

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Aleksandar V. Radević

**KARAKTERISTIKE ASFALTNIH
MEŠAVINA SA AGREGATOM OD
RECIKLIRANOG BETONA**

doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Aleksandar V. Radević

PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE
MIXTURES WITH RECYCLED PCC
AGGREGATE

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

Mentor:

dr Goran Mladenović, dipl. građ. inž
Vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Članovi komisije:

dr Gordana Topličić Ćurčić, dipl. građ. inž.
Vanredni profesor
Univerzitet u Nišu, Arhitektonsko-građevinski fakultet

dr Dimitrije Zakić, dipl. građ. inž
Docent
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

dr Aleksandar Savić, dipl. građ. inž
Docent
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Datum odbrane:

Dedi

SKRAĆENICE

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials, USA
ANOVA	- Analiza varijansi (Analysis of Variance)
AV	- Sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom u asfaltnoj mešavini (Air Voids)
G	- Zapreminska masa
G_{max}	- Maksimalna zapreminska masa
IDT	- Indirektno zatezanje (Indirect Tensile)
ITS	- Čvrstoće pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength)
ITSR	- Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (Indirect Tensile Strength Ratio)
LA	- Los Angeles
NCHRP	- National Cooperative Highway Research Program, USA
OBC	- Optimalan sadržaj bitumena (Optimum Bitumen Content)
PCRCA	- Reciklirani agregat obložen cementnom pastom sa dodatkom zgure (Pre-Coated RCA)
RCA	- Agregat od recikliranog betona (Recycled Concrete Aggregates)
RSI	- Indeks zaostale čvrstoće (Index of Retained Strength)
SEM	- Scanning Electron Microscopy
SHRP	- Strategic Highway Research Program, USA
TSRST	- Opit zatezanja uklještenog uzorka (Termal Stress Restrained Speciment Test)
UCTST	- Jednoaksijalni ciklični opit zatezanja (Uniaxial Cyclic Tensile Stress Test)
UTST	- Jednoaksijalni opit zatezanja (Uniaxial Tension Stress Test)
V_{bit}	- Zapreminski sadržaj bitumena u asfaltnoj mešavini
VFB	- Sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom (Voids Filled with Bitumen)
VFB_{abs}	- Absolutne vrednosti sadržaja šupljina ispunjenih bitumenom
VMA	- Sadržaj šupljina u mineralnoj mešavini (Voids in the Mineral Aggregate)
VMA_{abs}	- Absolutne vrednosti sadržaja šupljina u mineralnoj mešavini
WTT	- Wheel Tracking Test
MEPDG	- Mechanical Empirical Pavement Design Guide, USA

OZNAKE KORIŠĆENE U DISERTACIJI

Oznaka	Jedinice	Značenje oznake
$[\text{CO}_2]_{\text{ACT}}$	(%)	koncentracija CO_2 kod ubrzanog testa karbonatizacije
$[\text{CO}_2]_{\text{NCT}}$	(%)	koncentracija CO_2 u prirodnim uslovima
a	(m)	rastojanje između pozicija nanošenja opterećenja
b	(m)	prosečna širina gredice
d	(mm)	prečnik otvora sita
d_s	(mm)	prečnik uzorka
D	(J/m^3)	disipovana energija po ciklusu
E	(MPa)	modul krutosti
E^*	(MPa)	kompleksni modul krutosti
E_1	(MPa)	elastična komponenta kompleksnog modula
E_2	(MPa)	viskozna komponenta kompleksnog modula
E_{max}	(MPa)	maksimalna vrednost kompleksnog modula
E_{min}	(MPa)	minimalna vrednost kompleksnog modula
f	(Hz)	frekvencija opterećenja na temperaturi ispitivanja
f_r	(Hz)	redukovana frekvencija na referentnoj temperaturi
G_b	(kg/m^3)	zapreminska masa bitumena
G_{se}	(kg/m^3)	zapreminska masa mineralne mešavine bez šupljina
h	(m)	prosečna visina gredice
K_1		koeficijenti linearne regresije zakona zamora koji se određuju eksperimentalno
K_2		koeficijenti linearne regresije zakona zamora koji se određuju eksperimentalno
L	(m)	rastojanje između oslonaca
LA	(%)	"Los Angeles" koeficijent
M	(kg)	ukupna masa agregata i bitumena
M_b	(kg)	masa bitumena
M_{ba}	(kg)	masa apsorbiranog bitumena
M_{be}	(kg)	masa efektivnog bitumena

M_g	(kg)	masa agregata
N_f		broj ciklusa opterećenja
P	(kN)	sila loma
P_b	(%)	procenat učešća bitumena u mešavini
P_s	(%)	procenat učešća mineralne mešavine
s	(s)	vremensko kašnjenje između napona i dilatacije
t	(s)	vreme
T	(K)	temperatura ispitivanja modula krutosti
$t_{,ACT}$	(dani)	vreme izloženosti visokoj koncentraciji CO_2 kod testa ubrzane karbonatizacije
$t_{,NCT}$	(dani)	vreme izloženosti prirodnim uslovima CO_2
T_{lom}	(°C)	temperatura loma
T_r	(K)	referentna temperatura za određivanje modula krutosti
V	(m^3)	ukupna zapremina zbijene mešavine
V_a	(m^3)	zapremina šupljina između zrna agregata premazanih bitumenom
V_b	(m^3)	zapremina bitumena
V_g	(m^3)	zapremina agregata (sa šupljinama)
V_{ge}	(m^3)	efektivna zapremina agregata
V_{mm}	(m^3)	zapremina mešavine bez šupljina
WA	(%)	upijanje vode,
Y	(%)	procentualni prolazak kroz sito
β, γ	-	faktori pomeranja
δ	(m)	ugib gredice
Δm_1	(kg)	promena mase nakon tretmana HCl-om, odnosno nakon karbonatizacije
Δm_2	(kg)	promena mase nakon tretmana i prosejavanja kroz sito 4 mm, odnosno 8 mm
ΔE_a	(J/mol)	aktivaciona energija
ϵ_0	(m/m)	maksimalna dilatacija (m/m)
ρ_a	(kg/m^3)	prividna zapreminska masa zrna
ρ_{rd}	(kg/m^3)	stvarna zapreminska masa uzorka osušenog u sušnici

ρ_{ssd}	(kg/m ³)	stvarna zapreminska masa zasićenog, površinski osušenog uzorka
σ_0	(MPa)	maksimalan napon
σ_{max}		maksimalni kriogeni napon
φ_t	(rad)	fazni ugao
ω	(Hz)	ugaona brzina

ZAHVALNOST

Posebnu zahvalnost upućujem mentoru, profesoru Goranu Mladenoviću, na velikoj posvećenosti tokom celokupnog procesa izrade disertacije. Hvala na korisnim savetima, razumevanju i strpljenju za sva moja pitanja.

Takođe veliku zahvalnost želim da izrazim docentu Dimitriju Zakiću na angažovanju, podršci i korisnim sugestijama tokom izrade disertacije. Hvala mnogo i profesorki Dragici Jevtić i docentu Aleksandru Saviću na tehničkoj ekspertizi i savetima koji su doprineli boljoj interpretaciji rezultate ispitivanja. Zahvaljujem se i profesorki Gordani Topličić Ćurčić na predusretljivosti i uspešnoj saradnji.

Eksperimentalni deo ispitivanja ne bi bilo moguće sprovesti bez pomoći laboranata Milovana Mihailovića i Momčila Jakšića iz Laboratorije za kolovozne konstrukcije, koji su uložili ogroman trud i svoje slobodno vreme, i koji su pored svojih brojnih obaveza uvek imali razumevanja za naučni rad. Hvala mnogo i Savu Stavnjaku i Radomiru Petroviću na pomoći tokom pripreme eksperimenta. Dragocene savete u vezi analize rezultata i inovativne ideje dobio sam od kolega Aleksandra Đurekovića i Marka Oreškovića.

Zahvaljujem se kolegama sa Katedre za materijale i konstrukcije, a posebno Marini Aškračić na svestranoj pomoći i podsticaju da istrajem u ovom dugom putu istraživanja.

Na ogromnoj materijalnoj pomoći u vidu transporta, drobljenja i prosejavanja velikih količina agregata, zahvalnost upućujem firmama: City Road Group, Vlado Baumaschinen Ltd. i Gemax iz Beograda. Bitumen i filer obezbedila je asfaltna baza Strabag iz Obrenovca na čemu im se zahvaljujem. Hvala gospodinu Vladimiru Voslaru i firmi Integradnja-COOP koja je ustupila mehanizaciju za ugrađivanje asfaltnih mešavina i firmi Dijamant Inženjering za usluge sečenja velikog broja uzoraka od asfalt betona.

Zahvaljujem se i kolegama sa Institutu za saobraćajnice Tehničkog Univerziteta u Braunšvajgu u Nemačkoj, a posebno Ivanu Isailoviću, na tehničkoj podršci tokom realizacije dela eksperimentalnih istraživanja.

Na kraju, najveću zahvalnost upućujem svojoj porodici, a posebno mojoj Marijani, na bezrezervnoj podršci, brizi i veri u uspeh.

KARAKTERISTIKE ASFALJNIH MEŠAVINA SA AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA

Rezime:

U cilju implementacije i promocije održivog razvoja u oblasti graditeljstva, sprovedena su obimna eksperimentalna ispitivanja kako karakteristika recikliranog agregata (RCA), tako i karakteristika asfaltnih mešavina sa delimičnom zamenom prirodnog agregata recikliranim. Reciklirani agregat koji je korišćen u istraživanju dobijen je drobljenjem originalnog cementnog betona klase čvrstoće C35/45.

U cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata, krupan RCA ($d > 4$ mm) je izložen tretmanima hlorovodoničnom kiselinom (potapanjem u 0.1 mol/dm^3 HCl) i ubrzanoj karbonatizaciji (koncentraciji CO_2 od 4%). Pomenutim tretmanima su u manjoj meri poboljšane karakteristike RCA, pa su dalja ispitivanja uticaja RCA na karakteristike asfalt betona sprovedena samo za netretirani RCA.

Eksperimentalnim ispitivanjima je obuhvaćeno 10 asfaltnih mešavina. Osim kontrolne mešavine, formirane su tri grupe mešavina sa delimičnom zamenom sitnog (0/4 mm), krupnog (4/22.5 mm) i sitnog i krupnog (0/22.5 mm) prirodnog agregata recikliranim. Svaku grupu su činile mešavine sa tri različita sadržaja RCA: 15%, 30% i 45%. Projektovane su asfaltne mešavine za noseći sloj kolovozne konstrukcije AC 22 BASE sa ciljanim sadržajem šupljina ispunjenih vazduhom od 5.2%.

Glavni deo eksperimentalnog rada je obuhvatio ispitivanje modula krutosti i otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode, trajnu deformaciju, zamor i niske temperature. Dobijeni rezultati su pokazali da je moguća primena kompletnog RCA (i sitan i krupan agregat); da mešavine sa RCA imaju istu ili bolju otpornost na zamor u odnosu na kontrolnu mešavinu; i da je maksimalna količina RCA u manjoj meri ograničena otpornošću na niske temperature.

Na osnovu analize dobijenih rezultata razvijena je metodologija za upotrebu RCA kao delimične zamene prirodnog agregata i date su preporuke za dalja istraživanja.

Ključne reči: Asfaltne mešavine, reciklirani agregat, dejstvo vode, trajna deformacija, krutost, zamor, niske temperature, eksperimentalno ispitivanje.

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Građevinski materijali, tehnologija betona i ispitivanje konstrukcija

UDK broj: 624.04:691.32(043.3)

PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH RECYCLED PCC AGGREGATE

Abstract:

As a part of the implementation and promotion of sustainable construction development, large experimental research was conducted. This research included testing of the recycled concrete aggregate (RCA) and properties of asphalt mixtures in which this aggregate was applied as a partial replacement of the natural aggregate. Recycled concrete aggregate used in the conducted experiments was obtained by crushing of the original cement concrete (strength class C35/45).

In order to improve its quality, coarse RCA was exposed to the treatments with hydrochloric acid (by pre-soaking into 0.1 mol/dm³ HCl) and carbon dioxide (accelerated carbonation with 4% concentration of CO₂). Mentioned treatments induced improvements in the properties of RCA, to a lesser extent. Therefore, only untreated RCA was used as a partial replacement of the natural aggregate in production of asphalt mixtures.

Experimental research was conducted on the 10 different asphalt mixtures. Three groups of mixtures with RCA were tested in addition to the control mixture. In the first group, only fine aggregate (0/4 mm) was replaced by RCA; in the second group, the replacement was applied only to coarse aggregate (4/22.4 mm), while the third group included mixtures in which both fine and coarse aggregate were replaced by RCA. Each group included three different contents of RCA: 15%, 30%, and 45%. All asphalt mixtures were designed for the base course AC 22 BASE, targeting 5.2% of air entrained voids.

Main part of the experiment consisted of different asphalt mixture's testing, such as measurements of: the stiffness modulus, resistance to water, permanent deformation, fatigue and low temperatures. Obtained results show that application of the total (both fine and coarse) RCA is possible as mixtures with RCA expressed equal or improved fatigue resistance when compared to the referent mixture. Still, the amount of the RCA used should be limited according to its low temperatures resistance.

Methodology for the RCA application, when it is used as a partial replacement of the natural aggregate in asphalt mixtures, was developed based on the presented results, together with guidelines for the future research.

Key words: Asphalt mixtures, recycled concrete aggregate, water sensitivity, permanent deformation, stiffness, fatigue, low temperature, experimental investigation

Scientific field: Civil Engineering

Scientific subfield: Building materials, concrete technology and testing of structures

UDK number: 624.04:691.32(043.3)

SADRŽAJ

1 Uvod.....	1
1.1 Predmet istraživanja.....	1
1.2 Cilj istraživanja.....	3
1.3 Polazne hipoteze.....	4
1.4 Struktura rada.....	6
2 Pregled literature	8
2.1 Uvod	8
2.2 Karakteristike agregata od recikliranog betona.....	8
2.3 Karakteristike asfalt betona spravljenog sa recikliranim agregatom.....	12
2.3.1 Uvod	12
2.3.2 Optimalan sadržaj bitumena.....	14
2.3.3 Analiza zapreminske strukture i zapreminske mase.....	18
2.3.4 Stabilnost i tečenje po Maršalu	25
2.3.5 Otpornost na dejstvo vode.....	27
2.3.6 Otpornost na trajnu deformaciju.....	40
2.3.7 Krutost	48
2.3.8 Otpornost na zamor	56
2.3.9 Otpornost na niske temperature.....	63
2.3.10 Svojstva asfalt betona sa tretiranim recikliranim agregatom	69
2.4 Rezime	72
3 Program eksperimenta	78
3.1 Metodologija	78
3.2 Komponentni materijali	80
3.2.1 Agregat.....	81
3.2.1.1 Prirodni agregat	81
3.2.1.2 Reciklirani agregat.....	82
3.2.1.3 Tretirani reciklirani agregat	85
3.2.1.4 Komparativna analiza karakteristika prirodnog i recikliranog agregata	91
3.2.1.5 Filer.....	94
3.2.2 Bitumen.....	94

3.3	Projektovanje asfaltnih mešavina	94
3.3.1	Mineralna mešavina.....	95
3.3.2	Projektovanje asfaltne mešavine po Maršalu.....	96
3.4	Priprema uzoraka asfaltnih mešavina	98
3.4.1	Maršalovi uzorci.....	99
3.4.2	Gredice za krutost i zamor	101
3.4.3	Gredice za niske temperature	102
3.4.4	Ploče za kolotrage.....	103
3.4.5	Analiza zapreminskih karakteristika različitih uzoraka.....	104
3.5	Rezime	107
4	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja i diskusija.....	109
4.1	Uvod	109
4.2	Otpornost na dejstvo vode.....	109
4.3	Otpornost na trajnu deformaciju.....	112
4.4	Modul krutosti	117
4.5	Otpornost na zamor	125
4.6	Otpornost na niske temperature.....	136
4.6	Rezime	139
5	Zaključci i preporuke za dalja istraživanja	142
5.1	Zaključci	142
5.1.1	Zaključci u vezi rezultata ispitivanja agregata	143
5.1.2	Zaključci u vezi rezultata ispitivanja asfaltnih mešavina	144
5.2	Preporuke za dalja istraživanja.....	150
6	Literatura	151
Prilozi	.....	169
Prilog A	.....	169
Prilog B	.....	180
Prilog C	.....	182
Prilog D	.....	192
Prilog E	.....	196
Prilog F	.....	209
Biografija	.....	215

Izjava o autorstvu

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Izjava o korišćenju

SPISAK SLIKA

2 Poglavlje

Slika 2.1 - <i>Vremensko-temperaturna zavisnost bitumena</i>	13
Slika 2.2 - <i>Ponašanje agregata nepravilnog oblika i agregata zaobljenog oblika</i>	14
Slika 2.3 - <i>Zavisnost OBC i sadržaja RCA kod asfaltnih mešavina nosećih slojeva</i>	15
Slika 2.4 - <i>Zavisnost OBC i sadržaja RCA kod asfaltnih mešavina zastora</i>	16
Slika 2.5 - <i>Maseni i zapreminski odnosi komponentnih materijala u asfaltnoj mešavini</i> 18	
Slika 2.6 - <i>Šematski prikaz strukture asfaltne mešavine</i>	20
Slika 2.7 - <i>Zapreminska masa asfalta u funkciji količine bitumena i RCA</i>	21
Slika 2.8 - <i>Sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini u funkciji količine bitumena i RCA</i> ...	22
Slika 2.9 - <i>Sadržaj šupljina mineralne mešavine u funkciji količine bitumena i RCA</i> ...	22
Slika 2.10 - <i>AV, VMA, VMA_{abs}, VFB i VFB_{abs} u funkciji upotrebljene količine bitumena, RCA i vremena "starenja"</i>	24
Slika 2.11 - <i>Asfaltni uzorak bez oštećenja (levo) i sa oštećenjem usled dejstva vode (desno)</i>	27
Slika 2.12 - <i>Izgled uzoraka asfaltne mešavine nakon ispitivanja indirektnim zatezanjem: a) suvo stanje i b) vlažno stanje</i>	38
Slika 2.13 - <i>Trajne deformacije asfaltnih slojeva</i>	41
Slika 2.14 - <i>Ilustracija mehanizama pojave kolotruga</i>	41
Slika 2.15 - <i>Klasičan oblik dijagrama trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja</i>	42
Slika 2.16 - <i>Uticao sezonskih efekata na kolotrage</i>	43
Slika 2.17 - <i>Dispozicije ispitivanja modula krutosti prema EN 12697-26</i>	50
Slika 2.18 - <i>Dijagram napona i dilatacija kroz vreme pri dinamičkom opterećenju</i>	51
Slika 2.19 - <i>Osetljivost krutosti asfaltne mešavine na promenu temperature i starenje bitumena</i>	53
Slika 2.20 - <i>Poređenje povratnih modula asfaltnih mešavina sa RCA na različitim temperaturama</i>	54
Slika 2.21 - <i>Primer master krive kompleksnog modula</i>	55
Slika 2.22 - <i>Master krive dinamičkog (kompleksnog) modula</i>	56
Slika 2.23 - <i>Naponi zatezanja i pritiska u kolovozu</i>	57

Slika 2.24 - Oštećenja asfaltnih slojeva usled zamora	57
Slika 2.25 - Poređenje ponašanja različitih mešavina na zamor na $T = 25^{\circ}\text{C}$	62
Slika 2.26 - Fizički model termičkih pukotina.....	63
Slika 2.27 - Termičke pukotine	64
Slika 2.28 - Rezultati ispitivanja savijanja u tri tačke na $T = -10^{\circ}\text{C}$	68

3 Poglavlje

Slika 3.1 - Matrica ispitivanja komponentnih materijala	79
Slika 3.2 - Matrica ispitivanja asfaltnih mešavina.....	81
Slika 3.3 - Mobilna čeljusna drobilica	82
Slika 3.4 - Agregat od recikliranog betona krupnoće 0/100 mm	83
Slika 3.5 - Laboratorijska drobilica	83
Slika 3.6 - Prirodni agregat (gore) i RCA (dole)	84
Slika 3.7 - Komora za karbonatizaciju	86
Slika 3.8 - Trend promene upijanja vode u funkciji zapreminske mase RCA	88
Slika 3.9 - Površinska makrostruktura RCA bez tretmana (a) i uvećani detalj (b).....	89
Slika 3.10 - Površinska makrostruktura RCA nakon HCl tretmana (a) i uvećani detalj (b).....	90
Slika 3.11 - Površinska makrostruktura RCA nakon CO_2 tretmana (a) i uvećani detalj (b).....	90
Slika 3.12 - Granulometrijski sastav agregata.....	91
Slika 3.13 - Poređenje osnovnih karakteristika RCA_{lit} i RCA_{own}	93
Slika 3.14 - Laboratorijska mešalica.....	96
Slika 3.15 - Automatski mikser	99
Slika 3.16 - Maršalov nabijač i uzorci.....	100
Slika 3.17 - Procedura ugradnje asfaltne mešavine u poligon	101
Slika 3.18 - Sečenje gredica iz asfaltnih ploča	102
Slika 3.19 - Gredice za ispitivanje krutosti/zamora i gredice za ispitivanje otpornosti na niske temperature.....	102
Slika 3.20 - Segmentni nabijač (levo) i ploče za ispitivanje kolotruga (desno)	103

4 Poglavlje

Slika 4.1 - <i>Dispozicija ispitivanja čvrstoće na indirektno zatezanje (ITS)</i>	110
Slika 4.2 - <i>Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo vode</i>	111
Slika 4.3 - <i>Uređaj za ispitivanje trajnih deformacija</i>	113
Slika 4.4 - <i>Dispozicija ispitivanja asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju</i>	113
Slika 4.5 - <i>Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa sitnim RCA</i>	114
Slika 4.6 - <i>Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa krupnim RCA</i>	114
Slika 4.7 - <i>Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa sitnim i krupnim RCA</i>	115
Slika 4.8 - <i>Oblik signala opterećenja pri ispitivanju krutosti</i>	117
Slika 4.9 - <i>Dispozicija ispitivanja modula krutosti</i>	118
Slika 4.10 - <i>Ispitivanje modula krutosti</i>	119
Slika 4.11 - <i>Fazni ugao na sve tri ispitivane temperature pri frekvenciji od 8 Hz</i>	119
Slika 4.12 - <i>Modul krutosti na sve tri ispitivane temperature pri frekvenciji od 8 Hz</i> .	120
Slika 4.13 - <i>Master krive za asfaltne mešavine sa sitnim RCA</i>	123
Slika 4.14 - <i>Master krive za asfaltne mešavine sa krupnim RCA</i>	124
Slika 4.15 - <i>Master krive za asfaltne mešavine sa sitnim i krupnim RCA</i>	124
Slika 4.16 - <i>Promena krutosti u funkciji broja ciklusa opterećenja pri ispitivanju otpornosti na zamor</i>	127
Slika 4.17 - <i>Zavisnost koeficijenata linearne regresije</i>	129
Slika 4.18 - <i>Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa sitnim RCA</i>	130
Slika 4.19 - <i>Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa krupnim RCA</i>	130
Slika 4.20 - <i>Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa sitnim i krupnim RCA</i>	131
Slika 4.21 - <i>Odnos veka trajanja kolovoznih konstrukcija sa RCA mešavinama i kontrolne mešavine</i>	134
Slika 4.22 - <i>Dispozicija ispitivanja TSRST opitom</i>	136
Slika 4.23 - <i>Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa sitnim RCA</i>	138
Slika 4.24 - <i>Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa krupnim RCA</i>	138
Slika 4.25 - <i>Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa sitnim i krupnim RCA</i>	139

SPISAK TABELA**2 Poglavlje**

Tabela 2.1 - <i>Klasifikacija recikliranog agregata po kriterijumima</i>	9
Tabela 2.2 - <i>Tehnički uslovi za asfaltne mešavine u odnosu na ITSR</i>	29
Tabela 2.3 - <i>Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA</i>	31
Tabela 2.4 - <i>Otpornost na trajnu deformaciju asfaltnih mešavina - faktori uticaja</i>	44
Tabela 2.5 - <i>Komparativna analiza ispitivanja zamora pri kontrolisanim naponima/dilatacijama</i>	59
Tabela 2.6 - <i>Faktori koji utiču na krutost i zamor asfalta</i>	60
Tabela 2.7 - <i>Sastav asfaltnih mešavina (Zhu i ost. 2012)</i>	67

3 Poglavlje

Tabela 3.1 - <i>Sadržaj prirodnog agregata i RCA u asfaltnim mešavinama</i>	80
Tabela 3.2 - <i>Karakteristike originalnog betona</i>	84
Tabela 3.3 - <i>Fizičko – mehaničke karakteristike agregata</i>	87
Tabela 3.4 - <i>Hemijske karakteristike netretiranog i tretiranog RCA</i>	89
Tabela 3.5 - <i>Fizičko-mehaničke karakteristike agregata</i>	92
Tabela 3.6 - <i>Hemijski sastav reprezentativnog uzorka RCA</i>	93
Tabela 3.7 - <i>Granulometrijski sastav filera</i>	94
Tabela 3.8 - <i>Osnovne karakteristike bitumena</i>	94
Tabela 3.9 - <i>Sastav asfaltnih mešavina</i>	97
Tabela 3.10 - <i>Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina</i>	98
Tabela 3.11 - <i>Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina Maršalovih uzoraka</i>	105
Tabela 3.12 - <i>Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina gredica i ploča za kolotrage</i>	106

4 Poglavlje

Tabela 4.1 - <i>Prosečne vrednosti ITS i vrednost ITSR</i>	111
Tabela 4.2 - <i>Rezultati opita točkom</i>	116
Tabela 4.3 - <i>Dvosmerna analiza varijansi modula krutosti</i>	122

Tabela 4.4 - <i>Statistička analiza modula krutosti E mešavine i RCA mešavina "t- testom"</i>	123
Tabela 4.5 - <i>Parametri modela master krivih</i>	125
Tabela 4.6 - <i>Parametri regresionih krivih za mešavine ispitivane na zamor</i>	128
Tabela 4.7 - <i>Osnovne karakteristike kolovozne konstrukcije</i>	132
Tabela 4.8 - <i>Vek trajanja nosećih asfaltnih slojeva kolovozne konstrukcije</i>	132
Tabela 4.9 - <i>Lom posteljice kolovozne konstrukcije usled zamora</i>	133
Tabela 4.10 - <i>Temperature loma i čvrstoće pri zatezanju dobijeni TSRST opitom</i>	137

1 Uvod

1.1 Predmet istraživanja

Ubrzani rast svetske populacije, koja se od 70-ih godina XX veka pa do danas udvostručila (Van i ost. 2012), kao i sve zapaženiji trend migracija stanovništva ka većim gradovima, utiče na povećanu aktivnost građevinske industrije u cilju zadovoljenja potreba stanovništva. Ove aktivnosti se mogu klasifikovati u dve kategorije:

- izgradnja nove saobraćajne i energetske infrastrukture i novih stambenih i industrijskih objekata i
- rekonstrukcija postojeće infrastrukture i objekata u cilju produženja eksploatacionog veka ili njihovo rušenje.

Pomenute aktivnosti dovode do velike potrošnje prirodnog agregata, uz istovremeno generisanje enormnih količina građevinskog otpada. U Evropi se na godišnjem nivou proizvede 2.6×10^9 tona agregata (Evropska asocijacija za agregat 2017), uz nastanak oko 0.85×10^9 tona građevinskog otpada, koji predstavlja oko 31% ukupno generisanog otpada (Fisher & Werge 2009). Zbog toga upravljanje ovim otpadom, sa ciljem što manjeg zagađenja životne sredine, predstavlja veliki izazov.

Imajući u vidu da upravljanje otpadnim materijalima prevashodno obuhvata odlaganje, spaljivanje i recikliranje, pridržavajući se postulata održivosti (UN 1987), osnovni cilj je pronaći alternativne načine da se ovaj materijal upotrebi kao sirovina u nekoj grani industrije. Jedno od mogućih rešenja predstavlja recikliranje građevinskog otpada i njegova dalja upotreba kao agregata u građevinarstvu.

U Evropi generalno postoji tendencija da se poveća upotreba alternativnih materijala kao što su: građevinski otpad, strugani asfalt, leteći pepeo i ložišna zgura, zgura visokih peći, sprášeni sumpor, guma itd. (Reid i ost. 2001, Orešković i ost. 2013, Jevtić i ost. 2014, Savić 2015, Ristić i ost. 2016, Topličić-Ćurčić i ost. 2017), u izgradnji građevinskih objekata, a putevi spadaju u grupu objekata u koje je moguće ugraditi značajne količine ovih materijala. Ova tendencija se sprovodi na različite načine; ponekad direktno kroz zakonodavstvo, a ponekad kroz akcione planove i direktive. Mnoge države su uvele takse za odlaganje otpada, a u nekim državama su uvedene ili se planira uvođenje taksi na upotrebu prirodnog agregata (Reid i ost. 2001). Uprkos ovome, obim primene alternativnih materijala u kolovoznim konstrukcijama je generalno mali, što je delom posledica percepcije otpadnih materijala kao inferiornih, zbog nesigurnosti u fizičko-mehaničke karakteristike ovih materijala, a delom iz ekonomskih razloga.

U državama sa velikim zalihama prirodnog agregata, upotreba alternativnih materijala najčešće nije ekonomski isplativa, zbog velikih troškova transporta i potrebnih tretmana. Ipak, u gusto naseljenim sredinama upotreba alternativnih materijala postaje sve isplativija.

Količina građevinskog otpada koji se reciklira u zemljama EU varira u širokom opsegu, pa se tako na primer u Danskoj, Holandiji, Estoniji i Nemačkoj reciklira preko 80%, a u Mađarskoj i Španiji tek nešto više od 10% (Fisher & Werge 2009). Na stepen reciklaže utiču nalazišta prirodnog materijala, raspoložive deponije, socijalno-ekonomski parametri, kao i sastav otpada. Najveći deo građevinskog otpada čine beton, keramički proizvodi i asfalt (asfalt beton). U slučaju Srbije ne postoje pouzdani podaci o strukturi građevinskog otpada, kao ni o količinama koje se recikliraju.

Kako najveći deo građevinskog otpada čini cementni beton (Tam 2008; Kim G.D. & Kim T. B. 2007), to se njegovim usitnjavanjem mogu dobiti velike količine agregata od recikliranog betona (RCA – Recycled Concrete Aggregates). Do sada se RCA uglavnom koristio kao materijal za kolovozne konstrukcije, primarno za gornje i donje nevezane slojeve, za stabilizaciju tla, ali i kao agregat pri proizvodnji cementnih betona

(Oikonomou 2005). Od toga, preko 85% se koristi za različite podloge kolovoza (Wilburn & Goonan 1998). Od ukupne mase asfalta, agregat čini preko 90%. Sa proizvodnjom od 435×10^6 t/god na nivou EU (EAPA & NAPA 2011), asfalt čini izuzetno pogodan kompozit za utrošak RCA. Ipak, zbog nedostataka RCA u odnosu na prirodni agregat, istraživanja upotrebe RCA u asfaltnim mešavinama su donedavno bila prilično ograničena. Ohrabruje činjenica da je većina radova sa ovom tematikom objavljena u poslednjih nekoliko godina.

Pregledom dostupne literature, utvrđeno je da količina i krupnoća upotrebljenog RCA, kao zamene za prirodni drobljeni kameni agregat (za koji će se u daljem tekstu ovog rada koristiti termin "prirodni" agregat), imaju suštinski uticaj na karakteristike asfalt betona. Većina sprovedenih ispitivanja se odnosila na neke specifične situacije u pogledu količine i krupnoće upotrebljenog RCA, najčešće na potpunu zamenu ili samo sitnog ($d \leq 4$ mm) ili samo krupnog ($d > 4$ mm) prirodnog agregata recikliranim ili na potpunu zamenu i sitnog i krupnog agregata. U malom broju radova se analiziraju karakteristike asfalt betona sa delimičnom zamenom prirodnog agregata recikliranim, što ima više smisla, jer je, zbog lošijih mehaničkih karakteristika RCA i potrebe za većom količinom bitumena, upitno da li kompletna zamena sitnog ili krupnog prirodnog agregata sa RCA ima opravdost i sa ekonomskog aspekta i sa aspekta performansi takvih asfalt betona. Takođe, brojna istraživanja su sprovedena samo za asfalt betone namenjene habajućim slojevima.

1.2 Cilj istraživanja

Glavni cilj istraživanja prikazanih u ovoj disertaciji je da se ispita mogućnost upotrebe RCA u asfalt betonima za noseće slojeve kolovozne konstrukcije, uz zadržavanje kvaliteta asfalta u granicama koje propisuju tehnički uslovi. Konkretno, na bazi postojećih i sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja planirano je ostvarenje sledećih ciljeva:

- da se utvrdi mogućnost i efekat poboljšanja karakteristika recikliranog agregata;

- da se utvrdi uticaj krupnoće i sadržaja RCA na karakteristike asfaltnih mešavina i na njihovo ponašanje u eksploataciji;
- da se na bazi dobijenih eksperimentalnih rezultata da predlog za dalji razvoj pouzdanog postupka proizvodnje asfaltnih mešavina sa upotrebom recikliranog agregata na bazi betonskog otpada i njegove praktične primene;
- davanje smernica za dalja istraživanja, na osnovu prethodne analize i izvedenih zaključaka.

Da bi se postigli ovi ciljevi, istraživanjem će biti obuhvaćeni sledeći zadaci:

- analiza postojećeg stanja u oblasti primene RCA u asfaltnim mešavinama;
- obavljanje eksperimentalnih ispitivanja komponentnih materijala (bitumena, kamenog brašna i agregata) i komparativna analiza karakteristika prirodnog i recikliranog agregata;
- obavljanje eksperimentalnih ispitivanja asfaltnih mešavina sa različitim količinama i različitom krupnoćom RCA i poređenje njihovih karakteristika sa karakteristikama kontrolne asfaltne mešavine spravljene bez dodatka recikliranog agregata;
- vršenje parametarske analize uticaja količine i krupnoće upotrebljenjog RCA na svojstva asfaltnih mešavina, na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, nakon njihove obrade i sistematizacije.

1.3 Polazne hipoteze

Agregat dobijen recikliranjem starog betona se bitno razlikuje od prirodnog agregata, zbog toga što se RCA sastoji i od zrna prirodnog agregata i od zaostalog cementnog maltera. Ove razlike pre svega utiču na veće upijanje vode, ali i na manju čvrstoću, manju zapreminsku masu i manju otpornost na habanje, u odnosu na prirodni agregat. Dodatno, tehnologija dobijanja RCA utiče na oblik i površinsku teksturu zrna, formirajući zrna povoljnog oblika i hrapave površine sa oštrim ivicama. Zbog toga će,

osim u pogledu fizičko-mehaničkih karakteristika, evidentno postojati i razlike u samom procesu projektovanja i ugrađivanja asfaltnih mešavina, sa i bez recikliranog agregata.

Polazne hipoteze u okviru ovog istraživanja su sledeće:

- količina i krupnoća upotrebljenog recikliranog agregata utiču na karakteristike asfaltnih mešavina;
- sa povećanjem sadržaja upotrebljenog RCA raste optimalan sadržaj bitumena;
- upotreba sitnog RCA (≤ 4 mm) zahteva veće količine bitumena, zbog veće specifične površine u odnosu na krupan RCA (> 4 mm);
- zbog veće apsorpcije bitumena, povećanje sadržaja RCA u asfaltnim mešavinama dovodi do smanjenja efektivne količine bitumena, a samim tim i smanjenja sadržaja šupljina ispunjenih bitumenom;
- sa povećanjem sadržaja RCA smanjuje se zapreminska masa asfaltne mešavine.
- hrapava površina, oštre ivice i povoljan oblik zrna RCA utiče na bolju uklještenost zrna, a time i na veću stabilnost asfaltnih mešavina.
- u odnosu na habajuće slojeve, upotreba RCA u mešavinama namenjenim nosećim slojevima ima prednosti, jer je potrošnja agregata veća, sadržaj bitumena manji, a tehnički zahtevi blaži.

Rad na navedenoj temi realizovan je simultanom primenom teorijskog pristupa oslonjenog na podatke dobijene iz literature i praktičnog pristupa zasnovanog na sopstvenim eksperimentalnim rezultatima nad kojima je primenjena statistička i regresiona analiza. U disertaciji su korišćene sledeće naučne metode:

- strukturalno-funkcionalna analiza postojećih saznanja iz ove oblasti;
- hipotetičko-deduktivna metoda u kombinaciji sa laboratorijskim eksperimentalnim istraživanjem;
- komparativna metoda pri obradi rezultata eksperimentalnog istraživanja.

1.4 Struktura rada

Prvo poglavlje disertacije čini uvod, a prate ga pregled literature, program eksperimenta, rezultati eksperimentalnih ispitivanja i diskusija, i zaključak.

U uvodnom poglavlju je prikazan značaj upotrebe recikliranog agregata sa aspekta održivog razvoja. Definisani su predmet i ciljevi istraživanja, a prikazana je i struktura teze.

U pregledu literature su sumirani glavni zaključci u vezi sa fizičkom strukturom i fizičko-mehaničkim karakteristikama recikliranog agregata. Izvršena je komparativna analiza karakteristika RCA i prirodnog agregata. Takođe, dat je i detaljan pregled stanja stvari u oblasti ispitivanja asfaltnih mešavina kod kojih je prirodni agregat potpuno ili delimično zamenjen recikliranim, sa posebnim akcentom na krupnoću upotrebljenog RCA. Pregledom literature je obuhvaćena analiza zapreminske strukture asfaltnih mešavina, stabilnosti i tečenja po Maršalu, otpornosti na dejstvo vode, krutosti i otpornosti asfaltnih mešavina na oštećenja koja nastaju na visokim, niskim i srednjim temperaturama.

U trećem poglavlju je dat program ispitivanja. Prikazani su rezultati ispitivanja komponentnih materijala, koji su poslužili kao ulazni parametri prilikom projektovanja asfaltnih mešavina. Detaljno je objašnjen način pripreme asfaltnih uzoraka na kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja. Sprovedena je i analiza zapreminskih karakteristika tako dobijenih uzoraka, koja je izuzetno bitna za razumevanje ponašanja asfalt betona pri različitim optima.

Opis sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja sa rezultatima i diskusijom dat je u četvrtom poglavlju. Na 10 asfaltnih mešavina u kojima je varirano učešće i krupnoća RCA sprovedeni su opiti otpornosti na dejstvo vode, krutosti i otpornosti na trajnu deformaciju, zamor i niske temperature. Data je komparativna analiza rezultata ispitivanja kontrolne mešavine i mešavina sa RCA.

Opšti zaključci istraživanja, kao i preporuke za buduća istraživanja dati su u petom poglavlju.

Nakon spiska literature, u prilogima su dati numerički podaci vezani za projektovanje asfaltnih mešavina i rezultati ispitivanja različitih karakteristika komponentnih materijala i asfaltnih mešavina.

2 Pregled literature

2.1 Uvod

S obzirom na temu disertacije, glavni deo pregleda čine radovi koji se odnose na eksperimentalno ispitivanje karakteristika asfalt betona u kojima je izvršena delimična ili potpuna zamena prirodnog agregata recikliranim. Razlike u ponašanju asfalt betona sa i bez recikliranog agregata posledica su različitih karakteristika prirodnog i recikliranog agregata. Da bi se te razlike na što bolji način objasnile, pregledom literature su, u prvom delu, obuhvaćene i osnovne karakteristike agregata od recikliranog betona (RCA).

2.2 Karakteristike agregata od recikliranog betona

Reciklirani agregat dobijen drobljenjem starog betona, osim zrna prirodnog agregata, sadrži i zaostali cementni malter. Prisustvo zaostalog maltera koji je porozniji od prirodnog agregata, uzrok je nepovoljnijih karakteristika RCA u poređenju sa prirodnim agregatom: većeg upijanja i manje čvrstoće, kao i niže zapreminske mase i otpornosti na drobljenje (Tam i ost. 2007; MDT RC-1544 2011; Lee i ost. 2012). Na sadržaj zaostalog cementnog maltera, koji može dostići 20 – 70% mase RCA, utiče čvrstoća originalnog betona, proces drobljenja i krupnoća zrna (Akbarnezhad i ost. 2011; Spaeth & Tegguer 2013). Ovo je važno, jer kvalitet i količina zaostalog cementnog maltera imaju najveći uticaj na fizičko-mehaničke karakteristike RCA. Takođe, veliki uticaj na karakteristike RCA imaju i mikroprrsline, nastale tokom procesa drobljenja i athezija između zaostalog maltera i agregata (Al-Bayati i ost. 2016).

U tabeli 2.1 je prikazana klasifikacija recikliranog agregata po pojedinim državama ili standardima, u zavisnosti od vrednosti zapreminske mase i upijanja vode, koji su u svim

standardima navedeni kao osnovni uslovi za klasifikaciju RCA. Generalno, pojedini standardi osim zapreminske mase i upijanja vode, klasifikaciju vrše i prema sastavu RCA, dimenzionoj stabilnosti, otpornosti na smrzavanje, sadržaju rastvorljivih hlorida, itd.

Tabela 2.1 Klasifikacija recikliranog agregata po kriterijumima

Država (standard)	Tip recikliranog agregata	Kriterijum zapreminske mase suvog uzorka (kg/m ³)	Kriterijum za upijanje vode (%)
Australija (AS1141.6.2) (AS 1996)	Klasa 1A	≥ 2100	≤ 6
	Klasa 1B	≥ 1800	≤ 8
Nemačka (DIN 4226-100) (DIN 2002)	Tip 1	≥ 2000	≤ 10
	Tip 2	≥ 2000	≤ 15
	Tip 3	≥ 1800	≤ 20
	Tip 4	≥ 1500	Ne postoji ograničenje
Japan (JIS A 5021, 5022 and 5023) (JIS 2011, 2012a, b)	Krupan - Klasa H	≥ 2500	≤ 3
	Sitan - Klasa H	≥ 2500	≤ 3.5
	Krupan - Klasa M	≥ 2300	≤ 5
	Sitan - Klasa M	≥ 2200	≤ 7
	Krupan - Klasa L	Ne postoji ograničenje	≤ 7
Koreja (KS F 2573) (KS 2002)	Krupan	≥ 2500	≤ 3
	Sitan	≥ 2200	≤ 5
(RILEM TC 121-DRG 1994)	Tip 1	≥ 1500	≤ 20
	Tip 2	≥ 2000	≤ 10
	Tip 3	≥ 2500	≤ 3

Sa stanovišta primene u asfalt betonima RCA ima i određene prednosti u odnosu na prirodni agregat. Prisustvo zaostalog cementnog maltera čini površinsku teksturu RCA izrazito hrapavom, sa oštrim ivicama i zrnima povoljnog oblika, što je posledica tehnologije dobijanja RCA, tj. drobljenja betona. Ove karakteristike doprinose boljoj uklještenosti ovakvih zrna i većem trenju kontaktnih površina. Ipak, osnovne prednosti upotrebe RCA zasnivaju se na principima održivog razvoja i odnose se na sledeće:

- *Smanjenje otpada:* Upotrebom recikliranog betona smanjuje se količina otpada koji se svakodnevno odlaže na deponijama i ujedno se smanjuje potreba za dodatnim slobodnim prostorom. U skladu sa tim, pojedine zemlje, koje imaju problem sa kapacitetima deponija, uvele su visoke naknade za odlaganje otpada.
- *Estetski uticaj na okolinu:* Iako betonski otpad nema štetan uticaj na životnu sredinu, njegov estetski uticaj nije zanemarljiv, zbog velike zapremine slobodnog prostora koju zauzima, uz dodatni nedostatak kontrole prilikom odlaganja otpada.
- *Očuvanje prirodnih resursa:* Neke zemlje više nemaju zaliha prirodnog agregata, dok je u drugim zemljama mogućnost njihove eksploatacije procenjena na još svega nekoliko godina. U takvim sredinama upotreba recikliranog agregata predstavlja i ekonomski i ekološki održivo rešenje. U skladu sa tim, pojedine evropske zemlje su uvele takse na korišćenje prirodnog agregata.
- *Prikupljanje metala:* Uklanjanje metala iz armiranobetonskih elemenata predstavlja važan korak prilikom recikliranja betona. Većina drobilica poseduje magnetni separator, pomoću kog se vrši uklanjanje metala, koji se kasnije može prodati kao staro gvožđe.
- *Ekonomski aspekt:* U slučaju rekonstrukcije masivnih armiranobetonskih konstrukcija, kao što su mostovi, brane, blokovi zgrada, ili kruti kolovozi, stari beton se u svakom slučaju mora srušiti i ukloniti. Na taj način troškovi recikliranja betona se svode na troškove uklanjanja primesa, drobljenja i prosejavanja. Osim toga, u urbanim zonama, postrojenja za reciklažu, kao i asfaltne baze, često su bliže mestima izvođenja radova od nalazišta agregata, pa se sa tog aspekta ekonomska isplativost ostvaruje usled smanjenja troškova transporta. Na taj način se smanjuje i emisija štetnih gasova, poput CO₂. Takođe, proizvodnja drobljenog prirodnog agregata zahteva više energije u poređenju sa drobljenjem betonskog otpada, zbog većih dimenzija stenske mase koju treba usitniti do određene granulacije.

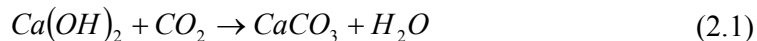
Širom sveta su sprovedena brojna istraživanja sa ciljem unapređenja tehnologije recikliranja i dobijanja recikliranog agregata sa karakteristikama sličnim prirodnom agregatu. Dve glavne metode za poboljšanje karakteristika RCA su uklanjanje ili ojačanje zaostalog cementnog maltera (Shi i ost.2016).

Najčešće korišćene metode za uklanjanje zaostalog maltera su: mehaničko drobljenje (Tateyashiki i ost. 2001), potapanje u vodu (Katz 2004) i potapanje u kiselinu (Tam i ost. 2007). Tako se, na primer, za tretman RCA kiselinama najčešće koriste hlorovodonična kiselina (HCl), sumporna kiselina (H₂SO₄) i fosforna kiselina (H₃PO₄). Najbolji efekat se postiže upotrebom HCl, jer su svi produkti reakcije RCA sa HCl rastvorljivi u vodi. Za razliku od njih, pojedini produkti reakcije sa H₂SO₄ skloni su stvaranju kristala, dok su pojedini produkti reakcije sa H₃PO₄ nestabilni. Upotreba jakih kiselina može uzrokovati velika oštećenja površine RCA. Zbog toga se upotrebom manje koncentrovanih kiselina omogućava efikasnije uklanjanje slabo vezanih delova zaostalog maltera sa površine RCA.

Ojačanje zaostalog maltera moguće je postići polimernim emulzijama (Kim i ost. 1999; Mansur i ost. 2007; Tsujino i ost. 2007; Kou & Poon 2010; Zhu i ost. 2013), korišćenjem pucolana (Tam V.W.V. & Tam C.M. 2005; Tam V.W.V. & Tam C.M. 2008; Kong i ost. 2010), krečnim i natrijum silikatnim dodacima (Pelliser i ost. 2011; Spaeth i ost. 2014), deponovanjem kalcijum karbonata (Grabiec i ost. 2012) i karbonatizacijom (Thiery i ost. 2007; Borges at el. 2010; Ismail & Ramli 2013; Kou i ost. 2014).

Proces karbonatizacije je baziran na reakciji između CO₂ i produkata hidratacije cementa u betonu: kalcijum hidroksida Ca(OH)₂ i kalcijum-silikat-hidrata C₃S₂H₃ (skraćena oznaka C-S-H). Pri ovoj reakciji proizvod karbonatizacije CaCO₃ se taloži u porama RCA što dovodi do povećanja zapreminske mase i otpornosti na drobljenje, uz istovremeno smanjenje upijanja vode i pH vrednosti (Zhan i ost. 2014; Zhang i ost. 2015; Silva i ost. 2015). Dodatno, karbonatizacijom RCA se poboljšava i kontaktna tranzitna zona (ITZ) u RCA. U skladu sa reakcijama (2.1) i (2.2), posle karbonatizacije

može doći do povećanja zapremine čvrste faze u agregatu od 11.8% bazirano na reakciji (2.1), i od cca. 23% bazirano na reakciji (2.2) (Xuan et. al 2016).



Sa ekološkog aspekta, procesom karbonatizacije RCA, u njegovom pornom sistemu deponuje se ugljendioksid, što globalno smanjuje efekat staklene bašte (Zhang i ost. 2015). Ovi procesi se brže odvijaju kod sitnijih zrna RCA, zbog veće specifične površine (Zhan i ost. 2014).

2.3 Karakteristike asfalt betona spravljenog sa recikliranim agregatom

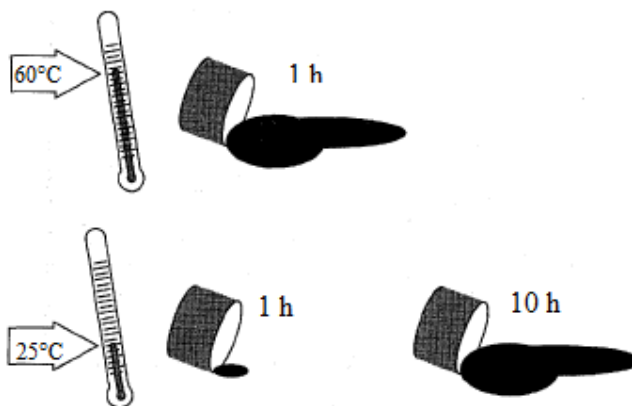
2.3.1 Uvod

Asfaltni betoni se koriste kao završni slojevi kolovoznih konstrukcija i predstavljaju kompozitne materijale, koji se sastoje od bitumena i agregata. U asfaltnim mešavinama bitumen obavija zrna agregata, povezujući ih u kohezivnu masu. Karakteristike asfalt betona su određene svojstvima:

- bitumena - konzistencija, temperaturna osetljivost, stabilnost, prionljivost, čistoća, itd.;
- agregata - oblik zrna, površinska tekstura, čvrstoća, granulometrijski sastav, skeletna struktura mineralne mešavine, itd.; i
- interakcijom bitumena i agregata - adhezija, apsorpcija, fizičko-hemijska interakcija, itd.

Najbitnija karakteristika bitumena je njegova temperaturna osetljivost. To znači da su njegove karakteristike zavisne od temperature, što je ujedno i glavni razlog zašto se sva ispitivanja asfaltnih mešavina sprovode u jasno definisanim uslovima okoline, tj. na tačno definisanim temperaturama. Na ponašanje bitumena utiče i trajanje opterećenja.

Apliciranje istog opterećenja sa drugačijim trajanjem uzrokuje različito ponašanje bitumena. Zbog ponašanja bitumena koje zavisi i od temperature i od dužine trajanja opterećenja, ova dva faktora se mogu koristiti naizmenično (slika 2.1.), tj. sporo nanošenje opterećenja se može simulirati visokim temperaturama, a brzo nanošenje opterećenja niskim temperaturama. Ovaj fenomen se u literaturi definiše kao "time-temperature superposition".

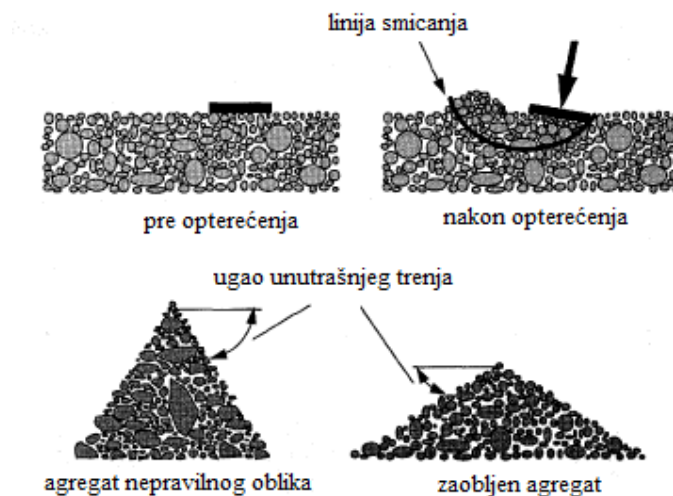


Slika 2.1 Vremensko-temperaturna zavisnost bitumena

Zbog ovakvog ponašanja, bitumen predstavlja visko-elastičan materijal. Na visokim temperaturama bitumen se ponaša kao viskoznan fluid. Drugim rečima, kada se dovoljno zagreje, npr. $T > 100^{\circ}\text{C}$, ima konzistenciju kao motorno ulje. Na veoma niskim temperaturama, npr. $T < 0^{\circ}\text{C}$, ponaša se kao elastično tvrdo telo.

Još jedna bitna osobina bitumena je da, zbog organskih molekula koje sadrži, hemijski reaguje sa kiseonikom iz vazduha. Oksidacijom bitumena se menja njegova struktura i molekularni sastav, i smanjuje duktilnost. Proces oksidacije se odvija mnogo brže na višim temperaturama. Iz tog razloga, do značajnog očvršćavanja bitumena dolazi još tokom procesa umešavanja i ugradnje asfaltne mase, kada pri zagrevanju dolazi do isparenja nestabilnih komponenti bitumena, što bitumen čini krućim (Kliwer i ost. 1996; Asphalt Institute SP-1 2001). Tokom eksploatacije bitumen postaje sve krtiji, pa se u literaturi ova pojava često naziva i "starenje bitumena".

Bez obzira na tip, način dobijanja i mineraloški sastav, od agregata se očekuje da svojom skeletnom strukturom asfaltnom betonu obezbedi čvrstoću. Zrna agregata nepravilnog (kubičastog) oblika, sa oštrim ivicama i hrapavom površinom obezbeđuju veću čvrstoću od zaobljenih zrna sa glatkom površinom. Iako i jedna i druga mogu imati isti kvalitet materijala, upotrebom zrna nepravilnog oblika može se obezbediti bolja uklještenost i veće trenje kontaktnih površina. Na taj način se obezbeđuje veća otpornost na deformacije usled saobraćajnog opterećenja (slika 2.2).



Slika 2.2 Ponašanje agregata nepravilnog oblika i agregata zaobljenog oblika

Zbog svega navedenog, ponašanje asfalt betona je veoma složeno i ponekad teško predvidljivo. U cilju boljeg razumevanja uticaja RCA na karakteristike asfalta, sproveden je detaljan pregled dostupne literature koji je obuhvatio: zapreminsku strukturu, stabilnost i tečenje po Maršalu, otpornost na dejstvo vode, krutost, otpornost na trajnu deformaciju, zamor i niske temperature.

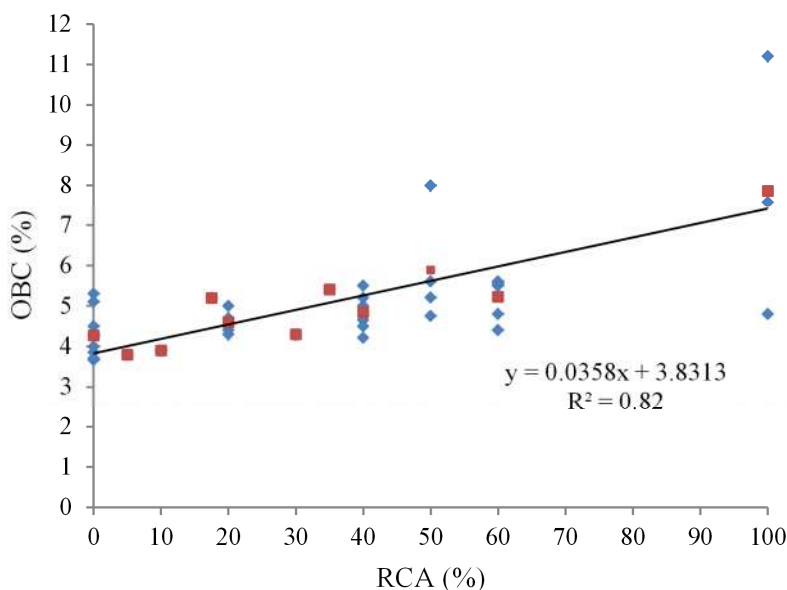
2.3.2 Optimalan sadržaj bitumena

Količina upotrebljenog bitumena utiče na karakteristike asfalt betona u pogledu njihove trajnosti, čvrstoće, krutosti, otpornosti na zamor i kolotrage, osetljivosti na dejstvo vode itd. Stoga je za proizvodnju kvalitetnog asfalt betona neophodno odrediti optimalnu količinu bitumena (OBC – Optimum Bitumen Content), kako bi se sprečila prevremena

oštećenja. Uobičajena količina bitumena u asfaltnim betonima, u odnosu na ukupnu masu mešavine, kreće se u granicama od 3% do 5% kod bitumeniziranih nosećih slojeva i od 5% do 8% kod zastora (vezni i habajućii slojevi). Ipak, sa udelom od cca. 30% u ceni ugrađenog asfaltnog sloja, bitumen predstavlja daleko najskuplji komponentni materijal asfaltno mešavine i na taj način dodatno daje na značaju definisanju OBC.

Kao što je pomenuto u poglavlju 2.2, u poređenju sa prirodnim agregatom zrna RCA su poroznija, hrapavija i poseduju veću specifičnu površinu. Zbog toga, asfaltno mešavine sa RCA, u poređenju sa mešavinama sa prirodnim agregatom, imaju potrebu za većom količinom bitumena.

U analiziranoj literaturi, približno isti broj istraživanja asfaltnih mešavina je sproveden za noseće slojeve (17 radova) i slojeve zastora (19 radova). Uticaj količine RCA na optimalan sadržaj bitumena prikazan je na slici 2.3 za noseće slojeve i na slici 2.4 za slojeve zastora.

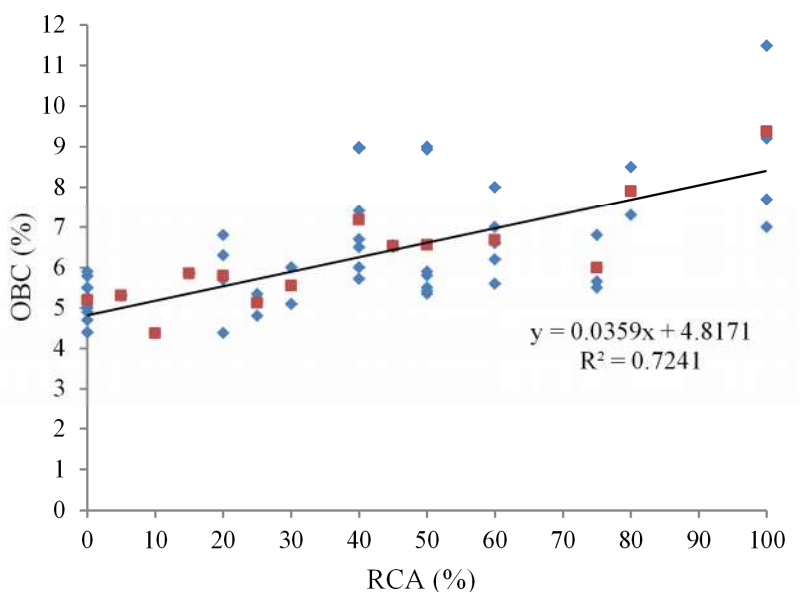


Slika 2.3 Zavisnost OBC i sadržaja RCA kod asfaltnih mešavina nosećih slojeva

U prvom koraku sračunate su prosečne vrednosti OBC pri onim količinama RCA kod kojih postoji veći broj podataka (sadržaj RCA 0%, 20%, 25%, 40%, 50%, 60% i 100%).

Zatim je linearnom regresijom prosečnih vrednosti OBC, dobijena zavisnost optimalnog sadržaja bitumena u funkciji upotrebljene količine RCA za noseće slojeve i slojeve zastora, sa koeficijentom korelacije od $R^2=0.820$ i $R^2=0.724$, respektivno, što ukazuje na dobru aproksimaciju zavisnosti OBC od sadržaja RCA.

Obe regresione prave imaju približno isti nagib, što pokazuje da je kod obe grupe asfaltnih mešavina sadržaj bitumena proporcionalan sadržaju RCA. Relativno veliko rasipanje rezultata je posledica različitog sastava RCA, različitih vrsta upotrebljenog filera, bitumena i prirodnog agregata, drugačijih postupaka projektovanja i ugradnje asfaltne mešavine, i drugih faktora. I pored brojnih različitosti ispitivanih mešavina, u literaturi postoji konsenzus da sa povećanjem sadržaja RCA u asfaltnim mešavinama optimalna količina bitumena ima trend rasta.



Slika 2.4 Zavisnost OBC i sadržaja RCA kod asfaltnih mešavina zastora

Uticaj krupnoće RCA na OBC ispitivali su Rafi i ost. (2011). Osim kontrolne mešavine, napravljene su dve grupe mešavina različitog granulometrijskog sastava sa nominalno najkrupnijim zrnom agregata od 19 mm i 25 mm. Obe grupe su činile po tri mešavine u kojima je prirodni agregat zamenjen recikliranim u količini od 20%, 50% i 75%.

Optimalan sadržaj bitumena bio je veći kod asfalt betona sa sitnozrnijom mineralnom mešavinom, što je posledica veće specifične površine sitnijih zrna agregata.

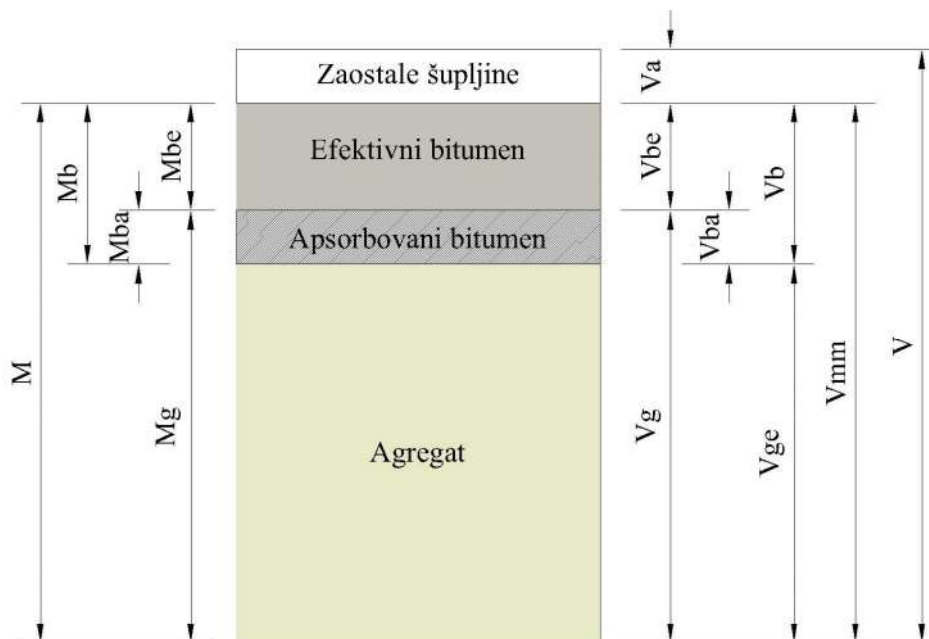
Poroznija struktura cementnog kamena, vezanog za zrna RCA, osim na povećanje OBC, utiče i na povećanje apsorpcije bitumena, a samim tim i na redukciju efektivne količine bitumena. Smanjenje efektivne količine bitumena ukazuje da debljina bitumenskog filma opada sa povećanjem sadržaja RCA, što može negativno uticati na karakteristike asfaltne mešavine, posebno u slučaju mešavina sa visokim sadržajem RCA (Pasandín & Pérez 2013).

Na vrednosti efektivne i apsorbovane količine bitumena u velikoj meri utiče i starenje (kondicioniranje) mešavine pre ugradnje. U cilju istraživanja uticaja starenja, Pasandín & Pérez (2014a) su asfaltnu mešavinu, pre zbijanja, držali u sušnici na temperaturi mešanja $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, u trajanju od 0 h, 2 h i 4 h. Ispitivanje je sprovedeno na mešavinama sa 0%, 5%, 10%, 20% i 30% zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim ($d > 4\text{ mm}$). Duže vreme starenja uticalo je na veću apsorpciju bitumena, i niži efektivni sadržaj bitumena u mešavini. Veća apsorpcija, omogućila je vezivu da bolje obloži površinu agregata, i time smanji poroznost RCA, odnosno sadržaj šupljina u koje bi kasnije prodrla voda. Bitumen apsorbovan u porama cementnog kamena, takođe je uticao na povećanje čvrstoće cementnog kamena.

U cilju poboljšanja pojedinih fizičkih i mehaničkih karaktera recikliranog agregata, pre svega smanjenja upijanja bitumena, kao i povećanja otpornosti na abraziju i dejstvo vode, Zhu i ost. (2012) su krupan reciklirani agregat potapali u tečnu silikonsku smolu u trajanju od 1 h, a potom ga držali u sušnici 24 h na temperaturi $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok silikonska smola ne očvrstne. Sastav recikliranog agregata su činili: RCA (71.2%), drobljena opeka (26.1%) i drugi materijali. Ispitivanja su sprovedena na dve asfaltne mešavine sa 80% krupnog recikliranog agregata. Jedna mešavina je spravljena sa recikliranim agregatom bez ikakvog tretmana, a druga sa recikliranim agregatom koji je bio prethodno izložen tretmanu silikonskom smolom. Dobijeni rezultati pokazuju da se tretmanom krupnog recikliranog agregata OBC asfaltne mešavine može smanjiti za 28%.

2.3.3 Analiza zapreminske strukture i zapreminske mase

Poznavanje zapreminske strukture i zapreminske mase zbijene asfaltne mešavine je veoma važno, kako pri projektovanju mešavine, tako i pri kontroli kvaliteta izvedenog asfaltnog sloja. U zavisnosti od primenjene metode, projektovanje asfaltne mešavine predstavlja proces određivanja zahtevanih zapremina bitumena i agregata koje će obezbediti mešavinu sa željenim karakteristikama. Veća apsorpcija bitumena, u asfaltnim mešavinama sa RCA, utiče na povećanje sadržaja šupljina u mešavini i redukciju efektivne količine bitumena koja učestvuje u oblaganju zrna agregata i njihovom međusobnom povezivanju. Apsorpcija bitumena od strane agregata je proporcionalna upijanju vode agregata. Poređenja radi, količina apsorbovanog bitumena je za istu vrstu agregata manja za oko 50% u odnosu na apsorbovanu količinu vode (Atkins 1997). Na slikama 2.5 i 2.6 dat je prikaz zapreminske strukture asfaltne mešavine.



Slika 2.5 Maseni i zapreminski odnosi komponentnih materijala u asfaltnoj mešavini

gde je:

M - ukupna masa ($M_g + M_b$);

V_{be} - efektivna zapremina bitumena

M_g - masa agregata;	V_{ba} - zapremina apsorbovanog bitumena;
M_b - masa bitumena ($M_{be}+M_{ba}$);	V_b - zapremina bitumena ($V_{be}+V_{ba}$);
M_{be} - masa efektivnog bitumena;	V_a - zapremina šupljina između zrna
M_{ba} - masa apsorbovanog bitumena;	agregata premazanih bitumenom;
V - ukupna zapremina zbijene mešavine;	V_{ge} - efektivna zapremina agregata (V_g-V_{be});
V_g - zapremina agregata (sa šupljinama);	V_{mm} - zapremina mešavine bez šupljina;

Najčešće korišćeni parametri pri analizi zapreminske strukture asfalt betona su procenat šupljina u asfaltnoj mešavini (AV – Air Voids), procenat šupljina u mineralnoj mešavini (VMA – Voids in the Mineral Aggregate), procenat šupljina ispunjenih bitumenom (VFB – Voids Filled with Bitumen), zapreminska masa (G) i maksimalna zapreminska masa (G_{max}). Vrednosti ovih parametara bitno utiču na pojedine karakteristike asfalta, pa su tako za noseće asfaltno slojeve prema standardu EN 13108-20, tačka D.2, propisane minimalne i maksimalne vrednosti AV i VFB za različite grupe saobraćajnih opterećenja. Prema Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012) dozvoljene vrednosti za AV se kreću u granicama od 3% do 7%, a za VFB od 55% do 77%. Velika poroznost ugrađenog asfalta (AV) utiče na brže starenje i manju trajnost. Sa druge strane, minimalne vrednosti AV treba da obezbede veću fleksibilnost i više prostora za ekspanziju bitumena i naknadno zbijanje usled saobraćajnog opterećenja tokom eksploatacije. Šupljine popunjene bitumenom takođe utiču na trajnost kolovozne konstrukcije. Mala zapremina šupljina ispunjenih bitumenom može uticati na smanjenje trajnosti konstrukcije, naročito zbog smanjenog efektivnog sadržaja bitumena. Vrednosti pomenutih parametara definisane su sledećim izrazima:

$$AV = \frac{V_a}{V} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$VMA = \frac{V_a + V_{be}}{V} \cdot 100 \quad (2.4)$$

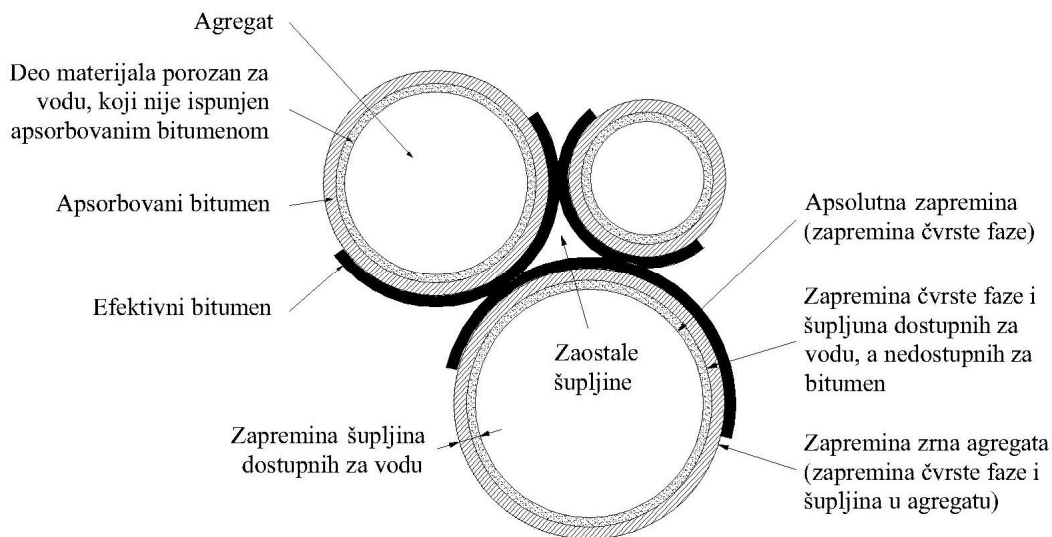
$$VFB = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_a} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Zapreminska masa asfaltnog uzorka u zbijenom stanju može se sračunati pomoću formule:

$$G = \frac{A}{B - C} \quad (2.6)$$

gde je:

- A - masa suvog uzorka (kg);
- B - masa vodom zasićenog površinski suvog uzorka (kg);
- C - masa potopljenog vodom zasićenog uzorka (kg);



Slika 2.6 Šematski prikaz strukture asfaltne mešavine

Maksimalna zapreminska masa asfaltnog uzorka može se sračunati pomoću sledeće formule:

$$G_{\max} = \frac{A}{A - D} = \frac{100}{\left(\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b} \right)} \quad (2.7)$$

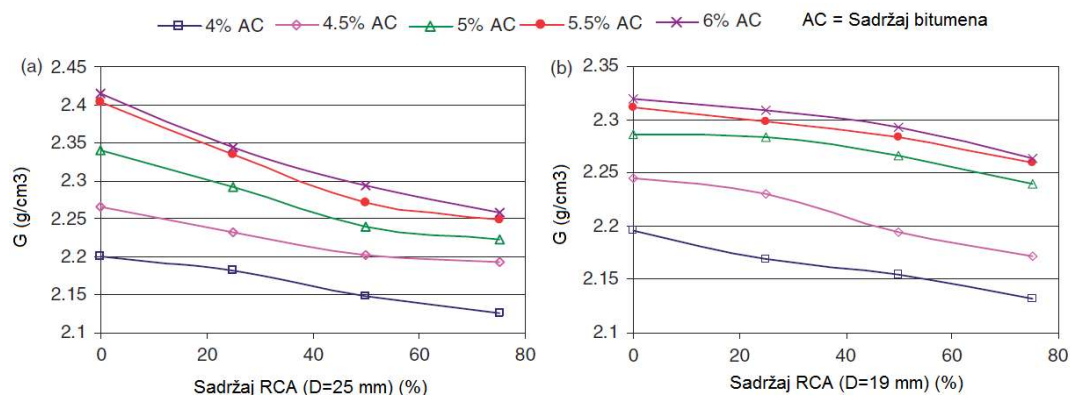
gde je:

- D - masa potopljenog uzorka u rastresitom stanju (uzorka bez šupljina) (kg);
- P_s - procenat učešća mineralne mešavine: $P_s = M_g/M$;
- P_b - procenat učešća bitumena u mešavini $P_b = M_b/M$;
- G_{se} - zapreminska masa mineralne mešavine bez šupljina (kg/m^3);
- G_b - zapreminska masa bitumena (kg/m^3).

Rafi i ost. (2011) su analizirali uticaj količine RCA i količine upotrebljenog bitumena na zapreminsku masu i sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini. Kao što je već pomenuto, ispitivanjima su obuhvaćene dve grupe asfalt betona koje su se razlikovale po granulometrijskom sastavu. Nominalno najkrupnije zrno agregata iznosilo je 19 mm i 25 mm. Na slikama 2.7 i 2.8 su prikazani rezultati sprovedenih ispitivanja.

Sa povećanjem sadržaja RCA, opada zapreminska masa asfalt betona. Ovaj trend je posledica veće poroznosti RCA u odnosu na prirodni agregat i potrebe za većom količinom bitumena da bi se dobila ista zapreminska struktura kao kod mešavina sa prirodnim agregatom. Veće vrednosti zapreminskih masa dobijene su na mešavinama sa većim učešćem krupnog agregata u granulometrijskom sastavu. Ipak, kod takvih mešavina je izraženija i redukcija zapreminske mase sa povećanjem sadržaja RCA. Sa povećanjem sadržaja bitumena do određene vrednosti, raste zapreminska masa mešavine, jer bitumen u mešavini ima ulogu lubrikanta koji omogućava da se zrna agregata lakše zbiju. Ovakav trend je manje izražen pri većim sadržajima bitumena, jer preveliki sadržaj bitumena stvara deblji sloj bitumena oko zrna agregata, razdvaja ih i dovodi do smanjenja zapreminske mase mešavine.

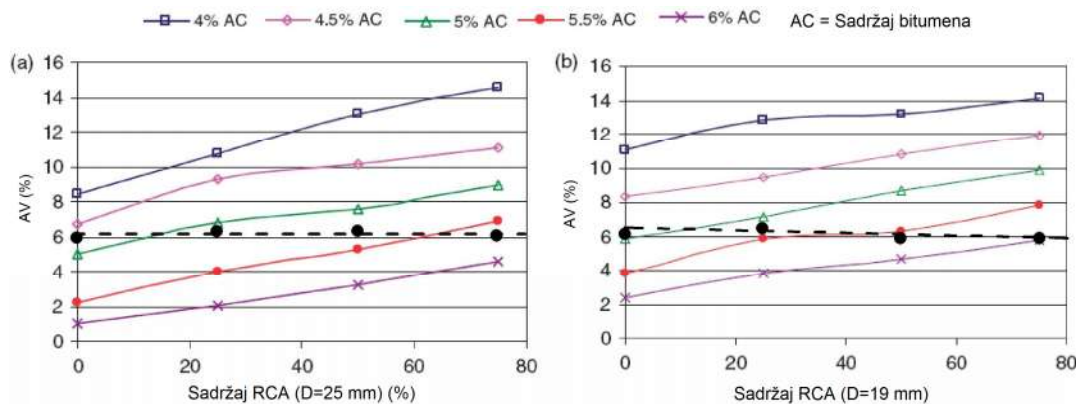
Manja zapreminska masa RCA u poređenju sa prirodnim agregatom, uz prateći uticaj povećanja sadržaja bitumena, utiče i na smanjenje maksimalne zapreminske mase asfaltne mešavine (Arabani i ost. 2013; Bhusal & Wen 2013).



Slika 2.7 Zapreminska masa asfalta u funkciji količine bitumena i RCA

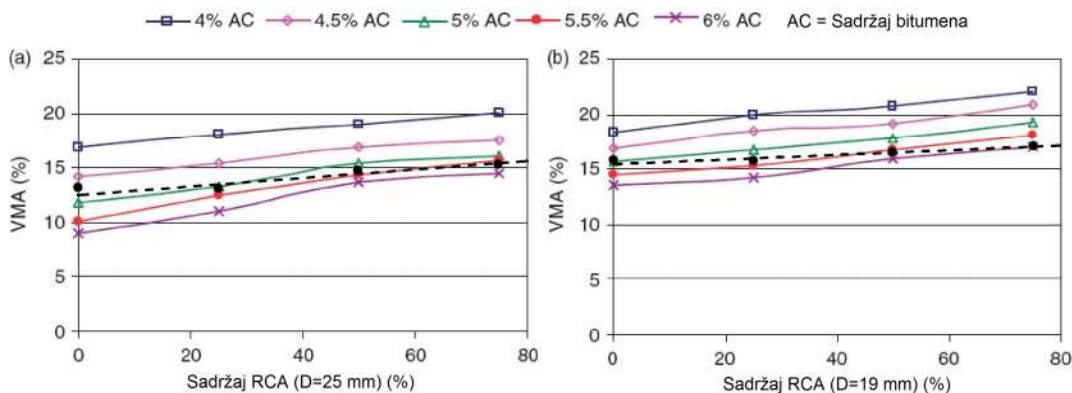
(izvor: Rafi i ost. 2011)

Sa povećanjem sadržaja RCA raste i sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini (AV), pri svim upotrebljenim količinama bitumena. Ovo je posledica povećanog upijanja RCA u odnosu na prirodni agregat, usled čega se redukuje efektivna količina bitumena koja popunjava šupljine u mineralnoj mešavini. Sadržaj šupljina je malo veći kod sitnozrnije mešavine zbog veće specifične površine i većeg VMA. Očekivano, sa povećanjem sadržaja bitumena smanjuje se AV.



Slika 2.8 Sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini u funkciji količine bitumena i RCA

(izvor: Rafi i ost. 2011)



Slika 2.9 Sadržaj šupljina mineralne mešavine u funkciji količine bitumena i RCA

(izvor: Rafi i ost. 2011)

Sa povećanjem sadržaja RCA primetan je i porast VMA (slika 2.9). Veća poroznost RCA u odnosu na prirodni agregat zahteva veću količinu bitumena za popunjavanje pora i na taj način utiče na trend rasta VMA u mešavini. Kod mešavina sa sitnijim

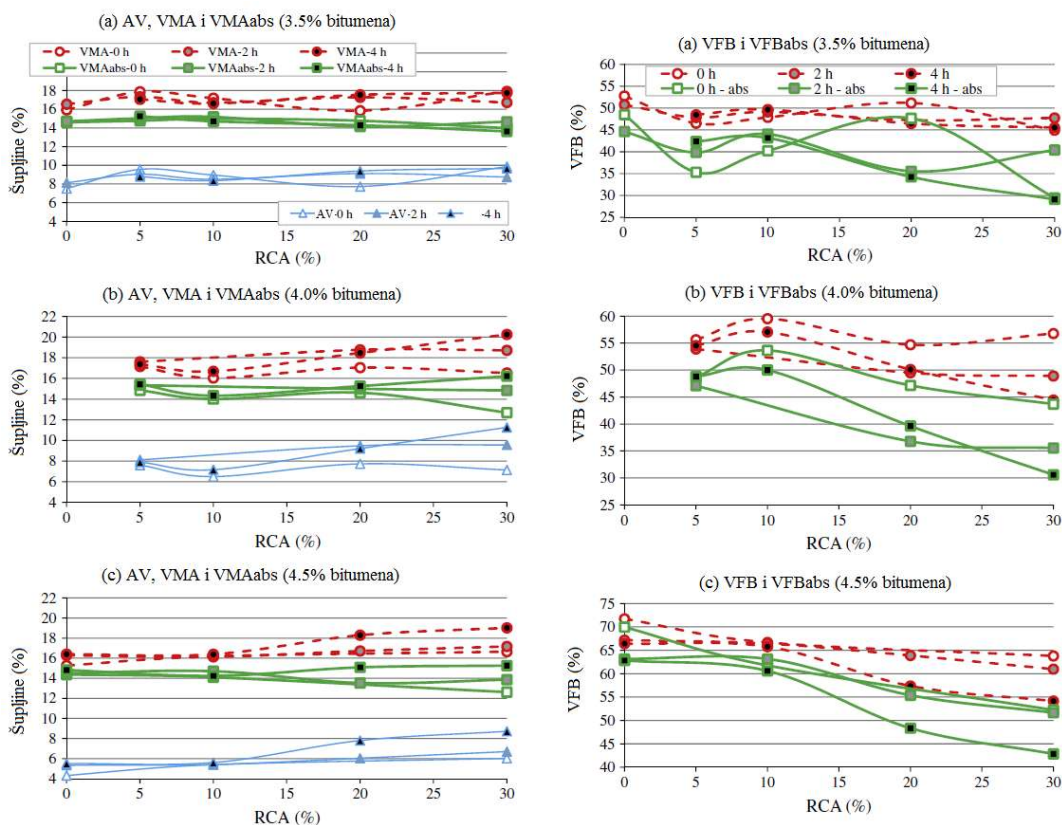
agregatom dobijene su veće vrednosti VMA iz istih razloga kako je to objašnjeno u slučaju AV. Mešavine sa većim sadržajem bitumena su imale manji sadržaj VMA.

Na osnovu pomenutih radova, može se zaključiti da povećanje sadržaja RCA u asfaltnoj mešavini utiče na povećanje AV i VMA i pored povećanog sadržaja bitumena, što može dovesti do manje efikasnosti prilikom zbijanja takvih mešavina.

Imajući u vidu da se prilikom projektovanja asfaltne mešavine definiše optimalan sadržaj bitumena (OBC), sa kojim se kasnije i spravlja asfaltna mešavina, izvršena je i analiza promene AV i VMA u funkciji količine upotrebljenog RCA, kod asfaltna sa optimalnim sadržajem bitumena. U tom cilju, vrednosti OBC, koje su za predmetne asfaltne mešavine utvrđene laboratorijskim ispitivanjima (Rafi i ost. 2011), ucrtane su crnim kružnim tačkama na slikama 2.8 i 2.9. Na taj način dobijene su procenjene vrednosti AV i VMA, u asfaltnim mešavinama sa optimalnim sadržajem bitumena. Linearnom regresijom tih vrednosti dobijene su zavisnosti AV i VMA u funkciji RCA, pri optimalnim sadržajima bitumena. U slučaju VMA i dalje je primetna tendencija porasta tih vrednosti sa povećanjem sadržaja RCA, ali su ti priraštaji blaži u poređenju sa vrednostima VMA koje su izmerene na mešavinama, sa različitim sadržajem bitumena. Što se tiče vrednosti AV, one su u najvećem broju slučajeva konstantne, i odgovaraju usvojenom sadržaju zaostalih šupljina od 6%, sa kojim se ušlo u postupak projektovanja asfaltne mešavine. I neki drugi autori su kod mešavina sa prethodno određenim OBC došli do zaključaka da veći sadržaj RCA dovodi do blagog povećanja VMA, uz praktično nepromenjen sadržaj AV, što je posledica podešavanja sadržaja veziva (Pasandín & Pérez 2013; Ektas & Karacasu 2012).

Prilikom ispitivanja zapreminskih parametara asfalt betona, Pasandín & Pérez (2014a) su uzeli u obzir i količinu apsorbiranog bitumena, pa su tako analizirali apsolutne vrednosti VMA_{abs} i VFB_{abs} , kao i VMA i VFB kod kojih su zanemarili količinu apsorbiranog bitumena. Na ispitivanim uzorcima, osim sadržaja RCA i sadržaja bitumena, varirano je i vreme "starenja", tj. vremenski period u kom je asfaltna mešavina pre ugradnje izlagana temperaturi mešanja $T = 170$ °C. Vreme "starenja"

iznosilo je 0 h, 2 h i 4 h. Na slici 2.10 prikazani su pomenuti zapreminski parametri asfaltnih mešavina u funkciji sadržaja RCA, količine bitumena i vremena "starenja".



Slika 2.10 AV, VMA, VMA_{abs}, VFB i VFB_{abs} u funkciji upotrebjene količine bitumena,

RCA i vremena "starenja" (izvor: Pasandín & Pérez 2014a)

Promena vrednosti AV i VMA, sa povećanjem sadržaja RCA i bitumena u asfaltnim mešavinama, menja se u skladu sa zaključcima do kojih su došli Rafi i ost. (2011). Dodatno je pokazano da duže vreme "starenja" mešavine utiče na povećanu apsorpciju bitumena. Kada se količina apsorbovanog bitumena uzme u obzir, VMA_{abs} ima tendenciju pada ili stagniranja sa povećanjem sadržaja RCA. Ovakvi rezultati ukazuju na mogućnost precenjivanja vrednosti VMA, ukoliko se zanemari apsorpcija bitumena.

Za razliku od prethodnih autora koji su ispitivanja zapreminskih karakteristika sproveli na asfaltnim mešavinama sa optimalnim sadržajem bitumena, Mills-Beale & You (2010) su došli do zaključka da sa povećanjem sadržaja RCA, procenat šupljina u

mineralnoj mešavini opada, uz zanemarljiv porast procenta zaostalih šupljina. Mills-Beale & You smatraju da usled povećanja sadržaja RCA raste i količina apsorbovanog bitumena, što smanjuje količinu efektivnog bitumena, a samim tim i vrednosti VMA. Do sličnih zaključaka su došli Shen & Du (2005).

Iako su izvedeni zaključci pojedinih autora u pogledu uticaja količine upotrebljenog RCA na vrednosti VMA kontradiktorni, u oba slučaja nagibi zavisnosti $VMA=VMA(RCA)$ nisu bili veliki, pa se ovakve razlike verovatno mogu pripisati različitom kvalitetu upotrebljenog agregata i različitim metodama projektovanja asfaltne mešavine (npr. u pojedinim slučajevima je prilikom projektovanja mešavina zahtevan tačno određen sadržaj AV, u drugim debljina bitumenskog filma, zatim zaostali sadržaj bitumena u porama, itd.).

Po pitanju uticaja količine upotrebljenog agregata na procenat šupljina ispunjenih bitumenom (VFB), nema oprečnih mišljenja. Svi izvori su saglasni da veći sadržaj RCA, usled veće apsorpcije bitumena, dovodi do smanjenja efektivne količine bitumena koja popunjava šupljine u mineralnoj mešavini i samim tim smanjenja vrednosti VFB.

2.3.4 Stabilnost i tečenje po Maršalu

U najvećem broju slučajeva, projektovanje asfaltnih mešavina sa dodatkom recikliranog betona vršeno je u skladu sa Maršalovom procedurom, što pokazuje da je i danas to najčešće primenjivana metoda. Prilikom projektovanja asfaltnih mešavina po Maršalu stabilnost i tečenje predstavljaju važne parametre koji se određuju, jer upravo ove vrednosti definišu čvrstoću i fleksibilnost asfaltnog betona. Stabilnost po Maršalu asfaltnog betona predstavlja maksimalnu silu koju materijal može izdržati prilikom ispitivanja cilindričnih uzoraka na indirektno zatezanje. Opit se sprovodi na temperaturi od 60°C, sa konstantnim priraštajem deformacije od 50 mm/min. Deformacija uzorka koja odgovara maksimalnoj vrednosti sile predstavlja tečenje po Maršalu.

Rezultati sprovedenih ispitivanja su pokazali da granulometrijski sastav upotrebljenog RCA ima najveći uticaj na stabilnost i tečenje asfaltnih mešavina. Naime, asfaltne

mešavine kod kojih je RCA korišćen kao filer, ili kod kojih je vršena delimična zamena sitnog prirodnog agregata recikliranim, pokazale su veći stepen stabilnosti od kontrolne mešavine (Solyman 2005; Wong i ost. 2007; Sun i ost. 2011; Arabani & Azarhoosh 2012; Arabani i ost. 2013). Prilikom analize ovih parametara treba imati na umu da stabilnost zavisi i od unutrašnjeg trenja i od kohezije mešavine. Kako unutrašnje trenje predstavlja kombinaciju trenja i uklještenosti zrna agregata, ono samim tim zavisi od oblika zrna, površinske teksture i količine bitumena. Zbog hrapave površine zrna RCA, kontaktna površina zrna u mešavini je veća, pa je veće i unutrašnje trenje. Takođe, poroznija struktura zrna utiče na smanjenje efektivne količine bitumena, što povećava stabilnost. U ostalim mešavinama u kojima je sitan prirodni agregat u potpunosti zamenjen recikliranim agregatom, sa izuzetkom mešavine prikazane u radu koji su objavili Sun i ost. (2011), izmerene su niže vrednosti tečenja u poređenju sa kontrolnim mešavinama. Zbog većeg unutrašnjeg trenja, bolje uklještenosti zrna i manje količine efektivnog bitumena, asfaltne mešavine sa dodatkom sitnog RCA imaju manje tečenje po Maršalu u poređenju sa kontrolnim mešavinama.

Upotreba i sitnog i krupnog ili samo krupnog RCA u asfaltnim mešavinama u većini slučajeva imala je negativan efekat na stabilnost i tečenje po Maršalu (Rafi i ost. 2011; Zhu i ost. 2012; Pasandín & Pérez 2013; Chen & Wong 2013; Arabani i ost. 2013; Bhusal & Wen 2013; Brasileiro i ost. 2014). U pomenutim ispitivanjima stabilnost je imala tendenciju pada, a tečenje tendenciju rasta sa povećanjem sadržaja RCA. Ovakvo ponašanje asfaltne mešavine se može objasniti slabijim kvalitetom RCA, pre svega manjom čvrstoćom, u odnosu na prirodni agregat. Ipak, u većini slučajeva su i stabilnost i tečenje zadovoljavali tehničke uslove.

Suprotno ovim rezultatima, Zulkati i ost. (2013) su došli do zaključka da mešavine sa dodatkom 37% krupnog RCA poseduju cca. 30% veću stabilnost od kontrolne mešavine. Povećana stabilnost objašnjena je boljom upakovanošću zrna agregata, koja je posledica promene granulometrijskog sastava nastalog prilikom ugradnje mešavine usitnjavanjem slabijih zrna RCA. Ovakav uticaj krupnog RCA na stabilnost asfaltnih mešavina potvrdili su Perez i ost. (2012a) svojim istraživanjima.

2.3.5 Otpornost na dejstvo vode

Oštećenja asfaltnih slojeva kolovoznih konstrukcija usled dejstva vode posledica su narušavanja athezije između bitumena i agregata. Smanjenje athezije između bitumena i agregata, u prisustvu vlage, uzrokuje skidanje bitumena sa zrna agregata (slika 2.11), što kasnije može uticati na pojavu brojnih oštećenja fleksibilnih kolovoza, npr. pojave kolotraga i oštećenja usled zamora materijala.



Slika 2.11 Asfaltni uzorak bez oštećenja (levo) i sa oštećenjem usled dejstva vode (desno)

Osetljivost asfaltnih mešavina na dejstvo vode je kompleksan fenomen i zavisi od mnogo faktora prikazanih u daljem tekstu. Ipak, pojedinačnim analiziranjem ovih faktora ne može se sa sigurnošću predvideti osetljivost asfaltne mešavine na dejstvo vode.

- **Karakteristike bitumena.** Viskoznost bitumena je važna, jer može ukazati na veću koncentraciju asfaltena (velikih polarnih molekula), koji obezbeđuju bolje prijanjanje bitumena za agregat. Zbog toga su asfaltne mešavine sa bitumenima manje viskoznosti osetljivije na dejstvo vode.

- **Karakteristike agregata.** Generalno, hidrofoban agregat je manje osetljiv na spiranje bitumena od hidrofilnog agregata. Na ove karakteristike agregata najviše utiču hemijski sastav, poroznost i veličina pora. Sa aspekta otpornosti na dejstvo vode korisni elementi u sastavu agregata su gvožđe, magnezijum i aluminijum, a štetni natrijum i kalijum (Hick 1991).

Veličina pora predstavlja kritičan faktor. Ukoliko su pore u agregatu dovoljno velike da mogu da apsorbuju bitumen, onda je asfaltna mešavina sa takvim agregatom osetljivija na dejstvo vode. Naime, mešavine sa poroznim agregatom zahtevaju više bitumena, jer deo bitumena apsorbuju zrna agregata, a ostatak, tzv. efektivni bitumen se troši na popunjavanje šupljina u mineralnoj mešavini. Ukoliko se prilikom definisanja sadržaja bitumena ne uzme u obzir apsorbovani bitumen, efektivna količina bitumena neće biti dovoljna da obloži sva zrna agregata bitumenskim filmom, pa će poroznost takve mešavine biti veća. Usled toga, biće omogućen lakši pristup vazduhu koji će dovesti do brže oksidacije bitumena i veće osetljivosti na dejstvo vode.

- **Sadržaj vazduha.** Kada je sadržaj šupljina u asfaltnim mešavinama veći od 8%, može doći do međusobnog povezivanja pora i lakšeg prodora vode kroz asfaltno slojeve. Tada, usled velikog pritiska u porama i ekspanzije leda mogu nastati oštećenja.
- **Vremenski uslovi pri ugrađivanju.** Ugradnja asfaltno mešavine pri niskim temperaturama može uticati na nedovoljnu zbijenost asfaltnog sloja, što rezultuje većom poroznošću. Do povećanja vlage u asfaltnoj mešavini može doći i u slučajevima kada se radovi izvode u vlažnim uslovima.
- **Klimatski uslovi.** Vlažnija klima i temperaturne promene (naročito ciklusi odmrzavanja i smrzavanja) povećavaju osetljivost asfaltnih mešavina na dejstvo vode.
- **Saobraćaj.** Ukoliko je voda prisutna u asfaltnim slojevima, povećanje saobraćajnog opterećenja će ubrzati proces oštećenja. Naime, ukoliko je voda zarobljena u asfaltnim porama, pod dejstvom saobraćajnog opterećenja povećaće

se unutrašnji naponi u porama, što može dovesti do odvajanja bitumena od agregata.

Za procenu otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode koristi se više različitih opita:

- opit u ključaloj vodi;
- opit smrzavanja i odmrzavanja;
- opit aksijalnim pritiskom kondicioniranih i kontrolnih uzoraka;
- opiti indirektnim zatezanjem kondicioniranih i kontrolnih Maršalovih uzoraka;
- Lotmanov test;
- Hamburški opit točkom itd.

U većini ovih ispitivanja uzorci se dele u dve grupe: kontrolne (etalonske) uzorke koji se neguju na suvom i uzorke kondicionirane u vodi. Ocena otpornosti asfaltnog betona na dejstvo vode daje se na osnovu odnosa prosečnih vrednosti čvrstoća ove dve grupe uzoraka. U tabeli 2.2 su prikazane zahtevane vrednosti odnosa čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR – Indirect Tensile Strength Ratio) za pojedine evropske države modifikovane od strane autora (Chomicz-kowalska i ost. 2016).

Tabela 2.2 Tehnički uslovi za asfaltne mešavine u odnosu na ITSR

(izvor: Chomicz-kowalska i ost. 2016)

Država	Zahtevana minimalna vrednost ITSR (%)			Ciklusi zamrzavanja
	Habajuci sloj	Vezni sloj	Noseći sloj	
Holandija	80	70	70	Ne
Nemačka	NR	NR	NR	Ne
Norveška	70	70	70	Ne
Poljska	90	80	70	Da
Slovačka	80	80	80	Ne
Slovenija	NR	NR	NR	Ne
Srbija	NR	NR	NR	Ne
Turska	80	80	80	Da
Švedska	75	75	75	Ne

*NR – nije definisano

Za asfaltne mešavine sa agregatom od recikliranog betona, zbog prisustva zaostalog cementnog maltera i poroznije strukture od prirodnog agregata, otpornost na dejstvo vode predstavlja jedan od najstrožijih uslova koje treba zadovoljiti. Koliko je važna otpornost na dejstvo vode asfaltnih mešavina sa dodatkom RCA, govori i veliki broj sprovedenih ispitivanja. Pasandín & Pérez (2015) su dali dobar pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode ovakvih mešavina. Predmetni rezultati su dopunjeni sa rezultatima iz još nekih reprezentativnih radova i prikazani su u tabeli 2.3.

Različita hemijska priroda bitumena i agregata određuje njihovu interakciju i utiče na karakteristike veze. Pošto bitumen predstavlja kiselu sredinu, agregati sa visokim sadržajem kalcita, kakav je krečnjak, ostvaruju dobru vezu sa njim. Ovakve agregate bitumen lakše obavija i stvara jače veze u odnosu na agregate sa većim sadržajem silicijuma, kakav je granit (Zulkati i ost. 2013). Postojanost kalcita u recikliranom agregatu, u sklopu cementnog maltera, trebala bi da pojača atheziju bitumena i agregata i poveća otpornost RCA asfaltnih mešavina na dejstvo vode. Ipak, u većini slučajeva se pokazalo da sa povećanjem sadržaja RCA u asfaltnim mešavinama, njihova otpornost na dejstvo vode opada. U najvećem broju slučajeva sadržaj cementnog maltera je relativno mali (oko 15-20%), što znači da kalcit nije dominantna komponenta u okviru RCA. Umesto toga, velika apsorpcija bitumena dovodi do smanjenja efektivne količine bitumena i debljine bitumenskog filma, ostavljajući više prostora za vlagu, što povećava osetljivost ovakvih mešavina na dejstvo vode. I pored svega navedenog, u većini slučajeva asfaltne mešavine sa recikliranim agregatom zadovoljavaju uslove propisane standardom.

2 Pregled literature

Tabela 2.3-1 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat (%)	Zahtev standarda	Zaključak
Shen i Du (2005)	Indeks zaostale čvrstoće (RSI)	MTC (Taiwan)	0 (AC-10)	92.1	>75%	Mešavine sa RCA zadovoljavaju zahteve
			50 (AC-10)	89.2		
			100 (AC-10)	87.7		
			0 (AC-20)	93.6		
			50 (AC-20)	91.9		
Paranavithana & Mohajerani (2006)	Procenat ogoljenja agregata	AS 2758 (Australia)	RCA	12.0	<10%	Mešavine sa RCA ne zadovoljavaju zahteve
			Bazalt	1.0		
			RCA	34.0		
Perez et. al (2007)	Odnos čvrstoća pri indir. zat. (ITSR)	NLT-161 i NLT-162 (Španija)	Bazalt	10.0	<35%	Mešavine sa 50% RCA nisu pokazale zadovoljavajuću otpornost
			0 (vezni sl.)	77.0		
			50 (vezni sl.)	63.7		
			0 (noseći sl.)	79.3		
Mills-Beale & You (2014)	Odnos čvrstoća pri indir. zat. (ITSR)	ASTM D4867 / D4867 - M04 (SAD)	50 (noseći sl.)	50.3	>75%	Sa povećanjem sadržaja RCA raste osetljivost na dejstvo vode.
			25	>75		
			35	>75		
			50	>75		
			75	<75		

2 Pregled literature

Tabela 2.3-2 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Cho i ost. (2011)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	ASTM D4867 i KSF2398 (Koreja)	0	>0.7	>0.7	Mešavine sa RCA zadovoljavaju zahteve
			RCA (>4.75mm)	>0.7		
			RCA (<4.75mm)	>0.7		
			100	>0.7		
Bushal i Wen (2013)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	WSDOT T718 (USA)	0 (RCA ₁)	88	>80%	Dodatak RCA povećava osetljivost mešavine na dejstvo vode.
			20 (RCA ₁)	87		
			40 (RCA ₁)	82		
			60 (RCA ₁)	80		
			80 (RCA ₁)	77		
			100 (RCA ₁)	76		
			0 (RCA ₂)	88		
			20 (RCA ₂)	84		
			40 (RCA ₂)	82		
			60 (RCA ₂)	81		
80 (RCA ₂)	81					
100 (RCA ₂)	80					

2 Pregled literature

Tabela 2.3-3 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Perez i ost. (2012b)	Odnos čvrstoća pri aksijalnom pritisku kondicioniranih i kontrolnih uzoraka	NLT-162 (Španija)	0	85	>75%	Mešavine su spravljane sa dva tipa filera: cementom i krečnim filerom. Oba tipa mešavina sa RCA pokazuju slabu otpornost na dejstvo vode
			20	59		
			40	54		
			60	63		
			0	69		
			20	79		
			40	51		
Zhu i ost. (2012)	Zaostala stabilnost po Maršalu (RMS) Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	JTJ 052-2000 (Kina)	0	>80	>80%	Upotreba RCA proizvodi HMA sa slabom otpornošću na dejstvo vode
			63.1	>80		
			100	>80		
			0	>75		
			63.1	>75		
100	>75					

2 Pregled literature

Tabela 2.3-4 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Lee i ost. (2012)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	AASHTO T283 (Tajvan)	0	81.5	>70 %	Sve mešavine zadovoljavaju uslove standarda. Zbog povećane apsorpcije bitumena sa povećanjem sadržaja PCRCA* opada otpornost na dejstvo vode.
			25	79.1		
			50	74.5		
			75	73.1		
			100	70.8		
Zulkati i ost. (2013)	Zaostala stabilnost po Maršalu	STP 204-22 (Singapur)	0	95.3	Nije naznačeno	Mešavina sa RCA je osetljivija na dejstvo vode
Pasandini & Perez (2013)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	UNE-EN 12697-12 (Španija)	0	82.8	>80 %	Kondicioniranje mešavine pre ugradnje na T = 170 °C u trajanju od 4 h poboljšava njenu otpornost na dejstvo vode.
			5 (>4mm)	102.5		
			10 (>4mm)	96.5		
			20 (>4mm)	94.2		
			30 (>4mm)	98.7		

*PCRCA predstavlja zrna RCA koja su obložena cementnom pastom sa dodatkom zgre

2 Pregled literature

Tabela 2.3-5 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Chen i ost. (2011)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	EN-12697-12 (Španija)	0%	86.3	Nije naznačeno	Uzorci su izlagani 1, 2 i 3 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Upotreba recikliranog filera može poboljšati otpornost mešavine na dejstvo vode
			75.3			
			71.3			
			4% (filer)	90.5		
			80.4			
74.5						
Wu i ost. (2013)	Odnos zaostale stabilnosti (MS0) Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	RIOH (Kina)	0	>80	>80%	Mešavine zadovoljavaju tehničke uslove, ali porozna i hrapava površina RCA utiče na manju otpornost na dejstvo vode
			RCA (>4.75mm)	>80		
			RCA (<4.75mm)	>80		
			0	>80		
			RCA (>4.75mm)	>80		
RCA (<4.75mm)	>80					

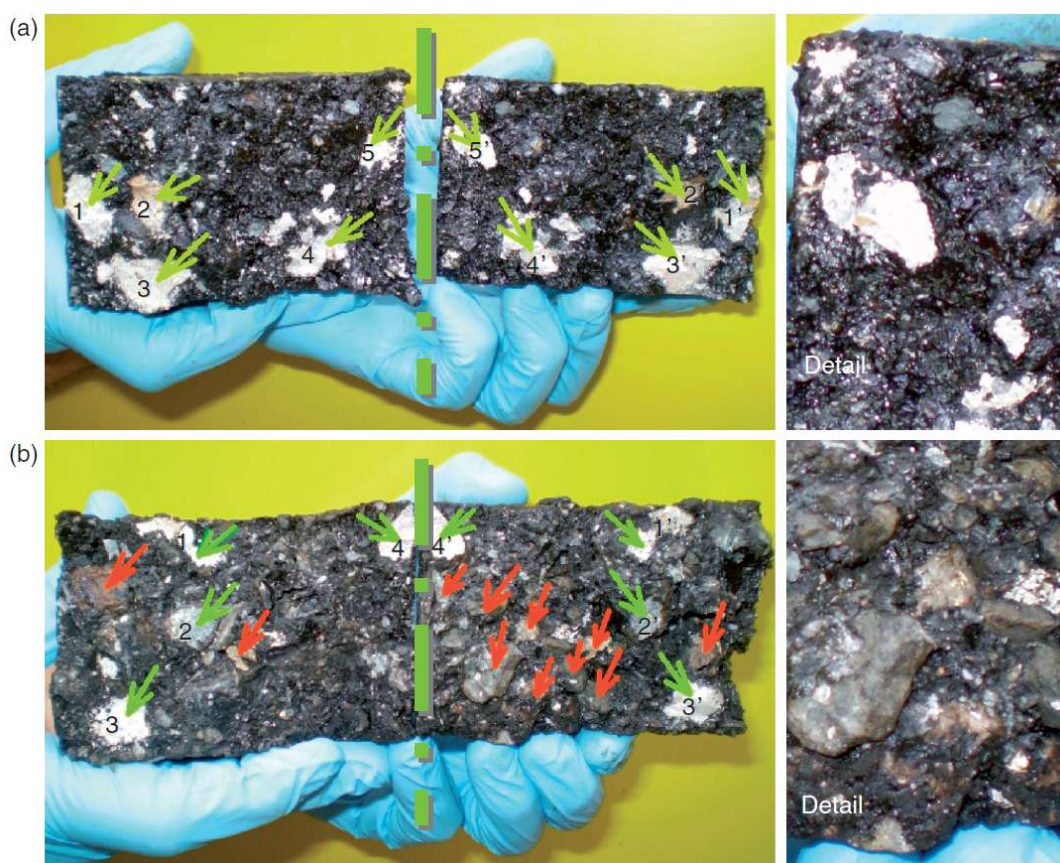
Tabela 2.3-6 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Al-Baiti i ost.	Gubitak stabilnosti	Roads Administration (Kuwait)	0	24.3	Nije naznačeno	Gubitak stabilnosti opada sa povećanjem sadržaja RCA do 50%, nakon čega raste
			25	23.1		
			50	21.8		
			75	22.6		
Perez i ost. (2007)	Odnos čvrstoća pri aksijalnom pritisku kondicioniranih i kontrolnih uzoraka	NLT-162 (Španija)	100	23.2	>75 %	Rezultati pokazuju da mešavine sa dodatkom RCA, bez posebnog tretmana ne zadovoljavaju standardom propisane uslove.
			0 (>4mm)	76.9		
			50 (>4mm)	63.7		
			0 (>4mm)	79.3		
Kuity i ost. (2014)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	ASTM D4867 (Indija)	50 (>4mm)	50.2	Nije naznačeno	
			filer	96.3		

Tabela 2.3-7 Pregled rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo vode asfalt betona sa dodatkom RCA

Autor	Parametar	Standard (država)	RCA (%)	Rezultat	Zahtev standarda	Zaključak
Perez i ost. (2012a)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	EN-12697-12 (Španija)	0	88	>80%	Mešavine su spravljane sa dva tipa prirodnog agregata: škriljcem i krečnjačkim dolomitom. Povećan sadržaj RCA smanjuje TSR kod oba tipa mešavina, što je objašnjeno slabom athezijom RCA
			20	70		
			40	65		
			60	60		
			0	96		
			20	86		
			40	62		
Pasandini & Perez (2014b)	Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR)	EN 12697-12 (Španija)	5 (>4mm)	82.1	>80 %	Mešavine zadovoljavaju propisane uslove nakon tretmana RCA, 5% bitumenskom emulzijom,
			10 (>4mm)	86.8		
			20 (>4mm)	89.1		
			30 (>4mm)	86.3		

Izrazito niske otpornosti asfaltnih mešavina sa RCA na dejstvo vode mogu se pripisati kombinaciji visokog sadržaja šupljina kod nosećih slojeva, velikog sadržaja raznih nečistoća (gline, opeke, keramičkih pločica itd.) i slabije athezije agregata i cementnog maltera kod RCA (Perez i ost. 2007; Pérez i ost. 2012a). Na slici 2.12 prikazano je kako nakon potapanja u vodu, a usled ispiranja bitumena sa zrna RCA, do loma dolazi po kontaktu bitumen-agregat (crveni markeri). Suprotno tome, na suvim uzorcima do loma u većini slučajeva dolazi po cementnom kamenu (zeleni markeri), što se vidi i sa leve i sa desne strane u odnosu na osu simetrije.



Slika 2.12 Izgled uzoraka asfaltnje mešavine nakon ispitivanja indirektnim zatezanjem:
a) suvo stanje i b) vlažno stanje (izvor: Perez i ost. 2012a)

Chen i ost. (2011) su pokazali da upotreba RCA kao filera u asfaltnim mešavinama povećava njihovu otpornost na dejstvo vode u odnosu na kontrolnu mešavinu kod koje je kao filer korišćeno krečnjačko brašno. S obzirom da se komponentalni materijali

prilikom spravljanja asfaltne mešavine doziraju maseno (masa filera ostaje ista), zbog manje zapremine mase RCA filera u odnosu na krečnjačko brašno, dozirana količina RCA filera imaće veću zapreminu od krečnjačkog brašna. Dobro je poznato da veća zapremina, zbog veće specifične površine, zahteva i veću količinu bitumena. Autori smatraju da upravo veća količina bitumena u asfaltnim mešavinama sa RCA filerom utiče na veću otpornost na dejstvo vode.

Bolje ponašanje asfaltne mešavine u prisustvu vlage Pasandín & Pérez (2013) su postigli dužom negom mešavine na temperaturi mešanja. Naime, mešavina je pre ugradnje držana u sušnici na temperaturi od 170 °C u trajanju od 4 h, ostvarujući na taj način bolju obavijenost zrna bitumenom i ostavljajući manje šupljina kroz koje može da se kreće voda.

Isti autori su premazivanjem RCA bitumenskom emulzijom 5% ECL-2d (sporovezujuća katjonska emulzija) poboljšali svojstva recikliranog agregata u pogledu njegove osetljivosti na dejstvo vode, do nivoa prirodnog agregata (Pasandín & Pérez 2014b). Bitumenska emulzija preseca pore u cementnom kamenu i na taj način sprečava prodiranje vode i povećava čvrstoću maltera, istovremeno smanjujući mogućnost fragmentacije materijala.

Ispitivanje koje su sproveli Bhusal & Wen (2013) pokazalo je da asfaltne mešavine sa 80% i 100% RCA, bez dodatka anti-stripping aditiva (koji poboljšavaju vezu između bitumena i agregata npr. kreč, cement, hemijski aditivi itd.) ne zadovoljavaju potrebne tehničke uslove u pogledu otpornosti na dejstvo vode (ITSR>80%). Ipak, mešavine u kojima je količina RCA iznosila 20%, 40% i 60% u potpunosti zadovoljavaju ove uslove. Upotrebom anti-stripping aditiva u količinama 0.25%, 0.5%, 0.75% i 1% pokazano je da čak i sa najmanjom količinom ovog aditiva sve mešavine zadovoljavaju uslove propisane standardom.

2.3.6 Otpornost na trajnu deformaciju

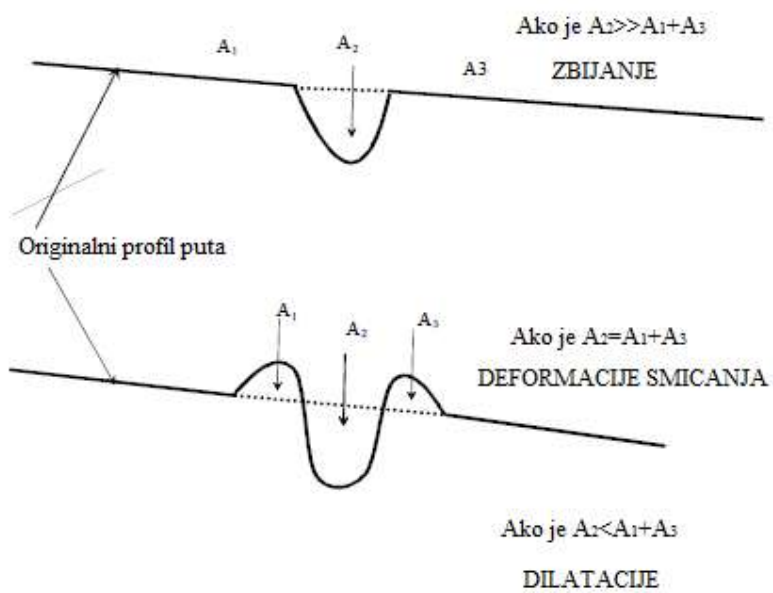
Trajne deformacije, tj. kolotrazi predstavljaju jedan od najznačajnijih tipova oštećenja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija (Barksdale 1967). Generalno, kod fleksibilnih kolovoznih konstrukcija kolotrazi mogu nastati usled akumulacije trajnih deformacija u gornjim asfaltnim slojevima, usled trajne deformacije podloge ili posteljice konstrukcije, kao i usled habanja površinskog sloja lancima ili gumama sa ekserima tokom zime.

Ekonomski faktori, kao što su tendencija da se manjim brojem vozila transportuje veća količina dobara i da se ušteda goriva ostvari putem povećanja opterećenja teretnih vozila, dovode do povećanja pritiska u pneumaticima i povećanja osovinskog opterećenja i smanjenja površine na kontaktu pneumatik-kolovoz. Usled ovoga dolazi do veće koncentracije napona i većih trajnih deformacija, što je naročito izraženo u gornjim asfaltnim slojevima, pa im se stoga mora posvetiti dodatna pažnja sa aspekta pojave kolotruga. U prilog tome ide i anketa sprovedena u sklopu COST 333 (1999) projekta koja je imala za cilj da utvrdi koji su to najčešći tipovi oštećenja koji se javljaju na putevima u 22 anketirane evropske zemlje. Prema rezultatima ankete, trajne deformacije asfaltnih slojeva označene su kao najčešći oblik oštećenja.

U asfaltnim slojevima, trajne deformacije (kolotrazi) se mogu definisati kao nepovratne deformacije koje nastaju usled saobraćajnog opterećenja, uglavnom na visokim temperaturama, u tragovima pneumatika (slika 2.13). Dva osnovna mehanizma koja dovode do pojave kolotruga su zbijanje (smanjenje zapremine) i/ili deformacija smicanja (bez promene zapremine). Deformacija smicanja asfaltnih slojeva se manifestuje velikim bočnim pomeranjima i obično se javlja do dubine od 100 mm (Nevelt & Thanfold. 1988; Brown & Cross 1992). Ipak, mogu se javiti i na većim dubinama asfaltnih slojeva ukoliko se ne koriste adekvatni materijali. U poređenju sa promenom zapremine (zbijanjem), deformacije smicanja predstavljaju dominantniji mehanizam za pojavu kolotruga (Hofstra & Klomp 1972; Eisenmann & Hilmer 1987). Na slici 2.14 ilustrovani su pomenuti mehanizmi pojave kolotruga.

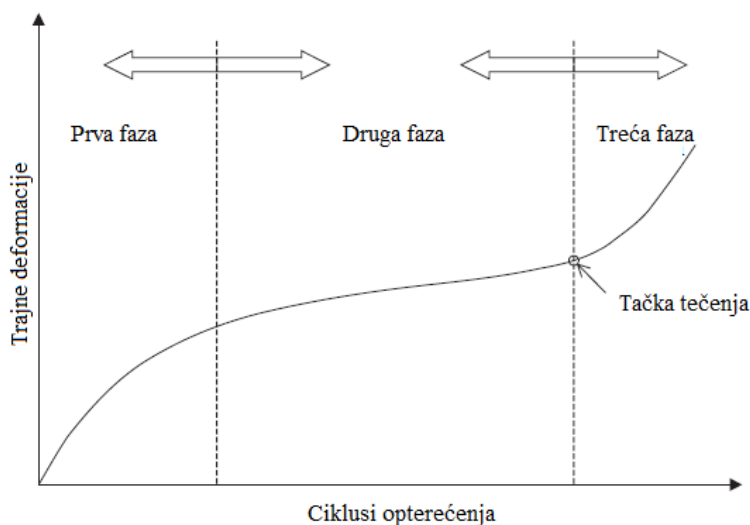


Slika 2.13 Trajne deformacije asfaltnih slojeva



Slika 2.14 Ilustracija mehanizama pojave kolotruga (izvor: Garba 2002)

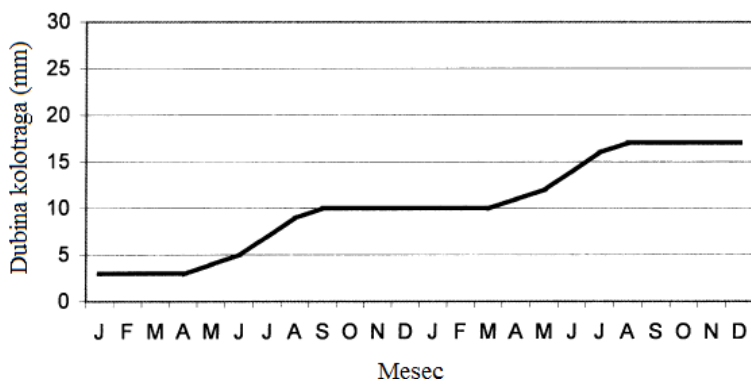
Sa povećanjem saobraćaja u vidu broja prelaza i veličine osovinskog opterećenja dolazi i do povećanja trajnih deformacija. Na slici 2.15 prikazan je klasičan oblik dijagrama trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja. Sa apliciranjem saobraćajnog opterećenja, u prvoj fazi, dolazi do malih zapreminskih deformacija koje su posledica zbijanja asfaltnih slojeva. Nagib krive u ovoj fazi opada sa povećanjem broja ciklusa opterećenja. U drugoj fazi priraštaj trajnih deformacija je konstantan u toku vremena i ima blaži trend u odnosu na početni stadijum. Deformacije u ovom stadijumu nastaju usled napona smicanja u asfaltnim slojevima, koji dovode do premeštanja (smicanja) asfaltne mase bez promene zapremine. Tako u zoni ispod pneumatika dolazi do formiranja udubljenja, a u bočnim zonama do izdizanja asfaltnih slojeva. Deformacije nastale na ovaj način čine najveći deo ukupnih trajnih deformacija, a njihovo formiranje se odvija tokom većeg dela životnog veka kolovoza. Poslednju fazu karakteriše ubrzan priraštaj plastičnih deformacija u odnosu na broj ciklusa opterećenja. Deformacije nastale u trećoj fazi ukazuju na strukturni lom i dovode do gubitka upotrebljivosti kolovoza.



Slika 2.15 Klasičan oblik dijagrama trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja (izvor: NCHRP RPT 580)

Formiranje kolotruga nije uobičajeno tokom jesenjih i zimskih meseci, kada je asfaltna mešavina generalno veoma kruta zbog niskih temperatura, a nevezani slojevi (podloga) i posteljica u nekim slučajevima čak i smrznuti. Tokom proleća nosivost nevezanih

slojeva i posteljice je mala zbog velike vlažnosti, što potencijalno može uticati na stvaranje kolotruga. Krajem proleća i početkom leta, zbog smanjenja vlage u nevezanim slojevima i posteljici, može doći do usporavanja procesa formiranja kolotruga. I konačno tokom letnjih meseci, kada su temperature relativno visoke, krutost asfaltnih slojeva opada i dovodi do akumulacije trajnih deformacija u gornjim asfaltnim slojevima. Na slici 2.16 je prikazan uticaj sezonskih temperatura i vlažnosti na formiranje kolotruga.



Slika 2.16 Uticaj sezonskih efekata na kolotrage (izvor: NCHRP RPT 468-a)

Otpornost asfaltnih mešavina na pojavu trajnih deformacija je kompleksan fenomen i zavisi pre svega od karakteristika agregata, bitumena i njihove interakcije. Dodatno, sadržaj i starenje bitumena, kao i zapreminska struktura i uslovi na terenu bitno utiču na ponašanje asfaltne mešavine na visokim temperaturama. Uticaj različitih faktora, kao i efekti njihovih promena na trajnu deformaciju asfaltnih mešavina prikazani su u tabeli 2.4.

Detaljan pregled uticaja različitih faktora na trajnu deformaciju asfaltnih mešavina prikazao je i Muraya (2007). Tako na primer, zbog velikog uticaja sadržaja šupljina ispunjenih vazduhom (AV) i šupljina ispunjenih bitumenom (VFB) na pojavu kolotruga, pojedini postupci za projektovanje sastava asfaltnih mešavina propisuju dopuštene vrednosti AV i VFB. U Srbiji, opšti zahtevi za kolovozne konstrukcije (Putevi Srbije 2012) propisuju za asfaltne mešavine sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom u granicama od 3-7% i sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom u granicama od 50-77%. Svrha ovih

odredbi je da spreči prepunjavanje praznih prostora u mešavini bitumenom, usled povećanja njegove zapremine na visokim temperaturama. U suprotnom, pri malim sadržajima šupljina ispunjenih vazduhom u mešavini (<3%), može lako doći do pojave kolotruga (Roberts et al 1996).

Tabela 2.4 Otpornost na trajnu deformaciju asfaltnih mešavina - faktori uticaja
(Sousa i ost. 1994; Kandhal & Cooley 2003)

FAKTOR	PROMENA FAKTORA	UTICAJ PROMENE FAKTORA	
Agregat	Površinska tekstura	Glatka ka hrapavoj	Povećava
	Granulometrija	Otvorena ka zatvorenoj	Povećava
	Oblik	Zaobljena ka oštroivičnim	Povećava
	Krupnoća	Manje ka većem max zrnju	Povećava ¹
Bitumen	Krutost ²	Povećanje	Povećava
Asfaltna mešavina	Sadržaj bitumena	Povećanje	Smanjuje
	Sadržaj šupljina ³	Povećanje	Smanjuje
	Šupljine u mineralnoj mešavini ⁴	Povećanje	Smanjuje
	Način ugrađivanja	- ⁵	- ⁵
Uslovi na terenu	Temperatura	Povećanje	Smanjuje
	Stanje napona / deformacija	Povećanje pritiska u pneumaticima	Smanjuje
	Br. ciklusa opterećenja	Povećanje	Smanjuje
	Voda	Suva površina ka mokroj	Smanjuje ako je mešavina osetljiva na vodu

¹ Uz pretpostavku da je debljina sloja konstantna

² Odnosi se na krutost na temperaturi na kojoj se ispituju kolotrazi. Mogu se koristiti modifikatori za povećanje krutosti na kritičnim temperaturama kako bi smanjili kolotrage

³ Kada je sadržaj vazduha manji od približno 3%, asfalt je osetljiviji na pojavu trajnih deformacija

⁴ Treba izbegavati veoma male sadržaje šupljina u mineralnoj mešavini (npr. <10%)

⁵ Način ugrađivanja asfalta, bilo u laboratoriji ili na terenu, može uticati na strukturu mešavine i na njenu osetljivost na trajne deformacije

Otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju se dodatno može poboljšati upotrebom agregata koji imaju hrapavije površine i oštrije ivice, jer se na taj način obezbeđuje veće trenje i bolja uklještenost između zrna, što direktno utiče na veću stabilnost asfalta. Kalcheff & Tunnicliff (1982) su zaključili da asfaltne mešavine sa drobljenim krupnim i sitnim agregatom, sa ili bez velikog sadržaja mineralnog filera, imaju značajno veću otpornost na trajnu deformaciju i manju osetljivost na temperaturne uticaje u poređenju sa mešavinama koje sadrže rečni pesak.

Osim manje trajnosti i većih troškova održavanja kolovoza, formiranjem kolotruga stvaraju se potencijalna mesta na površini kolovoza sa kojih je otežano ili gotovo nemoguće odvodnjavanje za vreme kiša, što može dovesti do smanjenja trenja između pneumatika i kolovoza i pojave tzv. akvaplaning efekta. Duže zadržavanje vode i njeno mržnjenje može dovesti i do postepenog pogoršanja stanja kolovozne konstrukcije. Dodatno, kolotrazi mogu imati veliki uticaj i na formiranje pukotina usled zamora, zbog smanjenja debljine asfaltnih slojeva u tragovima točkova. Istraživanje koje je sproveda Javna uprava za puteve Norveške (Sund 2002), pokazalo je da učestalost saobraćajnih nesreća proporcionalno raste sa povećanjem dubine kolotruga. Zbog svega navedenog, jasna je tendencija inženjera da se pravilnim projektovanjem i kvalitetnom ugradnjom asfaltne mešavine obezbede sigurniji i dugotrajniji putevi.

Danas se za procenu otpornosti asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju koriste brojni opiti koji se generalno mogu podeliti na tri grupe:

- fundamentalni opiti: jednoaksijalni i triaksijalni opiti tečenja, dinamički modul smicanja, kvazi direktno smicanje, opit tečenja ili ponavljajućeg opterećenja na cilindričnim uzorcima opterećenim po izvodnici itd.;
- empirijski opiti: Maršalov opit, Hveem-ov opit, indikator bočnog pritiska itd.;
- simulacioni opiti: različite vrste opita točkom.

Fundamentalni opiti omogućavaju određivanje napona i deformacija i kasnije konverziju tih podataka primenom teorijskih modela u podatke o predviđenoj dubini

kolotruga u funkciji saobraćajnog opterećenja. Osnovni nedostatak ovih metoda je što su rezultati dobijeni ovim metodama veoma kompleksni za tumačenje. Za razliku od njih, zbog svoje jednostavnosti i kvalitetne kontrole (procene) trajnih deformacija na terenu, simulacioni opiti su našli veliku primenu i predstavljaju najčešće korišćene opite za određivanje otpornosti asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju. Nedostatak opita točkom je taj što oni u suštini predstavljaju simulacione testove koji mogu dati podatak da li neka mešavina zadovoljava ili ne zadovoljava zahtevane kriterijume pri prethodno definisanim uslovima, ali ne i podatke o fundamentalnim karakteristikama mešavine, koje mogu da se koriste pri upotrebi teorijskih modela za utvrđivanje ponašanja materijala u eksploataciji.

S obzirom na analogiju koja se može postaviti između otpornosti na trajnu deformaciju asfaltne mešavine i njene krutosti, brojni autori su prilikom ispitivanja uticaja količine i krupnoće upotrebljenog recikliranog agregata na ove dve karakteristike asfaltnih mešavina, došli do sličnih zaključaka (kao u poglavlju 2.3.7).

Ispitivanja trajne deformacije su pokazala da upotreba filera, dobijenog tokom procesa drobljenja otpadnog betona, povećava otpornost asfaltne mešavine na trajnu deformaciju (Chen i ost. 2011; Arabani i ost. 2013) ili da nema bitnog uticaja na ovaj parametar (Wong i ost. 2007).

Rezultati dobijeni dinamičkim opitom tečenja, koji su sproveli Wong i ost. (2007), Arabani & Azarhoosh (2012) i Arabani i ost. (2013), pokazali su da asfaltne mešavine u kojima je sav sitan prirodni agregat (≤ 4.75 mm) zamenjen recikliranim, imaju veću otpornost na trajnu deformaciju od kontrolne mešavine.

Veća otpornost na trajnu deformaciju asfaltnih mešavina sa dodatkom sitnog RCA, objašnjava se strukturom i teksturom RCA. Naime, površina RCA je hrapava, oštroičnija i višestruko zdrobljena, što povećava specifičnu površinu i trenje između zrna agregata, obezbeđujući na taj način dobru uklještenost zrna, koja se suprotstavlja pomeranju pojedinih zrna usled dejstva saobraćajnog opterećenja. S obzirom da krutost i viskozitet bitumena opadaju sa porastom temperature, karakteristike veze i čvrstoća pri

smicanju takođe opadaju. U tom slučaju, struktura agregata igra glavnu ulogu u otpornosti asfaltne mešavine na trajnu deformaciju pri visokim temperaturama. Za razliku od konvencionalnih asfaltnih mešavina, u slučaju upotrebe RCA upotrebljena količina bitumena nema dominantan uticaj na izmerene vrednosti deformacije. Ovakvo kontradiktorno ponašanje u odnosu na konvencionalne mešavine je verovatno posledica veće apsorpcije bitumena, koja dovodi do povećanja čvrstoće samih zrna agregata, a samim tim i mešavine (Pasandín & Pérez 2014a).

Veća odstupanja u ponašanju asfaltnih mešavina, u pogledu njihove deformabilnosti, zabeležena su kod onih mešavina u kojima je krupnozrni (> 4.75 mm) prirodni agregat zamenjen recikliranim, kao i kod mešavina sa 100% sadržajem RCA. Rezultati do kojih su došli Shen & Du (2005), Zhu i ost. (2012) i Wu i ost. (2013) potvrđuju da se upotrebom velikih količina krupnog RCA (80% i 100%) može poboljšati otpornost asfalta na trajnu deformaciju. Nasuprot njima Arabani & Azarhoosh (2012), Pérez i ost. (2012b) i Arabani i ost. (2013) ukazuju na veću osetljivost mešavina sa dodatkom RCA u poređenju sa kontrolnim mešavinama, usled prisustva relativno slabog cementnog maltera male otpornosti na habanje.

Ektas & Karacasu (2012) su pokazali da upotreba i sitnog i krupnog RCA, u količini do 40% od ukupne količine agregata, može povećati otpornost asfaltne mešavine na trajnu deformaciju. Detaljna ispitivanja trajne deformacije na asfaltnim mešavinama u kojima je korišćen i sitan i krupan RCA sproveo je Gul (2008). Ispitivane su dve grupe asfaltnih mešavina sa različitim granulometrijskim sastavom i sa količinom RCA od 0%, 25%, 50% i 75% od ukupne količine agregata. Granulometrijski sastav prve grupe uzoraka (tzv. krupnozrnija mešavina) bio je blizak gornjoj graničnoj vrednosti za guste mešavine D-6, u skladu sa standardom ASTM D3515, a druge grupe uzoraka (tzv. sitnozrnija mešavina) donjoj graničnoj vrednosti istog standarda. Dodatno, svoja eksperimentalna ispitivanja Gul (2008) je sproveo na modifikovanim Maršalovim uzorcima, s obzirom na zaključke do kojih su došli (Von Quintus i ost. 1994; Witeczak i ost. 1999), a koji su ukazali na značaj veličine laboratorijskih uzoraka na kojima se mere trajne deformacije. Kao optimalno rešenje usvojeni su cilindrični uzorci prečnika

100 mm i visine 150 mm. Kako bi se postigla ista zbijenost asfaltne mešavine, kao kod standardnih Maršalovih uzoraka, korigovan je broj udaraca maljem.

Otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju određena je metodom ponavljajućeg opita tečenja (Repeated creep test). Dobijeni rezultati pokazuju da sa povećanjem sadržaja RCA u mešavinama sa krupnozrnijim granulometrijskim sastavom raste i otpornost asfaltne mešavine na trajnu deformaciju. Sa druge strane, u sitnozrnijim mešavinama povećanje sadržaja RCA je imalo negativan uticaj na izmerene vrednosti trajne deformacije.

Posmatrajući rezultate prikazane u prethodnim istraživanjima, treba naglasiti da i u situacijama kada je dodatak RCA negativno uticao na trajnu deformaciju asfaltne mešavine, u većini slučajeva su bili zadovoljeni tehnički uslovi, pa se može zaključiti da u pogledu otpornosti asfalta na trajnu deformaciju, ne postoji nikakva prepreka za upotrebu RCA.

2.3.7 Krutost

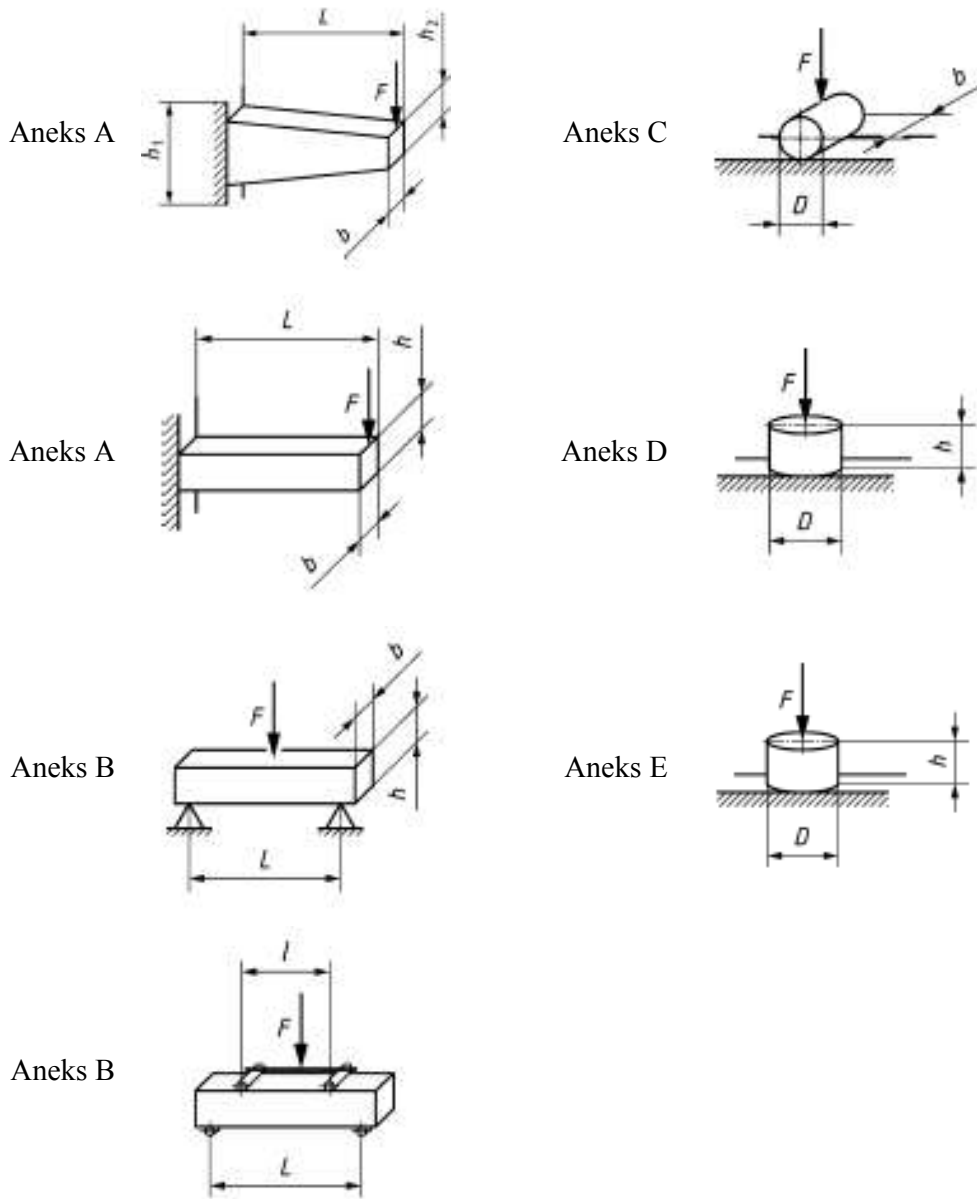
Prilikom projektovanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija, poznavanje krutosti asfaltne mešavine predstavlja osnovnu karakteristiku materijala potrebnu za određivanje naponskog i deformacijskog odgovora konstrukcije na saobraćajno opterećenje. Kako krutost definiše sposobnost asfaltnog sloja da rasporedi opterećenje na niže slojeve, tako za različite nivoe opterećenja definiše i nivo deformacija na kontaktu različitih slojeva kolovozne konstrukcije, pa na taj način indirektno utiče i na pojavu pukotina usled zamora (Kok & Yilmaz 2009). Takođe, veće vrednosti krutosti omogućavaju ugradnju tanjih asfaltnih slojeva, smanjujući troškove izgradnje. Ipak, treba imati u vidu i da izuzetno velika krutost, zbog smanjene fleksibilnosti asfaltnih slojeva, može dovesti do pojave termičkih pukotina.

Od uvođenja pojma krutosti asfaltne mešavine (Van der Poel 1954), kao viskoelastičnog materijala, pa do danas, predloženi su različiti koncepti krutosti i metode za njeno određivanje. U vezi sa tim, u literaturi se mogu naći različiti stavovi po pitanju "modula

krutosti" koji je najprikladniji za mehaničku karakterizaciju asfaltnih mešavina. Ipak, kao najprikladniji parametri za efikasno predstavljanje naponsko-deformacijskog odgovora konstrukcije definisani su "*kompleksni modul*" i "*povratni modul*".

Donedavno, povratni modul (E) je bio inkorporiran u proračune za projektovanje kolovoznih konstrukcija u metodama kao što su: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993), Asphalt Institute design method (1999) i Australian pavement design guide (AUSTROADS 2004). Ipak, sa prelaskom na analitičko-empirijsko projektovanje kolovoza (MEPDG – Mechanical Empirical Pavement Design Guide) razvijenog od strane National Cooperative Highway Research Programs (NCHRP 2002) Project 1-37 A, povratni modul je zamenjen dinamičkim (kompleksnim) modulom $|E^*|$. Metode ispitivanja povratnog i kompleksnog modula definisane su američkim standardima ASTM D 4123 i ASTM D 3497, respektivno.

U tom kontekstu, objavljen je i evropski standard EN 12697-26 (2012), koji bi u izvesnoj meri trebalo da uskladi različite metode ispitivanja modula krutosti asfaltnih mešavina u evropskim državama. Preciznije, ovaj standard opisuje određivanje "*modula krutosti*" bitumeniziranih mešavina, u skladu sa serijom različitih opita: savijanje u 2 tačke trapezoidnih i prizmatičnih uzoraka (Aneks A), savijanje prizmatičnih uzoraka - gredica opterećenih u 3 ili 4 tačke (Aneks B), indirektno zatezanje cilindričnih uzoraka (Aneks C), aksijalno zatezanje/pritiskanje cilindričnih uzoraka (Aneks D) i opit direktnog zatezanja cilindričnih ili prizmatičnih uzoraka (Aneks E). Dispozicije ispitivanja prema navedenim opitima prikazane su na slici 2.17. Prema standardu EN 12697-26, modul krutosti je definisan kao apsolutna vrednost kompleksnog modula $|E^*|$, nezavisno od vrste opita.



Slika 2.17 Dispozicije ispitivanja modula krutosti prema EN 12697-26

Pomenuti standard definiše kompleksni modul (E^*) kao odnos amplitude napona (u bilo kom trenutku vremena t , i pri bilo kojoj ugaonoj brzini ω) i amplitude dilatacije (u istom trenutku t i pri istoj ugaonoj brzini ω). Napon i dilatacija imaju sinusoidalni oblik i fazno su pomereni (slika 2.18). Matematički, kompleksni modul se može prikazati na jedan od sledećih načina:

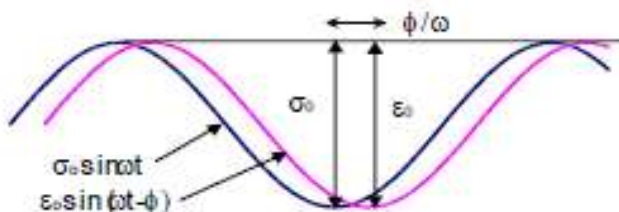
$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} \quad (2.8)$$

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi) = E_1 + i \cdot E_2 \quad (2.9)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.10)$$

gde je:

- σ_0 - maksimalan napon (Pa);
- ε_0 - maksimalna dilatacija (m/m);
- ω - ugaona brzina (Hz); $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$;
- f - frekvencija opterećenja (Hz);
- φ - fazni ugao (rad);
- t - vreme (s);
- E_1 - elastična komponenta modula (Pa);
- E_2 - viskozna komponenta modula (Pa);



Slika 2.18 Dijagram napona i dilatacija kroz vreme pri dinamičkom opterećenju

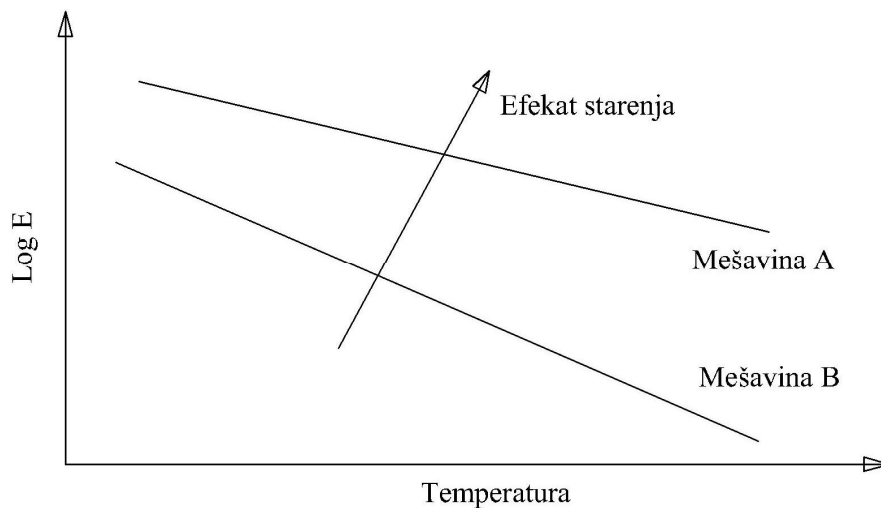
Kao što je prikazano u jednačini 2.9, kompleksni modul se sastoji od dve komponente, realne (elastične) i imaginarnе (viskozne) vrednosti. Realna komponenta predstavlja elastičnu krutost, koja se još naziva i modul akumulirane energije. Imaginarna komponenta predstavlja unutrašnje prigušenje materijala, koje se još naziva modul izgubljene energije, jer pokazuje veličinu rada koji je utrošen na trajnu deformaciju. Ove dve komponente opisuju vrlo složeno ponašanje visko-elastičnog materijala, a daju dobar podatak koja od dve komponente modula preovladava pri različitim temperaturama i frekvencijama opterećenja.

Za razliku od kompleksnog modula, prilikom određivanja povratnog modula (E) asfaltnih mešavina, opterećenje se najčešće nanosi u vidu sinusne funkcije ("haversine")

sinusoide) sa periodom relaksacije. Povratna dilatacija, koja se javlja tokom perioda relaksacije, kada je uzorak rasterećen, koristi se prilikom proračuna povratnog modula. Zbog postojanja perioda relaksacije, pri istoj amplitudi i frekvenciji opterećenja, povratna dilatacija kod opita povratnog modula, biće nešto veća od amplitude dilatacije kod kompleksnog modula. To znači da će vrednosti E biti niže od vrednosti $|E^*|$. Ovaj fenomen potvrdili su i rezultati laboratorijskih ispitivanja do kojih su došli Flintsch i ost. (2005), Loulizi i ost. (2006), Ping & Xiao (2007), Hu i ost. (2008) i Shu i ost. (2010).

Krutost asfaltne mešavine zavisi od mnogo različitih parametara kao što su: temperatura, frekvencija i oblik signala opterećenja, granulometrijski sastav i tekstura agregata, krutost bitumena, dimenzije uzoraka itd. (Ahmed i ost. 2014; Tjan & Napitupulu 2013). Na višim temperaturama (40°C) krutost mešavine uglavnom je određena bitumenskim mastiksom, a na nižim temperaturama (5°C i 25°C) skeletnom strukturom krupnozrnog agregata. Rezultati do kojih su došli Kamal i ost. (2005) pokazuju da sa povećanjem temperature sa 25°C na 40°C dolazi do pada krutosti od približno 85%. Slično tome, povećanje trajanja opterećenja sa 150 na 450 ms utiče na smanjenje krutosti i do 30%. Pan i ost. (2005) su pokazali da na temperaturi od 25°C nepravilan oblik krupnih zrna agregata povećava krutost asfaltne mešavine, a da različiti granulometrijski sastavi ispitivanih mešavina ne utiču bitno na predmetnu krutost. Suprotno tome, Al-Mosawe i ost. (2015) su utvrdili da granulometrijski sastav agregata ima značajan uticaj na krutost asfaltnih mešavina, čak i u slučajevima kada se granulometrijska kriva nalazi u okviru dozvoljenih granica. Ispitivanja krutosti na indirektno zatezanje sprovedi su na 13 asfaltnih mešavina različitog granulometrijskog sastava, sa nominalno najkrupnijim zrnom $D=14\text{ mm}$.

Nezavisno od sastava asfaltne mešavine, njena krutost se menja tokom eksploatacionog veka konstrukcije, kao posledica starenja bitumena. Na slici 2.19 je prikazan uticaj temperature i starenja bitumena na krutost asfaltne mešavine. Na pomenutoj slici "mešavina A" predstavlja ostarelu "mešavinu B".



Slika 2.19 Osetljivost krutosti asfaltne mešavine na promenu temperature i starenje bitumena

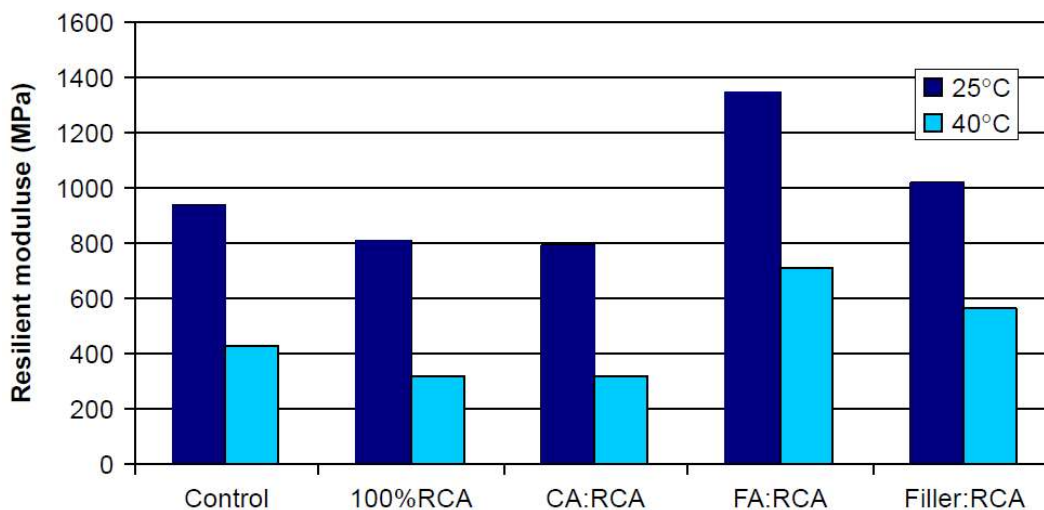
Analiza rezultata ispitivanja sprovedenih na asfaltnim mešavinama sa delimičnom ili potpunom zamenom prirodnog agregata recikliranim, pokazala je da krupnoća upotrebljenog RCA ima najveći uticaj na krutost asfaltnih mešavina. Rezultati nekoliko istraživanja su pokazali da mešavine sa 100% sitnog RCA (≤ 4.75 mm) umesto prirodnog agregata imaju veću krutost od kontrolne mešavine (Wong i ost. 2007; Arabani & Azarhoosh 2012; Arabani i ost. 2013).

Sa izuzetkom rezultata koje su dobili Zulkati i ost. (2013), u svim ostalim radovima (Paranavithana & Mohajerani 2006; Arabani & Azarhoosh 2012; Arabani i ost. 2013) potpuna zamena prirodnog agregata krupnim RCA (>4.75 mm) dovodi do manje krutosti asfaltne mešavine.

Kod mešavina u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjen sa RCA, primećeno je da sa povećanjem sadržaja RCA krutost asfaltne mešavine opada (Park i ost. 2004; Mills-Beale & You 2010b; Ektas & Karacasu 2012).

Wong i ost. (2007) i Chen i ost. (2011) su došli do zaključka da upotreba filera dobijenog recikliranjem otpadnog betona nema bitniji uticaj na krutost asfalt betona. Uticajem filera od recikliranog (sprašenog) betona na karakteristike asfaltnih mešavina

bavili su se i Arabani i ost. (2013). Rezultati njihovih istraživanja su pokazali da osim sitnog RCA i RCA-filer doprinosi povećanju krutosti. Na slici 2.20 prikazani su rezultati ovog ispitivanja. Sa CA i FA su obeležene mešavine u kojima je krupni, odnosno sitni prirodni agregat, zamenjen recikliranim.

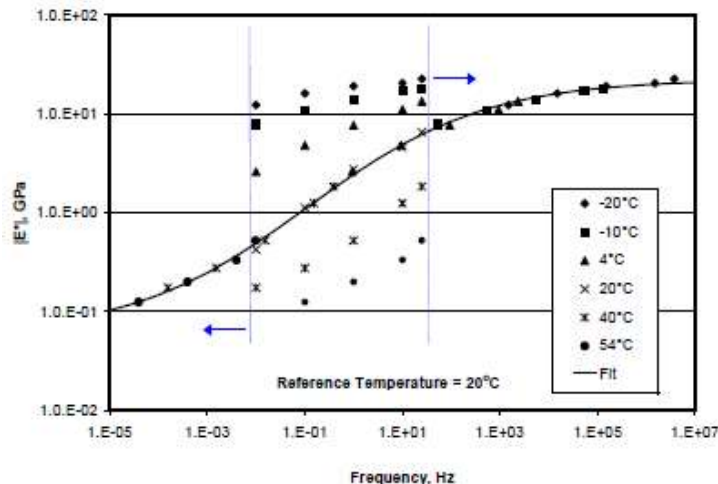


Slika 2.20 Poređenje povratnih modula asfaltnih mešavina sa RCA na različitim temperaturama (izvor: Arabani i ost. 2013)

U nekoliko radova statistički su analizirani rezultati krutosti asfaltnih mešavina sa RCA na različitim temperaturama. Analizom varijansi (ANOVA) (Shen & Du 2005; Mills-Beale & You 2010b) su pokazali da temperatura na kojoj se vrši predmetno ispitivanje ima znatno veći uticaj na krutost od količine upotrebljenog RCA. Do ovakvih zaključaka su došli i Pasandín & Pérez (2014b) ispitivanjem asfalta sa RCA koji je prethodno tretiran 5% bitumenskom emulzijom.

Da bi se opisalo linearno viskoelastično ponašanje asfaltnih mešavina i izvan dobijenog opsega temperatura ili frekvencija, potrebno je konstruisati karakterističnu krivu, tzv. "master krivu". Master krive se konstruišu po principu superpozicije vreme-temperatura i one za određeni materijal predstavljaju promenu kompleksnog modula u zavisnosti od frekvencije opterećenja pri konstantnoj temperaturi. Takav princip omogućava da se dobijeni podaci sakupljeni na različitim temperaturama ili frekvencijama horizontalno

pomeraju do referentne temperature i tako omoguće formiranje jedne master krive od više različitih. Slika 2.21 prikazuje primer jedne master krive.



Slika 2.21 Primer master krive kompleksnog modula (izvor: MnDOT 2003)

Master kriva se može predstaviti nelinearnim sigmoidalnim modelom u sledećem obliku:

$$\log|E^*| = \log(E_{\min}) + \frac{(\log(E_{\max}) - \log(E_{\min}))}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}} \quad (2.11)$$

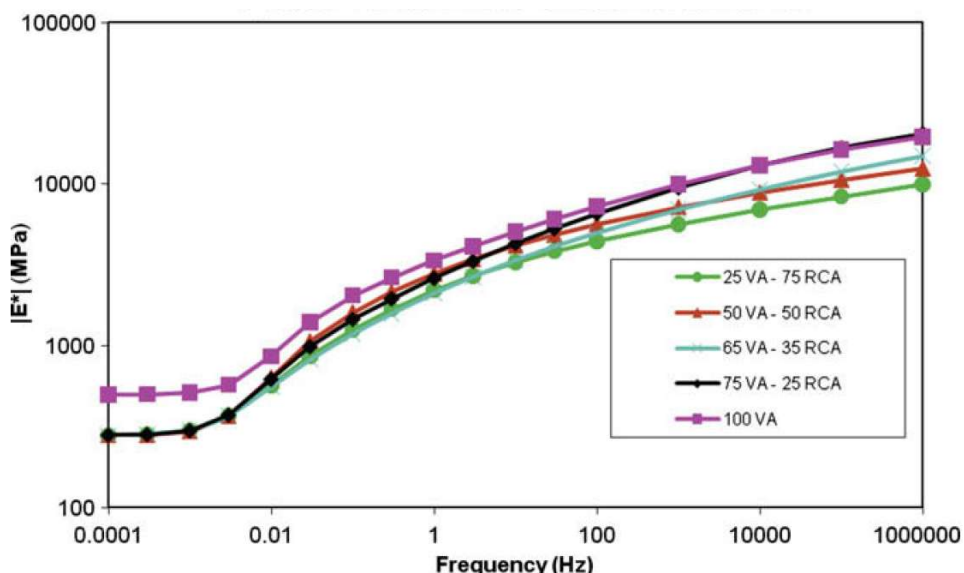
a redukovana frekvencija prema Arrhenijusovoj jednačini:

$$\log f_r = \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2.12)$$

U jednačinama (2.11) i (2.12) korišćene su sledeće oznake:

- E^* - kompleksni modul (Pa);
- E_{\min} - minimalna vrednost kompleksnog modula (Pa);
- E_{\max} - maksimalna vrednost kompleksnog modula (Pa);
- β, γ - faktori pomeranja (-);
- f_r - redukovana frekvencija na referentnoj temperaturi (Hz);
- f - frekvencija opterećenja na temperaturi ispitivanja (Hz);
- ΔE_a - aktivaciona energija (J/mol);
- T - temperatura ispitivanja (K);
- T_r - referentna temperatura (K);

Kod asfaltnih mešavina sa RCA, master krive su prikazane samo u istraživanjima koje su sproveli (Mills-Beale & You 2010). Predmetna istraživanja dinamičkog (kompleksnog) modula su vršena na pet asfaltnih mešavina u kojima je sadržaj i sitnog i krupnog RCA iznosio 0%, 25%, 35%, 50% i 75%. Dobijeni rezultati pokazuju da povećanje količine RCA utiče na smanjenje krutosti asfaltne mešavine na celom frekventnom opsegu (slika 2.22).

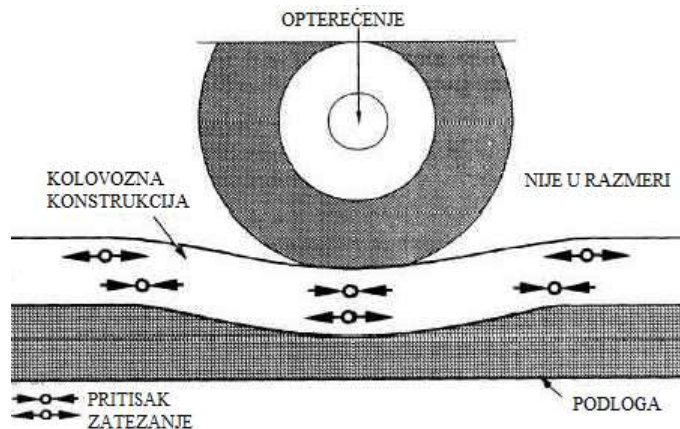


Slika 2.22 Master krive dinamičkog (kompleksnog) modula (izvor: Mills-Beale & You 2010)

2.3.8 Otpornost na zamor

Oštećenja asfaltnih kolovoza usled zamora materijala posledica su akumulacije oštećenja uzrokovanih velikim brojem ciklusa opterećenja od vozila u saobraćaju (Pell 1962). Naime, opterećenja koja su manja od graničnih, usled velikog broja ponavljanja mogu dovesti do oštećenja u kolovoznoj konstrukciji. Kod tanjih kolovoza, a prema klasičnoj teoriji kolovoznih konstrukcija, u početnom stadijumu, oštećenja usled zamora nastaju formiranjem mikropukotina na dnu bituminiziranih slojeva, kao posledica lokalnih napona zatezanja (slika 2.23). Daljim napredovanjem, od mikro pukotina nastaju makropukotine čija se propagacija nastavlja odozdo-naviše kroz kompletnu debljinu asfaltnih slojeva sve do pojave na površini (Chiangmai 2010). Ove pukotine su

relativno uske, podužne i javljaju se u tragovima točkova. U poslednjem stadijumu, dolazi do širenja pukotina, grananja i formiranja mreže pukotina koja se naziva i "krokodilska koža" (slika 2.24).



Slika 2.23 Naponi zatezanja i pritiska u kolovozu (Kareem & Chandra 2012)

Veliki naponi zatezanja se takođe mogu javiti i u gornjoj zoni bitumeniziranih slojeva (slika 2.23). Prema pojedinim teorijama, pukotine usled zamora, koje se propagiraju odozgo na dole karakteristične su za deblje asfaltne slojeve (Meyers 2000). Ovakve pukotine se javljaju po ivicama kolotruga i primarno predstavljaju podužne pukotine nastale usled opterećenja koje izaziva napone zatezanja u gornjoj zoni. Pukotine nastale na ovaj način su često i indikator starenja bitumena usled oksidacije.



Slika 2.24 Oštećenja asfaltnih slojeva usled zamora

Kako bi se što bolje simulirali uslovi na terenu i procenila otpornost asfalta na zamor vrše se različita laboratorijska ispitivanja. U laboratorijskim uslovima otpornost na zamor asfaltnih mešavina se ispituje na srednjim temperaturama (oko 20°C), jer se smatra da će oštećenja nastala na tim temperaturama primarno biti posledica zamora materijala. Na višim temperaturama (preko 38°C) kolotrazi predstvaljaju najčešći vid oštećenja, dok pri temperaturama nižim od 4°C, oštećenja u asfalnim kolovozima nastaju najčešće kao posledica termičkih pukotina. Trenutno najzastupljeniji opiti zamora su: ispitivanje gredica opterećenih na savijanje, direktno i indirektno zatezanje cilindričnih uzoraka i savijanje polucilindričnih uzoraka (Shu i ost. 2008; Wu 2011). U pogledu pristupa ovom problemu, predmetna ispitivanja se mogu podeliti na tri grupe koje se zasnivaju na fenomenološkom, energetskom i na pristupu mehanike loma. Fenomenološki pristup istražuje vezu između napona ili dilatacija i broja ciklusa opterećenja pri kome dolazi do loma. Energetski pristup koristi koncept utrošene energije za procenu ponašanja asfalta pri zamoru, dok pristup zasnovan na mehanici loma istražuje pojavu i propagaciju prslina.

Kod svih ovih ispitivanja opterećivanje uzoraka vrši se ili pri konstantnim naponima ili pri konstantnim dilatacijama. Dosadašnja iskustva pokazuju da su kod debljih asfaltnih slojeva ($d > 76.2$ mm) ispitivanja sprovedena pri konstantnim naponima mnogo bliža realnim uslovima na terenu, dok je kod tanjih slojeva to slučaj sa ispitivanjima koja se sprovode u uslovima konstantnih dilatacija. Osim debljine asfaltnih slojeva u kolovozu, postoji i čitav niz drugih promenljivih koje u različitoj meri utiču na rezultate ispitivanja zamora. Veze ovih promenljivih sa načinom nanošenja opterećenja detaljno su opisane u izveštaju sa projekta Strategic Highway Research Program SHRP-A-003-A (Tangella i ost. 1990), čiji su zaključci prikazani u tabeli 2.5.

U istom izveštaju je data i analiza uticaja različitih faktora na krutost i zamor asfalta. Ta analiza je zasnovana na rezultatima dobijenim u brojnim istraživanjima (Bazin i ost. 1967; Kirk, 1967; Monismith i ost. 1971 and 1981; Epps i ost. 1972; Pell & Brown 1972; Pell 1973; Freeme i ost. 1973) i njeni rezultati su prikazani u tabeli 2.6.

Tabela 2.5 Komparativna analiza ispitivanja zamora pri kontrolisanim naponima/dilatacijama (Tangella i ost. 1990)

PROMENLJIVA	KONTROLISANI NAPON	KONTROLISANA DILATACIJA
Debljina asfaltnog sloja	Deblji asfaltni slojevi (>76.2 mm)	Tanji asfaltni slojevi (<76.2 mm)
Kriterijum loma (broj ciklusa)	Dobro definisan (do loma uzorka)	Proizvoljan (npr. do 50% redukcije početne vrednosti modula)
Rasipanje rezultata	Manje rasipanje	Veće rasipanje
Zahtevan broj uzoraka	Manji	Veći
Simulacija dugoročnih uticaja	Dugoročni uticaji, kao što je starenje, dovode do povećanja krutosti i verovatno dužeg veka trajanja u odnosu na zamor	Dugoročni uticaji, dovode do povećanja krutosti i kraćeg veka trajanja u odnosu na zamor
Vek trajanja pri zamoru	Kraći	Duži
Uticaj sastava mešavine	Veći uticaj	Manji uticaj
Brzina disipacije energije	Brže	Sporije
Brzina propagacije prslina	Veća nego u kolovozu (in-situ)	Mnogo reprezentativnije u poređenju sa uslovima in-situ
Korist efekta relaksacije (rest period-a)	Veći	Manji

U slučajevima kada se asfaltne mešavine spravljaју sa istim tipom bitumena, sa istim granulometrijskim sastavom i kada se ispitivanja zamora sprovode na jednoj temperaturi, što je slučaj sa eksperimentalnim ispitivanjima prikazanim u ovoj disertaciji, sadržaji bitumena i šupljina ispunjenih vazduhom imaju najveći uticaj na ponašanje mešavina pri zamoru. Harvey i ost. (1995) su istraživali uticaj ova dva parametra na zamor u uslovima kada se opterećenje nanosi pri konstantnim dilatacijama. Dobijeni rezultati su pokazali da povećanje sadržaja bitumena smanjuje krutost asfalta i povećava njegovu otpornost na zamor. Ovo je posledica povećanja debljine sloja bitumena kojim su obavijena zrna agregata. Kako su dilatacije usled zatezanja koncentrisane u bitumenu, koji je duktilniji od agregata, deblji sloj rezultira manjim naponima i izduženjima u bitumenu, pod uslovom da ukupne dilatacije mešavine nisu promenjene sa dodatkom bitumena. Sa druge strane, smanjenje sadržaja

šupljina ispunjenih vazduhom povećava i krutost i otpornost asfalta na zamor. Jednostavno, manji sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom čini asfalt homogenijim i na taj način smanjuje koncentraciju napona na kontaktu čvrste faze i vazduha. Sprovedena ispitivanja su takođe pokazala da sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom ima veći uticaj na otpornost asfalta na zamor od sadržaja bitumena.

Tabela 2.6 Faktori koji utiču na krutost i zamor asfalta¹ (Tangella i ost. 1990)

FAKTOR	PROMENA FAKTORA	UTICAJ PROMENE FAKTORA		
		na krutost	na vek trajanja pri zamoru (kontrolisani napon)	na vek trajanja pri zamoru (kontrolisana dilatacija)
Viskozitet bitumena	Porast	Porast	Porast	Smanjenje
Sadržaj bitumena	Porast	Porast ²	Porast ²	Porast ³
Granulometrija agregata	Od otvorenije ka zatvorenijoj mineralnoj mešavini	Porast	Porast	Smanjenje ⁴
Sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom	Smanjenje	Porast	Porast	Porast ⁴
Temperatura	Smanjenje	Porast ⁵	Porast	Smanjenje

¹ Za mešavine sa kontinualnim granulometrijskim sastavom.

² Dostiže optimalne vrednosti pri količinama većim od onih koje su zahtevane za stabilnost.

³ Kontradiktorni efekti povećanja krutosti i smanjenja dilatacija u asfaltu dovode u pitanje ovakav zaključak.

⁴ Nema bitan uticaj.

⁵ Dostiže granične vrednosti na temperaturama nižim od temperature smrzavanja.

Treba naglasiti da su, za datu asfaltnu mešavinu, maksimalan sadržaj bitumena i minimalan sadržaj šupljina ograničeni, ne samo zbog ekonomskih razloga, već i zbog drugih vidova oštećenja koja mogu nastati kao posledica prekoračenja optimalne količine bitumena, npr. kolotrazi i isplivavanje bitumena.

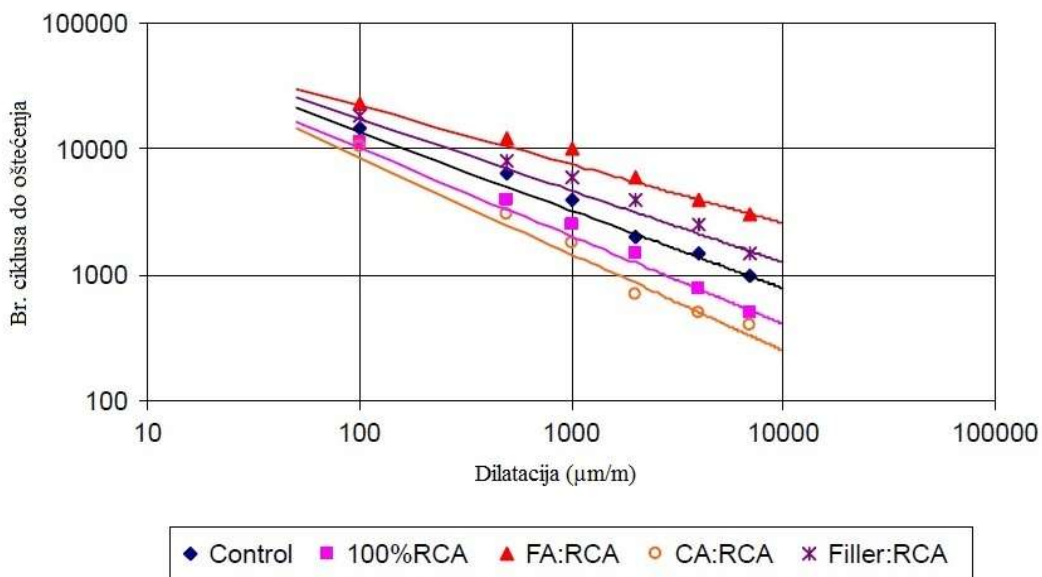
Prilikom procene uticaja zamora na životni vek asfaltnih mešavina, treba imati u vidu da se ponašanje asfaltnih mešavina pri laboratorijskim ispitivanjima, bitno razlikuje od ponašanja tih istih mešavina u kolovoznoj konstrukciji, kao posledica pauza između ciklusa opterećenja, promene temperature, starenja bitumena, promene opterećenja itd. Smatra se da asfalt u kolovozu može da izdrži od 10 do preko 100 puta veći broja ciklusa opterećenja (Strategic Highway Research Program (SHRP-A-404), 1994). Zbog svega navedenog, a u cilju uspostavljanja što bolje korelacije između rezultata dobijenih laboratorijskim ispitivanjima i uslova in-situ, potrebno je koristiti korektivne faktore ("Shift factors") koji se određuju empirijski.

Ponašanjem asfaltnih mešavina sa dodatkom RCA na zamor, bavio se relativno mali broj autora. Ipak, zaključci do kojih su došli u ovim istraživanjima su u dobroj meri usaglašeni. Naime, pokazalo se da dodatak RCA u vidu filera (Chen i ost. 2011; Arabani i ost. 2013) ili sitnog agregata (≤ 4.75 mm) (Sun i ost. 2011; Arabani & Azarhoosh 2012; Nejad i ost. 2013; Arabani i ost. 2013) povećava otpornost asfalta na zamor. Ovakvo ponašanje materijala autori objašnjavaju većom oštroičnošću zrna RCA, koja uslovljava veće trenje između zrna agregata. Takođe, upotreba sitnijih zrna RCA utiče na promenu granulometrijskog sastava agregata pre i nakon procesa mešanja, što dovodi do povećanja sadržaja filera, smanjenja sadržaja šupljina, a samim tim i bolje zbijenosti i uklještenosti zrna u odnosu na kontrolnu mešavinu. Drugo, dodatak sitnijeg RCA može povećati optimalan sadržaj bitumena, koji je direktno povezan sa ponašanjem asfaltne mešavine na zamor. Ipak, zbog većeg sadržaja bitumena kod RCA-mešavina, izraženiji je pad otpornosti na zamor pri povećanju temperature (Nejad i ost. 2013).

Istaživanja koja su sproveli Taibo i ost. (2010) pokazuju da mešavina namenjena nosećem sloju kolovoza, sa 50% sitnog i krupnog RCA, poseduje veću otpornost na zamor od kontrolne mešavine. Suprotno tome, kod mešavine projektovane za habajući sloj, ista količina RCA imala je negativan efekat na zamor materijala. Loše ponašanje asfaltnih mešavina za habajuće slojeve sa sitnim i krupnim RCA u količini od 20%-100%, uz mala odstupanja, potvrdili su i rezultati do kojih su došli Bhusal & Wen (2013).

Uticaj krupnog RCA (>4.75 mm) na zamor nosećih asfaltnih slojeva istraživao je Pasandini sa svojim saradnicima. Predmetna ispitivanja su obuhvatila kontrolnu i mešavine sa 5%, 10%, 20% i 30% RCA. Pri tom su, u cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata, u jednom slučaju RCA-mešavine pre ugradnje negovane 4 h na temperaturi od 170°C (Pasandín & Pérez 2013), a u drugom slučaju su pre spravljanja asfaltne mešavine zrna RCA obložena bitumenskom emulzijom (Pasandín & Pérez 2014b). Dobijeni rezultati su pokazali da količina primenjenog RCA nije bitno uticala na ponašanje asfaltnih mešavina na zamor, tj. da su otpornosti pri zamoru obe grupe RCA mešavina bile slične kontrolnoj mešavini.

Sa druge strane, kod asfaltnih mešavina za habajuće slojeve, Arabani i ost. (2013) su došli do zaključka da mešavina sa 100% RCA i mešavina sa krupnim RCA (CA: RCA), pokazuju manju otpornost na zamor od kontrolne mešavine. Za razliku od njih, mešavina sa sitnim RCA (FA:RCA) i mešavine sa filerom od RCA pokazale su najbolju otpornost na zamor (slika 2.25).

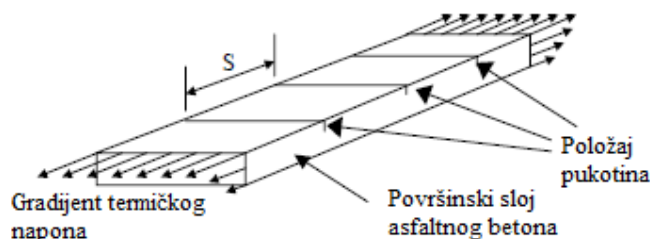


Slika 2.25 Poređenje ponašanja različitih mešavina na zamor na $T = 25^{\circ}\text{C}$

(izvor: Arabani i ost. 2013)

2.3.9 Otpornost na niske temperature

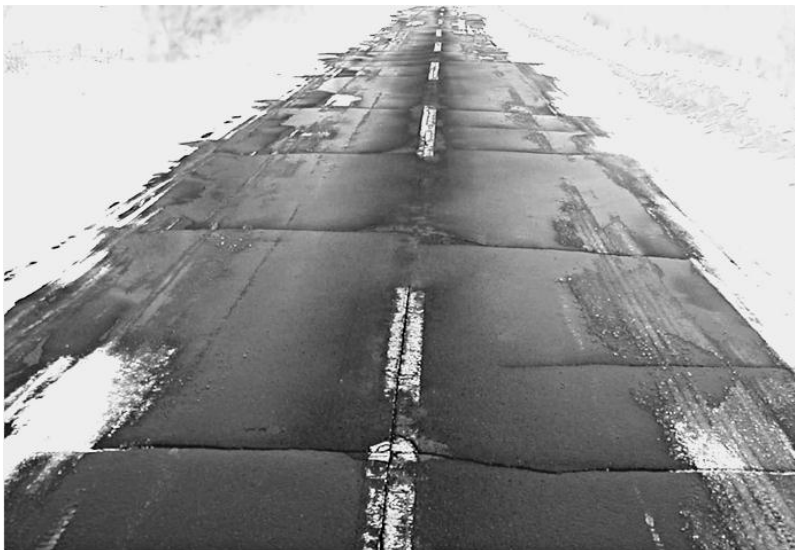
Pukotine koje nastaju u uslovima niskih temperatura predstavljaju najčešći vid oštećenja asfaltnih kolovoza u regionima sa hladnijim klimatskim uslovima. Pri smanjenju temperature, asfaltni betoni, kao i sva druga tela, imaju tendenciju skupljanja, usled čega se javljaju naponi zatezanja. Trenje između asfaltnih i nosećih nevezanih slojeva sprečava kontrakciju asfalta zbog čega se javljaju unutrašnji termički (kriogeni) naponi zatezanja. Onog trenutka kad termički naponi dostignu čvrstoću asfalta pri zatezanju formiraju se mikropukotine na ivici i površini kolovoza (slika 2.26). Pukotine ovog tipa se pružaju upravno na podužnu osu puta na prilično ujednačenim rastojanjima (slika 2.27). Yoder i Witczak (1975) su приметili da su najčešća rastojanja transverzalnih termičkih pukotina od 6 m do 9 m, ali se mogu kretati i u opsegu: manje od 1 m, pa sve do 30 m. Ukoliko je rastojanje poprečnih pukotina manje od širine kolovoza, može doći i do pojave podužnih pukotina, koje mogu rezultirati formiranjem mreže pukotina (SHRP-A-400 1994). Pojavu termičkih pukotina može izazvati i nagli pad temperature u kratkom vremenskom periodu, čak i u uslovima kada temperature nisu izrazito niske. Dalja propagacija pukotina moguća je i pri dnevnim promenama temperature.



Slika 2.26 Fizički model termičkih pukotina (izvor: Hiltunen & Roque 1995 SHRP A-005)

Pojava termičkih pukotina dovodi do pojave neravnina na putu i veće buke, čineći vožnju manje komfornom. Ipak, glavni problem kod pukotina ovog tipa predstavlja prodiranje vode (Fromm & Phang 1972). Sa stanovišta trajnosti, prisustvo vode povećava stepen čupanja zrna i dovodi do bržeg propadanja asfaltnog betona. Dodatno, infiltracijom vode kroz pukotine povećava se odnošenje sitnih čestica iz nevezanih slojeva podloge i posteljice i redukuje se njihova nosivost. Tokom zime, voda u

pukotinama, može da se zaledi i da formira ledena sočiva, koja mogu proširiti postojeće pukotine. Svi ovi efekti smanjuju eksploatacioni vek kolovoza i povećavaju troškove njegovog održavanja.



Slika 2.27 Termičke pukotine

Na pojavu termičkih pukotina u asfaltnim betonima utiče veliki broj faktora koji se grubo mogu podeliti u tri kategorije: karakteristike materijala, uslovi okruženja i geometrija kolovozne konstrukcije. Uticaj ovih faktora detaljno je prikazan u radovima SHRP-A-400 (1994) i Ksaibati & Erickson (1998).

Zbog velikog uticaja na fleksibilnost kolovoza, prilikom projektovanja sastava asfaltne mešavine, posebnu pažnju treba obratiti na vrstu upotrebljenog bitumena. Tako važeće Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) specifikacije pokušavaju da reše ovaj problem definišući najniže temperature na kojima pojedini bitumeni mogu biti upotrebljeni, uslovljavajući na taj način upotrebu "mekših" (duktilnijih) bitumena u oblastima sa hladnijom klimom. Promene sadržaja bitumena u granicama bliskim optimalnoj vrednosti nemaju bitan uticaj na pojavu termičkih pukotina, jer se povećanjem sadržaja bitumena povećava koeficijent termičke kontrakcije, ali i smanjuje krutost. Sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini i granulometrijski sastav agregata nemaju veliki uticaj na pojavu termičkih pukotina, ukoliko se kreću u nekim uobičajenim

granicama. Veća otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature se postiže i upotrebom agregata koji poseduje visoku otpornost na abraziju i dejstvo mraza i malo upijanje. Agregati sa većim upijanjem smanjuju efektivnu količinu bitumena, a time i otpornost asfalta na niskim temperaturama.

Ambijentalna temperatura i brzina vetra imaju veliki uticaj na temperaturu površine kolovoza. Što je niža temperatura površine kolovoza, i što je brži pad temperature, veća je mogućnost nastanka termičkih pukotina. Dodatno, sa starenjem asfaltne mešavine, smanjuje se i njena otpornost na niske temperature. Ovo je posledica reakcije organskih molekula u bitumenu sa kiseonikom, tokom eksploatacije. Oksidacijom se menja struktura i sastav molekula, čineći bitumen krutijim i osetljivijim na termičke pukotine.

Geometrijske karakteristike kolovozne konstrukcije takođe utiču na pojavu termičkih pukotina. Tako na primer, kod puteva druge kategorije (širine oko 7 m) pukotine se javljaju na rastojanju od približno 30 m, dok se kod aerodroma, sa širinom kolovoza 15 m do 30 m, termičke pukotine javljaju na preko 45 m. Učestalost pojave termičkih pukotina može se smanjiti sa povećanjem debljine asfaltnih slojeva i sa smanjenjem trenja između asfaltnih slojeva i nevezanih slojeva podloge. Termičke pukotine se češće javljaju kod kolovoza sa posteljicom od peska u odnosu na posteljice od nekih materijala koji imaju veću koheziju.

Ispitivanje otpornosti asfaltnih mešavina na niske temperature u većini evropskih država sprovodi se u skladu sa standardom EN 12697-46, koji obuhvata sledeće opite:

- Jednoaksijalni opit zatezanja (UTST – Uniaxial Tension Stress Test); Uzorci su na konstantnoj temperaturi izloženi dilatacijama zatezanja koje se linearno povećavaju tokom vremena do loma. Rezultat UTST-a je maksimalni napon i odgovarajuća dilatacija loma.
- Opit zatezanja uklještenog uzorka (TSRST – Termal Stress Restrained Speciment Test); Uzorci su uklješteni, a temperatura linearno opada do loma uzorka. Zbog temperaturnog skupljanja uzorka, u njemu se javljaju kriogeni naponi. Rezultat TSRST-a je kriogeni napon, napon loma i temperatura loma.

- Jednoaksijalni ciklični opit zatezanja (UCTST – Uniaxial Cyclic Tensile Stress Test); Uzorci su izloženi cikličnom (sinusoidalnom) naponu pri konstantnoj temperaturi. Tokom opita mere se dilatacije i krutost, sve do loma usled zamora materijala. Rezultat UCTST-a je broj ciklusa opterećenja do loma i broj ciklusa opterećenja do konvencionalnog kriterijuma loma (pad krutosti od 50%).

U svega nekoliko istraživanja ispitivana je otpornost na niske temperature asfaltnih mešavina sa recikliranim agregatom. Bhusal & Wen (2013) su predmetna ispitivanja sprovedeli metodom indirektnog zatezanja (IDT – Indirect Tensile) na temperaturi $T = -10$ °C, pri kontrolisanim deformacijama od 50.8 mm/min. Ispitivana je čvrstoća pri indirektnom zatezanju i energija loma. Za potrebe ispitivanja RCA je uzet sa dva različita postrojenja za drobljenje betona. U skladu sa tim, ispitivanja su sprovedena na dve grupe od po šest asfaltnih mešavina za habajuće slojeve, sa nominalno najkrupnijim zrnom agregata $D = 12.5$ mm. U mešavinama je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjivan sa RCA u količinama od 0%, 20%, 40%, 60%, 80% i 100%. Dobijeni rezultati su pokazali da se sa povećanjem sadržaja RCA u asfaltnoj mešavini smanjuje čvrstoća pri indirektnom zatezanju. Kod mešavina sa jednom vrstom recikliranog agregata, veći sadržaj RCA uticao je na smanjenje energije loma, dok kod druge grupe mešavina nije postojala jasna zavisnost između količine upotrebljenog RCA i energije loma.

Ponašanje RCA-asfaltnih mešavina na niskim temperaturama istraživala je i grupa autora sa Tehnološkog Univerziteta Wuhan, u Kini. Predmetna ispitivanja su sprovedena na asfaltnim betonima za noseće slojeve sa nominalno najkrupnijim zrnom agregata $D = 25$ mm. Asfaltne gredice dimenzija $250 \times 30 \times 35$ mm su izlagane savijanju u tri tačke na temperaturi $T = -10$ °C, pri kontrolisanim deformacijama od 50 mm/min. Procena otpornosti različitih asfaltnih mešavina vršena je na osnovu izmerene čvrstoće pri savijanju, dilatacije savijanja i modula krutosti. Upotrebljeni RCA se sastojao od starog betona (71.2%), opeke (26.2), keramičkih pločica (2.3%) i manje količine stakla, drveta i drugih materijala. Rezultati ovih istraživanja su prikazani u sledeća tri rada.

Wu i ost. (2013) su sproveli ispitivanja na tri vrste asfaltnih mešavina: kontrolna mešavina, mešavina sa sitnim RCA (≤ 4.75 mm) i mešavina sa krupnim RCA (> 4.75 mm). Dobijeni rezultati su pokazali da dodatak RCA uzrokuje mali pad otpornosti asfaltnih mešavina na niske temperature. Wu i ost. (2013) smatraju da su ovakvi rezultati posledica postojanja većeg broja mikropukotina u RCA u poređenju sa prirodnim agregatom. Dodatno, komadići opeke i cementog maltera mogu postati krtiji na nižim temperaturama, što može dovesti do lakšeg oštećenja asfalt betona. Ipak, obe asfaltne mešavine sa recikliranim agregatom zadovoljavaju tehničke uslove za dilatacije savijanja $\epsilon > 2000 \mu\epsilon$ (JTG F40-2004). Poredeći RCA asfaltne mešavine, mešavina sa krupnim RCA ima veću čvrstoću pri savijanju i veće dilatacije savijanja u trenutku loma.

Na slici 2.28 prikazani su rezultati ispitivanja koje su sproveli Zhu i ost. (2012). Sastav pet različitih asfaltnih mešavina na kojima su sprovedena ispitivanja prikazan je u tabeli 2.7. U cilju poboljšanja kvaliteta krupnog RCA, korišćenog prilikom spravljanja četvrte mešavine, isti je podvrgnut prethodnom tretmanu koji se sastojao od potapanja RCA u tečnu silikonsku smolu u trajanju od 1 h, a potom izlaganju temperaturi od 60 °C u trajanju od 24 h u cilju očvršćavanja silikonske smole.

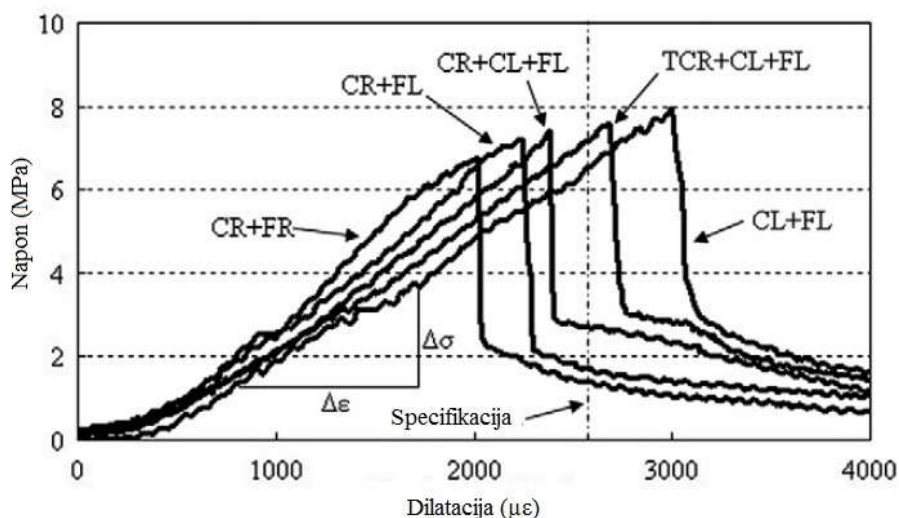
Tabela 2.7 Sastav asfaltnih mešavina (Zhu i ost. 2012)

Oznaka asfaltnih mešavine	Krupni agregat (> 4.75 mm)	Sitni agregat (≤ 4.75 mm)
CR + FR	RCA	RCA
CR + FL	RCA	Krečnjak
CR + CL + FL	80% RCA + 20% krečnjak	Krečnjak
TCR + CL + FL	80% tretiranog RCA + 20% krečnjak	Krečnjak
CL + FL	Krečnjak	Krečnjak

Asfaltna mešavina sa 100% RCA, imala je najmanju čvrstoću pri zatezanju savijanjem i najmanju dilataciju u trenutku loma, a mešavina sa 100% prirodnim agregatom najveće vrednosti ovih parametara. Slabije mehaničke karakteristike mešavina sa recikliranim agregatom autori pripisuju manjoj zapreminskoj masi i većoj drobljivosti recikliranog

agregata. Prethodni tretman recikliranog agregata silikonskom smolom i veći sadržaj prirodnog agregata poboljšava otpornost asfalta na niske temperature.

Treba napomenuti da kineski tehnički uslovi, za regione sa godišnjom temperaturom vazduha od -37°C ili nižom, zahtevaju da dilatacije pri savijanju u tri tačke na $T = -10^{\circ}\text{C}$, budu veće od $2600\ \mu\epsilon$.



Slika 2.28 Rezultati ispitivanja savijanja u tri tačke na $T = -10^{\circ}\text{C}$
(izvor: Zhu i ost. 2012)

Uticaj filera dobijenog drobljenjem otpadnog betona na ponašanje asfalta na niskim temperaturama ispitivali su (Chen i ost. 2011). Rezultati pokazuju da upotreba ovakvog filera u asfaltnim mešavinama može uzrokovati mali pad otpornosti asfalta na niske temperature.

Sun i ost. (2011) su otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature ispitivali na dve mešavine sa prirodnim agregatom od krečnjaka i dacita, i na jednoj mešavini sa krupnim agregatom od dacita i sitnim RCA. Izmerene dilatacije savijanja pri lomu su iznosile $3056\ \mu\epsilon$, $1853\ \mu\epsilon$ i $4106\ \mu\epsilon$, respektivno za sve tri navedene mešavine. Asfaltna mešavina sa sitnim RCA je pokazala veću otpornost na niske temperature u poređenju sa dvema kontrolnim mešavinama.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da upotreba krupnog RCA ima negativan uticaj na ponašanje asfalta na niskim temperaturama, što ovakve asfalte čini manje pogodnim za primenu u hladnijim regionima. I pored toga, pojedine asfaltne mešavine sa krupnim RCA su uspele da zadovolje tehničke uslove. Sprovedena istraživanja su pokazala i da se tretmanom krupnog RCA u silikonskoj smoli, može poboljšati otpornost asfalta na niske temperature.

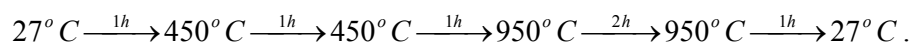
Kod asfaltnih mešavina sa sitnim RCA ne postoji jedinstven stav u pogledu njihovog uticaja na ponašanje mešavina pri niskim temperaturama.

Ipak, treba imati na umu da su ovi zaključci izvedeni na osnovu malog broja istraživanja, koja su, izuzev rada Bhusal & Wen (2013), sprovedena u istoj laboratoriji od strane jedne iste grupe autora. Izuzev mešavine "CR + CL + FL" sa 80% krupnog RCA, predmetna istraživanja nisu obuhvatila asfaltne mešavine sa delimičnom upotrebom samo sitnog ili samo krupnog RCA. Zbog ovoga postoji potreba za dodatnim ispitivanjima asfaltnih mešavina sa RCA na niskim temperaturama.

2.3.10 Svojstva asfalt betona sa tretiranim recikliranim agregatom

U cilju poboljšanja kvaliteta agregata koji se dobija recikliranjem betona, pojedini istraživači su pribegli posebnim tretmanima, kojima su ova zrna izlagana. Ideja ovakvog pristupa bila je da se poboljšaju ona svojstva RCA, koja su izrazito lošija u odnosu na prirodni agregat. Tu se pre svega misli na veću poroznost i manju čvrstoću RCA u odnosu na prirodni agregat. Kao posledica veće poroznosti, optimalni sadržaj bitumena u mešavinama sa dodatkom RCA bio je veći u poređenju sa mešavinama u kojima je korišćen prirodni agregat, što je imalo direktan uticaj na cenu gotovog proizvoda. Ovo je takođe uticalo i na manju otpornost asfaltnih mešavina na dejstvo vode. Dodatno, zbog manje čvrstoće RCA, prilikom mešanja i ugradnje asfalta sa dodatkom RCA, dolazilo bi do usitnjavanja cementnog maltera i promene granulometrijskog sastava, što je negativno uticalo na ponašanje asfalta pri niskim temperaturama, na zamor materijala itd.

Wong i ost. (2007) su u svom ispitivanju imali za cilj da se kalcijum karbonat (CaCO_3), koji je prisutan u recikliranom agregatu, pretvori u kalcijum oksid (CaO), tretmanom na visokim temperaturama. U cilju poređenja dobijenih rezultata ispitivanja, pored kontrolne mešavine sa agregatom od dacita, napravljene su još tri hibridne mešavine. U jednoj je RCA korišćen kao filer, u drugoj je celokupan sadržaj sitnog prirodnog agregata ($< 3.15 \text{ mm}$) zamenjen recikliranim, dok je treća mešavina po svom sastavu odgovarala drugoj mešavini, s tim što su zrna RCA izložena pomenutom tretmanu. Proces kalcinacije sproveden je u sledećim etapama:



Prilikom projektovanja asfaltnih mešavina optimalan sadržaj bitumena je iznosio 5.3%, 6.5% i 7.0%, respektivno za sve tri mešavine. Stabilnost po Maršalu i krutost mešavina sa tretiranim RCA su manje od stabilnosti i krutosti mešavina u kojima sitni RCA nije izlagan predmetnom tretmanu, ali su znatno veće od istih parametara za kontrolnu mešavinu. Razlike modula krutosti su izraženije na temperaturi $T = 20^\circ \text{C}$, nego na $T = 40^\circ \text{C}$. Ispitivanje dinamičkim opitom tečenja, pokazalo je da asfaltna mešavina sa tretiranim RCA ima najveću otpornost na trajnu deformaciju, i da je ona 2 do 3 puta veća od kontrolne mešavine.

Lee i ost. (2012) su oblagali zrna recikliranog agregata cementnom pastom sa dodatkom zgure (PCRCA - Pre-Coated RCA) kako bi poboljšali njihove mehaničke karakteristike. Varirana je debljina sloja paste i iznosila je 0.25 mm, 0.45 mm i 0.65 mm. Da bi osigurali potpunu hidrataciju, cementna pasta sa dodatkom zgure, prethodno naneta na zrna recikliranog agregata, negovana je u krečnoj vodi 28 dana. Prilikom spravljanja paste, a u cilju redukcije količine vode za 30%, korišćen je superplastifikator. Vodovezivni faktor je iznosio 0.45. Optimalna debljina sloja paste iznosila je 0.25 mm. U drugom koraku vršeno je spravljanje asfaltnih mešavina u kojima je prirodni agregat zapreminski zamenjivan sa PCRCA u količini od 0%, 25%, 50%, 75% i 100%. Zbog porozne strukture cementne paste sa dodatkom zgure, sa povećanjem sadržaja PCRCA raste optimalan sadržaj bitumena, od 5.78% kod kontrolne mešavine do 6.62% kod mešavine sa 100% PCRCA. Povećanjem količine upotrebljenog PCRCA otpornost na

dejstvo vode i stabilnost po Maršalu opadaju, dok čvrstoća pri indirektnom zatezanju ima trend rasta. Ovit točkom je pokazao da zamena prirodnog agregata sa PCRCA povećava otpornost asfaltne mešavine na trajnu deformaciju. I pored negativnog uticaja koji je dodatak PCRCA imao na dejstvo vode, zadovoljeni su zahtevi propisani tehničkim uslovima.

U ispitivanju koja su sproveli Pasandín & Pérez (2014b) kao komponentni materijali za spravljanje asfalta korišćeni su: prirodni agregat, RCA, portland cement kao mineralni filer, bitumen B50/70 i bitumenska emulzija ECL-2d kojom su zrna RCA premazivana pre spravljanja asfaltne mešavine. Količina RCA u mešavinama iznosila je 5%, 10%, 20% i 30% od ukupne količine agregata. Mešavine su spravljene sa količinama bitumena od 3.5%, 4% i 4.5%. Ispitivanje otpornosti asfalta na dejstvo vode nije dalo jasnu zavisnost između odnosa čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) i sadržaja RCA. Imajući u vidu da su sve mešavine zadovoljile tehničke zahteve, može se zaključiti da premazivanje zrna RCA bitumenskom emulzijom poboljšava njegove karakteristike. Ovo je posledica zaptivanja pora u zrnima RCA, kao i očvršćavanja maltera, koji umanjuje mogućnost dalje fragmentacije materijala, koja bi mogla dovesti do formiranja novih pukotina, tj. potencijalnih mesta za dalji prodor vode. U pogledu zapreminskih karakteristika, tj. sadržaja šupljina u asfaltnoj mešavini (AV) i šupljina u mineralnoj mešavini (VMA), većina mešavina je zadovoljila uslove za puteve sa teškim saobraćajnim opterećenjem. Za potrebe ispitivanja modula krutosti, napravljene su dodatne "kontrolne" mešavine sa RCA koji nije izlagan predmetnom tretmanu. U mešavinama sa RCA, koji je prethodno premazivan bitumenskom emulzijom, modul krutosti je imao blagu tendenciju pada sa povećanjem sadržaja RCA, za razliku od mešavina sa netretiranim RCA kod kojih nije postojala jasna zavisnost između krutosti i sadržaja RCA. Takođe, varijacija vrednosti krutosti na temperaturama 0°C, 10°C i 20°C u mešavinama sa tretiranim RCA bila je manja u poređenju sa mešavinama u kojima je korišćen netretirani RCA, pokazujući da upotreba bitumenske emulzije čini RCA dosta homogenijim. Otpornost na trajnu deformaciju ispitana je metodom ponavljajućeg opterećenja. Izmerene ukupne vrednosti deformacija nakon 1800 ciklusa opterećenja pokazale su dobru otpornost svih mešavina na kolotrage. Što se tiče otpornosti na

zamor, koja je ispitana indirektnim zatezanjem u uslovima konstantnih vrednosti napona, sve mešavine su se ponašale slično jedna drugoj.

Pasandín & Pérez (2013) i (2014a) su ispitivali uticaj starenja bitumena na karakteristike asfalnih mešavina sa dodatkom RCA. Mešavina je držana u sušnici na temperaturi mešanja u trajanju od 0 h, 2 h i 4 h pre ugradnje. Na taj način je omogućeno zrnima RCA dovoljno vremena da se sva zrna fino obaviju bitumenom, ne ostavljajući prazne prostore za prodor vode. Receptura asfaltne mešavine je bila ista kao u prethodnom radu (Pasandín & Pérez 2014a), gde je korišćen portland cement kao filer, bitumen B50/70, dok je prirodni agregat zamenjivan recikliranim u količini od 5%, 10%, 20% i 30%. Sadržaj bitumena je iznosio 3.5%, 4.0% i 4.5%. Zapreminski parametri mešavina u funkciji starenja, sadržaja RCA i bitumena su prikazani na slici 2.10 (videti poglavlje 2.3.3). Uočava se da duže vreme starenja asfalta na temperaturi mešanja, kao i veća količina RCA uzrokuju povećano upijanje bitumena i manju efektivnu količinu bitumena. Prodiranjem bitumena kroz pukotine RCA, agregat postaje čvršći, pa i vrednosti modula krutosti rastu sa povećanjem vremena starenja mešavine. Kod mešavina koje su negovane 2 h i 4 h na temperaturi mešanja izmerene su veće vrednosti trajne deformacije, što autori objašnjavaju većim sadržajem šupljina ispunjenih vazduhom. U pogledu otpornosti na dejstvo vode, dobijene vrednosti odnosa čvrstoća na zatezanje (ITSR), pokazale su da su sve mešavine sa RCA koje su 4 h pre ugradnje negovane na temperaturi 170°C imale bolju otpornost na dejstvo vode od kontrolne mešavine. Takođe, i kod ispitivanja ponašanja na zamor, bolju otpornost u odnosu na kontrolnu mešavinu su pokazale mešavine u kojima je deo prirodnog agregata zamenjen recikliranim.

2.4 Rezime

Na osnovu prethodno iznetih karakteristika agregata dobijenog recikliranjem otpadnog betona (RCA), kao i karakteristika asfalnih mešavina u kojima je vršena delimična ili potpuna zamena prirodnog agregata recikliranim može se zaključiti sledeće:

- U poređenju sa prirodnim agregatom, a zbog prisustva cementnog maltera, agregat dobijen drobljenjem otpadnog betona ima znatno veću poroznost. Usled veće poroznosti, maksimalna zapreminska masa RCA iznosila je cca. 2.6 g/cm^3 , u poređenju sa 2.7 g/cm^3 koliko je u proseku izmereno na prirodnom agregatu.

Lošiji kvalitet RCA u odnosu na prirodni agregat ogleda se i u višim vrednostima otpornosti na habanje po metodi Los Angeles, koje su u većini slučajeva iznosile približno 34%, što zadovoljava tehničke uslove za klase materijala Z3, Z4 i Z5, što znači da odgovara za bitumenizirane noseće i vezne slojeve za sve kategorije saobraćajnog opterećenja (Putevi Srbije 2012).

Najveće razlike između RCA i prirodnog agregata zapažaju se na izmerenim vrednostima upijanja vode, koje kod RCA imaju vrednosti oko 5% u poređenju sa tipično dozvoljenih 1% kod prirodnog agregata. Upijanje vode ujedno predstavlja i parametar koji najviše odstupa od vrednosti zahtevanih nacionalnim standardima. U većini slučajeva maksimalna vrednost upijanja vode agregata, koji se koristi za spravljanje asfaltnih mešavina, ograničena je na 1%.

Ipak, prisustvo zaostalog cementnog maltera čini površinsku teksturu RCA izrazito hrapavom, što uz povoljan oblik i oštoroivičnost zrna, koji su posledica tehnologije dobijanja RCA, tj. drobljenja betona, doprinosi boljoj uklještenosti ovakvih zrna i većem trenju kontaktnih površina, što dovodi do povećanja nosivosti asfaltnog betona.

- Velika poroznost RCA utiče na veće upijanje bitumena u odnosu na prirodni agregat. Linearnom regresijom prosečnih vrednosti optimalnog sadržaja bitumena (OBC) u asfaltnim mešavinama definisana je zavisnost između sadržaja RCA i OBC. Predmetne funkcije glase:

$$OBC = 0.0358 \times RCA + 3.83 \text{ (za noseće slojeve) i}$$

$$OBC = 0.0358 \times RCA + 4.82 \text{ (za slojeve zastora).}$$

Obe regresione prave imaju približno isti nagib, što pokazuje da je kod obe grupe asfaltnih mešavina sadržaj bitumena proporcionalan sadržaju RCA. Na osnovu prikazanih zavisnosti može se zaključiti da u najekstremnijem slučaju, kada se vrši celokupna zamena prirodnog agregata recikliranim, optimalan sadržaj bitumena raste za oko 3.6%.

- U pogledu zapreminskih karakteristika asfaltnih mešavina, sadržaj RCA ne utiče bitno na zaostale šupljine u asfaltnoj mešavini (AV). Ovo je i očekivano jer većina postupaka za projektovanje asfaltnih mešavina u startu definiše ciljanu vrednost AV.

Iako su izvedeni zaključci pojedinih autora u pogledu uticaja količine upotrebljenog RCA na sadržaj šupljina u mineralnoj mešavini (VMA) kontradiktorni, u oba slučaja nagibi zavisnosti VMA - RCA nisu bili veliki, pa se ovakve razlike verovatno mogu pripisati različitim metodama projektovanja asfaltne mešavine.

Ipak, ukoliko se u obzir uzme apsorbirana količina bitumena, tada zapremina šupljina u mineralnoj mešavini (VMA_{abs}) ima tendenciju pada sa povećanjem sadržaja RCA.

Po pitanju zapremine šupljina ispunjenih bitumenom (VFB) svi autori su saglasni da veći sadržaj RCA usled veće apsorpcije bitumena, dovodi do smanjenja efektivne količine bitumena koja popunjava šupljine u mineralnoj mešavini i samim tim smanjuje vrednost VFB.

Zbog veće poroznosti RCA u odnosu na prirodni agregat i zapreminska masa asfalta (G) i maksimalna zapreminska masa asfalta (G_{max}) opadaju sa porastom sadržaja RCA.

- Najveći uticaj na stabilnost i tečenje po Maršalu asfaltnih mešavina u kojima je prirodni agregat delimično ili u potpunosti zamenjen recikliranim agregatom, ima krupnoća zrna upotrebljenog RCA. Asfaltne mešavine sa filerom dobijenim drobljenjem otpadnog betona, kao i mešavine sa sitnim RCA (≤ 4 mm) imaju veću stabilnost i manje tečenje u odnosu na konvencionalne mešavine.

U mešavinama sa krupnim RCA (> 4 mm), ne može se izvesti jasna zavisnost između količine upotrebljenog RCA i stabilnosti i tečenja po Maršalu. Isto važi i za mešavine u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat u određenom procentu zamenjivan recikliranim agregatom.

- Zbog velike poroznosti cementog maltera koji je prisutan u recikliranom agregatu, osetljivost na dejstvo vode asfaltnih mešavina sa dodatkom RCA

mного je veća u odnosu na konvencionalne mešavine. Ipak, kao što se može videti u tabeli 2.3, veliki broj asfaltnih mešavina sa različitim procentom RCA uspeo je da zadovolji odgovarajuće tehničke uslove. Pojedini autori su svojim istraživanjima pokazali i da se različitim tretmanima RCA može poboljšati ovo svojstvo asfalta, pa čak i dostići otpornost kakvu imaju konvencionalni asfalti.

- Upotrebom filera ili sitnog RCA može se poboljšati otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju. Sprovedena ispitivanja na mešavinama sa krupnim RCA nisu dala konzistentne zaključke. Neke mešavine su pokazale bolje ponašanje u odnosu na kontrolnu mešavinu, a neke lošije. Ipak, u većini slučajeva su zadovoljeni tehnički zahtevi.
- Asfaltne mešavine sa sitnim RCA imale su veću krutost od kontrolnih mešavina. Za razliku od filera, dobijenog recikliranjem betona, koji nije imao bitan uticaj na krutost, asfaltne mešavine sa dodatkom krupnog RCA imale su manju krutost od kontrolnih mešavina. Manja krutost je izmerena i kod mešavina u kojima je određen procenat i sitnog i krupnog prirodnog agregata zamenjivan recikliranim.
- Dodatak RCA filera ili sitnog RCA povećava otpornost asfalta na zamor. Kod asfaltnih mešavina u kojima je i sitan i krupan prirodan agregat delimično zamenjen recikliranim agregatom izmerena otpornost na zamor bila je niža u odnosu na konvencionalne mešavine. Isto važi i za mešavine sa krupnim RCA. Treba napomenuti da su ovakvi zaključci izvedeni iz relativno malog broja istraživanja.
- Ispitivanje otpornosti asfaltnih mešavina na niske temperature prikazano je u svega par istraživanja, koja su izuzev jednog rada sprovedena u istoj laboratoriji od strane jedne iste grupe autora. Većina dobijenih rezultata pokazuje da dodatak RCA ima negativan uticaj na ponašanje asfalta na niskim temperaturama, što ih čini manje pogodnim za primenu u hladnijim regionima. I pored negativnog uticaja, pojedine mešavine sa RCA su zadovoljile tehničke zahteve. U jednom istraživanju dodatak sitnog RCA je pozitivno uticao na ponašanje asfalta na niskim temperaturama. Otpornost asfaltnih mešavina sa dodatkom RCA se dodatno može poboljšati prethodnim tretmanom RCA.

- U literaturi su prikazani i različiti načini prethodnog tretmana recikliranog agregata u cilju poboljšanja kako njegovih svojstava, tako i karakteristika same asfaltne mešavine. Prethodni tretmani RCA su obuhvatili: kalcinaciju RCA, oblaganje RCA cementnom pastom sa dodatkom zgure, premazivanje RCA tečnom silikonskom smolom, premazivanje RCA bitumenskom emulzijom i negu asfaltne mešavine na temperaturi mešanja u trajanju od 2 h i 4 h, pre ugradnje.

Rezultati ispitivanja asfalt betona u kojima je prirodni agregat delimično ili u potpunosti zamenjen recikliranim agregatom, a koja su obuhvaćena ovim pregledom literature su ohrabrujući. Upotreba RCA u asfaltnim mešavinama promovise održivi razvoj obezbeđujući ekološke povoljnosti, kao što su smanjenje eksploatacije prirodnog agregata iz kamenoloma, smanjenje količina otpadnog materijala koji se deponuju, itd.

Ipak, postoje i određeni nedostaci upotrebe RCA u asfaltnim mešavinama. Tu se pre svega misli na povećan sadržaj bitumena, kao i na troškove uklanjanja gipsa i drugih materijala koji mogu štetno uticati na kvalitet asfaltnih mešavina HMA (Hot mix Asphalt).

Treba imati na umu da je većina sprovedenih ispitivanja vršena na asfaltnim uzorcima koji su projektovani i ugrađivani u svemu prema Maršalovoj proceduri, što je za posledicu imalo usitnjavanje zrna RCA i promenu granulometrijskog sastava mineralne mešavine. Takođe, većina radova, koji su obuhvaćeni pregledom literature, se odnosila na specifične slučajeve u pogledu količine i krupnoće upotrebljenog RCA. U pojedinim radovima je samo krupan ili samo sitan prirodni agregat zamenjen recikliranim, dok je u drugim radovima samo sitan i krupan RCA korišćen u određenom procentu.

Otpornost na trajnu deformaciju nije analizirana na asfaltnim mešavinama sa delimičnom zamenom sitnog agregata sa RCA.

U većini slučajeva krutost je analizirana na asfaltnim mešavinama namenjenim habajućim slojevima. Krutost asfaltnih mešavina projektovanih za noseće slojeve

kolovoza prikazana je samo u jednom radu. Zbog različitog sadržaja bitumena u nosećim i habajućim slojevima upotrebljeni RCA može imati različit uticaj na karakteristike asfaltnih mešavina. Takođe krutost nije ispitivana na asfaltnim mešavinama sa delimičnom zamenom samo sitnog ili samo krupnog prirodnog agregata recikliranim.

Otpornost na zamor asfaltnih mešavina namenjenih nosećim slojevima, sa delimičnom zamenom sitnog ili i sitnog i krupnog agregata, prikazana je samo u po jednom radu, dok nije sprovedeno ni jedno takvo ispitivanje na mešavinama sa delimičnom zamenom krupnog RCA.

Relativno je mali broj istraživanja koja su za cilj imala ispitivanje ponašanja asfaltnih mešavina sa RCA na niskim temperaturama. Izuzev rada Bhusal & Wen (2013), sva ostala ispitivanja su sprovedena u istoj laboratoriji od strane jedne iste grupe autora. Osim mešavine sa 80% krupnog RCA, predmetna istraživanja nisu obuhvatila asfaltne mešavine sa delimičnom upotrebom samo sitnog ili samo krupnog RCA.

U svakom slučaju, neophodna su dalja ispitivanja u cilju iznalaženja ekonomski opravdanih rešenja za prethodni tretman RCA, kako bi se po karakteristikama što više približio prirodnom agregatu. Takođe, posebnu pažnju treba posvetiti ponašanju asfalt betona koje sadrže RCA na niskim temperaturama i njihovom odgovoru na zamor materijala, karakteristikama koje još uvek nisu dovoljno istražene. Potrebno je uraditi i detaljnu ekonomsku analizu troškova spravljanja ovakvih mešavina.

3 Program eksperimenta

3.1 Metodologija

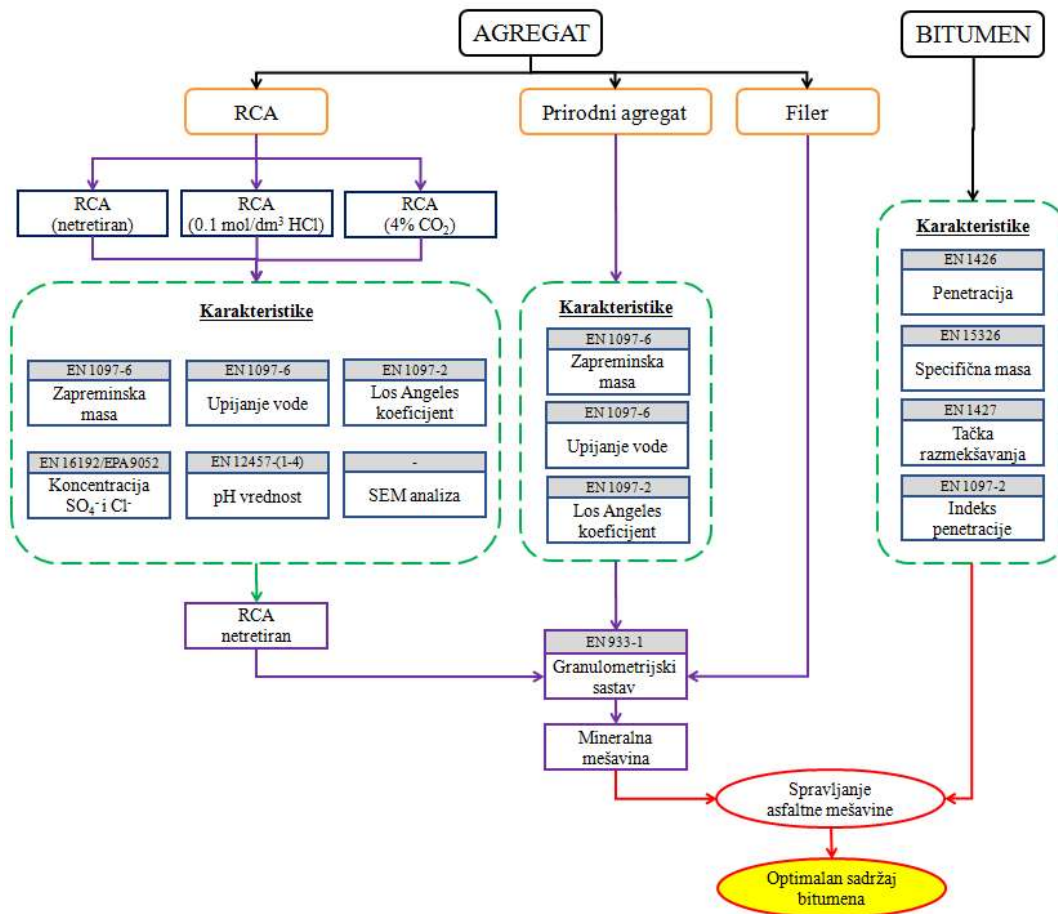
U okviru predmetnih istraživanja izvršena su ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika asfaltnih mešavina sa različitim sadržajem RCA i dobijeni rezultati su upoređeni sa karakteristikama kontrolne mešavine napravljene sa prirodnim drobljenim agregatom.

U cilju poboljšanja karakteristika RCA, ovaj agregat je izložen tretmanima potapanja u hlorovodoničnu kiselinu i ubrzane karbonatizacije (dejstvu povišenih koncentracija ugljendioksida). Nakon tretmana, reciklirani agregat je podvrgnut ispitivanjima zapreminske mase, upijanja vode, otpornosti na drobljenje metodom "Los Angeles", sadržaja sulfata i hlorida, pH vrednosti i snimanju mikrostrukture primenom elektronskog mikroskopa (SEM analiza). Dobijeni rezultati su upoređeni sa netretiranim RCA. Analizom tih vrednosti zaključeno je da nije potrebno RCA izlagati dodatnim tretmanima u cilju poboljšanja njegovih fizičko-mehaničkih karakteristika (videti poglavlje 3.2.1.3). Zbog toga su dalja eksperimentalna ispitivanja uticaja RCA na karakteristike asfalt betona sprovedena samo za netretirani RCA.

Na slici 3.1 je prikazana matrica eksperimentalnih ispitivanja koja su sprovedena na komponentnim materijalima, a koja su prethodila projektovanju asfaltnih mešavina.

Maksimalna količina RCA u asfaltnim mešavinama je ograničena na 45% zbog zabrinutosti da bi njegove slabije mehaničke karakteristike uticale na karakteristike mešavine i kako bi se izbegla potreba za povećanim sadržajem bitumena. Osim količine upotrebljenog RCA, na karakteristike asfaltnih mešavina veoma bitan uticaj ima i krupnoća upotrebljenog RCA. Zbog toga su, osim kontrolne mešavine, formirane tri

grupe mešavina sa RCA. U prvoj grupi, samo sitan prirodni agregat (0/4 mm) je zamenjivan recikliranim; u drugoj grupi, zamenjivan je samo krupan agregat (4/22.4 mm), dok je treća grupa obuhvatila mešavine u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjivan recikliranim. Svaku grupu su činile mešavine sa tri različita masena sadržaja RCA: 15%, 30% i 45%. U tabeli 3.1 je prikazan sastav agregata za svih 10 mešavina. Tako na primer, oznaka K-30 označava asfaltnu mešavinu u kojoj je 30% krupnog prirodnog agregata (4/22.4 mm) zamenjeno recikliranim agregatom.



Slika 3.1 Matrica ispitivanja komponentnih materijala

Sve mešavine su projektovane sa bitumenom B50/70, sa istim granulometrijskim sastavom i sa ciljanim sadržajem šupljina u asfaltnoj mešavini od 5.2%. Projektovana je asfaltna mešavina za noseći sloj AC 22 BASE, koja u odnosu na habajuće slojeve ima veću potrošnju agregata i manji sadržaj bitumena. Dodatno, noseći slojevi nisu direktno

izloženi saobraćajnom opterećenju i klimatskim uticajima, pa su tehnički uslovi koje treba zadovoljiti blaži u odnosu na habajuće slojeve.

Tabela 3.1 Sadržaj prirodnog agregata i RCA u asfaltnim mešavinama

Mešavina	Prirodni agregat		RCA	
	Sitan	Krupan	Sitan	Krupan
	($d \leq 4$ mm)	($d > 4$ mm)	($d \leq 4$ mm)	($d > 4$ mm)
Kontrolna (E)	100	100	0	0
S-15	85	100	15	0
S-30	70	100	30	0
S-45	55	100	45	0
K-15	100	85	0	15
K-30	100	70	0	30
K-45	100	55	0	45
SK-15	85	85	15	15
SK-30	70	70	30	30
SK-45	55	55	45	45

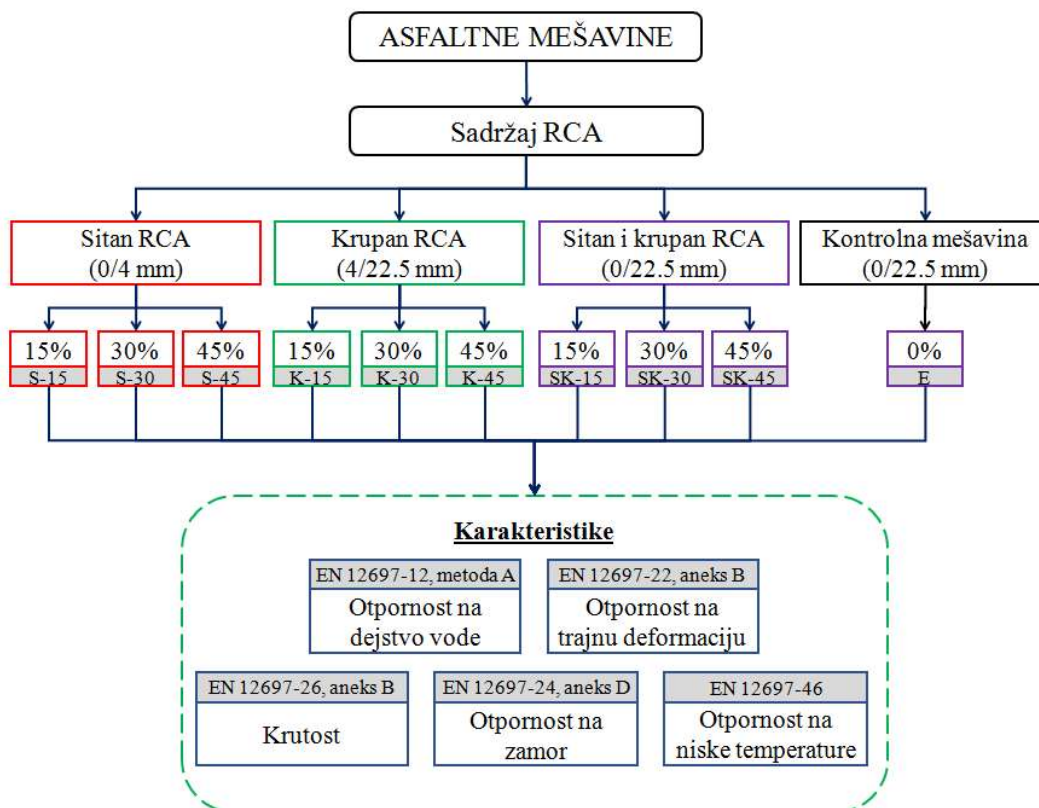
Nakon projektovanja asfaltnih mešavina po metodi Maršala, izvršeno je spravljanje i ugradnja mešavina u kalupe različitih dimenzija. Konačno, na tako dobijenim uzorcima sprovedena su ispitivanja: otpornost na dejstvo vode, krutost i otpornost na trajnu deformaciju, zamor i niske temperature.

Na slici 3.2 je prikazan plan eksperimentalnih ispitivanja koja su sprovedena na asfaltnim mešavinama.

3.2 Komponentni materijali

Ispitivanja osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika komponentnih materijala sprovedena su za potrebe projektovanja, kao i sagledavanja eventualnih efekata koje svaka od komponenata (prirodni agregat, reciklirani agregat, bitumen i filer) može imati

na svojstva asfaltnih mešavina. Predmetna ispitivanja su sprovedena u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije i Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, kao i u Laboratoriji za SEM analize na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu i Laboratoriji za hemijske analize "Anahem" u Beogradu.



Slika 3.2 Matrica ispitivanja asfaltnih mešavina

3.2.1 Agregat

Za spravljanje asfaltnih mešavina upotrebljene su dve vrste agregata: prirodni i reciklirani agregat, kao i filer krečnjačkog porekla.

3.2.1.1 Prirodni agregat

U svim asfaltnim mešavinama korišćen je prirodni drobljeni agregat "Ravnje" – Valjevo, krečnjačkog porekla, razvrstan na frakcije: 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm i

16/22.4 mm. Prirodni agregat je uzorkovan na asfaltnoj bazi STRABAG d.o.o u Obrenovcu. Osnovne karakteristike prirodnog agregata su prikazane u poglavlju 3.2.1.4.

3.2.1.2 Reciklirani agregat

Reciklirani agregat (RCA) je dobijen drobljenjem cementnog betona koji je služio kao podloga konstrukcije tramvajskih šina u ul. Vojvode Stepe u Beogradu. Drobljenje cementnog betona izvršeno je u proleće 2015. godine na postrojenju firme Vlado Baumaschinen d.o.o. u Beogradu. Otpadni beton je drobljen mobilnom čeljusnom drobilicom KOMATSU BR380, sa magnetnim separatorom za odvajanje armature, kapaciteta 240 t/h (slika 3.3). Na taj način je dobijen RCA krupnoće 0/100 mm (slika 3.4).



Slika 3.3 Mobilna čeljusna drobilica

U sledećoj fazi, RCA je transportovan na postrojenje za separaciju građevinskog preduzeća GEMAX d.o.o. u Zemun. Mokra sejanje RCA izvršeno je pomoću separacionog uređaja Binder+Co AG Gleisdorf, tip KS/DD 1600×5, kapaciteta 110 t/h. Agregat je razvrstan na sledeće nazivne frakcije: 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm i 16/32 mm.



Slika 3.4 Agregat od recikliranog betona krupnoće 0/100 mm

U poslednjoj fazi, RCA je transportovan na Građevinski fakultet. Najkrupnija frakcija RCA (16/32 mm), je pomoću drobilice RETSCH JAW CRUSHER BB 300 (slika 3.5), u Laboratoriji za materijale, predrobljena do zrna krupnoće 16/22.4 mm. Na taj način su dobijene četiri frakcije istih nazivnih veličina kao kod prirodnog agregata (Slika 3.6).



Slika 3.5 Laboratorijska drobilica



Slika 3.6 Prirodni agregat (gore) i RCA (dole)

S obzirom da se preko betonske podloge tramvajskih šina nalazio sloj asfalta, originalni beton nije bio pod direktnim uticajem atmosferilija. U trenutku uklanjanja i recikliranja, starost originalnog betona je bila preko 30 godina. S obzirom da podaci o kvalitetu originalnog betona nisu bili dostupni, iz većih komada betona su izvađena tri cilindrična uzorka (kerna) prečnika 65 mm i visine 65 mm i na njima je ispitana zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku. U tabeli 3.2 su dati rezultati ispitivanja, na osnovu kojih se može zaključiti da je originalni beton u trenutku ispitivanja odgovarao klasi čvrstoće C35/45. Na osnovu vizuelnog pregleda recikliranog agregata zaključeno je i da je originalni beton spravljan sa trofrakcijskim rečnim agregatom. Pored RCA (98%), upotrebljeni agregat je sadržao 1.2% asfalta i 0.8% opeke.

Tabela 3.2 Karakteristike originalnog betona

Uzorak	γ (g/cm^3)	$f_{p,c}$ (MPa)
1	2.394	56.3
2	2.334	41.8
3	2.339	49.9

3.2.1.3 Tretirani reciklirani agregat

U cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata, koji bi omogućio njegovu veću primenu u građevinarstvu, RCA je izložen tretmanima potapanja u hlorovodoničnu kiselinu i ubrzane karbonatizacije. Prvi postupak je imao za cilj uklanjanje dela cementnog maltera, a drugi ojačanje cementne matrice. Predmetni tretmani su sprovedeni na RCA krupnoće 4/8 mm i 8/16 mm.

Kod tretmana hlorovodoničnom kiselinom agregat je potopljen u rastvor HCl koncentracije 0.1 mol/dm^3 u trajanju od 24 h, a zatim ispran vodom, da bi se ocenili efekti uklanjanja cementnog maltera. Kod drugog postupka, RCA je izložen karbonatizaciji u komori MEMMERT ICH 260 C (slika 3.7) pri konstantnim uslovima: sadržaj CO_2 od 4%, temperatura od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ i vlažnost vazduha od 55% (u skladu sa predstandardom prCEN/TS 12390-12). Tokom celog procesa, na svaka 72 h, merena je promena mase uzoraka RCA. Proces ubrzane karbonatizacije je vršen do dostizanja konstantne mase, koja je dostignuta nakon 21 dana tretmana (Thiery i ost. 2013). Period ubrzane karbonatizacije RCA, približno odgovara karbonatizaciji u prirodnim uslovima u urbanim zonama ($0.3\% \text{ CO}_2$) u trajanju od jedne godine. Ovo je sračunato pomoću sledeće jednačine (Tang i ost. 2010; Carević & Ignjatović 2016):

$$t_{NCT} = \frac{[\text{CO}_2]_{ACT}}{[\text{CO}_2]_{NCT}} \cdot t_{ACT} = \frac{4}{0.3} \cdot 21 = 280 \text{ days} \approx 1 \text{ year} \quad (3.1)$$

gde je:

- t_{ACT} - vreme izloženosti kod ubrzanog testa (dani);
- t_{NCT} - vreme izloženosti prirodnim uslovima CO_2 (dani);
- $[\text{CO}_2]_{ACT}$ - koncentracija CO_2 kod ubrzanog testa (%);
- $[\text{CO}_2]_{NCT}$ - koncentracija CO_2 u prirodnim uslovima (%).

Na svim uzorcima agregata: netretiranom RCA, agregatu tretiranom kiselinom $\text{RCA}_{(\text{HCl})}$ i karbonatizovanom $\text{RCA}_{(\text{CO}_2)}$ ispitani su: prividna zapreminska masa, kao i zapreminska masa zasićenog, odnosno u sušnici osušenog agregata (EN 1097-6:2007), upijanje vode (EN 1097-6:2013), otpornost na drobljenje metodom "Los Angeles" (EN

1097-2:2013), promena mase nakon tretmana, pH vrednost (EN 16192:2011/EN 12457 (1-4):2002), sadržaj sulfata i hlorida (EN 16192/EPA 9056:2007) i mikrostruktura primenom elektronskog mikroskopa (SEM analiza).



Slika 3.7 Komora za karbonatizaciju

Rezultati ispitivanja fizičko – mehaničkih osobina sva tri tipa recikliranog agregata (netretiranog, tretiranog HCl-om i karbonatizovanog), prikazani su u tabeli 3.3.

U pogledu fizičkih svojstava RCA, dobijeni rezultati pokazali su da je posle tretmana sa HCl upijanje vode smanjeno za 0.1% (za 4/8 mm: sa 3.0% na 2.9%; za 8/16 mm: sa 4.1% na 4.0%). Istovremeno, došlo je do povećanja zapreminskih masa RCA u poređenju sa netretiranim agregatom: npr. ρ_{rd} je povećana za 1.6% (4/8 mm), i za 0.8% (8/16 mm). Pri tome je gubitak mase agregata tretiranog sa HCl iznosio 4.3% i 2.9%, za frakcije 4/8 mm i 8/16 mm, respektivno. Ovim je potvrđena recipročna zavisnost između upijanja vode i zapreminske mase agregata kao rezultat uklanjanja dela cementnog maltera koji je veoma porozan. Ovo potvrđuje rezultate dobijene od strane

drugih istraživača (Akbarnezhad et al. 2011; Katz 2004; V.W.V. Tam & C.M. Tam 2008; Zhan et al. 2014).

Znatno bolji rezultati dobijeni su postupkom karbonatizacije: smanjenje upijanja vode za 0.4% (za 4/8 mm: sa 3.0% na 2.6%) i 0.8% (za 8/16 mm: sa 4.1% na 3.3%) i povećanje zapreminske mase u suvom stanju za 1.4% (4/8 mm) i 0.4% (8/16 mm). Nakon potpune karbonatizacije došlo je i do povećanja ukupne mase agregata u iznosu od 0.9% (4/8 mm) i 1.4% (8/16 mm). Ovakve karakteristike RCA su rezultat formiranja produkata karbonatizacije u mikropukotinama cementnog maltera.

Tabela 3.3 Fizičko – mehaničke karakteristike agregata

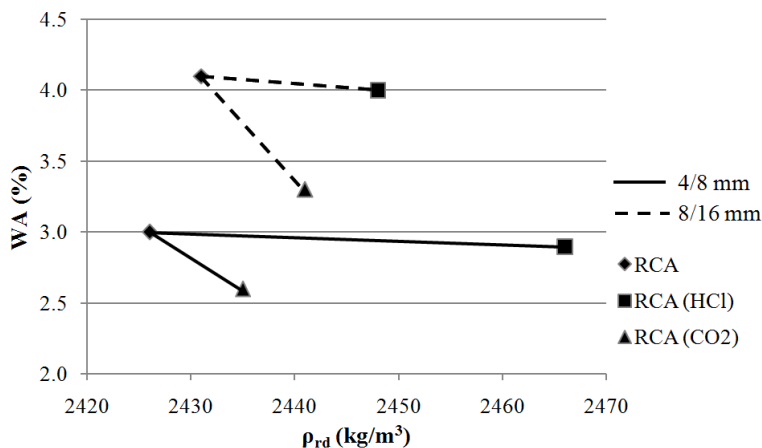
Parametar	RCA		RCA _(HCl)		RCA _(CO2)	
	4/8 mm	8/16 mm	4/8 mm	8/16 mm	4/8 mm	8/16 mm
ρ_a (kg/m ³)	2618	2699	2681	2654	2667	2657
ρ_{ssd} (kg/m ³)	2499	2530	2547	2525	2522	2523
ρ_{rd} (kg/m ³)	2426	2431	2466	2448	2435	2441
WA (%)	3.0	4.1	2.9	4.0	2.6	3.3
LA (%)	31.5		32.0		28.4	
Δm_1 (%)	-	-	-2.3	-2.2	0.9	1.4
Δm_2 (%)	-	-	-4.3	-2.9	0.9	1.4

U tabeli su korišćene sledeće oznake:

- ρ_a - prividna zapreminska masa zrna;
- ρ_{ssd} - stvarna zapreminska masa zasićenog, površinski osušenog uzorka;
- ρ_{rd} - stvarna zapreminska masa uzorka osušenog u sušnici;
- WA - upijanje vode;
- LA - "Los Angeles" koeficijent;
- Δm_1 - promena mase nakon tretmana HCl-om, odnosno nakon karbonatizacije;
- Δm_2 - promena mase nakon tretmana i prosejavanja kroz sito 4 mm, odnosno 8 mm.

Na slici 3.8 prikazan je dijagram promene upijanja vode i zapreminske mase RCA, u zavisnosti od primenjenog tretmana. Jasno se uočava da krupnija frakcija agregata ima

veće upijanje vode. Trendovi smanjenja upijanja vode su slični za obe frakcije i primarno zavise od primenjenog tretmana.



Slika 3.8 Trend promene upijanja vode u funkciji zapreminske mase RCA

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava RCA, na osnovu merenja otpornosti na drobljenje metodom "Los Angeles" pokazali su da zrna $\text{RCA}_{(\text{CO}_2)}$ poseduju zadovoljavajući kvalitet ($\text{LA} \leq 30\%$), ali i da preostala dva tipa RCA ne odstupaju mnogo od zahtevane vrednosti. Pri tome, nije bilo značajne razlike između netretiranog i kiselinom tretiranog agregata, što ukazuje na veoma dobru vezu (atheziju) između zrna prirodnog agregata i starog cementnog maltera. U slučaju karbonatizovanog RCA došlo je do povećanja otpornosti agregata na drobljenje u iznosu od približno 10% u odnosu na netretirani RCA.

Hemijske karakteristike krupnog RCA, pre i posle odgovarajućih tretmana, prikazane su u tabeli 3.4. Ispitivanja su sprovedena u akreditovanoj laboratoriji za hemijske analize "Anahem" u Beogradu.

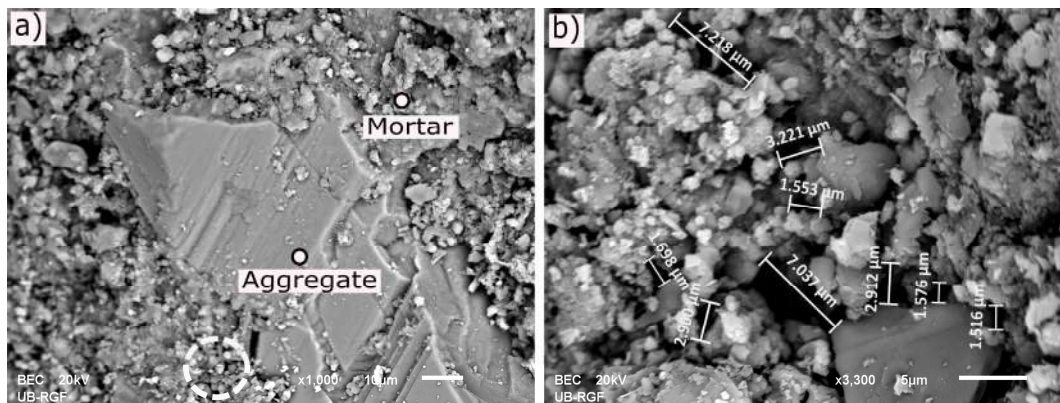
Nakon tretmana RCA, izvršena je kontrola koncentracije sulfata i hlorida, kao potencijalno štetnih jedinjenja. Dobijeni rezultati pokazali su da primena HCl značajno povećava sadržaj hlorida u agregatu i to za 20.9% (4/8 mm), odnosno za 120.2% (8/16 mm), što je bilo očekivano. Istovremeno, sadržaj sulfata se znatno smanjio nakon ovog tretmana (za oko 50%), što se može objasniti rastvaranjem i fizičkim uklanjanjem dela starog cementnog maltera. Postupak karbonatizacije praktično nije imao uticaja na

promenu sadržaja hlorida i sulfata u recikliranom agregatu. Vrednosti pH se tokom tretmana hlorovodoničnom kiselinom praktično nisu promenile, dok su se nakon karbonatizacije smanjile za 11.2% (4/8 mm), odnosno za 16.9% (8/16 mm).

Tabela 3.4 Hemijske karakteristike netretiranog i tretiranog RCA

Parametar	RCA		RCA _(HCl)		RCA _(CO₂)	
	4/8 mm	8/16 mm	4/8 mm	8/16 mm	4/8 mm	8/16 mm
pH vrednost	10.7	11.8	10.6	11.5	9.5	9.8
Sadržaj SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	1212	605	514	330	1008	576
Sadržaj Cl ⁻ (mg/kg)	177	242	214	533	175	271

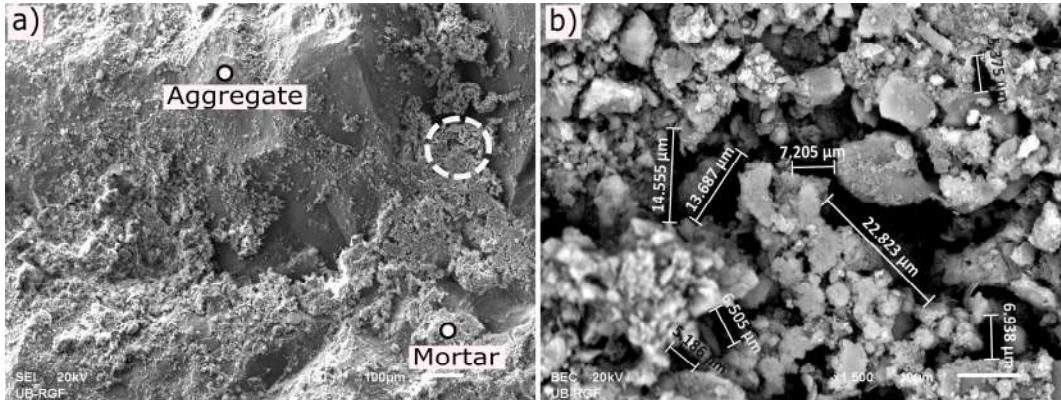
Poređenje mikrostrukture netretiranog i tretiranog RCA, sprovedeno je pomoću SEM aparature, oznake JEOL JSM-6610LV. SEM slike su napravljene sa uvećanjem od 5 µm do 100 µm. Karakteristični mikrografici su prikazani na slikama 3.9-3.11.



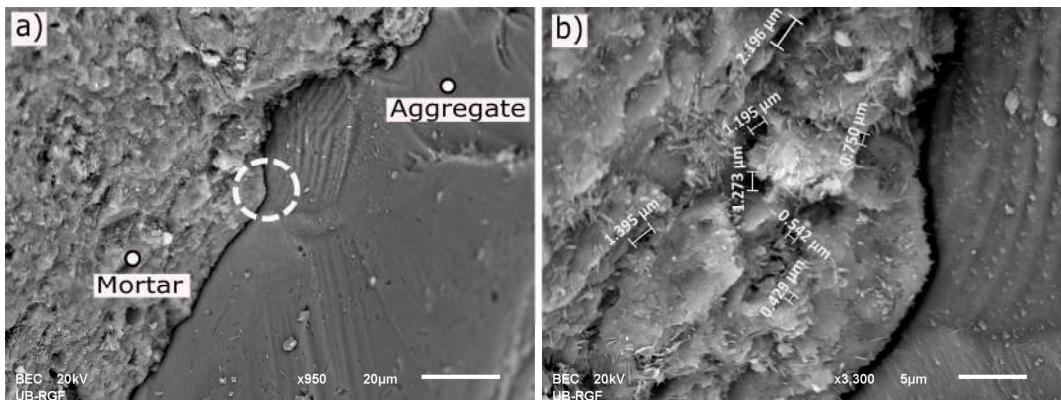
Slika 3.9 Površinska makrostruktura RCA bez tretmana (a) i uvećani detalj (b)

Morfologija netretiranog RCA je hrapava i nepravilnog oblika sa izraženom poroznošću i različitom debljinom zaostalog maltera, što površinu čini heterogenom. SEM analizom su jasno uočene brojne šupljine bez specifičnog oblika i dimenzija. Na slici 3.10 su uočljivi ostaci kiselinom nagriženog starog cementnog maltera, sa prisutnim brojnim šupljinama nepravilnog oblika čija dužina dostiže i 20 µm. Karbonatizacijom je

poroznost RCA znatno smanjena, pore su veličine do 2 μm (slika 3.11), što je u skladu sa dobijenim rezultatima fizičko-mehaničkih ispitivanja.



Slika 3.10 Površinska makrostruktura RCA nakon HCl tretmana (a) i uvećani detalj (b)



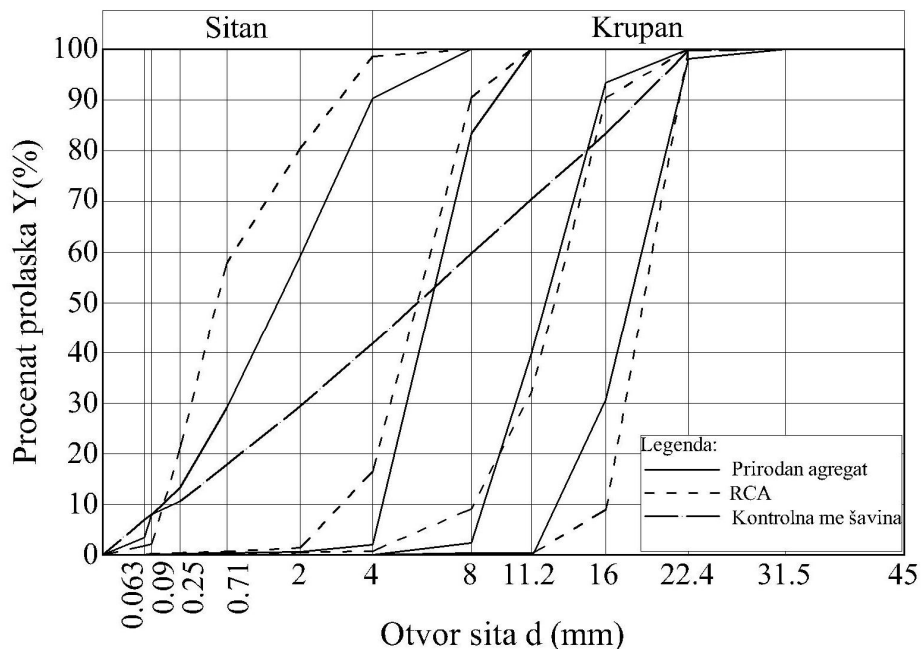
Slika 3.11 Površinska makrostruktura RCA nakon CO₂ tretmana (a) i uvećani detalj (b)

Tretiranjem RCA hlorovodoničnom kiselinom ili karbonatizacijom u manjoj meri se mogu poboljšati njegove fizičke i mehaničke karakteristike. Bolji efekat je postignut procesom karbonatizacije, koji je povoljan i sa ekološkog aspekta, za razliku od tretmana HCl-om. Ovo se pre svega ogleda u smanjenju upijanja vode recikliranog agregata. Ipak, proces karbonatizacije za posledicu ima smanjenje pH vrednosti, što može smanjiti atheziju između bitumena i RCA i asfaltnu mešavinu učiniti osetljivijom na dejstvo vode, ali i na neke druge vrste oštećenja. Dodatno, ovakvim tretmanima se komplikuje i poskupljuje proces pripreme RCA za upotrebu u građevinarstvu.

Imajući u vidu navedeno može se zaključiti da RCA dobijen drobljenjem betona visokog kvaliteta (klasa čvrstoće $\geq C35/45$), koji nije bio izložen agresivnim uticajima spoljašnje sredine, nije potrebno izlagati dodatnim tretmanima u cilju poboljšanja njegovih fizičko-mehaničkih karakteristika. Zbog toga su dalja eksperimentalna ispitivanja uticaja RCA na karakteristike asfalt betona sprovedena samo za netretirani RCA.

3.2.1.4 Komparativna analiza karakteristika prirodnog i recikliranog agregata

Granulometrijski sastav prirodnog i recikliranog agregata prikazan je na slici 3.12. Prva frakcija RCA (0/4 mm) je značajno sitnija od prirodnog agregata, dok su granulometrijske krive krupnih frakcija (>4 mm) slične.



Slika 3.12 Granulometrijski sastav agregata

Osnovne karakteristike agregata su date u tabeli 3.5. U poređenju sa prirodnim agregatom, RCA ima manju zapreminsku masu zbog zaostalog cementnog maltera. Takođe, zbog veće poroznosti cementnog maltera, RCA ima veće upijanje vode. Slabija otpornost na drobljenje, izražena preko LA koeficijenta, ukazuje na slabije mehaničke karakteristike RCA. Ipak, ekvivalentna vrednost LA, čak i u mešavini sa najvećom

količinom RCA, bila je i dalje manja od 30%, što zadovoljava tehničke uslove za klase materijala Z3, Z4 i Z5, što znači da odgovara za bitumenizirane noseće i vezne slojeve za sve kategorije saobraćajnog opterećenja (Putevi Srbije 2012).

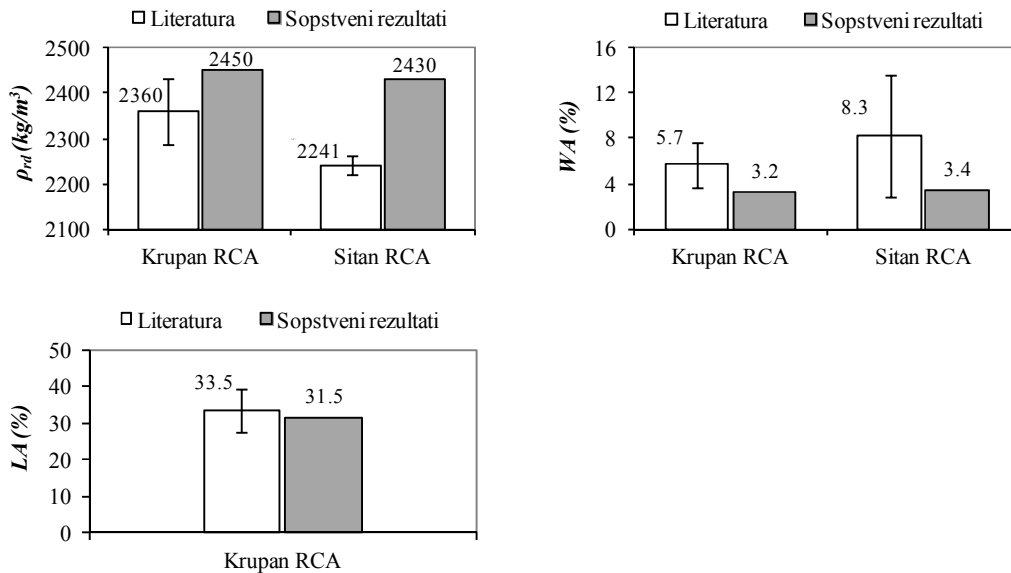
Tabela 3.5 Fizičko-mehaničke karakteristike agregata

	Parametar	Jedinice	Standard	RCA	Prirodni agregat
Sitan $d \leq 4$ mm	ρ_a	(kg/m ³)		2645	2717
	ρ_{ssd}	(kg/m ³)	EN 1097-6	2512	2650
	ρ_{rd}	(kg/m ³)		2430	2580
	WA	(%)		3.4	0.4
Krupan $d > 4$ mm	ρ_a	(kg/m ³)		2667	2743
	ρ_{ssd}	(kg/m ³)	EN 1097-6	2532	2731
	ρ_{rd}	(kg/m ³)		2450	2724
	WA	(%)		3.2	0.2
	LA	(%)	EN1097-2	31.5	26.1

U tabeli su korišćene sledeće oznake:

- ρ_a - prividna zapreminska masa zrna;
- ρ_{ssd} - stvarna zapreminska masa zasićenog, površinski osušenog uzorka;
- ρ_{rd} - stvarna zapreminska masa uzorka osušenog u sušnici;
- WA - upijanje vode;
- LA - "Los Angeles" koeficijent.

Poređenje osnovnih karakteristika recikliranog agregata korišćenog za spravljanje asfalt betona koji su predmet ove teze (RCA_{own}) i recikliranih agregata koji su korišćeni u 30 drugih istraživanja (RCA_{lit}) koja su analizirana u pregledu literature dato je na slici 3.13. Vrednosti stvarne zapreminske mase suvog uzorka, upijanje vode i LA koeficijent RCA_{lit} , su statistički obrađeni posebno za krupan i posebno za sitan agregat. Na slici 3.13 su prikazane prosečne vrednosti ovih karakteristika i rasipanje rezultata od plus/minus jedne standardne devijacije.



Slika 3.13 Poređenje osnovnih karakteristika RCA_{lit} i RCA_{own}

U poređenju sa rezultatima RCA_{lit} , zapreminska masa RCA_{own} je znatno veća i kod krupnog i kod sitnog agregata. Te vrednosti čak nisu ni obuhvaćene opsegom: srednja vrednost \pm jedna standardna devijacija za RCA_{lit} . Očekivano, veću zapreminsku masu prati i manje upijanje vode. Bolje karakteristike RCA_{own} u odnosu na RCA_{lit} su potvrđene i mehaničkim ispitivanjem otpornosti na drobljenje.

Hemijski sastav reprezentativnog uzorka RCA, dobijen masenom spektrometrijom, prikazan je u tabeli 3.6. Merenja su sprovedena u laboratoriji za SEM analize na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Hemijski sastav RCA određen je za oba makrostrukturalna elementa RCA: prirodni agregat i zaostali malter. Dobijeni rezultati pokazuju da se originalni beton sastojao pretežno od agregata silikatnog porekla (SiO_2).

Tabela 3.6 Hemijski sastav reprezentativnog uzorka RCA

Element strukture zrna RCA	Hemijski sastav (%)						
	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Prirodni agregat	67.64	-	-	31.88	-	0.48	-
Zaostali cementni malter	67.88	0.40	0.72	2.17	0.21	28.25	0.37

3.2.1.5 Filer

Za spravljanje asfaltnih mešavina korišćeno je kameno brašno (filer) krečnjačkog porekla, proizvođača "Rujevac" - Ljig. Filer je uzorkovan na asfaltnoj bazi STRABAG d.o.o u Obrenovcu. Granulometrijski sastav filera dat je u tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Granulometrijski sastav filera

d (mm)	0.063	0.09	0.25	0.71
Y (%)	75.9	84	97.2	100

3.2.2 Bitumen

U svim mešavinama korišćen je bitumen B 50/70 proizveden u Rafinieriji nafte u Pančevu. Određivanje osnovnih karakteristika bitumena izvršeno je konvencionalnim opitima, kao što su: penetracija, specifična masa i tačka razmekšavanja. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3.8.

Tabela 3.8 Osnovne karakteristike bitumena

Opit	Jedinice	Standard	Vrednost
Penetracija	(25°C, 0.1 mm)	EN 1426	53.4
Specifična masa	(kg/m ³)	EN 15326	1004
Tačka razmekšavanja	(°C)	EN 1427	50.5
Index penetracije	(-)	EN 12591	-0.9

3.3 Projektovanje asfaltnih mešavina

Svrha projektovanja asfaltnih mešavina je određivanje optimalnog sadržaja bitumena, za ciljani granulometrijski sastav agregata, da bi se dobila ekonomična mešavina zadovoljavajućih karakteristika. Optimalan sadržaj bitumena varira u zavisnosti od tipa i karakteristika upotrebljenih materijala, nivoa opterećenja i klimatskih uslova. Ukoliko je upotrebljena količina bitumena niža od optimalne, zrna agregata neće biti obavijena slojem bitumena u dovoljnoj meri, što će rezultovati manjom stabilnošću i trajnošću zbog štetnih uticaja vazduha i vode. Takođe, ukoliko se upotrebi više bitumena, zrna

agregata će imati previše "lubrikanta" koji će omogućiti lakše pomeranje zrna pod dejstvom saobraćajnog opterećenja, a time i veću deformabilnost asfaltnog sloja. Ovo može dovesti do isplivavanja bitumena na površinu, poremećaja same strukture asfalt betona i umanjenja njegove stabilnosti (Mamlouk & Zaniewski 2011). Kod bitumenom vezanih nosećih slojeva kolovozne konstrukcije sadržaj bitumena se kreće u uskim granicama od 3-5% u odnosu na ukupnu masu mešavine.

Dobro projektovana asfaltna mešavina treba da poseduje sledeće osobine:

- stabilnost (otpornost na deformacije pod opterećenjem);
- trajnost (otpornost na klimatske uticaje i dejstvo saobraćaja);
- fleksibilnost (otpornost na zamor pod dejstvom opterećenja);
- hrapavost (otpornost na klizanje površine kolovoza);
- vodonepropustljivost i
- ugradljivost.

3.3.1 Mineralna mešavina

Mineralnu mešavinu čine: kameno brašno (5%) i agregat sačinjen od frakcija sledećih nazivnih veličina: 0/4 mm (41%), 4/8 mm (15%), 8/16 mm (24%) i 16/22.4 mm (15%). Granulometrijska kriva mineralne mešavine prirodnog agregata prikazana je na slici 3.12. Zbog delimično različitog granulometrijskog sastava pojedinih frakcija prirodnog agregata i RCA, postoje i mala odstupanja granulometrijskog sastava mineralnih mešavina. U prilogu B je dat tabelaran prikaz granulometrijskog sastava svih 10 mineralnih mešavina. Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da su razlike u granulometrijskom sastavu između mešavina zanemarljive i kao takve ne mogu biti uzrok različitog ponašanja asfaltnih mešavina.

3.3.2 Projektovanje asfaltne mešavine po Maršalu

Projektovanje sastava kontrolne asfaltne mešavine sprovedeno je po metodi Maršala na temperaturi od 150°C, sa energijom zbijanja od dva puta po 50 udaraca. Pripremljeno je devet Maršalovih uzoraka (cilindrični uzorci prečnika 101.6 mm i visine 61-66 mm) podeljenih u tri grupe. Za svaku seriju uzoraka korišćena je ista mineralna mešavina sa različitim sadržajem bitumena. Na slici 3.14 je prikazana laboratorijska mešalica CONTROLS 16-B0072 u kojoj je vršeno umešavanje mase za prethodne probe. Optimalan sadržaj bitumena je usvojen za ciljani sadržaj šupljina (AV) od 5.2%.



Slika 3.14 Laboratorijska mešalica

Nakon definisanja sastava kontrolne asfaltne mešavine (E), na isti način po metodi Maršala, pristupilo se projektovanju sastava za preostalih devet asfaltnih mešavina u kojima je vršena delimična zamena prirodnog agregata recikliranim. Kako bi se omogućila uporedivost dobijenih rezultata za različite mešavine, optimalan sadržaj bitumena kod RCA mešavina je usvojen za ciljani sadržaj šupljina (AV) od 5.2% kao kod kontrolne mešavine.

Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina i izmerene vrednosti stabilnosti i tečenja po Maršalu za svaki od uzoraka prikazane su u Prilogu A. U tabeli 3.9 je prikazana

receptura svih 10 asfaltnih mešavina. Količine pojedinih komponentnih materijala su izražene u procentima u odnosu na ukupnu masu mešavine. U tabeli 3.10 su prikazane vrednosti optimalnog sadržaja bitumena (*OBC*), *AV*, šupljina u mineralnoj mešavini (*VMA*), procenat šupljina ispunjenih bitumenom (*VFB*), zapreminske mase (*G*), maksimalne zapreminske mase (G_{max}), kao i stabilnost i tečenje po Maršalu.

Tabela 3.9 Sastav asfaltnih mešavina

Meš.	Bit.	Kameno		Prirodni agregat				RCA			
		brašno									
			0/4	4/8	8/16	16/22.4	0/4	4/8	8/16	16/22.4	
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
E	3.4	4.83	39.6	14.5	23.2	14.5	0	0	0	0	
S-15	3.5	4.83	33.6	14.5	23.2	14.5	5.9	0	0	0	
S-30	3.5	4.83	27.7	14.5	23.2	14.5	11.9	0	0	0	
S-45	3.6	4.82	21.7	14.5	23.1	14.5	17.8	0	0	0	
K-15	3.4	4.83	39.6	12.3	19.7	12.3	0	2.2	3.5	2.2	
K-30	3.5	4.83	39.6	10.1	16.2	10.1	0	4.3	6.9	4.3	
K-45	3.5	4.83	39.6	8.0	12.7	8.0	0	6.5	10.4	6.5	
SK-15	3.6	4.82	33.6	12.3	19.7	12.3	5.9	2.2	3.5	2.2	
SK-30	3.9	4.81	27.6	10.1	16.1	10.1	11.8	4.3	6.9	4.3	
SK-45	4.4	4.78	21.6	7.9	12.6	7.9	17.6	6.5	10.3	6.5	

Optimalan sadržaj bitumena ima trend rasta sa povećanjem sadržaja RCA, što se može objasniti većom poroznošću i većom specifičnom površinom RCA. Ovakav trend je više izražen kod mešavina sa sitnim RCA u odnosu na mešavine sa krupnim RCA, kao rezultat veće specifične površine sitnijih zrna. Očekivano, u mešavinama sa najvećim sadržajem RCA (SK mešavine) i optimalan sadržaj bitumena je najveći.

Povećan sadržaj RCA, zbog veće poroznosti u odnosu na prirodni agregat i potrebe za većom količinom bitumena koja će obezbediti istu gustinu kao mešavina sa prirodnim agregatom, dovodi do smanjenja vrednosti zapreminske mase asfaltna mešavine. Sa povećanjem sadržaja RCA i OBC opada zapreminska masa asfaltnih mešavina.

Iako ne postoji jasna zavisnost između izmerenih vrednosti stabilnosti i tečenja po Maršalu i sadržaja upotrebljenog RCA, stabilnosti po Maršalu zadovoljavaju zahtevane uslove prema standardu SRPS U.E9.021, a zapreminske karakteristike zadovoljavaju Tehničke uslove za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012).

Tabela 3.10 Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina

Mešavina	OBC (%)	AV (%)	VMA (%)	VFB (%)	G (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	Stabilnost (kN)	Tečenje (mm)
E	3.4	5.2	13.5	61.0	2419	2553	12.0	3.3
S-15	3.5	4.9	13.4	63.2	2418	2543	12.5	3.0
S-30	3.5	4.6	13.0	64.9	2410	2525	12.8	3.4
S-45	3.6	5.4	14.0	61.1	2379	2516	12.4	3.2
K-15	3.4	5.0	13.2	61.9	2412	2540	12.5	3.2
K-30	3.5	5.6	14.0	59.6	2388	2531	12.6	3.3
K-45	3.5	5.4	13.8	60.6	2388	2525	12.2	3.3
SK-15	3.6	5.3	13.9	62.1	2403	2537	12.6	3.3
SK-30	3.9	5.4	14.7	63.0	2370	2506	13.4	3.6
SK-45	4.4	4.5	15.0	69.6	2372	2485	9.9	3.8
Zahtevano		5-9	NR	55-74	NR	NR	min 6	NR

* NR – nije definisano

3.4 Priprema uzoraka asfaltnih mešavina

U cilju utvrđivanja uticaja RCA na ponašanje asfalt betona izrađeni su uzorci za laboratorijska ispitivanja koji treba na realan način da simuliraju ponašanje asfalt betona u kolovoznoj konstrukciji. Da bi ocena rezultata ispitivanja bila merodavna, takvi uzorci treba da poseduju isti sastav i zapreminske karakteristike što sličnije asfaltu in-situ.

Nakon odmeravanja potrebnih količina, komponentni materijali su, pre umešavanja, zagrevani na temperaturi od 150°C. Odmah po postizanju temperature od 150°C, vršeno je njihovo umešavanje u automatskom mikseru INFRATEST 20-0160, kapaciteta 30 l (slika 3.15).



Slika 3.15 Automatski mikser

Za potrebe ispitivanja koja su prikazana u ovom radu korišćeni su različiti postupci ugradnje asfaltnih mešavina: Maršalov postupak sa dva puta po 50 ili 35 udaraca, ugradnja asfaltne mešavine u segmentnom nabijaču i ugradnja asfaltne mešavine na specijalnom poligonu pomoću valjka.

3.4.1 Maršalovi uzorci

Spravljanje standardnih Maršalovih uzoraka započeto je umešavanjem agregata, filera i bitumena koji su prethodno zagrejani na temperaturi od 150°C. Nakon spravljanja, mešavina je negovana u trajanju od 1 h na temperaturi od 150°C, posle čega je ugrađivana u Maršalovom nabijaču (slika 3.16). Zbijanje asfaltne mešavine je vršeno udarnim opterećenjem tega težine 4.45 kg, koji slobodno pada sa visine 46 cm. Prečnik Maršalovog tega je jednak prečniku uzoraka. Kod standardnih Maršalovih uzoraka zbijanje se vrši sa po 50 udaraca sa obe strane cilindričnog uzorka. Na taj način se dobijaju cilindrični uzorci prečnika 101.6 mm i visine cca. 63.5 mm. Na standardnim

Maršalovim uzorcima sprovedeno je ispitivanje zapreminskih karakterisitika i stabilnosti i tečenja po Maršalu.



Slika 3.16 Maršalov nabijač i uzorci

Za ispitivanje otpornosti asfaltna mešavina na dejstvo vode spravljaju se takođe Maršalovi uzorci po istoj proceduri, ali se zbijanje mešavine vrši sa 2×35 udaraca.

Prednost pripreme uzoraka asfaltna mešavina po Maršalovom postupku je niska cena i jednostavna procedura, što ovu metodu čini najzastupljenijom i na terenu i u laboratorijskim uslovima. Glavni nedostatak ove metode je istiskivanje bitumena usled velikog transfera energije pri udarima Maršalovog čekića, koji dovode do toga da se pojedina zrna agregata oslanjaju direktno jedna na druga bez sloja bitumena između njih. Dodatno, ovakvim načinom ugradnje se sprečava slobodna orijentacija zrna agregata, što direktno utiče na strukturu uzoraka i karakteristike mešavine u poređenju sa asfaltom ugrađenim u konstrukciju. Takođe, velika energija zbijanja može dovesti i do usitnjavanja slabijih zrna RCA i promene granulometrijskog sastava. Potencijalni nedostatak ove metode predstavlja i otežana priprema uniformnih i homogenih cilindričnih uzoraka većih dimenzija.

3.4.2 Gredice za krutost i zamor

Za potrebe ovog ispitivanja napravljen je poseban poligon sa tri polja dimenzija 500×500×70 mm. Nakon umešavanja agregata, filera i bitumena, asfaltne mešavina je negovana u trajanju od 1.5 h na temperaturi od 170°C, posle čega je vršena ugradnja pomoću valjka mase 1,000 kg. Na slici 3.17 je prikazana procedura ugradnje asfaltne mešavine. U poslednjem koraku, iz tako dobijenih ploča, isecanjem sa svih strana (slika 3.18) dobijeni su prizmatični uzorci (gredice). Za svaku od 10 ispitivanih asfaltnih mešavina napravljeno je po 18 gredica dimenzija 50×60×400 mm, od kojih je po 5 korišćeno za ispitivanje krutosti. Kako ispitivanje krutosti spada u nedestruktivne metode ispitivanja, te iste gredice su kasnije iskorišćene i za ispitivanje otpornosti na zamor (sprovedeno na 10 do 16 gredica) ili otpornosti na niske temperature (2 gredice).



Slika 3.17 Procedura ugradnje asfaltne mešavine u poligon

Ugradnja asfalta valjkom na improvizovanom poligonu veoma dobro simulira uslove na terenu (van Dijk 1975; Bonnot 1986; von Quintus i ost.; 1988). Glavna prednost ovakve tehnike ugradnje je da se može postići da orijentacija zrna agregata i zapreminska masa mešavine odgovaraju asfaltu ugrađenom u kolovoznu konstrukciju. Ovo se može obezbediti zbijanjem asfaltne mešavine u kalupima većih dimenzija pomoću valjka koji će obezbediti pritisak sličan onom koji se javlja na terenu. Na kraju, sečenjem ovakvih ploča mogu se dobiti prizmatični uzorci zahtevanih dimenzija. Nedostatak ove metode je potreba za specijalizovanom opremom.



Slika 3.18 Sečenje gredica iz asfaltnih ploča

3.4.3 Gredice za niske temperature

Gredice na kojima je ispitivana otpornost asfalt betona na niske temperature dobijene su naknadnom obradom (sečenjem) gredica napravljenih za ispitivanje krutosti i zamora. Pre ispitivanja zamora, od 18 gredica dimenzija $50 \times 60 \times 400$ mm za svaku mešavinu, uzete su po dve gredice, od kojih su ponovnim sečenjem dobijeni novi prizmatični uzorci dimenzija $50 \times 50 \times 160$ mm (slika 3.19).



Slika 3.19 Gredice za ispitivanje krutosti/zamora i gredice za ispitivanje otpornosti na niske temperature

3.4.4 Ploče za kolotrage

U cilju simuliranja uslova na asfaltnoj bazi i na terenu, asfaltna mešavina je pre ugradnje kondicionirana na temperaturi 135°C u trajanju od 4 h. Za svaku asfaltnu mešavinu, u segmentnom nabijaču (slika 3.20) pripremljene su po dve ploče dimenzija 320×260×70 mm, u skladu sa EN 12697-33.

Proces zbijanja asfaltne mešavine segmentnim nabijačem se sprovodi u nekoliko koraka i programiran je tako da odgovara procesu ugradnje asfalta na terenu pomoću mehanizacije. Zbijanju mešavine prethodi zagrevanje kalupa i valjka na temperaturi od 80 °C za nemodifikovane bitumene. U kalup se sipa asfaltna mešavina, zatim počinje proces zbijanja: prvo se vrši zbijanje prelazima čeličnim segmentom pri konstantnoj deformaciji i ograničenom opterećenju, sa hodom od 0.5 mm po prelazu, do maksimalne sile od 2.6 kN; potom sledi tzv. ravnanje uzorka sa 7 prelaza segmenta pri konstantnoj sili, na taj način se simulira rad finišera na terenu; zatim se vrši zbijanje konstantnim opterećenjem od 0.5 kN i to sa 15 prelaza segmenta; potom se zbjija sa potrebnim brojem prelaza segmenta sa konstantnim priraštajem opterećenja od 1.3 kN/prelazu do maksimalne sile od 19.5 kN, i rasterećuje istom brzinom, čime se simulira završno zbijanje valjcima.



Slika 3.20 Segmentni nabijač (levo) i ploče za ispitivanje kolotrage (desno)

3.4.5 Analiza zapreminskih karakteristika različitih uzoraka

Iako se prilikom spravljanja i ugradnje asfaltnih mešavina različitim postupcima vodilo računa o usvojenim recepturama, izmerene vrednosti zapreminskih karakteristika na Maršalovim uzorcima, gredicama i pločama za kolotrage nisu bile iste. Ovo je posledica pre svega različitih tehnika ugradnje (oblik uzoraka, način nanošenja opterećenja, temperatura zbijanja, itd.). Prosečne vrednosti zapreminskih karakteristika za ova tri tipa uzoraka prikazane su u tabeli 3.11 i 3.12. Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina za svaki od uzoraka prikazane su u Prilogu C.

Najveće vrednosti zapreminskih masa izmerene su na Maršalovim uzorcima koji su ugrađivani sa 2×50 udaraca. U odnosu na te uzroke, zapreminske mase na gredicama su bile niže za 0.4% do 3.0%, odnosno za 0.5% do 3.7% kod ploča za kolotrage. Ova odstupanja su se značajno odrazila na sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini koji je kod većine mešavina na gredicama i pločama za kolotrage bio znatno veći od projektovanih 5.2%. Zbog velikog uticaja AV na karakteristike asfaltnih mešavina, dobijene vrednosti treba uzeti u obzir prilikom analize rezultata do kojih će se doći tokom eksperimenta. Ipak, izmerene vrednosti i AV i VFB za većinu mešavina nalaze se u propisanom području.

Za razliku od gore pomenutih uzoraka kod kojih se težilo istoj zapreminskoj strukturi, kod Maršalovih uzoraka namenjenih ispitivanju na dejstvo vode (koji su ugrađivani sa 2×35 udaraca) zapreminske mase su bile značajno niže, a sadržaj šupljina značajno veći u odnosu na Maršalove uzorka ugrađivane sa 2×50 udaraca, što je bilo očekivano.

Tabela 3.11 Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina Maršalovih uzoraka

Meš.	Maršalovi uzorci 2×50 zbivanja							Maršalovi uzorci 2×35 zbivanja				
	OBC (%)	G _{max} (kg/m ³)	G (kg/m ³)	AV (%)	V _{bit} (%)	VMA (%)	VFB (%)	G (kg/m ³)	AV (%)	V _{bit} (%)	VMA (%)	VFB (%)
E	3.4	2553	2419	5.2	8.2	13.5	61.0	2348	8.0	8.0	16.0	49.8
S-15	3.5	2543	2418	4.9	8.5	13.4	63.2	2312	9.1	8.1	17.2	47.1
S-30	3.5	2525	2410	4.6	8.4	13.0	64.9	2317	8.2	8.1	16.3	49.6
S-45	3.6	2516	2379	5.4	8.6	14.0	61.1	2298	8.7	8.3	16.9	48.8
K-15	3.4	2540	2412	5.0	8.2	13.2	61.9	2298	9.5	7.8	17.3	45.0
K-30	3.5	2531	2388	5.6	8.3	14.0	59.6	2290	9.5	8.0	17.5	45.7
K-45	3.5	2525	2388	5.4	8.3	13.8	60.6	2263	10.4	7.9	18.3	43.3
SK-15	3.6	2537	2403	5.3	8.6	13.9	62.1	2305	9.1	8.3	17.4	47.5
SK-30	3.9	2506	2370	5.4	9.2	14.7	63.0	2281	9.0	8.9	17.9	49.7
SK-45	4.4	2485	2372	4.5	10.4	15.0	69.6	2280	8.2	10.0	18.3	54.9
Zahtevano				5-9			55-74					

U tabeli su korišćene sledeće oznake:

- | | | | |
|------------------|--|------------------|--|
| OBC | - optimalan sadržaj bitumena; | V _{bit} | - zapreminski sadržaj bitumena u asfaltnoj mešavini; |
| G _{max} | - maksimalna zapreminska masa asfaltno mešavine; | VMA | - sadržaj šupljina u mineralnoj mešavini; |
| G | - zapreminska masa asfaltno mešavine; | VFB | - sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom; |
| AV | - sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini. | | |

Tabela 3.12 Zapreminske karakteristike asfaltnih mešavina gredica i ploča za kolotrage

Meš.	Gredice iz poligona							Ploče za kolotrage				
	OBC (%)	G_{\max} (kg/m ³)	G (kg/m ³)	AV (%)	V_{bit} (%)	VMA (%)	VFB (%)	G (kg/m ³)	AV (%)	V_{bit} (%)	VMA (%)	VFB (%)
E	3.4	2553	2409	5.6	8.2	13.8	59.2	2389	6.4	8.1	14.5	55.8
S-15	3.5	2543	2390	6.0	8.4	14.4	58.1	2407	5.3	8.4	13.8	61.1
S-30	3.5	2525	2337	7.4	8.2	15.6	52.3	2363	6.4	8.3	14.7	56.3
S-45	3.6	2516	2339	7.0	8.4	15.4	54.5	2334	7.2	8.4	15.6	53.7
K-15	3.4	2540	2371	6.7	8.1	14.7	54.8	2330	8.3	7.9	16.2	48.9
K-30	3.5	2531	2362	6.7	8.3	14.9	55.3	2332	7.9	8.2	16.0	50.9
K-45	3.5	2525	2340	7.3	8.2	15.5	52.8	2300	8.9	8.0	17.0	47.4
SK-15	3.6	2537	2383	6.1	8.6	14.6	58.5	2343	7.6	8.4	16.1	52.4
SK-30	3.9	2506	2354	6.1	9.2	15.2	60.2	2315	7.6	9.0	16.6	54.2
SK-45	4.4	2485	2359	5.1	10.4	15.4	67.2	2327	6.4	10.2	16.6	61.7
Zahtevano				5-9			55-74		5-9			55-74

U tabeli su korišćene sledeće oznake:

- | | | | |
|------------|--|------------------|--|
| OBC | - optimalan sadržaj bitumena; | V_{bit} | - zapreminski sadržaj bitumena u asfaltnoj mešavini; |
| G_{\max} | - maksimalna zapreminska masa asfaltna mešavine; | VMA | - sadržaj šupljina u mineralnoj mešavini; |
| G | - zapreminska masa asfaltna mešavine; | VFB | - sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom; |
| AV | - sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini. | | |

3.5 Rezime

Reciklirani agregat koji je korišćen u istraživanju dobijen je drobljenjem originalnog cementnog betona ujednačenog i relativno visokog kvaliteta, koji je u trenutku ispitivanja odgovarao klasi čvrstoće C35/45. Pored RCA (98%) upotrebljeni agregat je sadržao 1.2% asfalta i 0.8% opeke. U odnosu na prirodni agregat, RCA je imao manju zapreminsku masu i veće upijanje vode. Ipak, u odnosu na RCA korišćen u drugim istraživanjima, RCA upotrebljen u eksperimentalnim ispitivanjima prikazanim u ovoj disertaciji imao je znatno manje upijanje i veću zapreminsku masu.

U cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata, RCA je izložen tretmanima hlorovodoničnom kiselinom i ugljendioksidom (ubrzana karbonatizacija). Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika i hemijske analize su pokazali da se pomenutim tretmanima RCA u manjoj meri mogu poboljšati njegove karakteristike. Ipak, ostvarena poboljšanja nisu opravdana sa praktičnog i ekonomskog aspekta. Iz tog razloga spravljanje asfaltnih mešavina je vršeno sa netretiranim RCA.

Planom eksperimenta je predviđeno spravljanje 10 asfaltnih mešavina. Osim kontrolne mešavine, formirane su tri grupe mešavina sa RCA. U prvoj grupi, samo sitan prirodni agregat (0/4 mm) je zamenjivan recikliranim; u drugoj grupi, zamenjivan je samo krupan agregat (4/22.4 mm), dok je treća grupa obuhvatila mešavine u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjivan recikliranim. Svaku grupu su činile mešavine sa tri različita sadržaja RCA: 15%, 30% i 45%.

Sve mešavine su projektovane sa bitumenom B 50/70, sa istim granulometrijskim sastavom i sa ciljanim sadržajem šupljina u asfaltnoj mešavini od 5.2%. Projektovana je asfaltna mešavina za noseći sloj kolovozne konstrukcije AC 22 BASE.

Za potrebe planiranih ispitivanja na asfalt betonima, ugradnja asfaltnih mešavina je sprovedena Maršalovim postupkom, segmentnim nabijačem i ugradnjom pomoću valjka na specijalnom poligonu. Na taj način su dobijeni cilindrični, pločasti i prizmatični

uzorci na kojima su, pre bilo kakvih ispitivanja, određene osnovne zapreminske karakteristike.

4 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja i diskusija

4.1 Uvod

Nakon pripreme odgovarajućih uzoraka pristupilo se eksperimentalnim ispitivanjima asfaltnih betona sa različitim sadržajem recikliranog agregata. Najveći deo ispitivanja, sproveden je u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Ta ispitivanja su obuhvatila određivanje: otpornosti na dejstvo vode, modula krutosti, otpornosti na trajnu deformaciju i otpornosti na zamor. Ispitivanje otpornosti asfaltnih betona na dejstvo niskih temperatura sprovedeno je na Institutu za saobraćajnice Tehničkog Univerziteta u Braunšvajgu (Nemačka).

U poglavljima 4.2-4.6 je opisan postupak ispitivanja i izvršena je analiza dobijenih rezultata.

4.2 Otpornost na dejstvo vode

Otpornost asfaltnih betona na dejstvo vode ispitana je merenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) suvih i vlažnih uzoraka u svemu prema standardu EN 12697-12, metoda A. Za potrebe ovog ispitivanja, napravljeno je po šest Maršalovih cilindara (videti poglavlje 3.4.1) za sve tipove mešavina. Predmetni uzorci su podeljeni na dve grupe po tri uzorka, tako da prosečne vrednosti zapreminskih masa u obe grupe budu što približnije. Jedna grupa je držana na suvom na sobnoj temperaturi od 20°C, dok je druga grupa prvo u trajanju od 30 min potopljena u vodu pod pritiskom 6.7 kPa, a potom u trajanju od 72 h kondicionirana u vodi na temperaturi od 40°C. Nakon pomenutog kondicioniranja, pre merenja čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS), uzorci su čuvani na temperaturi od 25°C u trajanju od 2 h. Ispitivanje ITS je sprovedeno

na univerzalnoj presi UTM-25 prema standardu EN 12697-23 (slika 4.1). Čvrstoća pri indirektnom zatezanju je sračunata po sledećoj formuli:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d_s} \quad (4.1)$$

gde je:

P - sila loma (kN);

h - visina uzorka (mm);

d_s - prečnik uzorka (mm).

Kao mera otpornosti asfaltnih betona na dejstvo vode definiše se odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) vlažnih i suvih uzoraka:

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

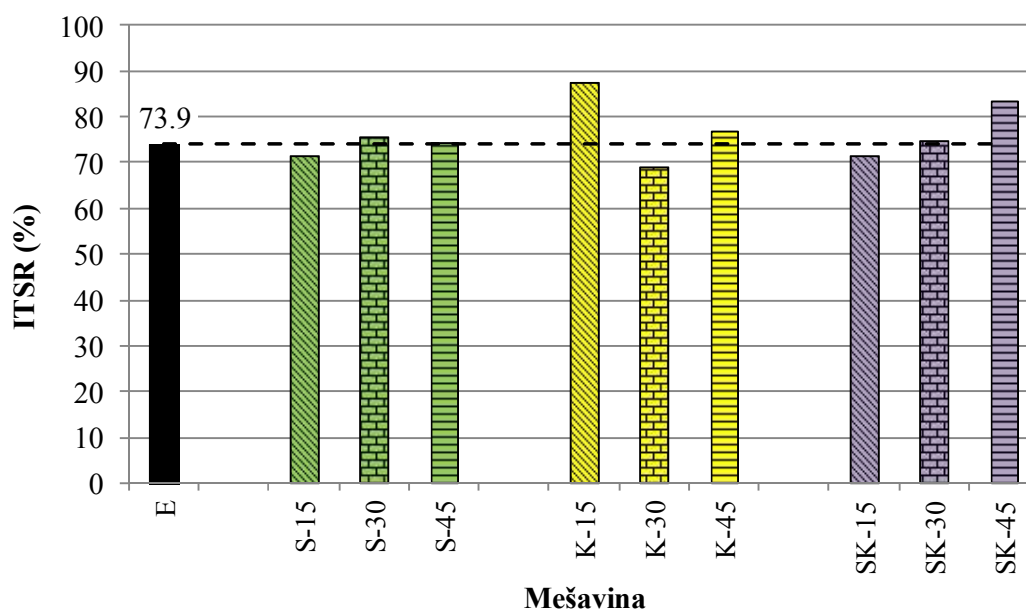


Slika 4.1 Dispozicija ispitivanja čvrstoće na indirektno zatezanje (ITS)

Izmerene vrednosti ITS svih ispitivanih uzoraka su date u prilogu D, a u tabeli 4.1 su prikazane prosečne vrednosti suvih (ITS_{dry}) i vlažnih (ITS_{wet}) uzoraka za svaku od ispitivanih mešavina, kao i njihov odnos (ITSR). Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) vlažnih i suvih uzoraka prikazan je i grafički na slici 4.2.

Tabela 4.1 Prosečne vrednosti ITS i vrednost ITSR

Mešavina	ITS_{dry} (MPa)	ITS_{wet} (MPa)	ITSR (%)
E	937.2	692.9	73.9
S-15	851.6	609.2	71.5
S-30	921.7	696.6	75.6
S-45	963.3	719.5	74.7
K-15	771.5	676.0	87.6
K-30	981.1	679.1	69.2
K-45	879.9	676.3	76.9
SK-15	985.8	706.7	71.7
SK-30	1010.2	757.5	75.0
SK-45	1068.0	892.3	83.5



Slika 4.2 Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo vode

Izmerene vrednosti ITS, kod asfaltnih mešavina spravljenih sa RCA (S, K i SK mešavine) nezavisno od uslova kondicioniranja, pokazuju trend rasta sa povećanjem sadržaja RCA. Izuzetak je samo mešavina K-45. Ovakvi rezultati su posledica bolje uklještenosti i većeg trenja između zrna RCA, usled hrapavije površinske teksture RCA i oštrijih ivica.

Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR), koji predstavlja meru otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode, kod većine asfaltnih betona sa RCA ima veće vrednosti u poređenju sa kontrolnom mešavinom. Odstupanja u odnosu na kontrolnu mešavinu kreću se u granicama od -4.7% (mešavina K-30) do +13.7% (mešavina K-15). Izuzev mešavina K-15, K-30 i SK-45, odstupanja ITSR u odnosu na kontrolnu mešavinu kreću se u granicama od $\pm 3\%$ i sa inženjerske strane nisu značajna.

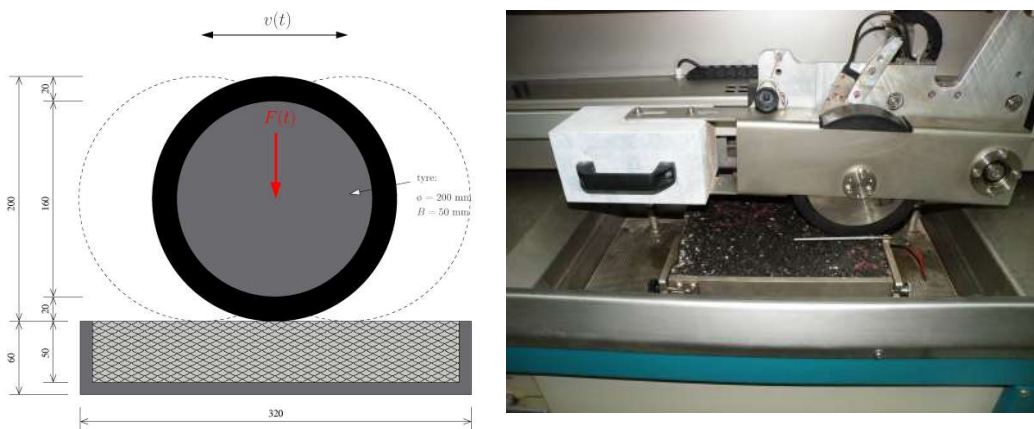
S obzirom da su izmerene vrednosti ITSR kod većine RCA asfaltnih mešavina veće u odnosu na kontrolnu mešavinu, i da Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012) ne propisuju minimalne uslove za ITSR, može se zaključiti da sa stanovišta otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode ne postoji nikakva prepreka za delimičnu zamenu prirodnog agregata recikliranim u količini do 45%.

4.3 Otpornost na trajnu deformaciju

Ispitivanje trajne deformacije asfaltnih betona vršeno je pomoću opita točkom na vazduhu, pri temperaturi od 60°C, nakon 10,000 ciklusa (20,000 prelaza), u svemu prema EN 12697-22, Anex B, mali uređaj. Opterećenje točkom od 700 N se prenosi preko kontaktne površine od 1900 mm² sa frekvencijom od 0.88 Hz. Prema ovoj metodi, otpornost asfaltnih betona na trajnu deformaciju određuje se merenjem dubine kolotruga koji se formira nakon svakog ciklusa opterećenja točkom. Na slici 4.3 prikazan je laboratorijski uređaj za WTT (Wheel tracking test) proizvođača INFRA TEST 20-4000, pomoću kog su ispitivane trajne deformacije. Način nanošenja opterećenja prikazan je na slici 4.4.

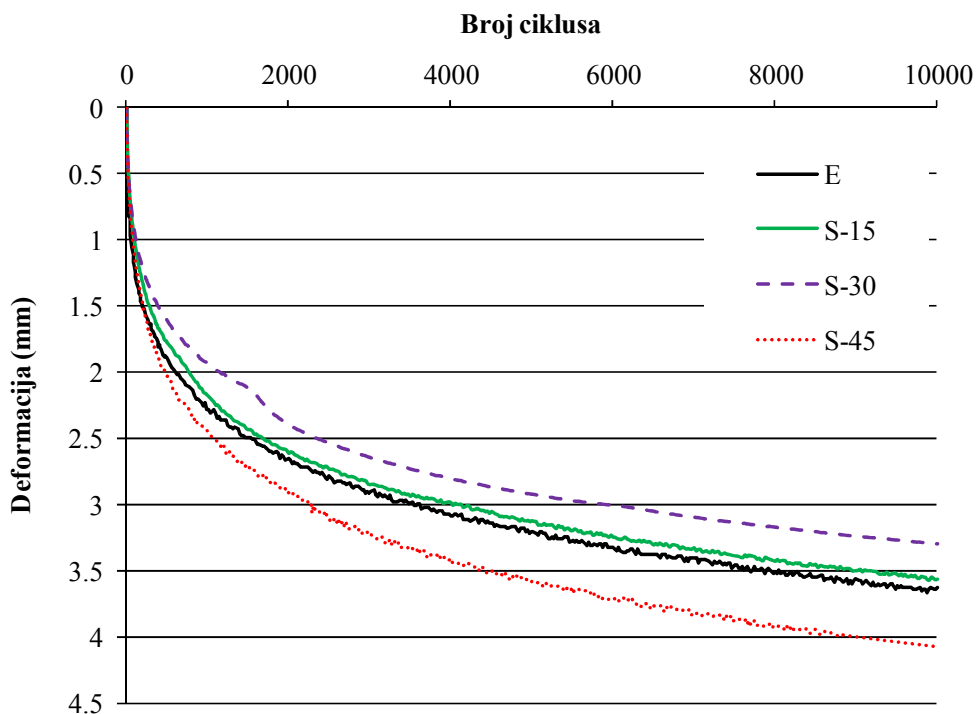


Slika 4.3 Uređaj za ispitivanje trajnih deformacija

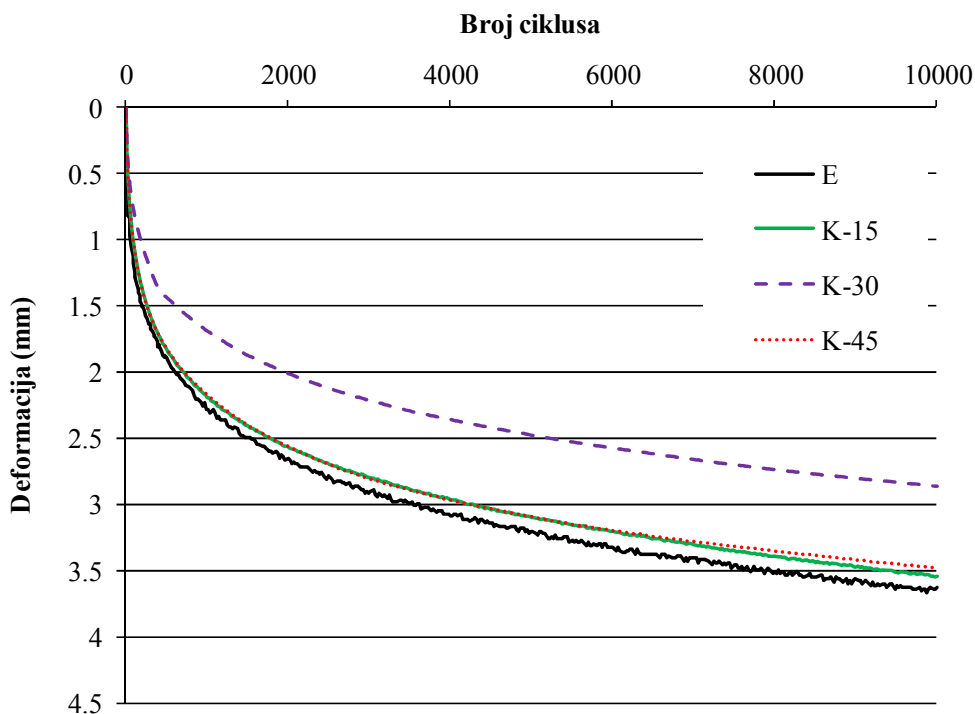


Slika 4.4 Dispozicija ispitivanja asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju

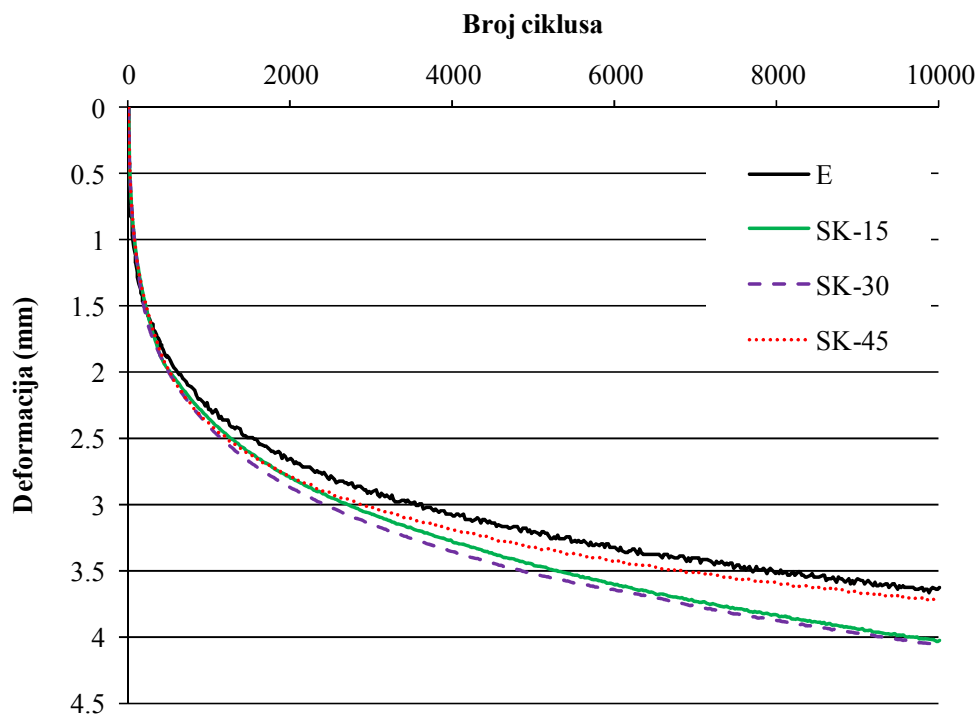
Rezultati ispitivanja dubine kolotraga u funkciji broja ciklusa saobraćajnog opterećenja prikazani su na slikama 4.5-4.17. Deformacije prikazane na pomenutim slikama predstavljaju prosečne vrednosti deformacija od dva uzorka, za svaku od ispitivanih mešavina.



Slika 4.5 Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa sitnim RCA



Slika 4.6 Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa krupnim RCA



Slika 4.7 Trajna deformacija asfaltnih mešavina sa sitnim i krupnim RCA

Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da delimična zamena prirodnog agregata recikliranim ne utiče u bitnoj meri na dubinu kolotruga. Dodatak krupnog RCA generalno povećava otpornost na trajnu deformaciju, kao i dodatak do 30% sitnog RCA. Ovako dobro ponašanje asfalta sa dodatkom RCA može se objasniti strukturom i teksturom RCA. Naime, površine RCA su hrapave, oštroičine i višestruko zdrobljene, što povećava specifičnu površinu i trenje između zrna agregata, obezbeđujući na taj način dobru uklještenost zrna, koja se suprotstavlja pomeranju pojedinih zrna usled dejstva saobraćajnog opterećenja. S obzirom da bitumen na povišenim temperaturama razmekšava, slabeći karakteristike veze i čvrstoću pri smicanju, u ovom slučaju, struktura agregata igra glavnu ulogu u otpornosti asfaltnih betona na trajnu deformaciju. Ipak, kombinovani uticaj povećanog sadržaja bitumena i RCA dovodi do većih trajnih deformacija kod mešavina sa sitnim i krupnim RCA (SK mešavine), ali su one i dalje manje od 7%, koliko je dopušteno prema važećim Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012).

U tabeli 4.2 su prikazani rezultati opita točkom. Vrednosti dubine kolotruga i proporcionalne dubine kolotruga (u odnosu na stvarnu visinu asfaltne ploče) su izmerene nakon 10,000 ciklusa opterećenja. Sa dijagrama trajne deformacije, za svaku od 10 ispitanih mešavina, određen je nagib krive između 5,000 i 10,000 ciklusa opterećenja. Kod svih RCA mešavina, izuzev mešavine SK-30, nagib krive je isti ili manji od kontrolne mešavine. Priraštaj trajnih deformacija najsporiji je kod asfaltnih mešavina sa sitnim RCA.

Dobijeni rezultati pokazuju da asfaltne mešavine sa sitnim i krupnim RCA, u količini do 45%, zadovoljavaju tehničke uslove sa aspekta trajnih deformacija. S obzirom da se vrednosti proporcionalne dubine kolotruga kreću u granicama od 2.9% (mešavina K-30) do 5.5% (mešavine S-45, SK-15 i SK-30) što je znatno niže od dozvoljenih 7%, može se zaključiti da dodatak RCA u asfaltnim mešavinama može biti i značajno veći od 45%, naročito kad je u pitanju krupan RCA.

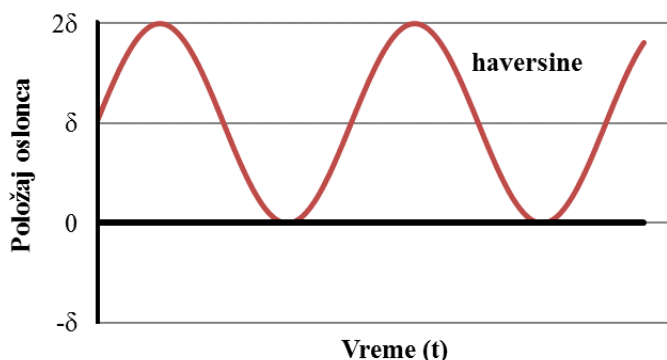
Tabela 4.2 Rezultati opita točkom

Mešavina	Dubina kolotruga (mm)	Proporcionalna dubina kolotruga (%)	Nagib krive
Kontrolna (E)	3.6	5.0	0.09
S-15	3.6	4.9	0.07
S-30	3.3	4.5	0.07
S-45	4.0	5.5	0.07
K-15	3.5	4.8	0.09
K-30	2.9	3.9	0.08
K-45	3.5	4.6	0.07
SK-15	4.0	5.5	0.07
SK-30	4.1	5.5	0.11
SK-45	3.7	5.1	0.07
Zahtevano		7.0	

4.4 Modul krutosti

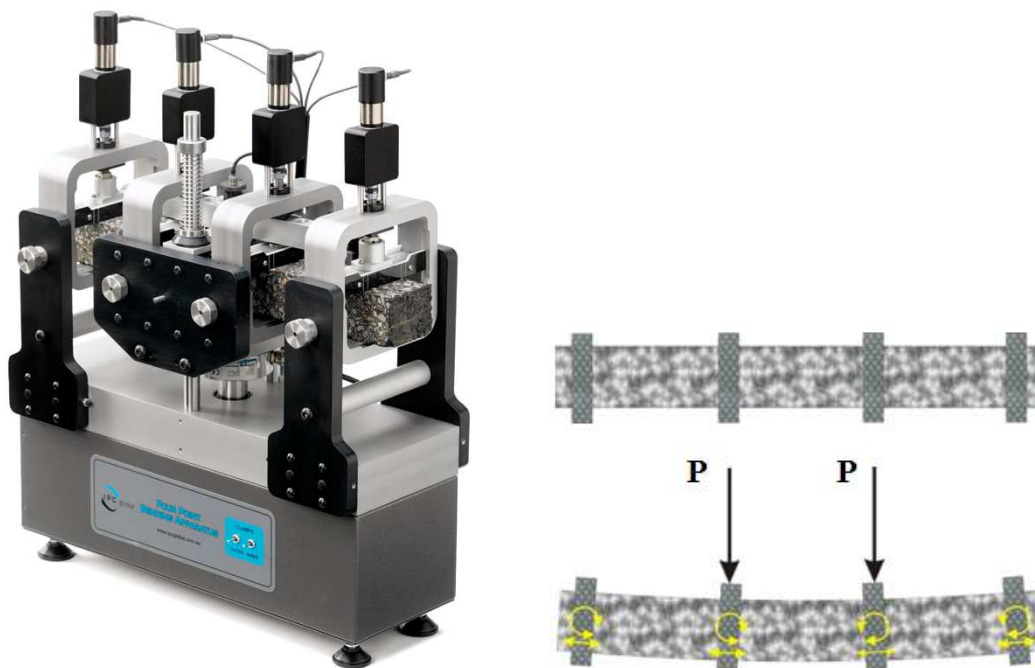
Kompleksni modul i fazni ugao asfaltnih betona ispitan je savijanjem gredica opterećenih u četiri tačke, u svemu prema EN 12697-26, Annex B.

Opit je vršen na temperaturama od 5°C, 15°C i 25°C pri frekvencijama 0.1, 1, 5, 8 i 10 Hz. Opterećenje je nanošeno u vidu sinusne funkcije ("haversine" sinusoida) sa kontrolisanom dilatacijom od 50 µε, čime je sprečena mogućnost pojave oštećenja usled zamora. Za razliku od obične sinusne funkcije, "haversine" sinusoida je takva da izaziva samo dilatacije zatezanja sa jedne strane, odnosno samo dilatacije pritiska sa druge strane uzorka. Na taj način je omogućena kontrola dilatacije bez prolaska gredice kroz neutralan položaj, čime bi u suprotnom došlo do izvesne relaksacije materijala. Oblik signala opterećenja prikazan je na slici 4.8. Trajanje opita je ograničeno na 100 ciklusa, da ne bi došlo do pojave trajne deformacije i remećenja naponskog stanja u gredicama.



Slika 4.8 Oblik signala opterećenja pri ispitivanju krutosti

Dispozicija ispitivanja modula krutosti prikazana je na slici 4.9. Pri ovom ispitivanju u krajnjim osloncima je sprečeno vertikalno pomeranje uzoraka, a dozvoljena rotacija i horizontalno pomeranje. Savijanje gredice se realizuje pomoću dva unutrašnja oslonca u vertikalnom pravcu, upravno na podužnu osu uzorka. Ovakvim opitom se simulira stanje napona i deformacija u kolovozu pri prelasku osovine u idealizovanom preseku. Opit je sproveden na uređaju za savijanje IPS GLOBAL 0002 5020 u komori CONTROLS 77-b3300 (slika 4.10).



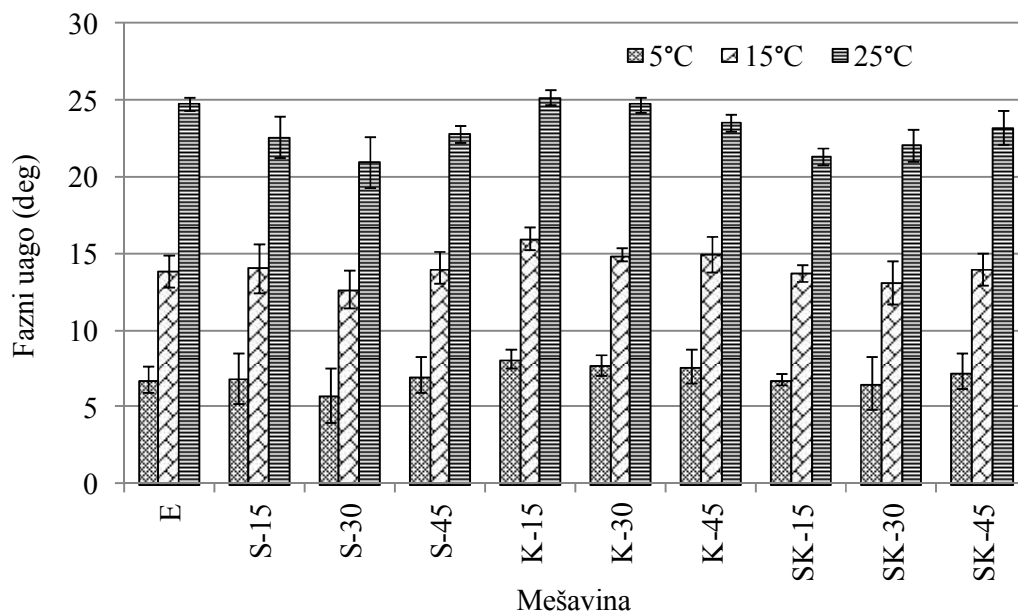
Slika 4.9 Dispozicija ispitivanja modula krutosti

Pre izlaganja opterećenju predmetni uzorci su negovani na temperaturi ispitivanja u trajanju od minimum 2 h. Na slikama 4.11 i 4.12 su prikazane prosečne vrednosti faznog ugla i modula krutosti (apsolutne vrednosti kompleksnog modula $|E^*|$) na frekvenciji od 8 Hz nakon 100 ciklusa opterećenja, u skladu sa stadardom EN 13108-20:2006 (Annex D). Na oba dijagrama su osim prosečnih vrednosti prikazana rasipanja rezultata od plus/minus jedne standardne devijacije. Izmerene vrednosti faznog ugla i modula krutosti svih ispitivanih uzoraka su date u prilogu E.

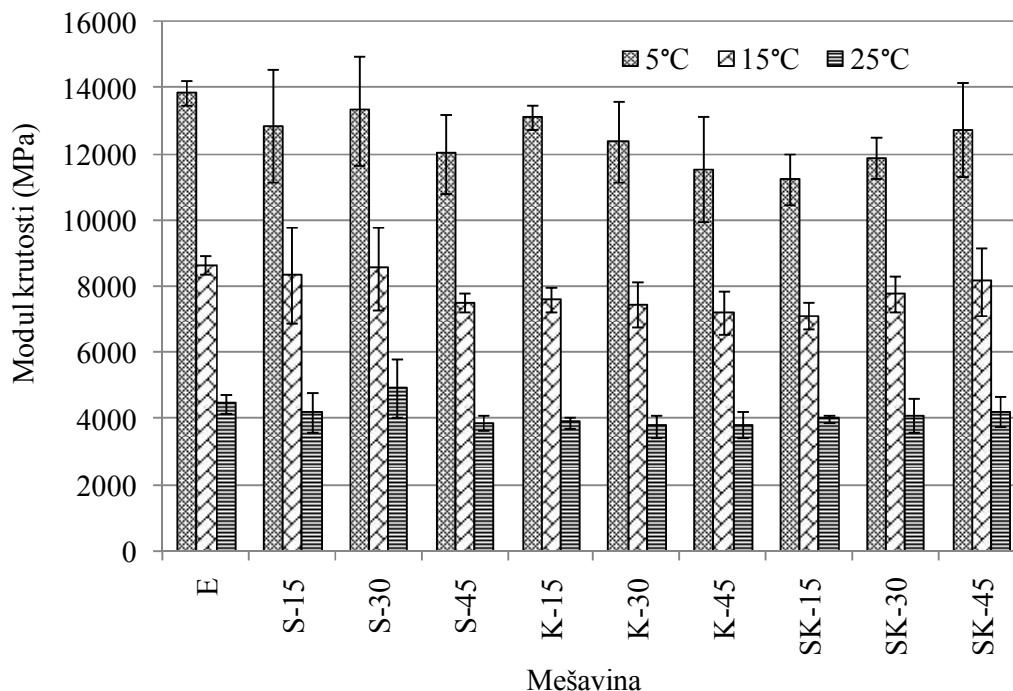
U poređenju sa kontrolnom mešavinom fazni ugao je nešto niži kod mešavina sa RCA. Ipak, fazni ugao varira u relativno uskim granicama (npr. između 22° i 25° na temperaturi od 25°C) i te varijacije nisu značajne.



Slika 4.10 Ispitivanje modula krutosti



Slika 4.11 Fazni ugaon na sve tri ispitivane temperature pri frekvenciji od 8 Hz



Slika 4.12 Modul krutosti na sve tri ispitivane temperature pri frekvenciji od 8 Hz

Posmatrajući samo prosečne vrednosti modula krutosti uočava se da asfalt betoni sa recikliranim agregatom imaju manje krutosti od kontrolne mešavine. Kod mešavina sa sitnim RCA (S-mešavine) ne postoji jasna zavisnost između količine upotrebljenog RCA i modula krutosti. U asfaltnim mešavinama u kojima je upotrebljen krupan RCA (K-mešavine), krutost opada sa povećanjem sadržaja recikliranog agregata. Suprotno tome, u mešavinama u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjen recikliranim (SK-mešavine), povećanje sadržaja RCA uticalo je i na povećanje krutosti asfaltne mešavine. Ovakvi odnosi modula krutosti odnose se na sve tri temperature ispitivanja, s tim što su na višim temperaturama razlike između mešavina izraženije.

Nepostojanje jedinstvene zavisnosti između modula krutosti i sadržaja i/ili krupnoće upotrebljenog RCA posledica je kompleksnog ponašanja asfaltnih betona sa RCA. Za očekivati je da sa povećanjem sadržaja bitumena krutost asfalta opada, što nije slučaj sa mešavinama SK-30 i SK-45, čiji je optimalni sadržaj bitumena znatno veći u poređenju sa ostalim mešavinama. Takođe, usled slabijih mehaničkih karakteristika RCA u poređenju sa prirodnim agregatom, očekivano je da krutost mešavine opada sa

povećanjem sadržaja RCA. Ipak, površina RCA je u odnosu na prirodni agregat hrapavija, sa oštrijim ivicama i višestruko zdrobljena, što povećava trenje između zrna agregata obezbeđujući na taj način dobru uklještenost zrna, koja se suprotstavlja pomeranju pojedinih zrna usled dejstva opterećenja. Dodatno, zrna RCA su poroznija i poseduju veću specifičnu površinu u odnosu na prirodni agregat, što može uticati na manju debljinu bitumenskog filma oko zrna agregata.

Zbog svega navedenog, sprovedena je statistička analiza kako bi se utvrdilo da li su razlike u prosečnim vrednostima modula krutosti statistički značajne. Sprovedena je dvosmerna analiza varijansi (ANOVA) sa nivoom poverenja od 95%. Analiziran je uticaj krupnoće i sadržaja RCA (15%, 30% i 45%) za različite populacije (videti tabelu 4.3).

Rasipanja rezultata modula krutosti su generalno veća kod mešavina sa recikliranim agregatom u poređenju sa kontrolnom mešavinom. Ova rasipanja su primarno posledica nehomogenosti RCA. Razlike modula krutosti nisu statistički značajne u populacijama koje obuhvataju RCA asfaltne mešavine sa određenom krupnoćom zrna (S, K ili SK mešavine) ili sa određenom količinom RCA (15%, 30% ili 45%) što znači da ni krupnoća ni količina RCA nemaju značajan uticaj na krutost ispitivanih RCA mešavina. Izuzetak je samo populacija "30% RCA meš.". Kod većine drugih populacija, razlike između modula krutosti su statistički značajne samo na pojedinim temperaturama ispitivanja. Jedino kod mešavina E, K-15, K-30 i K-45 koje pripadaju populaciji "Kontrolna & K-meš.", razlike u modulima krutosti su statistički značajne na svim temperaturama ispitivanja. Statistička analiza je pokazala i da na modul krutosti veći uticaj ima krupnoća upotrebljenog RCA nego procenat upotrebljenog RCA.

Dodatno razlike modula krutosti kontrolne mešavine i svake od devet RCA mešavina upoređene su statističkim t-testom sa nivoom poverenja od 95%. Rezultati t-testa su pokazali da su, izuzev mešavina S-15, S-30 i SK-45, razlike modula krutosti svih ostalih RCA mešavina statistički značajne u odnosu na modul krutosti kontrolne mešavine (videti tabelu 4.4).

4 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja i diskusija

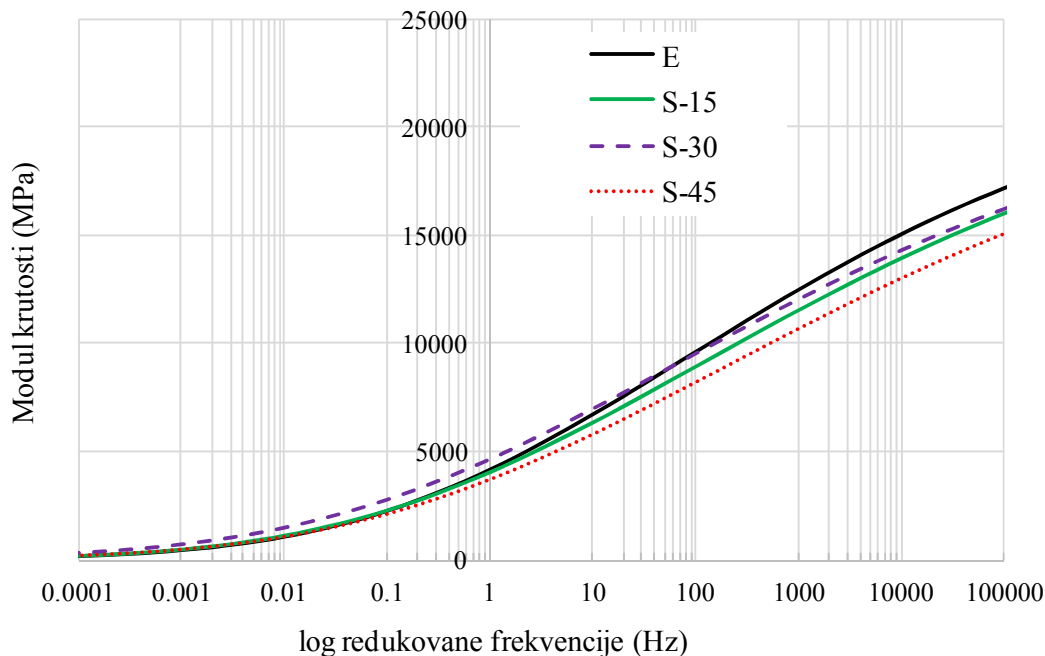
Tabela 4.3 Dvosmerna analiza varijansi modula krutosti

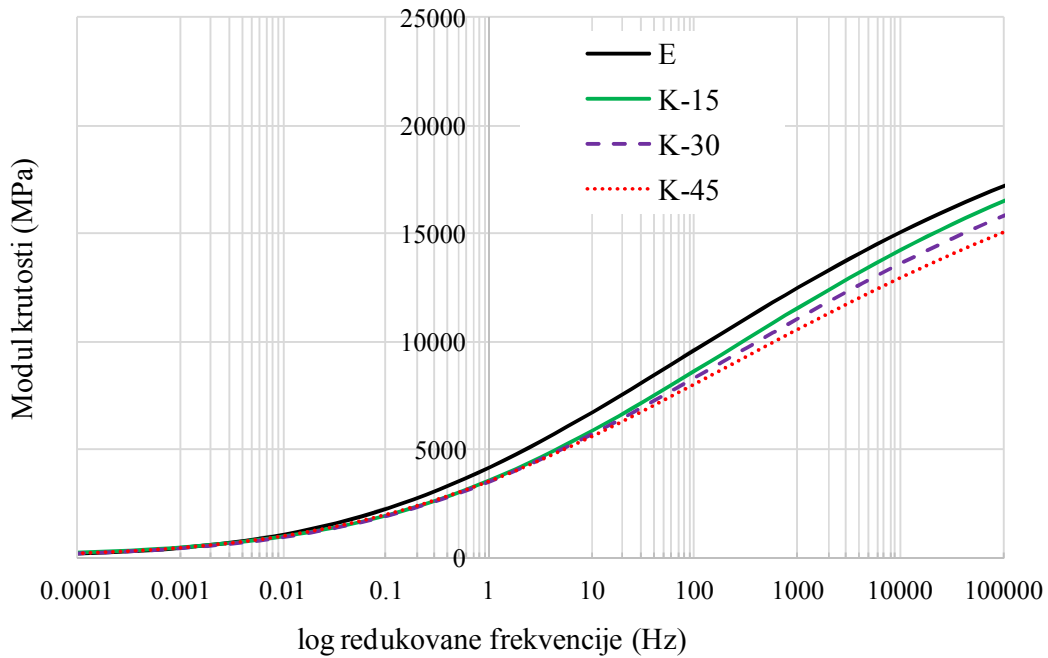
Varijabla	5°C		15°C		25°C	
	F	F _{0.05}	F	F _{0.05}	F	F _{0.05}
Kontrolna & Sve RCA meš.	2.1412	2.1449	2.0068	2.1608	2.7627	2.1375
Kontrolna & S-meš.	1.4746	3.2874	1.2645	3.2874	2.9556	3.2874
Kontrolna & K-meš.	3.6550	3.3439	5.3384	3.4903	4.1430	3.3439
Kontrolna & SK-meš.	7.5323	3.3439	4.5311	3.3439	1.0880	3.2874
Kontrolna & 15% RCA meš.	5.2489	3.3439	2.9793	3.4105	1.8281	3.3439
Kontrolna & 30% RCA meš.	2.9236	3.2874	2.4051	3.3439	3.8150	3.2874
Kontrolna & 45% RCA meš.	2.7985	3.3439	4.0273	3.3439	2.9297	3.2874
S-meš.	0.9320	3.8853	1.2003	3.8853	3.6682	3.8853
K- meš.	1.8503	3.9823	0.3557	4.2565	0.1326	3.9823
SK- meš.	2.6912	3.9823	2.6927	3.9823	0.3152	3.8853
15% RCA meš.	3.6808	3.9823	2.0262	4.1028	0.6882	3.9823
30% RCA meš.	1.7482	3.8853	1.9377	3.9823	4.6724	3.8853
45% RCA meš.	0.7862	3.9823	2.0038	3.9823	1.4622	3.8853

Tabela 4.4 Statistička analiza modula krutosti E mešavine i RCA mešavina "t- testom"

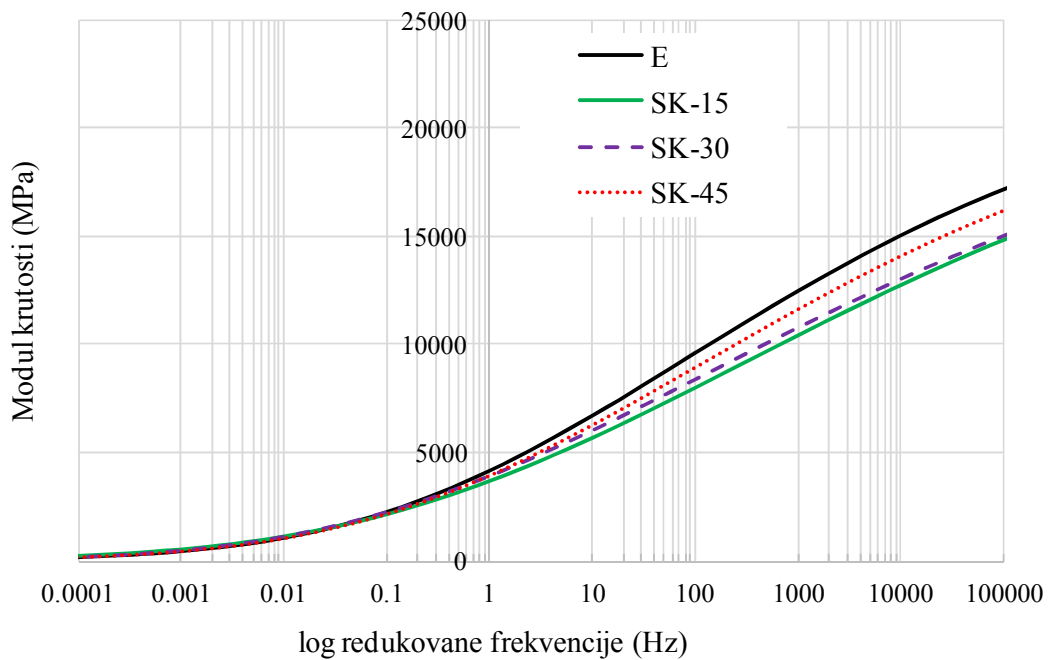
Varijabla	5°C		15°C		25°C	
	t	t _{critical}	t	t _{critical}	t	t _{critical}
S-15	-1.2785	2.7764	0.4246	2.3646	-0.7835	2.3646
S-30	-0.7169	2.5706	0.1564	2.3646	-1.0436	2.3646
S-45	-3.2806	2.5706	-5.8575	2.3646	3.3651	2.3646
K-15	-2.8709	2.4469	-4.3361	2.5706	3.3578	2.4469
K-30	-2.5706	2.5706	-3.2425	2.3646	-3.2502	2.3646
K-45	-3.1513	2.5706	-4.0921	2.4469	-2.6471	2.3646
SK-15	-6.1295	2.3646	-6.5101	2.3646	3.2867	2.3646
SK-30	-5.4282	2.3646	-2.8246	2.4469	-1.2090	2.3646
SK-45	-1.5486	3.1824	0.9376	2.3646	-0.9165	2.3646

Ponašanje predmetnih asfaltnih mešavina prikazano je i u vidu master krivih na slikama 4.13-4.15. Master krive su razvijene koristeći sigmoidalni model (jednačina 2.11). Regresioni parametri su određeni za referentnu temperaturu od 20°C, dok je redukovana frekvencija sračunata pomoću jednačine Arrhenius-a (jednačina 2.12).

**Slika 4.13** Master krive za asfaltna mešavina sa sitnim RCA



Slika 4.14 Master krive za asfaltne mešavine sa krupnim RCA



Slika 4.15 Master krive za asfaltne mešavine sa sitnim i krupnim RCA

Vrednosti regresionih parametara dobijenih za potrebe formiranja master krivih, kao i vrednosti statističkih pokazatelja uklapanja su prikazani u tabeli 4.5. Maksimalni moduli krutosti su sračunati koristeći Hirtsch-ov model, pretpostavljajući modul krutosti bitumena od 1 GPa. Vrednosti statističkih pokazatelja uklapanja modela pokazuju veoma dobru korelaciju laboratorijskih podataka i sračunatih regresionih parametara. U ovom slučaju, aktivaciona energija (ΔE_a) se posmatra kao parametar uklapanja za master krive, a njeno pravo značenje je minimalna energija potrebna da bi se izazvalo međumolekularno kretanje. Što se tiče pojedinačnih regresionih parametara, aktivaciona energija opada kod K i SK mešavina, dok je kod mešavina sa sitnim RCA (S mešavine) viša u odnosu na kontrolnu mešavinu. Master krive RCA mešavina su za kombinacije visokih frekvencija i niskih temperatura ispod master krive kontrolne mešavine.

Tabela 4.5 Parametri modela master krivih

Meš.	Karak. meš.		Parametri modela				Kvalitet korelacije	
	<i>VMA</i>	<i>VFA</i>	E^*_{max}	ΔE_a	β	γ	R^2	S_e/S_y
	(%)	(%)	(MPa)	(J/mol)	(-)	(-)	(-)	(-)
E	13.75	58.98	23144.5	272766	-1.6139	-0.3805	0.996	0.047
S-15	14.30	57.92	22901.8	280304	-1.9155	-0.3373	0.999	0.023
S-30	15.54	52.10	22204.0	274626	-1.6542	-0.3485	0.990	0.072
S-45	15.37	54.24	22359.8	278942	-1.7540	-0.3280	0.998	0.032
K-15	14.64	54.54	22643.9	270440	-1.0316	-0.4045	0.992	0.063
K-30	14.86	55.07	22581.8	269310	-1.3436	-0.3691	0.997	0.041
K-45	15.44	52.53	22263.0	261408	-1.5578	-0.3408	0.996	0.046
SK-15	14.56	58.32	22819.1	256418	-1.6907	-0.3145	0.992	0.063
SK-30	15.16	59.98	22665.4	273966	-2.4241	-0.3028	0.999	0.022
SK-45	15.35	66.96	22837.3	265338	-1.7841	-0.3521	0.999	0.023

4.5 Otpornost na zamor

Ispitivanje otpornosti na zamor asfaltnih betona sprovedeno je na prizmatičnim gredicama opterećenim u četiri tačke prema standardu EN 12697-24, Annex D. Asfaltni uzorci, oblik signala opterećenja i dispozicija ispitivanja bili su isti kao u slučaju ispitivanja modula krutosti (slika 4.8 i 4.9). Za svaku od 10 mešavina pripremljeno je po

18 gredica dimenzija 50×50×400 mm, od kojih je 10 do 16 upotrebljeno za ovo ispitivanje (videti poglavlje 3.4.2). Pre izlaganja opterećenju, predmetni uzorci su negovani na temperaturi ispitivanja od 20°C u trajanju od najmanje 2 h. Ispitivanja su sprovedena pri kontrolisanim dilatacijama sa frekvencijom od 10 Hz, bez perioda relaksacije. Kontrolom dilatacija je omogućeno da usled smanjenja krutosti gredica tokom ispitivanja opada i sila, pa naponsko stanje materijala ostaje u linearnom opsegu.

Prizmatični uzorci svake od 10 mešavina podeljeni su na tri serije po šest uzoraka i podvrgnuti ispitivanjima na tri različita nivoa opterećenja. Podela uzoraka jedne mešavine na tri grupe izvršena je tako da prosečne vrednosti zapreminskih masa sve tri grupe budu približno jednake. Amplitude opterećenja su definisane posebno za svaku mešavinu, i za svaku grupu uzoraka, tako da lom usled zamora nastupi u opsegu od 10^4 do 2×10^6 ciklusa opterećenja.

Kao kriterijum loma, pri ovim uslovima ispitivanja, usvojen je broj ciklusa opterećenja pri kojem se početna krutost uzorka smanji za 50% (Hicks i ost. 1993; Roberts i ost. 1991; Williams 1998). Promena krutosti u funkciji broja ciklusa opterećenja tokom ispitivanja na zamor prikazana je na slici 4.16. U početnoj fazi (I), krutost asfalta naglo opada sa povećanjem broja ciklusa opterećenja. Nakon toga, u drugoj fazi (II), promena krutosti prati linearnu zavisnost sa znatno manjim nagibom, da bi usled formiranja makropukotina, u III fazi, opet došlo do naglog pada krutosti i fizičkog loma uzorka. Na bazi ovih promena, generalno je prihvaćeno da se krutost nakon 100 ciklusa opterećenja, usvaja kao početna krutost, u odnosu na koju se definiše uslov loma.

Za sračunavanje napona, dilatacija, modula krutosti, faznog ugla, disipovane energije i kumulativne disipovane energije, za svaki od ciklusa opterećenja, korišćen je softverski paket IPC Global UTS018. Pomenuti parametri su sračunati koristeći sledeće izraze:

$$\sigma = \frac{3 \cdot a \cdot P}{b \cdot h^2} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = \frac{12 \cdot h \cdot \delta}{3 \cdot L^2 + 4 \cdot a^2} \quad (4.4)$$

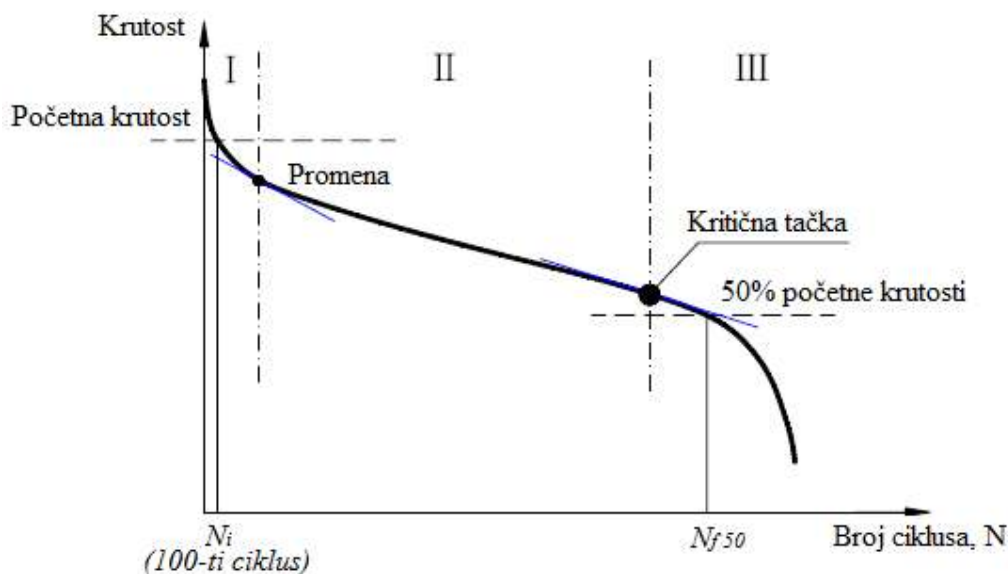
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

$$\varphi_t = 360 \cdot f \cdot s \quad (4.6)$$

$$D = \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sin(\varphi_t) \quad (4.7)$$

gde je:

- σ - maksimalan napon zatezanja (Pa);
- ε - maksimalna dilatacija zatezanja (m/m);
- E - modul krutosti (Pa);
- φ_t - fazni ugao (rad);
- D - disipovana energija po ciklusu (J/m^3);
- a - rastojanje između pozicija nanošenja opterećenja (m);
- P - aplicirana sila (N);
- b - prosečna širina gredice (m);
- h - prosečna visina gredice (m);
- δ - ugib gredice (m);
- L - rastojanje između oslonaca (m);
- f - frekvencija opterećenja (Hz);
- s - vremensko kašnjenje između napona i dilatacije (s).



Slika 4.16 Promena krutosti u funkciji broja ciklusa opterećenja pri ispitivanju otpornosti na zamor (izvor: Wu i ost. 2014)

Za procenu otpornosti asfaltnih mešavina na zamor usvojen je model zamora koji se može prikazati u sledećem obliku (Pell 1987):

$$N_f = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{K_2} \quad (4.8)$$

$$\ln(N_f) = \ln(K_1) - K_2 \cdot \ln(\varepsilon_0) \quad (4.9)$$

gde je:

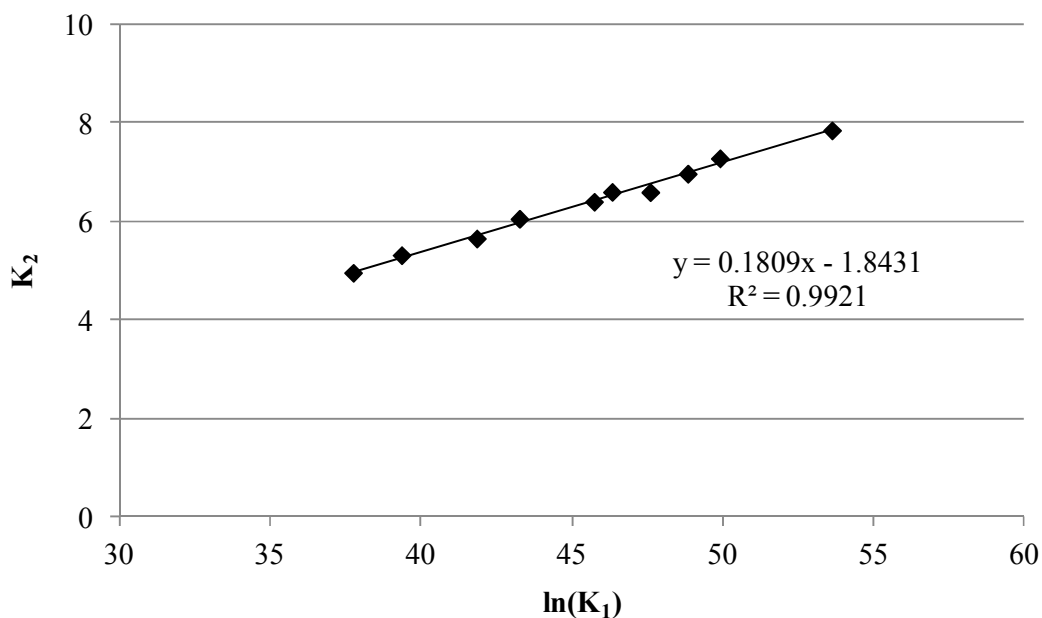
- ε_0 - dilatacija zatezanja na dnu asfaltnog sloja ($\mu\text{m}/\text{m}$);
- N_f - broj ciklusa opterećenja;
- K_1, K_2 - koeficijenti koji se određuju eksperimentalno.

Analizom rezultata dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima, koji su dati u prilogu F, definisani su zakoni zamora svih 10 asfaltnih mešavina. Koeficijenti linearne regresione analize, koeficijenti korelacije i procenjene vrednosti dilatacija pri kojima je vek trajanja 10^6 ciklusa opterećenja dati su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6 Parametri regresionih krivih za mešavine ispitivane na zamor

Meš.	K_2	$\ln(K_1)$	R^2	ε ($\mu\text{m}/\text{m}$) ($N_{f50}=10^6$)
E	4.96	37.74	0.883	124.0
S-15	7.28	49.89	0.703	141.7
S-30	7.85	53.61	0.916	158.9
S-45	5.32	39.35	0.883	121.3
K-15	6.06	43.25	0.839	129.0
K-30	6.41	45.73	0.902	145.8
K-45	6.60	46.32	0.949	137.4
SK-15	6.97	48.83	0.911	151.8
SK-30	5.66	41.84	0.859	141.4
SK-45	6.60	47.59	0.858	167.2

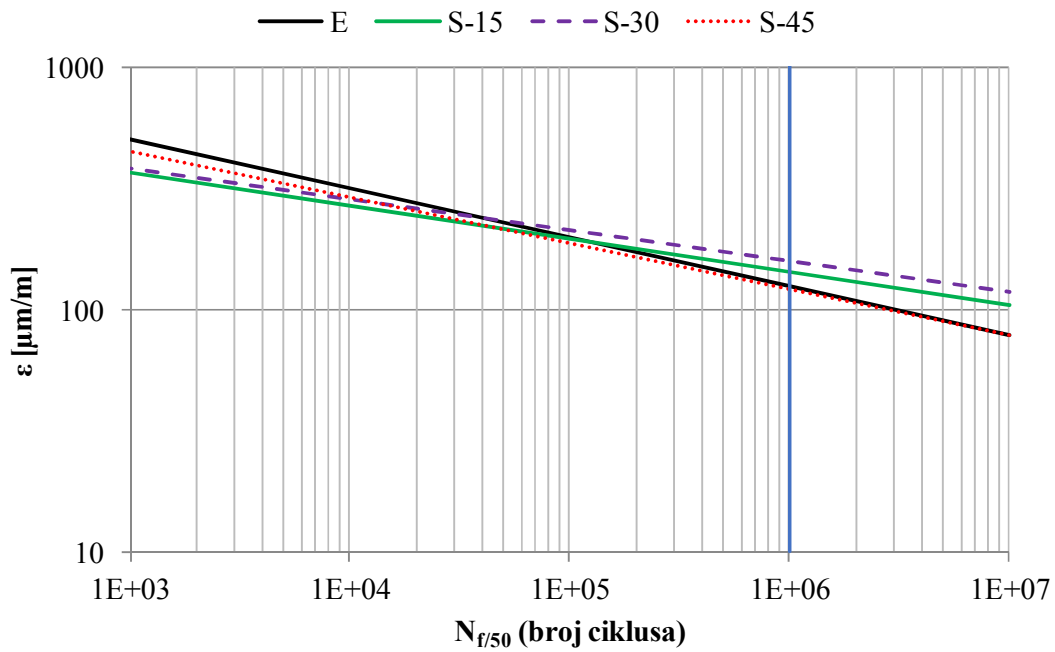
Zavisnost koeficijenta linearne regresije $K_2 = K_2(\ln(K_1))$ grafički je prikazana na slici 4.17. Dobijeni rezultati pokazuju da za različite asfaltne betone važi linearna zavisnost $K_2 = K_2(\ln(K_1))$, sa velikom tačnošću aproksimacije, što je u skladu sa zaključcima do kojih su došli Ghuzlan & Carpenter (2003).



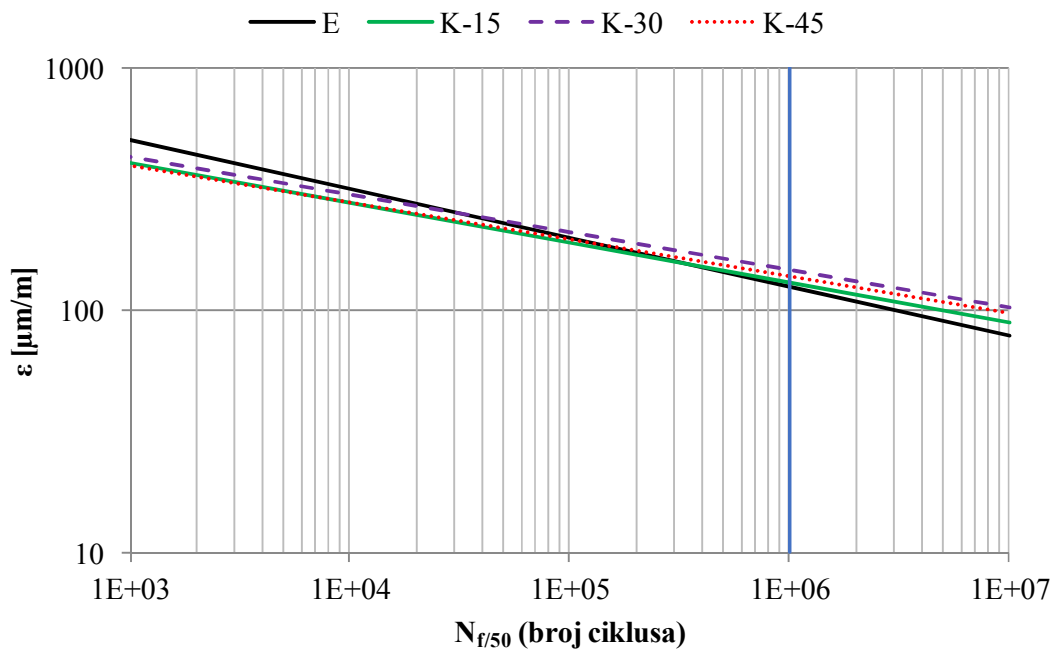
Slika 4.17 Zavisnost koeficijenta linearne regresije

Dilatacije ε ($N_{f50}=10^6$) pokazuju da su izuzev mešavine S-45, sve ostale RCA-mešavine pokazale veću otpornost na zamor u poređenju sa kontrolnom mešavinom (E). Posmatrajući vrednosti dilatacija pri kojima će uslediti "lom" pri većem broju ponavljajućih opterećenja, može se pokazati da i mešavina S-45, zbog manjeg nagiba prave $\varepsilon = \varepsilon(N)$, nakon približno 5.8×10^6 ciklusa opterećenja ima veće dilatacije pri "lomu" od kontrolne mešavine. Drugim rečima, pri dilatacijama opterećenja nižim od $87.36 \mu\text{m/m}$, mešavina S-45 će imati duži životni vek od mešavine E, sa aspekta zamora materijala.

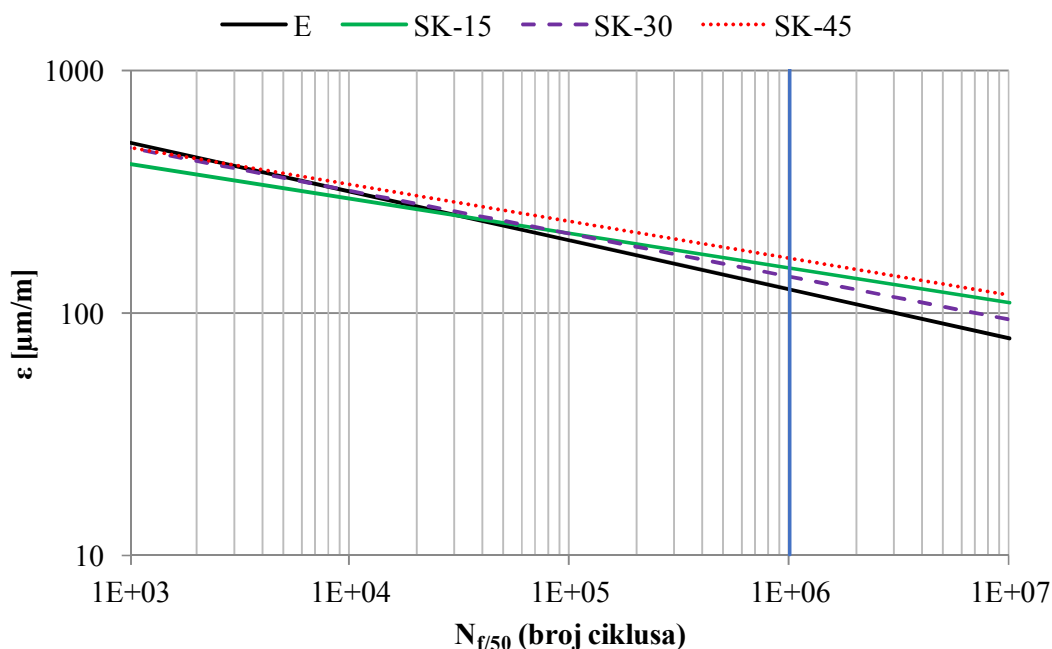
Zakoni zamora definisani jednačinom (4.9) prikazani su i grafički na slikama 4.18-4.20. Pri ovome, vrednosti na apscisi i ordinati su date u logaritamskoj razmeri sa osnovom 10.



Slika 4.18 Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa sitnim RCA



Slika 4.19 Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa krupnim RCA



Slika 4.20 Ponašanje pri zamoru asfaltnih betona sa sitnim i krupnim RCA

Sa slika 4.18-4.20 se jasno uočava da su niže vrednosti dilatacija "loma" kontrolne mešavine posledica pre svega koeficijenta nagiba, pa i pored najvećih dilatacija na početku ($N \sim 10^3 \div 10^4$), pri većem broju ciklusa opterećenja vrednosti dilatacija pri kojima će uslediti "lom" su niže u poređenju sa RCA-mešavinama. Tako su na primer, dilatacije ε ($N=10^6$) kod mešavina S-30, K-30, SK-15 i SK-45 veće za 28.1%, 17.5%, 22.4% i 34.8%, respektivno, u poređenju sa kontrolnom mešavinom. Drugim rečima, pri istim uslovima u kolovoznoj konstrukciji, dilataciju "loma" kontrolne mešavine od $\varepsilon = 124.0 \mu\text{m}/\text{m}$, mešavine S-30, K-30, SK-15 i SK-45 će dostići za 7.0, 2.8, 4.1 i 7.2 puta veći broj osovinskih opterećenja, respektivno.

Ipak, pri analizi uticaja količine RCA na otpornost asfaltnih mešavina na zamor, treba uzeti u obzir i krutost asfaltnog sloja, jer će pri manjim krutostima, a za isto saobraćajno opterećenje, dilatacije biti veće. Kako bi se procenio eksploatacioni vek kolovozne konstrukcije sa aspekta zamora materijala, izvršeno je dimenzionisanje kolovozne konstrukcije za tri intenziteta saobraćajnog opterećenja (TIP 1: 500,000; TIP 2: 5,000,000 i TIP 3: 15,000,000 standardnih osovina od 80 kN). Kolovozna konstrukcija je dimenzionisana kao višeslojni linearno-elastični sistem korišćenjem programa Bisar

(de Jong i ost. 1973). Pri dimenzionisanju kolovozne konstrukcije usvojene su uobičajene vrednosti krutosti pojedinih slojeva, dok je u slučaju nosećeg sloja usvojena krutost kontrolne mešavine. U tabeli 4.7 su prikazane vrednosti modula krutosti pojedinih slojeva kolovozne konstrukcije sa kojima se ušlo u proračun i usvojene debljine slojeva. Debljine pojedinih slojeva kolovoza, dobijene na ovaj način, su usvojene kao konstantne i u slučajevima kada se noseći slojevi izvode od asfaltnih mešavina sa RCA.

Tabela 4.7 Osnovne karakteristike kolovozne konstrukcije

Sloj	Krutost (MPa)	Debljina sloja (cm)		
		TIP 1	TIP 2	TIP 3
Habajuci asfaltni sloj	4100	5	5	5
Noseći asfaltni sloj	6731	10	16	19
Nevezana podloga (0/31.5 mm)	190-260	15	20	20
Nevezana podloga (0/63 mm)	110-120	20	20	25
Posteljica	50			

Tabela 4.8 Vek trajanja nosećih asfaltnih slojeva kolovozne konstrukcije

	Dilatacije zatezanja			Broj prelaza standardnih osovina od 80 kN do loma		
	(με)					
	TIP 1	TIP 2	TIP 3	TIP 1	TIP 2	TIP 3
E	144	90.4	72.3	483,945	4,871,675	14,755,291
S-15	148	93.4	74.8	736,964	21,029,379	105,912,707
S-30	141	88.5	70.8	2,577,254	99,775,175	575,130,106
S-45	155	98.2	78.7	273,479	3,100,664	10,067,051
K-15	154	97.2	77.8	336,404	5,469,892	21,081,426
K-30	156	98.8	79.2	634,392	11,854,811	48,916,823
K-45	158	99.8	80.0	403,073	8,361,012	35,985,413
SK-15	157	99.3	79.6	796,488	19,402,750	90,622,381
SK-30	152	96.1	77.0	663,203	8,885,191	31,141,793
SK-45	149	93.9	75.2	2,113,708	44,512,449	192,768,757

Za usvojene karakteristike kolovozne konstrukcije, sračunate su vrednosti dilatacija zatezanja na dnu nosećeg asfaltnog sloja, za sva tri tipa opterećenja i za svaku od 10 asfaltnih mešavina. Na osnovu tako sračunatih dilatacija zatezanja, korišćenjem eksperimentalno dobijenog zakona zamora (tabela 4.6), sračunat je broj standardnih osovina pri kojima će doći do loma usled zamora materijala (tabela 4.8).

Promena krutosti nosećeg asfaltnog sloja utiče i na dilatacije pritiska na posteljici. Zbog toga je na isti način kao i u slučaju nosećeg sloja, izvršen proračun dilatacija pritiska i broja ciklusa opterećenja pri kojima će doći do loma usled zamora materijala primenom kriterijuma Shell-a za nivo pouzdanosti od 95% (Shell 1978). Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Lom posteljice kolovozne konstrukcije usled zamora

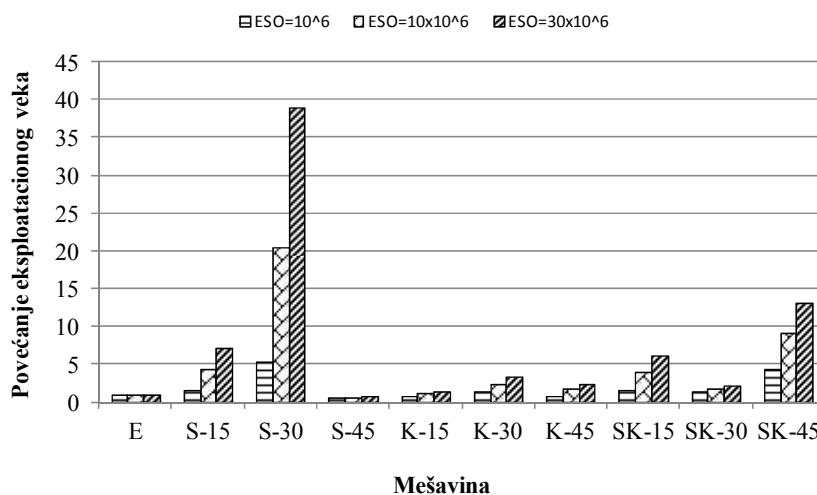
	Dilatacije zatezanja			Broj standardnih osovina		
	TIP 1	TIP 2	TIP 3	TIP 1	TIP 2	TIP 3
E	354	210	163	6,686,152	53,989,850	148,743,803
S-15	358	214	166	6,392,301	50,064,998	138,279,228
S-30	352	208	161	6,839,410	56,096,525	156,273,664
S-45	364	219	170	5,981,137	45,647,063	125,716,886
K-15	363	218	169	6,047,318	46,490,404	128,718,948
K-30	365	219	170	5,915,859	45,647,063	125,716,886
K-45	366	220	171	5,851,470	44,822,758	122,801,835
SK-15	365	220	171	5,915,859	44,822,758	122,801,835
SK-30	362	217	168	6,114,416	47,353,312	131,811,157
SK-45	359	214	166	6,321,374	50,064,998	138,279,228

Rezultati dati u tabeli 4.8 pokazuju da većina kolovoznih konstrukcija sa nosećim slojem od RCA asfaltnih mešavina pokazuje bolje ponašanje u odnosu na kontrolnu mešavinu, sa aspekta zamora. Povoljan efekat RCA na ovo svojstvo asfalt betona naročito je izražen kod kolovoznih konstrukcija sa većim intenzitetom opterećenja. Tako na primer, u slučaju opterećenja TIP 2 i TIP 3, samo kolovozna konstrukcija sa

mešavinom S-45 ima manji vek s obzirom na zamor u odnosu na konstrukciju sa kontrolnom mešavinom.

Suprotno tome, upotreba RCA, izuzev kod mešavine S-30, ima negativan uticaj na trajnost kolovoznih konstrukcija sa aspekta trajne deformacije posteljice, zbog manje krutosti nosećeg asfaltnog sloj sa RCA. Ipak, treba imati u vidu da je vek konstrukcije s obzirom na trajnu deformaciju posteljice kod analiziranih konstrukcija višestruko veći nego vek s obzirom na dilataciju zatezanja u asfaltnim slojevima, tako da ovo smanjenje veka nije od značaja.

Iz rezultata prikazanih u tabeli 4.8 lako se može sračunati vek trajanja kolovoznih konstrukcija sa nosećim asfaltnim slojevima sa RCA u odnosu na konstrukciju sa kontrolnom mešavinom (slika 4.21). Odnos veka trajanja kolovoza sa RCA mešavinama i kolovoza sa kontrolnom mešavinom za najveći broj slučajeva kreće se u granicama od 0.6 do 1.4 (za intenzitet opterećenja TIP 1) i od 0.6 do 3.3 (za intenzitet opterećenja TIP 2 i TIP 3). Kod kolovoza sa nosećim slojevima od asfaltnih mešavina S-15, SK-15 i SK-45 ovaj odnos raste i kreće se u granicama od 1.5 do 4.4 (za intenzitet opterećenja TIP 1) i od 4.0 do 13.1 (za intenzitet opterećenja TIP 2 i TIP 3). U slučaju mešavine S-30 ovi odnosi su znatno veći.



Slika 4.21 Odnos veka trajanja kolovoznih konstrukcija sa RCA mešavinama i kontrolne mešavine

Bolje ponašanje RCA-mešavina u poređenju sa kontrolnom mešavinom bi se donekle moglo objasniti većim sadržajem bitumena (OBC) u mešavini. Ipak, treba imati na umu da se sadržaj bitumena kod mešavina sa sitnim RCA (S-mešavine) i kod mešavina sa krupnim RCA (K-mešavine) kretao u granicama od 3.4% do 3.5%, izuzev mešavine S-45 sa 3.6% bitumena, što je kompatibilno sa 3.4% kod kontrolne mešavine.

Ponašanje asfaltnih betona pri zamoru nije moguće adekvatno objasniti ni sa aspekta sadržaja šupljina ispunjenih vazduhom (AV). Naime, na osnovu zaključaka do kojih su došli mnogi drugi istraživači, očekuje se da veće vrednosti AV negativno utiču na otpornost asfalta pri zamoru. U slučaju mešavina koje su predmet istraživanja prikazanih u ovoj disertaciji, najniže vrednosti AV imala je upravo kontrolna mešavina ($AV_E = 5.6\%$), dok su se kod preostalih RCA-mešavina te vrednosti kretale od 6.0% do 7.4%, izuzev mešavine SK-45 sa 5.1% šupljina. Analogno, i zbijenost kontrolne mešavine (99.7%) je bila veća u odnosu na RCA-mešavine kod kojih se kretala u dopuštenim granicama za noseće slojeve od 98.1% do 99.6%.

S obzirom da na osnovu rezultata ispitivanja sadržaja bitumena, sadržaja šupljina ispunjenih vazduhom i modula krutosti nije moguće objasniti vezu između količine/krupnoće upotrebljenog RCA i ponašanja asfalt betona pri zamoru, može se pretpostaviti da struktura i tekstura RCA imaju ključnu ulogu. Naime, kao što je već više puta naglašeno, hrapavija površina i oštrije ivice RCA u poređenju sa prirodnim agregatom dovode do većeg trenja između zrna agregata i bolje uklještenosti. Dodatno, upotreba sitnog RCA povećava sadržaj sitnijih zrna u mineralnoj mešavini koja u interakciji sa bitumenom može uticati na veću otpornost na zamor. Isto tako, i upotreba krupnog RCA, zbog slabijih zrna, prilikom ugradnje može dovesti do promene granulometrijskog sastava i povećanja količine sitnijih zrna.

Iako ne postoji jasna zavisnost između količine upotrebljenog RCA i ponašanja asfalta pri zamoru, ovakvi rezultati su veoma ohrabrujući sa aspekta upotrebe RCA u asfalt betonima, posebno imajući u vidu da oštećenja, koja nastaju kao posledica zamora materijala, predstavljaju dominantan tip oštećenja u bitumeniziranim nosećim slojevima kolovoznih konstrukcija.

4.6 Otpornost na niske temperature

Otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature ispitana je opitom zatezanja uklještenog uzorka (TSRST) u svemu prema EN 12697-46. Ispitivanje je sprovedeno na po dva prizmatična uzorka dimenzija 50×50×160 mm (videti poglavlje 3.4.3) za svaku od 10 asfaltnih mešavina.

Tokom TSRST opita prizmatični uzorci su fiksirani između dve paralelne ploče, tako da je dužina uzorka konstantna, dok se temperatura smanjuje, sa početnih $T = + 20^{\circ}\text{C}$, konstantnom brzinom od $\Delta T = -10^{\circ}\text{C/h}$. Pošto je termičko skupljanje materijala sprečeno, u uzorku se javljaju kriogeni naponi koji se povećavaju sa smanjenjem temperature. Opit se završava na najnižoj temperaturi od $T = - 40^{\circ}\text{C}$ ili na temperaturi loma, kada kriogeni naponi dostignu čvrstoću materijala pri zatezanju. Rezultat ispitivanja su funkcionalna zavisnost kriogenih napona i temperature, kao i temperatura loma (T_{lom}) i čvrstoća pri zatezanju (σ_{max}). Dispozicija ispitivanja asfaltnih betona metodom TSRST je prikazana na slici 4.22.



Slika 4.22 Dispozicija ispitivanja TSRST opitom

Na slikama 4.23-4.25 su prikazane funkcionalne zavisnosti kriogenih napona i temperature. Tačne vrednosti temperatura loma i čvrstoća pri zatezanju date su u tabeli 4.10. Dobijeni rezultati predstavljaju prosečne vrednosti od dva uzorka, za svaku od ispitivanih mešavina.

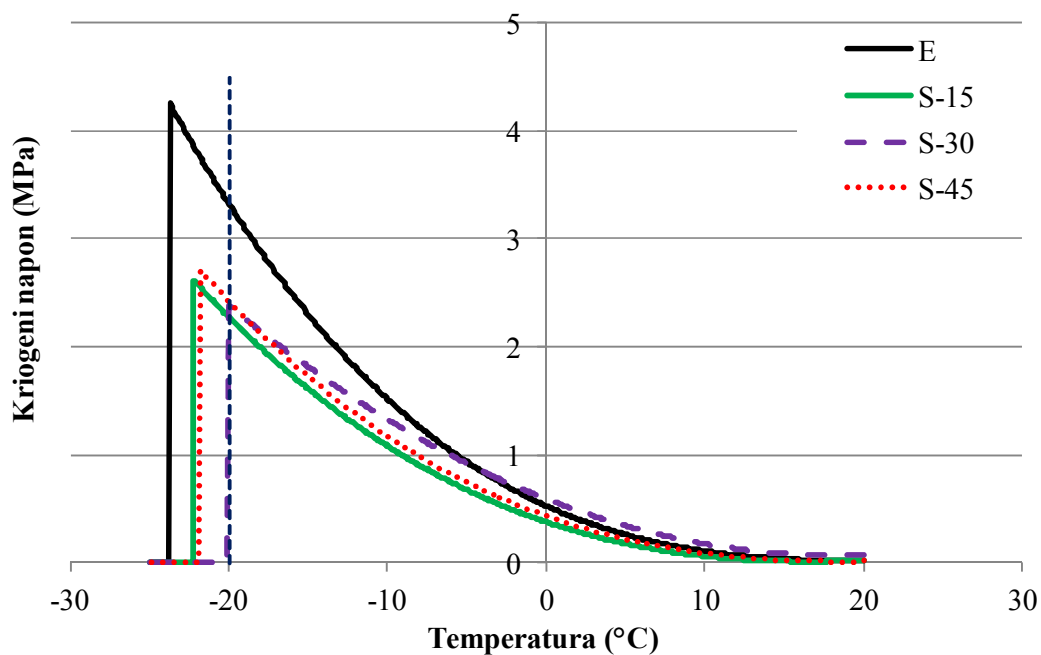
Tabela 4.10 Temperature loma i čvrstoće pri zatezanju dobijeni TSRST opitom

Parametar	E	S-15	S-30	S-45	K-15	K-30	K-45	SK-15	SK-30	SK-45
σ_{\max} (MPa)	4.06	2.48	2.38	2.47	0.90	3.26	2.07	3.00	2.94	3.40
T_{lom} (°C)	-23.8	-22.2	-20.0	-20.8	-21.5	-21.7	-19.4	-23.3	-20.8	-19.7

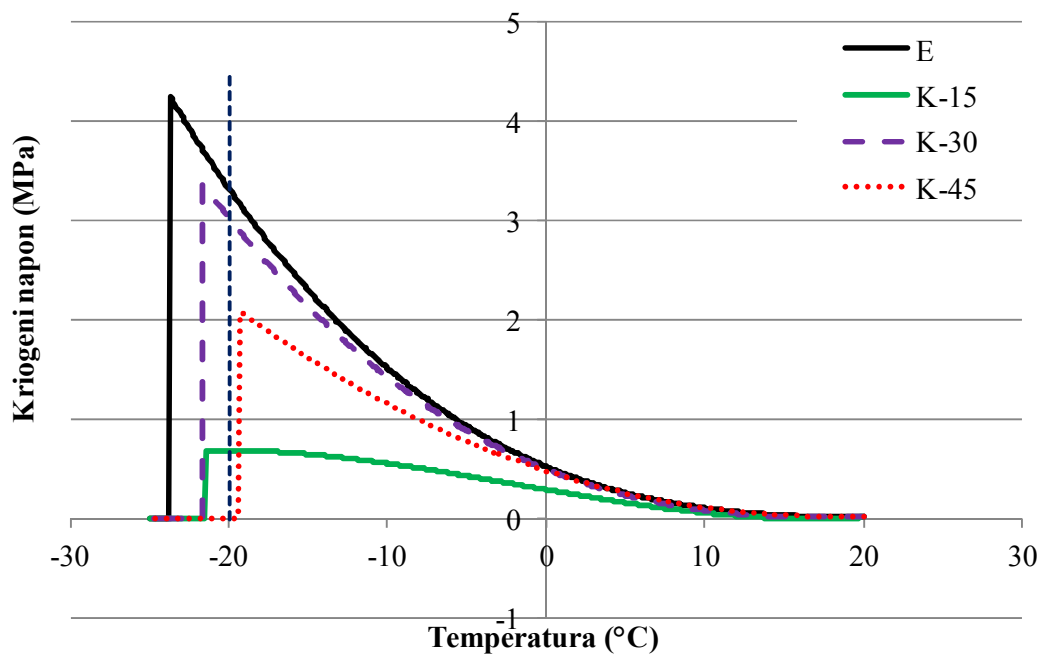
Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da se sa povećanjem sadržaja RCA smanjuje otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature. Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012) nisu definisani minimalni kriterijumi za otpornost asfaltnih betona na niske temperature.

Ipak, u stručnoj javnosti je prihvaćeno mišljenje da asfalti kod kojih termičke pukotine nastaju na temperaturama nižim od -20 °C, imaju zadovoljavajuću otpornost na niske temperature. Izuzev mešavina K-45 ($T_{\text{lom}} = -19.4$ °C) i SK-45 ($T_{\text{lom}} = -19.7$ °C), prema ovom kriterijumu, sve ostale RCA mešavine su otporne na dejstvo niskih temperatura. Međutim, treba naglasiti da se mešavine K-45 i SK-45 nalaze praktično na granici u pogledu otpornosti na dejstvo niskih temperatura. Imajući u vidu da se ove mešavine ugrađuju u noseće slojeve kolovoznih konstrukcija i da nisu direktno izložene dejstvu niskih temperatura, u praksi se može smatrati da sve ispitivane mešavine mogu biti uspešno primenjene.

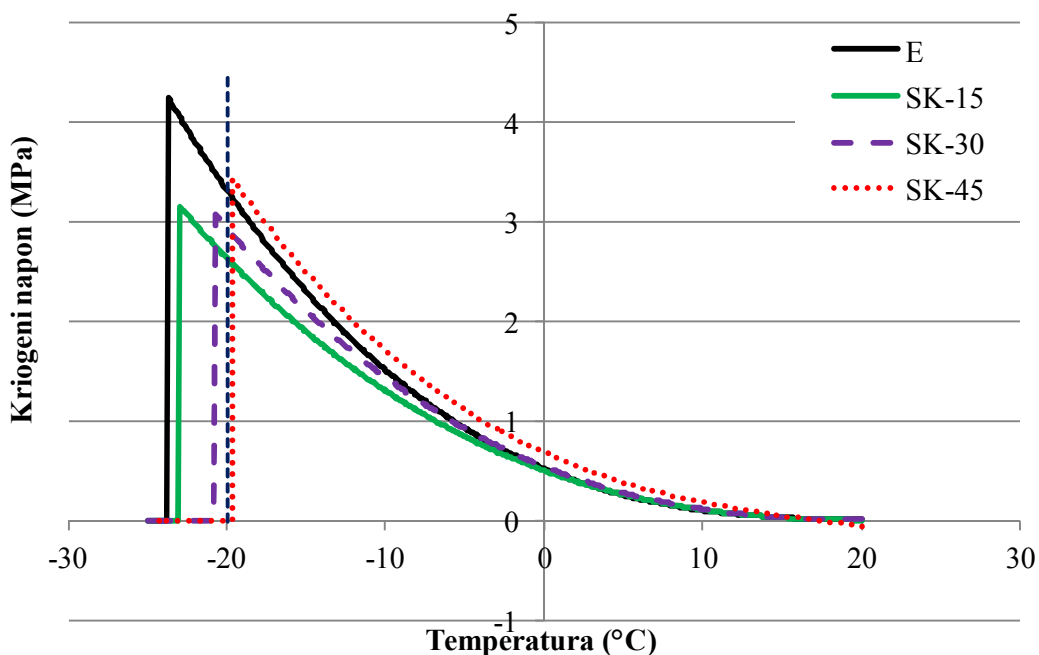
Najveći kriogeni naponi su izmereni na kontrolnoj mešavini, što ukazuje na manju deformabilnost kontrolne mešavine u odnosu na mešavine sa RCA.



Slika 4.23 Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa sitnim RCA



Slika 4.24 Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa krupnim RCA



Slika 4.25 Rezultati TSRST testa asfaltnih mešavina sa sitnim i krupnim RCA

4.6 Rezime

Optimalan sadržaj bitumena (OBC) je imao trend rasta sa povećanjem sadržaja RCA. U odnosu na mešavine sa krupnim RCA, ovaj trend je malo više naglašen kod mešavina sa sitnim RCA.

Kod većine asfaltnih mešavina sa delimičnom zamenom prirodnog agregata recikliranim, čvrstoća pri indirektnom zatezanju raste sa povećanjem sadržaja RCA. Odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju uzoraka kondicioniranih u vodi i na suvom kreće se u granicama od 69.2% (mešavina K-30) do 87.6% (mešavina K-15) i kod većine mešavina se kreće u granicama od $\pm 3\%$ u odnosu na 73.9% koliko je dobijeno kod kontrolne mešavine.

Dodatak krupnog RCA povećava otpornost asfaltnih mešavina na trajne deformacije. Dodatak do 30% sitnog RCA ima isti efekat. Ipak, kombinovani efekat povećanog sadržaja bitumena i RCA, uticao je na nešto veće trajne deformacije SK mešavina u

poređenju sa kontrolnom mešavinom, ali su i te deformacije u granicama koje propisuju tehnički uslovi. Nagib krive trajne deformacije između 5,000 i 10,000 ciklusa je niži kod svih asfaltnih mešavina sa RCA, izuzev mešavine SK-30, u odnosu na kontrolnu mešavinu.

Prosečne vrednosti modula krutosti svih mešavina sa RCA niže su u poređenju sa kontrolnom mešavinom. Ipak, razlike modula krutosti nisu statistički značajne u populacijama koje obuhvataju RCA asfaltne mešavine sa određenom krupnoćom zrna (S, K ili SK mešavine) ili sa određenom količinom RCA (15%, 30% ili 45%). Statistička analiza je pokazala i da na modul krutosti veći uticaj ima krupnoća upotrebljenog RCA nego procenat upotrebljenog RCA u količini do 45%.

Master krive RCA mešavina su za kombinacije visokih frekvencija i niskih temperatura ispod master krive kontrolne mešavine.

Dilatacije ε ($N_{f/50}=10^6$) pokazuju da su, izuzev mešavine S-45, sve ostale RCA-mešavine pokazale veću otpornost na zamor u poređenju sa kontrolnom mešavinom (E). Sprovedena ispitivanja su pokazala da će i mešavina S-45, pri dilatacijama opterećenja nižim od 87.36 $\mu\text{m/m}$, imati duži životni vek od mešavine E, sa aspekta zamora materijala.

Kako bi se procenio eksploatacioni vek kolovozne konstrukcije sa aspekta zamora materijala, izvršeno je dimenzionisanje kolovozne konstrukcije za tri intenziteta saobraćajnog opterećenja (TIP 1: 500,000; TIP 2: 5,000,000 i TIP 3: 15,000,000 standardnih osovina od 80 kN). Dobijeni rezultati pokazuju da većina kolovoznih konstrukcija sa nosećim slojem od RCA asfaltnih mešavina pokazuje bolje ponašanje u odnosu na kontrolnu mešavinu. Povoljan efekat RCA na ovo svojstvo asfalt betona naročito je izražen kod kolovoznih konstrukcija sa većim intenzitetom opterećenja. Tako na primer, u slučaju opterećenja TIP 2 i TIP 3, samo kolovozna konstrukcija sa mešavinom S-45 ima manji vek s obzirom na zamor u odnosu na konstrukciju sa kontrolnom mešavinom.

Sa dodatkom RCA generalno se smanjuje otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature u odnosu na kontrolnu mešavinu. Na osnovu ispitanih mešavina se takođe može zaključiti da postoji blagi trend smanjenja otpornosti na niske temperature sa povećanjem sadržaja RCA i da je učešće RCA od približno 45% na gornjoj granici primenljivosti, sa aspekta otpornosti asfaltne mešavine na niske temperature. U stručnoj javnosti je prihvaćeno mišljenje da asfalti kod kojih termičke pukotine nastaju na temperaturama nižim od -20°C , imaju zadovoljavajuću otpornost na niske temperature. Izuzev mešavina K-45 ($T_{\text{lom}} = -19.4^{\circ}\text{C}$) i SK-45 ($T_{\text{lom}} = -19.7^{\circ}\text{C}$), prema ovom kriterijumu, sve ostale RCA mešavine bile su otporne na dejstvo niskih temperatura. Mešavine K-45 i SK-45 su se nalazile na granici u pogledu otpornosti na dejstvo niskih temperatura. Ipak, imajući u vidu da su ove mešavine predviđene za noseće slojeve kolovoznih konstrukcija i da nisu direktno izložene dejstvu niskih temperatura, može se smatrati da sve ispitivane mešavine mogu biti uspešno primenjene.

5 Zaključci i preporuke za dalja istraživanja

5.1 Zaključci

U poslednje dve decenije u svetu je sve izraženija tendencija da se recikliranjem betona smanji zagađenje životne sredine i eksploatacija prirodnog agregata. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je reciklirani beton najčešće korišćen kao krupan agregat za izradu nevezanih slojeva kolovoznih konstrukcija, za izgradnju nasipa i kao komponentni materijal u cementnim betonima. Sitan agregat od recikliranog betona, iako čini od 30% do 60% ukupne količine dobijenog RCA, zbog velike količine sitnih čestica i velike specifične površine, imao je relativno malu primenu. S obzirom da sitne čestice predstavljaju neizostavnu komponentu asfaltnih mešavina, postoje opravdana očekivanja da je moguća uspešna upotreba i sitnog i krupnog RCA u asfaltnim mešavinama.

Većina do sada sprovedenih ispitivanja, koja su obuhvaćena pregledom literature, vršena je na asfaltnim uzorcima koji su projektovani i ugrađivani u svemu prema Maršalovoj proceduri, što je za posledicu imalo usitnjavanje zrna RCA i promenu granulometrijskog sastava mineralne mešavine. Takođe, većina radova, koji su obuhvaćeni pregledom literature, odnosila se na specifične slučajeve u pogledu količine i krupnoće upotrebljenog RCA. U pojedinim radovima je samo krupan ili samo sitan prirodni agregat zamenjen recikliranim, dok je u drugim radovima samo sitan i krupan RCA korišćen u određenom procentu.

U cilju implementacije i promocije održivog razvoja u oblasti graditeljstva, sprovedena su obimna eksperimentalna ispitivanja kako karakteristika RCA, tako i karakteristika asfaltnih mešavina sa delimičnom zamenom sitnog, krupnog, i sitnog i krupnog prirodnog agregata recikliranim. Ova istraživanja su imala za cilj da procene mogućnost

upotrebe RCA u asfaltnim mešavinama, uz zadržavanje kvaliteta asfalta u granicama koje propisuju tehnički uslovi.

5.1.1 Zaključci u vezi rezultata ispitivanja agregata

RCA je dobijen drobljenjem originalnog betona koji je u trenutku ispitivanja odgovarao klasi čvrstoće C35/45. Pored RCA (98%) upotrebljeni agregat je sadržao 1.2% asfalta i 0.8% opeke. Kako bi se na što bolji način objasnile razlike između kontrolne mešavine i mešavina sa RCA, u prvom koraku su sprovedena detaljna ispitivanja recikliranog agregata. U sklopu tih ispitivanja, a u cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata koji je kasnije korišćen za spravljanje asfaltnih mešavina, RCA krupnoće 4/8 mm i 8/16 mm je podvrgnut tretmanu hlorovodoničnom kiselinom i tretmanu ubrzane karbonatizacije.

Na osnovu rezultata hemijskih i fizičko-mehaničkih ispitivanja netretiranog RCA, tretiranog HCl-om i karbonatizovanog RCA može se zaključiti sledeće:

- Nakon tretmana RCA u HCl-u (0.1 mol/dm^3), smanjeno je upijanje vode u odnosu na netretirani RCA za 0.1% kod obe frakcije agregata, uz povećanje zapreminske mase od 1%. Istovremeno, mehaničke karakteristike se praktično nisu promenile. Hemijska analiza je pokazala da je HCl tretman uticao na povećanje koncentracije hlorida i smanjenje koncentracije sulfata u agregatu, dok je pH vrednost ostala ista. SEM analiza je pokazala da su nakon tretmana HCl-om u zrnima RCA prisutne šupljine veličine 5–23 μm , što je približno tri puta veće od šupljina u netretiranom RCA.
- Nakon procesa ubrzane karbonatizacije smanjeno je upijanje vode u odnosu na netretirani RCA za 0.4% (4/8 mm) i 0.8% (8/16 mm), uz povećanje zapreminske mase za cca. 1% i povećanje mehaničkih karakteristika za cca. 10%. Kao što je očekivano, proces ubrzane karbonatizacije je doveo do smanjenja pH vrednosti uz nepromenjenu koncentraciju hlorida i sulfata u agregatu. Mikroskopska analiza sprovedena SEM-om je potvrdila eksperimentalne rezultate. Slike dobijene SEM-om su pokazale da su nakon ubrzane karbonatizacije u zrnima RCA prisutne šupljine veličine manje od 2 μm .

Ipak, proces karbonatizacije za posledicu ima smanjenje pH vrednosti, što može smanjiti adheziju između bitumena i RCA i asfaltnu mešavinu učiniti osetljivijom na dejstvo vode, ali i na neke druge vrste oštećenja. Dodatno, ovakvim tretmanima se komplikuje i poskupljuje proces pripreme RCA za upotrebu u građevinarstvu.

Imajući u vidu navedeno, može se zaključiti da RCA dobijen drobljenjem betona visokog kvaliteta (klasa čvrstoće \geq C35/45), koji nije bio izložen agresivnim uticajima spoljašnje sredine, nije potrebno izlagati dodatnim tretmanima u cilju poboljšanja njegovih fizičko-mehaničkih karakteristika. Zbog toga su dalja eksperimentalna ispitivanja uticaja RCA na karakteristike asfalt betona sprovedena samo za netretirani RCA.

Granulometrijski sastav krupnih frakcija (4/8 mm, 8/16 mm i 16/22.4 mm) prirodnog i recikliranog agregata je sličan, dok je sitna frakcija (0/4 mm) RCA značajno sitnija od prirodnog agregata. U poređenju sa prirodnim drobljenim (kamenim) agregatom, RCA ima:

- manju zapreminsku masu zbog zaostalog cementnog maltera;
- veće upijanje vode zbog veće poroznosti cementnog maltera;
- slabiju otpornost na drobljenje, izraženu kroz manji LA koeficijent.

5.1.2 Zaključci u vezi rezultata ispitivanja asfaltnih mešavina

Osim količine upotrebljenog RCA, posebna pažnja je posvećena uticaju krupnoće RCA na fizičko-mehaničke karakteristike asfalt betona. Maksimalan sadržaj RCA je ograničen na 45%, zbog zabrinutosti da bi njegove slabije mehaničke karakteristike mogle negativno uticati na karakteristike asfaltne mešavine i u cilju izbegavanja potrebe za prekomernom količinom bitumena. Osim kontrolne mešavine, ispitivanja su sprovedena i na tri serije mešavina sa RCA. U prvoj seriji je samo sitan agregat (0/4 mm) zamenjen sa RCA; u drugoj seriji je zamenjen samo krupan agregat (4/22.4 mm), dok je treća serija obuhvatila mešavine u kojima je i sitan i krupan prirodni agregat zamenjen sa RCA. Svaku grupu su činile po tri mešavine sa sadržajem RCA od 15%,

30% i 45%. Ispitivanja su sprovedena na asfaltnim mešavinama za noseće slojeve, AC 22 BASE.

Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja asfaltnih mešavina sa delimičnom zamenom prirodnog agregata recikliranim, zaključuje se sledeće:

- Otpornost asfalt betona na dejstvo vode ispitana je merenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) suvih i vlažnih uzoraka. U odnosu sa kontrolnu mešavinu, kod šest od devet asfaltnih mešavina sa RCA, izmerena je veća otpornost na dejstvo vode. U poređenju sa kontrolnom mešavinom, kod mešavina S-15, K-30 i SK-15 zabeležen je pad otpornosti na dejstvo vode u iznosu od: -2.4%, -4.7% i -2.2%, respektivno, što je prihvatljivo sa aspekta mogućnosti primene u asfaltnim mešavinama. S obzirom da Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012) ne propisuju minimalne uslove za otpornost asfaltnih mešavina na dejstvo vode, može se zaključiti da sa tog stanovišta ne postoji nikakva prepreka za delimičnu zamenu prirodnog agregata recikliranim u količini do 45%.
- Ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju asfalt betona vršeno je pomoću opita točkom. Delimična zamena prirodnog agregata recikliranim, u količini do 45%, ne utiče u bitnoj meri na dubinu kolotruga. Dodatak krupnog RCA generalno povećava otpornost na trajnu deformaciju, kao i dodatak do 30% sitnog RCA. Ipak, kombinovani uticaj povećanog sadržaja bitumena i RCA dovodi do većih trajnih deformacija kod mešavina sa sitnim i krupnim RCA. Maksimalna izmerena dubina kolotruga iznosila je 5.5%, što je i dalje manje od 7%, koliko je dopušteno prema važećim Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012).
- Kompleksni modul i fazni ugao asfalt betona ispitani su savijanjem gredica opterećenih u četiri tačke. U poređenju sa kontrolnom mešavinom fazni ugao je nešto niži kod mešavina sa RCA i varira u relativno uskim granicama (npr. između 22° i 25° na temperaturi od 25°C) što ukazuje na elastičnije ponašanje mešavina sa RCA u odnosu na kontrolnu mešavinu. Posmatrajući samo prosečne vrednosti modula krutosti uočava se da asfalt betoni sa recikliranim agregatom

imaju manje krutosti od kontrolne mešavine. Izmerene vrednosti modula krutosti su statistički obrađene dvosmernom analizom varijansi (ANOVA) i t-testom, sa nivoom poverenja od 95%. Rezultati ANOVA-e pokazuju da razlike modula krutosti nisu statistički značajne u populacijama koje obuhvataju RCA asfaltne mešavine sa određenom krupnoćom zrna (S, K ili SK mešavine) ili sa određenom količinom RCA (15%, 30% ili 45%), što znači da ni krupnoća ni količina RCA nemaju značajan uticaj na krutost ispitivanih RCA mešavina. Kod mešavina sa recikliranim agregatom veća su rasipanja rezultata u odnosu na kontrolnu mešavinu, što je primarno posledica nehomogenosti RCA. Statistička analiza je pokazala i da na modul krutosti veći uticaj ima krupnoća upotrebljenog RCA nego procenat upotrebljenog RCA. Rezultati t-testa su pokazali da su, izuzev mešavina S-15, S-30 i SK-45, razlike modula krutosti svih ostalih RCA mešavina statistički značajne u odnosu na modul krutosti kontrolne mešavine.

- Krutost predmetnih asfaltnih mešavina prikazana je i u vidu master krivih. Master krive RCA mešavina su za kombinacije visokih frekvencija i niskih temperatura ispod master krive kontrolne mešavine, što znači da su moduli krutosti RCA mešavina niži u odnosu na kontrolnu mešavinu u zoni visokih modula krutosti.
- Ispitivanje otpornosti na zamor asfalt betona sprovedeno je na prizmatičnim gredicama opterećenim na savijanje u četiri tačke. Izuzev mešavine S-45, sve ostale RCA-mešavine pokazale su veću otpornost na zamor u poređenju sa kontrolnom mešavinom. Čak se može pokazati da i mešavina S-45 pri dilatacijama opterećenja nižim od 87.36 $\mu\text{m}/\text{m}$ ima duži životni vek od kontrolne mešavine, sa aspekta zamora materijala. Iako ne postoji jasna zavisnost između količine upotrebljenog RCA i ponašanja asfalta pri zamoru, ovakvi rezultati su veoma ohrabrujući sa aspekta upotrebe RCA u asfaltima, posebno imajući u vidu da oštećenja koja nastaju kao posledica zamora materijala, predstavljaju dominantan tip oštećenja u bitumeniziranim nosećim slojevima kolovoznih konstrukcija. Kako bi se procenio eksploatacioni vek kolovozne konstrukcije sa aspekta zamora materijala, izvršeno je dimenzionisanje kolovozne konstrukcije za tri intenziteta saobraćajnog opterećenja (TIP 1: 500,000; TIP 2: 5,000,000 i

TIP 3: 15,000,000 standardnih osovina od 80 kN). Dobijeni rezultati pokazuju da većina kolovoznih konstrukcija sa nosećim slojem od RCA asfaltnih mešavina pokazuje bolje ponašanje u odnosu na kontrolnu mešavinu. Povoljan efekat RCA na ovo svojstvo asfalt betona naročito je izražen kod kolovoznih konstrukcija sa većim intenzitetom opterećenja. Tako na primer, u slučaju opterećenja TIP 2 i TIP 3, samo kolovozna konstrukcija sa mešavinom S-45 ima manji vek s obzirom na zamor u odnosu na konstrukciju sa kontrolnom mešavinom.

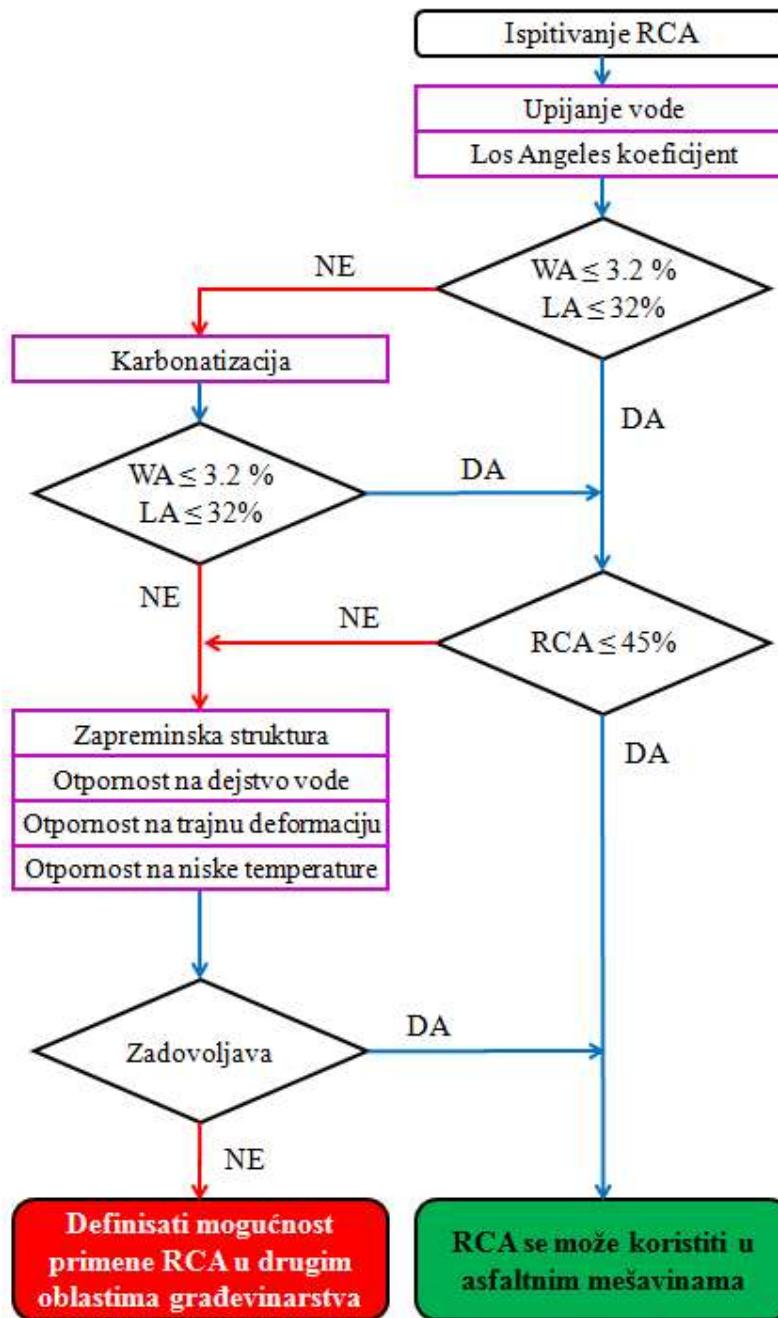
- Otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature ispitana je opitom zatezanja uklještenog uzorka (TSRST). Sa dodatkom RCA generalno se smanjuje otpornost asfaltnih mešavina na niske temperature u odnosu na kontrolnu mešavinu. Na osnovu ispitanih mešavina se takođe može zaključiti da postoji blagi trend smanjenja otpornosti na niske temperature sa povećanjem sadržaja RCA i da je učešće RCA od približno 45% na gornjoj granici primenljivosti, sa aspekta otpornosti asfaltne mešavine na niske temperature. Tehničkim uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012) ne definišu minimalne kriterijume za otpornost asfalt betona na niske temperature. Ipak, u stručnoj javnosti je prihvaćeno mišljenje da asfalti kod kojih termičke pukotine nastaju na temperaturama nižim od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, imaju zadovoljavajuću otpornost na niske temperature. Izuzev mešavina K-45 ($T_{\text{lom}} = -19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) i SK-45 ($T_{\text{lom}} = -19.7^{\circ}\text{C}$), prema ovom kriterijumu, sve ostale RCA mešavine bile su otporne na dejstvo niskih temperatura. Mešavine K-45 i SK-45 su se nalazile na granici u pogledu otpornosti na dejstvo niskih temperatura. Imajući u vidu da su ove mešavine predviđene za noseće slojeve kolovoznih konstrukcija i da nisu direktno izložene dejstvu niskih temperatura, može se smatrati da sve ispitivane mešavine mogu biti uspešno primenjene.

Na slici 5.1 su date smernice za upotrebu RCA kao delimične zamene prirodnog agregata recikliranim. Ovakvi zaključci se odnose na asfaltne mešavine namenjene nosećim slojevima kolovoznih konstrukcija, za sve kategorije saobraćajnog opterećenja. Upotrebi RCA uvek prethodi ispitivanje osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika,

upijanja vode i otpornosti na drobljenje metodom "Los Angeles". Ukoliko je upijanje vode $\leq 3.2\%$ i LA koeficijent $\leq 32\%$, asfaltne mešavine sa dodatkom takvog RCA u količini do 45% se mogu koristiti bez daljih ispitivanja. U slučaju da RCA ne zadovolji uslove za upijanje vode i otpornost na drobljivost, ove karakteristike je u određenoj meri moguće poboljšati postupkom ubrzane karbonatizacije, koja je u odnosu na tretman hlorovodoničnom kiselinom, dala bolje rezultate, kako u pogledu kvaliteta novodobijenog RCA, tako i u pogledu uticaja na životnu sredinu. Ukoliko se ni ubrzanom karbonatizacijom ne postignu zadovoljavajuće vrednosti upijanja vode i otpornosti na drobljenje neophodno je sprovesti dodatna ispitivanja na asfaltnim mešavinama (videti sliku 3.1). Dodatna ispitivanja na asfaltnim mešavinama su neophodna i ako se planira upotreba više od 45% RCA. U skladu sa dobijenim rezultatima dodatnih ispitivanja asfaltnih mešavina treba definisati mogućnost primene RCA.

Kao opšti zaključak celokupnog istraživanja treba istaći da:

- primena RCA u asfaltnim mešavinama za noseće slojeve omogućava da se primeni kompletan RCA - i sitan i krupan agregat;
- mešavine sa RCA imaju istu ili bolju otpornost na zamor u odnosu na kontrolnu mešavinu;
- maksimalna količina RCA je u manjoj meri ograničena otpornošću na niske temperature, otpornošću na dejstvo vode, otpornošću na trajnu deformaciju i krutošću mešavine.



Slika 5.1 Smernice za primenu RCA u asfaltnim mešavinama

5.2 Preporuke za dalja istraživanja

Istraživanja vršena na asfaltnim mešavinama sa RCA dala su detaljan uvid u ponašanje asfaltnih mešavina u uslovima niskih, srednjih i visokih temperatura, kao i otpornosti na dejstvo vode. Ipak, do sada je sproveden relativno mali broj istraživanja na asfaltnim mešavinama sa delimičnom ili potpunom zamenom prirodnog agregata recikliranim. Zbog toga postoji širok spektar pravaca u kojima bi uspešno mogla da se nastave buduća ispitivanja. Neki od aktuelnih predloga za dalja istraživanja su:

- ispitivanja asfaltnih mešavina sa recikliranim agregatom koji je dobijen drobljenjem betona klase čvrstoće niže od C35/45;
- ispitivanja asfaltnih mešavina sa recikliranim agregatom u količinama većim od 45%;
- ispitivanja drugih načina prethodne pripreme (tretmana) agregata u cilju poboljšanja njegovog kvaliteta (prevlačenjem spoljašnjih površina RCA tankim slojem izvesnog zaptivnog materijala, na primer parafina ili laka; potapanjem RCA u manje agresivne i ekološki pogodnije kiseline, itd.);
- određivanje mikrostrukture asfaltnih mešavina sa recikliranim agregatom;
- verifikovanje rezultata ispitivanja RCA asfaltnih mešavina prikazanih u ovoj disertaciji nekim drugim metodama (npr. dinamički opit tečenja, dinamički modul krutosti itd.) ;
- ispitivanje mogućnosti upotrebe RCA kao filera u asfaltnim mešavinama;
- ispitivanje uticaja različitih postupaka ugradnje asfaltnih mešavina sa recikliranim agregatom na promenu granulometrijskog sastava mineralne mešavine, zbog slabijih mehaničkih karakteristika RCA u odnosu na prirodni agregat;
- detaljna analiza ekonomskog aspekta upotrebe RCA koja bi uključila:
 - analizu procene uticaja na životnu sredinu (Life-cycle assessment);
 - efekat pripreme RCA na smanjenje potrebnog sadržaja bitumena.

6 Literatura

- AASHTO, 1993. Guide for the Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2008. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC.
- Ahmed, K., Muhammad, I., Sarfraz, A., Arsalan, A., Afaq, K., 2014. Experimental Investigation of Strength and Stiffness Characteristics of Hot Mix Asphalt (HMA). *Procedia Engineering*, 77, pp.155–160.
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Zhang, M. H., Tam, C. T., Foo, T. W. J., 2011. Microwaveassisted beneficiation of recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials* 25(8) pp. 3469–3479.
- Al-Bayati, H. K. A., Das, P. K., Tighe, S. L., Baaj, H., 2016. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 112, pp. 284–298.
- Al-Mosawe, H., Thom, N., Airey, G. and Al-Bayati, A., 2015. Effect of aggregate gradation on the stiffness of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology (PEAT)* ISSN 1464-8164, Volume: 16, Issue: 2, pp.39-49.
- Al-Baiti, H.K., Al-Sarrag, N., Al-Maliky, S. E. S., Alwan, S. S., Use of Recycling Building Demolition waste As Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt, https://www.researchgate.net/publication/259965582_Use_of_Recycling_Building_Demolition_waste_As_Coarse_Aggregate_in_Hot_Mix_Aspphalt (pristupljeno: 04.03.2017).

- Arabani, M. & Azarhoosh, A. R., 2012. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 35, pp.1–7.
- Arabani, M., Moghadas Nejad, F. & Azarhoosh, A. R., 2013. Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), pp.531–539.
- AS. (1996). Particle density and water absorption of aggregates (AS 1141.6.2-1996). Sydney: Australian Standard.
- Asphalt Institute, 1981. Thickness design--asphalt pavements for highways and streets, Manual Series MS-1, 80 p, Asphalt Institute, College Park, MD
- Asphalt Institute design method, 2001. SP-1 Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specifications and Testing.
- Austrroads, 2004. Pavement Design - A Guide to the Structural Design of Road Pavements, AP-G17/04, Austrroads, Sidney.
- ASTM D3515:2009 Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures
- ASTM D 3497:2003 Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.
- ASTM D 4123: 1995 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.
- Atkins H.N., 1997. Highway materials, soils, and concretes, 3rd editions, ISBN 0-13-212862-4.
- Barksdale R.D., 1967. Predicting Performance of Bituminous Surfaced Pavements, Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 321-340, University of Michigan Ann Arbor, United States of America.
- Bazin, P., and Saunier, J., 1967. Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan.

- Bhusal, S. & Wen, H., 2013. Evaluating Recycled Concrete Aggregate as Hot Mix Asphalt Aggregate, 2(1), pp.252–265.
- Bonnot, J., 1986. Asphalt Aggregate Mixtures. Transportation Research Record No. 1096, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 42-50.
- Borges, P.H., Costa, J. O., Milestone, N. B., 2010. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS, Cem. Concr. Res. 40(2) pp. 284-292.
- Brasileiro, L.L., Silva Filho, E. C., da C. Filho, J. A. R., Vieira, P. de A., de Matos, J. M. E., 2014. Analysis of the Properties of Asphaltic Concrete Using Recycled Aggregates of CDW. Materials Science Forum, 775–776, pp.613–618.
- Brown, E.R., & S.A. Cross, 1992. A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61; pp. 535–582.
- Carević, V., Ignjatović, I. 2016. Ispitivanje otpornosti betona sa prirodnim i recikliranim agregatom ubrzanim karbonatizovanim testovima, Konferencija Savremeni materijali i konstrukcije sa regulativom, Beograd, pp. 79-88, ISBN 978-86-87615-07-6.
- Chen, M., Lin, J. & Wu, S., 2011. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. Construction and Building Materials, 25(10), pp.3909–3914.
- Chen, M.J. & Wong, Y.D., 2013. Porous asphalt mixture with 100% recycled concrete aggregate. Road Materials and Pavement Design, 14(4), pp.921–932.
- Chiangmai, C. N., 2010. Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures. M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Cho, Y. Ho, Hun, T., Kim, I. T., Choi, N. R., 2011. The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate. KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 15 (3), pp. 473–478.
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., Iwanski, M. M., 2016. Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen, Construction and Building Materials 126, pp.

108–118.

COST 333, European Commission, 1999. Development of new pavement design method - Final report of the action, Brussels, Belgium.

De Jong, D. L., Peatz, M. G. F., & Korswagen, A. R., 1973., Computer Program Bisar Layered Systems Under Normal and Tangential Loads, External Report AMSR .0006 .73 ; Konin Klijck e Shell-Laboratorium, Amsterdam

DIN. (2002). Aggregates for mortar and concrete—Part 100: Recycled aggregates (DIN 4226-100). Berlin: Deutsches Institut für Normung.

Ektas, S. & Karacasu, M., 2012. Use of Recycled Concrete in Hot Mix Asphalt and an ANN model for Prediction of Resilient Modulus. *Ekoloji*, 21(83), pp. 53–60.

Eisenmann, J., & A. Hilmer, 1987. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements-Experiments and Theoretical Investigations. Proceedings, Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, pp. 392-403.

Epps, J.A., & Monismith, C.L., 1972. Fatigue of Asphalt Concrete Mixtures - Summary of Existing Information, in STP 508, ASTM, 19-45.

EN1097-2:2013 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.

EN 1097-6:2013 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.

EN 12457-(1-4):2002 Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 1: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction); Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction); Part 3: Two stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg and 8 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction); Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction).

- EN 12591: 2009 Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.
- EN 12697-12:2008, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.
- EN 12697-22:2003, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking.
- EN 12697-23:2003 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
- EN12697-24:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.
- EN 12697-26:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.
- EN 12697-33:2007, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen prepared by roller compactor.
- EN 12697-46: 2012 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests.
- EN 13108-20:2006, Bituminous mixtures - Material specifications - Part 20: Type Testing.
- EN 1426:2015, Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration.
- EN 1427:2015, Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method.
- EN 15326:2009, Bitumen and bituminous binders - Measurement of density and specific gravity - Capillary-stoppered pycnometer method.
- EN 16192:2011 Characterization of waste - Analysis of eluates.
- EN 933-1:2012, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.
- EPA 9056:2007 Determination of inorganic anions by ion chromatography.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA) and the National Asphalt Pavement

- Association (NAPA), 2011: The Asphalt Paving Industry A Global Perspective Second Edition: Production, Use, Properties and Occupational Exposure Reduction Technologies and Trends, pp. 5, ISBN 0-914313-06-1.
- Evropska asocijacija za agregat 2017, <http://www.uepg.eu/statistics/current-trends>, (pristupljeno 12. februara 2017).
- Freeme, C. R., & Marais, C. P., 1973. Thin Bituminous Surfaces: Their Fatigue Behavior and Prediction, Highway Research Board, Special Report No. 140, pp. 158-179.
- Fisher, C., Werge, M., 2009: EU as a Recycling Society. ETC/SCP working paper 2/2009. Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU.
- Flintsch, G. W., Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., & Mokarem, D., 2005. Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Virginia. Report VTRC 05-CR22. Virginia Department of Transportation, Richmond, VA.
- Fromm, H.J. & Phang, W.A., 1972. A Study of Transverse Cracking of Bituminous Pavements, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, pp. 383 - 423.
- Garba, R. 2002. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Doctoral thesis submitted to the Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Ghuzlan, K. A., Carpenter, S. H., 2003. Traditional Fatigue Analysis of Asphalt Concrete Mixtures. Presented at the 2003 Transportation Research Board Annual Meeting.
- Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D., 2012. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition, Construction and Building Materials 34, pp. 145–150.
- Gul, W. A., 2008. Effect of recycled cement concrete content on rutting behavior of asphalt concrete, Doctoral thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university.

- Harvey, J. T., Deacon, J. A., Tsai, B.W., Monismith, C. L., 1995. Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California, RTA-65W485-2. Asphalt Research Program , CAL / APT Program Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley.
- Hicks, R. G., Finn, F. N., Monismith, C. L., Leahy, R. B., 1993. Validation of SHRP binder specification through mix testing. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 62, pp. 565–614.
- Hiltunen, D.R., Roque, R. 1995, SHRP A-005, A Mechanics-Based Prediction Model for Thermal Cracking of Asphaltic Concrete Pavements, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, 1994, pp. 81-117.
- Hofstra, A., & Klomp, A.J.G., 1972. Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions, Proceedings, Third International Conference on tire Stntcttttral Design of Asphalt Pavements, Vol. I, London, pp. 613-621.
- Hu, S., Zhou, F., Hu, X., Scullion, T., Qi, X., Walubita, L. F., & Claros, G., 2008. Consideration of HMA Resilient Modulus (M_r) for M-E Pavement Design and Analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 77, pp. 663–708.
- Ismail, S., Ramli, M., 2013. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA), *Constr. Build. Mater.* 44, pp. 464–476.
- Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A., Radević, A., 2014. Properties modeling of cement composites of fly ash, *Materials Protection*, ISBN 0351-9465, LV pp. 39-44.
- JIS. (2011). Recycled aggregate for concrete-class H (JIS A 5021:2011). Tokyo: Japan Concrete Institute (in Japanese).
- JIS. (2012a). Recycled concrete using recycled aggregate class M (JIS A 5022:2012). Tokyo: Japan Concrete Institute (in Japanese).
- JIS. (2012b). Recycled concrete using recycled aggregate class L (JIS A 5023:2012). Japan Concrete Institute: Japan Concrete Institute (in Japanese).

- JTG F40-2004, 2004. China's Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavements.
- Katz, A., 2004. Treatments for the improvement of recycled aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16(6), pp. 597-603.
- Kalcheff, I. V., & Tunnicliff, D. G., 1982. Effects of Crushed Stone Aggregate Size and Shape on Properties of Asphalt Concrete, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions*, vol. 51, pp. 453-483, Kansas City, Missouri, United States of America.
- Kamal, M. A., Shazib, F., & Yasin, B., 2005. Resilient Behaviour of Asphalt Concrete under Repeated Loading & Effects of Temperature. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 1329-1343.
- Kandhal, P. S., Cooley, L. A., 2003. NCHRP Report 508: Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Kareem, Y.N.A., & Chandra, S., 2012. Review of Studies on Fatigue Behavior of Bituminous Concrete, pp. 1-10.
- Kirk, J.M., 1967. Results of Fatigue Tests on Different Types of Bituminous Mixtures. *Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan.
- Kou, S. C., Zhan, B. J., Poon, C. S., 2014. Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregate, *Cement and Concrete Composites* 33(2), pp. 22-28.
- Ksaibati, K., & Erickson, R., 1998: Evaluation of low temperature cracking in asphalt pavement mixes (MPC report), Dept. of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, ASIN: B0006R0QE2.
- Kim, J. H., Robertson, R. E., Naaman, A. E., 1999. Structure and properties of poly(vinylalcohol) -modified mortar and concrete, *Cement and Concrete Research* 29(3), pp. 407-415.

- Kim, G. D., Kim, T. B., 2007. Development of recycling technology from waste aggregate and dust from waste concrete, *Journal of Ceramic Processing Research* 8(1), pp. 82-86.
- Kliwer, J., Zeng, H., & Vinson, T., 1996. Aging and Low-Temperature Cracking of Asphalt Concrete Mixture. *Journal of Cold Regions Engineering*, 10(3), pp. 134–148.
- Kok, B.V., Yilmaz, M., 2009. The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 23, pp. 1999-2006.
- Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., Jiang, J., 2010. Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 24(5) pp. 701–708.
- Kou, S. C., Poon, C. S., 2010., Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research* 32(8), pp. 649 – 654.
- KS. (2002). Recycled aggregates for concrete. Korean Standards Association, Korea (in Korean).
- Lee, C. H., Du, J. C., & Shen, D. H., 2012. Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.66–71.
- Loulizi, A., Flintsch, G. W., Al-Qadi, I. L., & Mokarem, D., 2006. Comparing Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design. *Transportation Research Record*, No. 1970, pp. 161–170.
- Mansur, A., Santos, D., Mansur, H., 2007. A microstructural approach to adherence mechanism of poly (vinyl alcohol) modified cement systems to ceramic tiles, *Cement and Concrete Research* 37 (2), pp. 270 – 282.

- MDT RC-1544, 2011. Michigan Department of Transportation, Using Recycled Concrete in MDOT's Transportation Infrastructure – Manual of Practice, Report Number RC-1544.
- Mills-Beale, J., & You, Z., 2010. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(3), pp.230–235.
- Monismith, C. L., Epps, J. A., Kasianchuk, & McLean, D. B., 1971. Asphalt Mixture Behavior on Repeated Flexure. Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, 303.
- Monismith, C. L., 1981. Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design, Proceedings, 18th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque.
- MnDOT Final Report No. MN/RC – 2003-09, Timothy R. Clyne, Xinjun Li, Mihai O. Marasteanu, Eugene L. Skok 2003: Dynamic and Resilient Modulus of MN/DOT Asphalt Mixtures, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, 500 Pillsbury Dr. S.E. Minneapolis.
- Muraya, P. M., 2007. Permanent Deformation of Asphalt Mixtures, Doctoral Dissertation, Technische Universiteit Delft, ISBN-13: 978-90-9021895-3.
- Nejad, F. M., Azarhoosh, A.R., & Hamed, G. H., 2013. The effects of using recycled concrete on fatigue behavior of hot mix asphalt. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(sup1), pp.S61–S68.
- Nevelt, G., & Thanfold, H., 1988. Evaluation of the Resistance to Deformation of Different Road Structures and Asphalt Mixtures Determined in the Pavement-Rutting Tester. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 57.
- NCHRP 01-37A, 2004. *Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Draft Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- NCHRP RPT 468-a, 2002, Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements, Project C1-34A FY'99, ISBN 0-309-06721-9, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- NCHRP RPT 580, 2007. Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Oikonomou, N. D., 2005. Recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*; 27(2), pp. 315-318.
- Orešković, M., Ćirilović, J., Mladenović, G., 2013. Performance of asphalt mixtures with increased content of recycled asphalt material, In Proceedings, 14th Colloquium on asphalt and bitumen, Bled, Slovenia., pp. 157-167.
- Pan, T., Tutumluer, E. & Carpenter, S. H., 2005. Effect of Coarse Aggregate Morphology on the Resilient Modulus of Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, pp. 1-9.
- Paranavithana, S. & Mohajerani, A., 2006. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(1), pp.1–12.
- Park, T., Kim, K.W., Rhee, S.K., Nam, Y.K., 2004, Asphalt mixture using recycled concrete aggregate, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna, pp. 368-372.
- Pasandín, A.R. & Pérez, I., 2014a. Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 52, pp.284–293.
- Pasandín, A.R. & Pérez, I., 2013. Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. *Construction and Building Materials* 43, pp.497–505.
- Pasandín, A. R. & Pérez, I., 2014b. Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion. *Construction and Building Materials* 55, pp.350–358.

- Pasandín, A. R. & Pérez, I., 2015. Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 74, pp.151–161.
- Pavement interactive, 2016. Asphalt test: <http://www.pavementinteractive.org/article/flexural-fatigue/>, (pristupljeno 04.12.2016.).
- Pell, P. S., 1962. *Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes*. Ann Arbor, Michigan: International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements.
- Pell, P. S. & Brown, S. F., 1972. The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures, Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 326.
- Pell, P. S., 1973. Characterization of Fatigue Behavior, in *Structural Design of Asphalt Concrete Pavements to Prevent Fatigue Cracking*. Special Report 140, Highway Research Board, pp. 49-64.
- Pell, P.S., 1987. *Pavement Materials*, Sixth International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Ann Arbor, Michigan.
- Pelliser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., Bernardin, A. M., 2011. Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition, *Journal of Cleaner Production* 19(6), pp. 757-763.
- Perez, I., Pasandín, A. R. & Gallego, J., 2012a. Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste. *Waste Management & Research*, 30(1), pp.3–11.
- Pérez, I., Pasandín, A. R. & Medina, L., 2012b. Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials & Design* 36, pp. 840–846.
- Perez, I., Toledano, M., Gallego, J., Taibo, J. 2007. Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris. *Materiales de Construcción* 57(285), pp.17-29.

- Ping, W. V., & Xiao, Y., 2007. Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida. Report BC-352-12, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
- prCEN/TS 12390-12 Testing hardened concrete Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method.
- Putevi Srbije 2012, Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, Javno preduzeće Putevi Srbije.
- Rafi, M. M., Qadir, A. & Siddiqui, S. H., 2011. Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates. Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 29(12), pp.1316–26.
- Reid, J. M., Evans, R. D., Holsteiner, R., Wimmer, B., Gaggli, W., Berg, F., Pihl, K. A., Milvang-Jensen, O., Hjelmar, O., Rathmeyer, H., François, D., Raimbault, G., Johansson, H. G., Håkansson, K., Nilsson, U., Hugener, M., 2001. ALT-MAT Contract No.: RO-97-SC.2238, Project funded by the European Commission under the transport RTD programme of the 4th framework programme.
- RILEM TC 121-DRG (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. Materials and Structures, 27, pp. 557–559.
- Ristić, N., Grdić, Z., Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Despotović, I., 2016. Svojstva samougrađujućeg betona spravljenog sa dodatkom otpadnih materijala kao mineralnog dodatka, Konferencija Savremeni materijali i konstrukcije sa regulativom, Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, pp. 11-20.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. & Kennedy, T. W., 1996. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, Lanham, Maryland, United States of America.
- Savić, A., 2015. Istraživanje svojstava svežeg i očvrstlog samozbijajućeg betona sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet.

- Silva, R. V., Neves, R., de Brito, J., Dhir, R.K., 2015. Cement and Concrete Composites 62, pp. 22-32.
- Shell International Petroleum Company Ltd. 1978., Shell pavement design manual. London.
- Shen, D. & Du, J., 2005. Application of Gray Relational Analysis to Evaluate HMA with Reclaimed Building Materials, pp. 400–406.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., Xie, Z., 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review, Journal of Cleaner Production 112, pp. 466 – 472.
- SHRP-A-404, 1994. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, ISBN 0-309-05812-0.
- Shu, X., Huang, B., Vukosavljevic, D., 2008. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture, Construction and Building Materials 22 (7), pp.1323–1330.
- Shu, X., Huang, B., Qian, G., 2010: A Practical Method for Converting Resilient Modulus to Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Aichi, Japan, pp. 797-806.
- Solyman, M., 2005. Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures Klassifizierung von Recycling - Brechsanden und ihre Anwendungen für Beton und für Straßenbaustoffe Dissertation.
- Spaeth, V., Tegguer, A. D., 2014. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments, International Journal of Sustainable Built Environment 2(2), pp. 143-152.
- Sousa, J. B., Craus, J., Monismith, C. L., 1991. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete (SHRP-A/IR-91-104). Strategic Highway Research Program, Washington, DC.

- SRPS U.E9.021:1986, Projektovanje i gradenje puteva - Izrada gornjih nosećih slojeva od bitumeniziranog materijala po vrućem postupku - Tehnički uslovi.
- Sun, Y. H., Wu, S. P., Zhu, J. Q., & Zhong, J. J., 2011. Investigation on Properties of Granite Asphalt Mixtures Prepared Using Fine Recycled Concrete Aggregate. *Advanced Materials Research*, 211–212, pp.1066–1071.
- Sun, Y. H., Wu, S. P., Zhu, J. Q., & Zhong, J. J., 2011. Classification of Fine Recycled Aggregate Used in Asphalt Concrete. *Advanced Materials Research*, 365, 33–37.
- Sund, E. K., 2002. Optimal Road Maintenance and Operations – Results of New Research and Analysis in Norway, *NORDIC Road and Transportation Research*, NPRA, Norway.
- Taibo, J., Pérez, I., Gallego, J., Toledano, M., 2010. Asphalt mixtures with construction and demolition debris. *Proceedings of the ICE - Transport* 163(4), pp.165–174.
- Tam, V. W. V., Tam, C. M., 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research* 35(6), pp. 1195-1203.
- Tam, V. W., Tam, C. M., Le, K. N., 2007. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling* 50 (1), pp. 82–101.
- Tam, V. W. V., Tam, C. M., 2008. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA_{sc}, *Construction and Building Materials* 22(10), pp. 2068–2077.
- Tam, V. W. Y., 2008. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resources Conservation and Recycling* 52(5), pp. 821-828.
- Tang, L., Utgenannt, P., Lindvall, A., Boubitsas, D., 2010. Uppdragsrapport: Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in the road environment, CBI Betonginstitutet.
- Tangella, R., Craus, J., Deacon, A., Monismith, L., 1990. SHRP-A-003-A, SUMMARY REPORT ON FATIGUE RESPONSE OF ASPHALT MIXTURES, TM-UCB-A-003A-89-3.

- Tateyashiki, H., Shima, H., Matsumoto, Y., Koga, Y., 2001. Properties of concrete with high quality recycled aggregate by heat and rubbing method, *Proc.JCI* 23(2), pp. 61-66.
- Thiery, M., Villain, G., Dangla, P., Platret, G., 2007. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics, *Cement and Concrete Research* 37(7), pp.1047-1058.
- Thiery, M., Dangla, P., Belin, P., Habert, G., Roussel, N., 2013. Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials. *Cement and Concrete Research* 46, pp.50–65.
- Tjan, A., Napitupulu, R. 2013. Verification of Resilient Modulus Prediction of Asphalt Mixtures, Eastern Asia Society for Transportation Studies, Paper presented at the Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.
- Topličić-Ćurčić, G., Mitić, V., Grdić, D., Ristić, N., Grdić, Z., 2017. Environmental Aspects of Red Mud and Its Utilization as a Component of Building Materials, Proceedings of the IV Advanced Ceramics and Applications Conference, DOI: 10.2991/978-94-6239-213-7_31, pp 447-474.
- Tsujino, M., Noguchi, T., Tamura, M., Kanematsu, M., Maruyama, I., 2007. Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment, *Journal of Advanced Concrete Technology* 5 (1), pp. 13-25.
- Tschegg, E. K., Jamek, M., & Lugmayr, R., 2011. Fatigue crack growth in asphalt and asphalt-interfaces. *Engineering Fracture Mechanics* 78(6), pp. 1044–1054.
- UN 1987, *Our Common Future: Report of the United Nations World Commission on Environment and Development*.
- Van, D. T., Taylor, P., Fick, G., Gress, D., VanGeem, M., Lorenz, E., 2012. *Sustainable Concrete Pavements: A Manual of Practice*. National Concrete Pavement Technology center.
- Van, der Poel, C., 1954. A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data. *Journal of Applied Chemistry*, 4, pp. 221–236.

- Van, D. W., 1975. Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings, 'The Association of Asphalt Paving Technologists, 38.
- Von Quintus, H. L., Scherocman, T. A., Hughes, C. S., & Kennedy, T. W., 1988. Development of Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System: AAMAS. Brent Rauhut Engineering, Inc., Austin.
- Von Quintus, H.L., Bush, A.J., Baladi G. Y., 1994. Nondestructive Testing of Pavements and Back-Calculation of Modulil, Second Volume STP 1198, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Witczak, M.V., Ramon, B., Von Quintus, H., Kaloush, K.E., 1999. Specimen Geometry And Aggregate Size Lab Test Study\| Superpave Support And Performance Models Management, NCHRP 9-19, Team Report SLS-3.
- Wilburn, D., Goonan, T., 1998. Aggregates from natural and recycled sources: Economic assessments for construction applications - A materials flow analysis, U.S. Geological Survey Circular 1176, U.S. Department of the Interior, Washington, DC.
- Williams, D. A., 1998. Microdamage healing in asphalt concretes: Relating binder composition and surface energy to healing rate. Ph.D. thesis, Texas A&M Univ., College Station, TX.
- Wong, Y.D., Sun, D.D. & Lai, D., 2007. Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt. Waste management (New York, N.Y.), 27(2), pp.294–301.
- Wu, H., 2011. Investigating Properties of Pavement Materials Utilizing Loaded Wheel Tester (LWT).
- Wu, H., Huang, D., Asce, M., Shu, X., Asce, A.M., 2014. Characterizing Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures Utilizing Loaded Wheel Testers.
- Wu, S., Yhong, J., Zhu, J. & Wang, D., 2013. Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture. Road Materials and Pavement Design, 14(3), pp.679–688.

- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S., 2016. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 65, pp. 67-74.
- Yoder, E. J., Witczak, M. W., 1975. *Principles of Pavement Design*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Zhan, B. J., Poon, C. S., Liu, Q., Kou, S. C., Shi, C. J., 2014. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties, *Construction and Building Materials* 67, pp. 3-7.
- Zhang, J., Li, Y., Poon, C. S., Xie, Z., 2015. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar, *Construction and Building Materials* 98, pp. 1–7.
- Zhu, J., Wu, S., Zhong, J., Wang, D., 2012. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. *Construction and Building Materials* 29, pp. 466–475.
- Zhu, Y. G., Kou, S. C., Poon, C. S., Dai, J. G., Li, Q. Y., 2013. Influence of silane – based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites* 35(1), pp. 32-38.
- Zulkati, A., Wong, Y.D. & Sun, D.D., 2013. Mechanistic Performance of Asphalt-Concrete Mixture Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(9), pp.1299–1305.

PRILOG A

REZULTATI PROJEKTOVANJA ASFALTNIH MEŠAVINA
PO METODI MARŠALA

Tabela A.1 Kontrolna mešavina (E)

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
E ₁	E ₁₁	3.4	2415	2564	5.8	8.2	14.0	58.6	12.4	3.4	3.6
E ₁	E ₁₂	3.4	2421	2564	5.6	8.2	13.8	59.6	12.0	3.2	3.8
E ₁	E ₁₃	3.4	2420	2564	5.6	8.2	13.8	59.4	11.5	3.4	3.4
Prosek			2419	2564	5.7	8.2	13.9	59.2	12.0	3.3	3.6

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
E ₂	E ₂₁	3.7	2430	2550	4.7	9.0	13.7	65.6	11.3	3.6	3.1
E ₂	E ₂₂	3.7	2420	2550	5.1	8.9	14.0	63.7	11.9	3.6	3.3
E ₂	E ₂₃	3.7	2423	2550	5.0	9.0	13.9	64.3	11.9	3.7	3.2
Prosek			2424	2550	4.9	9.0	13.9	64.6	11.7	3.6	3.2

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
E ₃	E ₃₁	4	2460	2541	3.2	9.8	13.0	75.5	10.5	3.9	2.7
E ₃	E ₃₂	4	2462	2541	3.1	9.8	12.9	76.1	10.6	4.0	2.6
E ₃	E ₃₃	4	2458	2541	3.2	9.8	13.1	75.2	10.8	3.8	2.8
Prosek			2460	2541	3.2	9.8	13.0	75.6	10.6	3.9	2.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
E											
USVOJENO		3.6	2422	2554	5.2	8.7	13.9	62.8	11.8	3.5	3.3

Tabela A.2 Mešavina S15

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S15 ₁	S15 ₁₁	3.4	2412	2587	6.8	8.2	14.9	54.8	12.7	2.6	4.9
S15 ₁	S15 ₁₂	3.4	2407	2587	7.0	8.2	15.1	54.0	12.3	2.7	4.6
S15 ₁	S15 ₁₃	3.4	2416	2587	6.6	8.2	14.8	55.4	12.7	2.7	4.7
Prosek			2412	2587	6.8	8.2	15.0	54.7	12.6	2.7	4.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S15 ₂	S15 ₂₁	3.7	2428	2563	5.3	9.0	14.2	63.0	12.1	3.7	3.3
S15 ₂	S15 ₂₂	3.7	2428	2563	5.3	9.0	14.2	63.0	12.3	3.5	3.5
S15 ₂	S15 ₂₃	3.7	2440	2563	4.8	9.0	13.8	65.3	12.3	3.4	3.6
Prosek			2432	2563	5.1	9.0	14.1	63.8	12.3	3.5	3.5

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S15 ₃	S15 ₃₁	4	2440	2548	4.2	9.7	14.0	69.7	11.6	3.8	3.0
S15 ₃	S15 ₃₂	4	2444	2548	4.1	9.8	13.8	70.6	12.0	3.7	3.3
S15 ₃	S15 ₃₃	4	2456	2548	3.6	9.8	13.4	73.1	11.9	3.7	3.2
Prosek			2447	2548	4.0	9.8	13.8	71.1	11.8	3.7	3.2

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S15											
USVOJENO		3.6	2422	2554	5.2	8.7	13.9	62.8	11.8	3.5	3.3

Tabela A.3 Mešavina S30

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S30 ₁	S30 ₁₁	3.5	2411	2552	5.5	8.4	13.9	60.5	12.9	3.4	3.8
S30 ₁	S30 ₁₂	3.5	2412	2552	5.5	8.4	13.9	60.7	12.8	3.4	3.8
S30 ₁	S30 ₁₃	3.5	2408	2552	5.6	8.4	14.1	59.9	12.6	3.5	3.6
	Prosek		2410	2552	5.5	8.4	14.0	60.4	12.8	3.4	3.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S30 ₂	S30 ₂₁	3.8	2424	2540	4.6	9.2	13.8	66.9	12.8	3.6	3.6
S30 ₂	S30 ₂₂	3.8	2420	2540	4.7	9.2	13.9	66.0	12.8	3.6	3.6
S30 ₂	S30 ₂₃	3.8	2424	2540	4.6	9.2	13.8	66.8	12.5	3.7	3.4
	Prosek		2423	2540	4.6	9.2	13.8	66.6	12.7	3.6	3.5

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S30 ₃	S30 ₃₁	4.1	2439	2530	3.6	10.0	13.6	73.7	11.0	4	2.7
S30 ₃	S30 ₃₂	4.1	2434	2530	3.8	10.0	13.7	72.5	10.6	3.9	2.7
S30 ₃	S30 ₃₃	4.1	2433	2530	3.8	10.0	13.8	72.3	10.8	3.9	2.8
	Prosek		2435	2530	3.7	10.0	13.7	72.8	10.8	3.9	2.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S30											
USVOJENO		3.6	2414	2548	5.2	8.7	13.9	62.4	12.7	3.5	3.6

Tabela A.4 Mešavina S45

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S45 ₁	S45 ₁₁	3.7	2378	2521	5.7	8.8	14.5	60.8	12.2	3.3	3.7
S45 ₁	S45 ₁₂	3.7	2380	2521	5.6	8.8	14.4	61.2	12.6	3.2	3.9
S45 ₁	S45 ₁₃	3.7	2385	2521	5.4	8.8	14.2	62.1	12.4	3.3	3.8
	Prosek		2381	2521	5.5	8.8	14.3	61.4	12.4	3.3	3.8

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S45 ₂	S45 ₂₁	4	2404	2514	4.4	9.6	14.0	68.7	12.2	3.6	3.4
S45 ₂	S45 ₂₂	4	2407	2514	4.3	9.6	13.9	69.3	12.5	3.5	3.6
S45 ₂	S45 ₂₃	4	2414	2514	4.0	9.6	13.6	70.9	12.3	3.6	3.4
	Prosek		2408	2514	4.2	9.6	13.8	69.7	12.4	3.6	3.5

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S45 ₃	S45 ₃₁	4.3	2425	2507	3.3	10.4	13.7	76.1	12.0	4	3.0
S45 ₃	S45 ₃₂	4.3	2431	2507	3.0	10.4	13.5	77.6	12.0	3.8	3.2
S45 ₃	S45 ₃₃	4.3	2430	2507	3.0	10.4	13.5	77.4	11.9	4	3.0
	Prosek		2429	2507	3.1	10.4	13.5	77.1	11.9	3.9	3.0

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
S45											
USVOJENO		3.6	2372	2523	6.0	8.5	14.5	58.6	12.4	3.2	3.9

Tabela A.5 Mešavina K15

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K15 ₁	K15 ₁₁	3.4	2410	2559	5.8	8.2	14.0	58.4	12.6	3.2	3.9
K15 ₁	K15 ₁₂	3.4	2415	2559	5.6	8.2	13.8	59.3	12.7	3.1	4.1
K15 ₁	K15 ₁₃	3.4	2411	2559	5.8	8.2	14.0	58.6	12.3	3.2	3.8
Prosek			2412	2559	5.7	8.2	13.9	58.8	12.5	3.2	4.0

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K15 ₂	K15 ₂₁	3.7	2436	2542	4.1	9.0	13.1	68.5	12.0	3.6	3.3
K15 ₂	K15 ₂₂	3.7	2436	2542	4.1	9.0	13.1	68.5	11.9	3.5	3.4
K15 ₂	K15 ₂₃	3.7	2438	2542	4.1	9.0	13.1	68.7	11.6	3.6	3.2
Prosek			2437	2542	4.1	9.0	13.1	68.6	11.8	3.6	3.3

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K15 ₃	K15 ₃₁	4	2450	2530	3.2	9.8	13.0	75.5	9.6	4	2.4
K15 ₃	K15 ₃₂	4	2450	2530	3.1	9.8	12.9	75.7	9.8	3.9	2.5
K15 ₃	K15 ₃₃	4	2457	2530	2.9	9.8	12.7	77.2	9.7	4.1	2.4
Prosek			2452	2530	3.1	9.8	12.9	76.1	9.7	4.0	2.4

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K15											
USVOJENO		3.5	2420	2553	5.2	8.5	13.7	62.0	12.3	3.3	3.7

Tabela A.6 Mešavina K30

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K30 ₁	K30 ₁₁	3.4	2374	2583	8.1	8.1	16.2	49.8	13.2	3.2	4.1
K30 ₁	K30 ₁₂	3.4	2381	2583	7.8	8.1	15.9	50.9	12.5	3.1	4.0
K30 ₁	K30 ₁₃	3.4	2383	2583	7.7	8.1	15.8	51.1	12.5	3.2	3.9
Prosek			2380	2583	7.9	8.1	16.0	50.6	12.7	3.2	4.0

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K30 ₂	K30 ₂₁	3.7	2409	2558	5.8	8.9	14.7	60.5	12.6	3.5	3.6
K30 ₂	K30 ₂₂	3.7	2401	2558	6.2	8.9	15.0	59.0	12.3	3.4	3.6
K30 ₂	K30 ₂₃	3.7	2400	2558	6.2	8.9	15.0	59.0	12.1	3.6	3.4
Prosek			2404	2558	6.1	8.9	14.9	59.5	12.3	3.5	3.5

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K30 ₃	K30 ₃₁	4	2414	2546	5.2	9.6	14.8	65.0	12.2	3.8	3.2
K30 ₃	K30 ₃₂	4	2414	2546	5.2	9.6	14.8	65.0	11.2	3.7	3.0
K30 ₃	K30 ₃₃	4	2415	2546	5.2	9.6	14.8	65.1	11.5	3.8	3.0
Prosek			2414	2546	5.2	9.6	14.8	65.0	11.6	3.8	3.1

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K30											
USVOJENO		3.5	2388	2575	6.6	8.3	15.6	53.6	12.6	3.3	3.9

Tabela A.7 Mešavina K45

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K45 ₁	K45 ₁₁	3.4	2382	2551	6.6	8.1	14.7	55.0	11.8	3.3	3.6
K45 ₁	K45 ₁₂	3.4	2383	2551	6.6	8.1	14.7	55.2	12.6	3.1	4.1
K45 ₁	K45 ₁₃	3.4	2384	2551	6.6	8.1	14.6	55.3	12.0	3.1	3.9
Prosek			2383	2551	6.6	8.1	14.7	55.1	12.1	3.2	3.8

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K45 ₂	K45 ₂₁	3.7	2398	2540	5.6	8.9	14.5	61.3	12.4	3.7	3.3
K45 ₂	K45 ₂₂	3.7	2400	2540	5.5	8.9	14.4	61.5	12.6	3.6	3.5
K45 ₂	K45 ₂₃	3.7	2399	2540	5.6	8.9	14.4	61.5	12.5	3.6	3.5
Prosek			2399	2540	5.6	8.9	14.4	61.4	12.5	3.6	3.4

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K45 ₃	K45 ₃₁	4	2404	2526	4.8	9.6	14.4	66.6	11.0	3.8	2.9
K45 ₃	K45 ₃₂	4	2406	2526	4.8	9.6	14.4	66.9	11.1	3.8	2.9
K45 ₃	K45 ₃₃	4	2409	2526	4.6	9.6	14.2	67.6	11.5	3.9	2.9
Prosek			2406	2526	4.7	9.6	14.3	67.0	11.2	3.8	2.9

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
K45											
USVOJENO		3.5	2388	2548	6.1	8.4	14.6	57.2	12.2	3.3	3.7

Tabela A.8 Mešavina SK15

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK15 ₁	SK15 ₁₁	3.4	2401	2557	6.1	8.2	14.3	57.2	12.3	3.1	4.0
SK15 ₁	SK15 ₁₂	3.4	2392	2557	6.4	8.1	14.6	55.8	11.9	3.2	3.7
SK15 ₁	SK15 ₁₃	3.4	2386	2557	6.7	8.1	14.8	54.8	11.9	3.2	3.7
	Prosek		2393	2557	6.4	8.1	14.5	55.9	12.0	3.2	3.8

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK15 ₂	SK15 ₂₁	3.7	2412	2544	5.2	8.9	14.1	63.1	12.8	3.4	3.8
SK15 ₂	SK15 ₂₂	3.7	2409	2544	5.3	8.9	14.2	62.6	12.9	3.4	3.8
SK15 ₂	SK15 ₂₃	3.7	2408	2544	5.3	8.9	14.2	62.5	12.8	3.3	3.9
	Prosek		2410	2544	5.3	8.9	14.2	62.8	12.9	3.4	3.8

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK15 ₃	SK15 ₃₁	4	2424	2526	4.0	9.7	13.7	70.5	10.2	3.7	2.8
SK15 ₃	SK15 ₃₂	4	2419	2526	4.2	9.7	13.9	69.5	9.9	3.8	2.6
SK15 ₃	SK15 ₃₃	4	2421	2526	4.1	9.7	13.8	70.0	9.9	3.8	2.6
	Prosek		2421	2526	4.1	9.7	13.8	70.0	10.0	3.8	2.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK15											
USVOJENO		3.6	2404	2549	5.7	8.6	14.3	60.5	12.6	3.3	3.8

Tabela A.9 Mešavina SK30

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK30 ₁	SK30 ₁₁	3.4	2333	2547	8.4	7.9	16.3	48.6	11.7	2.8	4.2
SK30 ₁	SK30 ₁₂	3.4	2342	2547	8.0	8.0	16.0	49.8	12.1	2.8	4.3
SK30 ₁	SK30 ₁₃	3.4	2338	2547	8.2	7.9	16.1	49.2	11.1	3	3.7
	Prosek		2338	2547	8.2	7.9	16.1	49.2	11.6	2.9	4.1

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK30 ₂	SK30 ₂₁	3.7	2363	2511	5.9	8.7	14.6	59.7	12.8	3.2	4.0
SK30 ₂	SK30 ₂₂	3.7	2362	2511	6.0	8.7	14.7	59.4	12.8	3.3	3.9
SK30 ₂	SK30 ₂₃	3.7	2362	2511	5.9	8.7	14.7	59.5	12.5	3.4	3.7
	Prosek		2362	2511	5.9	8.7	14.7	59.5	12.7	3.3	3.8

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK30 ₃	SK30 ₃₁	4	2374	2495	4.9	9.5	14.4	66.0	11.4	3.6	3.2
SK30 ₃	SK30 ₃₂	4	2375	2495	4.8	9.5	14.3	66.2	11.6	3.5	3.3
SK30 ₃	SK30 ₃₃	4	2373	2495	4.9	9.5	14.4	65.9	11.5	3.5	3.3
	Prosek		2374	2495	4.9	9.5	14.4	66.1	11.5	3.5	3.3

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK30											
USVOJENO		3.9	2379	2487	5.2	9.3	13.7	66.5	13.4	3.6	3.7

Tabela A.10 Mešavina SK45

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK45 ₁	SK45 ₁₁	3.4	2301	2518	8.6	7.8	16.4	47.5	11.5	3	3.8
SK45 ₁	SK45 ₁₂	3.4	2295	2518	8.9	7.8	16.7	46.8	11.4	3	3.8
SK45 ₁	SK45 ₁₃	3.4	2300	2518	8.7	7.8	16.5	47.4	11.0	3.2	3.4
	Prosek		2299	2518	8.7	7.8	16.5	47.2	11.3	3.1	3.7

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK45 ₂	SK45 ₂₁	3.8	2332	2497	6.6	8.7	15.4	56.9	65.5	3.4	19.3
SK45 ₂	SK45 ₂₂	3.8	2330	2497	6.7	8.7	15.4	56.5	64.5	3.3	19.5
SK45 ₂	SK45 ₂₃	3.8	2328	2497	6.8	8.7	15.5	56.3	65.5	3.4	19.3
	Prosek		2330	2497	6.7	8.7	15.4	56.6	65.2	3.4	19.4

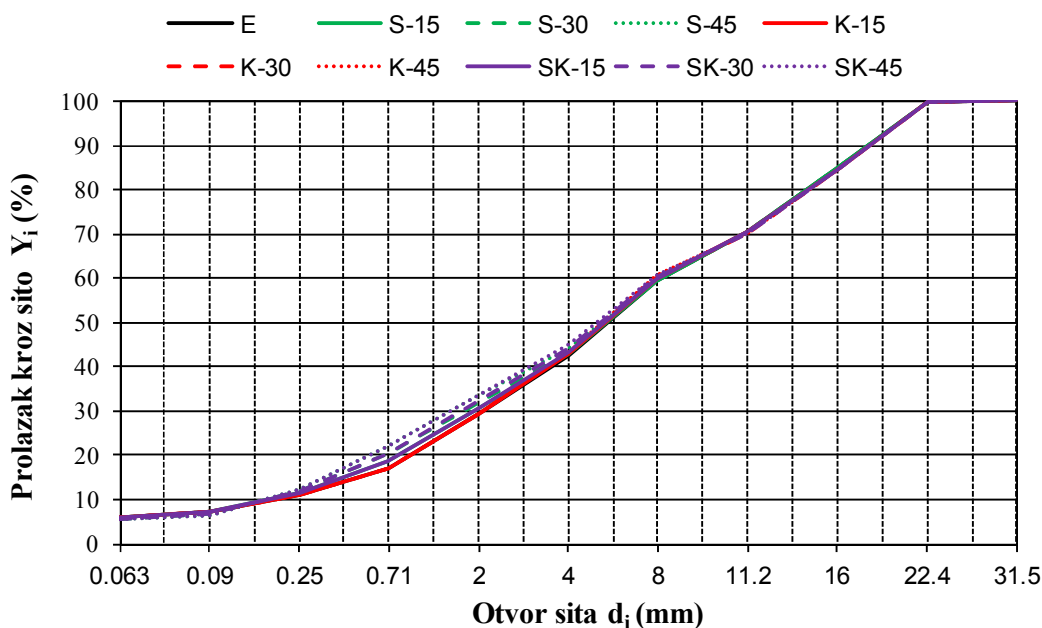
Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK45 ₃	SK45 ₃₁	4	2340	2478	5.6	9.4	14.9	62.6	60.3	3.5	17.2
SK45 ₃	SK45 ₃₂	4	2342	2478	5.5	9.4	14.9	63.0	60.3	3.5	17.2
SK45 ₃	SK45 ₃₃	4	2341	2478	5.5	9.4	14.9	62.8	59.3	3.6	16.5
	Prosek		2341	2478	5.5	9.4	14.9	62.8	60.0	3.5	17.0

Meš.	Uzorak	Pb (%)	G (kg/m ³)	G _{MAX} (kg/m ³)	AV (%)	V _B (%)	VMA (%)	VFB (%)	KS (kN)	t (mm)	U=S/t (kN/mm)
SK45											
USVOJENO		4.4	2359	2449	3.7	10.4	14.0	72.8	9.9	3.8	13.2

PRILOG B
GRANULOMETRIJSKI SASTAV MINERALNIH MEŠAVINA

Tabela B.1 Granulometrijski sastav mineralnih mešavina

Mešavina	Sito (mm)										
	0.063	0.09	0.25	0.71	2	4	8	11.2	16	22.4	31.5
E	6.0	7.4	11.1	17.0	29.4	42.6	59.6	70.7	84.8	99.6	100
S-15	5.8	7.1	11.5	18.7	30.7	43.1	59.6	70.7	84.8	99.6	100
S-30	5.7	6.9	11.9	20.5	32.0	43.5	59.6	70.7	84.8	99.6	100
S-45	5.5	6.6	12.4	22.2	33.4	44.0	59.6	70.7	84.8	99.6	100
K-15	6.0	7.4	11.1	17.0	29.4	42.9	59.9	70.4	84.7	99.7	100
K-30	6.0	7.4	11.1	17.0	29.5	43.2	60.2	70.2	84.6	99.7	100
K-45	6.0	7.4	11.1	17.1	29.5	43.5	60.6	69.9	84.5	99.8	100
SK-15	5.8	7.1	11.5	18.7	30.7	43.4	59.9	70.4	84.7	99.7	100
SK-30	5.7	6.9	12.0	20.5	32.1	44.1	60.2	70.2	84.6	99.7	100
SK-45	5.5	6.6	12.4	22.3	33.5	44.9	60.6	69.9	84.5	99.8	100



Slika B.1 Granulometrijske krive mineralnih mešavina

PRILOG C

ZAPREMINSKE KARAKTERISTIKE GREDICA ZA
ISPITIVANJE KRUTOSTI I OTPORNOSTI NA ZAMOR I
NISKE TEMPERATURE I PLOČA ZA ISPITIVANJE
KOLOTRAGA

Tabela C.1 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine E i S-15

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
E - 1		2435				4.6		101
E - 2		2445				4.2		101
E - 3		2432				4.8		101
E - 9		2443				4.3		101
E - 10		2447				4.1		101
E - 11	3.4	2427	2413	2419	2553	4.9	5.5	100
E - 13		2390				6.4		99
E - 15		2392				6.3		99
E - 16		2389				6.4		99
E - 17		2369				7.2		98
E - 18		2370				7.2		98
S15 - 4		2411				5.2		100
S15 - 5		2387				6.1		99
S15 - 6		2376				6.6		98
S15 - 7		2406				5.4		100
S15 - 8		2354				7.4		97
S15 - 9	3.5	2405	2390	2418	2543	5.4	6.0	99
S15 - 10		2402				5.6		99
S15 - 12		2396				5.8		99
S15 - 14		2388				6.1		99
S15 - 16		2387				6.1		99
S15 - 17		2382				6.3		99

Tabela C.2 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine S-30 i S-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
S30 - 2		2392				5.3		99
S30 - 3		2378				5.8		98
S30 - 4		2387				5.5		99
S30 - 6		2367				6.2		98
S30 - 9		2388				5.4		99
S30 - 10	3.5	2383	2373	2416	2525	5.6	6.0	99
S30 - 11		2393				5.2		99
S30 - 12		2388				5.4		99
S30 - 15		2337				7.4		97
S30 - 16		2350				6.9		97
S30 - 17		2354				6.8		97
S30 - 18		2355				6.8		97
S45 - 2		2365				6.0		99
S45 - 3		2346				6.7		99
S45 - 4		2350				6.6		99
S45 - 5		2349				6.6		99
S45 - 6		2350				6.6		99
S45 - 7		2318				7.9		97
S45 - 8	3.6	2313	2339	2379	2516	8.1	7.0	97
S45 - 10		2339				7.0		98
S45 - 11		2339				7.0		98
S45 - 12		2332				7.3		98
S45 - 13		2349				6.6		99
S45 - 14		2344				6.9		99
S45 - 15		2338				7.1		98
S45 - 18		2311				8.1		97

Tabela C.3 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine K-15 i K-30

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
K15 - 1		2372				6.6		98
K15 - 2		2371				6.7		98
K15 - 3		2383				6.2		99
K15 - 4		2377				6.4		99
K15 - 5		2367				6.8		98
K15 - 7	3.4	2366	2371	2412	2540	6.9	6.7	98
K15 - 9		2375				6.5		98
K15 - 12		2352				7.4		97
K15 - 14		2367				6.8		98
K15 - 15		2376				6.5		99
K15 - 16		2372				6.6		98
K15 - 17		2371				6.6		98
K30 - 3		2362				6.7		99
K30 - 4		2361				6.7		99
K30 - 5		2355				7.0		99
K30 - 6		2355				7.0		99
K30 - 8		2375				6.2		99
K30 - 9		2372				6.3		99
K30 - 10	3.5	2371	2362	2388	2531	6.3	6.7	99
K30 - 11		2357				6.9		99
K30 - 12		2355				7.0		99
K30 - 13		2353				7.0		99
K30 - 14		2360				6.7		99
K30 - 15		2364				6.6		99
K30 - 16		2367				6.5		99

Tabela C.4 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine K-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Mašal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
K45-1		2347				7.0		98
K45-2		2351				6.9		98
K45-3		2346				7.1		98
K45-4		2348				7.0		98
K45-5		2352				6.9		98
K45-6		2330				7.7		98
K45-7		2341				7.3		98
K45-8		2357				6.6		99
K45-9	3.5	2357	2342	2388	2525	6.6	7.2	99
K45-10		2350				6.9		98
K45-11		2341				7.3		98
K45-12		2327				7.8		97
K45-13		2332				7.6		98
K45-14		2345				7.1		98
K45-15		2339				7.4		98
K45-16		2338				7.4		98
K45-17		2331				7.7		98
K45-18		2323				8.0		97

Tabela C.5 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine SK-15

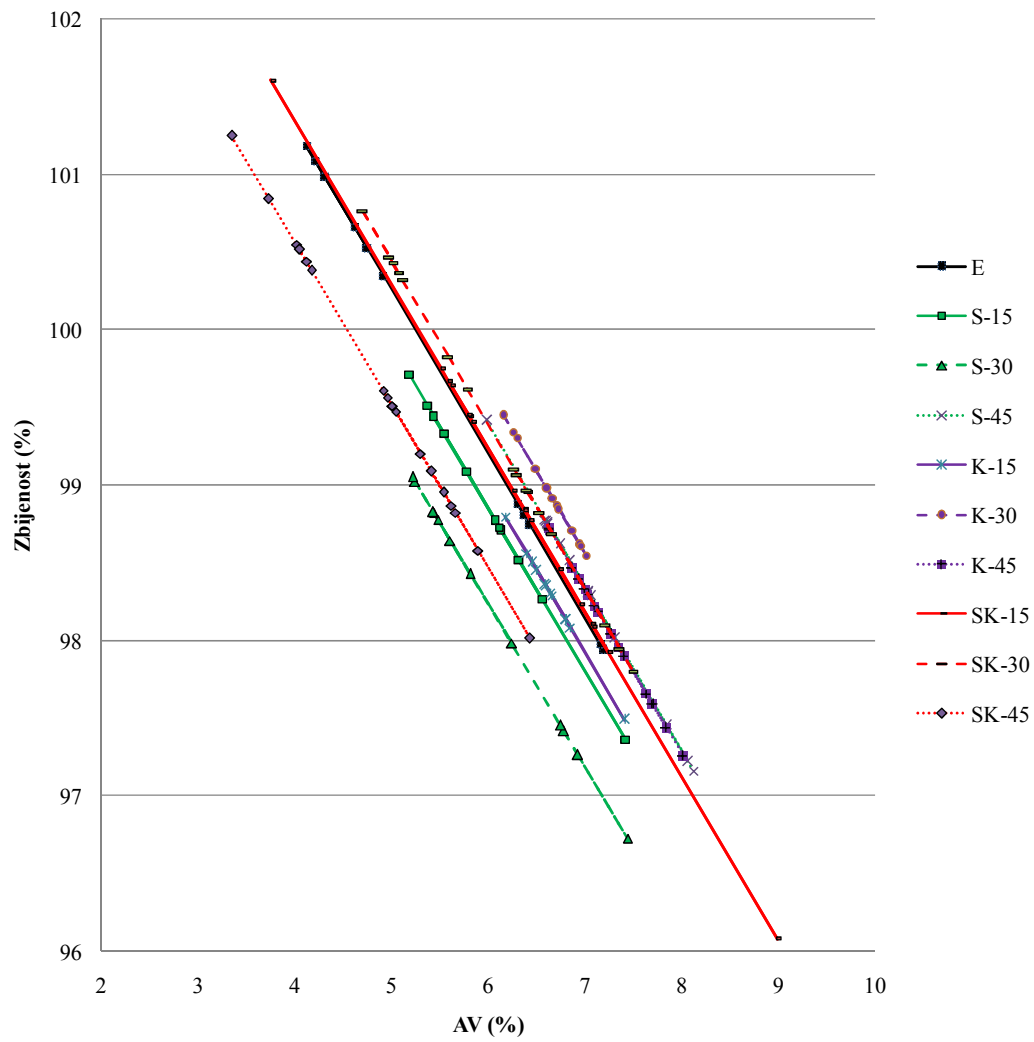
Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
SK15-1		2390				5.8		99
SK15-2		2395				5.6		100
SK15-4		2390				5.8		99
SK15-5		2358				7.1		98
SK15-6		2309				9.0		96
SK15-7		2442				3.8		102
SK15-8		2397				5.5		100
SK15-9		2394				5.6		100
SK15-10	3.6	2389	2377	2403	2537	5.8	6.3	99
SK15-11		2375				6.4		99
SK15-12		2353				7.2		98
SK15-13		2366				6.7		98
SK15-14		2375				6.4		99
SK15-15		2378				6.3		99
SK15-16		2374				6.4		99
SK15-17		2361				7.0		98
SK15-18		2357				7.1		98

Tabela C.6 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine SK-30

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
SK30-1		2379				5.1		100
SK30-2		2388				4.7		101
SK30-3		2381				5.0		100
SK30-4		2380				5.0		100
SK30-5		2378				5.1		100
SK30-6		2366				5.6		100
SK30-7		2361				5.8		100
SK30-8	3.9	2349	2354	2370	2506	6.3	6.1	99
SK30-9		2345				6.4		99
SK30-11		2342				6.5		99
SK30-12		2321				7.4		98
SK30-13		2325				7.2		98
SK30-14		2348				6.3		99
SK30-16		2318				7.5		98
SK30-17		2345				6.4		99
SK30-18		2339				6.7		99

Tabela C.7 Zapreminske karakteristike gredica za mešavine SK-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
SK45-1		2402				3.4		101
SK45-2		2392				3.7		101
SK45-3		2385				4.0		101
SK45-4		2382				4.1		100
SK45-5		2381				4.2		100
SK45-6		2384				4.1		101
SK45-7		2360				5.0		99
SK45-8		2353				5.3		99
SK45-9	4.4	2362	2363	2372	2485	5.0	4.9	100
SK45-10		2363				4.9		100
SK45-11		2345				5.6		99
SK45-12		2325				6.4		98
SK45-13		2360				5.0		100
SK45-14		2360				5.0		100
SK45-15		2347				5.5		99
SK45-16		2338				5.9		99
SK45-17		2350				5.4		99
SK45-18		2344				5.7		99



Slika C.1 Zbijenost u funkciji sadržaja šupljina

Tabela C.8 Zapreminske karakteristike ploča za kolotrage

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Mašal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
E ₁	3.4	2387	2389	2419	2553	6.5	6.4	98.7
E ₂		2390				6.4		98.8
S-15 ₁	3.5	2402	2407	2418	2543	5.5	5.3	99.3
S-15 ₂		2412				5.2		99.8
S-30 ₁	3.5	2357	2363	2416	2525	6.7	6.4	97.6
S-30 ₂		2368				6.2		98.0
S-45 ₁	3.6	2339	2334	2379	2516	7.0	7.2	98.3
S-45 ₂		2328				7.5		97.9
K-15 ₁	3.4	2334	2330	2412	2540	8.1	8.3	96.8
K-15 ₂		2325				8.5		96.4
K-30 ₁	3.5	2327	2332	2388	2531	8.1	7.9	97.4
K-30 ₂		2337				7.7		97.9
K-45 ₁	3.5	2301	2300	2388	2525	8.9	8.9	96.4
K-45 ₂		2298				9.0		96.2
SK-15 ₁	3.6	2337	2343	2403	2537	7.9	7.6	97.3
SK-15 ₂		2349				7.4		97.8
SK-30 ₁	3.9	2309	2315	2370	2506	7.9	7.6	97.4
SK-30 ₂		2320				7.4		97.9
SK-45 ₁	4.4	2325	2327	2372	2485	6.4	6.4	98.0
SK-45 ₂		2328				6.3		98.1

PRILOG D

ZAPREMINSKE KARAKTERISTIKE UZORAKA ZA
ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA DEJSTVO VODE

Tabela D.1 Zapreminske karakteristike Maršalovih uzoraka
za mešavine E, S-15, S-30 i S-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
E - 4		2341				8.3		96.8
E - 5		2342				8.3		96.8
E - 6	3.4	2347	2348	2419	2553	8.1	8.0	97.0
E - 7		2358				7.6		97.5
E - 8		2346				8.1		97.0
E - 9		2353				7.8		97.3
S15 - 4		2312				9.1		95.6
S15 - 5		2307				9.3		95.4
S15 - 6	3.5	2305	2312	2418	2543	9.4	9.1	95.3
S15 - 7		2315				9.0		95.8
S15 - 8		2310				9.2		95.5
S15 - 9		2320				8.8		95.9
S30 - 4		2312				8.4		95.7
S30 - 5		2317				8.2		95.9
S30 - 6	3.5	2311	2317	2416	2525	8.5	8.2	95.7
S30 - 7		2312				8.4		95.7
S30 - 8		2340				7.3		96.9
S30 - 9		2309				8.5		95.6
S45 - 4		2292				8.9		96.5
S45 - 5		2308				8.3		97.2
S45 - 6	3.6	2310	2298	2376	2515	8.2	8.7	97.2
S45 - 7		2302				8.5		96.9
S45 - 8		2287				9.1		96.2
S45 - 9		2288				9.1		96.3

Tabela D.2 Zapreminske karakteristike Maršalovih uzoraka
za mešavine K-15, K-30 i K-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
K15 - 4		2290				9.9		94.9
K15 - 5		2317				8.8		96.1
K15 - 6	3.4	2312	2298	2412	2540	9.0	9.5	95.8
K15 - 7		2289				9.9		94.9
K15 - 8		2290				9.8		95.0
K15 - 9		2292				9.8		95.0
K30 - 4		2298				9.2		96.2
K30 - 5		2308				8.8		96.7
K30 - 6	3.5	2283	2290	2388	2531	9.8	9.5	95.6
K30 - 7		2285				9.7		95.7
K30 - 8		2293				9.4		96.0
K30 - 9		2273				10.2		95.2
K45 - 4		2267				10.2		94.9
K45 - 5		2264				10.3		94.8
K45 - 6	3.5	2256	2263	2388	2525	10.6	10.4	94.5
K45 - 7		2266				10.3		94.9
K45 - 8		2255				10.7		94.4
K45 - 9		2268				10.2		95.0

Tabela D.3 Zapreminske karakteristike Maršalovih uzoraka
za mešavine SK-15, SK-30 i SK-45

Oznaka	OBC (%)	G (kg/m ³)	G _{sr} (kg/m ³)	G _{Maršal} (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	AV (%)	AV _{sr} (%)	Zbijenost (%)
SK15 - 4		2305				9.1		95.9
SK15 - 5		2316				8.7		96.4
SK15 - 6	3.6	2301	2305	2403	2537	9.3	9.1	95.8
SK15 - 7		2303				9.2		95.9
SK15 - 8		2299				9.4		95.7
SK15 - 9		2307				9.1		96.0
SK30 - 4		2293				8.5		96.8
SK30 - 5		2284				8.9		96.4
SK30 - 6	3.9	2286	2281	2370	2506	8.8	9.0	96.4
SK30 - 7		2276				9.2		96.0
SK30 - 8		2275				9.2		96.0
SK30 - 9		2272				9.3		95.9
SK45 - 4		2280				8.3		96.1
SK45 - 5		2280				8.3		96.1
SK45 - 6	4.4	2284	2280	2372	2485	8.1	8.2	96.3
SK45 - 7		2292				7.8		96.6
SK45 - 8		2274				8.5		95.9
SK45 - 9		2273				8.5		95.8

PRILOG E
FAZNI UGAO I MODUL KRUTOSTI

Tabela E.1 Fazni ugao za mešavine E i S-15

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
E1	5.0	12.6	8.7	6.9	6.5	6.4	12.5
E10		13.0	9.1	7.0	6.6	6.3	13.0
E13		12.6	8.8	7.2	6.8	6.6	12.4
E17		13.1	9.4	7.8	7.4	7.2	12.9
E1	15.0	23.4	18.1	14.8	14.1	13.8	23.4
E10		25.8	19.9	16.1	15.2	14.7	25.8
E13		22.9	17.3	14.0	13.2	12.9	23.2
E17		22.6	16.9	13.6	12.9	12.6	22.7
E1	25.0	35.1	30.4	26.2	25.1	24.7	34.9
E10		35.9	31.4	27.0	25.8	25.4	35.7
E13		33.8	29.0	25.0	23.9	23.5	33.7
E17		34.2	29.3	25.3	24.2	23.9	34.3
S15-4	5.0	13.1	9.9	8.1	7.8	7.6	13.3
S15-7		10.4	7.1	5.8	5.5	5.5	10.7
S15-8		10.8	7.6	6.2	5.9	5.7	10.8
S15-10		12.7	8.7	7.0	6.6	6.4	12.6
S15-16		14.0	10.6	9.0	8.7	8.4	13.7
S15-4	15.0	24.9	19.8	16.7	15.9	15.6	24.8
S15-7		21.3	16.0	13.0	12.3	12.0	21.5
S15-8		21.2	16.0	13.3	12.7	12.4	21.4
S15-10		23.2	18.1	15.1	14.2	14.0	23.5
S15-16		24.6	19.4	16.2	15.4	15.1	24.5
S15-4	25.0	33.2	28.8	24.8	23.8	23.6	32.6
S15-7		30.7	25.7	21.9	21.0	20.5	30.8
S15-8		30.7	25.5	21.8	20.7	20.4	30.6
S15-10		32.9	28.0	24.1	23.1	22.8	33.1
S15-16		32.8	28.7	25.3	24.4	24.2	32.8

Tabela E.2 Fazni ugao za mešavine S-30 i S-45

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
S30-2		12.3	8.8	7.2	6.8	6.6	11.9
S30-6		12.7	9.2	7.7	7.4	7.3	12.8
S30-9	5.0	8.3	5.1	4.0	3.8	3.7	8.3
S30-11		8.0	5.3	4.3	4.1	3.9	8.0
S30-15		11.8	8.5	7.0	6.7	6.6	11.7
S30-2		21.8	16.8	13.4	13.3	13.7	21.6
S30-6		22.9	18.0	15.0	14.3	14.1	22.8
S30-9	15.0	18.9	14.3	11.5	11.0	10.6	18.9
S30-11		19.1	14.0	11.7	12.0	11.7	19.0
S30-15		21.2	16.3	13.5	12.8	12.5	21.4
S30-2		30.2	25.6	22.3	20.9	20.7	30.4
S30-6		32.0	27.9	24.6	23.7	23.4	32.1
S30-9	25.0	28.2	23.8	20.3	19.5	19.3	28.4
S30-11		28.2	23.6	20.2	19.4	19.1	28.4
S30-15		31.0	26.2	22.5	21.5	21.2	31.1
S45-2		12.7	9.5	8.0	7.6	7.4	12.7
S45-3		13.5	9.9	8.0	7.6	7.4	13.5
S45-4	5.0	11.4	8.4	6.9	6.4	6.1	11.6
S45-15		13.1	8.9	6.9	6.5	6.4	12.8
S45-18		12.7	9.3	7.7	7.3	7.1	12.8
S45-2		22.4	17.5	14.6	13.9	13.7	22.7
S45-3		23.4	18.5	15.6	14.9	14.6	23.5
S45-4	15.0	21.3	16.1	13.2	12.5	12.2	21.3
S45-15		22.9	17.7	14.6	13.9	13.6	23.0
S45-18		23.5	18.4	15.6	15.1	14.4	23.3
S45-2		30.5	26.5	23.2	22.1	21.8	30.6
S45-3		33.1	28.6	25.0	24.0	23.7	32.9
S45-4	25.0	30.4	25.8	22.2	21.1	20.7	30.5
S45-15		32.4	27.8	24.3	23.3	23.0	32.4
S45-18		32.7	28.1	24.4	23.5	23.2	32.7

Tabela E.3 Fazni ugao za mešavine K-15 i K-30

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
K15-2	5.0	14.5	10.1	7.9	7.4	7.0	14.3
K15-3		13.5	9.9	8.1	7.6	7.3	13.6
K15-4		14.2	10.6	8.6	8.2	8.0	14.1
K15-9		15.0	10.5	7.9	7.1	6.7	15.0
K15-2	15.0	24.6	18.9	15.5	14.8	14.5	24.7
K15-4		24.1	18.9	15.6	14.8	14.4	24.2
K15-9		25.4	20.2	16.9	16.1	15.8	25.5
K15-2	25.0	34.2	29.8	26.3	25.4	25.1	34.6
K15-3		33.3	28.9	25.4	24.5	24.2	33.3
K15-4		33.4	29.1	25.6	24.4	24.1	33.3
K15-9		34.2	30.1	26.7	25.7	25.5	34.1
K30-8	5.0	13.7	9.8	7.9	7.5	7.3	13.7
K30-9		13.4	9.6	7.6	7.2	6.9	13.5
K30-11		14.4	10.4	8.4	7.9	7.6	14.3
K30-13		13.6	9.8	8.1	7.8	7.6	13.5
K30-15		14.9	10.7	9.1	8.5	8.3	14.6
K30-8	15.0	25.2	19.4	15.9	15.0	14.6	25.2
K30-9		25.5	19.7	16.2	15.3	14.9	25.6
K30-11		24.2	19.1	15.8	15.0	14.7	24.3
K30-13		22.7	17.9	15.0	14.2	13.9	22.6
K30-15		24.3	19.1	16.0	15.1	14.9	24.3
K30-8	25.0	33.7	29.7	25.7	24.7	24.3	33.9
K30-9		33.4	29.3	25.7	24.6	24.3	33.9
K30-11		34.7	30.3	26.1	25.1	24.7	34.8
K30-13		32.4	28.2	24.8	23.8	23.7	32.4
K30-15		34.6	30.2	26.6	25.6	25.3	34.7

Tabela E.4 Fazni ugao za mešavine K-45 i SK-15

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
K45-2	5.0	13.3	9.8	8.2	7.7	7.6	13.1
K45-4		13.0	9.4	7.7	7.3	7.1	13.1
K45-8		14.9	11.1	9.2	8.6	8.4	14.9
K45-14		13.5	9.9	8.0	7.6	7.4	13.4
K45-18		13.5	9.7	7.7	7.2	7.1	13.4
K45-2	15.0	22.8	17.9	14.9	14.2	13.9	22.7
K45-4		23.5	18.3	15.1	14.3	13.9	23.5
K45-8		25.2	20.7	17.4	16.7	16.4	25.3
K45-18		23.4	18.5	15.4	14.6	14.3	23.5
K45-2	25.0	31.3	27.4	23.7	22.9	22.6	31.4
K45-4		31.4	27.3	23.7	22.7	22.4	31.8
K45-8		32.2	29.8	26.4	25.4	25.1	33.7
K45-14		32.3	28.0	24.2	23.2	22.9	32.3
K45-18		32.0	27.9	24.4	23.4	23.2	32.3
SK15-7	5.0	12.8	9.6	8.0	7.6	7.4	12.8
SK15-8		11.3	8.2	6.8	6.5	6.4	11.3
SK15-9		11.9	8.4	6.7	6.3	6.2	11.9
SK15-15		12.3	9.0	7.4	7.0	6.8	12.3
SK15-18		12.5	8.8	7.0	6.7	6.6	12.2
SK15-7	15.0	22.6	18.0	15.2	14.4	14.2	22.7
SK15-8		21.1	16.6	13.9	13.2	13.0	20.9
SK15-9		22.0	17.1	14.2	13.5	13.2	22.1
SK15-15		22.2	17.6	14.9	14.3	14.1	22.2
SK15-18		21.6	17.0	14.2	13.5	13.3	21.7
SK15-7	25.0	29.7	25.7	22.4	21.5	21.2	30.0
SK15-8		28.6	24.6	21.4	20.6	20.1	28.5
SK15-9		30.1	25.8	22.5	21.6	21.1	30.0
SK15-15		29.6	25.5	22.4	21.6	21.4	29.6
SK15-18		29.1	25.4	22.3	21.3	21.0	29.5

Tabela E.5 Fazni ugao za mešavine SK-30 i SK-45

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
SK30-1		9.9	7.1	5.7	5.3	5.2	9.9
SK30-2		10.4	7.5	6.0	5.7	5.6	10.4
SK30-8	5.0	12.6	9.4	7.8	7.4	7.2	12.6
SK30-11		12.4	9.1	7.4	6.9	6.7	12.5
SK30-16		13.2	9.7	8.1	7.7	7.4	13.3
SK30-1		19.9	15.3	12.5	11.8	11.5	20.0
SK30-2	15.0	20.6	15.7	12.9	12.1	11.9	20.6
SK30-8		23.0	18.4	15.5	14.8	14.5	23.0
SK30-11		22.8	17.7	14.7	13.9	13.7	23.0
SK30-1		29.3	24.4	20.9	19.9	19.7	28.7
SK30-2		29.7	24.9	21.4	20.6	20.2	29.5
SK30-8	25.0	31.5	27.5	24.2	23.3	23.0	31.5
SK30-11		32.2	27.4	23.9	22.9	22.7	32.3
SK30-16		32.5	28.1	24.6	23.6	23.2	32.7
SK45-5		13.6	9.9	8.0	7.5	7.3	13.5
SK45-12	5.0	15.3	11.4	9.2	8.8	8.6	15.2
SK45-15		12.0	8.8	7.2	6.7	6.6	12.1
SK45-18		11.2	8.0	6.6	6.3	6.1	11.2
SK45-5		23.9	18.5	15.3	14.4	14.1	24.2
SK45-12		23.5	19.2	16.4	15.6	15.4	23.7
SK45-14	15.0	23.1	17.8	14.6	13.8	13.5	23.3
SK45-15		22.1	17.1	14.0	13.4	13.1	22.3
SK45-18		21.4	16.5	13.5	12.7	12.4	21.5
SK45-5		34.0	29.1	25.0	23.9	23.5	33.9
SK45-12		33.2	29.1	25.4	24.3	24.0	33.4
SK45-14	25.0	33.4	28.7	24.8	23.8	23.4	33.5
SK45-15		32.5	27.5	23.9	22.8	22.5	32.5
SK45-18		30.6	26.1	22.4	21.4	21.0	31.0

Tabela E.6 Prosečne vrednosti faznog ugla

Oznaka	T (°C)	Fazni ugao (deg)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
E	5	12.8	9.0	7.2	6.8	6.6	12.7
	15	23.7	18.1	14.6	13.9	13.5	23.8
	25	34.8	30.0	25.9	24.8	24.4	34.7
S-15	5	12.2	8.8	7.2	6.9	6.7	12.2
	15	23.0	17.9	14.9	14.1	13.8	23.1
	25	32.1	27.3	23.6	22.6	22.3	32.0
S-30	5	10.6	7.4	6.0	5.8	5.6	10.5
	15	20.8	15.9	13.0	12.7	12.5	20.7
	25	29.9	25.4	22.0	21.0	20.7	30.1
S-45	5	12.7	9.2	7.5	7.1	6.9	12.7
	15	22.7	17.6	14.7	14.1	13.7	22.8
	25	31.8	27.4	23.8	22.8	22.5	31.8
K-15	5	14.6	10.7	8.7	8.1	7.8	14.5
	15	25.1	20.0	16.8	16.0	15.7	25.2
	25	33.4	29.4	26.2	25.2	25.0	33.6
K-30	5	14.0	10.1	8.2	7.8	7.5	13.9
	15	24.4	19.0	15.8	14.9	14.6	24.4
	25	33.8	29.5	25.8	24.8	24.5	33.9
K-45	5	13.6	10.0	8.2	7.7	7.5	13.6
	15	23.7	18.9	15.7	15.0	14.6	23.8
	25	31.8	28.1	24.5	23.5	23.2	32.3
SK-15	5	12.2	8.8	7.2	6.8	6.7	12.1
	15	21.9	17.3	14.5	13.8	13.6	21.9
	25	29.4	25.4	22.2	21.3	21.0	29.5
SK-30	5	11.7	8.6	7.0	6.6	6.4	11.7
	15	21.6	16.8	13.9	13.2	12.9	21.7
	25	31.0	26.5	23.0	22.1	21.8	30.9
SK-45	5	13.0	9.5	7.8	7.3	7.2	13.0
	15	22.8	17.8	14.8	14.0	13.7	23.0
	25	32.7	28.1	24.3	23.2	22.9	32.9

Tabela E.7 Modul krutosti za mešavine E i S-15

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
E1	5.0	9123	12111	13868	14291	14465	9099
E10		8620	11498	13219	13658	13833	8614
E13		9191	11959	13625	14079	14285	9143
E17		8634	11346	13022	13480	13690	8668
E1		3747	6136	8031	8577	8827	3695
E10	15.0	3347	5776	7781	8369	8647	3299
E13		3989	6505	8476	9027	9273	3981
E17		3900	6289	8140	8666	8905	3860
E1		1232	2584	4123	4625	4876	1247
E10	25.0	1040	2215	3621	4072	4299	1011
E13		1380	2754	4220	4706	4942	1406
E17		1291	2582	3982	4448	4669	1247
S15-4		7107	9549	11220	11663	11871	7111
S15-7	5.0	9293	11781	13234	13550	13690	9275
S15-8		8980	11536	13123	13532	13693	8947
S15-10		9671	12682	14501	14966	15166	9593
S15-16		6480	8685	10180	10603	10791	6404
S15-4		2934	4852	6457	6935	7160	2901
S15-7		4034	6428	8232	8750	8981	4027
S15-8	15.0	4334	6800	8747	9345	9597	4296
S15-10		4423	7193	9371	9972	10248	4392
S15-16		2809	4681	6251	6709	6919	2766
S15-4		1064	2068	3254	3603	3776	1076
S15-7	25.0	1487	2980	4427	4887	5114	1523
S15-8		1404	2704	4034	4456	4662	1389
S15-10		1321	2673	4096	4559	4791	1306
S15-16		1054	2083	3145	3488	3655	1041

Tabela E.8 Modul krutosti za mešavine S-30 i S-45

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
S30-2		8743	11279	12925	13325	13498	8672
S30-6		6960	9231	10694	11060	11221	6866
S30-9	5.0	11271	13849	15210	15570	15730	11280
S30-11		10156	12413	13649	13911	14005	10190
S30-15		8271	10755	12370	12803	12998	8338
S30-2		3601	5591	6942	7262	7349	3532
S30-6		3251	5221	6853	7320	7533	3199
S30-9	15.0	4949	7553	9442	9997	10299	5054
S30-11		5200	7557	9062	9507	9747	5050
S30-15		4061	6353	8181	8710	8963	4039
S30-2		1493	2841	4128	4543	4748	1495
S30-6		1250	2344	3509	3886	4067	1198
S30-9	25.0	1988	3632	5213	5707	5946	1965
S30-11		2175	3863	5456	5948	6189	2111
S30-15		1453	2823	4176	4605	4815	1444
S45-2		7353	9739	11271	11656	11812	7318
S45-3		7273	9748	11431	11878	12062	7191
S45-4	5.0	9104	11663	13296	13733	13921	9090
S45-15		6558	8784	10129	10452	10584	6539
S45-18		7904	10343	11966	12398	12572	7821
S45-2		3243	5186	6751	7225	7429	3164
S45-3		3265	5240	6882	7351	7553	3160
S45-4	15.0	3734	5832	7451	7916	8127	3685
S45-15		3266	5266	6887	7341	7552	3221
S45-18		3486	5625	7280	7763	8064	3411
S45-2		1197	2275	3383	3739	3912	1172
S45-3		1126	2187	3322	3686	3862	1106
S45-4	25.0	1353	2598	3831	4269	4450	1330
S45-15		1184	2303	3496	3879	4065	1139
S45-18		1181	2276	3517	3890	4064	1166

Tabela E.9 Modul krutosti za mešavine K-15 i K-30

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
K15-2	5.0	8167	11126	13037	13494	13705	8154
K15-3		7969	10596	12314	12744	12933	7924
K15-4		7837	10567	12425	12864	13073	7742
K15-9		7709	10700	12788	13381	13651	7717
K15-2	15.0	3314	5511	7328	7841	8074	3254
K15-4		3088	5070	6711	7190	7415	3021
K15-9		3260	5436	7274	7814	8059	3201
K15-2	25.0	1127	2201	3404	3836	4056	1089
K15-3		1217	2408	3661	4064	4253	1182
K15-4		1180	2325	3562	4025	4223	1177
K15-9		1067	2113	3278	3666	3847	1025
K30-8	5.0	7704	10448	12289	12785	13006	7647
K30-9		8144	10943	12720	13150	13355	8094
K30-11		7826	10713	12742	13316	13583	7780
K30-13		6357	8531	9945	10313	10470	6321
K30-15		7530	10117	11915	12436	12670	7460
K30-8	15.0	3003	5116	6844	7348	7598	2965
K30-9		3044	5172	6941	7458	7708	3013
K30-11		3533	5837	7800	8377	8630	3428
K30-13		2883	4596	6023	6443	6631	2836
K30-15		3330	5438	7153	7647	7868	3254
K30-8	25.0	1169	2333	3643	4067	4281	1134
K30-9		1178	2350	3618	4035	4237	1122
K30-11		1052	2165	3505	3924	4126	1067
K30-13		1038	1968	2968	3289	3447	992
K30-15		1064	2094	3230	3610	3790	1021

Tabela E.10 Modul krutosti za mešavine K-45 i SK-15

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
K45-2	5.0	6646	8786	10176	10547	10700	6587
K45-4		8487	11226	13048	13522	13730	8438
K45-8		5953	8110	9550	9930	10098	5925
K45-14		8037	10703	12503	12989	13192	8011
K45-18		6748	8947	10420	10757	10909	6615
K45-2	15.0	3262	5217	6852	7336	7560	3199
K45-4		3447	5633	7440	7974	8228	3396
K45-8		2658	4424	5954	6404	6625	2644
K45-18		3106	5062	6701	7186	7409	3065
K45-2	25.0	1232	2344	3570	3939	4126	1217
K45-4		1317	2522	3794	4202	4406	1279
K45-8		938	1853	2873	3211	3377	890
K45-14		1270	2467	3721	4121	4320	1290
K45-18		1142	2207	3342	3709	3888	1136
SK15-7	5.0	7985	10429	12002	12404	12574	7909
SK15-8		6744	8820	10170	10518	10667	6707
SK15-9		7562	9864	11291	11633	11773	7488
SK15-15		6549	8724	10225	10620	10777	6530
SK15-18		6793	9136	10628	11009	11132	6856
SK15-7	15.0	3366	5397	7057	7549	7777	3342
SK15-8		3007	4744	6147	6553	6741	2984
SK15-9		3327	5347	6983	7454	7674	3291
SK15-15		3109	4927	6481	6939	7150	3064
SK15-18		3204	5081	6615	7068	7274	3157
SK15-7	25.0	1326	2504	3699	4076	4263	1303
SK15-8		1291	2363	3451	3803	4030	1307
SK15-9		1302	2487	3699	4089	4329	1305
SK15-15		1359	2493	3633	3988	4167	1323
SK15-18		1351	2487	3643	4084	4266	1351

Tabela E.11 Modul krutosti za mešavine SK-30 i SK-45

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
SK30-1	5.0	8434	10691	12076	12433	12574	8373
SK30-2		7842	9932	11196	11523	11657	7791
SK30-8		6915	9212	10783	11193	11373	6893
SK30-11		7352	9685	11214	11605	11769	7309
SK30-16		7714	10403	12204	12706	12931	7666
SK30-1		15.0	4099	6241	7881	8291	8489	4036
SK30-2	3833		6005	7684	8190	8386	3746
SK30-8	3076		5010	6642	7121	7339	3060
SK30-11	3304		5366	7057	7553	7785	3263
SK30-1	25.0	1623	3100	4458	4887	5096	1653
SK30-2		1449	2748	4026	4425	4625	1431
SK30-8		1149	2206	3324	3690	3870	1118
SK30-11		1117	2195	3394	3795	4002	1149
SK30-16		1101	2182	3345	3727	3917	1082
SK45-5	5.0	8746	11810	13839	14383	14571	8729
SK45-12		7003	9639	11465	11953	12167	6963
SK45-15		8445	11175	12937	13399	13618	8453
SK45-18		7435	9576	10877	11212	11354	7456
SK45-5	15.0	3642	6078	8108	8706	8985	3582
SK45-12		2798	4576	6118	6592	6818	2754
SK45-14		3784	6221	8234	8843	9120	3717
SK45-15		3965	6446	8445	9001	9285	3954
SK45-18		3495	5568	7190	7662	7866	3458
SK45-5		25.0	1270	2616	4077	4558	4796	1302
SK45-12	962		1937	3103	3458	3631	981
SK45-14	1249		2533	3921	4374	4601	1235
SK45-15	1387		2723	4147	4606	4830	1337
SK45-18	1261		2471	3690	4086	4285	1226

Tabela E.12 Prosečne vrednosti modula krutosti

Oznaka	T (°C)	Modul krutosti (MPa)					
		0.1 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	0.1 Hz
E	5	8892	11729	13434	13877	14068	8881
	15	3746	6177	8107	8660	8913	3709
	25	1236	2534	3987	4463	4697	1228
S-15	5	8306	10847	12452	12863	13042	8266
	15	3707	5991	7812	8342	8581	3676
	25	1266	2502	3791	4199	4400	1267
S-30	5	9080	11505	12970	13334	13490	9069
	15	4212	6455	8096	8559	8778	4175
	25	1672	3101	4496	4938	5153	1643
S-45	5	7638	10055	11619	12023	12190	7592
	15	3399	5430	7050	7519	7745	3328
	25	1208	2328	3510	3893	4071	1183
K-15	5	7921	10747	12641	13121	13341	7884
	15	3221	5339	7104	7615	7849	3159
	25	1148	2262	3476	3898	4095	1118
K-30	5	7512	10150	11922	12400	12617	7460
	15	3159	5232	6952	7455	7687	3099
	25	1100	2182	3393	3785	3976	1067
K-45	5	7174	9554	11139	11549	11726	7115
	15	3118	5084	6737	7225	7456	3076
	25	1180	2279	3460	3836	4023	1162
SK-15	5	7127	9395	10863	11237	11385	7098
	15	3203	5099	6657	7113	7323	3168
	25	1326	2467	3625	4008	4211	1318
SK-30	5	7651	9985	11495	11892	12061	7606
	15	3578	5656	7316	7789	8000	3526
	25	1288	2486	3709	4105	4302	1287
SK-45	5	7907	10550	12280	12737	12928	7900
	15	3537	5778	7619	8161	8415	3493
	25	1226	2456	3788	4216	4429	1216

PRILOG F
REZULTATI ISPITIVANJA ASFALTNIH MEŠAVINA NA
ZAMOR

Tabela F.1 Zavisnost broja ciklusa opterećenja i zadate deformacije opterećenja za mešavine E i S-15

Oznaka	Broj ciklusa opterećenja (-)	E ₁₀₀ (MPa)	με (με)
E-1	8,195	5513	341
E-18	10,163	5281	304
E-15	22,286	5879	302
E-2	56,663	5972	225
E-13	78,244	6137	215
E-14	73,715	6259	200
E-10	2,032,595	5838	141
E-3	513,364	4766	132
E-5	520,749	2179	126
E-16	348,847	6825	123
S15-6	13,300	2757	305
S15-9	10,803	6013	301
S15-11	23,920	5177	202
S15-8	400,004	6243	202
S15-10	99,660	6359	201
S15-2	113,221	3147	142
S15-13	387,164	4725	141
S15-4	706000	4799	132
S15-16	5,000,000	3919	130

Tabela F.2 Zavisnost broja ciklusa opterećenja i zadate deformacije opterećenja za mešavine S-30 i S-45

Oznaka	Broj ciklusa opterećenja (-)	E_{100} (MPa)	$\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$)
S30-16	9,577	5683	303
S30-12	9,974	6221	302
S30-3	20,451	5537	302
S30-2	41,915	5905	203
S30-17	166,214	5336	203
S30-10	73,468	7658	202
S30-9	87,595	6633	201
S30-6	62,703	4093	141
S30-15	2,209,034	6470	140
S30-4	2,361,686	5716	140
S30-11	8,000,000	6972	135
S45-13	6,868	4717	304
S45-10	29,885	5075	303
S45-8	17,948	5002	302
S45-15	37,003	5066	203
S45-7	29,439	4124	203
S45-18	43,478	4914	202
S45-5	32,165	5785	202
S45-11	136,641	5550	200
S45-6	470,428	4271	131
S45-14	502,483	5036	128
S45-12	1,165,804	4596	126
S45-3	902,859	5276	126

Tabela F.3 Zavisnost broja ciklusa opterećenja i zadate deformacije opterećenja za mešavine K-15 i K-30

Oznaka	Broj ciklusa opterećenja (-)	E_{100} (MPa)	$\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$)
K15-7	10,151	4107	301
K15-15	5,009	3834	301
K15-17	21,508	3415	298
K15-16	18,239	4143	203
K15-14	204,159	4299	202
K15-4	76,612	4738	200
K15-5	2,799,558	5591	127
K15-2	869,437	5632	126
K15-1	275,245	4574	126
K15-9	645,276	5342	123
K30-15	6,174	4467	304
K30-13	7,016	3964	303
K30-11	18,622	4918	303
K30-8	28,483	4848	300
K30-16	63,430	5209	203
K30-6	206,268	5604	203
K30-14	43,008	4283	203
K30-12	269,895	4482	201
K30-3	878,274	5767	136
K30-4	1,035,957	5278	136
K30-5	2,000,000		135

Tabela F.4 Zavisnost broja ciklusa opterećenja i zadate deformacije opterećenja za mešavine K-45 i SK-15

Oznaka	Broj ciklusa opterećenja (-)	E_{100} (MPa)	$\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$)
K45-10	3,638	2487	308
K45-18	9,224	4247	304
K45-3	11,573	5148	303
K45-2	52,583	4763	203
K45-12	81,820	4723	203
K45-14	32,736	5282	202
K45-8	74,006	4899	126
K45-11	1,391,845	5771	126
K45-4	2,869,181	6476	125
SK15-15	24,015	4286	304
SK15-18	5,469	4651	303
SK15-9	28,892	5170	302
SK15-5	58,556	4203	204
SK15-2	78,567	5253	203
SK15-10	60,685	5022	202
SK15-11	2,823,138	6043	127
SK15-7	2,624,303	5842	127
SK15-1	7,000,000	5393	125

Tabela F.5 Zavisnost broja ciklusa opterećenja i zadate deformacije opterećenja za mešavine SK-30 i SK-45

Oznaka	Broj ciklusa opterećenja (-)	E_{100} (MPa)	$\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$)
SK30-16	24,000	4523	304
SK30-8	12,705	3629	303
SK30-11	37,075	4910	302
SK30-9	39,697	4293	208
SK30-18	165,111	6064	204
SK30-4	210,968	6719	201
SK30-15	2,920,163	5808	132
SK30-13	448,577	5093	132
SK30-6	453,907	6975	132
SK30-1	1603610	6347.0	131.5
SK30-3	2,452,732	7110	130
SK45-12	5,856	4440	327
SK45-14	18,868	5739	321
SK45-15	58,324	5702	302
SK45-5	43,982		302
SK45-16	186,276	6055	232
SK45-13	66,781	6227	232
SK45-17	304,619	6534	227
SK45-9	183,498	5760	177
SK45-8	347,591	6443	172
SK45-10	797,827	5759	163
SK45-7	1,357,318	6686	163
SK45-3	1,525,708	6504	162

BIOGRAFIJA

Aleksandar Radević, mast. inž. građ. je rođen 11.11.1986. godine u Novom Pazaru. Osnovnu školu "12. decembar" i gimnaziju "Jezdimir Lović" završio je u Sjenici.

Osnovne studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, završio je 16.10.2009. godine na Odseku za konstrukcije. Na istom fakultetu 27.08.2010. godine završio je master studije. Tokom školovanja na fakultetu kao demonstrator na predmetima Građevinski materijali 1 i Građevinski materijali 2 aktivno je učestvovao u pripremi i izvođenju vežbanja u periodu od septembra 2008. do septembra 2010. godine. Doktorske studije na Građevinskom fakultetu u Beogradu, na Odseku za konstrukcije, upisao je 2010. godine i položio sve ispite sa prosečnom ocenom 10.

Od 24. decembra 2010. godine, izabran je u zvanje asistenta – studenta doktorskih studija za užu naučnu oblast Građevinski materijali, tehnologija betona i ispitivanje konstrukcija, na Katedri za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu. Angažovan je prilikom izrade master radova studenata iz pomenutih predmeta. Nakon isteka prvog izbornog perioda, u zvanje asistenta - studenta doktorskih studija ponovo je izabran 20. decembra 2013. godine. Od 29. decembra 2016. godine izabran je u zvanje istraživač saradnik.

Kao autor i koautor do sada je publikovao 22 rada vezanih za širu problematiku građevinskih materijala i tehnologije betona u vrhunskim međunarodnim časopisima, časopisima od nacionalnog značaja, na domaćim i međunarodnim skupovima. Angažovan je na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod nazivom "Ispitivanje stanja i metoda unapređenja građevinskih konstrukcija sa aspekta upotrebljivosti, nosivosti, ekonomičnosti i održavanja".

U okviru Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a pre svega u okviru Instituta za materijale i konstrukcije, aktivno je učestvovao u obavljanju brojnih zadataka iz saradnje sa privredom. U dosadašnjoj praksi, imao je više od 20 stručnih radova, uglavnom iz oblasti ispitivanja građevinskih materijala, ispitivanja i sanacije konstrukcija, kao i tehnologije betona.

Kandidat se služi engleskim jezikom. Koristi kompjuterske programe od opšteg i stručnog značaja. Aleksandar Radević je oženjen i živi u Beogradu.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Александар Радевић

Број индекса 907/2010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Карактеристике асфалтних мешавина са агрегатом од рециклираног бетона

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 17.03.2017.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Александар Радевић

Број индекса 907/2010

Студијски програм Грађевинарство

Наслов рада Карактеристике асфалтних мешавина са агрегатом од рециклираног бетона

Ментор В. проф. др Горан Младеновић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 17.03.2017.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Карактеристике асфалтних мешавина са агрегатом од рециклираног

бетона

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 17.03.2017.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.