloj od drobljenog kamenog agregata je 1 : 2 (AI, 1970). To znači da 1 cm debljine asfalta se zamenjuje sa 2 cm debljine nevezanog sloja od drobljenog kamenog agregata.

U prošlosti, mnoge agencije su smatrale da nosivost hladno recikliranih mešavina odgovara konvencionalnim materijalima ([38] Wood i dr, 1988). U CBR metodi konvencionalni nevezani noseći slojevi se jednostavno zamenjuju sa jednakom debljinom hladno reciklirane mešavine bez dodatnih projektnih analiza i proračuna.

CBR metod se smatra najjednostavnijim i najbržim metodom koji treba da se koristi isključivo kao vodič za prethodna razmatranja i svakako ga treba proveriti primenom metoda koje baziraju na mehanističkom pristupu.

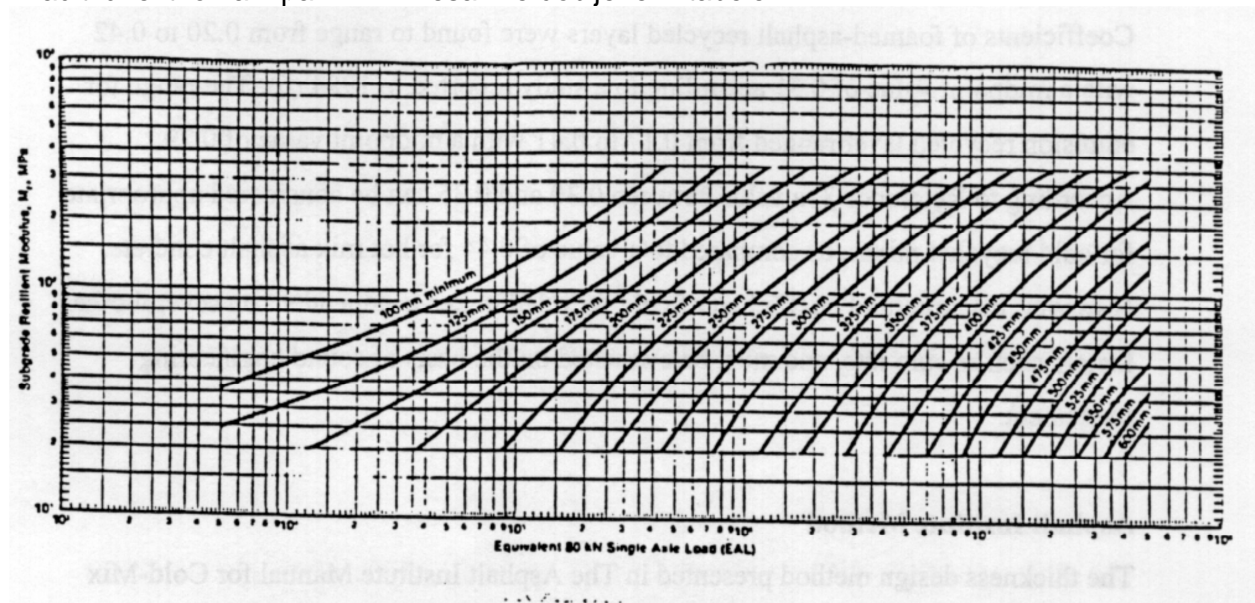
### 3.8.3 METOD INSTITUTA ZA ASFALT

Metoda dimenzionisanja prikazan u "*Priručniku za hladno reciklirane asfaltne kolovoze*" Instituta za asfalt bazira se na upotrebi bitumenskih emulzija kao veziva, ali se smatra primenljivim i za hladno recikliranje sa penušavim bitumenom. Potrebni ulazni parametri uključuju i projektovani nivo saobraćaja i nosivost posteljice. Prikazani elementi projektovanja mogu da se koriste za određivanje debljine hladno recikliranih slojeva.

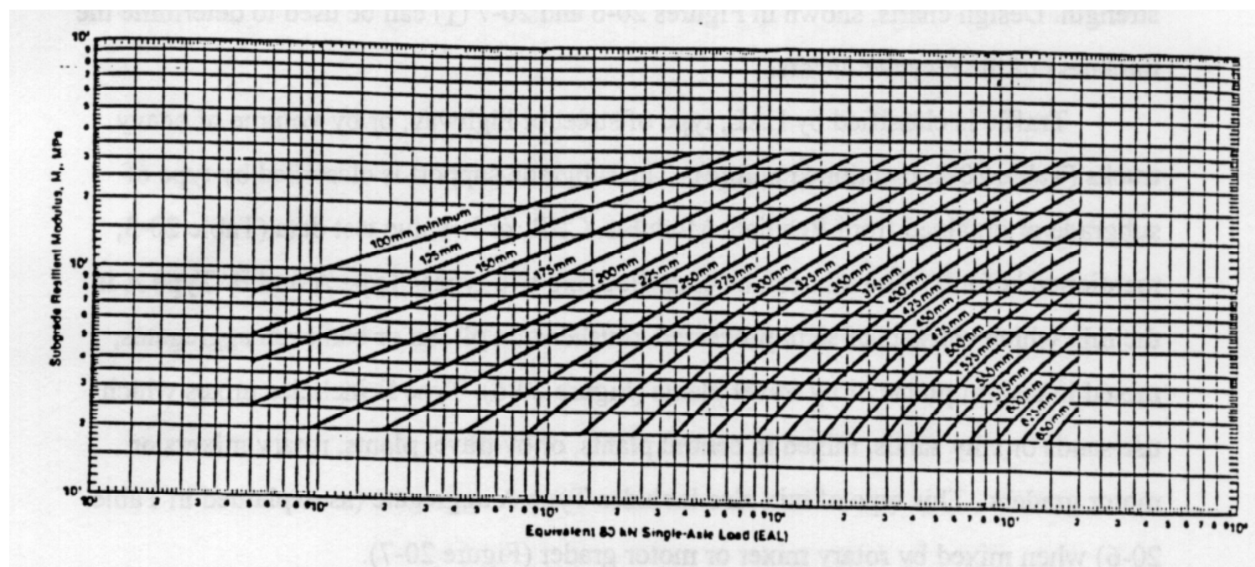
Saobraćaj se klasifikuje pomoću ESAL, tipa ulice ili glavnog puta, ili brojem teških teretnih vozila. Kvalitet odnosno nosivost posteljice se klasifikuje tipom posteljice ili se dobija iz

Modula deformacije, CBR ili R vrednosti. Mešavina se može klasifikovati u dva tipa – Tip A i B. Tip A je mešavina koja sadrži sekundarne agregate dobijene drobljenjem, iz kolovoza ili nasipa izmešanih u centralnom ili mobilnom postrojenju (Slika 46). Tip B uključuje mešavine od peska ili prašinstog peska izmešane u centralnom ili mobilnom postrojenju, rotirajućim frezama ili motornim grejderima. Ovaj tip mešavine takođe uključuje i Tip A agregat kada se meša rotirajućim frezama ili motornim grejderom (Slika 47). Izlaz iz tabele za dimenzionisanje daje kombinovanu debljinu sloja hladne reciklaže i habajućeg asfaltnog sloja. Tabela 18 pokazuje preporučene debljine habajućih asfaltnih slojeva preko sloja hladne reciklaže u funkciji od saobraćajnog opterećenja u projektnom periodu.

Habajući sloj od asfalt betona ili bitumenizirane asfaltne mešavine Tipa I (pripremljene u centralnom postrojenju, projektovane u laboratoriji, sa kamenim agregatom kontinualne granulacije i sa svojstvima sličnim asfalt betonu) mogu se zameniti za deo debljine od Tipa A ili B mešavine dobijenih iz tabele. Kada se koristi mešavina Tipa I, treba koristiti jednostruku ili dvostruku površinsku obradu kao habajući sloj, ali ovo ne sme uticati na smanjenje bilo koje debljine dobijene iz tabele. U uslovima lakog saobraćaja, površinska obrada se može izraditi direktno na Tipa A ili B mešavine dobijene iz tabele.



Slika 46 Dijagram za dimenzionisanje hladno reciklirane mešavine Tipa A. [68]



Slika 47 Dijagram za dimenzionisanje hladno reciklirane mešavine Tipa B. [68]

**Tabela 18** Smernice za granulometrijski sastav za hladnu reciklažu. [69]

Otvor sita	Procenat prolaza (m/m)						
	Diskontinualna - otvorena			Kontinualna - zatvorena			
	A	B	C	D	E	F	G
38.1 mm (1½ in)	100			100			
25.0 mm (1 in)	95 – 100	100					
19.0 mm (¾ in)		90 – 100					
12.5 mm (½ in)	25 – 60		100		100	100	100
9.5 mm (3/8 in)			85 – 100				
4.75 mm (No. 4)	0 – 10	0 – 10		25 – 85	75 – 100	75 – 100	75 – 100
2.36 mm (No. 8)	0 – 5	0 – 5					
1.18 mm (No. 16)			0 – 5				
300 µm (No. 50)						15 – 30	
150 µm (No. 100)							15 – 65
750 µm (No. 200)	0 - 2	0 - 2	0 - 2	3 - 15	0 - 12	5 - 12	12 - 20

**Tabela 19** Minimalna debljina asfaltnog habajućeg sloja preko sloja hladne reciklaže. [18]

Nivo saobraćajnog opterećenja <sup>a</sup>	Minimalna debljina habajućeg sloja	
	mm	(in)
<10 <sup>4</sup>	x <sup>b</sup>	x <sup>b</sup>
10 <sup>4</sup>	50 <sup>c</sup>	(2) <sup>c</sup>
10 <sup>5</sup>	50 <sup>c</sup>	(2) <sup>c</sup>
10 <sup>6</sup>	75 <sup>c</sup>	(3) <sup>c</sup>
10 <sup>7</sup>	100 <sup>c</sup>	(4) <sup>c</sup>
>10 <sup>7</sup>	130 <sup>c</sup>	(5) <sup>c</sup>

Napomene:

a - ekvivalentna osovina od 80 kN

b - jednostruka ili dvostruka površinska obrada

c - asfalt beton ili Tip 1 asfalt sa emulzijom i površinska obrada

**Tabela 20** Faktori konverzije u funkciji vrste materijala u sloju kolovozne konstrukcije. [18]

Klasifikacija materijala	Opis materijala	Faktori konverzije
A	Prirodna posteljica u svim slučajevima	0.0
B	Poboljšana posteljica - prvenstveno granularni materijali - može da sadrži malo prašine i gline ali ima IP ≤ 10 (poboljšana posteljica = bilo koji sloj ili slojevi poboljšanog materijala između prirodnog podtla i kolovozne konstrukcije)	0.00
C	Granularna posteljica ili DNA solidne granulacije, čvrst kameni agergat sa malo plastčnih finih čestica i CBR ≥ 20. Koristiti gornji deo raspona koeficijenta ako je IP ≤ 6 ili niži deo raspona ako je IP ≥ 6.	0.1 – 0.2

\*Vrednosti i rasponi faktora konverzije su multiplicirajući faktori za konverziju debljine slojeva postojeće kolovozne konstrukcije u ekvivalentnu debljinu sloja hladne reciklaže.

Ovi faktori konverzije se primenjuju samo kod dimenzionisanja kolovoza za hladno recikliranje. Ni u kom slučaju se ne mogu primeniti na dimenzionisanje novih kolovoznih konstrukcija.

### 3.8.4 AASHTO METODA

Rezultujuća debljina sloja pojačanja uključuje debljinu hladno recikliranog sloja plus debljina habajućeg sloja od asfalt betona, ako je potreban. Tabela 21 prikazuje tipične AASHTO

strukturne koeficijente zamene slojeva koji su dobijeni iz različitih recikliranih test deonica korišćenjem nekoliko tipova recikliranih materijala (*a* - se odnosi na koeficijent zamene sloja).

Ove vrednosti su dobijene iz rezultata AASHTO Testa (*AASHTO Road Test*) i programa zasnovanih na višelojnoj elastičnoj teoriji. Koeficijenti zamene sloja za hladno reciklirane asfaltne mešavine mogu da se dobiju iz ovih vrednosti. Koeficijenti hladno recikliranih slojeva sa penušavim bitumenom imaju raspon od 0.20 do 0.42 sa srednjom vrednosti od 0.31 prema studiji objavljenoj 1984. godine. Raspon koeficijenta za sloj recikliran bitumenskom emulzijom bio je od 0.17 do 0.41 sa srednjom vrednosti od 0.29. Vrednost između 0.30 i 0.35 može se smatrati odgovarajućom za hladno reciklirane mešavine u poređenju sa vrednosti 0.44 za klasične mešavine asfalt betona. Međutim, strukturni koeficijent hladno recikliranih mešavina zavisi od nekoliko drugih faktora kao što je stopa starenja, i mora se proceniti na bazi merenja defleksija, iskustva i inženjerske procene.

**Tabela 21** Tipični AASHTO strukturni koeficijenti slojeva. [70]

Tip korišćenog recikliranog materijala	Sloj korišćen	Raspon $a_1$	Prosek $a_1$	Broj test deonica	$a_1$ za odgovarajući sloj i materijal pri AASHTO Road testu
Habajuci sloj asfalta termički recikliran u centralnom postrojenju	Habajuci sloj	0.37 – 0.59	0.48	14	0.44
Habajuci sloj asfalta hladno recikliran u centralnom postrojenju	Noseći sloj	0.37 – 0.49	0.42	3	0.35
Asfalt beton stabilizovan sa bitumenom i/ili aditivima recikliran na licu mesta	Noseći sloj	0.23 – 0.42	0.31	4	0.15 – 0.23
Asfalt beton i BNS stabilizovan cementom recikliranjem na licu mesta	Noseći sloj	0.40	0.40	1	0.15 – 0.30
Mešavina slojeva asfaltnog kolovoza stabilizovana penušavim bitumenom reciklirana na licu mesta	Habajuci sloj	0.42	0.42	1	-

AASHTO metoda za dimenzionisanje kolovoza kako je prikazano u AASHTO Guide for design of Pavement Structures ([20] AASHTO, 1993) može se koristiti za projektovanje hladno recikliranih slojeva ukoliko su raspoloživi odgovarajući koeficijenti zamene ([22] Epps, 1990). Tabela 2.6 prikazuje neke od AASHTO koeficijenata zamene za hladno reciklirane materijale na licu mesta koji su prikazani u određenoj stručnoj literaturi.

**Tabela 22** AASHTO koeficijenti zamene hladno recikliranih slojeva [71]

Reference	Vezivo	AASHTO koeficijent
Moore (1985)*	Emulzija	0,30
Kandhal i Koeler(1987)*	Emulzija	0,25 - 0,40
Tia i Wood (1983)	Emulzija	0,22 - 0,49
Wood et al (1988)	Emulzija	0,14 – 0,44
Sebaaly et al (2000)**	(Nema podataka)	0,26
Mallick et al (2002)	Emulzija 3,4 % kreč 2 %	0,37
	Cement 5 %	0,28
	Emulzija 2,2 %	0,24
Wen et al (2003)	Vrsta C pepela 8 %	0,16
New Mexico State Highway and Transportation Department (NMSHD)**	(Nema podataka)	0,30

I dalje se u mnogim zemljama projektovanje vrši na osnovu empirijskih nomograma i tabela. Vrednosti koeficijenta ekvivalencije sloja, koji se mogu primeniti na reciklirani materijal dobijeni su izvorno iz test deonica kolovoza (AASHTO):

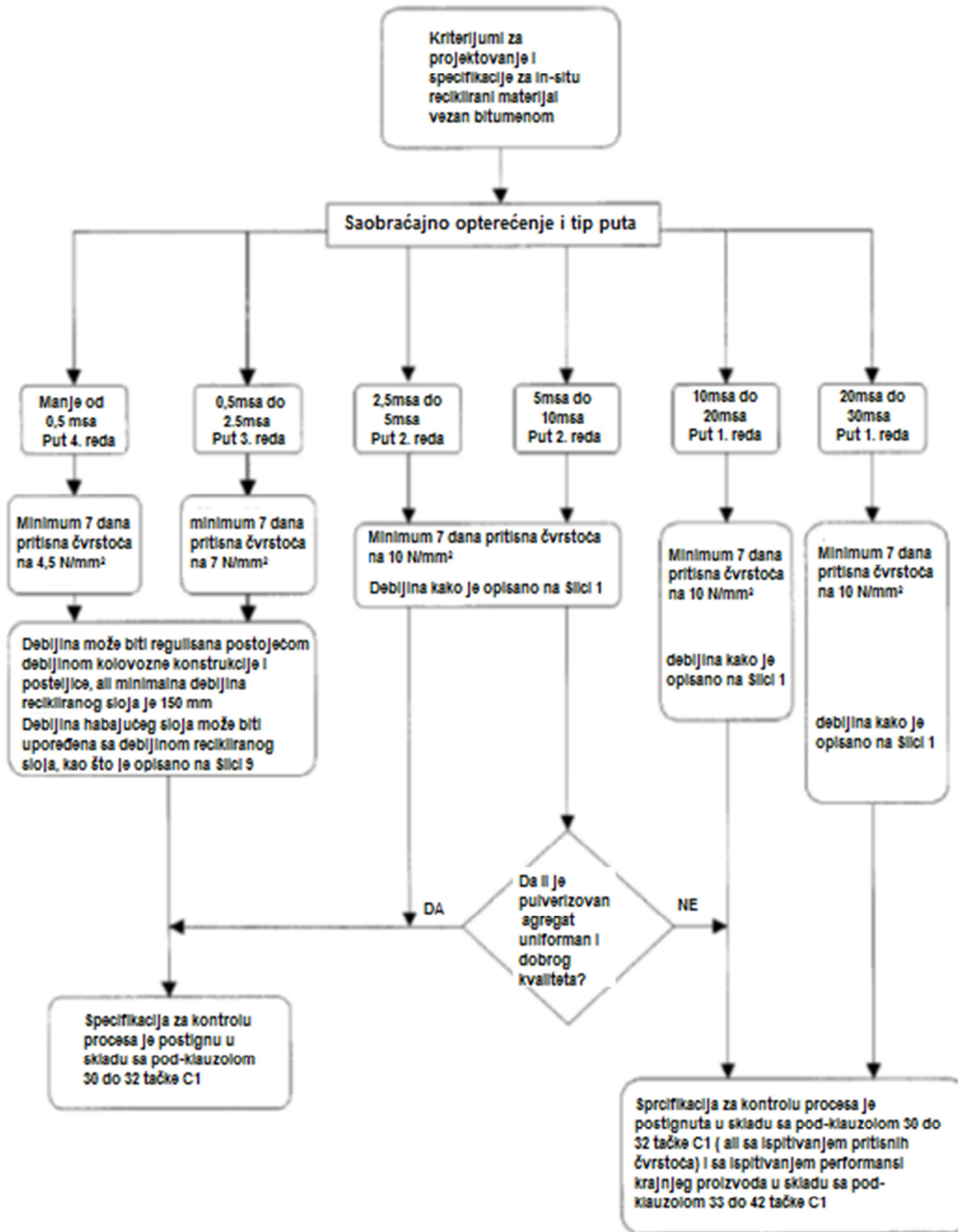
- Za materijale reciklirane sa bitumenskom emulzijom, vrednosti su se kretale od 0.17 do 0.41 sa srednjom vrednosti od 0.29,
- Za materijale reciklirane sa penušavim bitumenom, vrednosti su se kretale od 0.20 do 0.42 sa srednjom vrednosti od 0.31.

Navedeno je da se vrednost od 0.30 do 0.35 može koristiti za hladnu reciklažu na licu mesta koja treba da se uporedi sa vrednosti 0.44 koja je predložena za klasične asfaltne mešavine, što predstavlja smanjenje od 21 do 32%.

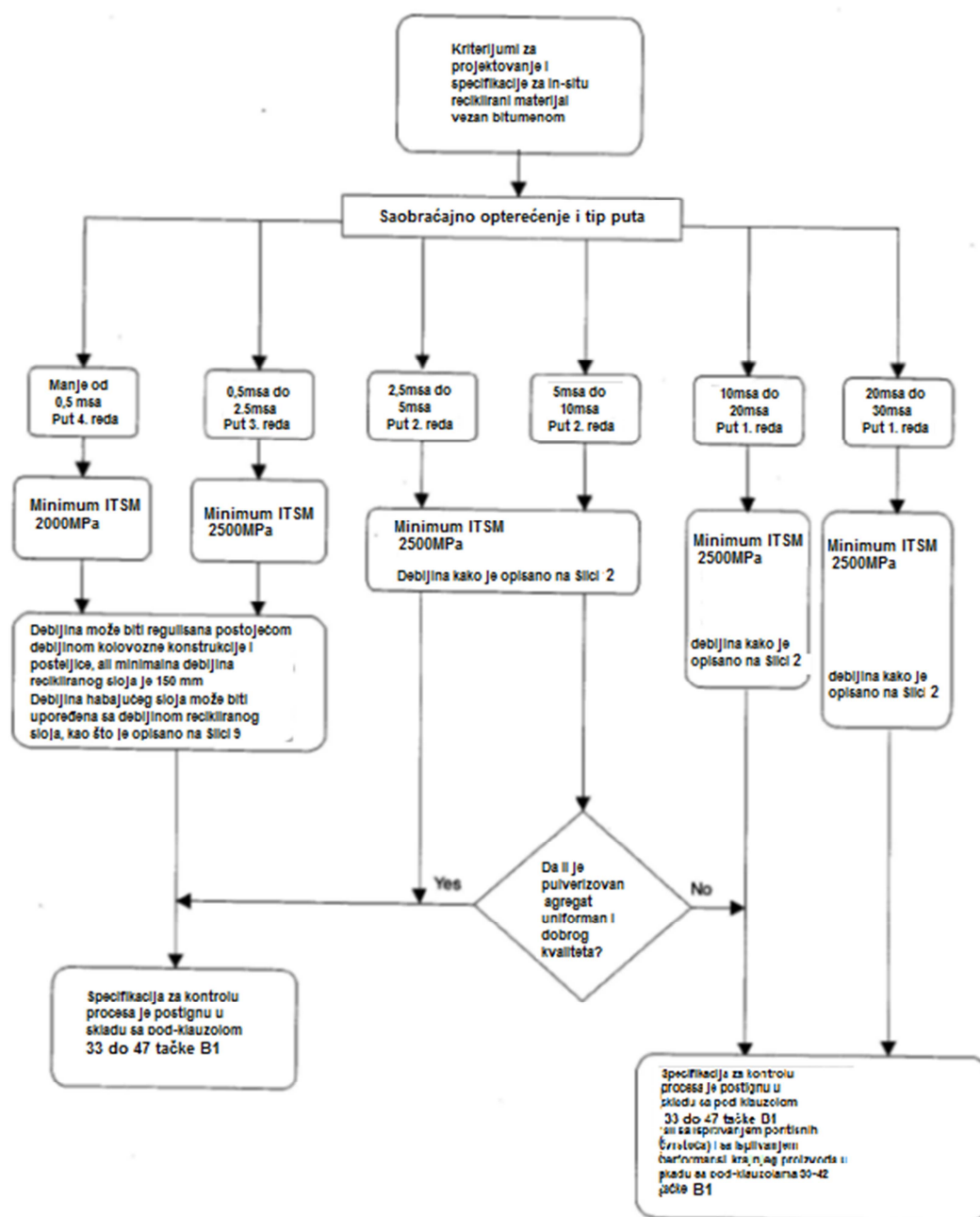
### 3.8.5 METODA DIMENZIONISANJA HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA U VELIKOJ BRITANIJI

U Velikoj Britaniji, Milton i Earland (1999) [29] su izradili metodu za dimenzionisanje hladno recikliranih kolovoza na licu mesta. Metoda se može ukratko opisati na sledeći način.

Slika 48 pokazuje algoritam za projektovanje kolovoznih konstrukcija sa slojevima od cementom vezanih recikliranih mešavina, a Slika 49 za mešavine vezane sa penušavim bitumenom. Podaci o saobraćaju koji se koriste podrazumevaju broj standardnih osovina u milionima tokom projektnog perioda u jednoj saobraćajnoj traci. Projektni kriterijum i specifikacije materijala su isto navedene u algoritmu. Kolovoz koji će se reciklirati se kategoriše u četiri klase, prema klasi saobraćajnog opterećenja prema Tabeli 23.



**Slika 48** Projektni kriterijumi i specifikacije za reciklirane mešavine na licu mesta sa cementom kao vezivom [29]



**Slika 49** Projektni kriterijumi i specifikacije za reciklirane mešavine na licu mesta sa bitumenom kao vezivom [29]

**Tabela 23** Kategorija puta [29]

Kategorija puta	Saobraćajno opterećenje (mil.st.os.)
1	od 10 do 30
2	od 2,5 do 10
3	od 0,5 do 2,5
4	do 0,5

Za relativno opterećenje puteve, npr. Tip 1 i Tip 2, debljine habajućih slojeva i recikliranog sloja se mogu odrediti korišćenjem projektnih dijagrama prikazanim na slikama 50 i 51 za cementom vezane i penušavim bitumenom vezane mešavine. Nevezani noseći sloj



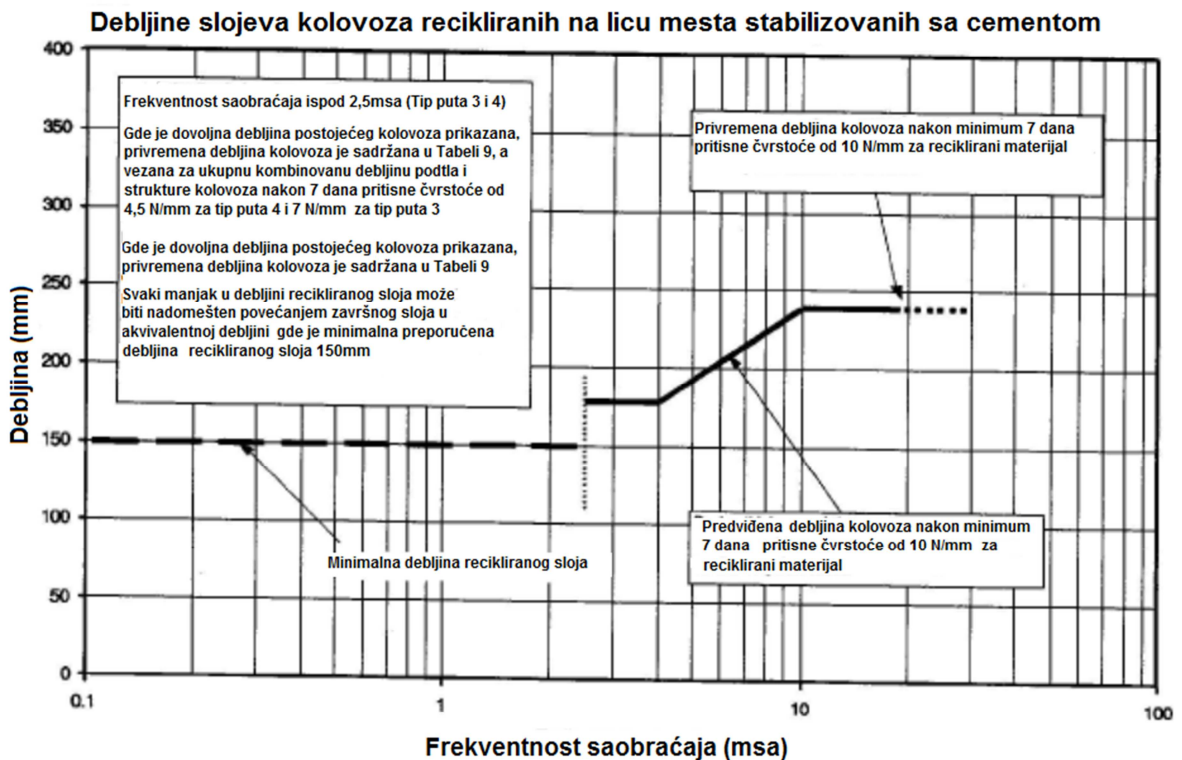
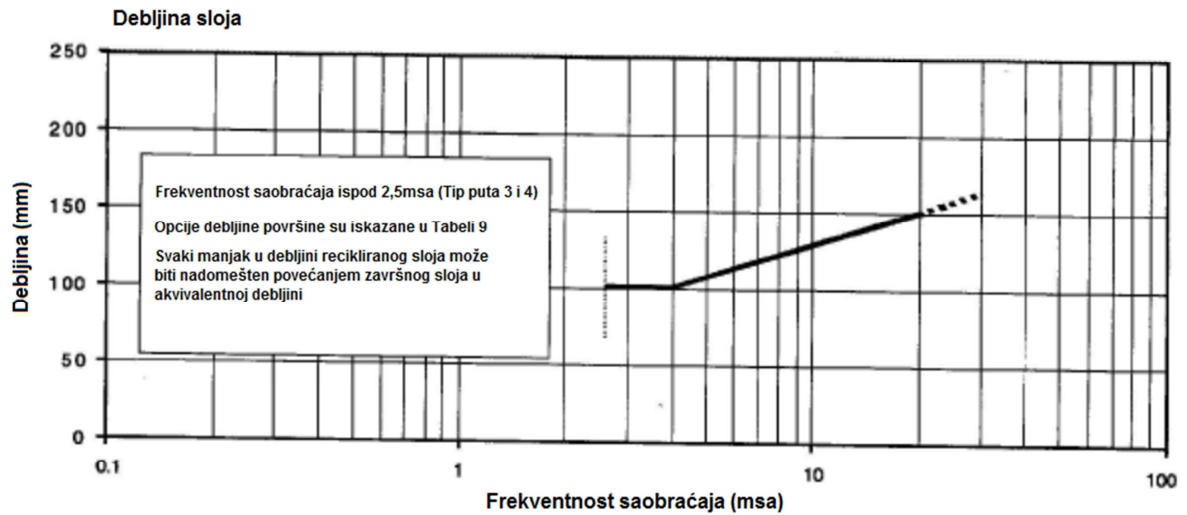
postojećeg kolovoza se klasifikuje u funkciji od CBR-a posteljice kako je prikazano u Tabeli 24.

**Tabela 24** Pretpostavljena debljina nevezanog nosećeg sloja postojećeg kolovoza za puteve Tipa 1 i Tipa 2 [29]

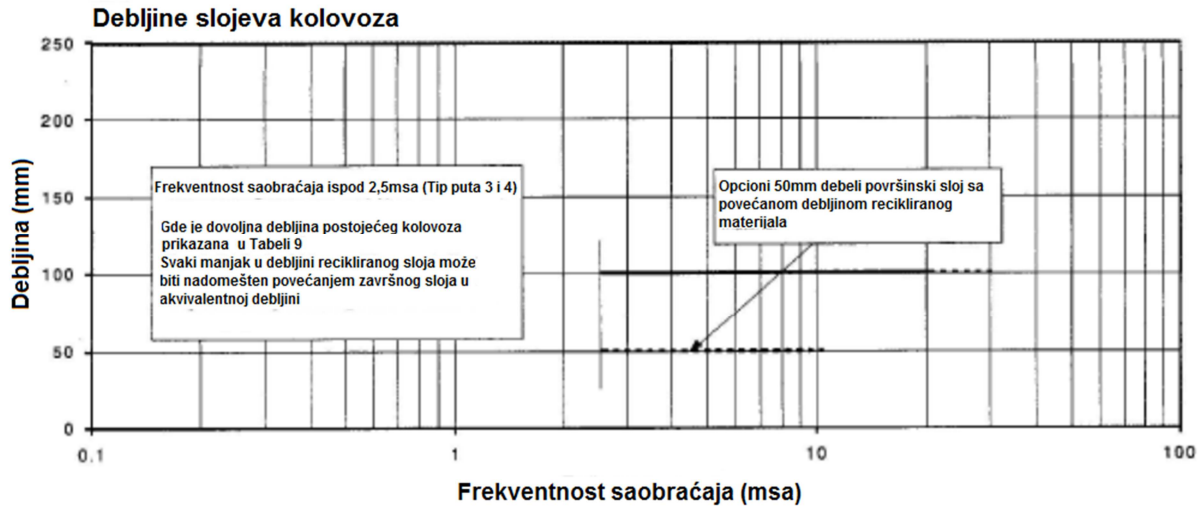
Debljina nevezanog nosećeg sloja (mm)							
Posteljica CBR 2-4		Posteljica CBR 5-7		Posteljica CBR 8-14		Posteljica CBR > 15	
Zrnavost	Preostala granica konstrukcije	Zrnavost	Preostala granica konstrukcije	Zrnavost	Preostala granica konstrukcije	Zrnavost	Preostala granica konstrukcije
300	85	250	70	200	60	150	40

Ukoliko je debljina nevezanog nosećeg sloja postojećeg kolovoza ispod zahteva iz Tabele 24, debljina recikliranog sloja se povećava sa ciljem kompenzacije nedostajuće debljine nevezanog nosećeg sloja. Ekvivalentni faktori su prikazani u Tabeli 25. Povećanje debljine recikliranog sloja rezultiraće smanjenjem potrebne debljine nevezanog nosećeg sloja. Stoga, će tokom postupka projektovanja svako povećanje debljine recikliranog sloja biti pomnoženo sa faktorom nedostajuće debljine – prikazano u Tabeli 25.

U slučaju puteva sa lakim saobraćajnim opterećenjem, npr. Tip 3 i Tip 4, debljina recikliranih slojeva zavisi od debljine habajućih slojeva i CBR-a posteljice kako je prikazano u Tabeli 26.



Slika 50 Debljine slojeva kolovoza recikliranih na licu mesta stabilizovanih sa cementom [29]



**Slika 51** Debljine slojeva kolovoza recikliranih na licu mesta stabilizovanih sa penušavim bitumenom [29]

**Tabela 25** Faktori ekvivalencije i Faktori nedostajućih debljina [29]

Debljine recikliranih na licu mesta slojeva	Ekvivalentni faktor	Faktor manjka debljine
Cementno stabilizovan materijal sa 7 dnevnom pritisnom čvrstoćom od 10N/mm <sup>2</sup>	0.3	0.45
Cementno stabilizovan materijal sa 7 dnevnom pritisnom čvrstoćom od 7N/mm <sup>2</sup>	0.4	0.65
Cementno stabilizovan materijal sa 7 dnevnom pritisnom čvrstoćom od 4,5N/mm <sup>2</sup>	0.5	1.00
Penušavi bitumensko stabilizovan materijal sa ITSM-om od 2500 MPa	0.4	0.65

**Tabela 26** Debljine recikliranih na lcu mesta slojeva kolovoza za Tip 3 i Tip 4 [29]

	Debljina hladnog na licu mesta recikliranog materijala (mm)					
	Tip puta 3			Tip puta 4		
Tip veziva	Cementna granica na licu mesta recikliranog materijala					
Debljina površine (mm)	Površinski preliv	40	100	Površinski preliv	40	100
Posteljica CBR %						
<2	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r
2 – 4	280	240	180	240	200	150
5 – 7	260	220	160	220	180	150
8 – 14	240	200	150	200	160	150
> 15	220	180	150	190	150	150
Tip veziva	Granice penušavog bitumenskog na licu mesta recikliranog materijala					
Debljina površine (mm)	Površinski preliv	40	100	Površinski preliv	40	100
<2	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r
2 – 4	n/r	310 (n/r)	250	320 (n/r)	280	195
5 – 7	330 (n/r)	290	230	300	260	185
8 – 14	315 (n/r)	275	215	285	245	160
> 15	285	245	185	255	215	150

*n/r* = ne preporučuje se

Debljine recikliranih slojeva ne bi trebalo da prelaze 300mm, u suprotnom se dovodi u pitanje mogućnost ugradnje u jednom sloju. Preporučuje se da se za puteve Tip 1 i Tip 2 izbegava mešanje materijala iz posteljice u reciklirani sloj [29].

Istraživanja u ovoj oblasti u vreme izdavanja ovog uputstva su se izvodila za saobraćajno opterećenje do 20 mil.st.os. Stoga, ukoliko saobraćajno prevazilazi ovu vrednost dimenzionisanje treba izvršiti sa dodatnim oprezom. Ukoliko je vrednost CBR-a posteljice ispod 2%, ne preporučuje se hladno recikliranje na licu mesta za bilo koje saobraćajno opterećenje [29].

### 3.8.6 MEHANISTIČKE METODE DIMENZIONISANJA HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZA

Mehanistički proces projektovanja podrazumeva da se kolovoz može modelirati kao višeslojna elastična ili visko-elastična struktura na elastičnoj ili viskoelastičnoj podlozi, i shodno tome računaju se naponi i deformacije. Za potrebe rehabilitacija, na osnovu izmerenih defleksionih basena, povratnim proračunom ("backcalculation"), dobijaju se vrednosti modula slojeva kolovoza i posteljice u trenutku merenja defleksija.

Za povratni proračun postoji nekoliko metoda koje su stručno prihvaćene i verifikovane:

- Linearna teorija elastičnosti (LET - Linear Elastic Theory),
- Metoda konačnih elemenata (FEM - Finite Element Method),
- Metoda ekvivalentnih debljina (MET - Method of equivalent thickness).

Nanošenjem opterećenja od referentne osovine i proračunom i poređenjem napona i deformacija sa dozvoljenim vrednostima na osnovu ispitanih zakonitosti zamora materijala, za sračunato saobraćajno opterećenje u projektnom periodu, dobija se teorijska trajnost kolovozne konstrukcije.

Postoji izvestan broj kompjuterskih programa koji određuju ponašanje kolovoza (deformacija - napon) u različitim tačkama kolovoza uz pomoć podataka o opterećenju od točkova referentne osovine i svojstava materijala, kao što su Modul elastičnosti i Poisson-ov koeficijent (Poisson's ratio) i debljine slojeva.

Savremeni kompjuterski programi uključuju CHEV5L (Chevron Research Co.), BISAR, BANDS i SPDM (Shell Oil Co.), ELSYM5 (University of California at Berkeley), PDMAP (NCHRP 1-10B), ELMOD 5 (Dynatest) i DAMA (The Asphalt Institute) i sl. VESYS program koji je razvila Federalna administracija za puteve (Federal Highway Administration) koristi visko-elastični pristup za izračunavanje napona i deformacija kolovoza.

U većini ovih programa moguće je vršiti i uporedne povratne proračune po različitim metodama, sa ili bez uzimanja u obzir nelinearnosti posteljice, sa međusobnim poređenjem rezultata, što, uz uključivanje iskustva i inženjerskog razmatranja, u svakom slučaju smanjuje mogućnost greške u samom dimenzionisanju. [72]

### 3.9 MEHANIČKE KARAKTERISTIKE HLADNO RECIKLIRANIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA

Istraživanja sprovedena u SAD ([73] McDaniel, 1988, Jähren et al, 1999, [74] Thomas et al, 2000, [71] Sebaaly et al, 2004, [75] Wen et al, 2004), Kanadi ([28] Kazmierowski et al, 1992), Australiji ([76] Moffatt and Sharp, 1999) i ostalim zemljama ([51] Cohen et al, 1989, [77] Hoff et al, 2005] su polužila za formiranje pouzdane osnovne o karakteristikama hladno recikliranih kolovoznih konstrukcija na licu mesta. Rezultati tih istraživanja se mogu sumirati na prema sledećem.

U projektu proširenja kolovoza, Departman za Autoputeve u Indijani je vršio kratkoročni monitoring hladno recikliranog kolovoza na licu mesta sa bitumenskom emulzijom kao vezivom u poređenju sa klasičnim tehničkim merama rehabilitacije odnosno klasičnim pojačanjem. Ustanovljeno je da nakon godinu dana eksploatacije reciklirani kolovozi pokazuju bolje performanse nego kolovozi rehabilitovani klasičnim ojačanjem sa aspekta reflektovanih pukotina i pojave kolotruga. Nije postojala značajna razlika sa aspekta defleksija i ravnosti kolovoza.

Jahren et al (1999) [27] je sistematski proučavao karakteristike 18 deonica puteva sa hladno recikliranim kolovozima na licu mesta u Ajovi, SAD korišćenjem PCI i PSI indeksa za rangiranje stanja kolovoza kvantitativno i kvalitativno kako je prikazano u tabeli 27. Zaključeno je da se kolovozi generalno ponašaju dobro u eksploataciji. Uočeno je samo nekoliko problema sa trajnim deformacijama. Konstatovano je da hladno reciklirani kolovozi na licu mesta usporavaju reflektovanje pukotina. Na osnovu ograničenih podataka o karakteristikama tokom eksploatacije, prognozirani projektovani životni vek se kretao između 15 i 26 godina pod uticajem lakog saobraćajnog opterećenja.

Tabela 27 prikazuje ponašanje kolovoza do 10 godine eksploatacije ([27] Jahren et al, 1999). Smanjenje oštećenosti za dva tipa oštećenja, koji su od posebno značaja za hladno recikliranje na licu mesta, trajna deformacija i poprečne pukotine, su prikazane u tabeli. Te vrednosti su korišćene kao deo ukupnih iznosa smanjenja u proračunu PCI-ja. Definicije koje se odnose na PSI proračun su prikazani u Tabeli 28. Iz Tabele 27 oko jedna trećina deonica nije posedovala smanjenje poprečnih pukotina dok oko dve trećine nije posedovalo smanjenje trajne deformacije.

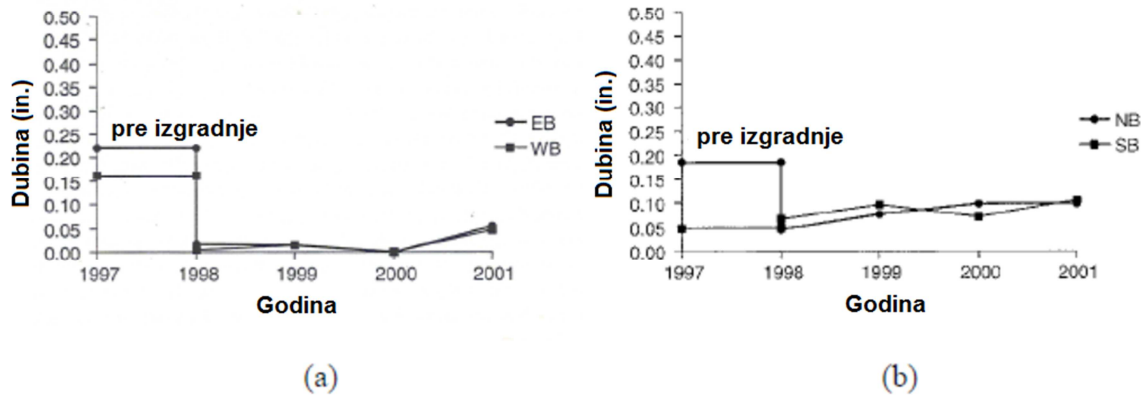
Eksperimentalno recikliranje na licu mesta dela kolovozne konstrukcije je izvedeno i u Kansasu ([74] Thomas et al, 2000). Dve deonice puta sa približno istim dužinama su reciklirane, jedna sa Letećim pepelom Klase C i druga sa bitumenskom emulzijom sa krečnom suspenzijom. Na deonici sa letećim pepelom dodato je 10% letećeg pepela dok je na deonici sa bitumenskom emulzijom dodato 1.5% hidratisanog kreča. Habajući sloj koji je izveden na recikliranom sloju je debljine 40mm. Laboratorijska ispitivanja i terenska ispitivanja su ukazivala da reciklirani materijal nije posedovao otpornost na pojavu trajnih deformacija. Određene pukotine su se pojavile na površini habajućeg sloja. Deonica sa letećim pepelom je posedovala duplo veću količinu pukotina od deonice sa bitumenskom emulzijom.

Seabaaly et al (2004) [74] je pratio performanse tri deonice sa hladno recikliranim kolovozima na licu mesta u Nevadi. Izvedeni su slojevi hladnog recikliranja sa bitumenskom emulzijom površinskih 50 – 75 mm asfaltnih habajućih slojeva postojećeg kolovoza. I izvedeno je 50 – 75mm novog habajućeg asfaltnog sloja nakon recikliranja. Rezultati praćenja stanja ukazuju da je hladno recikliranje umanjilo količinu reflektovanih pukotina i značajno redukovalo pojavu trajnih deformacija, prikazano na Slici 53.

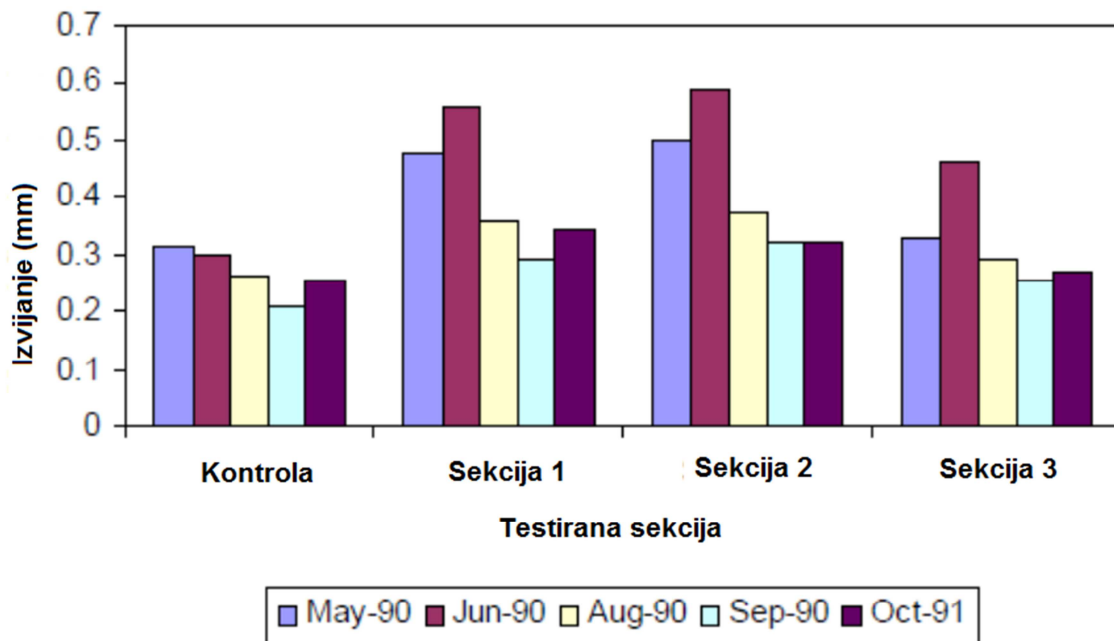
Evaluacija performansi dubokog hladnog recikliranja na licu mesta kolovoza sa letećim pepelom klase C je izvedeno od strane Wen-a ([75] Wen et al, 2004). Na putevima se odvijao prosečan dnevni saobraćaj od 5.050 vozila sa 5% teških teretnih vozila. Postojeća struktura kolovoza: 127mm asfaltni slojevi, 178mm nevezani noseći slojevi. Struktura novog kolovoza: 127mm asfaltni slojevi, 305mm reciklirani slojevi. Nakon 2 godine eksploatacije nisu registrovane pukotine ili kolotrazi na kolovozu.



kolovoza nakon prve godine eksploatacije je bilo veoma dobro bez vidljivih oštećenja na površini.



**Slika 53** Kolotrazi na deonicama hladno recikliranih kolovoza na licu mesta u Nevadi (a) SAD- 50, (b) SAD-95 [71]



**Slika 54** FWD ispitivanja na hladno recikliranom kolovozu na putu u Ontariju [28]

### 3.10 KRITERIJUMI ZA HLADNO RECIKLIRANE KOMPONENTNE MATERIJALE NA LICU MESTA

Karakteristike materijala koji se često koriste za recikliranje sa bitumenom i cementom prikazani su u Tabeli 29. [17].



**Tabela 29** Karakteristike hladno recikliranih materijala [67]

<b>RAP / Drobljeni kamen (50/50 mešavina)</b>			
Uslovi testa	Stabilizovani cement 2-2½ % cementa	Stabilizovani bitumen	
		1-1½% cement plus 2½-5% emulsion	1% cement plus 1½ - 3% foam
Gustina modificovanog AASHTO %	96 to 98	98 to 100	98 to 102
Nepotvrđena pritisna čvrstoća MPa	1.5 to 3	N/A	N/A
Posredna čvrstoća na zatezanje kPa	N/A	350 to 750	350 to 800
Zadržana čvrstoća %	N/A	> 75	> 75
Modul elastičnosti MPa	~5000*	2500 to 5000	2500 to 5000
<b>Drobljeni kamen</b>			
Uslovi testa	Stabilizovani cement 2-2½ % cementa	Stabilizovani bitumen	
		1-1½% cement plus 2½-5% emulsion	1% cement plus 1½ - 3% foam
Gustina modificovanog AASHTO %	96 to 98	98 to 100	98 to 102
Nepotvrđena pritisna čvrstoća MPa	1.5 to 3	N/A	N/A
Posredna čvrstoća na zatezanje kPa	N/A	400 to 800	400 to 900
Zadržana čvrstoća %	N/A	> 60	> 60
Modul elastičnosti MPa	~5000*	3000 to 6000	3000 to 6000
<b>Šljunak</b>			
Uslovi testa	Stabilizovani cement 3-4 % cementa	Stabilizovani bitumen	
		1-1½% cement plus 4-7% emulsion	1% cement plus 1½ - 3% foam
Gustina modificovanog AASHTO %	95 to 97	97 to 100	98 to 100
Nepotvrđena pritisna čvrstoća MPa	1.5 to 3	N/A	N/A
Posredna čvrstoća na zatezanje kPa	N/A	250 to 500	250 to 500
Zadržana čvrstoća %	N/A	> 50	> 50
Modul elastičnosti MPa	~4000*	2000 to 4000	2000 to 4000

\* Pre nego što dođe do pucanja

U ovom poglavlju je analizirana raspoloživa literatura o hladno recikliranim kolovozima. Istraživanje je pokazalo da hladno reciklirani kolovozi pokazuju poseduju veoma dobre karakteristike tokom eksploatacije. Pa se stoga očekuje i potrebno je nastaviti istraživanje u ovoj oblasti. Mnoge studije i istraživanja karakteristika hladno recikliranih mešavina su izvedene sa korišćenjem ispitnih metoda koje ne odražavaju ponašanje materijala pod uticajem realnog saobraćajnog opterećenja kao što je indirektna zatezna čvrstoća na bitumenom stabilizovanim mešavinama i pritisna čvrstoća na cementom stabilizovanim mešavinama. Ova doktorska disertacija će istražiti važne fundamentalne mehaničke karakteristike recikliranih mešavina sa ciljem korišćenja zaključaka istraživanja u budućoj inženjerskoj praksi pri projektovanju kolovoza.

## 4 KOMPONENTNI MATERIJALI KORIŠĆENI U SOPSTVENOM EKSPERIMENTALNOM ISTRAŽIVANJU

Za potrebe izvođenja sopstvenog eksperimentalnog istraživanja korišćeni su sledeći komponentni materijali:

- RAP – strugani asfaltni kolovoz,
- Drobljeni kameni agregat 0/22mm krečnjačkog porekla,
- Drobljeni pesak 0/2mm krečnjačkog porekla,
- Cement CEM II 32.5R,
- Bitumenska emulzija KP 60 (C-60).

Izbor komponentnih materijala je učinjen na način da se koriste aktuelni materijali koji su trenutno raspoloživi na tržištu u Srbiji i čija je upotreba uobičajena iz razloga primenljivosti rezultata ovog istraživanja u budućnosti u lokalnim uslovima na području Srbije i regiona.

Drobljeni pesak 0/2mm krečnjačkog porekla je korišćen sa ciljem poboljšanja granulometrijskog sastava RAP-a posebno na sitima ispod 1,0mm i povećanja učešća frakcije peska sa ciljem postizanja bolje ugradljivosti i odgovarajućih šupljina i zapremnske mase.

Drobljeni kameni agregat 0/22mm predstavlja nevezani noseći sloj iz postojeće kolovozne konstrukcije koji se reciklira prilikom izvođenja Hladnog recikliranja kolovozne konstrukcije na licu mesta i/ili se dodaje kao "nov" materijal za potrebe korekcije nivelete ili poboljšanja same mešavine.

Prvobitna namera autora je bila da se koristi drobljeni kameni agregat 0/31mm, kao agregat koji je zastupljeniji na lokalnom tržištu, ali zbog zahteva za sprovođenje fundamentalnih mehaničkih ispitivanja (zamor) maksimalno zrno je smanjeno na 22mm sa ciljem dobijanja kvalitetnijih uzoraka na kojima se mogu dobiti pouzdaniji rezultati sa smanjenim rasipanjem vrednosti.

Kao veziva korišćeni su Cement i Bitumenska emulzija u različitim odnosima.

### 4.1 UZORKOVANJE I POREKLO KOMPONENTNIH MATERIJALA

Uzorkovanje i nabavka komponentnih materijala koji će se upotrebljavati za izvođenje inženjerskog eksperimenta je izvršeno prema sledećem:

- Drobljeni kameni agregat 0/22mm, Kovilovača, i Drobljeni kameni agregat 0/2mm, Kovilovača uzorkovan je kao reprezentativan uzorak prema standardu SRPS B.B0.001, (Uzimanje uzoraka kamena i kamenih agregata) na deponiji Proizvođača "Kovilovača" u Despotovcu,
- Strugani asfalt – RAP – Reclaimed asphalt pavement – uzorkovan na deponiji na asfaltnoj bazi u Srbobranu, "BAČKA PUT"AD.
- Cement CEM II 32.5R, "LAFARGE" Beočin, kupljen je u originalnom pakovanju, proizvođač od Cementare Lafarge iz Beočina,
- Bitumenska emulzija KP 60 (oznaka C-60 prema SRPS EN 13808), proizvedena u fabrici "VIALIT" GmbH u Austriji, nabavljena je u originalnom pakovanju direktno od proizvođača iz Austrije.

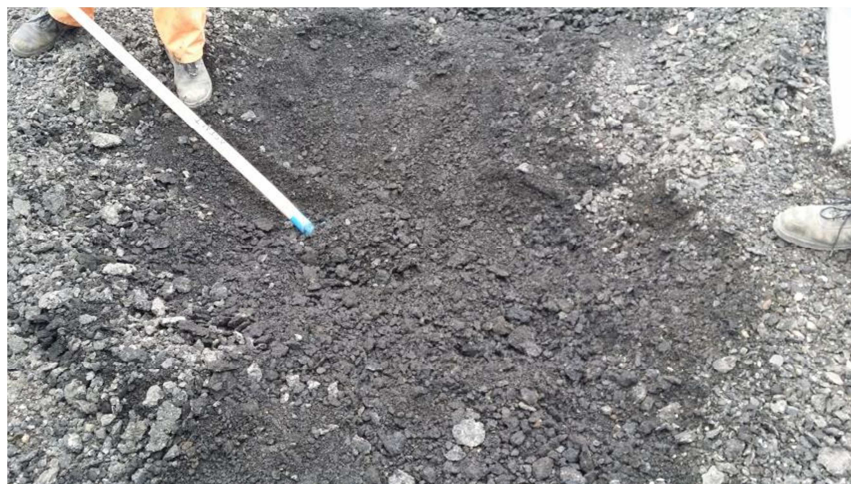
**Tabela 30** Komponentni materijali za izradu prethodnih mešavina

<b>Osnovni materijali</b>	<b>Poreklo / Proizvođač</b>
1. Drobljeni kameni agregat 0/22mm	Kamenolom "Kovilovača", Despotovac
2. Drobljeni kameni agregat 0/2mm	Kamenolom "Kovilovača", Despotovac
3. Cement CEM II 32.5R	"Lafarge", Beočin
4. Strugani asfalt – RAP	"Bačka put"AD, deponija na Asfaltnoj bazi u Srbobranu
5. Bitumenska emulzija KP 60 (C-60)	Vialit, Austrija
6. Voda za piće	Gradski Vodovod, Novi Sad

#### 4.2 RAP – STRUGANI ASFALJNI KOLOVOZ

RAP - Strugani asfaltni kolovoz je uzorkovan na deponiji na asfaltnoj bazi u Srbobranu, "BAČKA PUT"AD, Novi Sad.

Uzorkovani RAP potiče sa izvođenja radova na redovnom održavanju i struganju asfaltnih slojeva kolovozne konstrukcije Autoputa E-75, Deonica: Feketić – Novi Sad – Beograd.



**Slika 55** Uzorkovanje na deponiji RAP-a na asfaltnoj bazi Srbobran, BAČKA PUT AD, Novi Sad.

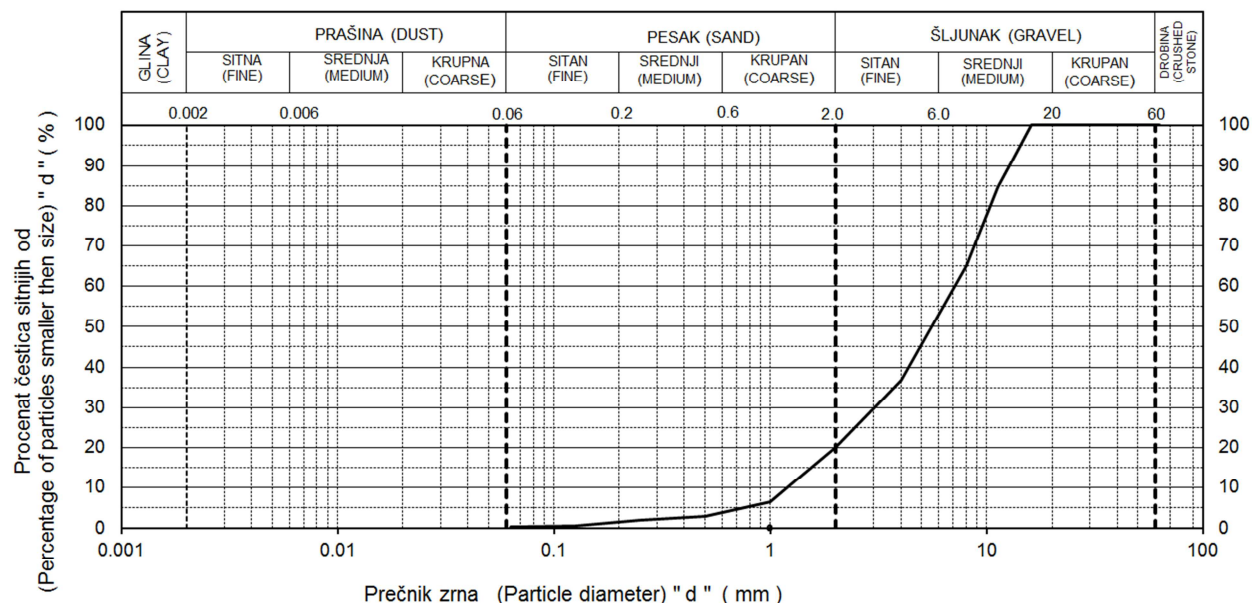


**Slika 56** Deponija RAP-a na asfaltnoj bazi Srbobran, BAČKA PUT AD, Novi Sad.

RAP agregat je nakon donošenja u laboratoriju osušen na temperaturi od 30 °C u laboratorijskoj sušnici tokom 48 sati do postizanja konstantne mase.

Nakon sušenja izvršeno je prosejavanje kroz sito od 16.0mm, kompletne količine RAP koja će se koristiti za inženjerski eksperiment, i odstranjivanje svih zrna većih od 16.0mm. Većina zrna većih od 16.0mm su bila sačinjena od zrna koja su međusobno slepljena – grudvi RAP-a i pločastih komada starog asfalta koji je nedovoljno izdrobljen postupkom struganja asfalta iz postojećeg kolovoza.

Ispitivanje granulometrijskog sastava je izvršeno prema SRPS EN 933-1 na osušenom RAP agregatu na šest uzoraka. U sledećoj tabeli su prikazani rezultati izvršenih ispitivanja.



#### Učešće frakcija

Glina	Prašina	Pesak	Šljunak	Drobina	$d_{10\%}$	$d_{30\%}$	$d_{60\%}$	C u	C c
< 0.002	0.002-0.06	0.06-2.0	2.0-60.0	> 60	(mm)	(mm)	(mm)	-	-
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(mm)	-	-
<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>19,0</b>	<b>81,0</b>	<b>0</b>	<b>1,25</b>	<b>3,0</b>	<b>7,0</b>	<b>5,6</b>	<b>1,0</b>

**Slika 57** Granulometrijski sastav RAP-a.

Ispitivanjem RAP-a kao komponentnog materijala ustanovljeno je sledeće:

- Granulometrijski sastav, Cu, Cc, prolaz na situ 0,063mm i 0,02mm (% m/m), (rezultati prikazani na prethodnoj slici, prosečna granulometrijska kriva dobijena prosejavanjem 6 uzoraka),
- Ekstrakcija bitumena iz RAP-a:
  - Sadržaj bitumena iznosi u proseku 4.9% (od 3.6% do 6.3%, mešavina struganog BNS 22sA i AB16s sa Autoputa E-75, Feketić – Novi Sad, ispitano na šest uzoraka),

- Bitumen je ostareo i sadašnje karakteristike ga svrstavaju u klasu BIT 20/30, dok je iz arhivske dokumentacije utvrđeno da je originalna klasa bitumena koji je korišćen tokom građenja BIT60.

#### 4.3 DROBLJENI KAMENI AGREGAT 0/22MM, KAMENOLOM KOVILOVAČA, DESPOTOVAC

Rezultati laboratorijskih ispitivanja Drobljenog kamenog agregata 0/22mm iz kamenoloma Kivilovača iz Despotovca su prikazani u sledećoj tabeli.

**Tabela 31** Rezultati laboratorijskih ispitivanja drobljenog kamenog agregata 0/22mm "Kivilovača", Despotovac.

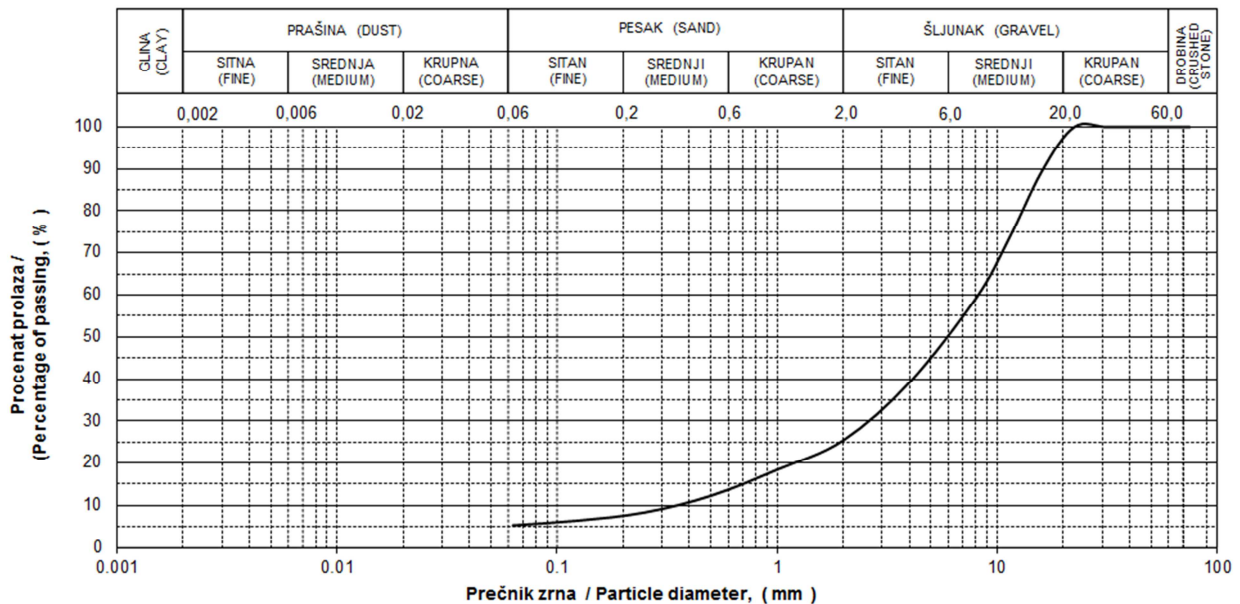
Karakteristike agregata	Metoda ispitivanja	Jedinica mere	Rezultat ispitivanja	Uslov kvaliteta TU JPPS 2009.
Mineraloško-petrografski sastav	SRPS B.B8.004:1987**	-	-	Krečnjak
Zapreminska masa u rastresitom stanju	SRPS B.B8.030:1986 - povučen*	kg/m <sup>3</sup>	<b>1519</b>	-
Zapreminska masa u zbijenom stanju	SRPS B.B8.030:1986 - povučen*	kg/m <sup>3</sup>	<b>1708</b>	-
Upijanje vode	SRPS B.B8.031:1982 - povučen*	%	<b>0.5</b>	≤ 1,6
Količina lakih čestica	SRPS B.B8.034:1986	%	<b>0.0</b>	≤ 3,0
Količina slabih zrna	SRPS B.B8.037:1986	%	<b>0.0</b>	≤ 7,0
Sadržaj grudvi gline	SRPS B.B8.038:1982	%	<b>0.0</b>	≤ 5,0
Postojanost prema mrazu natrijum-sulfatom	SRPS B.B8.044:1982 - povučen	%	<b>0.1</b>	≤ 5,0
Otpornost prema drobljenju i habanju - "Los Anđeles"	SRPS B.B8.045:1978	%	<b>22.0</b>	≤ 40,0
Oblik zrna 3:1	SRPS B.B8.048:1984 - povučen	%	<b>10.9</b>	≤ 40,0
Granulometrijski sastav				
- čestice manje od 0,02mm	SRPS U.B1.018:2005 - povučen	%	<b>2.9</b>	≤ 3
- stepen neravnomernosti (U)		-	<b>23.5</b>	15 - 50
Aterbergove granice - Indeks plastičnosti	SRPS U.B1.020:1980 - povučen	-	<b>0</b>	-
Sadržaj organskih materija	SRPS U.B1.024:1968		<b>0.0</b>	≤ 3,0
Maksimalna suva zapreminska masa	SRPS U.B1.038:1997	t/m <sup>3</sup>	<b>2.17</b>	-

Optimalna vlažnost	SRPS U.B1.038:1997	%	<b>5.2</b>	-
Kalifornijski indeks nosivosti $CBR_{lab}$ pri zahtevanoj suvoj zapreminskoj masi od 95% $\gamma_{d,max}$	SRPS U.B1.042:1997 - povučen	%	<b>86</b>	$\geq 80$

**Tabela 32** Granulometrijski sastav Drobljenog kamenog agregata 0/22mm, "Kovilovača", Despotovac

<b>Otvor sita, [mm]</b>	0.063	0.125	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	11.2	16.0	22.4	31.5
<b>Prolaz, [%]</b>	<b>5.4</b>	<b>6.5</b>	<b>8.4</b>	<b>12.3</b>	<b>18.4</b>	<b>25.4</b>	<b>39.2</b>	<b>59.2</b>	<b>72.9</b>	<b>89.5</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

**Slika 58** Granulometrijska kriva Drobljenog kamenog agregata 0/22mm, "Kovilovača", Despotovac (prosečna kriva od 6 prosejanih uzoraka).



Za korekciju granulometrijskog sastava kod mešavina sa 80% RAP-a, sa ciljem dobijanja zadovoljavajuće granulometrijske krive mineralne mešavine izvršeno je dodavanje 10% drobljenog peska – drobljenog kamenog agregata 0/2mm, "Kovilovača", Despotovac.

**Tabela 33** Granulometrijski sastav drobljenog peska – Drobljenog kamenog agregata 0/2mm, "Kovilovača", Despotovac

Naziv frakcije	Sito (mm)	Prolaz (%)
Pesak frakcije 0/2 mm	0.063	<b>8,0</b>
	0.09	<b>8,1</b>
	0.25	<b>18,8</b>
	0.71	<b>47,6</b>
	2.0	<b>95,1</b>
	4.0	<b>100</b>
	8.0	<b>100</b>

#### 4.4 CEMENT CEM II 32.5R, CEMENTARA: "LAFARGE", BEOČIN

Rezultati laboratorijskih ispitivanja Cementa CEM II 32.5 R iz Cementare LAFARGE iz Beočina su prikazani u sledećoj tabeli.

**Tabela 34** Laboratorijska ispitivanja cementa CEM II 32.5R, CEMENTARA: "LAFARGE", BEOČIN.

Vrsta ispitivanja	Metoda ispitivanja	Rezultati	
		Zahtevano	Ostvareno
Finoća mliva (ostatak na situ), [%]	SRPS EN 196-6:1995 t.3	-	<b>0,65</b>
Standardna konzistencija, [%]	SRPS EN 196-3:2010 t.5	-	<b>29</b>
Vreme vezivanja, [min]	- početak posle	≥ 75	<b>260</b>
	- kraj posle	-	<b>315</b>
Stalnost zapremine na Le Šatelijeovim prstenovima, [mm]	SRPS EN 196-3:2010 t.7	≤ 10	<b>0,88</b>
Savojna čvrstoća, [MPa]	- na 2 dana	-	<b>2,9</b>
	- na 28 dana	-	<b>9,2</b>
Pritisna čvrstoća, [MPa]	- na 2 dana	≥ 10,0	<b>23,1</b>
	- na 28 dana	32,5 - 52,5	<b>49,7</b>

#### 4.5 BITUMENSKA EMULZIJA KP 60 (C-60), "VIALIT", AUSTRIJA

Rezultati laboratorijskih ispitivanja bitumenske emulzije KP 60 (C-60) iz fabrike emulzije VIALIT iz Austrije su prikazani u sledećoj tabeli.

**Tabela 35** Laboratorijska ispitivanja bitumenske emulzije iz fabrike emulzije VIALIT iz Austrije.

Vrsta ispitivanja	Metoda ispitivanja	Rezultati	
		Zahtevano za TIP C-60 (SRPS EN 13808:2013)	Ostvareno
Vreme isticanja bitumenske emulzije - standardni TAR viskozimetar kroz otvor prečnika 4mm na 40°C (s)	SRPS EN 12846-1:2012	40 - 100	<b>42,9</b>
Određivanje vrednosti raspada sa mineralnim punilom	SRPS EN 13075-1:2013	-	-
Određivanje stabilnosti bitumenskih emulzija pri mešanju sa cementom (g)	SRPS EN 12848:2012	-	<b>0,2</b>
Stabilnost pri skladištenju (% mas)	SRPS EN 1429:2014	-	<b>0,05</b>
- ostatak na situ 0,500mm		-	<b>0,03</b>
- ostatak na situ 0,160mm		-	<b>0,03</b>
Polarnost čestica bitumenske emulzije	SRPS EN 1430:2012	katjonska / cationic	katjonska / cationic
Sadržaj vode ( % mas)	SRPS EN 1428:2013	58 - 62	<b>59,0</b>
Prionljivost emulzije i kamenog agregata pod vodom (%)	SRPS EN 13614:2013	-	<b>90,0</b>

## 5 REALIZACIJA SOPSTVENOG EKSPERIMENTALNOG DELA ISTRAŽIVANJA

### 5.1 PLAN, ALGORITAM I PROGRAM INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA

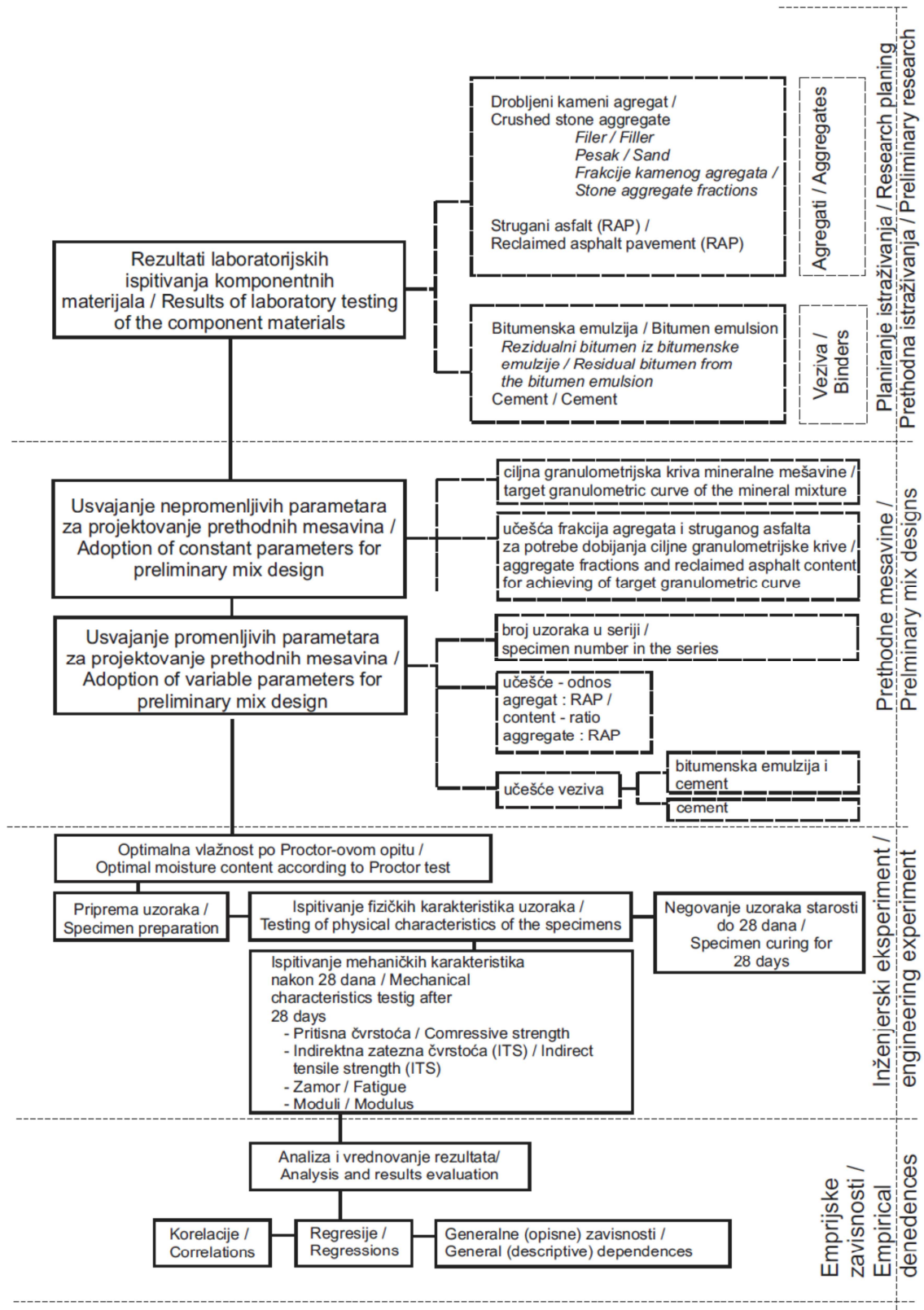
Inženjerski eksperiment je najvećim delom obavljen u akreditovanoj laboratoriji CPL - "Centralna putna laboratorija" DOO, Veternik, Novi Sad, Srbija dok su se određena specifična ispitivanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika obavila u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije, Građevinski fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija i u Laboratoriji "NIEVELT Labor"GmbH, Stockerau, Beč, Austrija.

Sve ovo i činjenica da su prethodno obezbeđeni apsolutno svi uslovi za izvršenje planiranih istraživanja u ovom radu je pretpostavka dobrih polaznih osnova i uslova za dostizanje planiranih ciljeva istraživanja.

Na sledećoj slici je prikazan generalni plan za realizaciju sopstvenog eksperimentalnog istraživanja koji prikazuje sve faze realizacije prema metodologiji naučno istraživačkog rada:

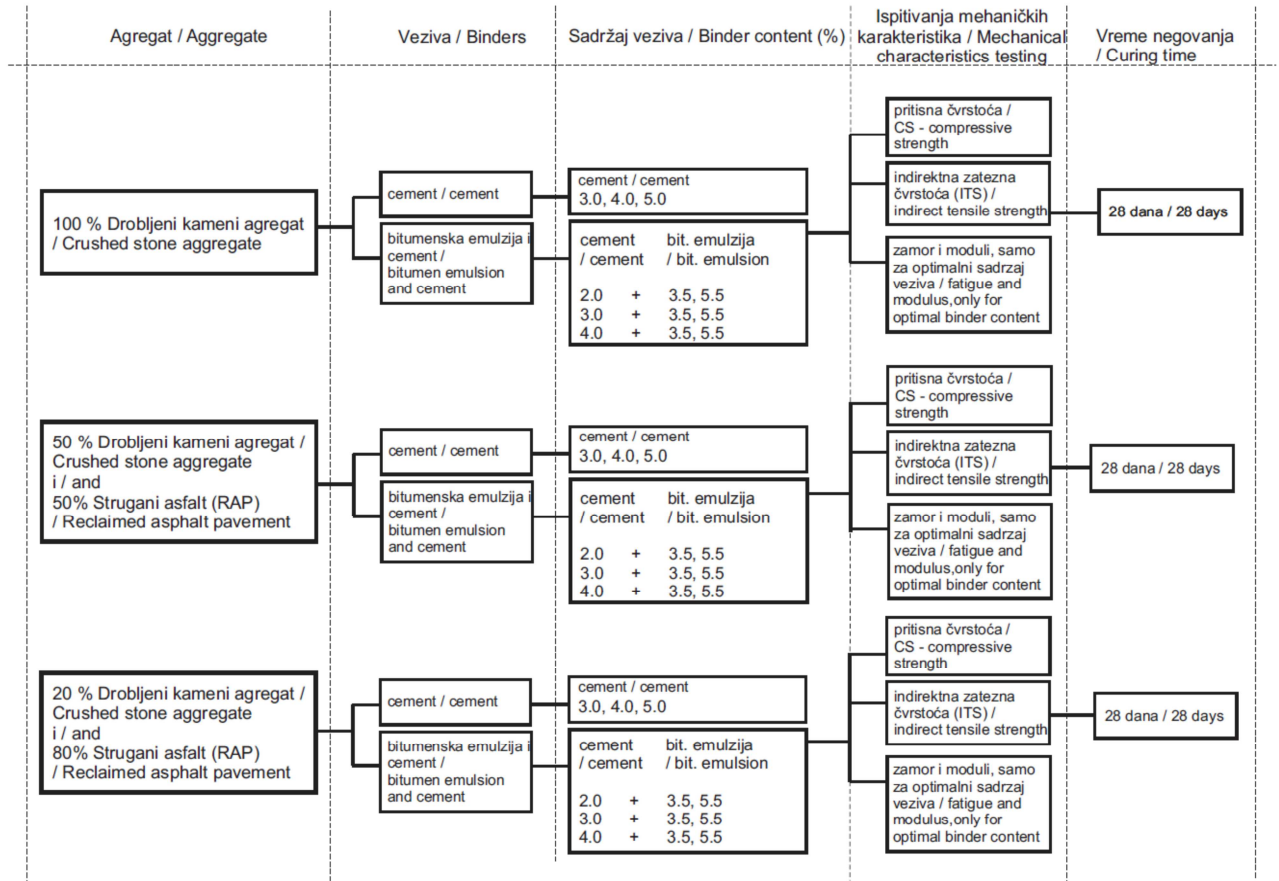
- Planiranje istraživanja sa izvođenjem prethodnih istraživanja,
- Projektovanje prethodnih mešavina,
- Izvođenje inženjerskog eksperimenta,
- Određivanje empirijskih zavisnosti.





**Slika 59** Generalni plan za realizaciju sopstvenog eksperimentalnog istraživanja.

Plan spravljanja mešavina, izrade uzoraka i ispitivanja mehaničkih karakteristika u obliku algoritma inženjerskog eksperimenta prikazan je na sledećoj slici:



Slika 60 Algoritam sopstvenog eksperimentalnog dela istraživanja.

## 5.2 PRIPREMA UZORAKA

Uzorci se pripremaju prema Algoritmu inženjerskog eksperimenta koji je prikazan na Slici 60 odnosno prema postupku opisanom u sledećem tekstu.

U prvom delu eksperimenta je prvo izvršeno ispitivanje (pritisna čvrstoća i ITS) svih mešavina sa različitim učešćima RAP-a i drobljenog kamenog agregata i cementa i bitumenske emulzije kao veziva, pa je nakon analize dobijenih rezultata izvršeno usvajanje optimalnih sadržaja veziva i na usvojenim recepturama odnosno prethodnim mešavinama je izveden drugi deo eksperimenta odnosno dalje ispitivanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika – zamor i moduli.

### 5.2.1 PRETHODNA MEŠAVINA OD 100% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM

Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R:

- Svi uzorci se pripremaju Standardnim Proctor-ovim postupkom, veliki kalup 150mm x 150mm.
- Prvo se određuje Optimalna vlažnost  $w_{opt}$  i  $maxY_d$  po standardnom Proctor-u za srednji sadržaj cementa.
- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za ITS<sub>28</sub>),

- Ispitivanje se vrši za 3 različita učešća - procenta cementa (Cement 3.0%, Cement 4.0%, Cement 5.0%),
- Znači, pripremljeno je ukupno  $3 \times 6 = 18$  uzoraka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R + Bitumenska emulzija KP 60:

- Svi uzorci se pripremaju u Statičkoj presi za hladnu reciklažu prema standardu RVS 08.17.01 u ciklusima opterećenja do 49kN, veliki kalup 150mm x 150mm, specijalni namenski kalup,
- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za  $ITS_{28}$ ),
- Ispitivanje se vrši za 6 različitih učešća cementa i bitumenske emulzije (2.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 2.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija),
- Znači, pripremljeno je ukupno  $6 \times 6 = 36$  uzoraka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

5.2.2 PRETHODNA MEŠAVINA OD 50% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM + 50% RAP

Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R:

- Svi uzorci se pripremaju u Standardnom Proctor-u, veliki kalup 150mm x 150mm,
- Prvo se odredi Optimalna vlažnost  $w_{opt}$  i  $\max Y_d$  po standardnom Proctor-u za srednji sadržaj cementa.
- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za  $ITS_{28}$ ),
- Ispitivanje se vrši za 3 različita učešća - procenta cementa (Cement 3.0%, Cement 4.0%, Cement 5.0%),
- Znači, priprema se ukupno  $3 \times 6 = 18$  uzoraka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R + Bitumenska emulzija KP 60:

- Svi uzorci se pripremaju u Statičkoj presi za hladnu reciklažu prema standardu RVS 08.17.01 u ciklusima opterećenja do 49kN, veliki kalup 150mm x 150mm, specijalni namenski kalup,

- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za ITS<sub>28</sub>),
- Ispitivanje se vrši za 6 različitih učešća cementa i bitumenske emulzije (2.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 2.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija ),
- Znači, priprema se ukupno 6 x 6 = 36 uzoraka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

### 5.2.3 PRETHODNA MEŠAVINA OD 20% DROBLJENOG KAMENOG AGREGATA 0/22MM + 80% RAP

#### Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R:

- Svi uzorci se pripremaju u Standardnom Proctor-u, veliki kalup 150mm x 150mm,
- Prvo se odredi Optimalna vlažnost  $w_{opt}$  i  $\max Y_d$  po standardnom Proctor-u za srednji sadržaj cementa.
- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za ITS<sub>28</sub>),
- Ispitivanje se vrši za 3 različita učešća - procenta cementa (Cement 3.0%, Cement 4.0%, Cement 5.0%),
- Znači, priprema se ukupno 3 x 6 = 18 uzoraka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

#### Sa vezivom: Cement CEM II 32.5 R + Bitumenska emulzija KP 60:

- Svi uzorci se pripremaju u Statičkoj presi za hladnu reciklažu prema standardu RVS 08.17.01. u ciklusima opterećenja do 49kN, veliki kalup 150mm x 150mm, specijalni namenski kalup,
- Priprema se 6 uzoraka za svaki sadržaj veziva za ispitivanja nakon 28 dana (3 uzorka za pritisnu čvrstoću  $\beta_{28}$ , 3 uzorka za ITS<sub>28</sub>),
- Ispitivanje se vrši za 6 različitih učešća cementa i bitumenske emulzije (2.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 3.5% bitumenska emulzija, 2.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 3.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija, 4.0% Cement + 5.5% bitumenska emulzija ),
- Znači, priprema se ukupno 6 x 6 = 36 uzorka.
- Na usvojenom optimalnom sadržaju veziva odnosno za usvojenu optimalnu recepturu prethodne mešavine su pripremljeni uzorci za ispitivanje na zamor i module u kalupu 150mm, visina uzorka 75mm.
- Znači, za ispitivanje na zamor i module pripremljeno je ukupno 9 uzoraka.

Za realizaciju prvog dela sopstvenog eksperimentalnog istraživanja odnosno za ispitivanje fizičko mehaničkih karakteristika – Pritisne čvrstoće (CS) i Indirektne Zatezne čvrstoće (ITS) ukupno je pripremljeno  $3 \times 54 = 162$  **uzorka**,  $d=150\text{mm}$ ,  $h=150\text{mm}$ , dok je za realizaciju drugog dela sopstvenog eksperimentalnog istraživanja za ispitivanje zamora i modula pripremljeno ukupno  $6 \times 9 = 54$  **uzorka**,  $d=150\text{mm}$ ,  $h=75\text{mm}$ . Sve ukupno za kompletno izvođenje sopstvenog eksperimentalnog istraživanja pripremljeno je ukupno **216 uzoraka**.

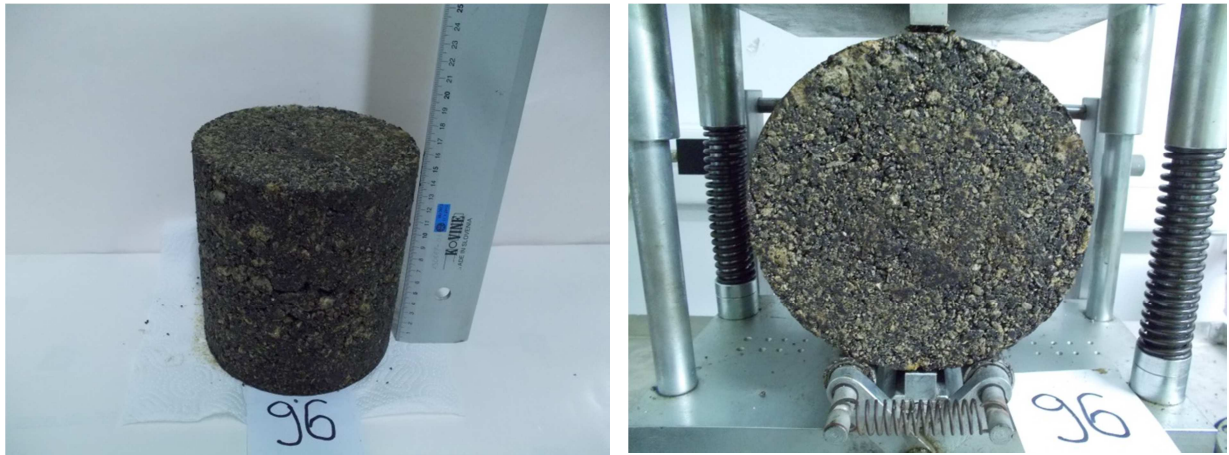
Na sledećim tabelama su prikazane slike uzoraka za ispitivanja, pre i nakon ispitivanja tokom prvog dela inženjerskog eksperimenta.



**Slika 61** Pripremljeni uzorak za ispitivanje pritisne čvrstoće pre izvođenja ispitivanja, na merenju dimenzija i u presi.



**Slika 62** Uzorak nakon loma odnosno nakon završenog ispitivanja pritisne čvrstoće u presi.



**Slika 63** Pripremljeni uzorak za ispitivanje indirektna zatezne čvrstoće pre izvođenja ispitivanja, na merenju dimenzija i u presi.



**Slika 64** Uzorak nakon loma odnosno nakon završenog ispitivanja indirektna zatezne čvrstoće u presi.

## 6 PRIKAZ REZULTATA EKSPERIMENTA

### 6.1 PRVI DEO EKSPERIMENTA – ISPITIVANJE FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA, PRITISNA ČVRSTOĆA I ITS

Rezultati sprovedenog prvog dela eksperimentalnog istraživanja su prikazani u ovom poglavlju. Svi uzorci su ispitivani na istoj starosti od 28 dana, dimenzije cilindričnih uzoraka:  $d=150\text{mm}$ ,  $h=150\text{mm}$ .

Rezultati ispitivanja su prikazani u sledećim tabelama.

**Tabela 36** Određivanje čvrstoće epruveta pri pritisku – Ispitivanje prema standardu SRPS EN 13286-41.

Sifra uzorka	Oznaka epruv.	Masa epruvete [kg]	Sila loma [N]	Zapremna masa epruv. [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku [N/mm <sup>2</sup> ]	Srednja vrednost čvrstoće pri pritisku [N/mm <sup>2</sup> ]
100% DK, 3% cem	1	4,71	71.380	2219	4,04	3,88
	2	4,71	61.080	2221	3,46	
	3	4,70	73.180	2216	4,14	
100% DK, 4% cem (usvojena kao optimalna receptura)	7	4,76	114.580	2243	6,48	6,39
	8	4,79	122.760	2257	6,95	
	9	4,71	101.470	2222	5,74	
100% DK, 5% cem	13	4,72	138.930	2226	7,86	8,60
	14	4,72	152.300	2224	8,62	
	15	4,73	164.910	2230	9,33	
50% DK, 50% RAP, 3% cem	19	4,09	28.730	1930	1,63	1,72
	20	4,22	29.090	1992	1,65	
	21	4,22	33.220	1989	1,88	
50% DK, 50% RAP, 4% cem	25	4,09	35.370	1928	2,00	2,00
	26	4,26	38.990	2010	2,21	
	27	4,17	31.850	1969	1,80	
50% DK, 50% RAP, 5% cem (usvojena kao optimalna receptura)	31	4,23	54.850	1997	3,10	2,93
	32	4,24	50.450	1999	2,85	
	33	4,20	50.210	1981	2,84	
50% DK, 50% RAP, 6% cem	37	4,28	62.160	2019	3,52	4,00
	38	4,41	85.550	2079	4,84	
	39	4,31	64.190	2031	3,63	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem	43	3,94	24.420	1857	1,38	1,35
	44	4,00	26.580	1885	1,50	
	45	3,96	20.670	1869	1,17	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem	49	3,98	29.350	1878	1,66	1,84
	50	4,05	35.390	1909	2,00	
	51	4,01	33.030	1893	1,87	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 5% cem	55	4,00	38.660	1887	2,19	2,30
	56	4,03	40.800	1901	2,31	
	57	4,05	42.370	1909	2,40	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 6% cem (usvojena kao optimalna receptura)	61	4,06	47.940	1913	2,71	2,63
	62	4,06	46.650	1916	2,64	
	63	4,07	44.750	1919	2,53	
100% DK, 2% cem, 3.5 bit em	67	5,99	13.910	2096	0,79	0,86
	68	6,04	15.300	2114	0,87	
	69	5,98	16.450	2112	0,93	
100% DK, 3% cem, 3.5 bit em	73	6,05	25.840	2110	1,46	1,50
	74	6,07	26.610	2106	1,51	

	75	6,13	27.210	2118	1,54	
<b>100% DK, 4% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	79	6,05	35.010	2093	1,98	2,26
	80	6,10	39.210	2103	2,22	
	81	5,99	45.510	2110	2,58	
	100% DK, 2% cem, 5.5 bit em	85	5,99	15.060	2105	0,85
	86	5,89	9.580	2091	0,54	
	87	6,03	17.560	2093	0,99	
100% DK, 3% cem, 5.5 bit em	91	5,94	25.930	2127	1,47	1,33
	92	5,90	22.970	2090	1,30	
	93	6,04	21.680	2124	1,23	
100% DK, 4% cem, 5.5 bit em	97	6,18	25.470	2140	1,44	1,69
	98	6,36	29.780	2147	1,69	
	99	6,22	34.210	2140	1,94	
50% DK, 50% RAP, 2% cem, 3.5 bit em	103	5,95	24870	2059	1,41	1,41
	104	6,07	24160	2080	1,37	
	105	6,05	25640	2075	1,45	
50% DK, 50% RAP, 3% cem, 3.5 bit em	109	6,00	34880	2067	1,97	1,83
	110	5,90	27550	2062	1,56	
	111	6,01	34760	2072	1,97	
<b>50% DK, 50% RAP, 4% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	115	5,84	40940	2058	2,32	2,16
	116	5,82	30910	2054	1,75	
	117	5,74	42560	2076	2,41	
50% DK, 50% RAP, 2% cem, 5.5 bit em	121	5,84	28770	2114	1,63	1,59
	122	5,82	28820	2140	1,63	
	123	5,74	26780	2075	1,52	
50% DK, 50% RAP, 3% cem, 5.5 bit em	127	5,92	38420	2068	2,17	2,18
	128	5,79	39240	2075	2,22	
	129	5,78	37890	2075	2,14	
50% DK, 50% RAP, 4% cem, 5.5 bit em	133	5,79	45320	2117	2,56	2,37
	134	5,72	37750	2101	2,14	
	135	5,53	42780	2124	2,42	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 2% cem, 3.5 bit em	139	5,54	32380	2021	1,83	1,85
	140	5,61	33660	2041	1,90	
	141	5,41	31810	2043	1,80	
<b>20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	145	5,58	51380	2071	2,91	2,59
	146	5,46	43000	2061	2,43	
	147	5,47	42900	2075	2,43	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem, 3.5 bit em	151	5,72	53800	2084	3,04	2,97
	152	5,65	53100	2110	3,00	
	153	5,35	50400	2073	2,85	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 2% cem, 5.5 bit em	157	5,85	29810	2070	1,69	1,65
	158	5,73	27010	2075	1,53	
	159	5,70	30650	2098	1,73	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem, 5.5 bit em	163	5,64	38810	2067	2,20	2,07
	164	5,51	36380	2079	2,06	
	165	5,62	34690	2073	1,96	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem, 5.5 bit em	169	5,77	49720	2147	2,81	2,70
	170	5,44	48600	2115	2,75	
	171	5,73	44870	2137	2,54	

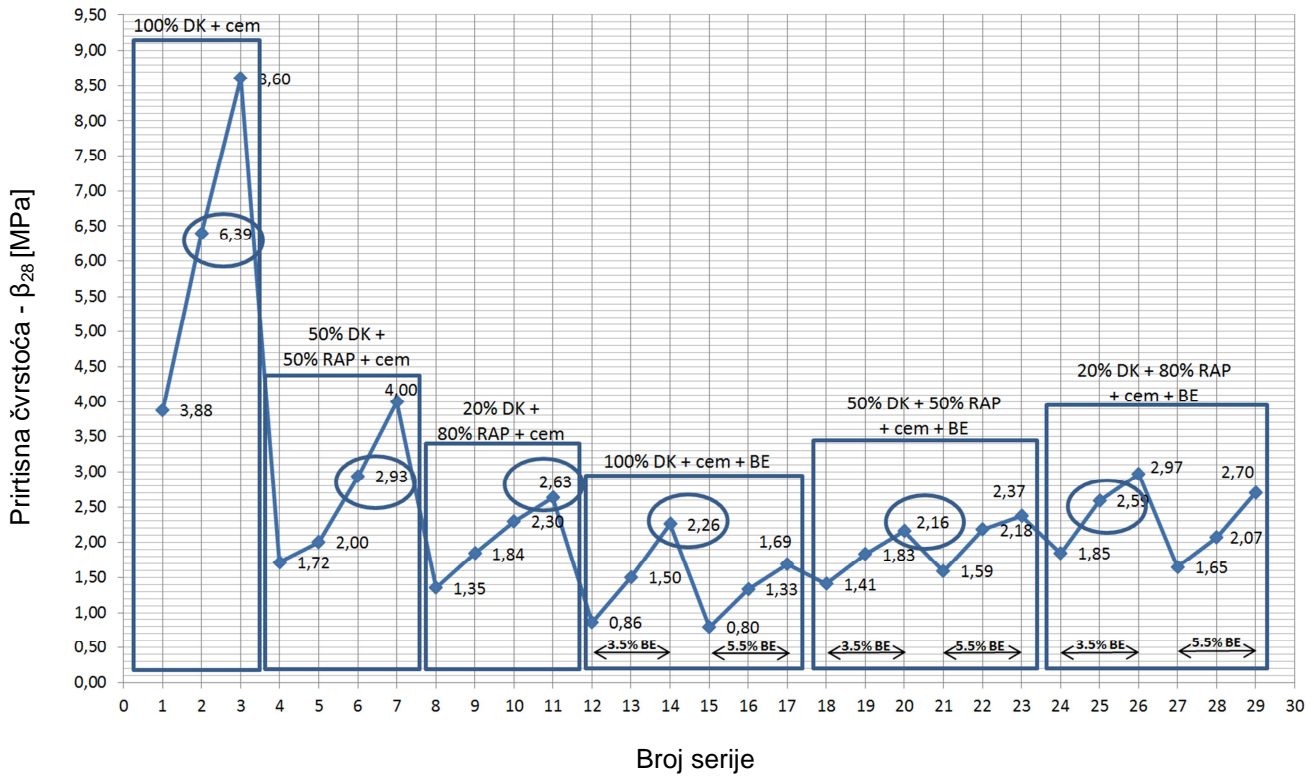


**Tabela 37** Određivanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju – Ispitivanje prema standardu SRPS EN 13286-42

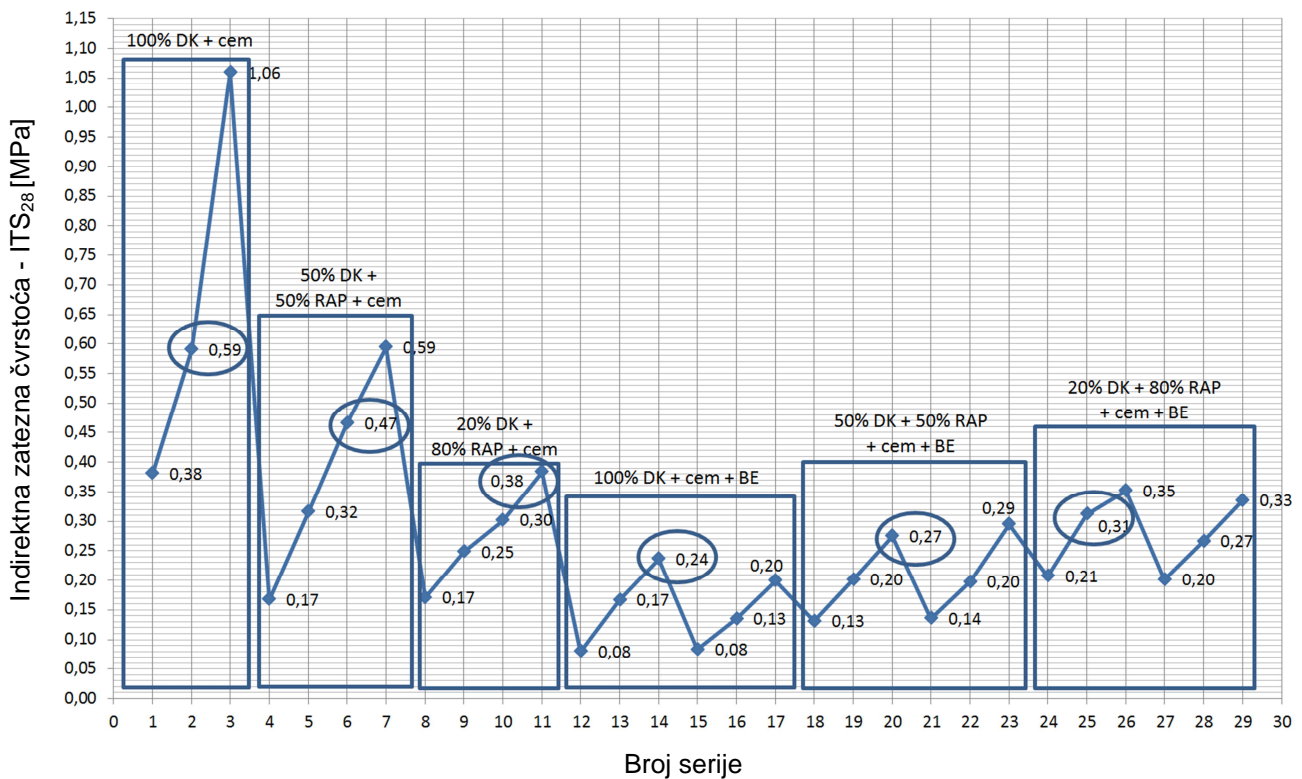
Sifra uzorka / Laboratory Number	Oznaka epruvete	Masa epruvete [kg]	Sila pri lomu [N]	Zapremin ska masa epruvete [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri indirektn om zatezanju [MPa]	Srednja vrednost čvrstoće pri indirektnom zatezanju [MPa]
100% DK, 3% cem	4	4,74	9310	2236	0,33	0,38
	5	4,74	10410	2233	0,37	
	6	4,72	12540	2227	0,44	
<b>100% DK, 4% cem (usvojena kao optimalna receptura)</b>	10	4,73	17440	2233	0,62	0,59
	11	4,71	14440	2223	0,51	
	12	4,76	18140	2246	0,64	
100% DK, 5% cem	16	4,74	32790	2235	1,16	1,06
	17	4,80	30630	2266	1,08	
	18	4,70	26410	2219	0,93	
50% DK, 50% RAP, 3% cem	22	4,18	5370	1972	0,19	0,17
	23	4,11	4140	1937	0,15	
	24	4,10	4640	1933	0,16	
50% DK, 50% RAP, 4% cem	28	4,22	8680	1991	0,31	0,32
	29	4,19	8590	1975	0,30	
	30	4,25	9520	2006	0,34	
<b>50% DK, 50% RAP, 5% cem (usvojena kao optimalna receptura)</b>	34	4,27	13160	2014	0,47	0,47
	35	4,25	13850	2006	0,49	
	36	4,32	12480	2036	0,44	
50% DK, 50% RAP, 6% cem	40	4,31	16140	2032	0,57	0,59
	41	4,35	16120	2053	0,57	
	42	4,38	18110	2065	0,64	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem	46	3,99	5120	1883	0,18	0,17
	47	3,96	4740	1868	0,17	
	48	3,96	4600	1867	0,16	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem	52	4,00	7430	1885	0,26	0,25
	53	3,99	7070	1883	0,25	
	54	3,98	6550	1879	0,23	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 5% cem	58	4,07	9240	1917	0,33	0,30
	59	4,04	8590	1907	0,30	
	60	4,04	7740	1906	0,27	
<b>20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 6% cem (usvojena kao optimalna receptura)</b>	64	4,05	10320	1908	0,36	0,38
	65	4,03	10970	1901	0,39	
	66	4,08	11190	1924	0,40	
100% DK, 2% cem, 3.5 bit em	70	6,00	2890	2114	0,08	0,08
	71	5,97	3100	2094	0,08	
	72	5,96	3010	2108	0,08	
100% DK, 3% cem, 3.5 bit em	76	6,09	6130	2116	0,16	0,17
	77	5,96	6710	2092	0,18	
	78	6,03	6210	2106	0,16	
<b>100% DK, 4% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	82	6,04	11140	2116	0,29	0,24
	83	6,02	8300	2082	0,22	
	84	5,90	7530	2087	0,20	
100% DK, 2% cem, 5.5 bit em	88	5,97	3290	2134	0,09	0,08
	89	5,99	3410	2131	0,09	
	90	6,13	2690	2125	0,07	
100% DK, 3% cem, 5.5 bit em	94	6,11	5120	2132	0,13	0,13
	95	6,11	5370	2112	0,14	
	96	5,98	5010	2081	0,13	
100% DK, 4% cem, 5.5 bit em	100	6,32	8610	2118	0,22	0,20
	101	6,15	8110	2096	0,21	
	102	5,96	6490	2106	0,17	

50% DK, 50% RAP, 2% cem, 3.5 bit em	106	5,84	5010	<b>2043</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>
	107	5,84	5070	<b>2071</b>	<b>0,13</b>	
	108	5,89	4810	<b>2048</b>	<b>0,13</b>	
50% DK, 50% RAP, 3% cem, 3.5 bit em	112	5,94	7680	<b>2116</b>	<b>0,21</b>	<b>0,20</b>
	113	5,90	7310	<b>2072</b>	<b>0,19</b>	
	114	5,83	7700	<b>2066</b>	<b>0,20</b>	
<b>50% DK, 50% RAP, 4% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	118	5,89	10470	<b>2105</b>	<b>0,28</b>	<b>0,27</b>
	119	5,84	9910	<b>2050</b>	<b>0,26</b>	
	120	5,77	10290	<b>2104</b>	<b>0,28</b>	
50% DK, 50% RAP, 2% cem, 5.5 bit em	124	5,79	5200	<b>2086</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>
	125	5,76	5080	<b>2076</b>	<b>0,14</b>	
	126	5,59	4650	<b>2070</b>	<b>0,13</b>	
50% DK, 50% RAP, 3% cem, 5.5 bit em	130	5,78	7480	<b>2079</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>
	131	5,64	7070	<b>2034</b>	<b>0,19</b>	
	132	5,77	7430	<b>2049</b>	<b>0,20</b>	
50% DK, 50% RAP, 4% cem, 5.5 bit em	136	5,62	10490	<b>2113</b>	<b>0,30</b>	<b>0,29</b>
	137	5,75	10990	<b>2121</b>	<b>0,30</b>	
	138	5,61	10080	<b>2100</b>	<b>0,28</b>	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 2% cem, 3.5 bit em	142	5,65	7890	<b>2072</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>
	143	5,49	7020	<b>2041</b>	<b>0,20</b>	
	144	5,53	7520	<b>2073</b>	<b>0,21</b>	
<b>20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem, 3.5 bit em (usvojena kao optimalna receptura)</b>	148	5,61	11450	<b>2096</b>	<b>0,32</b>	<b>0,31</b>
	149	5,47	10990	<b>2080</b>	<b>0,31</b>	
	150	5,38	10420	<b>2070</b>	<b>0,30</b>	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem, 3.5 bit em	154	5,56	12700	<b>2060</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>
	155	5,56	13000	<b>2061</b>	<b>0,36</b>	
	156	5,51	12100	<b>2062</b>	<b>0,34</b>	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 2% cem, 5.5 bit em	160	5,53	7700	<b>2094</b>	<b>0,22</b>	<b>0,20</b>
	161	5,51	6700	<b>2098</b>	<b>0,19</b>	
	162	5,36	6600	<b>2089</b>	<b>0,19</b>	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 3% cem, 5.5 bit em	166	5,72	10730	<b>2124</b>	<b>0,30</b>	<b>0,27</b>
	167	5,53	9240	<b>2099</b>	<b>0,26</b>	
	168	5,38	8180	<b>2073</b>	<b>0,24</b>	
20% DK (10% DK 0/22 + 10% DK 0/2), 80% RAP, 4% cem, 5.5 bit em	172	5,36	10950	<b>2127</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>
	173	5,47	11180	<b>2123</b>	<b>0,33</b>	
	174	5,60	12390	<b>2122</b>	<b>0,35</b>	

Na sledećim dijagramima su prikazane vrednosti  $\beta_{28}$  i  $ITS_{28}$  za sve ispitivane serije uzoraka sa različitim učešćem drobljenog kamenog agregata, RAP-a, cementa i bitumske emulzije. Za svaku seriju je prikazana prosečna vrednost od tri uzorka. Usvojene optimalne recepture za dalje ispitivanje fundamentalnih mehaničkih karakteristika su obeležene odnosno zaokružene na dijagramima, dok su u prethodnim tabelama redovi optimalnih receptura obeleženi sivom bojom. Usvajanje optimalnih receptura je izvršeno tek nakon donošenja zaključaka u Tački 6.2 "Analiza sa statističkom obradom rezultata" u ovom istraživačkom radu.



**Slika 64a** Dijagram vrednosti pritisnih čvrstoća -  $\beta_{28}$  za sve ispitivane mešavine sa obeleženim usvojenim optimalnim sadržajima veziva.



**Slika 64b** Dijagram vrednosti indirektnih zateznih čvrstoća -  $ITS_{28}$  za sve ispitivane mešavine sa obeleženim usvojenim optimalnim sadržajima veziva.

## 6.2 ANALIZA SA STATISTIČKOM OBRADOM REZULTATA

Kao što je objašnjeno u uvodnom delu ove disertacije cilj istraživanja je definisanje međusobne zavisnosti odnosno korelacije određenih mehaničkih karakteristika u funkciji vrste i količine pojedinih komponentnih materijala (RAP i drobljeni kameni agregat) i veziva (cement i bitumenska emulzija) koje će omogućiti mehanistički pristup projektovanju recikliranih kolovoznih konstrukcija.

Dostizanje postavljenog cilja zasniva se na rezultatima parcijalnih istraživanja koja će se odnositi na određivanje sledećih uticaja sastava na fizičko mehaničke karakteristike mešavine:

- Učešće komponentnih materijala (strugani asfalt i drobljeni kameni agregat) i njihovog međusobnog odnosa,
- Učešće veziva (cement i bitumenska emulzija), samo cement i zajedno u različitim iznosima.

Opis potrebnih međuzavisnosti:

- Definisane uticaja međusobnog odnosa učešća komponentnih materijala (strugani asfalt i drobljeni kameni agregat) na fizičko mehaničke karakteristike mešavine sa određenim sadržajem veziva,
- Definisane uticaja učešća veziva (pojedinačni uticaj primenjenog veziva i njihova kombinacija) na fizičko mehaničke karakteristike mešavine sa određenim sastavom komponentnih materijala (strugani asfalt i drobljeni kameni agregat),
- Opisivanje i definisanje generalnih među zavisnosti variranih parametara sastava i fizičko mehaničkih karakteristika mešavine,
- Određivanje međusobne zavisnosti i korelacija fizičko mehaničkih karakteristika "pritisna čvrstoća i ITS" i "zamora i modula" na uzorcima nakon 28 dana.

### 6.2.1 PREDMET STATISTIČKE OBRADU

Kao što je već u uvodnom izlaganju predočeno, ključni problem, kao i celokupna problemska orijentacija ovog istraživanja, vezuje se za analizu tematske celine i to: **fizičko mehaničke karakteristike** (*Zapreminska masa (Specimen Density [ $\text{kg/m}^3$ ] – SD)*, *Čvrstoća pri pritisku (Compressive Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – CS)*, *Čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – ITS)* u odnosu na kriterijume: **procentualno učešće DK-a** (u daljem tekstu će se koristiti skraćeni termin: DK), **procentualno učešće RAP-a** (u daljem tekstu će se koristiti skraćeni termin: RAP), **procentualno učešće bitumenske emulzije** (u daljem tekstu će se koristiti skraćeni termin: bit) i **procentualno učešće cementa** (u daljem tekstu će se koristiti skraćeni termin: cem).

Shodno tome, u istraživanju su postavljeni sledeći operativni zadaci:

- da se prikažu osnovni parametri fizičko mehaničkih karakteristika u odnosu na učešće DK, RAP, bitumenske emulzije i cementa.
- da se utvrde razlike po kriterijumima odnosno između učešća DK-a, između učešća RAP-a, između učešća bitumenske emulzije i između učešća cementa, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.
- da se definišu karakteristike svakog kriterijuma: učešće svakog DK, učešće svakog RAP, učešće svake bitumenske emulzije i učešće svakog cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.
- da se odredi homogenost svakog kriterijuma: učešće svakog DK, učešće svakog RAP, učešće svake bitumenske emulzije i učešće svakog cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

- da se odredi doprinos obeležja karakteristikama svakog kriterijuma: učešće svakog DK, učešće svakog RAP, učešće svake bitumenske emulzije i učešće svakog cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.
- da se odredi doprinos celine karakteristikama.

U završnim analizama dobijenih podataka, sa podjednakom pažnjom razmotriće se i sva druga pitanja za koja je naknadno utvrđeno da su od značaja radi potpunijeg osvetljavanja problema koji se istražuje.

## 6.2.2 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Uzimajući u obzir prethodna iskustva, osnovu problema, predmeta i ciljeva istraživanja, kao i metodološkog pristupa u ovom istraživanju, mogu se postaviti osnovne hipoteze:

### Globalna hipoteza istraživanja glasi:

**H<sub>0</sub>** Ne postoji razlika između DK, između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS).

**A<sub>0</sub>** Postoji razlika između DK, između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS).

### Ostale hipoteze glase:

**H<sub>1</sub>** Ne postoji razlika između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa), u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS)..

**A<sub>1</sub>** Postoji razlika između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa), u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS).

**H<sub>2</sub>** Ne postoji jasno definisana granica između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa) u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS).

**A<sub>2</sub>** Postoji jasno definisana granica između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa), u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike (SD, CS, ITS).

**H<sub>3</sub>** Ne postoji razlika između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa) u odnosu na pojedina obeležja fizičko mehaničkih karakteristika (SD, CS, ITS).

**A<sub>3</sub>** Postoji značajna razlika između DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa) u odnosu na pojedina obeležja fizičko mehaničkih karakteristika (SD, CS, ITS).

**H<sub>4</sub>** Ne postoji značajna razlika između bilo koja dva subuzorka DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa) u odnosu na pojedina obeležja fizičko mehaničkih karakteristika (SD, CS, ITS).

**A<sub>4</sub>** Postoji značajna razlika između bilo koja dva subuzorka DK (između RAP, između bitumenske emulzije i između cementa) u odnosu na pojedina obeležja fizičko mehaničkih karakteristika (SD, CS, ITS).

## 6.2.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Posmatrane promenljive su obeležja (ili varijable). Obeležja u odnosu na koja se deli uzorak na subuzorke su kriterijumska obeležja. Više obeležja, koja su međusobno smisleno povezana i čine logičnu celinu (C), zovu se jednostavno "celina" (prostor). Sve posmatrane tematske celine čine prostor istraživanja.

### 6.2.3.1 UZORAK ISTRAŽIVANJA

Analiziraće se sledeće grupe uzoraka koje su podeljene na podgrupe prema sledećim kriterijumima:

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće drobljenog kamenog agregata:**

- 100% DK, Oznaka podgrupe DK-1, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 50% DK, Oznaka podgrupe DK-2, 30 komada uzoraka u podgrupi,
- 20% DK, Oznaka podgrupe DK-3, 30 komada uzoraka u podgrupi.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće struganog asfalta RAP-a:**

- 0% RAP, Oznaka podgrupe RAP-1, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 50% DK, Oznaka podgrupe RAP-2, 30 komada uzoraka u podgrupi,
- 80% DK, Oznaka podgrupe RAP-3, 30 komada uzoraka u podgrupi.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 5 podgrupa u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće cementa:**

- 2% cement, Oznaka podgrupe CMNT-1, 18 komada uzoraka u podgrupi,
- 3% cement, Oznaka podgrupe CMNT-2, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 4% cement, Oznaka podgrupe CMNT-3, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 5% cement, Oznaka podgrupe CMNT-4, 9 komada uzoraka u podgrupi,
- 6% cement, Oznaka podgrupe CMNT-5, 6 komada uzoraka u podgrupi.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće bitumenske emulzije:**

- 0% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-1, 33 komada uzoraka u podgrupi,
- 3,5% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-2, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 5,5% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-3, 27 komada uzoraka u podgrupi.

### 6.2.3.2 MATEMATIČKO – STATISTIČKA OBRADA PODATAKA

Podaci su obrađeni odgovarajućim matematičko – statističkim postupcima u skladu sa temom istraživanja. Vođeno je računa da se što je moguće manje izgube informacije do kojih se došlo u toku istraživanja. Redosled primene postupaka je od izuzetne važnosti kako za zaključivanje tako i za blagovremenu eliminaciju i uključivanje pojedinih obeležja, koja će omogućiti kvalitetnije istraživanje. Analiza će se sprovesti u tri koraka i to: testiranje hipoteza o sličnostima ili razlikama, određivanjem mere razlika sa definisanjem karakteristika i grafičkim prikazom.

#### **Primenjeni postupci:**

Obeležja celine fizičko mehaničkih karakteristika poseduju parametrijska svojstva shodno tome analiziraće se parametrijskim postupcima.

U ovom radu će se prikazati deskriptivni parametri, srednja vrednost, standardna devijacija ( $S_d$ ), minimum i maksimum svih vrednosti, koeficijenta varijacije ( $C_v$ ) intervala poverenja, mere asimetrije Skjunis, mere spoljoštenosti Kurtosis i vrednost testa Kolmogorov – Smirnov.

Koristiće se multivarijantni postupci MANOVA i diskriminativna analiza. Od univarijantnih postupaka primeniće se ANOVA i t-test.

Primena postupaka na osnovu kojih se dobija mera daje novu dimenziju ovom istraživanju. Izračunavanjem koeficijenta diskriminacije izdvajaju se obeležja koja određuju specifičnost

subuzoraka i obeležja koje je potrebno isključiti iz dalje obrade, odnosno vrši se redukcija posmatranog prostora. Takođe prikaz procena homogenosti subuzoraka, distanca između njih i Klaster analiza, ima za cilj da se što je moguće bolje izuči posmatrana pojava.

Svrha primene matematičko – statističke analize ima za cilj da se odrede karakteristike svakog subuzorka, homogenost i distanca između njih u odnosu na izvedene karakteristike da bi se moglo izvesti pouzdano i precizno predviđanje i prognoza sa određenom pouzdanošću.

### **Grafički prikazi:**

Najznačajniji Rezultati istraživanja biće grafički prikazani. Grafici su crteži koji, po pravilu, jasnije i upečatljivije prikazuju pojavu, mada su često mogu biti sa određenog aspekta i neprecizni. Mogućnosti prikazivanja jednodimenzionalne i višedimenzionalne slike i sl. pojačavaju i izdvajaju neke vrednosti. Koliko god da doprinose prikazivanju istraživanja, na isti način mogu da ih prikažu i nerealno. Realnost ispitivane pojave se dobija uz predstavljanje analitičkog postupka i grafičko prikazivanje. Na osnovu grafičkog prikaza bez analitičkog postupka neće se donositi zaključci.

Korišćenje elipsi pri grafičkom prikazivanju ima višestruko značenje. Veličina elipse upućuje na homogenost uzorka. Uže elipse znače da je uzorak homogen. Dužina glavne ose pokazuje povezanost dva ispitivana parametra. Ugao koji zaklapa glavna osa elipse sa apscisom predstavlja smer povezanosti (rastuća ili opadajuća). Centar elipse je srednja vrednost uzorka u odnosu na oba parametra.

U slučaju dva ili više subuzorka, vizuelno se pokazuje postojanje sličnosti ili razlika između njih. Ako se dve elipse poklapaju razlika ne postoji, kada su elipse razdvojene, odnosno nemaju zajedničkih tačaka, postoji značajna razlika između subuzoraka za posmatrane parametre, a kada se elipse delimično poklapaju, obavezno se mora zaključivati samo na osnovu izvedenih analiza.

Dendrogram u ovom radu grafički prikazuje klasterizaciju (grupisanje) podgrupa po analiziranim parametrima na osnovu međusobnih distanci. Vertikalna duž predstavlja rastojanje između dve grupe ili grupe više grupa ili dve podgrupe.

### **Testiranje hipoteza:**

Postupci koji dokazuju postojanje sličnosti ili razlika između subuzoraka potvrđuju hipotezu o sličnosti ili je odbacuju (potvrđuju alternativnu hipotezu), odnosno ukazuju na postojanje razlika. Pri testiranju hipoteza koristi se kritična vrednost  $p$ , koja predstavlja rizik zaključivanja. Ako je  $p > 0.100$  nema razloga da se ne prihvati početna hipoteza. Za odbacivanje početne hipoteze koristiće se dva praga značajnosti. U slučaju kada je  $0.05 < p < 0.10$  prihvata se alternativna hipoteza sa povećanim rizikom zaključivanja, kada je  $p < 0.05$  prihvata se alternativna hipoteza i kaže se da postoje značajne razlike.

Definisanje hipoteza za primenjene postupke vrši se na sledeći način:

#### **Postupkom MANOVA se testira hipoteza $H_1$ koja glasi:**

- $H_1$  Ne postoje značajne razlike između podgrupa za posmatranu tematsku celinu.
- $A_1$  Postoje značajne razlike između nekih podgrupa za posmatranu tematsku celinu.

#### **Postupkom diskriminativne analize se testira hipoteza $H_2$ :**

- $H_2$  Ne postoji jasno definisana granica između podgrupa za posmatranu tematsku celinu.

**A<sub>2</sub>** Postoji jasno definisana granica između nekih podgrupa za posmatranu tematsku celinu.

**Postupkom ANOVA ili Roy-evog testa se testira hipoteza H<sub>3</sub>:**

**H<sub>3</sub>** Ne postoji značajna razlika između podgrupa po pojedinim obeležjima.

**A<sub>3</sub>** Postoji značajna razlika između nekih podgrupa po pojedinim obeležjima.

#### 6.2.4 ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE DK

U prvom delu biće prikazani centralni disperzioni i parametri, mere asimetrije i spljoštenosti u odnosu na praćene parametre. U drugom delu analiziraće se razlika između DK, odnosno dokazaće se ili odbaciti hipoteze, kako bi se procenili dobijeni rezultati i svrsishodnost daljeg razmatranja, utvrdili pravci i metodološki prioriteti njihove obrade. Zatim će se, ako za to postoje uslovi, definisati karakteristike i homogenost svake DK, odrediti distanca između njih. Na kraju će se dobijeni rezultati grafički prikazati.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće drobljenog kamenog agregata:**

- 100% DK, Oznaka podgrupe DK-1, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 50% DK, Oznaka podgrupe DK-2, 30 komada uzoraka u podgrupi,
- 20% DK, Oznaka podgrupe DK-3, 30 komada uzoraka u podgrupi,

Analiza će se sprovesti na sledećim fizičko mehaničkim karakteristikama: zapreminska masa (Specimen Density [ $\text{kg/m}^3$ ] – **SD**), čvrstoća pri pritisku (Compressive Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **CS**), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **ITS**).

##### 6.2.4.1 OSNOVNI PARAMETRI FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE DK

Centralni i disperzioni parametri, mere asimetrije i spljoštenosti praćenih obeležja fizičko mehaničkih karakteristika reprezentuju DK i usmeravaju na mogućnost primene parametrijskih postupaka.

**Tabela 38** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka za 100% DK

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv. pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2151.01	58.17	2089.9	2256.6	2.70	2127.99	2174.03	0.58	-1.37	0.132
<b>CS</b>	3.04	2.66	0.5	9.3	87.57	1.98	4.09	1.17	-0.02	0.049
<b>ITS</b>	0.32	0.31	0.1	1.2	95.10	0.20	0.45	1.55	1.33	0.048

*Napomena vrednosti asimetrije i spljoštenosti u intervalu od -0.04 do 0.04 nisu diskutovane.*

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 100% DK ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 100% DK po: čvrstoća pri pritisku (CS) (87.57), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (95.10). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (2.70). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (0.58), čvrstoća pri pritisku (CS) (1.17), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.55). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.33). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.37).



Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.13). Distribucija vrednosti odstupa od normalne raspodele (p) kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.05), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.05).

**Tabela 39** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 50% DK

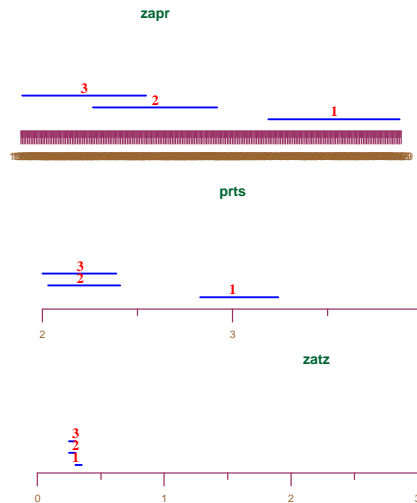
	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.		sk	ku	p
<b>SD</b>	2047.05	54.80	1927.7	2140.2	2.68	2026.58	2067.52	-0.53	-0.41	0.686
<b>CS</b>	2.22	0.77	1.4	4.8	34.76	1.93	2.51	1.60	2.75	0.233
<b>ITS</b>	0.28	0.15	0.1	0.6	52.65	0.22	0.33	1.06	0.10	0.284

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 50% DK ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 50% DK po: čvrstoća pri pritisku (CS) (34.76), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (52.65). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (2.68). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (1.60), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.06). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.53). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (2.75), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.10). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-0.41). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.69), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.23), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.28).

**Tabela 40** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 20% DK

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.		sk	ku	p
<b>SD</b>	2005.89	96.35	1857.2	2146.8	4.80	1969.90	2041.88	-0.26	-1.59	0.096
<b>CS</b>	2.19	0.52	1.2	3.0	23.70	2.00	2.39	-0.07	-1.05	0.958
<b>ITS</b>	0.28	0.07	0.2	0.4	25.12	0.25	0.30	-0.05	-1.19	0.951

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 20% DK ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 10% DK po: čvrstoća pri pritisku (CS) (23.70), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (25.12). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (4.80). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.26), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.07). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.59), čvrstoća pri pritisku (CS) (-1.05), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-0.19). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.96), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.95). Distribucija vrednosti odstupa od normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.10).



Legenda: 1 - 100% DK, 2 - 50% DK i 3 - 20% DK.

**Slika 65** Grafikon intervala poverenja fizičko mehaničkih karakteristika po DK

#### 6.2.4.2 ANALIZA RAZLIKA IZMEĐU DK U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

U ovom poglavlju će se dokazati ili odbaciti tvrdnja da postoji značajna razlika između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 41** Značajnost razlike između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike

analiza	n	F	p
<b>MANOVA</b>	3	8.809	0.000
<b>diskriminativna</b>	3	9.978	0.000

Na osnovu vrednosti  $p = 0.000$  (analize MANOVA) i  $p = 0.000$  (diskriminativne analize), odbacuje se hipoteza  $H_1$  i hipoteza  $H_2$  i prihvata se alternativna hipoteza  $A_1$  kao i alternativna hipoteza  $A_2$ , to znači da postoji razlika i jasno definisana granica između DK.

**Tabela 42** Značajnost razlike između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	F	p	k.dsk
<b>SD</b>	29.705	0.000	0.574
<b>CS</b>	2.572	0.082	0.012
<b>ITS</b>	0.552	0.578	0.010

Legenda: k.dsk - koeficijent diskriminacije.

Kako je  $p < 0.1$  prihvata se alternativna hipoteza  $A_3$ , to znači da postoji značajna razlika između nekih DK kod: zapreminska masa (0.000), čvrstoća pri pritisku (0.082).

Kako je  $p > 0.1$  nema razloga da se ne prihvati hipoteza  $H_3$ , to znači da nije uočena značajna razlika između DK uzorka kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578).

Koeficijent diskriminacije upućuje da je najveći doprinos diskriminaciji između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike, odnosno da je razlika najveća, kod: zapreminska masa (0.574), čvrstoća pri pritisku (0.012), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.010).

Potrebno je napomenuti, da je latentno obeležje, obeležje po kojem nije utvrđena razlika između DK, a diskriminativna analiza ga je uključila u strukturu po kojoj postoji značajna razlika DK. Latentno obeležje je: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578).

#### 6.2.4.3 KARAKTERISTIKE I HOMOGENOST DK U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu dosadašnjih razmatranja i analize grupe od 87 uzoraka, u skladu sa primenjenom metodologijom, logički sled istraživanja je određivanje karakteristika i homogenosti svake DK podgrupe i distance između njih.

Činjenica da je  $p=0.000$ , diskriminativne analize, znači da postoji jasno definisana granica između DK podgrupa, odnosno moguće je odrediti karakteriske svake podgrupe DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 43** Karakteristike i homogenost DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	DK-1	DK-2	DK-3	dpr %
<b>SD</b>	veće* <sup>2</sup>	umerene* <sup>1</sup>	manje	96.309
<b>CS</b>	veće* <sup>1</sup>	umerene	manje	2.013
<b>ITS</b>	veće	umerene	manje	1.678
<b>n/m</b>	26/27	14/30	15/30	
<b>%</b>	96.30	46.67	50.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojstvo svakog DK najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 96.31% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (2.01%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (1.68%). Homogenost DK-1 je 96.30%, DK-2 je 46.67% i DK-3 je 50.00%.

Na osnovu izloženog može se reći da karakteristike 100% DK ima 26 od 27 uzorka, homogenost je 96.3% (veća), to znači da 1 uzorak ima druge karakteristike, a ne karakteristike svoje grupe, a karakteristike 50% DK ima 14 od 30 uzorka, homogenost je 46.7% (manja) jer 16 uzorka ima druge karakteristike, takođe karakteristike 20% DK ima 15 od 30 uzorka, homogenost je 50.0% (manja) jer 15 uzoraka ima druge karakteristike.

To znači, da uzorci čije su karakteristike slične karakteristikama 100% DK, a nepoznata je njihova pripadnost DK, može se očekivati sa pouzdanošću od 96.3% da pripadaju baš 100% DK, odnosno moguće je izvršiti prognozu sa određenom pouzdanošću.

Na osnovu uzorka fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da:

- **100% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*\*<sup>2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *veće*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*.
- **50% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.
- **20% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

**Tabela 44** Distanca (Mahalanobisova) između DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

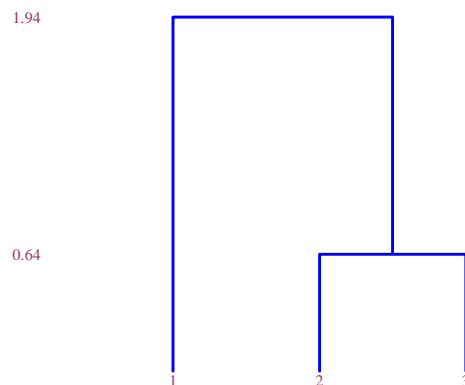
	DK-1	DK-2	DK-3
DK-1	0.00	1.45	2.03
DK-2	1.45	0.00	0.64
DK-3	2.03	0.64	0.00

Računanjem Mahalanobisove distance između DK dobija se još jedan pokazatelj sličnosti ili razlika. Distance različitih prostora mogu se upoređivati. Distance iz tabele ukazuju da je najmanje rastojanje između: 20% DK i 50% DK (0.64) (umerena) a najudaljenije su DK uzorci: 20% DK i 100% DK (2.03) (veća).

**Tabela 45** Grupisanje DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

nivo	bliskost
DK-2, DK-3	0.64
DK-1, DK-2	1.94

Na osnovu prikazanog dendrograma uočava se da su najbliže 50% DK i 20% DK sa distancom 0.64, a najveća razlika je između 100% DK i 50% DK, distanca 1.94.

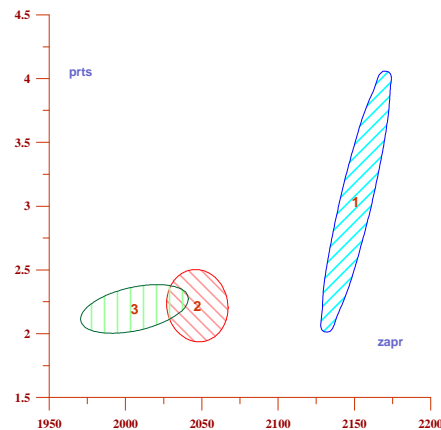


Legenda: 100% DK (1) 50% DK (2) 20% DK (3)

**Slika 66** Dendrogram analiziranih karakteristika

#### 6.2.4.4 GRAFIČKI PRIKAZ RAZLIKA IZMEĐU DK U ODNOSU NA TRI NAJDISKRIMINATIVNIJA OBELEŽJA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Na osnovu grafičkog prikaza elipsi (intervala poverenja) moguće je uočiti međusobni položaj i karakteristiku svake od 3 podgrupe DK (**100% DK (1) 50% DK (2) 20% DK (3)**), u odnosu na 3 najdiskriminativnija (obeležja) fizičko mehaničkih karakteristika i to: zapreminska masa (zapr), čvrstoća pri pritisku (prts), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

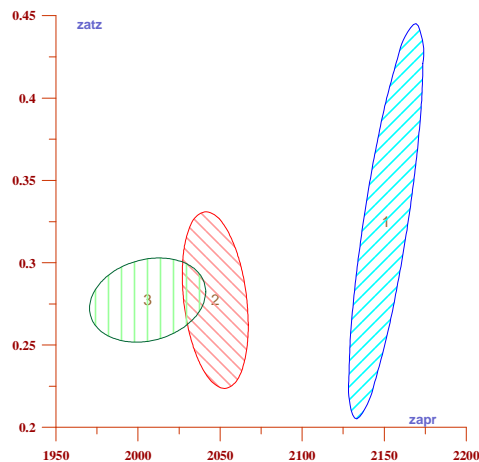


Legenda: 100% DK (1); 50% DK (2); 20% DK (3);; zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri pritisku (prts).

**Slika 67** Grafikon Elipse (intervala poverenja) DK kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminsku masu**, 20% DK (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1). U odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 20% DK (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1).

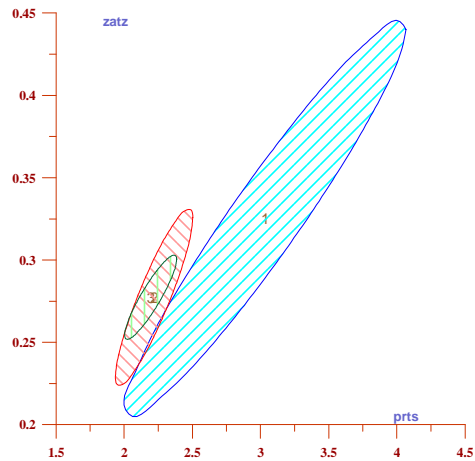


Legenda: 100% DK (1); 50% DK (2); 10% DK (3);; zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 68** Grafikon Elipse (intervala poverenja) DK kod zapreminska masa i čvrstoća pri indirektnom zatezanju

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminsku masu**, 20% DK (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 50% DK (2) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1).

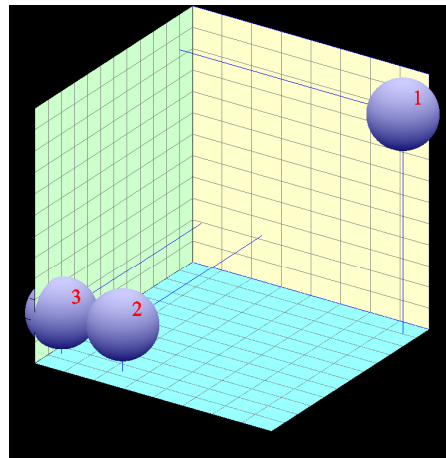


Legenda: 100% DK (1); 50% DK (2); 20% DK (3);; čvrstoća pri pritisku (prts); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 69** Grafikon elipse (intervala poverenja), DK uzorka kod čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 20% DK (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 50% DK (2) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 100% DK (1).



**Slika 70** 3D prikaz intervala poverenja za DK podgrupe.

## 6.2.5 ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE CEMENTA

U prvom delu biće prikazani centralni disperzioni i parametri, mere asimetrije i spljoštenosti u odnosu na praćene parametre. U drugom delu analiziraće se razlika između podgrupa cementa, odnosno dokazaće se ili odbaciti hipoteze, kako bi se procenili dobijeni rezultati i svrshodnost daljeg razmatranja, utvrdili pravci i metodološki prioriteti njihove obrade. Zatim će se, ako za to postoje uslovi, definisati karakteristike i homogenost svake podgrupe cementa, odrediti distanca između njih. Na kraju će se dobijeni rezultati grafički prikazati.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 5 podgrupa u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće cementa**:

- 2% cement, Oznaka podgrupe CMNT-1, 18 komada uzoraka u podgrupi,
- 3% cement, Oznaka podgrupe CMNT-2, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 4% cement, Oznaka podgrupe CMNT-3, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 5% cement, Oznaka podgrupe CMNT-4, 9 komada uzoraka u podgrupi,
- 6% cement, Oznaka podgrupe CMNT-5, 6 komada uzoraka u podgrupi,

Analiza će se sprovesti na sledećim fizičko mehaničkim karakteristikama: zapreminska masa (Specimen Density [ $\text{kg/m}^3$ ] – **SD**), čvrstoća pri pritisku (Compressive Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **CS**), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **ITS**).

### 6.2.5.1 OSNOVNI PARAMETRI FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE CEMENTA

Centralni i disperzioni parametri, mere asimetrije i spljoštenosti praćenih obeležja fizičko mehaničkih karakteristika reprezentuju učešće cementa i usmeravaju na mogućnost primene parametrijskih postupaka.

**Tabela 45** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 2% cement (18)

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2083.51	29.91	2021.4	2140.2	1.44	2068.63	2098.39	-.28	-0.33	0.991
<b>CS</b>	1.36	0.42	0.5	1.9	30.82	1.15	1.57	-0.51	-1.08	0.849
<b>ITS</b>	0.14	0.05	0.1	0.2	37.72	0.11	0.17	0.24	-1.34	0.699

*Napomena vrednosti asimetrije i spljoštenosti u intervalu od -0.04 do 0.04 nisu diskutovane.*

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika 2% cement ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 2% cement po: čvrstoća pri pritisku (CS) (30.82), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (37.72). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (1.44). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.24). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.28), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.51). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-.33), čvrstoća pri pritisku (CS) (-1.08), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-1.34). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne

raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.99), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.85), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.70).

**Tabela 46** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 3% cement (27)

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2062.88	93.95	1857.2	2221.1	4.55	2025.71	2100.05	-0.59	0.28	0.246
<b>CS</b>	2.05	0.79	1.2	4.1	38.30	1.74	2.36	1.41	1.34	0.269
<b>ITS</b>	0.22	0.08	0.1	0.4	36.30	0.19	0.25	1.07	0.32	0.106

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika 3% cement ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 3% cement po: čvrstoća pri pritisku (CS) (38.30), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (36.30). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (4.55). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (1.41), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.07). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.59). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: zapreminska masa (SD) (0.28), čvrstoća pri pritisku (CS) (1.34), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (.32). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.25), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.27), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.11).

**Tabela 47** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 4% cement (27)

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2082.76	98.35	1878.3	2256.6	4.72	2043.84	2121.67	-0.54	-0.11	0.516
<b>CS</b>	2.71	1.40	1.4	6.9	51.77	2.15	3.26	2.12	3.38	0.015
<b>ITS</b>	0.32	0.11	0.2	0.6	35.59	0.27	0.36	1.67	2.51	0.069

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 4% cement ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 4% cement po: čvrstoća pri pritisku (CS) (51.77), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (35.59). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (4.72). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (2.12), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.67). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.54). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (3.38), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (2.51). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-0.11). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.52). Distribucija vrednosti odstupa od normalne raspodele (p) kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.01), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.07).



**Tabela 48** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 5% cement (9)

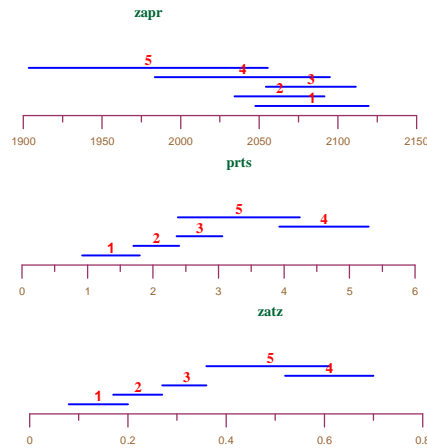
	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2039.32	146.37	1887.2	2229.9	7.18	1926.79	2151.87	0.47	-1.50	0.490
<b>CS</b>	4.61	3.03	2.2	9.3	65.72	2.28	6.94	0.73	-1.37	0.155
<b>ITS</b>	0.61	0.35	0.3	1.2	57.55	0.34	0.88	0.65	-1.28	0.303

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 5% cement ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 5% cement po: čvrstoća pri pritisku (CS) (65.72), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (57.55). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (7.18). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (0.47), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.73), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.65). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.50), čvrstoća pri pritisku (CS) (-1.37), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-1.28). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.49), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.16), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.30).

**Tabela 49** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 6% cement (6)

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	1979.36	72.40	1912.6	2078.6	3.66	1903.36	2055.36	0.23	-1.64	0.612
<b>CS</b>	3.31	0.88	2.5	4.8	26.68	2.38	4.24	0.83	-0.57	0.841
<b>ITS</b>	0.49	0.12	0.4	0.6	24.28	0.36	0.61	0.11	-1.73	0.717

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika za 6% cement ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost za 6% cement po: čvrstoća pri pritisku (CS) (26.68), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (24.28). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (3.66). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (0.23), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.83), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.11). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.64), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.57), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-1.73). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.61), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.84), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.72).



Legenda: 1 - 2% cement, 2 - 3% cement, 3 - 4% cement, 4 - 5% cement i 5 - 6% cement.  
**Slika 71** Grafikon Interval poverenja fizičko mehaničkih karakteristika po učešću cementa.

### 6.2.6 ANALIZA RAZLIKA UČEŠĆA CEMENTA U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

U ovom poglavlju će se dokazati ili odbaciti tvrdnja da postoji značajna razlika između cement uzoraka, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 50** Značajnost razlike između učešća cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike

analiza	n	F	p
<b>MANOVA</b>	3	10.969	0.000
<b>diskriminativna</b>	3	15.777	0.000

Na osnovu vrednosti  $p = 0.000$  (analize MANOVA) i  $p = 0.000$  (diskriminativne analize), odbacuje se hipoteza  $H_1$  i hipoteza  $H_2$  i prihvata se alternativna hipoteza  $A_1$  kao i alternativna hipoteza  $A_2$ , to znači da postoji razlika i jasno definisana granica između cement podgrupa.

**Tabela 51** Značajnost razlike između cement uzoraka u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	F	p	k.dsk
<b>SD</b>	1.913	0.116	0.946
<b>CS</b>	10.284	0.000	0.052
<b>ITS</b>	21.828	0.000	1.742

Legenda: k.dsk - koeficijent diskriminacije

Kako je  $p < 0.1$  prihvata se alternativna hipoteza  $A_3$ , to znači da postoji značajna razlika između nekih cement kod: čvrstoća pri pritisku (0.000) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.000).

Kako je  $p > 0.1$  nema razloga da se ne prihvati hipoteza  $H_3$ , to znači da nije uočena značajna razlika između cement podgrupa kod: zapreminska masa (0.116).

Koeficijent diskriminacije upućuje da je najveći doprinos diskriminaciji između cement pogrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike, odnosno da je razlika najveća, kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (1.742), zapreminska masa (0.946), čvrstoća pri pritisku (0.052).

Potrebno je napomenuti, da je latentno obeležje, obeležje po kojem nije utvrđena razlika između cementa, a diskriminativna analiza ga je uključila u strukturu po kojoj postoji značajna razlika cementa. Latentno obeležje je: zapreminska masa (0.116).

#### 6.2.6.1 KARAKTERISTIKE I HOMOGENOST CEMENT PODGRUPA U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu dosadašnjih razmatranja i analize uzorka od 87 uzoraka, u skladu sa primenjenom metodologijom, logički sled istraživanja je određivanje karakteristika i homogenosti svake cement podgrupe i distance između njih.

Činjenica da je  $p = 0.000$ , kod diskriminativne analize, znači da postoji jasno definisana granica između cement uzoraka, odnosno moguće je odrediti karakteriske svake cement podgrupe u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 52** Karakteristike i homogenost cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	CMNT-1	CMNT-2	CMNT-3	CMNT-4	CMNT-5	dpr %
<b>ITS</b>	najmanje	manje* <sup>1</sup>	umerene* <sup>2</sup>	najveće* <sup>3</sup>	veće* <sup>3</sup>	63.577
<b>SD</b>	najveće* <sup>1</sup>	umerene* <sup>1</sup>	veće* <sup>1</sup>	manje	najmanje	34.526
<b>CS</b>	najmanje	manje* <sup>1</sup>	umerene* <sup>2</sup>	najveće* <sup>3</sup>	veće* <sup>2</sup>	1.898
<b>n/m</b>	15/18	19/27	19/27	8/9	6/6	
<b>%</b>	83.33	70.37	70.37	88.89	100.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojstvo svakog subuzorka cementa najviše definiše čvrstoća pri indirektnom zatezanju jer je doprinos obeležja karakteristikama 63.58% zatim slede: zapreminska masa (34.53%) i čvrstoća pri pritisku (1.90%). Homogenost, CMNT-1 je 83.33%, CMNT-2 je 70.37%, CMNT-3 je 70.37%, CMNT-4 je 88.89% i CMNT-5 je 100.00%.

Na osnovu izloženog može se reći da karakteristike 2% cement ima 15 od 18 uzorka, homogenost je 83.3% (veća), to znači da 3 uzorka ima druge karakteristike a ne karakteristike svoje grupe, a karakteristike 3% cement ima 19 od 27 uzorka, homogenost je 70.4% (veća) jer 8 uzorka ima druge karakteristike, karakteristike 4% cement ima 19 od 27 uzorka, homogenost je 70.4% (veća) jer 8 uzorka ima druge karakteristike, a karakteristike 5% cement ima 8 od 9 uzorka, homogenost je 88.9% (veća) jer 1 uzorak ima druge karakteristike, takođe karakteristike 6% cement ima 6 od 6 uzorka, homogenost je 100.0% (veća) jer 0 uzoraka ima druge karakteristike.

To znači, da uzorak čije su karakteristike slične karakteristikama 2% cement, a nepoznata je njihova pripadnost grupi cement uzorka, može se očekivati sa pouzdanošću od 83.3% da pripadaju baš 2% cement, odnosno moguće je izvršiti prognozu sa određenom pouzdanošću.

Na osnovu fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da su:

- **2% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *najmanje*, za zapreminska masa je *najveće\*<sup>1</sup>*, za čvrstoća pri pritisku je *najmanje*.
- **3% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje\*<sup>1</sup>*, za zapreminska masa je *umerene\*<sup>1</sup>*, za čvrstoća pri pritisku je *manje\*<sup>1</sup>*.

- **4% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*<sup>\*2</sup>, za zapreminska masa je *veće*<sup>\*1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*<sup>\*2</sup>.
- **5% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *najveće*<sup>\*3</sup>, za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *najveće*<sup>\*3</sup>.
- **6% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*<sup>\*3</sup>, za zapreminska masa je *najmanje*, za čvrstoća pri pritisku je *veće*<sup>\*2</sup>.

**Tabela 53** Distanca (Mahalanobisova) između cement uzorka u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

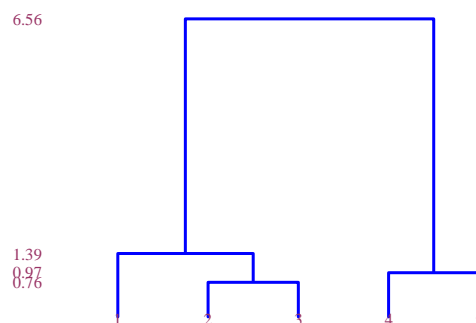
	CMNT-1	CMNT-2	CMNT-3	CMNT-4	CMNT-5
CMNT-1	0.00	1.01	1.64	4.75	4.34
CMNT-2	1.01	0.00	0.76	3.83	3.46
CMNT-3	1.64	0.76	0.00	3.14	2.84
CMNT-4	4.75	3.83	3.14	0.00	0.97
CMNT-5	4.34	3.46	2.84	0.97	0.00

Računanjem Mahalanobisove distance između cement uzoraka dobija se još jedan pokazatelj sličnosti ili razlika. Distance različitih prostora mogu se upoređivati. Distance iz tabele ukazuju da je najmanje rastojanje između: 4% cement i 3% cement (0.76) (umerena) a najudaljenije su za 5% cement i 2% cement (4.75) (veća).

**Tabela 54** Grupisanje cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

nivo	bliskost
CMNT-2,CMNT-3	0.76
CMNT-4,CMNT-5	0.97
CMNT-1,CMNT-2	1.39
CMNT-1,CMNT-4	6.56

Na osnovu prikazanog dendrograma uočava se da su najbliže 3% cement i 4% cement sa distancom 0.76, a najveća razlika je između 2% cement i 5% cement, distanca 6.56.

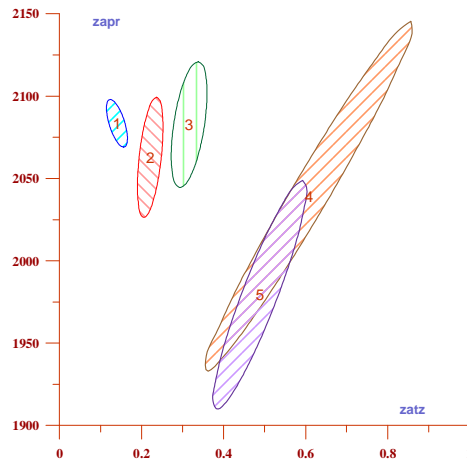


Legenda: 0% cement (1) 3% cement (2) 4% cement (3) 5% cement (4) 6% cement (5)

**Slika 72** Dendrogram analiziranih karakteristika

### 6.2.6.2 GRAFIČKI PRIKAZ RAZLIKA IZMEĐU PODGRUPA CEMENTA U ODNOSU NA 3 NAJDISKRIMINATIVNIJA OBELEŽJA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Na osnovu grafičkog prikaza elipsi (intervala poverenja) moguće je uočiti međusobni položaj i karakteristiku svake od 5 cement podgrupa u odnosu na 3 najdiskriminativnija (obeležja) fizičko mehaničkih karakteristika i to: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz), zapreminska masa (zapr), čvrstoća pri pritisku (prts).

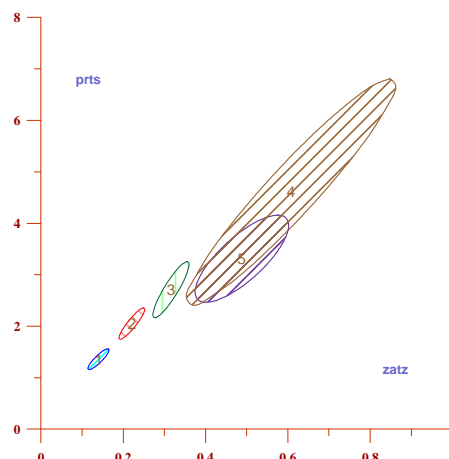


Legenda: 0% cement (1); 3% cement (2); 4% cement (3); 5% cement (4); 6% cement (5);; čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz); zapreminska masa (zapr).

**Slika 74** Grafikon elipse (intervala poverenja), cement podgrupa za čvrstoća pri indirektnom zatezanju i zapreminska masa.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz), a ordinata (vertikalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 2% cement (1) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 5% cement (4). U odnosu na **zapreminska masa**, 6% cement (5) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 2% cement (1).

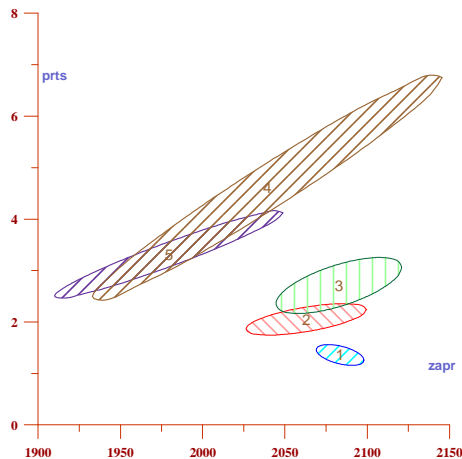


Legenda: 2% cement (1); 3% cement (2); 4% cement (3); 5% cement (4); 6% cement (5);; čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz); čvrstoća pri pritisku (prts).

**Slika 75** Grafikon elipse (intervala poverenja), cement uzoraka kod čvrstoća pri indirektnom zatezanju i čvrstoća pri pritisku

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 2% cement (1) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 5% cement (4). U odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 2% cement (1) ima najmanju, a najveću vrednost 5% cement (4).

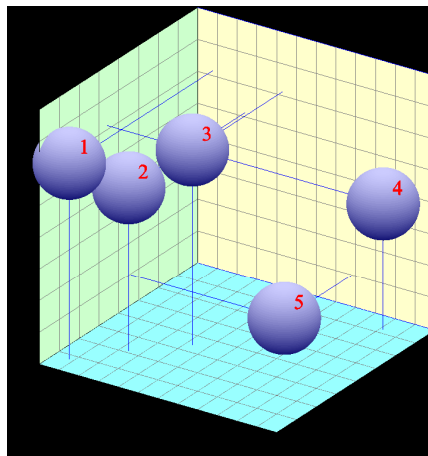


Legenda: 2% cement (1); 3% cement (2); 4% cement (3); 5% cement (4); 6% cement (5);; zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri pritisku (prts).

**Slika 76** Grafikon elipse (intervala poverenja), cement uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminska masa**, 6% cement (5) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 2% cement (1). U odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 2% cement (1) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 5% cement (4).



**Slika 77** 3D prikaz intervala poverenja za cement podgrupe

## 6.2.7 ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE RAP-A

U prvom delu biće prikazani centralni disperzioni i parametri, mere asimetrije i spljoštenosti u odnosu na praćene parametre. U drugom delu analiziraće se razlika između podgrupa RAP-a, odnosno dokazaće se ili odbaciti hipoteze, kako bi se procenili dobijeni rezultati i svrshodnost daljeg razmatranja, utvrdili pravci i metodološki prioriteti njihove obrade. Zatim će se, ako za to postoje uslovi, definisati karakteristike i homogenost svake podgrupe RAP-a, odrediti distanca između njih. Na kraju će se dobijeni rezultati grafički prikazati.

Grupa od 87 uzoraka je podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće struganog asfalta RAP-a:**

- 0% RAP, Oznaka podgrupe RAP-1, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 50% DK, Oznaka podgrupe RAP-2, 30 komada uzoraka u podgrupi,
- 80% DK, Oznaka podgrupe RAP-3, 30 komada uzoraka u podgrupi.

Analiza će se sprovesti na sledećim fizičko mehaničkim karakteristikama: zapreminska masa (Specimen Density [ $\text{kg/m}^3$ ] – **SD**), čvrstoća pri pritisku (Compressive Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **CS**), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **ITS**).

### 6.2.7.1 OSNOVNI PARAMETRI FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE RAP-A

Centralni i disperzioni parametri, mere asimetrije i spljoštenosti praćenih obeležja fizičko mehaničkih karakteristika reprezentuju učešće RAP-a i usmeravaju na mogućnost primene parametrijskih postupaka.

**Tabela 55** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 0% RAP (27).

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2151.01	58.17	2089.9	2256.6	2.70	2127.99	2174.03	0.58	-1.37	0.132
<b>CS</b>	3.04	2.66	0.5	9.3	87.57	1.98	4.09	1.17	-0.02	0.049
<b>ITS</b>	0.32	0.31	0.1	1.2	95.10	0.20	0.45	1.55	1.33	0.048

Napomena vrednosti asimetrije i spljoštenosti u intervalu od -0.04 do 0.04 nisu diskutovane.

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika 0% RAP ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 0% RAP po: čvrstoća pri pritisku (CS) (87.57), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (95.10). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (2.70). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (.58), čvrstoća pri pritisku (CS) (1.17), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.55). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.33). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.37). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.13). Distribucija vrednosti odstupa od normalne raspodele (p) kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.05), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.05).

**Tabela 56** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika za 50% RAP (30).

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2047.05	54.80	1927.7	2140.2	2.68	2026.58	2067.52	-0.53	-0.41	0.686
<b>CS</b>	2.22	0.77	1.4	4.8	34.76	1.93	2.51	1.60	2.75	0.233
<b>ITS</b>	0.28	0.15	0.1	0.6	52.65	0.22	0.33	1.06	0.10	0.284

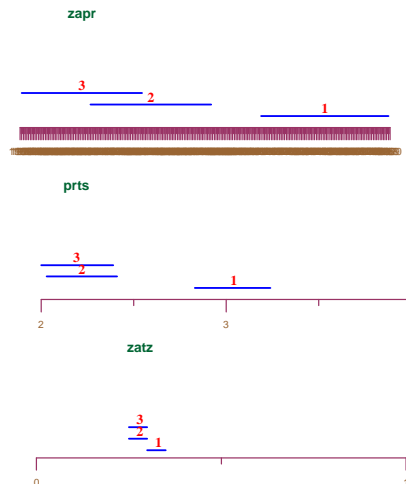
**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika 50% RAP ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 50% RAP po: čvrstoća pri pritisku (CS) (34.76), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (52.65). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (2.68). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (1.60), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.06). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.53). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (2.75), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.10). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-0.41). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.69), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.23), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.28).

**Tabela 57** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 80% RAP (30).

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2005.89	96.35	1857.2	2146.8	4.80	1969.90	2041.88	-0.26	-1.59	0.096
<b>CS</b>	2.19	.52	1.2	3.0	23.70	2.00	2.39	-0.07	-1.05	0.958
<b>ITS</b>	0.28	0.07	0.2	0.4	25.12	0.25	0.30	-0.05	-1.19	0.951

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 80% RAP ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 80% RAP po: čvrstoća pri pritisku (CS) (23.70), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (25.12). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (4.80). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.26), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.07). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.59), čvrstoća pri pritisku (CS) (-1.05), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-1.19). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.96), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.95). Distribucija vrednosti odstupa od normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.10).





Legenda: 1 - 0% RAP, 2 - 50% RAP i 3 - 80% RAP.

**Slika 78** Grafikon intervala poverenja fizičko mehaničkih karakteristika uzorka za podgrupe RAP-a.

#### 6.2.7.2 ANALIZA RAZLIKA IZMEĐU RAP PODGRUPA U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

U ovom poglavlju će se dokazati ili odbaciti tvrdnja da postoji značajna razlika između RAP podgrupa, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 58** Značajnost razlike između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

analiza	n	F	p
MANOVA	3	8.809	0.000
diskriminativna	3	9.978	0.000

Na osnovu vrednosti  $p = 0.000$  (analize MANOVA) i  $p = 0.000$  (diskriminativne analize), odbacuje se hipoteza  $H_1$  i hipoteza  $H_2$  i prihvata se alternativna hipoteza  $A_1$  kao i alternativna hipoteza  $A_2$ , to znači da postoji razlika i jasno definisana granica između RAP podgrupa.

**Tabela 59** Značajnost razlike između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	F	p	k.dsk
SD	29.705	0.000	0.574
CS	2.572	0.082	0.012
ITS	0.552	0.578	0.010

Legenda: k.dsk - koeficijent diskriminacije.

Kako je  $p < 0.1$  prihvata se alternativna hipoteza  $A_3$ , to znači da postoji značajna razlika između nekih RAP podgrupa kod: zapreminska masa (0.000), čvrstoća pri pritisku (0.082). Kako je  $p > 0.1$  nema razloga da se ne prihvati hipoteza  $H_3$ , to znači da nije uočena značajna razlika između RAP podgrupa kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578).

Koeficijent diskriminacije upućuje da je najveći doprinos diskriminaciji između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike, odnosno da je razlika najveća, kod:

zapreminska masa (0.574), čvrstoća pri pritisku (0.012), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.010).

Potrebno je napomenuti, da je latentno obeležje, obeležje po kojem nije utvrđena razlika između podgrupa RAP-a, a diskriminativna analiza ga je uključila u strukturu po kojoj postoji značajna razlika podgrupa RAP-a. Latentno obeležje je: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578).

### 6.2.7.3 KARAKTERISTIKE I HOMOGENOST RAP PODGRUPA U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu dosadašnjih razmatranja i analize uzorka od 87 uzoraka, u skladu sa primenjenom metodologijom, logički sled istraživanja je određivanje karakteristika i homogenosti svake podgrupa RAP i distance između njih.

Činjenica da je  $p=0.000$ , diskriminativne analize, znači da postoji jasno definisana granica između RAP podgrupe, odnosno moguće je odrediti karakteristike svake RAP podgrupe u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 60** Karakteristike i homogenost RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	RAP-1	RAP-2	RAP-3	dpr %
SD	veće* <sup>2</sup>	umerene* <sup>1</sup>	manje	96.309
CS	veće* <sup>1</sup>	umerene	manje	2.013
ITS	veće	umerene	manje	1.678
n/m	26/27	14/30	15/30	
%	96.30	46.67	50.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojstvo svakog RAP-a najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 96.31% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (2.01%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (1.68%). Homogenost, RAP-1 je 96.30%, RAP-2 je 46.67% i RAP-3 je 50.00%.

Na osnovu izloženog može se reći da karakteristike 0% RAP ima 26 od 27 uzorka, homogenost je 96.3% (veća), to znači da 1 uzorka ima druge karakteristike, a ne karakteristike svoje grupe, a karakteristike 50% RAP ima 14 od 30 uzorka, homogenost je 46.7% (manja) jer 16 uzorka ima druge karakteristike, takođe karakteristike 80% RAP ima 15 od 30 uzorka, homogenost je 50.0% (manja) jer 15 uzorka ima druge karakteristike.

To znači, da uzorci čije su karakteristike slične karakteristikama 0% RAP, a nepoznata je njihova pripadnost RAP, može se očekivati sa pouzdanošću od 96.3% da pripadaju baš 0% RAP, odnosno moguće je izvršiti prognozu sa određenom pouzdanošću.

Na osnovu fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da su:

- **0% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*\*<sup>2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *veće*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*.
- **50% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.
- **80% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

**Tabela 61** Distanca (Mahalanobisova) između RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

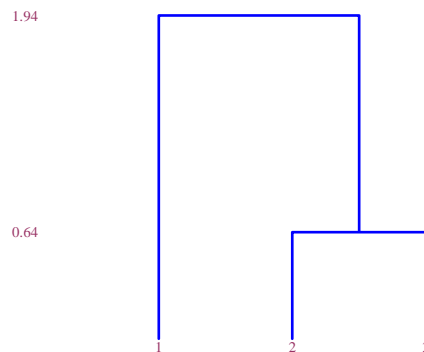
	RAP-1	RAP-2	RAP-3
RAP-1	0.00	1.45	2.03
RAP-2	1.45	0.00	0.64
RAP-3	2.03	0.64	0.00

Računanjem Mahalanobisove distance između RAP podgrupa dobija se još jedan pokazatelj sličnosti ili razlika. Distance različitih prostora mogu se upoređivati. Distance iz tabele ukazuju da je najmanje rastojanje između 80% RAP i 50% RAP (0.64) (umerena), a najudaljenije su 80% RAP i 0% RAP (2.03) (veća).

**Tabela 62** Grupisanje RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

nivo	bliskost
RAP-2,RAP-3	0.64
RAP-1,RAP-2	1.94

Na osnovu prikazanog dendrograma uočava se da su najbliže 50% RAP i 80% RAP sa distancom 0.64, a najveća razlika je između 0% RAP i 50% RAP, distanca 1.94.

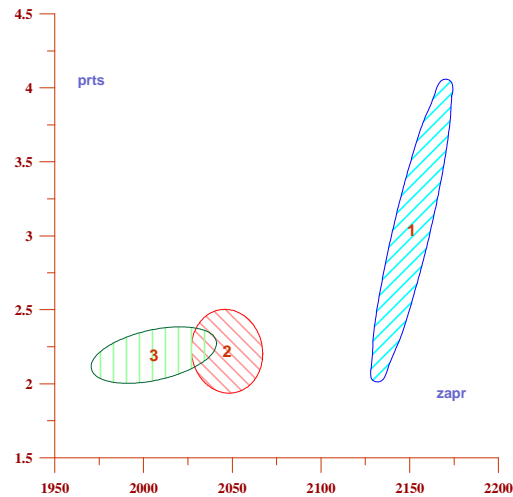


Legenda: 0% RAP (1) 50% RAP (2) 80% RAP (3)

**Slika 79** Dendrogram analiziranih karakteristika

#### 6.2.7.4 GRAFIČKI PRIKAZ RAZLIKA IZMEĐU RAP PODGRUPA U ODNOSU NA 3 NAJDISKRIMINATIVNIJE FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu grafičkog prikaza elipsi (intervala poverenja) moguće je uočiti međusobni položaj i karakteristiku svake od 3 podgrupe RAP-a (**0% RAP (1) 50% RAP (2) 80% RAP (3)**), u odnosu na 3 najdiskriminativnija (obeležja) fizičko mehaničkih karakteristika i to: zapreminska masa (zapr), čvrstoća pri pritisku (prts), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

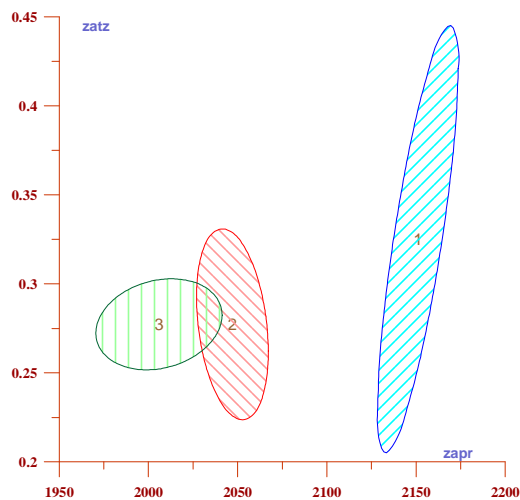


Legenda: 0% RAP (1); 50% RAP (2); 80% RAP (3); zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri pritisku (prts).

**Slika 80** Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminska masa**, 80% RAP (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1). U odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 80% RAP (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1).

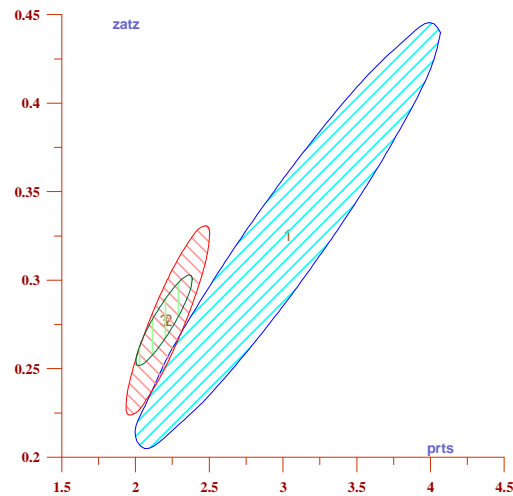


Legenda: 0% RAP (1); 50% RAP (2); 80% RAP (3); zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 81** Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod zapreminska masa i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminska masa**, 80% RAP (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 50% RAP (2) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1).

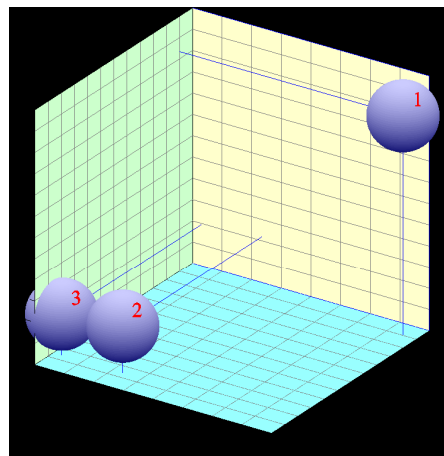


Legenda: 0% RAP (1); 50% RAP (2); 80% RAP (3);; čvrstoća pri pritisku (prts); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 82** Grafikon elipse (intervala poverenja), RAP uzoraka kod čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri indirektnom zatezanju.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **čvrstoća pri pritisku**, 80% RAP (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 50% RAP (2) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% RAP (1).



**Slika 83** 3D prikaz intervala poverenja za RAP podgrupe.

## 6.2.8 ANALIZA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE BITUMENSKE EMULZIJE

U prvom delu biće prikazani centralni disperzioni i parametri, mere asimetrije i spljoštenosti u odnosu na praćene parametre. U drugom delu analiziraće se razlika između podgrupa bitumenske emulzije, odnosno dokazaće se ili odbaciti hipoteze, kako bi se procenili dobijeni rezultati i svrsishodnost daljeg razmatranja, utvrdili pravci i metodološki prioriteti njihove obrade. Zatim će se, ako za to postoje uslovi, definisati karakteristike i homogenost svake podgrupe bitumenske emulzije, odrediti distanca između njih. Na kraju će se dobijeni rezultati grafički prikazati.

Grupa od 87 uzoraka podeljena u 3 podgrupe u odnosu na kriterijum: **procentualno učešće bitumenske emulzije**:

- 0% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-1, 33 komada uzoraka u podgrupi,
- 3,5% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-2, 27 komada uzoraka u podgrupi,
- 5,5% bitumenske emulzije, Oznaka podgrupe bit-3, 27 komada uzoraka u podgrupi.

Analiza će se sprovesti na sledećim fizičko mehaničkim karakteristikama: zapreminska masa (Specimen Density [ $\text{kg/m}^3$ ] – **SD**), čvrstoća pri pritisku (Compressive Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **CS**), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength [ $\text{N/mm}^2$ ] – **ITS**).

### 6.2.8.1 OSNOVNI PARAMETRI FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA U ODNOSU NA UČEŠĆE BITUMENSKE EMULZIJE

Centralni i disperzioni parametri, mere asimetrije i spljoštenosti praćenih obeležja fizičko mehaničkih karakteristika reprezentuju grupe bitumenske emulzije i usmeravaju na mogućnost primene parametrijskih postupaka.

**Tabela 63** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika podgrupe 0% bit em (33)

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2021.66	138.41	1857.2	2256.6	6.85	1972.57	2070.75	.63	-1.19	0.192
<b>CS</b>	3.42	2.19	1.2	9.3	64.01	2.64	4.20	1.37	0.82	0.109
<b>ITS</b>	0.43	0.25	0.2	1.2	58.97	0.34	0.51	1.44	1.76	0.422

Napomena vrednosti asimetrije i spljoštenosti u intervalu od -0.04 do 0.04 nisu diskutovane.

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika podgrupe 0% bit em ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 0% bit em po: čvrstoća pri pritisku (CS) (64.01), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (58.97). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (6.85). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (0.63), čvrstoća pri pritisku (CS) (1.37), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.44). Veće vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva izdužena, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.82), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (1.76). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.19). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.19), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.11), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.42).

**Tabela 64** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika uzorka 3.5% bit em (27).

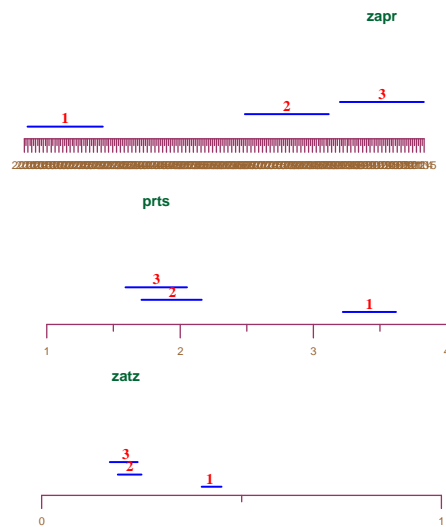
	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2079.33	25.64	2021.4	2117.8	1.23	2069.19	2089.48	-0.21	-0.71	0.822
<b>CS</b>	1.94	0.64	0.8	3.0	32.92	1.68	2.19	0.07	-0.79	0.920
<b>ITS</b>	0.22	0.08	0.1	0.4	38.60	0.18	0.25	0.01	-0.98	0.656

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika podgrupe 3.5% bit em ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 3.5% bit em po: čvrstoća pri pritisku (CS) (32.92), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (38.60). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (1.23). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (0.07). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (-0.21). Vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da raspodela nije asimetrična kod: čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.01). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-0.71), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.79), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-0.98). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.82), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.92), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.66).

**Tabela 65** Centralni i disperzioni parametri i mere asimetrije i spljoštenosti fizičko mehaničkih karakteristika 5.5% bit em (27).

	sr.vr	std.d	min	maks	k.var	interv.pov.	sk	ku	p	
<b>SD</b>	2104.02	27.53	2066.9	2147.4	1.31	2093.13	2114.92	0.16	-1.41	0.575
<b>CS</b>	1.82	0.57	0.5	2.8	31.29	1.60	2.05	-0.23	-0.43	0.950
<b>ITS</b>	0.20	0.08	0.1	0.3	38.93	0.17	0.24	0.19	-0.99	0.784

**Minimalne** (min) i **maksimalne** (maks) vrednosti fizičko mehaničkih karakteristika podgrupe 5.5% bit em ukazuju da se vrednosti nalaze u očekivanom rasponu. Veće vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na heterogenost 5.5% bit em po: čvrstoća pri pritisku (CS) (31.29), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (38.93). Vrednosti **koeficijenta varijacije** (k.var) ukazuju na homogenost obeležja zapreminska masa (SD) (1.31). Povećane vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *negativno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka većim vrednostima, odnosno da ima više većih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: zapreminska masa (SD) (0.16), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.19). Smanjene vrednosti **Skjunisa** (sk) ukazuju da je raspodela *pozitivno asimetrična*, to znači da kriva raspodele rezultata naginje ka manjim vrednostima, odnosno da ima više manjih vrednosti u odnosu na normalnu raspodelu, kod: čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.23). Negativne vrednosti **Kurtozisa** (ku) ukazuju da je kriva spljoštena, kod: zapreminska masa (SD) (-1.41), čvrstoća pri pritisku (CS) (-0.43), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (-0.99). Distribucija vrednosti uglavnom se kreće u okviru normalne raspodele (p) kod: zapreminska masa (SD) (0.57), čvrstoća pri pritisku (CS) (0.95), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITS) (0.78).



Legenda: 1 – 0% bit em, 2 - 3.5% bit em i 3 - 5.5% bit em.

**Slika 84** Grafikon interval poverenja fizičko mehaničkih karakteristika uzorka po učešću bitumenske emulzije.

#### 6.2.8.2 ANALIZA RAZLIKA IZMEĐU RAZLIČITIH UČEŠĆA BITUMENSKE EMULZIJE U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

U ovom poglavlju će se dokazati ili odbaciti tvrdnja da postoji značajna razlika između podgrupa sa različitim učešćem bitumenske emulzije, u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 66** Značajnost razlike između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

analiza	n	F	p
MANOVA	3	20.244	0.000
diskriminativna	3	27.216	0.000

Na osnovu vrednosti  $p = 0.000$  (analize MANOVA) i  $p = 0.000$  (diskriminativne analize), odbacije se hipoteza  $H_1$  i hipoteza  $H_2$  i prihvata se alternativna hipoteza  $A_1$  kao i alternativna hipoteza  $A_2$ , to znači da postoji razlika i jasno definisana granica između podgrupa bitumenske emulzije.

**Tabela 67** Značajnost razlike između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	F	p	k.dsk
SD	7.022	0.002	1.612
CS	11.926	0.000	0.598
ITS	16.649	0.000	0.013

Legenda: k.dsk - koeficijent diskriminacije.



Kako je  $p < 0.1$  prihvata se alternativna hipoteza  $A_3$ , to znači da postoji značajna razlika između nekih podgrupa bitumenske emulzije kod: zapreminska masa (0.002), čvrstoća pri pritisku (0.000) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.000).

Koeficijent diskriminacije upućuje da je najveći doprinos diskriminaciji između uzoraka bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike, odnosno da je razlika najveća, kod: zapreminska masa (1.612), čvrstoća pri pritisku (0.598), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.013).

#### 6.2.8.3 KARAKTERISTIKE I HOMOGENOST PODGRUPA BITUMENSKE EMULZIJE U ODNOSU NA FIZIČKO MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu dosadašnjih razmatranja i analize grupe od 87 uzorka, u skladu sa primenjenom metodologijom, logički sled istraživanja je određivanje karakteristika i homogenosti svake bitumenska emulzija uzorka i distance između njih.

Činjenica da je  $p = 0.000$  kod diskriminativne analize, znači da postoji jasno definisana granica između podgrupa bitumenske emulzije, odnosno moguće je odrediti karakteriske svake podgrupe bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

**Tabela 68** Karakteristike i homogenost podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	bit-1	bit-2	bit-3	dpr %
SD	manje	umerene* <sup>1</sup>	veće* <sup>2</sup>	72.515
CS	veće* <sup>2</sup>	umerene	manje	26.901
ITS	veće* <sup>2</sup>	umerene	manje	0.585
n/m	30/33	18/27	24/27	
%	90.91	66.67	88.89	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama

Svojstvo svake podgrupe bitumenske emulzije najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 72.51% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (26.90%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (.58%). Homogenost, bit-1 je 90.91%, bit-2 je 66.67% i bit-3 je 88.89%.

Na osnovu izloženog može se reći da karakteristike 0% bit em ima 30 od 33 uzorka, homogenost je 90.9% (veća), to znači da 3 uzorka ima druge karakteristike a ne karakteristike svoje grupe, a karakteristike 3.5% bit em ima 18 od 27 uzorka, homogenost je 66.7% (veća) jer 9 uzoraka ima druge karakteristike, takođe karakteristike 5.5% bit em ima 24 od 27 uzorka, homogenost je 88.9% (veća) jer 3 uzorka imaju druge karakteristike.

To znači, da uzorci čije su karakteristike slične karakteristikama 0% bit em, a nepoznata je njihova pripadnost uzorku bitumenske emulzije, može se očekivati sa pouzdanošću od 90.9% da pripadaju baš 0% bit em, odnosno moguće je izvršiti prognozu sa određenom pouzdanošću.

Na osnovu uzorka fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da:

- **0% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *veće\*<sup>2</sup>*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće\*<sup>2</sup>*.
- **3.5% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene\*<sup>1</sup>*, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.

- **5.5% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*<sup>\*</sup> <sup>2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

**Tabela 69** Distanca (Mahalanobisova) između podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

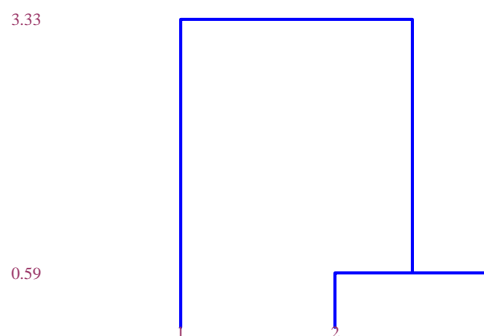
	<b>bit-1</b>	<b>bit-2</b>	<b>bit-3</b>
<b>bit-1</b>	0.00	2.56	3.11
<b>bit-2</b>	2.56	0.00	0.59
<b>bit-3</b>	3.11	0.59	0.00

Računanjem Mahalanobisove distance između podgrupa bitumenske emulzije dobija se još jedan pokazatelj sličnosti ili razlika. Distance različitih prostora mogu se upoređivati. Distance iz tabele ukazuju da je najmanje rastojanje između: 5.5% bit em i 3.5% bit em (0.59) (umerena), a najudaljenije su: 5.5% bit em i 0% bit em (3.11) (veća).

**Tabela 70** Grupisanje podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

<b>nivo</b>	<b>bliskost</b>
<b>bit-2, bit-3</b>	0.59
<b>bit-1, bit-2</b>	3.33

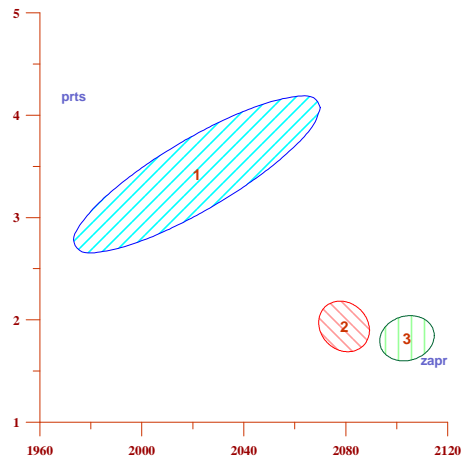
Na osnovu prikazanog dendrograma uočava se da su najbliže 3.5% bit em i 5.5% bit em sa distancom 0.59, a najveća razlika je između 0% bit em i 3.5% bit em, distanca 3.33.



Legenda: 0 bit em (1) 3.5 bit em (2) 5.5 bit em (3)  
**Slika 85** Dendrogram analiziranih karakteristika

#### 6.2.8.4 GRAFIČKI PRIKAZ RAZLIKA IZMEĐU PODGRUPA BITUMENSKE EMULZIJE U ODNOSU NA TRI NAJDISKRIMINATIVNIJA OBELEŽJA FIZIČKO MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

Na osnovu grafičkog prikaza elipsi (intervala poverenja) moguće je uočiti međusobni položaj i karakteristiku svake od 3 podgrupe bitumenske emulzije (**0% bit em (1)** **3.5% bit em (2)**, **5.5% bit em (3)**), u odnosu na 3 najdiskriminativnija obeležja fizičko mehaničkih karakteristika: zapreminska masa (zapr), čvrstoća pri pritisku (prts), čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

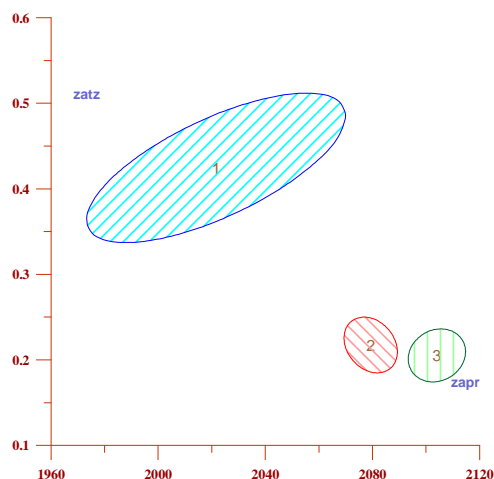


Legenda: 0 bit em (1); 3.5 bit em (2); 5.5 bit em (3);; zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri pritisku (prts).

**Slika 86** Grafikon elipse (intervala poverenja), podgrupa bitumenske emulzije za zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminsku masu**, 0% bit em (1) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 5.5% bit em (3). U odnosu na **čvrstoću pri pritisku**, 5.5% bit em (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% bit em (1).

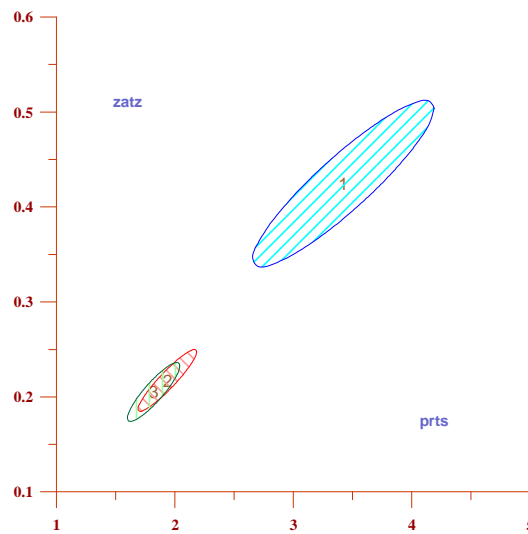


Legenda: 0 bit em (1); 3.5 bit em (2); 5.5 bit em (3);; zapreminska masa (zapr); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 87** Grafikon elipse (intervala poverenja), uzoiraka bitumenske emulzije kod zapreminske mase i čvrstoće pri indirektnom zatezanju.

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] (zapr), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **zapreminsku masu**, 0% bit em (1) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 5.5% bit em (3). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 5.5% bit em (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% bit em (1).

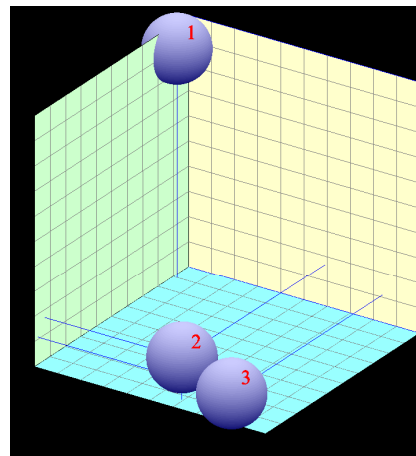


Legenda: 0 bit em (1); 3.5 bit em (2); 5.5 bit em (3);; čvrstoća pri pritisku (prts); čvrstoća pri indirektnom zatezanju (zatz).

**Slika 88** Grafikon elipse (intervala poverenja), uzoraka bitumenske emulzije kod čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri indirektnom zatezanju

Na grafikonu apscisa (horizontalna osa) je čvrstoća pri pritisku [ $\text{N/mm}^2$ ] (prts), a ordinata (vertikalna osa) je čvrstoća pri indirektnom zatezanju [ $\text{N/mm}^2$ ] (zatz).

Moguće je zapaziti da u odnosu na **čvrstoću pri pritisku**, 5.5% bit em (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% bit em (1). U odnosu na **čvrstoća pri indirektnom zatezanju**, 5.5% bit em (3) ima najmanju vrednost, a najveću vrednost 0% bit em (1).



**Slika 89** 3D prikaz intervala poverenja za podgrupe btiumenske emulzije.

## 6.2.9 ZAVRŠNA RAZMATRANJA

Celokupno istraživanje sprovedeno je za četiri kriterijuma – učešće DK, RAP-a, cementa i bitumenske emulzije. Analizirana je razlika između učešća DK, između učešća RAP, između učešća bitumenske emulzije i između učešća cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

U prvom delu ovog poglavlja je dat skraćeni pregled dobijenih rezultata u primenjenim postupcima. Zatim je prikazana tabela doprinosa celine karakteristikama svake podgrupe. Potrebno je napomenuti da što je veća diskriminacija – razlika između podgrupa to su karakteristike svake podgrupe izraženije. Za svaku podgrupu je dat procenat doprinosa (%), koji pokazuje koliko posmatrana celina definiše karakteristike grupe u odnosu na ostale. Zatim je dat pregled karakteristika sa homogenošću svake podgrupe u odnosu meru diskriminacije i stepen izvedenih karakteristika od najvišeg ka najnižem stepenu.

Kod četiri kriterijuma je utvrđena razlika i jasno definisana granica, između učešća DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike; između učešća cementa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike; između učešća RAP-a u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike; između učešća bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike:

- 1) Utvrđena je razlika između učešća DK (0.000) u odnosu na **fizičko mehaničke karakteristike**, kod zapreminska masa (0.000), kod čvrstoća pri pritisku (0.082). Nije utvrđena razlika čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578). Egzistencija granice (0.000) je potvrđena za zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri indirektnom zatezanju. Postoji latentna razlika kod čvrstoće pri indirektnom zatezanju (0.578).
- 2) Utvrđena je razlika između učešća cementa (0.000) u odnosu na **fizičko mehaničke karakteristike**, kod čvrstoća pri pritisku (0.000), kod čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.000). Nije utvrđena razlika kod zapreminske mase (0.116). Egzistencija granice (0.000) je potvrđena za čvrstoća pri indirektnom zatezanju, zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku. Postoji latentna razlika kod: zapreminske mase (0.116).
- 3) Utvrđena je razlika između učešća RAP-a (0.000) u odnosu na **fizičko mehaničke karakteristike**, kod zapreminska masa (0.000), kod čvrstoća pri pritisku (0.082). Nije utvrđena razlika čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.578). Egzistencija granice (0.000) je potvrđena za zapreminsku masu, čvrstoću pri pritisku, čvrstoću pri indirektnom zatezanju. Postoji latentna razlika kod čvrstoće pri indirektnom zatezanju (0.578).
- 4) Utvrđena je razlika između učešća bitumenske emulzije (0.000) u odnosu na **fizičko mehaničke karakteristike**, kod zapreminska masa (0.005), kod čvrstoća pri pritisku (0.000), kod čvrstoća pri indirektnom zatezanju (0.000). Egzistencija granice (0.000) je potvrđena za čvrstoću pri indirektnom zatezanju, zapreminsku masu i čvrstoću pri pritisku.

Povezivanje celokupnog istraživanja u jednu logičku hierarhijski uređenu celinu je značajno, a i u ovom slučaju je moguće. Doprinos prostora karakteristikama i doprinos obeležja karakteristikama unutar celine su veličine koje jasno određuju hierarhiju između celina i redosled važnosti obeležja.

**Tabela 71** Doprinos prostora karakteristikama.

rang	doprinos %	kod	između
1	46.277	fizičko mehaničkih karakteristika	<b>cement</b>
2	26.311	fizičko mehaničkih karakteristika	<b>bitumenska emulzija</b>
3	13.706	fizičko mehaničkih karakteristika	<b>DK</b>
3	13.706	fizičko mehaničkih karakteristika	<b>RAP</b>

Na osnovu procentualnog doprinosa prostora karakteristikama grupa, uočava se da je najveći doprinos (46.28%) učešća cementa na fizičko mehaničke karakteristike. To znači da su osobine, karakteristike podgrupa jasno izražene, a distanca između podgrupa je veća u odnosu na ostale distance, zatim sledi: doprinos učešća bitumenske emulzije na fizičko mehaničke karakteristike je 26.311%, pa zatim: doprinos učešća RAP-a na fizičko mehaničke karakteristike je 13.706% i doprinos učešća DK-a na fizičko mehaničke karakteristike je 13.706%

**Sumarni prikaz karakteristika je dat prema rangu doprinosa po istraživanim kriterijumima:**

**Učešće Cementa:**

Kako je kod **fizičko mehaničkih karakteristika**, jasno definisana granica između nekih učešća cementa moguće je odrediti njihove karakteristike.

**Tabela 72** Karakteristike i homogenost cement podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	CMNT-1	CMNT-2	CMNT-3	CMNT-4	CMNT-5	dpr %
<b>ITS</b>	najmanje	manje* <sup>1</sup>	umerene* <sup>2</sup>	najveće* <sup>3</sup>	veće* <sup>3</sup>	63.577
<b>SD</b>	najveće* <sup>1</sup>	umerene* <sup>1</sup>	veće* <sup>1</sup>	manje	najmanje	34.526
<b>CS</b>	najmanje	manje* <sup>1</sup>	umerene* <sup>2</sup>	najveće* <sup>3</sup>	veće* <sup>2</sup>	1.898
<b>n/m</b>	15/18	19/27	19/27	8/9	6/6	
<b>hmg %</b>	83.33	70.37	70.37	88.89	100.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojtvo svakog subuzorka cementa najviše definiše čvrstoća pri indirektnom zatezanju jer je doprinos obeležja karakteristikama 63.58% zatim slede: zapreminska masa (34.53%) i čvrstoća pri pritisku (1.90%). Homogenost, CMNT-1 je 83.33%, CMNT-2 je 70.37%, CMNT-3 je 70.37%, CMNT-4 je 88.89% i CMNT-5 je 100.00%.

Na osnovu fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da su:

- **2% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *najmanje*, za zapreminska masa je *najveće\*<sup>1</sup>*, za čvrstoća pri pritisku je *najmanje*.
- **3% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje\*<sup>1</sup>*, za zapreminska masa je *umerene\*<sup>1</sup>*, za čvrstoća pri pritisku je *manje\*<sup>1</sup>*.

- **4% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*<sup>\*2</sup>, za zapreminska masa je *veće*<sup>\*1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*<sup>\*2</sup>.
- **5% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *najveće*<sup>\*3</sup>, za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *najveće*<sup>\*3</sup>.
- **6% cement** ima sledeća svojstva: za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*<sup>\*3</sup>, za zapreminska masa je *najmanje*, za čvrstoća pri pritisku je *veće*<sup>\*2</sup>.

### Učešće Bitumenske emulzije:

Kako je kod **fizičko mehaničkih karakteristika**, jasno definisana granica između nekih učešća bitumenskih emulzija moguće je odrediti njihove karakteristike.

**Tabela 73** Karakteristike i homogenost podgrupa bitumenske emulzije u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	bit-1	bit-2	bit-3	dpr %
SD	manje	umerene <sup>*1</sup>	veće <sup>*2</sup>	72.515
CS	veće <sup>*2</sup>	umerene	manje	26.901
ITS	veće <sup>*2</sup>	umerene	manje	0.585
n/m	30/33	18/27	24/27	
hmg %	90.91	66.67	88.89	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama

Svojstvo svake podgrupe bitumenske emulzije najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 72.51% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (26.90%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (.58%). Homogenost, bit-1 je 90.91%, bit-2 je 66.67% i bit-3 je 88.89%.

Na osnovu uzorka fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da:

- **0% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *veće*<sup>\*2</sup>, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*<sup>\*2</sup>.
- **3.5% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene*<sup>\*1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.
- **5.5% bit em** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*<sup>\*2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

### Učešće DK:

Kako je kod **fizičko mehaničkih karakteristika** jasno definisana granica između nekih učešća DK moguće je odrediti njihove karakteristike.

**Tabela 74** Karakteristike i homogenost DK u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	DK-1	DK-2	DK-3	dpr %
<b>SD</b>	veće* <sup>2</sup>	umerene* <sup>1</sup>	manje	96.309
<b>CS</b>	veće* <sup>1</sup>	umerene	manje	2.013
<b>ITS</b>	veće	umerene	manje	1.678
<b>n/m</b>	26/27	14/30	15/30	
<b>hmg %</b>	96.30	46.67	50.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojstvo svakog DK najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 96.31% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (2.01%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (1.68%). Homogenost DK-1 je 96.30%, DK-2 je 46.67% i DK-3 je 50.00%.

Na osnovu fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da:

- **100% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*\*<sup>2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *veće*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*.
- **50% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.
- **20% DK** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

#### Učešće RAP-a:

Kako je kod **uzorka fizičko mehaničkih karakteristika**, jasno definisana granica između nekih podgrupa RAP-a moguće je odrediti njihove karakteristike.

**Tabela 75** Karakteristike i homogenost RAP podgrupa u odnosu na fizičko mehaničke karakteristike.

	RAP-1	RAP-2	RAP-3	dpr %
<b>SD</b>	veće* <sup>2</sup>	umerene* <sup>1</sup>	manje	96.309
<b>CS</b>	veće* <sup>1</sup>	umerene	manje	2.013
<b>ITS</b>	veće	umerene	manje	1.678
<b>n/m</b>	26/27	14/30	15/30	
<b>%</b>	96.30	46.67	50.00	

Legenda: hmg - homogenost; dpr % - doprinos obeležja karakteristikama.

Svojstvo svakog RAP-a najviše definiše zapreminska masa jer je doprinos obeležja karakteristikama 96.31% zatim slede: čvrstoća pri pritisku (2.01%) i čvrstoća pri indirektnom zatezanju (1.68%). Homogenost, RAP-1 je 96.30%, RAP-2 je 46.67% i RAP-3 je 50.00%.

Na osnovu fizičko mehaničkih karakteristika može se reći da su:

- **0% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *veće*\*<sup>2</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *veće*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *veće*.
- **50% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *umerene*\*<sup>1</sup>, za čvrstoća pri pritisku je *umerene*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *umerene*.



- **80% RAP** ima sledeća svojstva: za zapreminska masa je *manje*, za čvrstoća pri pritisku je *manje*, za čvrstoća pri indirektnom zatezanju je *manje*.

### **6.3 PARCIJALNI ZAKLJUČCI I DISKUSIJA REZULTATA PRVOG DELA EKSPERIMENTA**

Imajući u vidu završna razmatranja navedena u prethodnom poglavlju u ovom poglavlju prikazana je diskusija rezultata prvog dela eksperimenta u odnosu na primenjene vrste veziva i učešća komponentnih materijala.

#### **Vezivo Cement:**

Za iste sadržaje cementa kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti Pritisne čvrstoće:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 30 – 45% (prosečno 37%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 27 – 35% (prosečno 30%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 66 – 92% (prosečno 79%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina sa 50% RAP-a.

Za iste sadržaje cementa kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti ITS-a:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a ITS iznosi 44 – 55% (prosečno 47%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 28 – 45% (prosečno 38%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 64 – 102% (prosečno 77%) od vrednosti ITS-a kod mešavina sa 50% RAP-a.

#### **Vezivo Cement i 3.5% bitumenska emulzija:**

Za iste sadržaje cementa i bitumenske emulzije kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti Pritisne čvrstoće:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 96 – 164% (prosečno 127%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 131 – 214% (prosečno 173%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 131 – 141% (prosečno 137%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina sa 50% RAP-a.

Za iste sadržaje cementa i bitumenske emulzije kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti ITS-a:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a ITS iznosi 116 – 165% (prosečno 134%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 149 – 260% (prosečno 199%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 128 – 158% (prosečno 147%) od vrednosti ITS-s kod mešavina sa 50% RAP-a.

### **Vezivo Cement i 5.5% bitumenska emulzija:**

Za iste sadržaje cementa i bitumenske emulzije kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti Pritisne čvrstoće:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 141 – 200% (prosečno 168%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 156 – 207% (prosečno 174%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a pritisne čvrstoće iznose 95 – 114% (prosečno 104%) od vrednosti pritisne čvrstoće kod mešavina sa 50% RAP-a.

Za iste sadržaje cementa i bitumenske emulzije kao veziva, porastom učešća RAP-a dobijeni su sledeći međusobni odnosi vrednosti ITS-a:

- Kod mešavina sa 50% RAP-a ITS iznosi 146 – 163% (prosečno 153%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 168 – 242% (prosečno 203%) od vrednosti ITS-a kod mešavina bez RAP-a.
- Kod mešavina sa 80% RAP-a ITS iznosi 114 – 148% (prosečno 132%) od vrednosti ITS-a kod mešavina sa 50% RAP-a.

### **Parcijalni zaključak:**

- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa** vrednosti pritisnih čvrstoća iznose tek **37% i 30%** vrednosti pritisne čvrstoće mešavina bez RAP-a.
- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa** vrednosti ITS-a iznose tek **47% i 38%** vrednosti ITS-a mešavina bez RAP-a.
- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa i 3.5% bitumenske emulzije** vrednosti pritisnih čvrstoća iznose čak **127% i 173%** vrednosti pritisne čvrstoće mešavina bez RAP-a.
- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa i 3.5% bitumenske emulzije** kao veziva vrednosti ITS-a iznose čak **134% i 199%** vrednosti ITS-a mešavina bez RAP-a.
- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa i 5.5% bitumenske emulzije** vrednosti pritisnih čvrstoća iznose čak **168% i 174%** vrednosti pritisne čvrstoće mešavina bez RAP-a.
- Sa porastom učešća RAP-a na **50% i 80%** za iste sadržaje **cementa i 5.5% bitumenske emulzije** kao veziva vrednosti ITS-a iznose čak **153% i 203%** vrednosti ITS-a mešavina bez RAP-a.

**Znači, sa porastom učešća RAP-a na 50% i više kod mešavina stabilizovanih cementom vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a opadaju za više od 50%.**

**Kod mešavina sa cementom i 3.5% bitumenske emulzije sa porastom učešća RAP-a na 50% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 30% dok kod učešća RAP-a od 80% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 75%.**

**Kod mešavina sa cementom i 5.5% bitumenske emulzije sa porastom učešća RAP-a na 50% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 50% dok kod učešća RAP-a od 80% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 75% (čak 100%).**

Objašnjenje za porast vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a kod mešavina sa povećanjem učešća RAP-a sa povećanjem dodate količine bitumenske emulzije se ogleda u činjenici da bitumenska emulzija aktivira odnosno rejuvinira ostareli bitumen iz RAP-a.

#### **6.4 USVOJENE OPTIMALNE MEŠAVINE ZA SPROVOĐENJE DRUGOG DELA EKSPERIMENTA**

Nakon izvršene sveobuhvatne analize statističke obrade rezultata i rezultata izvršeno je usvajanje optimalnih receptura za ispitivanje za sprovođenje ispitivanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika u drugom delu eksperimenta:

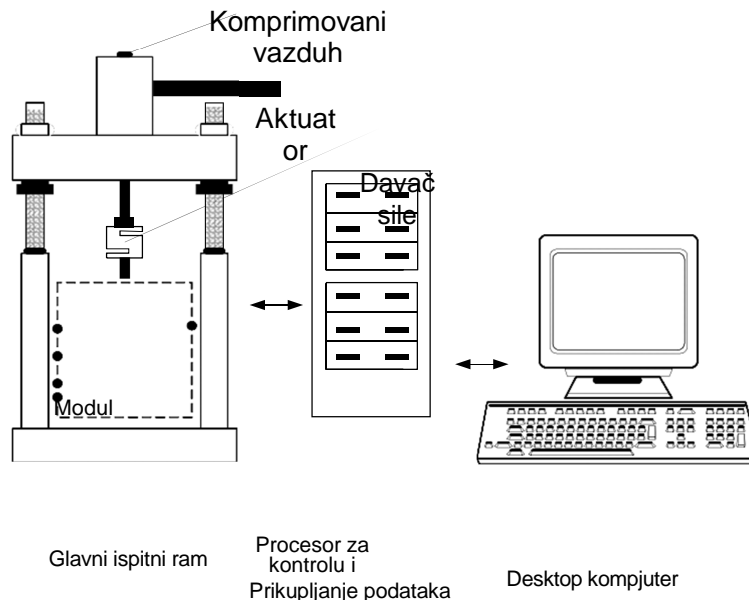
- **Mešavina 1** – 100% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 4% cement,
- **Mešavina 2** – 50% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 50% RAP, 5% cement,
- **Mešavina 3** – 20% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 80% RAP, 6% cement,
- **Mešavina 4** – 100% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 4% cement, 3.5 bitumenska emulzija,
- **Mešavina 5** – 50% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 50% RAP, 4% cement, 3.5 bitumenska emulzija,
- **Mešavina 6** – 20% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 80% RAP, 3% cement, 3.5 bitumenska emulzija.

## 6.5 DRUGI DEO EKSPERIMENTA – ISPITIVANJE FUNDAMENTALNIH MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA

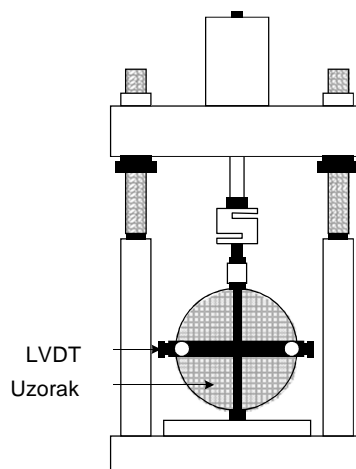
### 6.5.1 METODOLOGIJA ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ZAMOR

Ispitivanja zamora su izvršena na univerzalnom servo hidrauličkom uređaju za dinamička ispitivanja – IPC UTM 25 (Universal Testing Machine, IPC Global, Made in Australia, 25kN capacity) kapaciteta sile do 25kN sa dodatkom za dinamičko ITS ispitivanje zamora i modula – ITSM i ITF – prema SRPS EN 12697-24 na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije. Šematski prikaz rada uređaja je prikazan na sledećoj slici.

Ispitivanja otpornosti na zamor u ovoj doktorskoj disertaciji će se izvoditi prema standardu **SRPS EN 12697-24, Aneks E, Bitumenizirane mešavine – Ispitne metode za vrući asfalt – Deo 24: Otpornost na zamor** (*Annex E, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*).



Slika 90 Šematski prikaz ITS opreme



Slika 91 Šematski prikaz ispitnog modula – ITFT



**Slika 92** Oprema za ispitivanje zamora i modula ITSFT i ITSM na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Tehničke karakteristike uređaja za ispitivanje:

- Hidraulični kompresor,
- Kapacitet dinamičkog opterećenja  $\pm 25$  kN,
- Opseg pomeranja davača sile  $\pm 25$  mm,
- Opseg temperature klima komore od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $+ 60^{\circ}\text{C}$ ,
- Opseg komparatera LVDT za merenje horizontane deformacije  $\pm 1.875$  mm.

U primenjenom standardu SRPS EN 12697-24, Aneks E je definisan način ispitivanja cilindričnih uzoraka opterećenih ponovljenim indirektnim zatezanjem. Deformacija je merena u upravnoj odnosno horizontalnoj osi u odnosu na osu nanošenja sile.

Iako je standard specifično izrađen za vruće asfaltne mešavine, opcija za ispitivanje pri konstantnom naponu je posebno pogodna za materijale sa izraženim elastičnim reološkim karakteristikama.

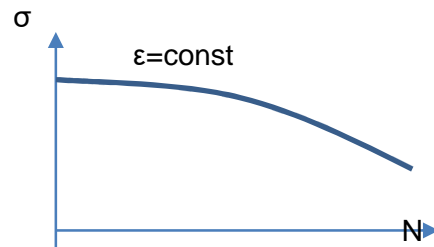
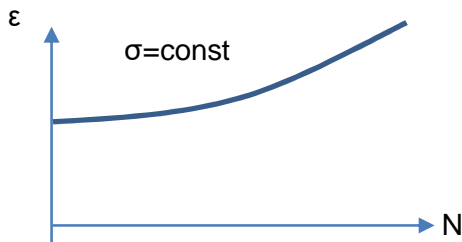
Prema metodologiji iz standarda pristupljeno je izvođenju opita u modu kontrolisanog napona (*Stress controlled mode*) odnosno nivo opterećenja je definisan preko nanošenja konstantne sile preko određenog poznatog preseka – održavanjem konstantnog napona, a deformacija je merena na upravnoj osi – dilatacija preko horizontalnog prečnika uzorka.

Ako se primeni konvencionalni način proračuna modula preko napona i dilatacije, nanošenjem konstantnog napona tokom opita akumulira se plastična deformacija na upravnoj osi uzorka i na taj način dolazi do gubitka nosivosti prilikom nanošenja ponovljenog opterećenja.

Na sledećem dijagramu su prikazani načini opterećenja ispitivanih uzoraka i promene karakterističnih reoloških parametara:

Za konvencionalni zapis proračuna modula krutosti:

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



Izbor za izvođenje ispitivanja u modu opita pri kontrolisanom naponu je donešen i na osnovu činjenice da materijal poseduje izrazito elastično ponašanje i da je očekivana deformacija manja nego kod konvencionalnih asfaltnih mešavina. Projektovani položaj sloja u okviru kolovozne konstrukcije (*na primer donji noseći vezani sloj*) takođe određuje način opterećenja uzoraka prilikom određivanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika.

Klima komora sa konstantnom cirkulacijom vazduha je sastavni deo instrumenta. Za praćenje deformacije korišćeni su LVDT komparateri opsega  $\pm 1,875\text{mm}$ .

Na uzorke su montirane čelične trake za fiksiranje (mounting strips) koje su pričvršćene za sam uzorak dvokomponentnim epoksi lepkom. Lepak omogućava i da se ispune eventualne šupljine na površini uzorka i tako ostvari bolji kontakt i samim tim dobije pouzdaniji rezultat ispitivanja. Vreme vezivanja epoksi lepka iznosi 1 sat i dodat je još jedan sat za stabilizaciju uzorka prilikom montiranja komparatera kao i vreme potrebno da se površina uzorka prosuši tako da je ukupno vreme od vađenja uzorka iz kesa do početka ispitivanja iznosilo oko 3 sata.

Uzorci su sve vreme do trenutka početka montiranja čeličnih traka i ispitivanja držani u kesama kako bi se omogućila adekvatna vlažnost odnosno nega i stabilnost uzoraka.

Merene su dimenzije uzoraka u šest položaja za debljinu i dva položaja za prečnik.

Zbog samog oblika instrumenta i uzimajući u obzir relativno visoke vrednosti dobijenih čvrstoća na indirektno zatezanje u prvom delu eksperimenta u odnosu na maksimalni kapacitet sile instrumenta uzorci su pripremljeni sa debljinom od 75mm. To je omogućilo odgovarajuće definisanje potrebne sile za opterećenje prilikom izvođenja dinamičkog opita.

Prosečna debljina uzorka se kretala od 70 do 75mm. Prečnik je iznosio 150mm.

Svi uzorci su kondicionirani na temperaturu merenja od 20°C minimum 4 sata pre početka opita, koja je primenjena za sve ispitivane mešavine. Na sledećim slikama su prikazani uzorci koji se pripremaju za ispitivanja i ispituju.

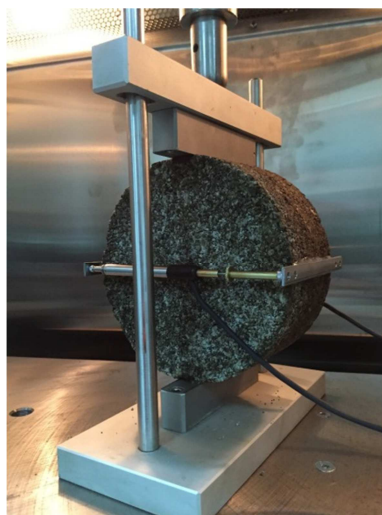


**Slika 93** Položaj uzorka u kalupu za montiranje traka.



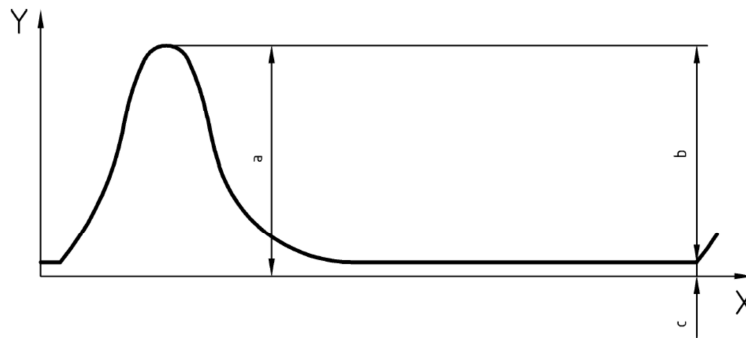
**Slika 94** Postupak kondicioniranja uzoraka u klima komori uređaja na temperaturu izvođenja opita.

Prilikom postavljanja uzorka u kalup za ispitivanje vođeno je računa o tome da osa položaja komparatera bude  $90 \pm 5^\circ$  u odnosu na osu nanošenja opterećenja.



**Slika 95** Položaj uzorka u instrumentu.

Opterećenje je nanošeno tzv. "Haversine" tipom signala, oblik signala je prikazan na sledećoj slici:



**Slika 96** Oblik "Haversine" tip signala

Prilikom ponavljajućih ciklusa opterećenja prilikom svakog rasterećenja održavan je konstantni kontaktni pritisak preko sile od 50N.

Ukupno vreme opterećenja je usvojeno u trajanju od 0,1 sekunde, dok je vreme ponavljanja ciklusa 0,5 sekundi odnosno frekvencija 2Hz.

### **Opis toka ispitivanja**

Da bi se konstruisale krive zakona zamora potrebno je odrediti vek zamora za uzorke na bar tri nivoa opterećenja. Broj ponavljanja koji dovodi do loma pri svakom nivou opterećenja treba da se kreće od 1.000 do 1.000.000 ciklusa. Iz praktičnih razloga, a i zbog prirode materijala izabrane su tri ciljne vrednosti za cikluse opterećenja: 1.000, 10.000 i 100.000.

Upoređivanjem ITS vrednosti dobijenim u prvom delu eksperimenta i korigovanjem za umanjenu debljinu uzorka iskustveno su odabrane sile za definisane nivoe opterećenja.

### **Kriterijum loma**

Konvencionalni kriterijum loma je definisan kao broj ponavljanja koji dovodi do promene karakteristične dinamičke reološke komponente za 50%.

U slučaju sprovođenja opita pri kontrolisanoj dilataciji ovaj kriterijum predstavlja umanjene napona za 50%.

**U slučaju sprovođenja opita u ovom radu pri kontrolisanom naponu ovaj kriterijum predstavlja uvećanje dilatacije zatezanja za 50%.**

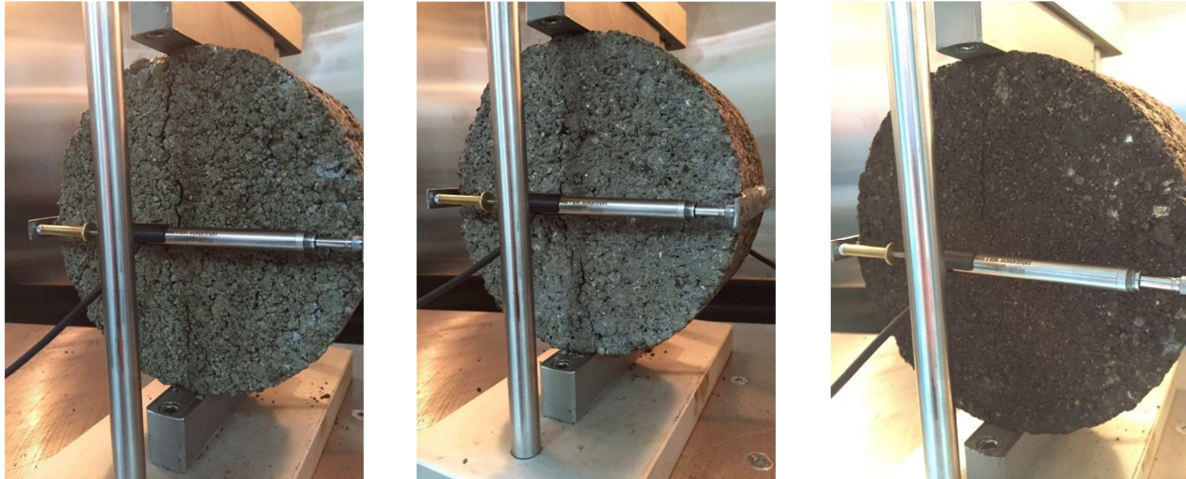
Takođe, zakon zamora može da se definiše preko takozvanog fracture life odnosno fizičkog loma uzorka pri ponovljenom opterećenju prema definisanom kriterijumu opterećenja.

Kako opit indirektnog zatezanja u svakom slučaju dovodi do izrazito plastične deformacije uzorka po upravnoj osi, bez obzira na odabrani nivo opterećenja, kao i da bi se izbegla očekivana odstupanja u pogledu ponovljivosti usled moguće i neizbežne nehomogenosti pripremljenih uzoraka ovaj kriterijum je izabran kao kriterijum za određivanje životnog veka pojedinačnih uzoraka u pogledu otpornosti na zamor.

Dodatno, potencijalni razlog za eventualnu neujednačenost kriterijuma se nalazi i u činjenici da je Poisson-ov koeficijent pretpostavljena, a nije izmerena vrednost tokom opita. Za mešavinu sa čistim hidrualičnim vezivom bez učešća RAP-a je usvojena vrednost 0,25, dok je za sve ostale mešavine usvojena vrednost 0,35.



U realnosti, Poisson-ov koeficijent menja vrednost tokom porasta plastične deformacije pa se logično nameće da se za kriterijum zamora usvoji fizički lom uzorka. Fizički lom se lako uočava kako na dijagramu promene deformacije tokom izvođenja opita, pojavljivanjem ubrzanog priraštaja deformacije kroz vreme, tako i fizički na samom uzorku pojavom izražene vertikalne pukotine na samom uzorku, tako da nije bilo potrebno dovoditi uzorak do potpunog raspada (*jer postoji rizik od oštećenja opreme za ispitivanje*), dovoljno je bilo uočiti karakterističnu pukotinu - lom po vertikalnoj osi.



**Slika 97** Nekoliko karakterističnih tipova započetih lomova uzoraka prilikom ispitivanja.

Za potrebe proračuna karakterističnih fundamentalnih mehaničkih karakteristika materijala korišćene su sledeće formule.

Napon za definisani nivo opterećenja je definisan kao:

$$\sigma = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times \Omega}$$

Dilatacija zatezanja pri definisanom nivou opterećenja je definisana kao:

$$\varepsilon = \left( \frac{2 \times \Delta H}{\Omega} \right) \times \left[ \frac{1 + 3 \times \nu}{4 + \pi \times \nu - \pi} \right]$$

Povratni modul (Modul Krutosti) za dato opterećenje i izmerenu deformaciju je definisan kao:

$$S_{mix} = \frac{\sigma_S}{\varepsilon_S} \times (1 + 3 \times \nu)$$

Zakon zamora za očitane vrednosti broja ponavljanja do loma i dilatacija zatezanja na karakterističnom 100-tom ciklusu je predstavljena preko sledeće formule:

$$\log(N_f) = k + n \times \log(\varepsilon_0)$$

$$N_f = k \times \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^n$$

Gde su:

- $\sigma$  napon od opterećenja (MPa)
- F sila (N)
- D debljina uzorka (mm)
- $\Omega$  prečnik uzorka (mm)
- $\Delta H$  deformacija ( $\mu\text{m}$ )
- $\mu$  Poisson-ov koeficijent (0,25 i 0,35)
- $\varepsilon_0$  karakteristična dilatacija pri 100-tom ciklusu ( $\mu\varepsilon$ )
- $N_f$  broj ponavljanja za izabrani kriterijum zamora
- k,n regresioni koeficijenti za potrebe proračuna zakona zamora, n predstavlja nagib krive zamora

Za ocenu podobnosti izabranog uzorka za definsanje zakonitosti zamora korišćen je statistički korelacioni koeficijent  $R^2$ . Ovaj koeficijent je prikazan samo kao globalna ocena podobnosti odabranog broja uzoraka odnosno pouzdanosti ispitivanja.

Kriva zamora je u bilogaritamskom obliku linearna, što znači da je logaritam dilatacije linearna funkcija logaritma broja ciklusa. Koeficijent **n** je nagib krive zamora i on ima vrednost blisku 5 za materijale vezane bitumenom dok kod cementnih stabilizacija on iznosi 12.

### Ispitivanje i rezultati ispitivanja

U sledećoj tabeli je prikazan planiran program opterećenja predstavljen preko opsega napona koji je predviđen za svaku mešavinu:

**Tabela 76** Planirani program nivoa opterećenja tokom ispitivanja (kPa)

oznaka	Mešavina 1	Mešavina 2	Mešavina 3	Mešavina 4	Mešavina 5	Mešavina 6
jedinica	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
opseg	350 - 450	200 - 300	200 - 300	175 - 250	150 - 250	125 - 200

Kako napon zavisi od geometrije uzorka, a radi lakšeg prikaza u sledećoj tabeli su predstavljeni nivoi primenjenih opterećenja, prikazana stavka u sledećoj tabeli "dodatno" se odnose na slučajeve kada je usled nehomogenosti uzoraka bilo potrebno ispitati još jednu kombinaciju opterećenja, preko primenjene sile:

**Tabela 77** Planirani program nivoa opterećenja tokom ispitivanja (N)

oznaka	Mešavina 1	Mešavina 2	Mešavina 3	Mešavina 4	Mešavina 5	Mešavina 6
jedinica	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
Nivo 1	8000	5000	4750	4500	4000	3250
Nivo 2	7000	4250	4250	4000	3750	2750
Nivo 3	6500	3900	4000	3500	3500	2500
Dodatno	5500	3500	-	-	3000	-

## 6.5.2 REZULTATI ISPITIVANJA – OTPORNOST NA ZAMOR PREMA EN 12697-24

Kao što je već prethodno navedeno, za drugi deo eksperimenta je pripremljeno ukupno 6 različitih optimalnih prethodnih mešavina x 9 uzoraka = 54 uzorka. Uzorci su pripremljeni na isti način kako je opisano za prvi deo eksperimenta, samo što je visina uzoraka zbog zahteva standarda SRPS EN 12697-24:AE i samog ispitnog uređaja smanjena na 75mm, dok je prečnik ostao isti d=150mm.

Na usvojenim optimalnim mešavinama sa određenim učešćima komponentnih materijala i veziva izvršeno je sprovođenje daljih ispitivanja otpornosti na zamor:

- **Mešavina 1** - 100% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 4% cement,
- **Mešavina 2** - 50% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 50% RAP, 5% cement,
- **Mešavina 3** - 20% drobljeni kameni agregat (10% DK 0/22mm + 10% DK 0/2mm), 80% RAP, 6% cement,
- **Mešavina 4** - 100% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 4% cement, 3.5 bitumenska emulzija,
- **Mešavina 5** - 50% drobljeni kameni agregat 0/22mm, 50% RAP, 4% cement, 3.5 bitumenska emulzija,
- **Mešavina 6** - 20% drobljeni kameni agregat (10% DK 0/22mm + 10% DK 0/2mm), 80% RAP, 3% cement, 3.5 bitumenska emulzija.

### 6.5.2.1 MEŠAVINA 1 – 100% DROBLJENI KAMENI AGREGAT SA 4% CEMENTA

**Tabela 78** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)						Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
183	74.5	75.1	75.0	74.8	75.2	75.2	75.0	0.2733
	150.2					150.4	150.3	0.1414
182	75.0	74.5	74.5	75.1	75.0	75.4	74.9	0.3545
	150.0					150.0	150.0	0.0000
181	74.5	74.4	75.0	75.0	75.6	75.3	75.0	0.4590
	150.0					150.0	150.0	0.0000
180	74.8	75.5	75	75.4	75.6	74.7	75.2	0.3830
	150					150	150.0	0.0000
179	74.2	73.9	73.9	74.7	74.1	74.4	74.2	0.3098
	150.0					150.0	150.0	0.0000
178	74.5	74.5	74.7	74.8	74.1	74.3	74.5	0.2563
	150.0					150.0	150.0	0.0000
177	75.0	75.4	75.1	74.5	74.8	74.6	74.9	0.3347
	150.0					150.0	150.0	0.0000
176	73.3	73.5	74.0	73.9	74.0	74.2	73.8	0.3430
	150.0					150.0	150.0	0.0000

**Tabela 79** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F (N)	$\sigma$ (Mpa)	$\mu$ (-)	$\Delta H$ (mm)	$\epsilon_0$ ( $\mu\epsilon$ )	$S_{mix}$ (Mpa)	N (-)
6,500.00	0.37	0.25	0.00225	31.87	20,154	213,891
7,000.00	0.40	0.25	0.00240	34.07	20,375	14,851
6,500.00	0.37	0.25	0.00257	36.48	17,645	139,651
5,500.00	0.31	0.25	0.00217	30.80	17,635	231,121
8,000.00	0.46	0.25	0.00377	53.51	14,964	2,061
8,000.00	0.46	0.25	0.00327	46.42	17,183	1,771
8,000.00	0.45	0.25	0.00326	46.27	17,143	2,261
7,000.00	0.40	0.25	0.00240	34.07	20,679	22,361

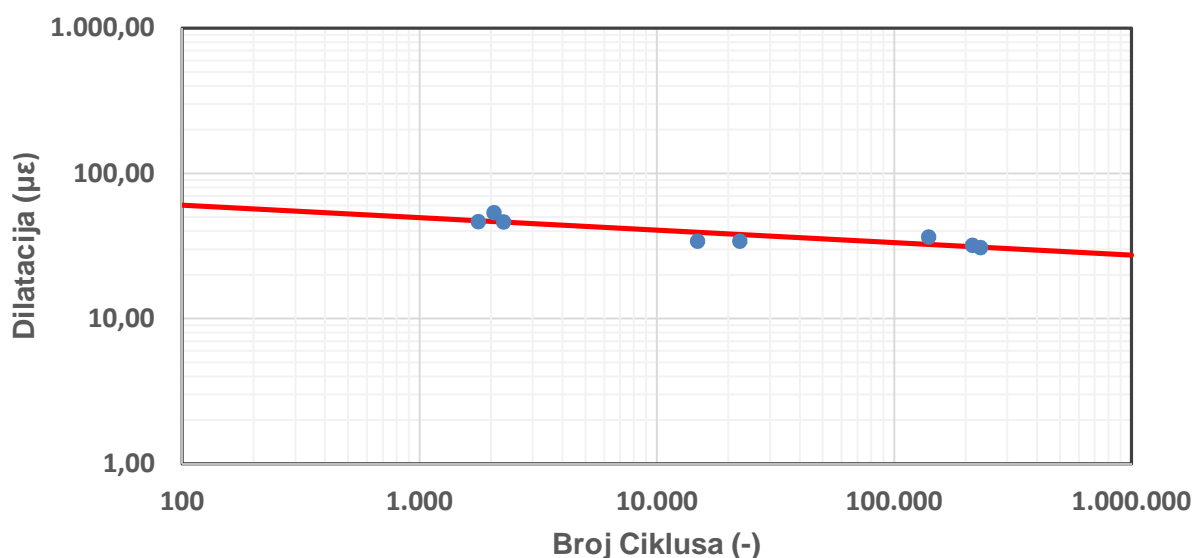
**Tabela 80** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	11.7	$r^2 = 0,777$
k	22.8	

**Tabela 81** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

N	logN	log $\epsilon$	$\epsilon$
100	2.00	1.780627	60.34
1,000	3.00	1.694958	49.54
10,000	4.00	1.609289	40.67
100,000	5.00	1.523620	33.39
1,000,000	6.00	1.437950	27.41

**Zakon Zamora - Mešavina 1 - 100% DK + 4% cement**



**Slika 98** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 1 – 100% drobljeni kameni agregat sa 4% cementa

6.5.2.2 MEŠAVINA 2 – 50% DROBLJENI KAMENI AGREGAT, 50% RAP SA 5% CEMENTA

**Tabela 82** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)						Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
191	74.9	74.5	75.0	75.1	75.2	74.9	74.9	0.2422
	150.2					150.4	150.3	0.1414
190	73.9	74.3	74.8	74.5	74.0	74.2	74.3	0.3312
	150.4					150.4	150.4	0.0000
189	74.4	74.5	74.8	75.3	75.0	74.9	74.8	0.3312
	150.2					150.4	150.3	0.1414
188	75	74.6	75.1	74.3	75.3	75	74.9	0.3656
	150.2					150.4	150.3	0.1414
187	74.3	74.6	74.9	75.0	75.1	75.0	74.8	0.3061
	150.0					150.0	150.0	0.0000
186	74.7	74.9	75.0	75.0	75.6	75.0	75.0	0.3011
	150.0					150.0	150.0	0.0000
185	75.1	75.0	74.5	74.8	75.0	75.1	74.9	0.2317
	150.0					150.0	150.0	0.0000
184	75.1	75.3	75.0	75.1	74.8	75.0	75.1	0.1643
	151.9					152.0	152.0	0.0707

**Tabela 83** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

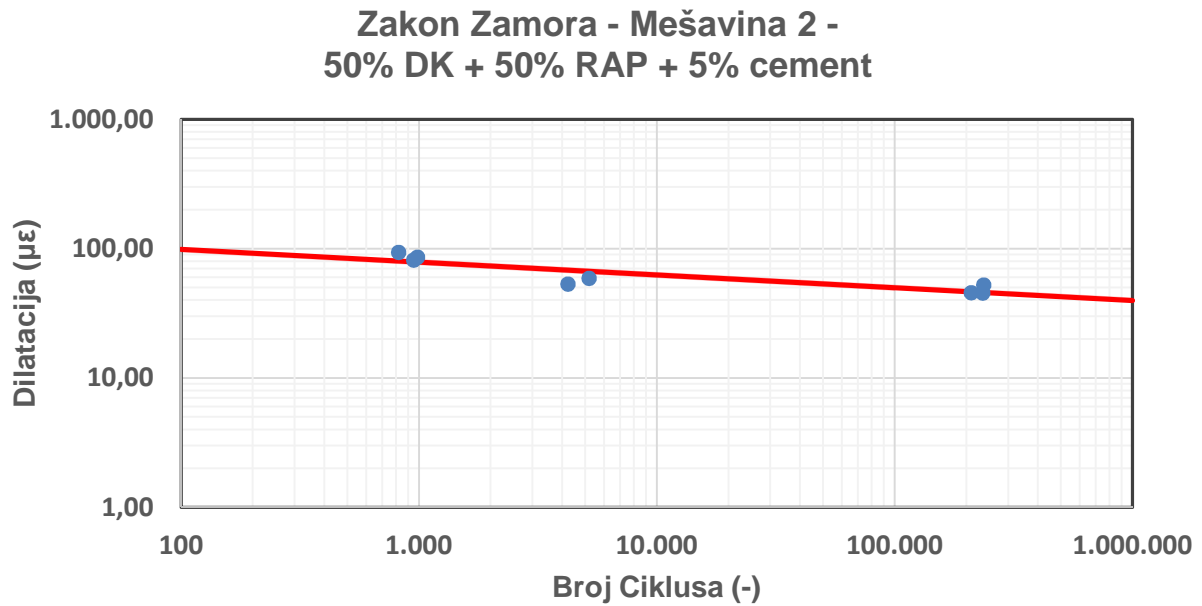
Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F	$\sigma$	$\mu$	$\Delta H$	$\epsilon_0$	S <sub>mix</sub>	N
(N)	(Mpa)	(-)	(mm)	( $\mu\epsilon$ )	(Mpa)	(-)
3,500	0.20	0.35	0.00325	45.28	8,961	234,731
4,000	0.23	0.35	0.00375	52.21	8,947	237,341
3,900	0.22	0.35	0.00328	45.70	9,907	209,821
4,250	0.24	0.35	0.00381	53.08	9,282	4,241
4,250	0.24	0.35	0.00421	58.77	8,411	5,201
5,000	0.28	0.35	0.00613	85.58	6,778	986
5,000	0.28	0.35	0.00583	81.39	7,136	951
5,000	0.29	0.35	0.00671	93.67	6,293	821

**Tabela 84** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	10.1	$r^2 = 0,785$
k	22.1	

**Tabela 85** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

<b>N</b>	<b>logN</b>	<b>logε</b>	<b>ε</b>
<b>100</b>	2.00	1.994972	<b>98.85</b>
<b>1,000</b>	3.00	1.895720	<b>78.65</b>
<b>10,000</b>	4.00	1.796468	<b>62.58</b>
<b>100,000</b>	5.00	1.697216	<b>49.80</b>
<b>1,000,000</b>	6.00	1.597964	<b>39.62</b>



**Slika 99** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 2 – 50% drobljeni kameni agregat + 50% RAP sa 5% cementa

6.5.2.3 MEŠAVINA 3 – 20% DROBLJENI KAMENI AGREGAT, 80% RAP SA 6% CEMENTA

**Tabela 86** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)					Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
201	73.8	73.9	74.0	74.1	73.7	73.8	0.1472
	150.3					150.2	0.0707
200	74.1	73.8	73.5	74.5	74.5	74.3	0.4021
	150.4					150.5	0.0707
199	73.5	73.8	73.9	74.1	74.0	73.5	0.2530
	150.1					150.1	0.0000
198	73.7	73.8	73.5	73.8	74	74.1	0.2137
	150.3					150.3	0.0000
197	73.8	74.0	74.1	74.5	74.6	74.2	0.3033
	150.0					150.0	0.0000
196	73.5	73.6	73.4	73.5	73.0	73.2	0.2251
	149.8					149.8	0.0000
195	74.1	73.5	74.2	73.6	74.2	73.8	0.3098
	150.4					150.3	0.0707
194	73.1	73.9	73.1	73.8	73.8	73.5	0.3615
	149.8					149.7	0.0707

**Tabela 87** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F (N)	σ (Mpa)	μ (-)	ΔH (mm)	ε <sub>0</sub> (με)	S <sub>mix</sub> (Mpa)	N (-)
4,750	0.27	0.35	0.00652	90.84	6,144	3,121
4,250	0.24	0.35	0.00521	72.54	6,861	11,731
4,750	0.27	0.35	0.00605	84.40	6,630	4,941
4,000	0.23	0.35	0.00401	55.87	8,424	256,491
4,750	0.27	0.35	0.00584	81.53	6,832	11,711
4,250	0.25	0.35	0.00550	76.88	6,561	4,551
4,250	0.24	0.35	0.00475	66.13	7,546	18,231
4,000	0.23	0.35	0.00425	59.41	7,981	239,211

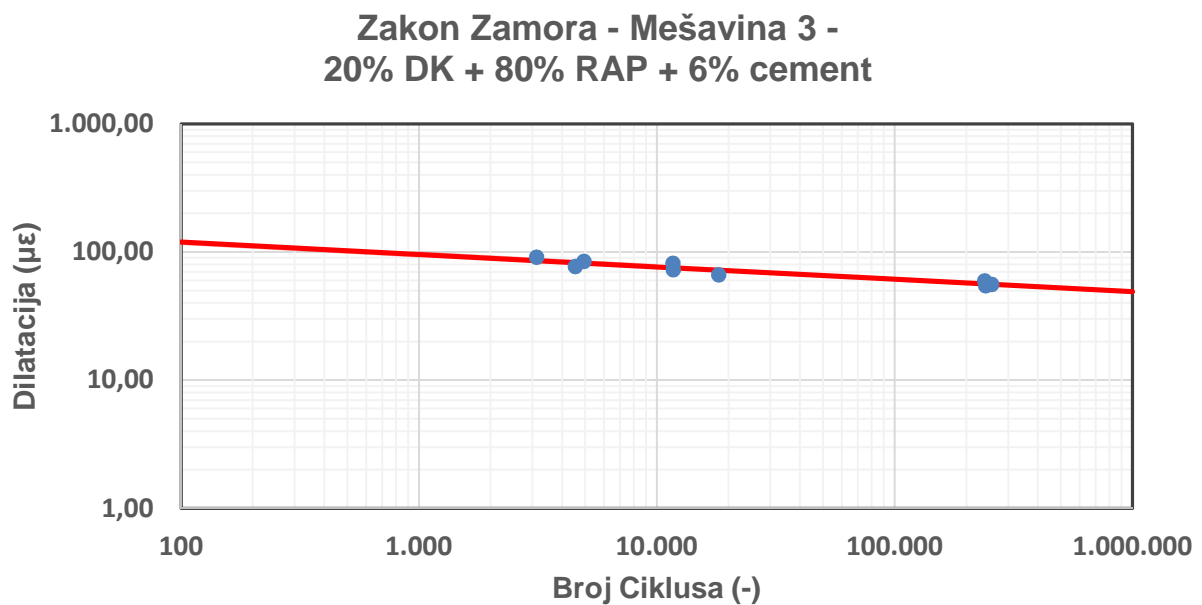
**Tabela 88** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	10.3	r <sup>2</sup> = 0,898
k	23.5	

**Tabela 89** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

<b>N</b>	<b>logN</b>	<b>logε</b>	<b>ε</b>
<b>100</b>	2.00	2.076933	<b>119.38</b>
<b>1,000</b>	3.00	1.980202	<b>95.54</b>
<b>10,000</b>	4.00	1.883471	<b>76.47</b>
<b>100,000</b>	5.00	1.786740	<b>61.20</b>
<b>1,000,000</b>	6.00	1.690010	<b>48.98</b>

**Slika 100** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 3 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 6% cementa



**Slika 100** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 3 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 6% cementa



6.5.2.4 MEŠAVINA 4 – 100% DROBLJENI KAMENI AGREGAT SA 4% CEMENTA I 3.5% BITUMENSKE EMULZIJE

**Tabela 90** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)						Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
210	75.0	74.5	74.6	72.0	72.5	73.1	73.6	1.2481
	150.5					150.8	150.7	0.2121
209	72.7	73.2	74.1	72.0	72.8	73.1	73.0	0.6911
	150.5					150.4	150.5	0.0707
208	73.9	73.0	72.5	71.8	72.3	71.9	72.6	0.7840
	150.5					150.8	150.7	0.2121
207	73.5	73.1	73	74.4	74.5	74	73.8	0.6473
	150.7					150.7	150.7	0.0000
205	72.5	72.8	73.1	73.3	72.8	72.7	72.9	0.2875
	150.3					150.2	150.3	0.0707
204p	72.5	72.8	72.6	73.5	73.2	73.5	73.0	0.4446
	151.0					150.8	150.9	0.1414
202	74.0	72.1	73.2	73.9	74.2	74.8	73.7	0.9381
	150.3					150.3	150.3	0.0000

**Tabela 91** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

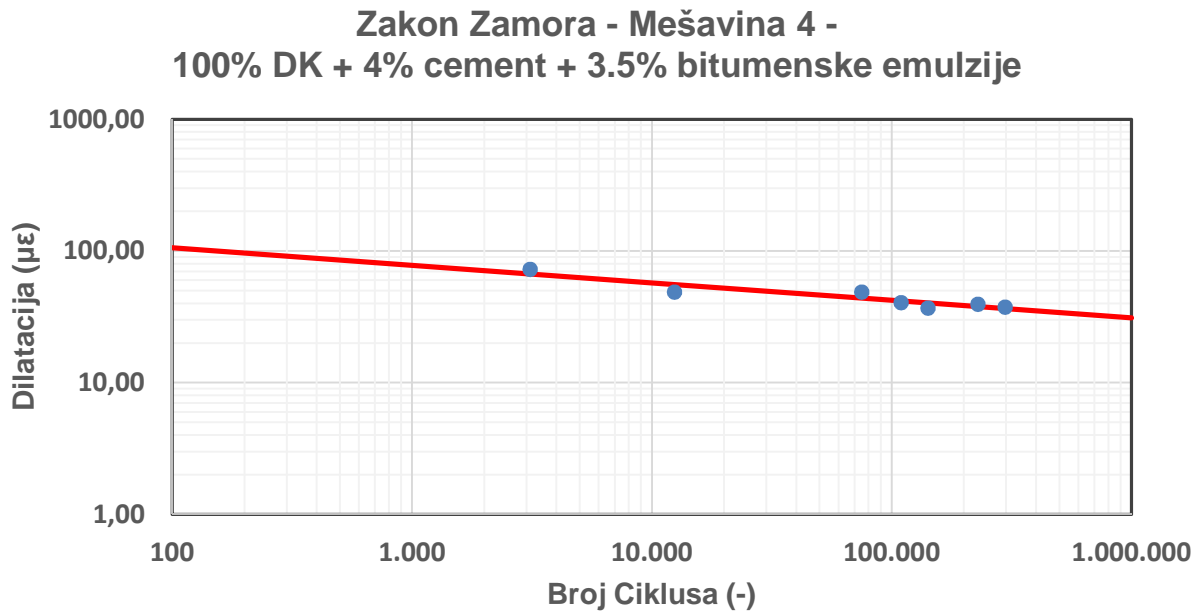
Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F	$\sigma$	$\mu$	$\Delta H$	$\epsilon_0$	S <sub>mix</sub>	N
(N)	(Mpa)	(-)	(mm)	( $\mu\epsilon$ )	(Mpa)	(-)
3,500	0.20	0.35	0.00291	40.44	10,185	109,481
4,500	0.26	0.35	0.00350	48.70	10,977	74,991
3,500	0.20	0.35	0.00270	37.52	11,128	297,341
3,500	0.20	0.35	0.00283	39.32	10,444	229,281
4,000	0.23	0.35	0.00520	72.45	6,576	3,111
3,000	0.17	0.35	0.00265	36.77	9,665	141,601
4,500	0.26	0.35	0.00350	48.76	10,873	12,441

**Tabela 92** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	7.5	r <sup>2</sup> = 0,865
k	17.2	

**Tabela 93** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

<b>N</b>	<b>logN</b>	<b>logε</b>	<b>ε</b>
<b>100</b>	2.00	2.024284	<b>105.75</b>
<b>1,000</b>	3.00	1.891210	<b>77.84</b>
<b>10,000</b>	4.00	1.758136	<b>57.30</b>
<b>100,000</b>	5.00	1.625061	<b>42.18</b>
<b>1,000,000</b>	6.00	1.491987	<b>31.04</b>



**Slika 101** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 4 – 100% Drobljeni kameni agregat sa 4% cementa i 3.5% bitumenske emulzije

6.5.2.5 MEŠAVINA 5 – 50% DROBLJENI KAMENI AGREGAT, 50% RAP SA 4% CEMENTA I 3.5% BITUMENSKE EMULZIJE

**Tabela 94** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)						Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
219	72.4	72.9	73.7	72.7	73.8	74.0	73.3	0.6656
	150.8					150.9	150.9	0.0707
218	73.1	72.1	73.1	73.9	71.9	72.1	72.7	0.7899
	150.8					150.8	150.8	0.0000
217	73.8	73.1	72.1	73.1	72.1	72.9	72.9	0.6565
	150.4					150.4	150.4	0.0000
216	73.8	74.1	73.7	72.3	72	72.1	73.0	0.9633
	150.6					150.6	150.6	0.0000
215	72.3	73.4	74.5	72.8	73.4	74.3	73.5	0.8456
	150.6					150.6	150.6	0.0000
214	73.3	72.8	71.8	72.3	71.8	71.0	72.2	0.8165
	151.1					151.1	151.1	0.0000
213	71.5	72.3	73.7	71.3	72.3	73.4	72.4	0.9725
	150.5					150.5	150.5	0.0000
212	73.0	72.7	71.8	71.5	72.7	73.0	72.5	0.6411
	150.7					150.8	150.8	0.0707

**Tabela 95** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

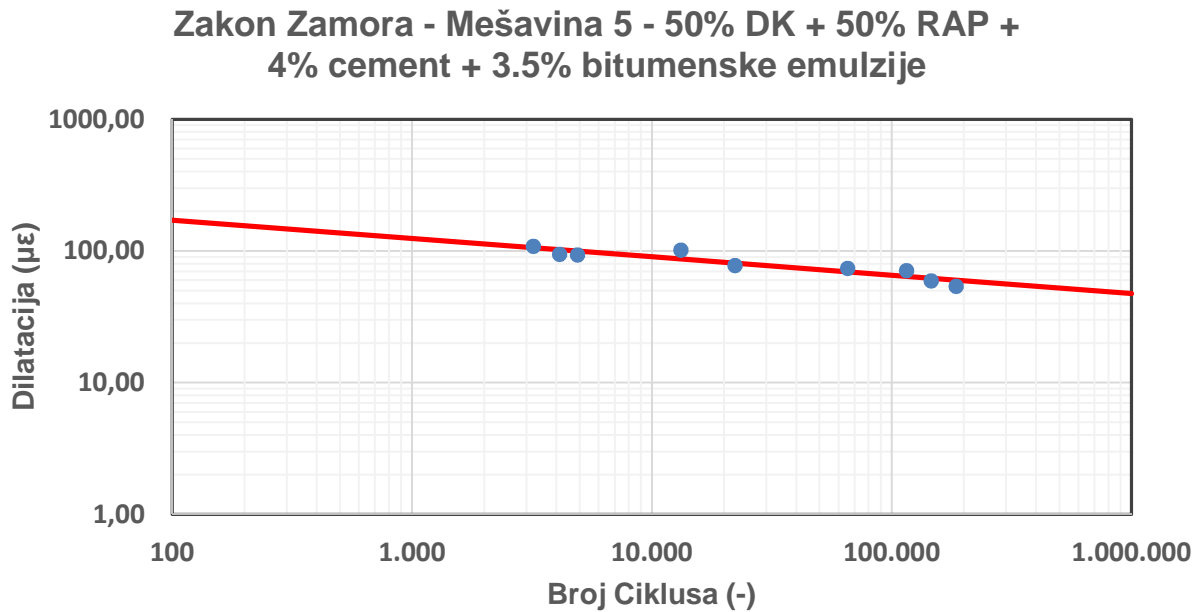
Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F	$\sigma$	$\mu$	$\Delta H$	$\epsilon_0$	$S_{mix}$	N
(N)	(Mpa)	(-)	(mm)	( $\mu\epsilon$ )	(Mpa)	(-)
3,000	0.17	0.35	0.00427	59.25	5,974	146,331
3,750	0.22	0.35	0.00780	108.31	4,122	3,211
4,000	0.23	0.35	0.00730	101.64	4,691	13,231
4,000	0.23	0.35	0.00670	93.16	5,097	4,901
3,750	0.22	0.35	0.00680	94.55	4,676	4,121
3,000	0.17	0.35	0.00388	53.77	6,628	185,691
3,500	0.20	0.35	0.00530	73.74	5,607	65,541
3,500	0.20	0.35	0.00510	70.82	5,859	115,371

**Tabela 96** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	7.2	$r^2 = 0,861$
k	18.1	

**Tabela 97** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

<b>N</b>	<b>logN</b>	<b>logε</b>	<b>ε</b>
<b>100</b>	2.00	2.233350	<b>171.14</b>
<b>1,000</b>	3.00	2.094330	<b>124.26</b>
<b>10,000</b>	4.00	1.955309	<b>90.22</b>
<b>100,000</b>	5.00	1.816289	<b>65.51</b>
<b>1,000,000</b>	6.00	1.677268	<b>47.56</b>



**Slika 102** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 5 – 50% drobljeni kameni agregat + 50% RAP sa 4% cementa i 3.5% bitumenske emulzije

6.5.2.6 MEŠAVINA 6 – 20% DROBLJENI KAMENI AGREGAT, 80% RAP SA 3% CEMENTA I 3.5% BITUMENSKE EMULZIJE

**Tabela 98** Merene dimenzije pripremljenih uzoraka (mm) za ispitivanja i statistička obrada (Srednja vrednost i Stdev).

šifra uzorka	visina / prečnik (mm)						Srednja vrednost	S <sub>tdev</sub>
228	72.5	73.5	73.1	71.7	70.5	71.4	72.1	1.1250
	151.6						151.6	0.0000
227	71.3	72.1	73.1	71.7	72.7	73.9	72.5	0.9585
	151.2						151.2	0.0000
226	71.7	72.5	72.8	70.2	70.7	71.5	71.6	1.0033
	151.0						151.0	0.0000
225	71.8	71.6	72	72.1	72.2	72.3	72.0	0.2608
	151						151	0.0000
224	71.3	70.6	72.7	73.1	71.8	70.5	71.7	1.0746
	151.1						150.9	0.1414
223	71.0	70.6	71.0	72.2	72.9	72.2	71.7	0.9072
	150.6						151.1	0.3536
222	72.0	72.4	72.0	72.0	72.3	71.7	72.1	0.2503
	151.2						151.2	0.0000
221	71.5	72.3	73.7	71.3	72.3	73.4	72.4	0.9725
	150.5						150.5	0.0000
220	72.5	72.6	72.9	72.7	72.9	72.1	72.6	0.2994
	151.0						151.0	0.0000

**Tabela 99** Merene i sračunate vrednosti za potrebe određivanja zakona zamora.

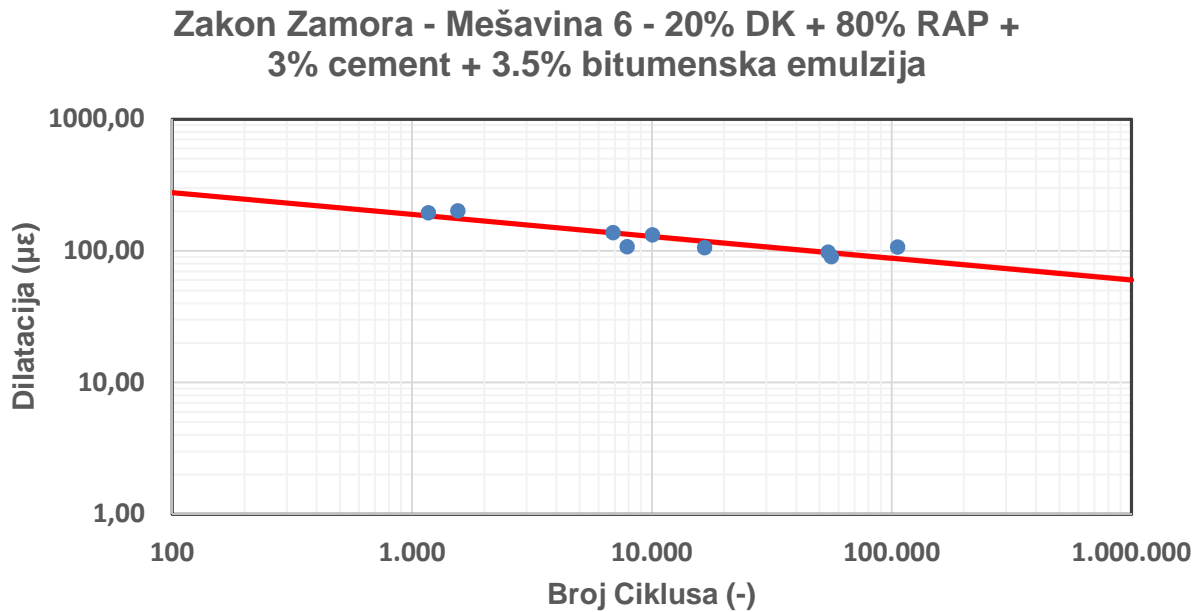
Sila	Napon	Poisson	Deformacija	Dilatacija	Modul Krutosti	Broj Ciklusa
F	$\sigma$	$\mu$	$\Delta H$	$\epsilon_0$	$S_{mix}$	N
(N)	(Mpa)	(-)	(mm)	( $\mu\epsilon$ )	(Mpa)	(-)
3250	0.19	0.35	0.01400	194.15	1,993	1,171
2750	0.16	0.35	0.00770	107.14	3,074	7,901
2500	0.15	0.35	0.00650	90.02	3,325	56,001
2500	0.15	0.35	0.00760	105.46	2,859	16,581
2500	0.15	0.35	0.00770	106.78	2,822	105,871
2500	0.15	0.35	0.00705	97.77	3,070	54,381
2750	0.16	0.35	0.00990	137.29	2,418	6,901
2750	0.16	0.35	0.00950	131.57	2,488	10,051
3250	0.19	0.35	0.01450	200.28	1,937	1,551

**Tabela 100** Linearni regresioni koeficijenti zakona zamora.

n	6.0	$r^2 = 0,805$
k	16.7	

**Tabela 101** Zakon zamora za  $1 \times 10^6$  ciklusa opterećenja prema definisanom zakonu zamora.

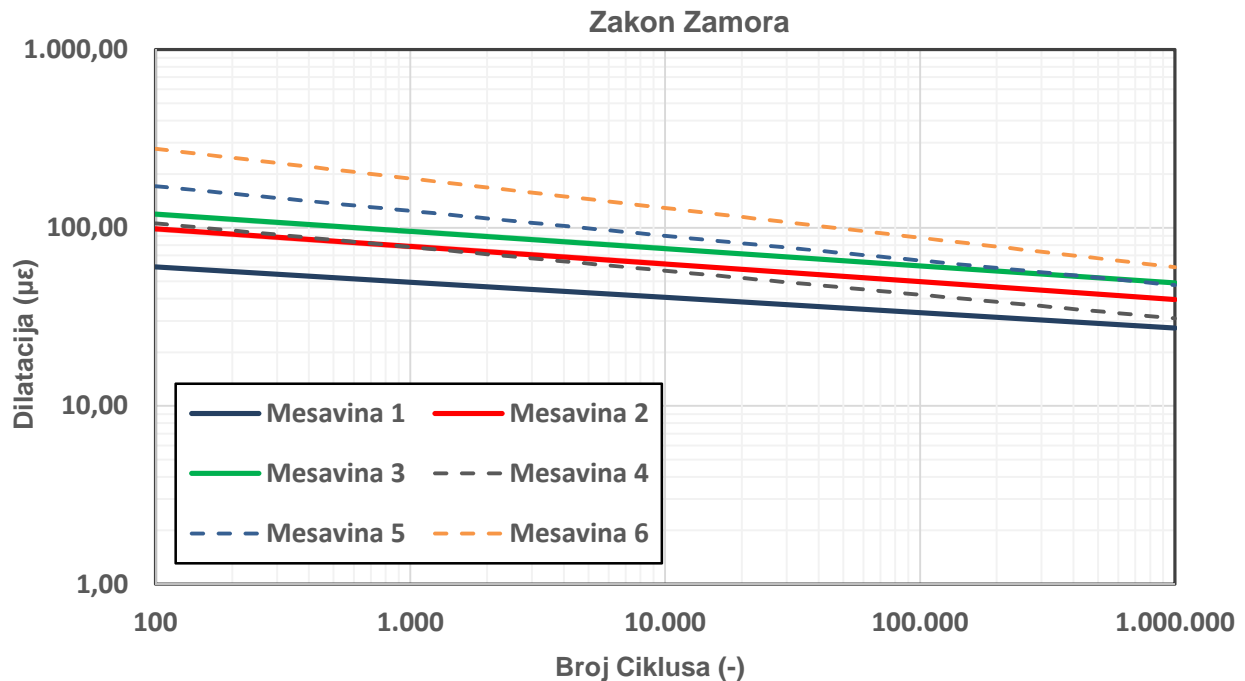
N	logN	logε	ε
100	2.00	2.442830	277.22
1,000	3.00	2.276599	189.06
10,000	4.00	2.110368	128.93
100,000	5.00	1.944137	87.93
1,000,000	6.00	1.777906	59.97



**Slika 103** Dijagram Zakona zamora za Mešavinu 6 – 20% drobljeni kameni agregat + 80% RAP sa 3% cementa i 3.5% bitumenske emulzije

### 6.5.2.7 SUMARNI GRAFIČKI PRIKAZ ZAKONA ZAMORA ZA SVE ISPITIVANE MEŠAVINE

Na sledećem dijagramu je dat uporedni prikaz dobijenih zakonitosti zamora za sve ispitivane mešavine.



**Slika 104** Dijagram Zakona zamora za sve ispitivane mešavine.

### 6.5.2.1 PREGLEDNA TABELA PARAMETARA ZAKONITOSTI ZAMORA I MODULA

U sledećoj tabeli je dat uporedni prikaz dobijenih parametara koji opisuju zakonitosti zamora za sve ispitivane mešavine.

**Tabela 102** Pregledna tabela parametara zakonitosti zamora i modul za sve ispitivane mešavine.

Oznaka mešavina veličina	Mešavina 1 100% DK 4% cem	Mešavina 2 50% DK 50% RAP 5% cem	Mešavina 3 20% DK 80% RAP 6% cem	Mešavina 4 100% DK 4% cem 3.5% be	Mešavina 5 50% DK 50% RAP 4% cem 3.5% be	Mešavina 6 20% DK 80% RAP 3% cem 3.5% be
n (-)	11.7	11.7	10.3	7.5	7.2	6.0
k (-)	22.8	22.8	23.5	17.2	18.1	16.7
$\epsilon_0$ ( $\mu\epsilon$ )	60.34	98.85	119.38	105.75	171.14	277.22
$\epsilon_6$ ( $\mu\epsilon$ )	27.41	39.62	48.98	31.04	47.56	59.97
$\epsilon_6 / \epsilon_0$	0.45	0.40	0.41	0.29	0.28	0.22
$S_{0,mix,av}$ – prosečni modul krutosti (Mpa)	18.222	8.214	7.282	9.978	5.385	2.665

## 6.6 PARCIJALNI ZAKLJUČCI I DISKUSIJA REZULTATA DRUGOG DELA EKSPERIMENTA

Pre diskusije u ovom poglavlju posebno se navode uslovi i ograničenja koje treba imati u vidu prilikom tumačenja zaključaka u ovom poglavlju:

- Sva ispitivanja su izvršena na temperaturi od 20°C. Promena temperature ispitivanja će imati veliki uticaj na zaključke u ovom poglavlju.
- Broj ispitanih uzoraka je ograničen i dovoljan za izvršena ispitivanja u ovom radu, međutim, povećanjem broja ispitanih uzoraka dobila bi se i veća pouzdanost izvedenih zaključaka.
- U diskusiji u ovom poglavlju su međusobno poređene mešavine sa različitim iznosima primenjenih veziva, što ima određeni uticaj na međusobne odnose određenih veličina.

### Diskusija o dobijenim vrednostima nagiba krive zamora:

Uvažavajući usvojenu činjenicu da se sledeće vrednosti smatraju referentnim i dobro poznatim vrednostima nagiba krive zamora u referentnoj literaturi širom sveta:

- za bitumenom vezane materijale  $n=5$ ,
- za cementom stabilizovane materijale  $d=12$ ,

izvršiće se diskusija dobijenih vrednosti nagiba krive zamora ispitivanjima sprovedenim u ovoj doktorskoj disertaciji.

Za mešavine vezane samo cementom bez učešća RAP-a:

- Nagib krive zamora iznosi **11.7** što predstavlja vrednost koja je bliska vrednosti 12 što ukazuje na nagib krive zamora klasičnih cementnih stabilizacija. Ovaj rezultat samo potvrđuje ispravnost kompletnog postupka i metodologije ispitivanja koji je sproveden u ovom eksperimentu.

Za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom bez učešća RAP-a:

- Nagib krive zamora iznosi **7.5** što predstavlja vrednost koja je se nalazi između vrednosti 5 za bitumenom vezane materijale i vrednosti 12 za cementne stabilizacije.

Za mešavine vezane samo cementom sa učešćem od 50 do 80% RAP-a:

- Nagib krive zamora iznosi **11.7 i 10.3** što predstavlja vrednost koja je bliska vrednosti 12 što ukazuje na nagib krive zamora klasičnih cementnih stabilizacija i navodi na zaključak da se mešavine stabilizovane cementom sa visokim učešćem RAP-a (50 – 80%) ponašaju kao cementne stabilizacije (na referentnoj temperaturi ispitivanja od 20°C).

Za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom sa učešćem od 50 do 80% RAP-a:

- Nagib krive zamora iznosi **7.2 i 6.0** što predstavlja vrednost koja je se nalazi između vrednosti 5 za bitumenom vezane materijale i vrednosti 12 za cementne stabilizacije.

Sve mešavine koje su vezane samo cementom kao vezivom, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%), poseduju nagib krive zamora od 10.3 do 11.7 (prosečno 11.2) što predstavlja vrednost koja je bliska vrednostima kod klasičnih cementnih stabilizacija.

Sve mešavine koje su vezane cementom i bitumenskom emulzijom kao vezivima, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%), poseduju nagib krive zamora od 6.0 do 7.5 (prosečno 6.9) što predstavlja vrednost koja se nalazi između vrednosti za bitumenom vezane materijale i klasične cementne stabilizacije.



**Učešće od 0% do 80% RAP-a nema uticaja na nagib krive zamora za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.**

**Na nagib krive zamora presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva, za mešavine vezane samo cementom nagib krive zamora je blizak klasičnim cementnim stabilizacijama, dok se za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom nagib krive zamora nalazi između vrednosti za klasične cementne stabilizacije i bitumenom vezane materijale.**

### **Diskusija o dobijenim vrednostima koeficijenta k:**

Vrednosti koeficijenta k se dele u dve grupe vrednosti:

- Vrednosti od 22.8 do 23.5 (prosečno 23.0) za sve mešavine koje su vezane samo cementom kao vezivom, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%).
- Vrednosti od 16.7 do 18.1 (prosečno 17.3) za sve mešavine koje su vezane cementom i bitumenskom emulzijom kao vezivima, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%).

**Učešće od 0% do 80% RAP-a nema uticaja na koeficijent k za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.**

**Na koeficijent k presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva, za mešavine vezane samo cementom koeficijent ima prosečnu vrednost od 23.0, dok je za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom prosečna vrednost 17.3.**

### **Diskusija o dobijenim vrednostima $\epsilon_6$ :**

Vrednosti dilatacije  $\epsilon_6$  za 1.000.000 ponovljenih ciklusa opterećenja:

Za mešavine vezane samo sa cementom:

- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% raste za 45%,
- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 79%,
- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 24%,

Za mešavine vezane sa cementom i bitumenskom emulzijom:

- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% raste za 53%,
- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 93%,
- $\epsilon_6$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 26%,

**Visina učešća RAP-a znatno utiče na porast vrednosti  $\epsilon_6$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.**

**Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% dilatacija raste za oko 50% i oko 80%, dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje porast dilatacije za oko 25%.**

### **Diskusija o dobijenim vrednostima $\epsilon_0$ :**

Vrednosti dilatacije za 100 ponovljenih ciklusa opterećenja:

Za mešavine vezane samo sa cementom:

- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% raste za 64%,
- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 98%,

- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 21%,

Za mešavine vezane sa cementom i bitumenskom emulzijom:

- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% raste za 62%,
- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 162%,
  
- $\epsilon_0$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 62%,

**Visina učešća RAP-a znatno utiče na porast vrednosti  $\epsilon_0$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.**

**Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% dilatacija raste za oko 60% i oko 100% (98% i 162%), dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje porast dilatacije za oko 25% (25% i 62%).**

### **Diskusija o dobijenim vrednostima $\epsilon_6/\epsilon_0$ :**

Vrednosti odnosa dilatacije  $\epsilon_6/\epsilon_0$  se dele u dve grupe vrednosti:

- Vrednosti od 0.40 do 0.45 (prosečno 0.42) za sve mešavine koje su vezane samo cementom kao vezivom, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%).
- Vrednosti od 0.21 do 0.29 (prosečno 0.26) za sve mešavine koje su vezane cementom i bitumenskom emulzijom kao vezivima, bez obzira na procenat učešća RAP-a (od 0% do 80%).

**Učešće od 0% do 80% RAP-a nema značajan uticaj na odnos dilatacija  $\epsilon_6/\epsilon_0$  za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.**

**Na odnos dilatacija  $\epsilon_6/\epsilon_0$  presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva.**

**Za mešavine vezane samo cementom odnos dilatacija ima prosečnu vrednost od 0.42, dok je za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom prosečna vrednost 0.26.**

### **Diskusija o dobijenim vrednostima koeficijenta $S_{0,mix,av}$ :**

Vrednosti  $S_{0,mix,av}$  – prosečnog modula krutosti:

Za mešavine vezane samo cementom bez učešća RAP-a:

- 18.000 MPa predstavlja vrednost koja je bliska uobičajenoj vrednosti kod klasičnih cementnih stabilizacija. Ovaj rezultat samo potvrđuje ispravnost kompletnog postupka i metodologije ispitivanja koji je sproveden u ovom eksperimentu.

Za mešavine vezane samo sa cementom:

- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% opada za 55%,
- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 60%,
  
- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 11%,

Za mešavine vezane sa cementom i bitumenskom emulzijom:

- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 50% raste za 46%,
- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 0% do 80% raste za 73%,

- $S_{0,mix,av}$  sa porastom učešća RAP-a od 50% do 80% raste za 51%,

**Visina učešća RAP-a znatno utiče na smanjenje vrednosti  $S_{0,mix,av}$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.**

**Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% moduli krutosti opadaju za oko 50% (55% i 46%) i oko 70% (60% i 73%), dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje opadanje modula krutosti za oko 30% (11% i 51%).**

**Vrsta primenjenog veziva znatno utiče na smanjenje vrednosti  $S_{0,mix,av}$  bez obzira na visinu učešća RAP-a.**

**Mešavine sa cementom i bitumenskom emulzijom poseduju vrednosti  $S_{0,mix,av}$  koje su niže za od 34% do 63% od mešavina sa cementom.**

## 7 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Obavljena istraživanja ispunila su prethodno postavljene ciljeve ovoga rada i obezbedila pouzdane odgovore na postavljena pitanja.

Zahvaljujući proučavanju obilne prikupljene literature, prikazano je postojeće stanje stanje u oblasti recikliranja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Prikazani bilansi količina i iskustava brojnih zemalja sveta jasno su pokazali da recikliranje ima značajne prednosti koje se, prvenstveno, ogledaju u ispunjavanju opšte prihvaćenih ciljeva minimiziranja upotrebe prirodnih resursa. Taj zahtev je u brojnim zemljama promovisao recikliranje kao opciju u održavanju, rehabilitaciji, rekonstrukciji i čak u poslednje vreme u novogradnji kolovoznih konstrukcija.

Potvrda uspešnosti recikliranja se može naći u stalnom i intezivnom razvoju samih tehnika recikliranja i opreme za izvođenje radova, u istraživanjima i razvoju novih laboratorijskih instrumenata i eksperimentalnih i ispitnih metoda za određivanje fizičko mehaničkih svojstava kao i fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih materijala, takvih da se njima uspešno može predvideti njihovo ponašanje u eksploataciji i, na kraju, u neprestanom rastu upotrebljenih količina recikliranih materijala u održavanju, rehabilitacijama, rekonstrukcijama i novogradnjama asfaltnih kolovoznih konstrukcija u velikom broju zemalja.

Prikazani razvoj tehnologije izvođenja i projektovanja recikliranja je, sa druge strane imao, i ima još i danas ograničenja koja su evidentirana u pomanjkanju svesti o korisnosti i uspešnosti recikliranja, nedostatku odgovarajućeg zakonodavstva, pa i standarda i odgovarajućih tehničkih specifikacija. Rad prikazuje sintezu iskustva o načinima i korisnim preporukama za prevazilaženje ovih poteškoća. One se, pre svega, odnose na pooštavanje zahteva za zaštitom životne okoline u svim aspektima, edukaciji, zakonodavstvu, istraživanju i standardizaciji postupaka recikliranja i normativnom definisanju ispitivanja sa kriterijumskim vrednostima za ispitivanja recikliranih materijala.

Nakon pregleda raspoložive literature zaključeno je da u predmetnoj oblasti nema dovoljno rezultata istraživanja, pogotovo sa domaćim komponentnim materijalima, koji bi omogućili optimizaciju sastava nosećeg sloja kolovozne konstrukcije na bazi agregata od hladno recikliranog asfalta sa aspekta mehaničkih karakteristika. Takođe, do sada nisu dovoljno ispitani uticaji određenih parametara mešavina na mehaničke karakteristike, pogotovo za slučaj upotrebe cementa i bitumenske emulzije zajedno kao veziva.

Određivanje fundamentalnih mehaničkih svojstava prethodne mešavine hladno recikliranog recikliranog materijala, posmatrano je kao uslov koji se u glavnom projektu mora ispuniti, ukoliko se za konačno dimenzionisanje projektnog rešenja koristi postupak dimenzionisanja zasnovan na mehanici kolovoza (*mehanistički pristup – mechanistic approach*). U procedurama dimenzionisanja pored takvih postupaka prikazuju se i ostale empirijske i poluempirijske metode dimenzionisanja koje se, takođe, mogu koristiti.

Eksperiment je sproveden u dva dela. U prvom delu eksperimenta analizirane su fizičko mehaničke karakteristike – zapreminska masa, pritisna čvrstoća i ITS, u drugom delu eksperimenta fundamentalne mehaničke karakteristike – zamor i moduli.

Rezultati ekspeprimenta su obrađeni odgovarajućim matematičko – statističkim postupcima u skladu sa temom istraživanja. Vođeno je računa da se što je moguće manje izgube korisne informacije do kojih se došlo u toku istraživanja. Redosled primene postupaka je od izuzetne važnosti kako za zaključivanje tako i za blagovremenu eliminaciju i uključivanje pojedinih obeležja, koja će omogućiti kvalitetnije istraživanje. Analiza je sprovedena u tri koraka i to:

testiranje hipoteza o sličnostima ili razlikama, određivanjem mere razlika sa definisanjem karakteristika i grafičkim prikazom. Obeležja celine fizičko mehaničkih karakteristika poseduju parametrijska svojstva pa su shodno tome primenjeni parametrijski postupci. Prikazani su deskriptivni parametri, srednja vrednost, standardna devijacija ( $S_d$ ), minimum i maksimum svih vrednosti, koeficijent varijacije ( $C_v$ ), interval poverenja, mere asimetrije Skjunis, mere spoljoštenosti Kurtosis i vrednost testa Kolmogorov – Smirnov. Korišćeni su multivarijantni postupci MANOVA i diskriminativna analiza. Od univarijantnih postupaka primenjen je ANOVA i t-test.

Primenjeni statistički postupci su dali novu dimenziju ovom istraživanju. Izračunavanjem koeficijenta diskriminacije izdvojena su obeležja koja određuju specifičnost subuzoraka i obeležja koje je bilo potrebno isključiti iz dalje obrade, odnosno izvršena je redukcija posmatranog prostora. Takođe prikazna procena homogenosti subuzoraka, distanca između njih i Klaster analiza, imala je za cilj da se što je moguće bolje izuči posmatrana pojava. Svrha primene matematičko – statističke analize imala je za cilj da se odrede karakteristike svakog subuzorka, homogenost i distanca između njih u odnosu na izvedene karakteristike kako bi se izvelo pouzdano i precizno predviđanje i prognoza sa određenom pouzdanošću.

Najznačajniji rezultati statističkih analiza su prikazani grafički. Na osnovu grafičkog prikaza bez analitičkog postupka nisu donošeni zaključci. Dendogram u ovom radu grafički prikazuje klasterizaciju (grupisanje) podgrupa po analiziranim parametrima na osnovu međusobnih distanci. Vertikalna duž predstavlja rastojanje između dve grupe.

Predmetna istraživanja, zasnovana na primenjenim naučnim metodama, obezbedila su pouzdanu osnovu za definisanje korelacija i međusobnih zavisnosti variranih parametara i mehaničkih karakteristika nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija na osnovu rezultata sprovedenog eksperimenta, u prvom delu eksperimenta fizičko mehaničke karakteristike – pritisna čvrstoća i ITS, u drugom delu eksperimenta fundamentalne mehaničke karakteristike – zamor i moduli.

Izvršena analiza mogućnosti optimizacije sastava sa aspekta mehaničkih karakteristika mešavine omogućuje u budućnosti efikasnije i pouzdanije projektovanje sastava nosećeg sloja kolovoza sa ciljem postizanja potrebnih mehaničkih karakteristika koje su u funkciji uslova eksploatacije kolovozne konstrukcije kod oba pristupa projektovanju kolovoznih konstrukcija – empirijskog i mehanističkog.

Sve učestaliji mehanistički pristup projektovanju recikliranih kolovoznih konstrukcija nameće potrebu poznavanja fundamentalnih mehaničkih karakteristika recikliranih slojeva kolovoza. Zbog toga će izvršeno definisanje korelacija između jednostavnijih opita čija je primena široko rasprostranjena (pritisna čvrstoća i ITS) sa fundamentalnim mehaničkim karakteristikama (zamor i moduli) biti veoma korisno za svakodnevnu praktičnu primenu.

### **Prvi deo eksperimenta – ispitivanje fizičko mehaničkih karakteristika mešavina, pritisna čvrstoća i indirektna zatezna čvrstoća**

Nakon završenog prvog dela eksperimenta i izvršene statističke analize dobijenih rezultata primenom statističkih metoda u odnosu na primenjene vrste veziva i učešća komponentnih materijala zaključeno je sledeće:

Sa porastom učešća RAP-a na 50% i više kod mešavina stabilizovanih cementom vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a opadaju za više od 50%.

Kod mešavina sa cementom i 3.5% bitumenske emulzije sa porastom učešća RAP-a na 50% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 30% dok

kod učešća RAP-a od 80% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 75%.

Kod mešavina sa cementom i 5.5% bitumenske emulzije sa porastom učešća RAP-a na 50% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 50% dok kod učešća RAP-a od 80% vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a rastu za više od 75%.

Objašnjenje porasta vrednosti pritisnih čvrstoća i ITS-a kod mešavina sa povećanjem učešća RAP-a sa povećanjem dodate količine bitumenske emulzije se ogleda u činjenici da bitumenska emulzija aktivira odnosno rejuvinira ostareli bitumen iz RAP-a i formira dodatno novo vezivo koje ima uticaj na reološke karakteristike budućeg sloja u kolovozu.

Ovim radom je potvrđeno da su kompleksne stabilizacije sa mešanim hidrauličnim i ugljovodoničnim vezivima odnosno kombinacijom cementa i bitumenske emulzije kao vezivima izuzetno efikasne. Cement povećava pritisnu čvrstoću samog sloja dok bitumenska emulzija povećava elastičnost i otpornost na zatezanje uz aktiviranje starog bitumena iz RAP-a, čime se RAP uvodi u projektne analize kao potreban i koristan materijal, a ne samo kao materijal koji je poželjno koristiti jer je dobijen struganjem postojećih asfaltnih slojeva iz razloga zaštite životne sredine.

## **Drugi deo eksperimenta – fundamentalne mehaničke karakteristike – zamor i moduli**

Zaključak o dobijenim vrednostima nagiba krive zamora:

Učešće od 0% do 80% RAP-a nema uticaja na nagib krive zamora za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.

Na nagib krive zamora presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva, za mešavine vezane samo cementom nagib krive zamora je blizak klasičnim cementnim stabilizacijama (od 10.3 do 11.7 što je blisko 12), dok se za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom nagib krive zamora nalazi između vrednosti za klasične cementne stabilizacije i bitumenom vezane materijale (od 6.0 do 7.5 što je između 5 i 12).

Zaključak o dobijenim vrednostima koeficijenta k:

Učešće od 0% do 80% RAP-a nema uticaja na koeficijent k za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.

Na koeficijent k presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva, za mešavine vezane samo cementom koeficijent ima prosečnu vrednost od 23.0, dok je za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom prosečna vrednost 17.3.

Zaključak o dobijenim vrednostima  $\epsilon_6$ :

Visina učešća RAP-a znatno utiče na porast vrednosti  $\epsilon_6$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.

Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% dilatacija raste za oko 50% i oko 80%, dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje porast dilatacije za oko 25%.

Zaključak o dobijenim vrednostima  $\varepsilon_0$ :

Visina učešća RAP-a znatno utiče na porast vrednosti  $\varepsilon_0$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.

Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% dilatacija raste za oko 60% i oko 100%, dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje porast dilatacije za oko 25%.

Zaključak o dobijenim vrednostima  $\varepsilon_6/\varepsilon_0$ :

Učešće od 0% do 80% RAP-a nema značajan uticaj na odnos dilatacija  $\varepsilon_6/\varepsilon_0$  za mešavine vezane samo cementom i mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom.

Na odnos dilatacija  $\varepsilon_6/\varepsilon_0$  presudan uticaj ostvaruje primenjena vrsta veziva.

Za mešavine vezane samo cementom odnos dilatacija ima prosečnu vrednost od 0.42, dok je za mešavine vezane cementom i bitumenskom emulzijom prosečna vrednost 0.26.

Zaključak o dobijenim vrednostima koeficijenta  $S_{0,mix,av}$ :

Visina učešća RAP-a znatno utiče na smanjenje vrednosti  $S_{0,mix,av}$  bez obzira na primenjenu vrstu veziva.

Sa porastom učešća RAP-a sa 0% na 50% i 80% moduli krutosti opadaju za oko 50% i oko 70%, dok porast učešća RAP-a sa 50% na 80% prouzrokuje opadanje modula krutosti za oko 30%.

Vrsta primenjenog veziva znatno utiče na smanjenje vrednosti  $S_{0,mix,av}$  bez obzira na visinu učešća RAP-a.

Mešavine sa cementom i bitumenskom emulzijom poseduju vrednosti  $S_{0,mix,av}$  koje su niže za od 34% do 63% od mešavina sa cementom.

Izvedeni zaključci u okviru doktorske disertacije su u potpunosti primenljivi u inženjerskoj praksi pri projektovanju recikliranih kolovoznih konstrukcija (emprijskim i mehanističkim pristupom), prethodnih receptura u laboratoriji pre početka izvođenja radova kao i kontroli kvaliteta izvedenih radova na gradilištu.

Nakon završetka ovog istraživanja otvorene su nove mogućnosti za dalja istraživanja u smislu konačnog definisanja Kataloga za projektovanje kolovoznih konstrukcija u Srbiji koji će biti zasnovan na mehanističkom pristupu projektovanja kolovoznih konstrukcija i u koji će biti uključeni reciklirani slojevi kolovoza (*slično kao u RVS 03.08.63 – Oberbaubemessung, Pavement design, Republika Austrija*).

Kompleksne stabilizacije sa kombinovanim hidrauličnim i ugljovodiničnim vezivima predstavljaju veoma kompleksan materijal u reološkom smislu. Naime, on poseduje delimično osobine stabilizacija vezanih hidrauličnim vezivima, ali pri tom poseduje izraženo visko elastično ponašanje odnosno menja svoje karakteristike u funkciji od temperature.

Preporuke za sprovođenje daljih istraživanja se ogledaju u sledećem:

- Laboratorijska ispitivanja sličnih mešavina na različitim temperaturama sa različitim uslovima negovanja odnosno različitim dužinama i postupcima negovanja sa ciljem što vernije simulacije realne nege na gradilištu.
- Ispitivanja sličnih mešavina na različitim temperaturama na uzorcima iz kolovoza – iz izvedenog recikliranog sloja, koji su negovani u realnim gradilišnim uslovima.
- Ispitivanja zamora i modula opitom 4PB-R (*opterećenje na gredicama u četiri tačke*) na prizmatičnim uzorcima – gredicama, prema SRPS EN 12697-24, Annex D i prema SRPS EN 12697-26: Annex B.
- Ispitivanje rezilijentnih modula  $M_r$  - triaksijalnim opitom prema SRPS EN 12697-25, Metod B.
- Ispitivanje sklonosti ka pojavi prslina i karakteristike mešavina na niskim temperaturama TSRST opitom prema SRPS EN 12697-46.
- Sprovođenje proračuna nosivosti različitih varijantnih rešenja kolovoznih konstrukcija sa dobijenim zakonitostima zamora i merodavnim modulima za različite intenzitete saobraćajnog opterećenja (*klase saobraćajnog opterećenja*) sa ciljem definisanja *Kataloga za projektovanje recikliranih kolovoznih konstrukcija*.
- Rezultate sprovedenih ispitivanja različitih tipova mešavina je potrebno u daljem istraživanju dodatno sagledati i sa aspekta fizičko mehaničkih karakteristika budućeg nosećeg sloja u kolovozu. Jedan od zaključaka istraživanja može biti definisanje mogućnosti primene analiziranih mešavina u novim – recikliranim kolovoznim konstrukcijama sa aspekta dobijanja zahtevanih mehaničkih karakteristika sloja u kolovoznoj konstrukciji.



## 8 LITERATURA

- [1] World road association - AIPCR (PIARC), *Recycling of existing flexible pavements (Recyclage des chaussées souples existantes)*, Flexible Roads Committee, 2001.
- [2] World road association - AIPCR (PIARC), *Review of the growth and development of recycling in pavement construction (REVUE DE LA PROGRESSION ET DU DÉVELOPPEMENT DU RECYCLAGE DANS LA CONSTRUCTION DES CHAUSSÉES)*, PIARC Technical Committee C 4.3 Road Pavements, 2008.
- [3] DWW-RWS, TU Delft, *Checklist Materialen & Milieu - Materiaalkeuze voor de wegenbouw*, gericht op duurzaam bouwen, 1996.
- [4] Road Transport Research - Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *Recycling Strategies for Road Works*, Paris, 1997.
- [5] CEDR Transnational Road Research Programme, Call 2012: Recycling: *Road construction in a post-fossil fuel society*, funded by Denmark, Finland, Germany, Ireland, Netherlands and Norway, EARN, Effects of constituent materials, recycled and secondary sources materials and construction conditions on pavements durability derived from literature and site data review - D3, 2014.
- [6] Valentina, J., Suda, J., Formanová, Z., Mollenhauer, K., Engels, M., McNally, C., *Introduction to European COREPASOL Project on Harmonizing Cold Recycling Pavement Techniques*, Transport Research Arena 2014, Paris,
- [7] Ipavec, A., Marsac, P., Mollenhauer, K., *DIRECT MAT PROJECT - Synthesis of the european national requirements and practices for recycling in HMA and WMA*, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2012, Istanbul.
- [8] National Administration of Roads, Ministry of Transportation, Romania, *Road Base Course of Natural Aggregates Stabilized with Cement - General Technical Specifications for Public Road Rehabilitation and Construction Work*, No. 7, 2010.
- [9] Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, *Richtlinie für Recycling - Baustoffe aus Hochbau - Restmassen, Anwendungsbereich: Zementgebundene Massen*, Wien, Austria, 2008.
- [10] Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, *Richtlinie für Recycling-Baustoffe, Anwendungsbereich: Ungebundene Massen*, Wien, Austria, 2006.
- [11] Peter, G. and Hugh, M., *Waste minimisation and recycling in construction - a review*, Special Publication 122, London, UK, 1995.
- [12] EAPA, *Industry Statement on the Recycling of Asphalt Mixes and the Use of Waste in Asphalt Pavements*, Breukelen, 1995.
- [13] USDOT, FHWA, *Recycled materials in european highway environments, Uses, Technologies, and Policies, International technology exchange program*, 2000.
- [14] Swedish National Road Administration, *Environmental Report 98. Publication 1999:34E., Butiken, 8F-178 87 Borlange*, Sweden, 1998.

- [15] Radojković Z., Cvetanović A., Uzelac Đ., *Tehnička uputstva za primenu tehnologije toplog i hladnog recikliranja kolovoza, površinskih obrada i mikroasfalta*, Republička dirtekcija za puteve, Beograd, 2002.
- [16] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Asphalt recycling manual*, Asphalt recycling and reclaiming association, 2001.
- [17] Wirtgen GmbH (2012). *Cold Recycling Manual*, 1<sup>st</sup> edition, Wirtgen GmbH, Germany, 2012.
- [18] AIPCR, *Pavement recycling guidelines for in-place recycling with cement, in-place recycling with emulsion or foamed bitumen and hot mix recycling in plant*, Comité Technique AIPCR C7/8 – "Chaussées Routières" PIARC Committee C7/8 – "Road Pavements", 2003.
- [19] AIPCR – PIARC, *Chaussées semi-rigides – Semi-Rigid Pavements*, Publication No. 08.02.B, Paris, France, 1991.
- [20] AASHTO, *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA, 1993
- [21] Jahren, C. T., Cawley, B., and Bergeson, K. "Performance of Cold In-place Recycled Asphalt Cement Concrete Roads", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 13, No. 3. 1999.
- [22] Epps, J. A.. *NCHRP Synthesis of Highway Practice, Cold Recycled Bituminous Concrete Using Bituminous Materials*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA. 1990.
- [23] Kearney, E. J., and Huffman, J. E. "Full-Depth Reclamation Process", *Transportation Research Record*, No. 1684, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 203-209. 1999.
- [24] Forsberg, A., Lukanen, E., and Thomas, T., "Engineering Cold In-place Recycling Project - Blue Earth County State Aid Highway 20, Minesota", *Transportation Research Record*, No. 1813, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 111-123. 2002.
- [25] Mallick, R. B., Bonner, D. S., Bradbury, R. L., Andrews, J. O., Kandhal, P. S., and Kearney, E. J. "Evaluation of Performance of Full-Depth Reclamation Mixes", *Transportation Research Record*, No. 1809, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 199-208. 2002a.
- [26] Mallick, R. B., Teto, M. R., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Bradbury, R. L., and Kearney, E. J. "Laboratory Study of Full-Depth Reclamation Mixes", *Transportation Research Record*, No. 1813, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 103-110., 2002b.
- [27] Jahren, C. T., Cawley, B., and Bergeson, K., "Performance of Cold In-place Recycled Asphalt Cement Concrete Roads", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 13, No. 3., 1999.
- [28] Kazmierowski, T. J., Bradbury, A., Cheng, S., and Raymond, C., "Performance of Cold In-place Recycling in Ontario", *Transportation Research Record*, No. 1337, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 28-36., 1992.

- [29] Milton L. J., and Earland M. G., *Design Guide and Specification for Structural Maintenance of Highway Pavements by Cold In - situ Recycling*, Transportation Research Laboratory Report 386, 60 p., 1999.
- [30] Williams, R. I. T., *Cement Treated Pavements - Materials, Design and construction*, Elsevier, London, 1986.
- [31] Wirtgen GmbH., *Foamed Bitumen - the Innovation Binding Agent for Road Construction*, Germany, 2002.
- [32] Moore, K. D., *"Foamed Asphalt Gains New Attention in Cold In-place, Recycling"*, Better Road, 2004.
- [33] Tarefder, R. A., Zaman, M. M., and Ting, C., *Behavior of Limed Treated Cold In place Recycled Asphalt Pavements*, 2005.
- [34] Cross, S. A., and Fager, G. A., *"Fly Ash in Cold Recycled Bituminous Pavement"*, Transportation Research Record, No. 1486, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA., pp. 49-56. 1995.
- [35] Cross, S. A., *"Experimental Cold In-place Recycling with Hydrated Lime"*, Transportation Research Record, No. 1684, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., USA., pp. 186-193. 1999.
- [36] Emery, J. J., *"Asphalt Concrete Recycling in Canada"*, Transportation Research Record, No. 1427, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 38 - 46. 1993.
- [37] Asphalt Institute (AI), *Asphalt Colddmix Recycling*, Manual series no. 21 (MS-21), Maryland, USA, 1983.
- [38] Wood, L. E., White, T. D., and Nelson, T. B., *"Current Practice of Cold In-place Recycling of Asphalt Pavements"*, Transportation Research Record, No. 1178, Transportation research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 31 - 37., 1988.
- [39] Asphalt Academy, *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen, Stabilised Materials TG 2*, Second edition, 2009.
- [40] Needham, A. D., and Brown, S. F., *"The Benefits of Using Ordinary Portland Cement in Solvent Free Dense Graded Bituminous Emulsion Mixtures"*, Internation Symposium on Asphalt emulsion Technology, Asphalt Emulsion Manufacturer's Association, Washington, D.C., USA, 1996.
- [41] Kennedy, J., and Clark, A. J., *Cement Bound Materials for Sub Bases & Road bases - Material selection and mix design*, construction and control testing, 2nd ed., British Cement Association, 1990.
- [42] Hunter, R. N., *Asphalts in Road Construction*, Thomas Telford, London, 2000.
- [43] Cross, S. A., *"Determination of Superpave® Gyrotory Compactor Design Compactive Effort for Cold In-place Recycled Mixtures"*, Transportation Research Record, No. 1819, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 152 - 160., 2003.

- [44] Lee, H.D., and Kim, J., *Developing of a Mix design Process for Cold In place Rehabilitation using Foamed Asphalt*, Final Report for TR-474 Phase I, Report on Research Sponsored by Iowa Department of Transportation, Public Policy Center, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, 2003.
- [45] Muthen, K.M., *Foamed Asphalt Mixes, Mix design Procedure*, CSIR Transportek Contract Report CR-98/077. South Africa, 1999.
- [46] Taha, R., Ali, G., Basma, A., and Al-Turk, O., "Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases", Transportation Research Record, No. 1652, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 264 - 269., 1999.
- [47] Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., and Al-Zubeidi, M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", Journal of Materials in Civil engineering, Vol. 14, No. 3, ASCE, pp.239 - 245., 2002.
- [48] Roads and Traffic Authority, *Guide to in-situ deep-lift recycling of granular pavements*, New South Wales, Australia, 1994.
- [49] Koliaş, S., RILEM, *Mechanical properties of cement-treated mixtures of milled bituminous concrete and crushed aggregates. Materials and Structures*, Vol. 29, Bagnex (France), 1996.
- [50] Dirección General de Carreteras de España, *Reciclado de firmes*. Orden Circular 8/2001. Art. 20 Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas, 2001.
- [51] Cohen, E., Sidess, A., and Zoltan, G., "Performance of a Full-Scale Pavement Using Cold Recycled Asphalt Mixture", Transportation Research Record, Transportation Research Board, No. 1228, National Research Council, Washington, D.C., p. 88 - 93. 1989.
- [52] Ruenkraitersa, T., Phromsorn, C., Lekso, S., and Silarom, P., "Engineering Properties of Asphalt Concrete Mixtures Utilised in Thailand", Proceeding of the 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, CD ROM., 2002.
- [53] Mohammad, L. N., Abu-Farsakh, M., Wu, Z., and Abadie, C. "Louisiana Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials", Transportation Research Record, No. 1832, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 17 - 24., 2003.
- [54] Oke, L.O, Parry, T and H. Thom, N.H, "Fatigue Characteristics of Cold Recycled Bituminous Emulsion Mixtures Using the Nottingham Asphalt Tester in the ITFT Mode of Testing", Proc. of the Second Intl. Conf. on Advances In Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM, 2014.
- [55] Jitarekul, P., Sunarjono, S., Zoorob, S.E. & N.H. Thom, *Early life performance of cement and foamed bitumen stabilised reclaimed asphalt pavement under simulated trafficking Nottingham Centre for Pavement Engineering*, University Park, Nottingham, NG7 2RD, UK, 2010.
- [56] Montepara, A., and Giuliani, F., "A study on design and performance of recycled pavements cold stabilised with cement and bituminous emulsion", 4<sup>th</sup> European Symposium, Performance of Bituminous and Cement Treated Materials in Pavements, 11th & 12th April 2002, Nottingham, UK. S.Zoorob et al. Editors, A.A.BALKEMA Publishers, ISBN 90-5809-375-1, pp. 213-217. 2002.

- [57] Sunarjono, S., *The Influence of Foamed Bitumen Characteristics on Cold Mix Asphalt Properties*, PhD Thesis, University of Nottingham. 2008.
- [58] Read, J.M., *Fatigue Cracking of Bituminous Paving Mixtures*, PhD thesis, School of Civil Engineering, University of Nottingham. 1996.
- [59] Kiplagat, C., *EFFECTS OF DIURNAL TEMPERATURE DYNAMICS ON CURING OF COLD-EMULSION RECLAIMED ASPHALT PAVEMENTS*, School of Civil Engineering, University of Nottingham, UK, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010.
- [60] Thanaya, I.N.A., *Evaluating and improving the performance of cold mix asphalt emulsion mixes*, Leeds University, United Kingdom (UK), Civil Engineering Dimension, Vol. 9, 2007.
- [61] Lynch, A., Jenkins, K., *MATERIALS RECYCLED USING FOAMED BITUMEN STABILISATION: WHAT IS THEIR LONG TERM LOAD SPREADING CAPACITY*, Stellenbosch University, South Africa, 2010.
- [62] Ndinyo, C.S., Gariy, Z.A. Mulei, S.M., *Suitability of Reclaimed Asphalt Concrete as a Cold Mix Surfacing Material for Low Volume Roads*, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Volume-3, Issue-2, 2013.
- [63] Crispino, M. and Brovelli, C., *BITUMEN EMULSION AND FOAM BITUMEN FOR COLD RECYCLED AND BITUMEN STABILIZED MATERIALS: A COMPARISON BASED ON PERFORMANCES, COSTS AND SAFETY*, 8<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets, Faculty of Civil Engineering, Politecnico di Milano, Italy, 2010.
- [64] Kavussi, A., Modarres, A., *A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results*, Highway Group, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Construction and Building Materials, 2010.
- [65] Modarres, A., Nejad, F.M., Kavussi, A., Hassani, A., Shabanzadeh, E., *A parametric study on the laboratory fatigue characteristics of recycled mixes*, Construction and Building Materials, 2010.
- [66] Fu, P., Jones, D., Harvey, J.T., Halles, P.H., *An Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles*, Construction and Building Materials, 2010
- [67] Wirtgen GmbH, *Wirtgen Cold Recycling Manual*, 2<sup>nd</sup> revised edition, Germany, 2001.
- [68] Asphalt Institute (AI), *Thickness design – Full depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets*, Manual Series No. 1 (MS-1), Revised 8th edition. 1970.
- [69] Asphalt Institute (AI), *Asphalt Hot-Mix Recycling*, Manual Series No. 20 (MS-20), College Park, MD, 1986.
- [70] USDOT, FHWA, *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*, Participant's Reference Book, Auburn University, 1997.
- [71] Sebaaly, P. E., Bazi, G., Hitti, E., Weitzel, D., and Bemanian, S. (2004). "Performance of Cold In-place Recycling in Nevada", Transportation Research Record, No. 1896, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 162 - 169., 2004.

- [72] Ulidtz, P., *Modelling flexible pavement response and performance*, Polyteknisk forlag, Technical University Denmark, 1998.
- [73] McDaniel R. S., *"Cold In-place Recycling on Indiana State Road 38"*, Transportation Research Record, No. 1196, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 234 - 242., 1988.
- [74] Thomas, T., Kadrmas, A., and Huffman, J., *"Cold In-place Recycling on US-283 in Kansas"*, Transportation Research Record, Transportation Research Board, No. 1723, National Research Council, Washington, D.C., pp. 53 - 56. 2000.
- [75] Wen, H., Tharaniyil, M. P., Ramme, B., and Krebs, S., *"Field Performance Evaluation of Class C Fly Ash in Full-Depth Reclamation - Case History Study"*, Transportation Research Record, Transportation Research Board, No. 1869, National Research Council, Washington, D.C., pp. 41 - 46., 2004.
- [76] Moffatt, M. A., and Sharp, K. G., *"Recent Australian Experience with In Situ Stabilization"*, Transportation Research Record, No. 1652, Transportation research Board, National research council, Washington, D.C., pp. 203 - 209., 1999.
- [77] Hoff, I., Dahlhaug, J. E., and Baklokk, L. J., *Laboratory and Field Tests with Stabilisation of a Base Layer Using In place Milling*, Construction and Building Materials, 2012.