

Samozbijajući beton s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima

Bušić, Robert

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:599915>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-29**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Doktorska disertacija

SAMOBILAJUĆI BETON S RECIKLIRANOM GUMOM U KONSTRUKCIJSKIM ELEMENTIMA

Robert Bušić, mag.ing.aedif.

Osijek, 26. siječnja 2022. godine

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

SELF-COMPACTING RUBBERIZED CONCRETE IN STRUCTURAL MEMBERS

Robert Bušić, mag.ing.aedif.

Osijek, January 26, 2022

PROSUDBENA POVJERENSTVA I BIBLIOGRAFSKI PODACI

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije imenovano na 1. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 14. listopada 2020. godine:

1. *Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednik)*
2. *Doc.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., docentica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica)*
3. *Prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., redovita profesorica, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (članica)*

Tema, mentorica i komentorica doktorske disertacije prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 3. redovitoj sjednici održanoj 11. studenoga 2020. godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije imenovano na 2. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 10. studenoga 2021. godine:

1. *Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednik)*
2. *Izv.prof.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., izvanredna profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica i mentorica)*
3. *Prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., redovita profesorica u trajnom zvanju, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (članica)*

Doktorska disertacija prihvaćena je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 4. redovitoj sjednici održanoj 12. siječnja 2022. godine.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije imenovano na 4. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 12. siječnja 2022. godine:

1. *Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednik)*
2. *Izv.prof.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., izvanredna profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica i mentorica)*
3. *Prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., redovita profesorica u trajnom zvanju, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (članica)*
4. *Izv.prof.dr.sc. Davorin Penava, dipl.ing.građ., izvanredni profesor, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (zamjenski član)*

Doktorska disertacija javno je obranjena 26. siječnja 2022. godine na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorska disertacija sadržava 304 stranica, 217 ilustracija, 116 tablica, 18 priloga i 193 citirane publikacije.

Mentorica doktorske disertacije je izv.prof.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., izvanredna profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Komentorica doktorske disertacije je izv.prof.dr.sc. Tanja Kalman Šipoš, dipl.ing.građ., izvanredna profesorica, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Istraživanje u okviru doktorske disertacije pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je doktorska disertacija isključivo rezultat moga vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da nisam prijavio doktorsku disertaciju s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, 26. siječnja 2022. godine

Robert Bušić, mag.ing.aedif.

PREDGOVOR

Osnovni razlog poduzimanja istraživanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom utvrđivanje je utjecaja reciklirane gume kao zamjene dijela sitnog agregata na mehanička i termička svojstva, svojstva trajnosti, parametre mehanike loma i mikrostrukturu samozbijajućeg betona te doprinos razvoju ekološki prihvatljivog samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim gredama. Doktorska disertacija obuhvaća pregled stanja područja, preliminarna eksperimentalna ispitivanja, odabir optimalnih mješavina, ispitivanje parametara mehanike loma te provođenje eksperimentalnih ispitivanja optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala i na razini konstrukcijskih elemenata. Kao rezultat proučavanja postojeće literature, eksperimentalnog istraživanja i statističke obrade dobivenih rezultata, na kraju doktorske disertacije predstavljeni su zaključci i dane smjernice za daljnja istraživanja.

Ova doktorska disertacija izrađena je u sklopu uspostavnog istraživačkog projekta *Razvoj armiranobetonskih elemenata i sustava s otpadnim prahom automobilskih guma - ReCoTiP* (UIP-2017-05-7113) koji je financiran sredstvima Hrvatske zaklade za znanost.

Zahvaljujem svojoj mentorici, izv.prof.dr.sc. Ivani Miličević na nesebičnoj pomoći, nepresušnoj motivaciji, usmjeravanju te uloženom trudu i vremenu, čiji je doprinos mojem radu neprocjenjiv.

Zahvaljujem svojoj komentorici, izv.prof.dr.sc. Tanji Kalman Šipoš, članovima projekta „ReCoTiP“ i svim kolegama na savjetima i stručnoj pomoći tijekom mojeg znanstvenog rada.

Hvala mojoj obitelji i mojoj dragoj zaručnici Heleni na nemjerljivoj ljubavi, vjeri, podršci, strpljenju, savjetima i riječima ohrabrenja.

I na kraju, hvala dragom Bogu na mudrosti, strpljenju i upornosti.

SAŽETAK

U svijetu se godišnje proizvede približno jedna milijarda otpadnih guma. Navedeni se broj iz godine u godinu povećava, a samo se 2 % otpadnih guma kao reciklirani materijal koristi u građevinskom sektoru. Uključivanje otpadne gume u građevinsku industriju predstavlja ekološki prihvatljivo rješenje za zbrinjavanje otpadne gume koje promovira održivu gradnju i potiče koncept održive proizvodnje. Detaljnim pregledom literature utvrđene su prednosti korištenja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u odnosu na obični beton s recikliranom gumom te je zaključeno da postojeća znanstvena istraživanja u najvećoj mjeri obuhvaćaju ispitivanja mehaničkih svojstava betona s gumom. Istraživanja termičkih svojstava, svojstava trajnosti te konstrukcijskih elemenata izrađenih od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom nisu značajno zastupljena u dostupnoj literaturi, što predstavlja potencijal za buduća eksperimentalna istraživanja.

Glavni cilj ovog istraživanja bio je utvrditi utjecaj reciklirane gume na mehanička i termička svojstva, svojstva trajnosti, parametre mehanike loma i mikrostrukturu samozbijajućeg betona te dokazati mogućnost primjene reciklirane gume u nosivim armiranobetonskim gredama zadovoljavajuće mehaničke otpornosti i stabilnosti te poboljšanih svojstava trajnosti. Kako bi se postigao zadani cilj, u prvom koraku provedena su preliminarne eksperimentalna ispitivanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom s ciljem definiranja optimalnog sastava betonske mješavine, materijala koji će reciklirana guma zamijeniti, udjela reciklirane gume u sastavu betonske mješavine te potrebi prethodnoga tretiranja reciklirane gume. U idućem koraku, s ciljem odabira optimalnih mješavina, izrađena je 21 mješavina samozbijajućeg betona s različitim postotnim udjelima reciklirane gume kao djelomične zamjene sitnoga agregata i silicijske prašine kao djelomične zamjene cementu te su provedena ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Provedena su i dodatna eksperimentalna istraživanja ponašanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom pri lomu promatranjem osnovnih parametara mehanike loma. Nakon toga provedena su eksperimentalna ispitivanja odabranih optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala i na razini konstrukcijskih elemenata. Na razini materijala dodatno su ispitana svojstva trajnosti i termička svojstva optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom te struktura i veza na sučelju cementnog kamena i prirodnog agregata, tj. reciklirane gume pomoću pretražnoga elektronskog mikroskopa. Na razini konstrukcijskih elemenata ispitano je 12 greda, po tri od svake odabrane betonske mješavine.

Na temelju eksperimentalnih rezultata dokazano je da se postotni udjeli reciklirane gume od 10 i 15 % mogu koristiti u nosivim armiranobetonskim elementima bez dodatnih ograničenja vezanih uz svojstva trajnosti, termička svojstva i svojstva mehanike loma. Nadalje, dokazano je da reciklirana guma doprinosi poboljšanju svojstava trajnosti armiranobetonskih greda te da je nosivost armiranobetonskih greda s recikliranom gumom slična ili jednaka nosivosti armiranobetonskih greda bez reciklirane gume.

Ključne riječi: samozbijajući beton, reciklirana guma, svojstva u svježem i očvrslom stanju, mehanička svojstva, svojstva trajnosti, termička svojstva, mehanika loma, armiranobetonske grede

ABSTRACT

Approximately 1 billion waste tires are produced annually worldwide. This number is increasing from year to year and only 2 % of waste tires are used as recycled material in the construction sector. The inclusion of waste rubber in the construction industry is an environmentally friendly solution for the disposal of waste rubber which promotes sustainable construction and encourages the concept of sustainable production. With detailed literature overview, the advantages of using self-compacting concrete with recycled rubber over ordinary concrete with recycled rubber were identified and conclusion was made that existing scientific research in the majority includes investigation of the mechanical properties of concrete with rubber. Investigations of thermal properties, durability properties and structural elements made of self-compacting concrete with recycled rubber are quite unrepresented in the available literature, which represents the potential for future experimental research.

The main goal of this research was to determine the influence of recycled rubber on mechanical, thermal and durability properties, fracture mechanics parameters and microstructure of self-compacting concrete and to prove the possibility of using recycled rubber in load-bearing reinforced concrete beams with satisfactory mechanical resistance and stability and improved durability properties. To achieve the set goal, several steps have been taken. In the first step, preliminary experimental testing of self-compacting concrete with recycled rubber was performed to define the optimal composition of the self-compacting concrete mixture, the replaced material, the proportion of recycled rubber in the self-compacting concrete mixture and the need for pre-treatment of recycled rubber.

In the next step, in order to select the optimal mixtures, 21 mixtures of self-compacting concrete with different percentages of recycled rubber as partial replacement of fine aggregate and silica fume as a partial replacement of cement were made and investigation of the self-compacting concrete fresh and hardened state properties were performed. Additional experimental investigation of the fracture behavior of self-compacting concrete with recycled rubber was performed by observing the basic parameters of fracture mechanics. In final two steps, experimental tests of selected optimal mixtures of self-compacting concrete with recycled rubber at the level of material and at the level of structural elements were then performed. At the level of material, the durability and thermal properties of optimal self-compacting rubberized concrete mixtures were examined. Additionally, bond between cement paste and natural aggregate, i.e. recycled rubber was examined with scanning electron microscope. At the level of structural elements, 12 beams were tested, three from each selected concrete mix.

Based on experimental results, it has been proven that the percentages of recycled rubber of 10 % and 15 % can be used in load-bearing reinforced concrete elements without additional restrictions related to durability, thermal and fracture properties. Furthermore, it has been proven that recycled rubber contributes to improving the durability properties of reinforced concrete beams and that the load-bearing capacity of reinforced concrete beams with recycled rubber is similar or equal to the load-bearing capacity of reinforced concrete beams without recycled rubber.

Key words: self-compacting concrete, recycled rubber, fresh and hardened properties, mechanical properties, durability properties, thermal properties, fracture mechanics, reinforced concrete beams

SADRŽAJ

PREDGOVOR	I
SAŽETAK	III
ABSTRACT	IV
SADRŽAJ	VI
POPIS ILUSTRACIJA	XII
POPIS TABLICA	XX
POPIS KRATICA I SIMBOLA	XXVI
1 UVOD I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	1
1.1 OBRAZLOŽENJE TEME	1
1.2 METODOLOGIJA RADA	1
1.3 OČEKIVANI ZNANSTVENI DOPRINOS	3
2 PREGLED STANJA PODRUČJA	4
2.1 OTPADNA AUTOMOBILSKA GUMA I RECIKLIRANA GUMA	4
2.1.1 <i>Općenito</i>	4
2.1.2 <i>Proizvodnja i klasifikacija reciklirane gume kao agregata</i>	7
2.1.2.1 <i>Proizvodnja reciklirane gume kao agregata</i>	7
2.1.2.2 <i>Klasifikacija reciklirane gume kao agregata</i>	7
2.2 SAMOZBIJAJUĆI BETON	8
2.2.1 <i>Općenito</i>	8
2.2.2 <i>Projektiranje sastava i postupak miješanja samozbijajućeg betona</i>	9
2.3 UPOTREBA RECIKLIRANE GUME U SAMOZBIJAJUĆEM BETONU: DOSADAŠNJE SPOZNAJE I TRENUTNA PRIMJENA	12
2.3.1 <i>Općenito</i>	12
2.3.2 <i>Utjecaj reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju</i>	15
2.3.2.1 <i>Sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilaženja zapreka, otpornost na segregaciju.</i>	15
2.3.2.2 <i>Poroznost samozbijajućeg betona s gumom</i>	19
2.3.2.3 <i>Reologija samozbijajućeg betona s gumom</i>	20
2.3.3 <i>Utjecaj reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju</i>	20
2.3.3.1 <i>Gustoća u očvrslom stanju</i>	20
2.3.3.2 <i>Tlačna čvrstoća</i>	21
2.3.3.3 <i>Čvrstoća na savijanje</i>	24
2.3.3.4 <i>Vlačna čvrstoća cijepanjem</i>	25
2.3.3.5 <i>Statički i dinamički modul elastičnosti</i>	26

2.3.3.6	Otpornost na udar	27
2.3.3.7	Duktilnost i krtost.....	29
2.3.3.8	Vodoupojnost / Upijanje vode.....	31
2.3.3.9	Skupljanje.....	32
2.3.3.10	Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	34
2.3.3.11	Vodonepropusnost.....	37
2.3.3.12	Plinopropusnost.....	38
2.3.3.13	Otpornost na požar i visoke temperature	39
2.3.3.14	Otpornost na koroziju, abraziju i kiseline.....	41
2.3.3.15	Otpornost na karbonatizaciju.....	43
2.3.3.16	Otpornost na difuziju klorida	44
2.3.3.17	Ponašanje pri zamoru materijala	45
2.3.3.18	Toplinska vodljivost.....	46
2.3.3.19	Veza između armature i betona	47
2.3.3.20	Prigušenje, disipacija energije, nosivost, deformabilnost i krutost na savijanje.....	48
2.3.4	<i>Utjecaj reciklirane gume na parametre mehanike loma samozbijajućeg betona</i>	<i>51</i>
2.3.5	<i>Nosivi armiranobetonski elementi – grede od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom</i>	<i>54</i>
2.3.6	<i>Mikrostruktura samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i prethodno tretiranje gume</i>	<i>55</i>
2.3.7	<i>Optimalna veličina zrna i optimalni postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranom gumom</i>	<i>55</i>
2.4	SILICIJSKA PRAŠINA KAO DJELOMIČNA ZAMJENA CEMENTA U SAMOZBIJAJUĆEM BETONU S RECIKLIRANOM GUMOM.....	57
2.5	TREUTNA PRIMJENA BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM U KONSTRUKCIJAMA	58
2.6	ZAKLJUČCI O PREGLEDU STANJA PODRUČJA.....	58
3	PRELIMINARNA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM.....	65
3.1	CILJ ISPITIVANJA	65
3.2	MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA.....	65
3.2.1	<i>Materijali</i>	<i>65</i>
3.2.2	<i>Metode ispitivanja</i>	<i>67</i>
3.2.3	<i>Projektiranje sastava betonskih mješavina.....</i>	<i>68</i>
3.2.4	<i>Priprema i ugradnja betona</i>	<i>71</i>
3.3	EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA.....	71
3.3.1	<i>Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja</i>	<i>71</i>
3.3.1.1	<i>Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju</i>	<i>71</i>
3.3.1.2	<i>Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju.....</i>	<i>72</i>
3.3.2	<i>Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja</i>	<i>73</i>
3.3.2.1	<i>Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju</i>	<i>73</i>
3.3.2.2	<i>Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju.....</i>	<i>74</i>
3.3.3	<i>Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja</i>	<i>75</i>

3.3.3.1	Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju	75
3.3.3.2	Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju.....	76
3.4	ZAKLJUČCI O ISPITIVANJU	76
4	ODABIR OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM	78
4.1	CILJ ISPITIVANJA	78
4.2	MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA.....	79
4.2.1	Materijali	79
4.2.2	Metode ispitivanja	80
4.2.3	Projektiranje sastava betonskih mješavina.....	82
4.2.4	Priprema i njega uzoraka	83
4.3	EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA.....	84
4.3.1	Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju.....	84
4.3.1.1	Sposobnost tečenja	86
4.3.1.2	Viskoznost.....	86
4.3.1.3	J-prsten i L-kutija	87
4.3.1.4	Otpornost segregaciji.....	87
4.3.2	Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju.....	88
4.3.2.1	Gustoća.....	91
4.3.2.2	Tlačna čvrstoća.....	91
4.3.2.3	Statički modul elastičnosti.....	92
4.3.2.4	Čvrstoća na savijanje.....	92
4.4	MODELIRANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA	93
4.4.1.1	Regresijski modeli	95
4.4.1.2	Odabrani regresijski modeli i inženjerska primjena	96
4.4.1.3	Verifikacija modela	99
4.5	ZAKLJUČCI O ISPITIVANJU	105
5	PARAMETRI MEHANIKE LOMA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM	107
5.1	CILJ ISPITIVANJA	107
5.2	MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA.....	109
5.2.1	Materijali i sastav betonskih mješavina.....	109
5.2.2	Priprema i njega uzoraka	110
5.2.3	Postav za ispitivanje i postupak ispitivanja	113
5.3	EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA.....	118
5.3.1	Jednadžbe za procjenu vrijednosti modula elastičnosti.....	118
5.3.2	Odnos P_H -CMOD i P_H -CTOD	120
5.3.3	Inicijalna sila loma ($P_{H,ini}$).....	126
5.3.4	Rezidualna horizontalna sila ($P_{H,residual}$)	127

5.3.5	Energija loma (G_F)	129
5.3.6	Žilavost loma (K_{Ic})	131
5.3.7	Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV)	134
5.4	ZAKLJUČCI O ISPITIVANJU	136
6	EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM NA RAZINI MATERIJALA	138
6.1	CILJ ISPITIVANJA	138
6.2	MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA.....	138
6.2.1	Materijali	138
6.2.2	Projektiranje sastava betonskih mješavina.....	139
6.2.3	Metode ispitivanja, priprema i njega uzoraka	139
6.2.3.1	Plinopropusnost.....	139
6.2.3.2	Vodonepropusnost.....	141
6.2.3.3	Skupljanje.....	142
6.2.3.4	Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	143
6.2.3.5	Otpornost na izlaganje visokim temperaturama	145
6.2.3.6	Toplinska vodljivost.....	149
6.3	EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA.....	150
6.3.1	Plinopropusnost.....	150
6.3.2	Vodonepropusnost	151
6.3.3	Skupljanje	153
6.3.4	Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.....	159
6.3.5	Otpornost na izlaganje visokim temperaturama	161
6.3.6	Toplinska vodljivost.....	194
6.3.7	Struktura očvrstnuloa samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i veza na sučelju cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata (SEM)	197
6.3.7.1	SEM analiza	197
6.3.7.2	EDS analiza.....	205
6.4	ZAKLJUČCI O ISPITIVANJU	208
7	EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM NA RAZINI KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA	213
7.1	UVOD I CILJ ISPITIVANJA	213
7.2	POSTUPAK IZRADE ARMIRANOBETONSKIH GREDA.....	213
7.2.1	Materijali i projektiranje sastava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom	213
7.2.2	Postupak izrade armiranobetonskih greda.....	215
7.2.3	Postupak ispitivanja uzoraka armiranobetonskih greda	218
7.3	REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA ARMIRANOBETONSKIH GREDA I DISKUSIJA.....	220
7.3.1	Rezultati eksperimentalnog ispitivanja greda – općenito	220
7.3.2	Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-OCR-OSLF	224

7.3.2.1	Način sloma i razvoj pukotina.....	224
7.3.2.2	Nosivost, krutost i duktilnost.....	227
7.3.3	<i>Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-10CR-0SLF</i>	230
7.3.3.1	Način sloma i razvoj pukotina.....	230
7.3.3.2	Nosivost, krutost i duktilnost.....	234
7.3.4	<i>Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-15CR-5SLF</i>	237
7.3.4.1	Način sloma i razvoj pukotina.....	237
7.3.4.2	Nosivost, krutost i duktilnost.....	240
7.3.5	<i>Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-R</i>	244
7.3.5.1	Način sloma i razvoj pukotina.....	244
7.3.5.2	Nosivost, krutost i duktilnost.....	247
7.3.6	<i>Usporedba rezultata eksperimentalnih ispitivanja serija AB greda (diskusija)</i>	251
7.3.6.1	Način sloma i razvoj pukotina.....	251
7.3.6.2	Nosivost, krutost i duktilnost.....	254
7.3.7	<i>Usporedba eksperimentalnih rezultata ispitivanja armiranobetonskih greda s analitičkim izrazima danim u normi HRN EN 1992-1-1:2013 (EC2)</i>	258
7.3.7.1	Odnos „sila – progib na sredini grede“.....	258
7.3.7.2	Moment pri pojavi prve pukotine (M_{cr}).....	262
7.4	ZAKLJUČCI O ISPITIVANJU	263
8	ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA	265
8.1	IZVORNI ZNANSTVENI DOPRINOS.....	270
8.2	SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA	270
PRILOZI		271
BIBLIOGRAFIJA		291
CURRICULUM VITAE		304

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 2.1 Pregled stanja područja – zastupljenost istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svijetu (https://www.amcharts.com/visited_countries/)	5
Slika 2.2 Pregled stanja područja – zastupljenost istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u Europi (https://www.amcharts.com/visited_countries/)	5
Slika 2.3 Prikaz proizvodnje i kategorija uporabe guma na kraju životnog vijeka u svijetu [12]	6
Slika 2.4 Kategorizacija agregata otpadne gume: (a) usitnjena guma, (b) gumeni granulat, (c) gumeni prah, (d) gumena vlakna [21]	8
Slika 2.5 Usporedba udjela materijala u sastavu betonske mješavine samozbijajućeg i običnog betona (volumenski odnosi) [25]	10
Slika 2.6 Grafički prikaz vrijednosti svjetske proizvodnje mineralnih sirovina u 1998. godini [35] ...	13
Slika 2.7 Utjecaj zamijenjenog materijala (sitni ili krupni agregat), udjela gume i vrste gume na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona [53]	22
Slika 2.8 Otpornost samozbijajućeg betona s gumom na udar prilikom ispitivanja metodom padajućeg utega [44]	28
Slika 2.9 Odnos između karakteristične duljine (l_{ch}) i postotka zamjene sitne frakcije s gumom [59].	30
Slika 2.10 Utjecaj vodopraškastog omjera (v/p) i postotka zamjene prirodnog sitnog agregata gumenim agregatom na svojstvo upijanja vode samozbijajućih mortova [46]	32
Slika 2.11 Utjecaj gumenog agregata na skupljanje [60]	33
Slika 2.12 Vodonepropusnost betona s gumom [80]	38
Slika 2.13 Utjecaj zamjene prirodnog agregata s gumom na plinopropusnost [70]	39
Slika 2.14 Odnos između gubitka mase i temperature kod betona s gumom [86]	40
Slika 2.15 Gubitak mase uzoraka samozbijajućeg betona s gumom nakon pet ciklusa sušenja i natapanja u sulfatu [60]	42
Slika 2.16 Dubina karbonatizacije različitih mješavina betona s gumom [74]	43
Slika 2.17 Odnos između broja ciklusa pri slomu uzorka (N) i razini naprezanja (S) kod betona s gumom [94]	45
Slika 2.18 Utjecaj gume na toplinsku vodljivost samozbijajućeg betona [54]	46
Slika 2.19 Odnos između čvrstoće veze i postotka zamjene prirodnog agregata s gumom [8]	47
Slika 2.20 Čvrstoća veze – prikaz ispitnog uzorka [59]	48
Slika 2.21 Utjecaj zamjene prirodnog agregata gumenim agregatom na koeficijent prigušenja [61] ..	49
Slika 2.22 Utjecaj postotka zamjene prirodnog agregata s gumom na (a) kapacitet nosivosti F_{max} i (b) deformabilnost $\delta_{F_{max}}$ [45]	50
Slika 2.23 Distribucija udjela zamjene sitnog agregata (% volumena) – (uključuje 30 referenci samozbijajućeg betona s gumom)	57

Slika 2.24 Grafički prikaz pregledom stanja područja obuhvaćenih svojstava običnog i samozbijajućeg betona s gumom u svježem i očvrslom stanju.....	59
Slika 3.1 Granulometrijski sastav prirodnog agregata i reciklirane gume	67
Slika 4.1 Korišteni materijali: (a) reciklirana guma, (b) silicijska prašina	80
Slika 4.2 Ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju: (a) sposobnost tečenja i viskoznost (ispitivanje rasprostiranja slijeganjem), (b) sposobnost zaobilaženja zapreka (J-prsten i L-kutija), (c) otpornost segregaciji (ispitivanje segregacije sijanjem).....	80
Slika 4.3 Ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju: (a) tlačna čvrstoća, (b) vlačna čvrstoća savijanjem, (c) modul elastičnosti	81
Slika 4.4 Miješalica kapaciteta 50 litara	83
Slika 4.5 Njega uzoraka	83
Slika 4.6 Grafički prikaz rezultata ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju: (a) sposobnost tečenja, (b) viskoznost, (c) i (d) sposobnost zaobilaženja zapreka (J-prsten i L-kutija)	84
Slika 4.7 Utjecaj reciklirane gume i silicijske prašine na rezultate ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju (starost 28 dana): (a) gustoća, (b) tlačna čvrstoća, (c) modul elastičnosti, (d) čvrstoća na savijanje.....	90
Slika 4.8 Odabrani regresijski model za procjenu tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona ($f_c = 43,09240 - 1,07104 \times cr + 1,72105 \times slf - 0,04515 \times cr \times slf$).....	98
Slika 4.9 Odabrani regresijski model za procjenu modula elastičnosti samozbijajućeg betona ($E = 39,7295 - 0,836401 \times cr + 0,000473885 \times \exp(slif)$)	98
Slika 4.10 Odabrani regresijski model za procjenu čvrstoće na savijanje samozbijajućeg betona ($f_b = 6,489658 - 0,123341 \times cr + 0,070092 \times slf - 0,003003 \times cr \times slf$).....	98
Slika 4.11 Koeficijent konverzije ($1 / 1,818 = 0,55$).....	100
Slika 4.12 Grafički prikaz verifikacije odabranih regresijskih modela.....	104
Slika 5.1 Geometrija uzorka: (a) uzorci kocki s usječenim prostorom za smještaj mehaničkih dijelova za prijenos sile i inicijalnim zarezom, (b) mjerenje duljine inicijalne pukotine (inicijalnog zareza) na dvije suprotne strane uzorka, (c) mjerenje visine uzorka na četiri ruba uzorka	111
Slika 5.2 Geometrija uzoraka i postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma metodom cijepanja klinom.....	111
Slika 5.3 Postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma pomoću LVDT-a	113
Slika 5.4 Postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma 3D DIC metodom: (a) Aramis, (b) pripremljena površina uzorka pomoću spreja crne boje, (c) računalo visokih performansi korišteno za obradu prikupljenih podataka	114
Slika 5.5 Određivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak.....	115
Slika 5.6 Grafička metoda određivanja $P_{H,ini}$ pomoću krivulje $P_H - CMOD$: (a) $\Delta CMOD = 5 \mu m$ [170]; (b) $\Delta CMOD = 0.15 \times CMOD_c$ [169], [170]; (c) $\Delta CMOD = 2 \mu m$	117

Slika 5.7 Eksperimentalna metoda određivanja $P_{H,ini}$: (a) optički mjerni sustav Aramis, (b) eksperimentalna krivulja P_H – mjerac pomaka dobivena pomoću optičkog mjernog sustava Aramis	118
Slika 5.8 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti	120
Slika 5.9 Mješavina SCC-0CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	121
Slika 5.10 Mješavina SCC-0CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	121
Slika 5.11 Mješavina SCC-5CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	121
Slika 5.12 Mješavina SCC-5CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	122
Slika 5.13 Mješavina SCC-10CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	122
Slika 5.14 Mješavina SCC-10CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	122
Slika 5.15 Mješavina SCC-15CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	123
Slika 5.16 Mješavina SCC-15CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	123
Slika 5.17 Mješavina SCC-20CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	123
Slika 5.18 Mješavina SCC-20CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	124
Slika 5.19 Mješavina SCC-25CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	124
Slika 5.20 Mješavina SCC-25CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	124
Slika 5.21 Mješavina SCC-30CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	125
Slika 5.22 Mješavina SCC-30CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD	125
Slika 5.23 Odnos između rezidualne horizontalne sile ($P_{H,residual}$) i definiranih maksimalnih vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja (CMOD).....	127
Slika 5.24 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 0,5 mm	130
Slika 5.25 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 1 mm	130
Slika 5.26 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 1,3 mm	130
Slika 5.27 Inicijalna žilavost loma ($K_{IC,ini}$ (a)) ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona: grafička metoda određivanja inicijalne horizontalne sile loma - metoda (a).....	133
Slika 5.28 Inicijalna žilavost loma ($K_{IC,ini}$ (b)) ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona: eksperimentalna metoda određivanja inicijalne horizontalne sile loma - metoda (b).....	133
Slika 5.29 Nestabilna žilavost loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona	133
Slika 5.30 Korelacija između $K_{IC,ini}$ (a) i UPV	135
Slika 5.31 Korelacija između $K_{IC,ini}$ (b) i UPV	135
Slika 5.32 Korelacija između $K_{IC,un}$ i UPV	135
Tablica 6.1 Sastav optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom	139
Slika 6.2 Ispitivanje plinopropusnosti: (a) uređaj za ispitivanje plinopropusnosti betonskih uzoraka, (b) shema i princip rada uređaja za ispitivanje plinopropusnosti [173], [174]	140
Slika 6.3 Ispitivanje vodonepropusnosti betonskih uzoraka: (a) uređaj za mjerenje tip Controls 55-C0246/6; (b) cijepanje betonskih uzoraka	141
Slika 6.4 Mjerne točke na liniji paralelnoj s glavnom osi.....	142

Slika 6.5 Ispitivanje skupljanja betona: (a) slobodno deformiranje betonskih uzoraka u komori; (b) mjerenje skupljanja betonskih uzoraka pomoću deformetra.....	142
Slika 6.6 Betonski uzorci pripremljeni za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	143
Slika 6.7 Mjesto piljenja betonske kocke u svrhu izrade betonskog uzorka za potrebe ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [179]	144
Slika 6.8 Shema pripreme betonskog uzorka [179]	145
Slika 6.9 Grafički prikaz promjene temperature na površini uzorka u jednom 24-satnom ciklusu (u skladu s normom HRN CEN/TS 12390-9:2016)	145
Slika 6.10 Cilindrični betonski uzorci u svježem stanju (a) i očvrslom stanju (b)	146
Slika 6.11 Njega betonskih uzoraka u vodi i sušenje betonskih uzoraka u sušioniku	146
Slika 6.12 Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka	147
Slika 6.13 Električna peć korištena za ispitivanje otpornosti betonskih uzoraka valjaka na visoke temperature	148
Slika 6.14 Režim zagrijavanja uzoraka.....	148
Slika 6.15 Ispitivanje toplinske vodljivosti: (a) uređaj za ispitivanje toplinske vodljivosti, (b) postavljanje vanjskih termoparova na betonski uzorak	149
Slika 6.16 Betonski uzorci na kojima je ispitana toplinska vodljivost	150
Slika 6.17 Srednje vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti K (m^2).....	151
Slika 6.18 Prosječna vrijednost dubine prodiranja vode	152
Slika 6.19 Ispitivanje vodonepropusnosti betonskih uzoraka - cijepanje betonskih uzoraka i određivanje dubine prodora vode u milimetrima: (a) SCC-0CR-0SLF; (b) SCC-10CR-0SLF; (c) SCC-15CR-5SLF	153
Slika 6.20 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF	155
Slika 6.21 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-10CR-0SLF	156
Slika 6.22 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-15CR-5SLF	156
Slika 6.23 Skupljanje betona: promjena koeficijenta varijacije u odnosu na starost uzoraka.....	157
Slika 6.24 Ukupne deformacije nastale skupljanjem betonskih uzoraka	158
Slika 6.25 Grafički prikaz povećanja srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala (kg/m^2) nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	160
Slika 6.26 Primjer tijeka sušenja - uzorci betonska mješavine SCC-15CR-5SLF	161
Slika 6.27 Pojava pukotina na dnu uzoraka referentne betonske mješavine ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $600\text{ }^{\circ}\text{C}$)	163
Slika 6.28 Pojava pukotina po cijeloj visini uzorka referentne betonske mješavine ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$)	163
Slika 6.29 Promjena boje ispitanih betonskih uzoraka	164

Slika 6.30 Promjena boje uzoraka referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF	164
Slika 6.31 Promjena boje uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0SLF	165
Slika 6.32 Promjena boje uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF	165
Slika 6.33 Prosječno smanjenje masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ..	169
Slika 6.34 Prosječna preostala masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama	169
Slika 6.35 Mjerenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa na betonskim uzorcima valjaka	170
Slika 6.36 Grafički prikaz prosječne preostale brzine prolaska ultrazvučnog impulsa nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama	174
Slika 6.37 Ispitivanje mehaničkih svojstava betonskih uzoraka: (a) tlačna čvrstoća i odnos <i>naprezanje-deformacija</i> (LVDT-i); (b) modul elastičnosti (ekstenzometri).....	176
Slika 6.38 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	180
Slika 6.39 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti referentne mješavine pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	181
Slika 6.40 Normalizirane vrijednosti tlačnih čvrstoća u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	181
Slika 6.41 Normalizirane vrijednosti tlačnih čvrstoća u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće referentne mješavine pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	181
Slika 6.42 Vrijednosti deformacija pri maksimalnom naprezanju pri različitim temperaturama	182
Slika 6.43 Normalizirane vrijednosti deformacije pri maksimalnom naprezanju u odnosu na vrijednost deformacije pri maksimalnom naprezanju pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	182
Slika 6.44 Normalizirane vrijednosti deformacije pri maksimalnom naprezanju u odnosu na vrijednost deformacije pri maksimalnom naprezanju referentne mješavine pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	182
Slika 6.45 Odnos <i>naprezanje-deformacija</i> uzoraka koji nisu izloženi visokim temperaturama.....	183
Slika 6.46 Odnos <i>naprezanje-deformacija</i> uzoraka izloženih visokoj temperaturi od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$	183
Slika 6.47 Odnos <i>naprezanje-deformacija</i> uzoraka izloženih visokoj temperaturi od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	184
Slika 6.48 Odnos <i>naprezanje-deformacija</i> uzoraka izloženih visokoj temperaturi od $600\text{ }^{\circ}\text{C}$	184
Slika 6.49 Odnos <i>naprezanje-deformacija</i> uzoraka izloženih visokoj temperaturi od $800\text{ }^{\circ}\text{C}$	185
Slika 6.50 Načini sloma betonskih uzoraka	189
Slika 6.51 Prikaz eksplozivnog odlamanja prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF	190
Slika 6.52 Usporedba eksperimentalnih vrijednosti omjera preostale tlačne čvrstoće i tlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi ($f_{c,\theta} / f_{c,20}$) kao funkcije temperature betona s modelima za vapnenačke i silicijske agregate danim u normi HRN EN 1992-1-2:2013	191
Slika 6.53 Odnos između brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i modula elastičnosti za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF	192

Slika 6.54 Odnos između brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i tlačne čvrstoće za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF	193
Slika 6.55 Odnos između tlačne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF	193
Slika 6.56 Srednje vrijednosti toplinske vodljivosti λ (W/mK)	194
Slika 6.57 Princip izrade uzoraka za ispitivanje mikrostrukture betona i sučeljka reciklirana guma-cementna pasta na uzorcima izloženim visokim temperaturama (0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C)	198
Slika 6.58 Pretražni elektronski mikroskop <i>JEOL SEM JSM-IT200</i>	199
Slika 6.59 Uređaj za prethodnu pripremu uzoraka <i>AGAR manual sputter coater B7340</i> i prethodno mjerenje visine uzoraka	199
Slika 6.60 Mikrograf - Uzorak 1 (SCC-0CR-0SLF-0).....	200
Slika 6.61 Mikrograf - Uzorak 2 (SCC-10CR-0SLF-0).....	200
Slika 6.62 Mikrograf - Uzorak 3 (SCC-15CR-5SLF-0).....	200
Slika 6.63 Mikrograf - Uzorak 4 (SCC-0CR-0SLF-200)	200
Slika 6.64 Mikrograf - Uzorak 5 (SCC-10CR-0SLF-200).....	200
Slika 6.65 Mikrograf - Uzorak 6 (SCC-15CR-5SLF-200).....	200
Slika 6.66 Mikrograf - Uzorak 7 (SCC-0CR-0SLF-400)	201
Slika 6.67 Mikrograf - Uzorak 8 (SCC-10CR-0SLF-400).....	201
Slika 6.68 Mikrograf - Uzorak 9 (SCC-15CR-5SLF-400).....	201
Slika 6.69 Mikrograf - Uzorak 10 (SCC-0CR-0SLF-600).....	201
Slika 6.70 Mikrograf - Uzorak 11 (SCC-10CR-0SLF-600).....	201
Slika 6.71 Mikrograf - Uzorak 12 (SCC-15CR-5SLF-600).....	201
Slika 6.72 Mikrograf - Uzorak 13 (SCC-0CR-0SLF-800).....	202
Slika 6.73 Mikrograf - Uzorak 14 (SCC-10CR-0SLF-800).....	202
Slika 6.74 Mikrograf - Uzorak 15 (SCC-15CR-5SLF-800).....	202
Slika 6.75 Mikrograf - Uzorak 16 (SCC-0CR-0SLF-G).....	202
Slika 6.76 Mikrograf - Uzorak 17 (SCC-10CR-0SLF-G).....	202
Slika 6.77 Mikrograf - Uzorak 18 (SCC-15CR-5SLF-G).....	202
Slika 6.78 Pojava mikropukotina: (a) uzorak 10 (SCC-0CR-0SLF-600); (b) uzorak 13 (SCC-0CR-0SLF-800)	204
Slika 6.79 SEM slike reciklirane gume različitih frakcija pri povećanju od (a) 33x i (b) 100x	205
Slika 7.1 Samohodni utovarni mikser za pripremu betona CARMIX	216
Slika 7.2 Prikaz oplata za AB grede	216
Slika 7.3 Prikaz armature za AB grede	216
Slika 7.4 Tečenje betona pod djelovanjem vlastite težine	216

Slika 7.5 AB grede - armaturni nacrti i specifikacija količina armaturnih šipki – dvodimenzionalni prikaz	217
Slika 7.6 AB grede - armaturni nacrti i specifikacija količina armaturnih šipki – trodimenzionalni prikaz	217
Slika 7.7 Statički sustav za eksperimentalno ispitivanje armiranobetonskih greda	218
Slika 7.8 Laboratorijsko ispitivanje AB greda pomoću univerzalnog uređaja za vlačno-tlačno ispitivanje materijala i elemenata	219
Slika 7.9 Plan-pozicija mjernih uređaja na gredama	219
Slika 7.10 Karakteristični dijagram sila-progib AB greda	222
Slika 7.11 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G1	224
Slika 7.12 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G2	224
Slika 7.13 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G3	225
Slika 7.14 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G1: (a) slom armature u vlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni	225
Slika 7.15 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G2	225
Slika 7.16 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G3	226
Slika 7.17 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	227
Slika 7.18 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	228
Slika 7.19 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	228
Slika 7.20 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	229
Slika 7.21 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	229
Slika 7.22 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	230
Slika 7.23 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G1	231
Slika 7.24 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G2	231
Slika 7.25 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G3	232
Slika 7.26 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G1	232
Slika 7.27 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G2	232
Slika 7.28 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G3	233
Slika 7.29 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	234
Slika 7.30 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	234
Slika 7.31 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	235
Slika 7.32 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	235
Slika 7.33 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	236
Slika 7.34 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede	236
Slika 7.35 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G1	237
Slika 7.36 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G2	238
Slika 7.37 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G3	238

Slika 7.38 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G1.....	239
Slika 7.39 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G2.....	239
Slika 7.40 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G3.....	239
Slika 7.41 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	241
Slika 7.42 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	241
Slika 7.43 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	242
Slika 7.44 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	242
Slika 7.45 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	243
Slika 7.46 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	243
Slika 7.47 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G1.....	244
Slika 7.48 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G2.....	245
Slika 7.49 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G3.....	245
Slika 7.50 Detalji sloma grede SCC-R-G1: (a) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni.....	246
Slika 7.51 Detalji sloma grede SCC-R-G2: (a) slom betona u tlačnoj zoni; (b) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni.....	246
Slika 7.52 Detalj sloma grede SCC-R-G3: (a) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni.....	246
Slika 7.53 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	248
Slika 7.54 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	248
Slika 7.55 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	249
Slika 7.56 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	249
Slika 7.57 Grafički odnos <i>sila-progib</i> cikličkog odgovora armiranobetonske grede	250
Slika 7.58 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede.....	250
Slika 7.59 Usporedba vrijednosti sila pri pojavi prve pukotine (F_c).....	252
Slika 7.60 Usporedba vrijednosti progiba pri pojavi prve pukotine (d_c).....	252
Slika 7.61 Usporedba vrijednosti sila pri pojavi popuštanja armature (d_y).....	255
Slika 7.62 Usporedba vrijednosti progiba pri pojavi popuštanja armature (d_y)	255
Slika 7.63 Usporedba vrijednosti maksimalnih sila (F_u).....	256
Slika 7.64 Usporedba vrijednosti progiba pri maksimalnoj sili (d_u)	256
Slika 7.65 Duktilnost uzoraka ispitanih serija armiranobetonskih greda (d_u / d_y).....	257
Slika 7.66 Grafički odnos <i>sila-progib</i> za uzorke greda iz serije SCC-0CR-0SLF.....	260
Slika 7.67 Grafički odnos <i>sila-progib</i> za uzorke greda iz serije SCC-10CR-0SLF.....	260
Slika 7.68 Grafički odnos <i>sila-progib</i> za uzorke greda iz serije SCC-15CR-5SLF.....	261
Slika 7.69 Grafički odnos <i>sila-progib</i> za uzorke greda iz serije SCC-R.....	261
Slika 8.1 Metodologija izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom	268

POPIS TABLICA

Tablica 1.1 Plan ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s gumom na razini materijala	2
Tablica 2.1 Prednosti korištenja samozbijajućeg betona u odnosu na obični beton [7], [23], [24], [26], [27].....	9
Tablica 2.2 Tipičan raspon vrijednosti komponenata sukladno Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1].....	11
Tablica 2.3 Utjecaj veličine gume i udjela gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju	17
Tablica 2.4 Utjecaj veličine gume i udjela gume na poroznost samozbijajućeg betona	19
Tablica 2.5 Utjecaj veličine gume i udjela gume na gustoću samozbijajućeg i običnog betona	21
Tablica 2.6 Utjecaj veličine gume i udjela gume na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona starosti 28 dana.....	22
Tablica 2.7 Utjecaj veličine gume i udjela gume na čvrstoću na savijanje samozbijajućeg betona starosti 28 dana.....	24
Slika 2.8 Utjecaj zamjene prirodnog agregata s gumom na čvrstoću na savijanje uzoraka samozbijajućeg betona starosti 7, 28 i 90 dana [48]	25
Tablica 2.9 Utjecaj veličine gume i udjela gume na vlačnu čvrstoću cijepanjem samozbijajućeg betona pri starosti 28 dana.....	26
Tablica 2.10 Utjecaj veličine gume i udjela gume na modul elastičnosti samozbijajućeg betona pri starosti 28 dana	27
Tablica 2.11 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na udar	29
Tablica 2.12 Utjecaj veličine gume i udjela gume na duktilnost samozbijajućeg i običnog betona.....	31
Tablica 2.13 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	35
Tablica 2.14 Utjecaj veličine gume i udjela gume na plinopropusnost običnog betona	39
Tablica 2.15 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost betona na požar i visoke temperature40	
Tablica 2.16 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na djelovanje korozije, abrazije i kiseline.....	42
Tablica 2.17 Utjecaj veličine gume i udjela gume na toplinsku vodljivost samozbijajućeg betona, običnog betona i morta.....	47
Tablica 2.18 Utjecaj veličine gume i udjela gume na parametre mehanike loma samozbijajućeg i običnog betona.....	52
Tablica 3.1 Kemijski sastav cementa CEM I 42,5R	66
Tablica 3.2 Fizikalna i kemijska svojstva silicijske prašine	66

Tablica 3.3 Svojstva kemijskih dodataka.....	67
Tablica 3.4 Pregled literature - sastavi referentnih betonskih mješavina samozbijajućeg betona (kg/m ³)	69
Tablica 3.5 Sastavi betonskih mješavina – prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m ³) [115].....	70
Tablica 3.6 Sastavi betonskih mješavina – druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m ³) [116].....	70
Tablica 3.7 Sastavi betonskih mješavina – treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m ³) [117].....	71
Tablica 3.8 Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju.....	72
Tablica 3.9 Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju	72
Tablica 3.10 Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju.....	74
Tablica 3.11 Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju	74
Tablica 3.12 Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju.....	75
Tablica 3.13 Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju	76
Tablica 4.1 Ispitana svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju.....	81
Tablica 4.2 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona (u kg/m ³)	82
Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju.....	85
Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju (starost uzoraka 28 dana)	89
Tablica 4.5 Slučajevi ispitivanja tlačne čvrstoće ($f_{c,cyl}$) samozbijajućeg betona	93
Tablica 4.6 Slučajevi ispitivanja modula elastičnosti (E) samozbijajućeg betona.....	94
Tablica 4.7 Slučajevi ispitivanja čvrstoće na savijanje (f_b) samozbijajućeg betona	94
Tablica 4.8 Popis regresijskih modela s pripadnim regresijskim jednadžbama.....	96
Tablica 4.9 Odabrani regresijski modeli za predviđanje mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom	96
Tablica 4.10 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – tlačna čvrstoća ($f_c = 43,09240 -$ $1,07104 \times cr + 1,72105 \times slf - 0,04515 \times cr \times slf$).....	97
Tablica 4.11 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – modul elastičnosti ($E = 39,7295 -$ $0,836401 \times cr + 0,000473885 \times \exp(slf)$).....	97

Tablica 4.12 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – čvrstoća na savijanje ($f_b = 6,489658 - 0,123341 \times cr + 0,070092 \times slf - 0,003003 \times cr \times slf$)	97
Tablica 4.13 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona	101
Tablica 4.14 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje modula elastičnosti samozbijajućeg betona	102
Tablica 4.15 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje čvrstoće na savijanje samozbijajućeg betona	103
Tablica 5.1 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona (kg/m^3)	110
Tablica 5.2 Geometrijske karakteristike uzoraka kocki samozbijajućeg betona podvrgnutih ispitivanju metodom cijepanja klinom	112
Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti dobiveni eksperimentalno i pomoću analitičkih izraza	119
Tablica 5.4 Prosječne vrijednosti maksimalne horizontalne sile ($P_{H,\max}$) i pripadajuće kritične vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja (CMOD_c) i kritične vrijednosti širenja pri vrhu pukotine (CTOD_c)	125
Tablica 5.5 Prosječne vrijednosti inicijalne ($P_{H,\text{ini}}$) i maksimalne sile loma ($P_{H,\max}$) za obje metode određivanja $P_{H,\text{ini}}$ te za odabranu grafičku metodu određivanja $P_{H,\text{ini}}$	127
Tablica 5.6 Odnos između rezidualne horizontalne sile ($P_{H,\text{residual}}$) i definiranih maksimalnih vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja (CMOD)	128
Tablica 5.7 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona	129
Tablica 5.8 Parametri mehanike loma (DKFM model) – ispitivanje samozbijajućeg betona s recikliranom gumom metodom cijepanja klinom	132
Tablica 5.9 Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) kroz uzorke	134
Tablica 6.1 Kriteriji za određivanje kvalitete betona s obzirom na vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti [175]	141
Tablica 6.2 Razredi vodonepropusnosti betona sukladno normi HRN 1128:2007 [177]	142
Tablica 6.3 Preporučene vrijednosti povećanja temperature na površini uzorka sukladno preporukama RILEM-a [180]	147
Tablica 6.4 Ispitana svojstva betonskih uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama	149
Tablica 6.5 Srednje debljine uzoraka korištenih za ispitivanje toplinske vodljivosti	149
Tablica 6.6 Rezultati ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti K (m^2)	150
Tablica 6.7 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom (vrijednosti u milimetrima)	152
Tablica 6.8 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF	154
Tablica 6.9 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-10CR-0SLF	154

Tablica 6.10 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-15CR-5SLF.....	155
Tablica 6.11 Rezultati ispitivanja ukupnih deformacija skupljanja betonskih uzoraka	157
Tablica 6.12 Mase oljuštenog materijala nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	159
Tablica 6.13 Srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.....	159
Tablica 6.14 Prijedlog vizualnog prepoznavanja stanja betona nakon izloženosti visokim temperaturama.....	166
Tablica 6.15 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=200^{\circ}\text{C}$)	167
Tablica 6.16 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=400^{\circ}\text{C}$)	167
Tablica 6.17 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=600^{\circ}\text{C}$)	168
Tablica 6.18 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=800^{\circ}\text{C}$)	168
Tablica 6.19 Prosječno smanjenje masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama	169
Tablica 6.20 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 20^{\circ}\text{C}$).....	171
Tablica 6.21 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 200^{\circ}\text{C}$).....	171
Tablica 6.22 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 400^{\circ}\text{C}$).....	172
Tablica 6.23 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 600^{\circ}\text{C}$).....	172
Tablica 6.24 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 800^{\circ}\text{C}$).....	173
Tablica 6.25 Ocjena kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnog impulsa prema normi ASTM C597 [166]	175
Tablica 6.26 Prosječne preostale brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke nakon izlaganja visokim temperaturama uspoređene s graničnim vrijednostima danim u normi ASTM C597 [166] .	175
Tablica 6.27 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka koji nisu izloženi visokim temperaturama ($T = 20^{\circ}\text{C}$)	177
Tablica 6.28 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 200°C	178
Tablica 6.29 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 400°C	178
Tablica 6.30 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 600°C	179

Tablica 6.31 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 800 °C	180
Tablica 6.32 Vrijednosti tlačne čvrstoće kao funkcije temperature betona sukladno normi HRN EN 1992-1-2:2013 [190]	190
Tablica 6.33 Rezultati ispitivanja toplinske vodljivosti λ (W/mK).....	195
Tablica 6.34 Popis ispitnih uzoraka za utvrđivanje mikrostrukture betona i sučeljka reciklirana guma-cementna pasta	197
Tablica 6.35 Prethodna priprema betonskih uzoraka naparivanjem – debljine slojeva zlata.....	199
Tablica 6.36 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-0CR-0SLF	206
Tablica 6.37 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0SLF	206
Tablica 6.38 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF	207
Tablica 6.39 Kvantitativni rezultati EDS analize uzorka reciklirane gume	207
Tablica 7.1 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona oznake SCC-R (u kg/m ³).....	214
Tablica 7.2 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona SCC-R u svježem stanju	214
Tablica 7.3 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona SCC-R u očvrslom stanju	215
Tablica 7.4 Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u svježem stanju	221
Tablica 7.5 Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u očvrslom stanju.....	221
Tablica 7.6 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-0CR-0SLF	226
Tablica 7.7 Maksimalna širina pukotina greda SCC-0CR-0SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara	227
Tablica 7.8 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF	230
Tablica 7.9 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-10CR-0SLF	233
Tablica 7.10 Maksimalna širina pukotina greda SCC-10CR-0SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara	233
Tablica 7.11 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-10CR-0SLF	237
Tablica 7.12 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-15CR-5SLF	240
Tablica 7.13 Maksimalna širina pukotina greda SCC-15CR-5SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara	240
Tablica 7.14 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-15CR-5SLF	244
Tablica 7.15 Ukupan broj pukotina pri slomu grede – grede SCC-R	247
Tablica 7.16 Maksimalna širina pukotina greda SCC-R pri progibu traverze od 77,78 milimetara...	247
Tablica 7.17 Normalizirane vrijednosti ukupnog broja pukotina pri slomu grede i maksimalne širine pukotina pri progibu traverze od 77,78 milimetara (mm).....	253

Tablica 7.18 Normalizirane vrijednosti kvantitativnih pokazatelja ponašanja ispitanih serija armiranobetonskih greda.....	254
Tablica 7.19 Ulazni parametri za analitički proračun progiba prema EC2	259
Tablica 7.20 Vrijednosti momenta pri pojavi prve pukotine (M_{cr}) – eksperimentalni i analitički rezultati (EC2).....	262
Tablica 8.1 Smjernice za primjenu samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima s gusto raspoređenom armaturom.....	269

POPIS KRATICA I SIMBOLA

$1/r_I$	odgovarajuća vrijednost zakrivljenosti za neraspucani element
$1/r_{II}$	odgovarajuća vrijednost zakrivljenosti za potpuno raspucali element
$1/r_{csm}$	zakrivljenost zbog skupljanja
$1/r_m$	zakrivljenost zbog opterećenja i puzanja
$1/r_{tot}$	ukupna zakrivljenost u presjeku u sredini raspona
3PBT	metoda savijanja (<i>engl. three-point bending test</i>)
A	poprečna površina betonskog uzorka
A_{s1}	glavna uzdužna armatura u vlačnoj zoni
AB	armiranobetonski
A_{lig}	površina ligamenta
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (<i>engl. American Society for Testing and Materials</i>)
a	udaljenost mjesta djelovanja sila od bližeg oslonca
a_0	početna duljina zareza
a_c	kritična / efektivna duljina pukotine pri kritičnom / vršnom opterećenju
B	širina uzorka
CA	krupni agregat (<i>engl. coarse aggregate</i>)
CBM	model trakastih pukotina (<i>engl. crack band model</i>)
CMOD	vrijednost širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne sile (<i>engl. crack mouth opening displacement</i>)
$CMOD_c$	kritična vrijednost širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne sile
CR	gumeni agregat / gumeni granulat (<i>engl. crumb rubber</i>)
CSH	kalcijev silikat hidrat
CTOD	vrijednost otvaranja pukotine pri vrhu pukotine (<i>engl. crack tip opening displacement</i>)
$CTOD_c$	kritična vrijednost otvaranja pukotine pri vrhu pukotine
DKFM	model dvostruke K-žilavosti (<i>engl. double K-fracture model</i>)
D_v	pomak traverze kidalice
DW	žičani potencijometar (<i>engl. draw wire</i>)
d	progib
d_c	progib pri pojavi prve pukotine
d_{max}	najveći ostvareni pomak pri slomu grede
d_y	progib u trenutku značajne promjene krutosti elementa koja je u direktnoj vezi s pojavom popuštanja armaturnog čelika
d_u	pomak u trenutku najveće dostignute sile (F_u)

E	modul elastičnosti
E_c	modul elastičnosti betona
EC	Eurokod (<i>engl. Eurocode</i>)
ECM	model efektivne pukotine (<i>engl. effective crack model</i>)
EDS	energo-disperzivna spektroskopija X-zrakama (<i>engl. energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>)
E_{model}	modul elastičnosti za odabrani regresijski model
EFNARC	Europsko udruženje proizvođača građevinske kemije i betonskih sustava (<i>engl. European Federation of National Associations Representing for Concrete</i>)
ERMCO	Europska organizacija za predgotovljeni beton (<i>engl. European Ready Mixed Concrete Organisation</i>)
EU	Europska unija (<i>engl. European Union</i>)
F	sila
F_c	sila pri pojavi prve pukotine
F_{max}	maksimalna sila
F_{slo}	sila u trenutku najvećeg ostvarenog pomaka
F_y	sila u trenutku značajne promjene krutosti elementa koja je u direktnoj vezi s pojavom popuštanja armaturnog čelika
F_u	najveća dostignuta sila
FA	sitni agregat (<i>engl. fine aggregate</i>)
FCM	model fiktivne pukotine (<i>engl. fictitious crack model</i>)
f_b	čvrstoća na savijanje
$f_{b,\text{model}}$	čvrstoća na savijanje za odabrani regresijski model
f_c	tlačna čvrstoća
$f_{ci,\text{min}}$	najmanja vrijednost tlačnih čvrstoća
f_{ck}	karakteristična tlačna čvrstoća
$f_{c,\text{cyl}}$	tlačna čvrstoća betonskih valjaka starosti 28 dana
f_{cm}	srednja vrijednost tlačnih čvrstoća
$f_{c,\text{model}}$	tlačna čvrstoća za odabrani regresijski model
f_{st}	vlačna čvrstoća cijepanjem
G_F	energija loma
H	visina uzorka
K	koeficijent plinopropusnosti
K_{Ic}	kritični koeficijent intenziteta naprezanja
$K_{Ic,\text{ini}}$	inicijalna žilavost loma
$K_{Ic,\text{un}}$	nestabilna žilavost loma

k	koeficijent ovisan o statičkom sustavu i opterećenju
L	razmak između oslonaca / raspon grede
L_0	mjerna udaljenost, tj. udaljenost između repera
LVDT	linearni varijabilni diferencijalni transformator (<i>engl. linear variable differential transformer</i>)
l	duljina uzorka
$l(t_0)$	početna udaljenost između repera u trenutku t_0
$l_{cs}(t)$	udaljenost između repera u trenutku t
l_{ch}	karakteristična dužina
N	broj ciklusa pri slomu (zamor materijala)
NN	Narodne novine
M_{cr}	moment savijanja pri pojavi prve pukotine
M_{Ed}	proračunski moment savijanja
m	masa
max	najveća / maksimalna vrijednost
min	najmanja / minimalna vrijednost
P	sila
P_H	horizontalna sila
$P_{H,ini}$	inicijalna horizontalna sila loma
$P_{H,max}$	maksimalna horizontalna sila
$P_{H,residual}$	rezidualna horizontalna sila
P_V	vertikalna sila
$P_{V,max}$	maksimalna vertikalna sila
PA	razred sposobnosti zaobilaženja zapreka (L-kutija)
PL	sposobnost zaobilaženja zapreka (L-kutija)
PJ	sposobnost zaobilaženja zapreka (J-prsten)
p	apsolutni ulazni tlak
p_a	atmosferski tlak
Q	protok plina
R^2	koeficijent determinacije
RC	obični beton s gumom (<i>engl. rubberized concrete</i>)
RILEM	Međunarodna udruga laboratorija i stručnjaka za građevinske materijale, sustave i konstrukcije (<i>engl. International union of Laboratories and Experts in construction Materials, systems and structures</i>)
S	maksimalna razina naprezanja (zamor materijala)
SAD	Sjedinjene Američke Države

SCC	samozbijajući beton (<i>engl. self-compacting concrete</i>)
SCC-D	samozbijajući beton, guma nije prethodno tretirana niti jednom metodom
SCC-T	samozbijajući beton, guma prethodno tretirana kombinacijom metode upijanja vode i dodatnim izlaganjem gume natrijevom hidroksidu (NaOH)
SCC-W	samozbijajući beton, guma prethodno tretirana metodom upijanja vode
SCRC	samozbijajući beton s gumom (<i>engl. self-compacting rubberized concrete</i>)
SEM	skenirajući elektronski mikroskop (<i>eng. scanning electron microscope</i>)
SLF	silicijska prašina (<i>engl. silica fume</i>)
SF	rasprostiranje slijeganjem (<i>engl. slump-flow</i>)
SP	superplastifikator (<i>engl. superplasticizer</i>)
SR	otpornosti segregaciji (<i>engl. segregation resistance</i>)
$\bar{s}_n$	standardna devijacija
$\bar{x}$	srednja vrijednost
UPV	brzina prolaska ultrazvučnog impulsa (<i>engl. ultrasonic pulse velocity</i>)
V	koeficijent varijacije
VMA	dodatak za promjenu viskoznosti (<i>engl. viscosity modifying admixture</i>)
v/c	vodocementni omjer, vodovezivni omjer
v/p	vodopraškasti omjer
T	temperatura
TPFM	dvoparametarski model loma (<i>engl. two parameter fracture model</i>)
t	vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak
VDP	vodonepropusnost
W	visina uzorka
WD	radna udaljenost (<i>engl. working distance</i>)
W_G	površina ispod P_H – CMOD krivulje
WST	metoda cijepanja klinom (<i>engl. wedge splitting test</i>)
z	krak unutarnjih sila za naponsko stanje II
Δa	razlika $a_c - a_0$
ΔCMOD	širina pojasa pogreške vrijednosti CMOD-a korištene za definiranje $P_{H,ini}$
Δd	promjena progiba
ΔF	promjena sile
Δm	promjena mase
$\emptyset$	promjer
α	omjer a_c / W
ε	deformacija
ε_{cs}	ukupna deformacija skupljanja betonskog uzorka u trenutku t

ζ	koeficijent raspodjele naprezanja u armaturi uzduž elementa
η	dinamička viskoznost fluida
λ	toplinska vodljivost
μ	faktor duktilnosti (omjer d_u / d_y)
μ	koeficijent trenja između klina i mehaničkih dijelova za prijenos sile
θ	nagib kuta klina
σ	naprezanje
$\sigma_{\max}$	maksimalno naprezanje

1 UVOD I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

1.1 Obrazloženje teme

Cilj istraživanja

Cilj je rada utvrditi utjecaj reciklirane gume kao zamjene dijela sitnog agregata na mehanička i termička svojstva, parametre mehanike loma i mikrostrukturu samozbijajućeg betona te razviti ekološki prihvatljiviji armiranobetonski (AB) element od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom zadovoljavajućih mehaničkih i poboljšanih svojstava trajnosti (manji progibi pri maksimalnoj sili i povoljnije pukotinsko stanje pri djelovanju opterećenja na konstrukcijski element), a samim time i poboljšane duktilnosti i kapaciteta apsorpcije energije. U radu će se utvrditi potencijal ovakvog materijala za primjenu u konstrukcijskim AB elementima izloženim izvanrednim djelovanjima kao što su požar i potres.

Istraživanje obuhvaća i primjenu silicijske prašine kao djelomične zamjene cementa s ciljem postizanja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava betona nužnih za primjenu ovakvog materijala u nosivim AB elementima.

Hipoteze istraživanja

H1: Upotrebom recikliranih automobilskih guma, kao zamjene za prirodni sitni agregat, moguće je izraditi samozbijajući beton zahtijevanih mehaničkih, poboljšanih termičkih svojstava i svojstava mehanike loma uz značajne ekološke i ekonomske uštede zbog smanjenja udjela prirodnog agregata.

H2: Moguća je primjena recikliranih automobilskih guma kao zamjene dijela prirodnog agregata u nosivim AB elementima (gredama) zadovoljavajuće mehaničke otpornosti i stabilnosti i poboljšanih svojstava trajnosti (smanjenih progiba pri maksimalnoj sili, povoljnijeg pukotinskog stanja, povećane duktilnosti i kapaciteta apsorpcije energije). Zajedničkim efektom silicijske prašine i reciklirane gume moguće je izraditi konstrukcijske elemente (grede) zahtijevane mehaničke otpornosti i stabilnosti te zadržati poželjna svojstva samozbijajućeg betona i poboljšati deformabilnost i duktilnost konstrukcijskih AB elemenata (greda).

1.2 Metodologija rada

1. faza – pregled stanja područja

Pregled stanja područja obuhvaća prikupljanje i analizu dostupnih relevantnih znanstvenih radova vezanih za temu doktorske disertacije. Detaljnom analizom znanstvenih istraživanja utvrđene su prednosti i mane korištenja reciklirane gume u samozbijajućem betonu, načini projektiranja sastava samozbijajućeg betona, utjecaj gume na mehanička svojstva, svojstva trajnosti i termička svojstva

betona te utjecaj gume na ponašanje nosivih AB elemenata, tj. greda. Analizirani su udjeli zamjene, zamijenjeni materijali i primjena zamjenskih materijala cementu kod samozbijajućeg betona te će se definirati ulazni parametri i omjeri za projektiranje sastava preliminarnih mješavina samozbijajućeg betona.

2. faza – laboratorijska istraživanja

Ispitivanje na razini materijala provedeno je korištenjem poznatih eksperimentalnih metoda u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/2017), važećim normama za beton i komponente betona te Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1]. Definirani su kriteriji za upotrebu reciklirane gume kao zamjenskog materijala za prirodni sitni agregat te sastavi samozbijajućeg betona s recikliranom gumom sa zadovoljavajućim svojstvima betona u svježem stanju te mehaničkim i termičkim svojstvima te svojstvima trajnosti, optimalnog za izradu AB greda. Točnije, definirani su optimalni sastavi betonskih mješavina, optimalna veličina zrna i optimalan postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranom gumom, za iduću fazu laboratorijskog istraživanja na razini materijala, tj. za ispitivanje mehaničkih svojstava, svojstava trajnosti i termičkih svojstava te ispitivanje svojstava mehanike loma (Tablica 1.1). U tu svrhu izrađen je veći broj mješavina samozbijajućeg betona s različitim udjelima reciklirane gume i silicijske prašine kako bi se ustanovio optimalni postotak zamjene obaju materijala. Silicijska prašina korištena je kao djelomična zamjena cementa kako bi se neutralizirao ili umanjio negativni efekt gume na mehanička svojstva samozbijajućeg betona.

Tablica 1.1 Plan ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s gumom na razini materijala

Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju	Poroznost, sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilazanja zapreka, otpornost segregaciji
Fizikalna i mehanička svojstva samozbijajućeg betona	Gustoća, tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, modul elastičnosti (statički i dinamički)
Termička svojstva samozbijajućeg betona	Toplinska vodljivost, otpornost na visoke temperature do 800 °C
Svojstva trajnosti samozbijajućeg betona	Plinopropusnost, vodonepropusnost, skupljanje, otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja
Mehanika loma samozbijajućeg betona	Energija loma, žilavost loma
Ispitivanje samozbijajućeg betona na mikrorazini	Karakterizacija površine samozbijajućeg betona pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) i mikroanaliza kemijskog sastava spektrometrom

Ispitivanje na razini elemenata konstrukcije (grede) provedeno je korištenjem poznatih eksperimentalnih metoda u skladu s Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/2017). Definirana je tehnologija izvedbe AB elemenata te izrada AB greda. Provedena su ispitivanja mehaničke otpornosti i stabilnosti (savijanje) na tri prethodno definirane optimalne mješavine samozbijajućeg betona s recikliranom gumom, od kojih je jedna referentna (bez gume). Predviđeno je

ispitivanje tri grede od svake mješavine radi točnije interpretacije rezultata ispitivanja, sveukupno devet greda. Predviđena je interpretacija rezultata ispitivanja AB greda pomoću nekoliko parametara poput kapaciteta nosivosti, progiba pri pojavi prve pukotine, maksimalne sile savijanja, progiba pri maksimalnoj sili i momentu savijanja pri pojavi prve pukotine, sve s ciljem dokazivanja poboljšane duktilnosti greda sa silicijskom prašinom i recikliranom gumom.

3. faza – analiza rezultata i donošenje zaključaka

Analiza rezultata i donošenje zaključaka sastoji se od nekoliko točaka:

- statistička obrada prikupljenih rezultata,
- analiza i interpretacija rezultata eksperimentalnog istraživanja,
- definiranje primjene samozbijajućeg betona s recikliranom gumom kao agregatom na temelju dobivenih eksperimentalnih rezultata na razini materijala i na razini konstrukcije,
- izrada smjernica za upotrebu reciklirane gume kao agregata u samozbijajućem betonu,
- donošenje zaključaka o utjecaju reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrnulom stanju,
- davanje smjernica za daljnja istraživanja.

1.3 Očekivani znanstveni doprinos

Nakon proučavanja postojeće literature, eksperimentalnog istraživanja i statističke obrade dobivenih rezultata, očekuju se sljedeći znanstveni doprinosi u području tehničkih znanosti, polje građevinarstvo:

- utvrđivanje utjecaja reciklirane gume kao zamjene dijela sitnog agregata na mehanička i termička svojstva, parametre mehanike loma i mikrostrukturu samozbijajućeg betona,
- ocjena mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti nosivih armiranobetonskih greda od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom,
- izrada smjernica s identificiranim ključnim parametrima i opisanom metodologijom izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom.

2 PREGLED STANJA PODRUČJA

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u publikaciji R. Bušić, I. Miličević, T. Šipoš, K. Strukar, *Recycled Rubber as an Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete—Literature Overview, Materials (Basel)*, vol. 11, no. 9, p. 1729, 2018. [2].

2.1 Otpadna automobilska guma i reciklirana guma

2.1.1 Općenito

Broj neupotrebljivih otpadnih automobilskih guma različite vrste ubrzano raste te se ta činjenica može smatrati jednim od glavnih ekoloških problema današnjice. Približno jedna milijarda otpadnih guma proizvodi se svake godine [3]. Taj će broj postati još i veći ako se u obzir uzme predviđanje da će se do 2030. godine taj broj povećati na skoro 1,2 milijardi godišnje [4]. Približno 8,3 milijune tona godišnje se proizvede u Europi i SAD-u [5] i neki je dio vrlo vjerojatno nelegalno zbrinut, što ima negativan utjecaj kako na zdravlje ljudi, tako i na estetiku okoline u kojoj živimo. Samo u SAD-u godišnje se proizvede 289 milijuna tona otpadnih automobilskih guma [6]. U Australiji taj broj približno iznosi 51 milijun tona [7], a zbog ogromnog broja guma koje korisnici odlažu, odlagališta postaju pretrpana, a priroda postaje izložena potencijalnim ekološkim prijetnjama, kao što su komarci, miševi, insekti, štakori i ostale štetočine te povećanom riziku opasnosti od požara [6], [8]. Prema Europskom udruženju proizvođača automobilskih guma i gume općenito (ETRMA) broj otpadnih guma povećao se s 2,48 na 2,88 milijuna tona od 2004. do 2013. godine [9]. Ipak, u proteklih nekoliko godina, zahvaljujući različitim udruženjima širom svijeta koja promoviraju cirkularnu ekonomiju i održivi razvoj, reciklirane su otpadne automobilske gume i njihova je ponovna uporaba postala poprilično popularna u različitim recikliranim proizvodima.

Zbog činjenice da guma kao bio-nerazgradivi materijal ima dug životni vijek, zanimanje za primjenom gume u betonu, kao zamjenskog materijala prirodnom agregatu, privuklo je pozornost građevinskih inženjera i građevinske industrije kako bi se potencijalno proizveo ekološki prihvatljiviji beton s gumom, tj. gumirani beton. Jedan od mogućih načina smanjenja količine otpadnih automobilskih guma njihovo je korištenje u građevinskoj, točnije u betonskoj industriji. Betonska industrija jedna je od najvećih svjetskih industrija. Prema Europskom udruženju ERMCO prosječna proizvodnja betona u 2015. godini u Europskoj uniji, Rusiji, SAD-u i Japanu bila je 344, 62, 365 i 138 milijuna kubičnih metara [10]. Ako se pogleda šira slika, u svijetu se potroši otprilike pet milijardi tona betona godišnje [11], što predstavlja velik potencijal primjene reciklirane gume dobivene iz otpadnih automobilskih guma kao zamjenskog materijala prirodnog agregatu koji se koristi kao jedna od glavnih komponenti za izradu betonskih mješavina.

Pregled stanja područja napravljen je proučavanjem literature iz domaćih i stranih izvora. Koliko je ova tema trenutno zastupljena u ispitivanjima u svijetu vidljivo je na [Slikama 2.1 i 2.2](#) na

kojima su označene zemlje svijeta i Europe u kojima se unazad nekoliko godina provode istraživanja običnog betona s gumom i samozbijajućeg betona s gumom. Označene su samo zemlje istraživača i autora čiji su članci korišteni tijekom pregleda dostupne literature te treba dodatno napomenuti da se osjetno veći broj istraživača iz različitih dijelova svijeta bavi ovom temom, neovisno o stupnju razvijenosti zemalja.



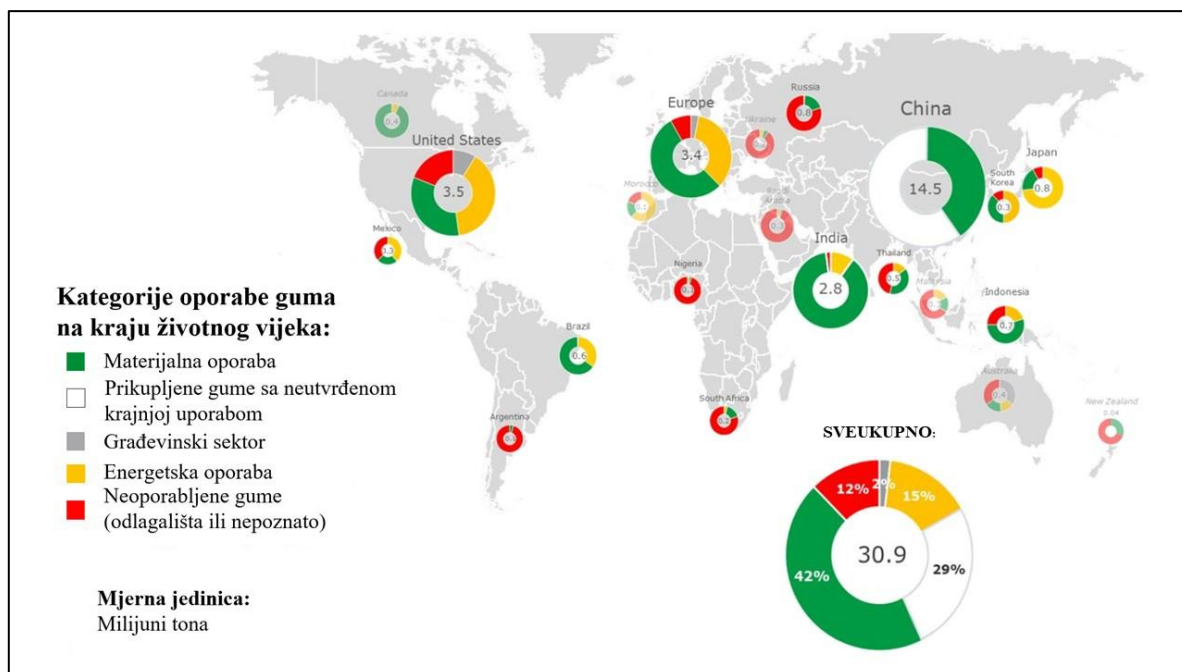
Slika 2.1 Pregled stanja područja – zastupljenost istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svijetu (https://www.amcharts.com/visited_countries/)



Slika 2.2 Pregled stanja područja – zastupljenost istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u Europi (https://www.amcharts.com/visited_countries/)

U 2019. godini uporaba otpadnih automobilskih guma u svijetu uključivala je: (a) energetsku uporabu, tj. korištenje gume kao izvora energije (15 % guma na kraju životnog vijeka), (b) materijalnu uporabu (42 % guma na kraju životnog vijeka), (c) korištenje gume u građevinskom sektoru (2 % guma na kraju životnog vijeka). U SAD-u i zemljama Europske unije oko 6-8 % otpadnih guma reciklira se

kao materijal korišten u građevinarstvu. Za ostatak svijeta taj je postotak zanemariv i iznosi 2 % [12]. Za 29 % guma na kraju životnog vijeka (Kina) nije utvrđena njihova krajnja upotreba, dok je za 12 % guma na kraju životnog vijeka utvrđeno da se ne oporabljaju, nego se odlažu na odlagališta otpada, spaljuju i slično (Slika 2.3).



Slika 2.3 Prikaz proizvodnje i kategorija uporabe guma na kraju životnog vijeka u svijetu [12]

Prema hijerarhiji otpada, koja je propisana nadležnošću Europskog parlamenta i Vijeća Europske Unije [13], prioritet je gospodarenja otpadom prevencija, ponovna uporaba i recikliranje otpada. Odlaganje otpadnih guma na odlagališta potrebno je izbjeći što je moguće više zbog ekoloških problema koje ono uzrokuje, npr. mogućnosti zapaljivanja, zagađenja zraka i ekološkog iscrpljivanja područja na kojemu se nalaze [8], [14], [15]. Gospodarenje otpadom ne smije utjecati na ljudsko zdravlje i okoliš.

Budući da je Republika Hrvatska članica Europske Unije, primjena pravne stečevine EU-a, tj. Uredbe 2008/98/EC, u Republici Hrvatskoj primjenjuje se provedbom Zakona o gospodarenju otpadom [16] u kojemu je određena obveza odvojenog sakupljanja otpada, pa tako i otpadne gume kao jedne od posebnih kategorija otpada, dok su Pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama [17], koji proizlazi iz ranije navedenog Zakona, propisani postupci i ciljevi gospodarenja otpadnim gumama, vrsta otpadnih guma koje se sakupljaju te zahtjevi u pogledu sakupljanja i recikliranja otpadnih guma. Prema navedenom Pravilniku [12] godišnji cilj uporabe otpadnih guma postupkom uporabe R3, tj. recikliranjem organskih tvari, iznosi najmanje 80 % mase odvojeno sakupljenih otpadnih guma. Prema [18], u 2018. godini oporabljeno je 92 % od mase odvojeno sakupljenih guma, čime je ostvaren prethodno naveden cilj uporabe otpadnih guma od najmanje 80 %. U 2018. godini u Republici Hrvatskoj

je 12 najvećih sakupljača sakupilo ukupno 21 670,69 tonu otpadnih guma, od kojih je oporabljeno 19 225,52 tona [18]. Poduzeće *Gumiimpex-GRP d.d.* iz Varaždina prvo je i trenutno najpoznatije hrvatsko poduzeće koje se bavi recikliranjem otpadnih guma. Poduzeće je osnovano prije točno 50 godina, trenutno broji 400 zaposlenika, a proizvodi više od 7 000 različitih gumeno-tehničkih proizvoda. Navedeno je poduzeće prema [18] najveći sakupljač i obrađivač otpadnih guma u Republici Hrvatskoj u 2018. godini s količinom od 17 608 tona oporabljene gume.

2.1.2 Proizvodnja i klasifikacija reciklirane gume kao agregata

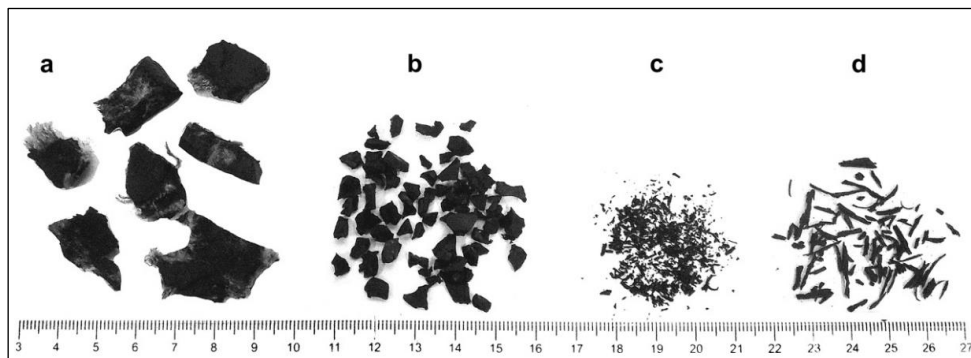
2.1.2.1 Proizvodnja reciklirane gume kao agregata

Otpadne gume sastavljene su od gumenih dijelova (70-78 % mase), čeličnih žica (15-27 % mase) i tekstila (3-13 % mase). Postotci variraju u ovisnosti o porijeklu gume [19]. Postoji nekoliko metoda kako se otpadne gume mogu oporabiti, tj. reciklirati, a jedna je od njih mehaničko usitnjavanje. Mehaničko usitnjavanje otpadnih guma fizička je metoda recikliranja otpadnih guma prilikom koje se navedene tri komponente otpadnih guma odvajaju jedna od druge te se gumeni dijelovi usitnjavaju na gumeni agregat željene veličine. Budući da se za potrebe izrade betonskih mješavina s recikliranom gumom u ovome radu koristio gumeni agregat poduzeća *Gumiimpex – GRP d.d.* iz Varaždina, u nastavku je ukratko opisan tehnološki proces mehaničkog usitnjavanja otpadne gume koji se koristi u navedenom poduzeću, kako bi se iz otpadnih guma proizveo gumeni granulat koji se između ostalog može koristiti i kao agregat u betonskoj mješavini. Tehnološki proces sastoji se od nekoliko koraka [20]. U prvom koraku otpadne se gume po dolasku u postrojenje razvrstavaju i transportiraju utovarivačem do lokacije uređaja za mehaničku obradu i reciklažu guma (šredera). Eventualno prisutne felge ili zračnice odvajaju se prije mehaničke obrade rezanjem. Gume se potom unose u stroj s velikim noževima (šreder) u kojemu se režu na komade maksimalne veličine 100 mm × 250 mm. Tako usitnjena guma se u idućih nekoliko koraka usitnjava kroz pet različitih granulatora, sve dok ne bude usitnjena na maksimalnu dimenziju 3,0-3,5 mm. Tijekom navedenih koraka od gumenih se dijelova odvajaju čelične žice i tekstil te se transportiraju u zaseban kontejner. Konačni je proizvod gumeni granulat 0-0,5 mm, 0,5-2,0 mm i 2,0-3,5 mm koji se potom puni u vreće te se kao konačni proizvod isporučuje kupcima.

2.1.2.2 Klasifikacija reciklirane gume kao agregata

Otpadna se guma u eksperimentalnim istraživanjima koristi kao djelomična zamjena za agregat u običnom betonu i samozbijajućem betonu duže od dva desetljeća. Većinom se krupni i sitni agregat mijenjao s gumenim agregatom dobivenim mehaničkim usitnjavanjem otpadne gume. Prema [Slici 2.4](#) otpadne gume nakon mehaničkog usitnjavanja mogu se svrstati u četiri kategorije, ovisno o veličini, obliku i materijalu koji zamjenjuju: (a) usitnjena guma (*engl. chipped/shredded rubber aggregate*) korištena kao zamjena za krupni agregat, tj. šljunak, veličina gume između 13 i 76 mm, (b) gumeni

granulat (*engl. crumb rubber/granular rubber*) uobičajeno korištena kao zamjena za sitni agregat, tj. pijesak, veličina zrna između 0,425 mm i 4,75 mm, (c) gumeni prah (*engl. rubber powder*) korišten kao djelomična zamjena cementa ili kao zamjena za praškasti materijal, veličina zrna manja od 0,425 mm, te (d) gumena vlakna (*engl. fiber rubber*) u obliku kratkih niti prosječne duljine 12,5 mm.



Slika 2.4 Kategorizacija agregata otpadne gume: (a) usitnjena guma, (b) gumeni granulat, (c) gumeni prah, (d) gumena vlakna [21]

2.2 Samozbijajući beton

2.2.1 Općenito

Samozbijajući beton razvijen je u Japanu u kasnim 80-im godinama 20. stoljeća te je prvi put u praksi upotrijebljen sredinom 90-ih godina 20. stoljeća [1], [22] pa se može istaknuti da je, kao vrsta betona, relativno nov proizvod na tržištu. Samozbijajući beton onaj je beton koji se ugrađuje bez potrebe za dodatnom vibracijom te ima sposobnost tečenja u popunjavanju oplata pod utjecajem vlastite težine [1]. Jedan od razloga razvijanja samozbijajućeg betona je zbog uočenih problema trajnosti konstrukcija izrađenih od običnog betona. Na mnogim uzorcima betona izvađenim iz konstrukcije uočene su pojave segregacije na makrorazini, a na mikrorazini potpuna dezintegracija strukture [22]. Pri korištenju samozbijajući beton ima nekoliko prednosti u odnosu na obični beton (**Tablica 2.1**), a najbitnije su da pod vlastitom težinom popunjava razne oblike oplata s i bez gusto složene armature s malo ili nimalo potrebnog mehaničkog zbijanja [23], [24] te se također može postići i željeni stupanj zbijenosti u područjima gusto složene armature [25]. Ne treba zaboraviti ni ekonomske kriterije poput smanjenog opsega rada te manjeg broja radnika potrebnih za provedbu betoniranja te na kraju i manja cijena rada [26]. Nadalje, ugradnja samozbijajućeg betona brža je od ugradnje običnog betona, što u današnjem građevinskom sektoru može uvelike doprinijeti bržem dovršenju aktivnosti betoniranja te bržoj izgradnji građevine. Najbolji je primjer za navedeno izgradnja najdužeg visećeg mosta na svijetu Akashi-Kaikyo koji povezuje grad Kobe (Honshu) s Iwayom (otok Awaji), gdje je korištenjem samozbijajućeg betona ostvareno 20 % uštede vremena [26].

Tablica 2.1 Prednosti korištenja samozbijajućeg betona u odnosu na obični beton [7], [23], [24], [26], [27]

Materijalne prednosti	- bolja tlačna čvrstoća - bolja rana čvrstoća - bolja trajnost materijala - smanjena propusnost i pojava zarobljenog zraka
Ekonomske prednosti	- smanjeni opseg rada, manji broj radnika potrebnih za provedbu betoniranja te na kraju i manja cijena rada – do 40 % brža ugradnja i do 5 puta veća produktivnost - brži završetak planiranih aktivnosti betoniranja i izgradnje - jednostavna proizvodnja – smanjena potreba za korištenim alatima i strojevima - ušteda na finim česticama (cement)
Ekološke prednosti	- manje finih čestica, manje CO₂ - produljen životni vijek
Ergonomske prednosti	- nema vibriranja (pod vlastitom težinom popunjava razne oblike oplata s i bez gusto složene armature s malo ili nimalo potrebnog mehaničkog zbijanja) - željeni stupanj zbijenosti u područjima gusto složene armature postiže se bez stvaranja buke i prašine inače proizvedene mehaničkim vibratorima - manja ljepljivost materijala
Vizualne prednosti	- dopušta inovativna arhitektonska rješenja - glatka površina koja zahtijeva minimalnu daljnju završnu obradu

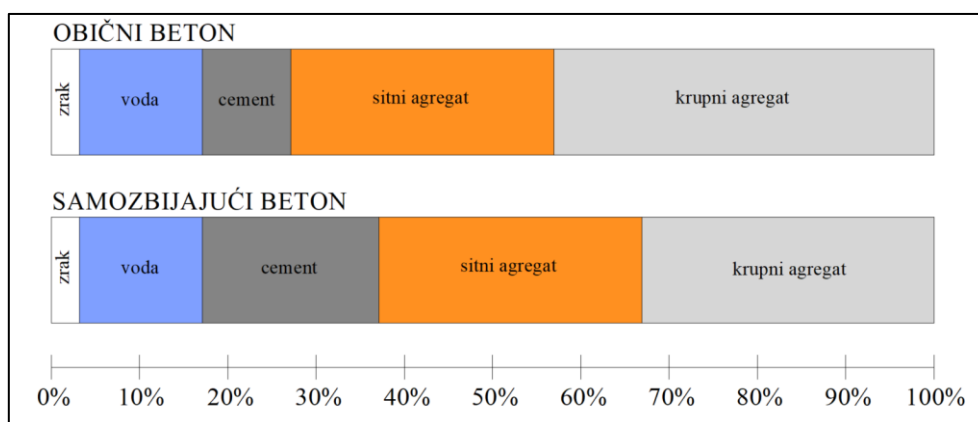
Samozbijajući beton ima i nekoliko nedostataka u odnosu na obični beton [28]: (a) potrebna je dodatna količina sitnih čestica, npr. letećeg pepela, dolomitnog brašna i sl., (b) vlažnost agregata mora se posebno nadzirati zbog osjetljivosti na promjene u vlažnosti, (c) samozbijajući beton osjetljiv je i na promjene vrste i veličine zrna agregata (d), a u očvrslom stanju povećana je osjetljivost na pojavu pukotina pri skupljanju betona zbog veće količine sitnih čestica.

Iz nabrojanih prednosti i nedostataka samozbijajućeg betona u odnosu na obični beton može se zaključiti da su nedostaci samozbijajućeg betona daleko manji od njegovih prednosti. Navedene nedostatke moguće je spriječiti ili svesti na minimum pravilnim projektiranjem sastava samozbijajućeg betona, odabirom komponenata sastava svježeg betonske mješavine te adekvatnom njegom betona u prvim tjednima njegovog dozrijevanja.

2.2.2 Projektiranje sastava i postupak miješanja samozbijajućeg betona

Usporedbom sastava betonskih mješavina samozbijajućeg betona i običnog betona (Slika 2.5) uočeno je da je kod samozbijajućeg betona obično manji udio krupnog agregata, manji vodovezivni omjer, povećan udio paste te povećan udio superplastifikatora [1], [22]. Iz Slike 2.5 također je vidljivo da prilikom projektiranja sastava samozbijajućeg betona postoji potreba za povećanim udjelom praškastog materijala. Korištenjem zamjenskih materijala cementu (*engl. supplementary cementitious materials, SCMs*), tj. mineralnih dodataka kao što su metakaolin, leteći pepeo, zgura ili silicijska

prašina, moguće je zadovoljiti preporučene vrijednosti vodopraškastog omjera, ali i potencijalno poboljšati mehanička svojstva i svojstva trajnosti samozbijajućeg betona.



Slika 2.5 Usporedba udjela materijala u sastavu betonske mješavine samozbijajućeg i običnog betona (volumenski odnosi) [25]

Trenutno ne postoji standardizirana metoda kojom je propisan postupak projektiranja sastava samozbijajućeg betona. Međutim, postoji nekoliko neslužbenih metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona, a Shi i sur. [29] klasificirali su ih u pet kategorija: (1) empirijske metode projektiranja (*engl. empirical design methods*), (2) metode projektiranja tlačne čvrstoće (*engl. compressive strength methods*), (3) metode pakiranja agregata (*eng. close aggregate packing methods*), (4) modeli statističkih faktora (*engl. statistical factorial methods*) i (5) modeli reološke paste (*engl. rheological paste methods*). 2005. godine donesene su Europske smjernice za samozbijajući beton [1], čime je napravljen velik korak u smislu lakših postavljanja ulaznih parametara i tipičnih raspona vrijednosti komponenata prilikom projektiranja sastava samozbijajućeg betona. U Europskim smjernicama navedeni su osnovni zahtjevi za samozbijajući beton koji su slični zahtjevima za obični beton, razred tlačne čvrstoće, razred izloženosti, najveća veličina zrna agregata. Također, u Europskim smjernicama iz 2005. godine prvi su puta postavljeni, uz osnovne zahtjeve, i specifični zahtjevi za karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju koji obuhvaćaju ispitivanje sposobnosti tečenja, sposobnosti zaobilazanja zapreka, viskoznost te otpornost segregaciji. U kasnijim godinama navedeni su specifični zahtjevi ključnih karakteristika samozbijajućeg betona u svježem stanju implementirani u normu HRN EN 12350, dio 8-12 [30]–[34]. Tipičan raspon vrijednosti komponenata sukladno Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1] prikazan je u Tablici 2.2. Dani rasponi vrijednosti okvirni su i ni u kojem slučaju ne predstavljaju ograničenja, već služe njihovim korisnicima kao početne i okvirne vrijednosti prilikom odabira količine određene komponente.

Tablica 2.2 Tipičan raspon vrijednosti komponenata sukladno Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1]

Komponenta	Masa (kg/m ³)	Volumen (litara/m ³)
Prah	380-600	-
Cementna pasta	-	300-380
Voda	150-210	150-210
Krupni agregat	750-1000	270-360
Sitni agregat (pijesak)	Tipično između 48-55 % volumena ukupnog agregata	
Vodopraškasti omjer	0,85-1,10	

Projektiranje sastava samozbijajućeg betona generalno se zasniva na pristupu koji se sastoji od nekoliko ključnih koraka [1], [22]:

- procijeniti potrebnu količinu vode i optimizirati tečenje i stabilnost paste,
- utvrditi udio pijeska i količinu dodataka kako bi se dobila zahtijevana robusnost,
- ispitati osjetljivost betonske mješavine na male promjene u količinama sastojaka,
- dodati prikladnu količinu krupnog agregata,
- zamiješati beton u laboratoriju te ispitati njegove karakteristike u svježem stanju sukladno specifičnim zahtjevima,
- ispitati svojstva betona u očvrslom stanju,
- proizvesti probne mješavine u betonari.

Ukoliko se nakon navedenih ključnih koraka uoči problem s mješavinom samozbijajućeg betona u svježem stanju poput izdvajanja vode, segregacije, smanjene sposobnosti tečenja, visoke viskoznosti ili smanjene sposobnosti zaobilaženja zapreka, potrebno je poduzeti neke od sljedećih metoda kako bi se optimiziralo ponašanje svježe betonske mješavine [1]:

- prilagoditi cementno-praškasti i vodo-praškasti omjer,
- dodati drugačiju vrstu dodataka,
- prilagoditi količinu sitnog agregata i superplastifikatora,
- upotrijebiti dodatak za promjenu viskoznosti,
- prilagoditi količinu ili granulometrijski sastav krupnog agregata.

Zbog zahtijevanih specifičnih svojstava u svježem stanju te kako bi se sačuvala otpornost segregaciji, kod samozbijajućeg betona koriste se inertni i pucolanski/hidraulični mineralni dodatci koji imaju ulogu i reguliranja količine cementa u betonu sve s namjerom smanjenja topline hidratacije i toplinskog skupljanja betona.

Trenutno ne postoji standardizirana metoda kojom je propisan postupak miješanja svježeg samozbijajućeg betona. Najim i Hall [21] predložili su nekoliko bitnih koraka kojih bi se trebalo

pridržavati u postupku miješanja samozbijajućeg betona kako bi se izbjegli problemi izdvajanja vode i segregacije:

- sve suhe komponentne mješavine prvo treba miješati 1-5 minuta prije postupnog dodavanja vode,
- nakon dodavanja vode miješanje treba nastaviti još 3-5 minuta,
- zadovoljavajući rezultati mogu se dobiti miješanjem agregata i praha tijekom 30 sekundi, bez dodavanja vode, a zatim je potrebno dodati 1/3 potrebne količine superplastifikatora i miješati dodatnih 90 sekundi,
- u završnom koraku potrebno je dodati preostale 2/3 količine superplastifikatora sa svim ostalim dodatcima, poput dodatka za promjenu viskoznosti i sl. te miješati dodatnih 210 sekundi.

U ovome radu prakticiralo se korištenje navedenih koraka miješanja svježe betonske mješavine, ali na početku preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom. U konačnici, koraci su tijekom preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja modificirani i prilagođeni, što je opisano u [Poglavlju 3](#).

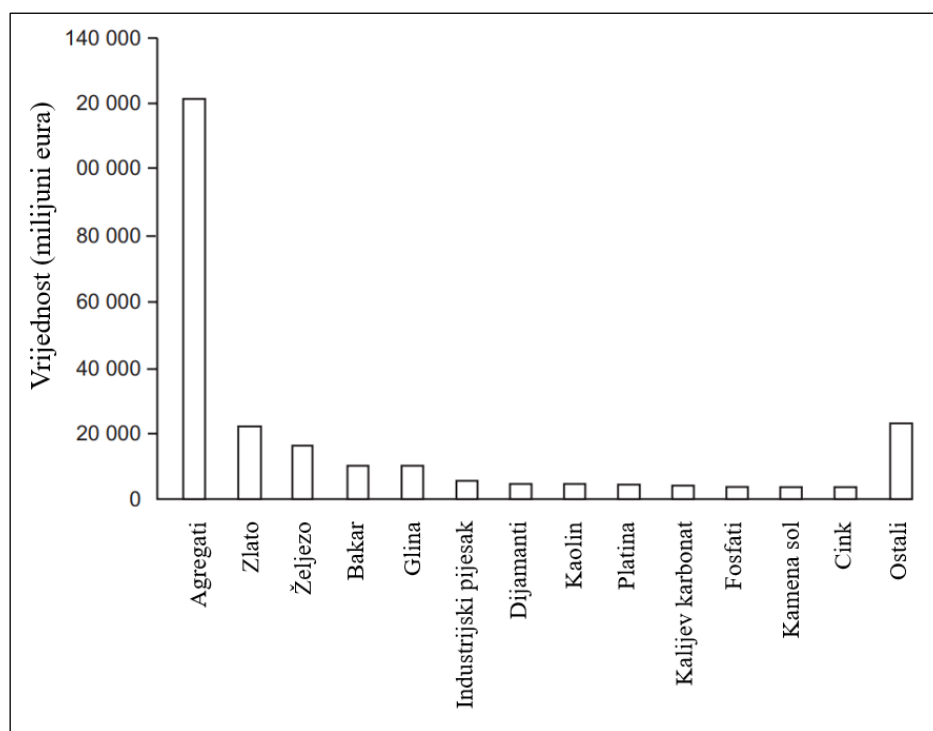
2.3 Upotreba reciklirane gume u samozbijajućem betonu: dosadašnje spoznaje i trenutna primjena

2.3.1 Općenito

Samozbijajući beton s gumom (SCRC) predstavlja vrstu samozbijajućeg betona u kojemu je prirodni agregat djelomično zamijenjen gumom. Jedan od osnovnih pravaca istraživanja samozbijajućeg betona jest poboljšanje svojstava uz istodobno poboljšanje ekološke prihvatljivosti i održivosti materijala. S ekološkog stajališta, koristeći gumu dobivenu iz otpadnih automobilskih guma u betonu, količina otpadnih guma koje završavaju na odlagalištima otpada potencijalno se smanjuje te se može proizvesti ekološki prihvatljiviji beton, što dovodi do pozitivnog utjecaja na okoliš i smanjenog korištenja prirodnog agregata kao resursa kojeg ima u ograničenim količinama. S inženjerskog stajališta, koristeći gumu kao zamjenski materijal prirodnom agregatu u betonu, može se uz pravilan odabir komponenata betona i njihovih međusobnih omjera proizvesti beton poboljšanih dinamičkih svojstava i svojstava trajnosti kao što su duktilnost, kapacitet prigušenja, otpornost na difuziju klorida, otpornost na karbonatizaciju, otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja i sl. S ekonomskog aspekta, guma ima svoju tržišnu vrijednost koja je trenutno ipak nešto veća od cijene prirodnog sitnog agregata, ali sve bržim širenjem zelene ekonomije, promocijom recikliranja materijala, što od strane državnih tijela, a što od strane privatnih investitora, te dodatnim unaprjeđenjem tehnološkog procesa prerade i obrade otpadnih guma, moguće je u skoroj budućnosti očekivati i u ovome polju smanjenje cijene gotovog proizvoda te pozitivan utjecaj primjene otpadnog recikliranog gumenog agregata kao komponente u sastavu betonskih mješavina.

Guma je bio-nerazgradivi materijal te kao takva ima dug životni vijek. Činjenica da otprilike 50 % mase samozbijajućeg betona čine sitni i krupni agregat predstavlja motivaciju za temeljitu istragu utjecaja korištenja gume kao alternativnog materijala agregatu, ne samo zato što osiguravamo beton manje mase i čuvamo prirodne resurse, nego zato što se, kako je već i ranije utvrđeno, na ovaj način potencijalno može poboljšati ili zadržati postojeće vrijednosti mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti betona.

Prirodni agregat, riječni ili drobljeni, koristi se kao komponenta asfalta i betona te je u građevinskom sektoru nužno potreban za izradu prometnica, autocesta, željezničkih pruga, mostova, zgrada, nogostupa, kanalizacija, brana itd., gotovo u svakom dijelu izgrađenog okoliša. Na svjetskoj razini agregat je kvantitativno (količinski) i kvalitativno (vrijednosno/cjenovno) vodeća mineralna roba (Slika 2.6). Tijekom 1998. godine proizvedeno je oko 20 milijardi tona agregata u vrijednosti od 120 milijardi eura [35]. Zahtjevi za upotrebu agregata kao sirovine svake se godine povećavaju za 4,7 % [36], što bi značilo da je potrošnja prirodnog agregata u 2020. godini više od 50 milijardi tona godišnje. Prema danim podacima iz 1998. godine, ako bi se samo 10 % prirodnog agregata zamijenilo recikliranom gumom, smanjila bi se njegova potrošnja za otprilike 2 milijarde tona godišnje.



Slika 2.6 Grafički prikaz vrijednosti svjetske proizvodnje mineralnih sirovina u 1998. godini [35]

U usporedbi s običnim betonom samozbijajući beton ima nekoliko prednosti ako se upotrijebi reciklirana guma kao zamjena za prirodni agregat:

- Zbog svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju potencijalno se može dobiti bolja veza između reciklirane gume i cementne paste, što direktno utječe na mogućnost korištenja većih

udjela gume u samozbijajućem betonu u odnosu na udio gume koji bi se koristio u običnom betonu. Nadalje, moguće je dobivanje istih ili možda čak i boljih vrijednosti mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u odnosu na obični beton s recikliranom gumom.

- b) Poroznost je iznimno bitna kod betona jer se povećanjem poroznosti smanjuju vrijednosti mehaničkih karakteristika betona. To je još jedan razlog zašto je moguće da će korištenje samozbijajućeg betona zajedno s recikliranom gumom dati povoljne rezultate s obzirom da samozbijajući beton ima veći udio praškastog materijala, a samim time i cementne paste u usporedbi s istom količinom kod običnog betona, čime je dodatno smanjena poroznost popunjavanjem prostora oko krupnog i sitnog agregata.
- c) U samozbijajući beton u određenom se postotku dodaju mineralni i kemijski dodatci za povećanje obradivosti, smanjenje segregacije i smanjenje poroznosti, što može doprinijeti i povećanju vrijednosti mehaničkih karakteristika betona i poboljšanju svojstava trajnosti betona.
- d) Kod običnog betona s recikliranom gumom u svježem stanju postoje problemi s njegovom obradivosti zbog nepravilnog oblika reciklirane gume u usporedbi s oblikom zrna sitnog agregata. Također, isti problemi s obradivosti javljaju se zbog grube površine gume, što uzrokuje povećanje trenja između gume i cementne paste. Taj se problem može riješiti upotrebom samozbijajućeg betona jer se svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju i kontaktnu površinu između cementne paste i gume može bolje kontrolirati korištenjem kemijskih dodataka nego što se navedena svojstva i kontaktna površina mogu kontrolirati kod običnog betona s gumom.
- e) Kod običnog betona postoji problem pojave segregacije zrna reciklirane gume koja se zbog svoje manje specifične težine kreću prema površini betonskih uzoraka prilikom ugrađivanja svježeg betona u kalupe i postupka vibriranja, rezultirajući betonom nejednolike raspodjele reciklirane gume po visini, što na kraju dovodi i do lošijih mehaničkih svojstava betona. Budući da kod samozbijajućeg betona nema postupka vibriranja, problem segregacije zrna reciklirane gume može se izbjeći pravilnim korištenjem kemijskih dodataka.
- f) U usporedbi s običnim betonom s recikliranom gumom samozbijajući beton s recikliranom gumom ima manje smanjenje čvrstoća, što se može objasniti manjim udjelom vode, kao i korištenjem veće količine punila i cementne paste, što može pozitivno utjecati na vezu između gumenog agregata i cementne paste.

Zbog nabrojanih prednosti samozbijajućeg betona u odnosu na obični beton u proteklih 20 godina provedena su brojna eksperimentalna istraživanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom, a pregled stanja područja dan je u nastavku.

2.3.2 Utjecaj reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

2.3.2.1 Sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilaženja zapreka, otpornost na segregaciju

Kada se govori o samozbijajućem betonu i svojstvima istog u svježem stanju, prema Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1], [37] te prema važećim europskim normama za samozbijajući beton, postoje četiri glavna svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju: sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilaženja zapreka i otpornost segregaciji. Navedena svojstva samozbijajućeg betona ispituju se pomoću posebne laboratorijske opreme koja se razlikuje od klasične opreme za ispitivanje običnog betona. Sposobnost tečenja i viskoznost najčešće se ispituju metodom rasprostiranja slijeganjem [30], viskoznost se dodatno može ispitati pomoću V-lijevka [31], sposobnost zaobilaženja zapreka J-prstenom [34] ili L-kutijom [32], dok se otpornost na segregaciju ispituje po potrebi nakon vizualnog pregleda svježe betonske mješavine pomoću sita otvora 5 mm [33].

Do danas se veliki broj znanstvenika bavio istraživanjem svojstava samozbijajućeg betona s gumom u svježem stanju. Također, pregledom literature ustanovljeno je da su u velikoj većini objavljenih radova na temu samozbijajućeg betona s gumom korišteni i zamjenski cementni materijali, koji su također varirani u određenim postotcima kako bi se ispitao i njihov utjecaj na svojstva samozbijajućeg betona s gumom u svježem stanju. U [Tablici 2.3](#) dan je kratak pregled istih, kako bi se mogli donijeti zaključci o utjecaju gume, ali i ostalih komponenata betona čije su količine varirane, na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju.

Bez obzira na vrstu gume, veličinu čestica, postotak zamjene ili zamijenjeni materijal većina autora [3], [7], [8], [14], [23], [38]–[50] izvijestila je o sličnom ponašanju SCC-a s gumom, tj. o smanjenju sposobnosti tečenja, sposobnosti zaobilaženja zapreka i otpornosti segregaciji te o povećanju viskoznosti s povećanjem sadržaja otpadne gume. Manji broj autora utvrdio je suprotno te je izvijestio o povećanju sposobnosti zaobilaženja zapreka [39], [48], [51] i smanjenju viskoznosti s povećanjem postotka zamjene gumenog agregata [48]. Si i sur. [49] smanjenje sposobnosti tečenja i povećanje viskoznosti pripisali su povećanju grube površine i površinskom trenju čestica gume. Slično su objašnjenje dali AbdelAleem i Hassan [43] koji su ponašanje svježeg samozbijajućeg betona objasnili preko oštih rubova gumenog agregata koji u kontaktu s okolnim zrnima agregata i u međusobnom kontaktu uzrokuju blokiranje iz čega proizlazi da je potrebno više energije kako bi se pomaknule čestice gume, što uzrokuje smanjenje sposobnosti tečenja i sposobnosti zaobilaženja zapreka. Većina rezultata objedinjenih u ovom odlomku u skladu su s Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1] iz čega se zaključuje da se prihvatljiva svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju mogu dobiti bez obzira na negativan učinak gumenog agregata na navedena svojstva, s tim da se u obzir mora uzeti optimalna količina zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom. Manji broj istraživača zamijenio je prirodni agregat gumenim agregatom iznad 40 % [8], [14], [46], dok je postotak zamjene kod većine eksperimentalnih istraživanja bio 15 % [41] ili 20 % [39], [48], [51], sve s ciljem održavanja prihvatljivih svojstava svježeg samozbijajućeg betona. U svim proučavanim istraživanjima drugih

autora mijenjan je sitni ili krupni agregat i to u postotku volumena ili u masenom postotku. Kod samozbijajućeg betona bez gume uobičajeno se koriste kemijski dodatci kako bi se održala prihvatljiva svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju, stoga je većina autora prilikom projektiranja sastava mješavine samozbijajućeg betona s gumom također koristila različite vrste kemijskih dodataka, tj. superplastifikatora (*engl. superplasticizer*) [3], [7], [8], [41], [42], [45]–[48], [51] i dodataka za promjenu viskoznosti (*engl. viscosity modified admixture*) [7], [45], [47], [51].

Kako bi se poboljšala veza između čestica gume i veziva, Ganesan i sur. [51] prethodno su tretirali gumeni agregat polivinil alkoholom, Aslani i sur. [7] metodom upijanja vode (*engl. water soaking method*), a Si i sur. [49] natrijevim hidroksidom (NaOH). Si i sur. [49] izvijestili su o sporijem smanjenju sposobnosti tečenja samozbijajućeg betona s gumom kada su čestice gume prethodno tretirane NaOH, dok se metoda upijanja vode dokazala kao ekonomična, jednostavna i isplativa. Najim i Hall [52] proveli su istraživanje samozbijajućeg betona prilikom kojega su prethodno gumu tretirali tehnikom premazivanja mortom (*engl. mortar pre-coating technique*) te su došli do zaključka da se poroznost povećala za 19 % u slučaju kada je gumeni agregat prethodno tretiran premazivanjem mortom. Ako se povećava poroznost betona, posljedično se smanjuje njegova čvrstoća, što predstavlja negativan utjecaj prethodnog tretiranja gume na navedeni način.

Tablica 2.3 Utjecaj veličine gume i udjela gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Autori	Vodovezivni omjer	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Vlakna	Mineralni dodatci	Sposobnost tečenja	Viskoznost	Sposobnost zaobilaženja zapreka	Otpornost segregaciji
Uygunoğlu i Topçu [46]	0,4 - 0,51	1 - 4	10, 20, 30, 40, 50	sitni agregat (volumen)	-	leteći pepeo	smanjena	povećana	-	-
Ganesan i sur. [51]	0,38	0 - 4,75	15, 20	sitni agregat (volumen)	čelična vlakna	leteći pepeo	blago smanjena	povećana	blago povećana	-
Emiroğlu i sur.. [8]	0,28	5 - 12	15, 30, 45, 60	krupni agregat (masa)	-	zgura	smanjena	-	-	-
Ismail i Hassan [14]	0,4	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	sitni agregat (volumen)	-	metakaolin, leteći pepeo, zgura	smanjena	povećana	smanjena	smanjena
Bideci i sur. [41]	0,5	dužina 25, 50, 75	5, 10, 15	krupni agregat (volumen)	-	zgura	smanjena	-	smanjena	smanjena
Aslani i sur. [7]	0,45	2, 5, 10	10, 20, 30, 40	sitni i krupni agregat (volumen)	-	leteći pepeo, zgura, silicijska prašina	smanjena	povećana	smanjena	-
Güneyisi [42]	0,35	0 - 4	5, 15, 25	sitni agregat (volumen)	-	leteći pepeo	smanjena	povećana	smanjena	-
AbdelAleem i Hassan [43]	0,4	< 4,75	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	čelična vlakna	leteći pepeo, zgura, metakaolin, silicijska prašina	smanjena	povećana	smanjena	smanjena
AbdelAleem i sur. [44]	0,4	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	sintetička vlakna čelična vlakna	metakaolin, leteći pepeo	smanjena	povećana	smanjena	smanjena

Tablica 2.3 Utjecaj veličine gume i udjela gume u sastavu samozbijajućeg betona na njegova svojstva u svježem stanju (nastavak)

Autori	vodovezivni omjer	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Vlakna	Mineralni dodatci	Sposobnost tečenja	Viskoznost	Sposobnost zaobilaženja zapreka	Otpornost segregaciji
Rahman i sur. [3]	0,53	1 - 4	28	sitni agregat (volumen)	-	-	smanjena	povećana	smanjena	-
Turatsinze i Garros [45]	0,4	4 - 10	10, 15, 20, 25	krupni agregat (volumen)	-	-	smanjena	-	-	smanjena
Bignozzi i Sandrolini [47]	0,34	0,5 - 2,0 0,05 - 0,7	22,2; 33,3	sitni agregat (volumen)	-	-	smanjena	-	smanjena	-
Mishra i Panda [48]	0,375	5 i 10	5, 10, 15, 20	krupni agregat (masa)	-	-	smanjena	smanjena	povećana	-
Si i sur. [49]	0,39	1,44 - 2,83	15, 25	sitni agregat (volumen)	-	leteći pepeo	smanjena	povećana	smanjena	-
Topçu i Bilir [50]	0,32	0 - 4	8; 16,90; 26,87	sitni agregat (masa)	-	leteći pepeo	smanjena	povećana	-	smanjena
Khalil i sur. [38]	0,45	0 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	-	-	smanjena	-	smanjena	-
Zaoiai i sur. [39]	0,43 - 0,47	0/3, 3/8	5/20	sitni /krupni agregat	-	-	smanjena	-	povećana	smanjena
Aslani i sur. [23]	0,45	5 - 10	20	krupni agregat (volumen)	-	leteći pepeo, zgura, silicijska prašina	smanjena	povećana	smanjena	-
Ismail i Hassan [40]	0,4	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	čelična vlakna	leteći pepeo, metakaolin	blago smanjena	povećana	smanjena	smanjena

2.3.2.2 Poroznost samozbijajućeg betona s gumom

Uygunoğlu i Topçu [46] pisali su o povećanju poroznosti mješavina samozbijajućeg morta s djelomičnom zamjenom sitnog agregata s otpadnim gumenim agregatom (1 - 4 mm). S vodocementnim omjerom 0,47 povećanje poroznosti iznosilo je 23 %, 29 %, 30 %, 41 % i 41 % pri 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 % zamjene volumena sitnog agregata gumenim agregatom. Ismail i Hassan [14] izvijestili su o povećanju sadržaja zraka s 1,5 % na 6,8 % u mješavinama samozbijajućeg betona nakon što su 40 % volumena sitnog agregata zamijenili gumenim agregatom veličine 0-4 mm. Povećanje sadržaja zraka u istraživanju [43] bilo je za 1,50 % nakon 20 %-tne volumenske zamjene sitnog agregata gumenim agregatom veličine 0-4,75 mm. Najim i Hall [52] proveli su istraživanje samozbijajućeg betona prilikom kojega su prethodno gumu tretirali tehnikom premazivanja mortom (*engl. mortar pre-coating technique*) te su došli do zaključka da se poroznost povećala za 19 % u slučaju kada je gumeni agregat prethodno tretiran. Istraživanje koje su proveli Ismail i Hassan [40] također je pokazalo slične rezultate kao prethodna istraživanja, tj. povećanje poroznosti za 3,5 % s povećanjem udjela gume od 0 % do 30 %. U ovom slučaju zamjenski je materijal također bio sitni agregat maksimalne veličine zrna 4,75 mm. U [Tablici 2.4](#) sumarno je prikazan utjecaj reciklirane gume na poroznost samozbijajućeg betona.

Tablica 2.4 Utjecaj veličine gume i udjela gume na poroznost samozbijajućeg betona

Autori	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Poroznost / sadržaj zraka
Uygunoğlu i Topçu [46]	1 - 4	0, 10, 20, 30, 40 i 50	Sitni agregat (volumen)	Povećanje s povećanjem udjela gume
Ismail i Hassan [14]	0 - 4	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 i 50	Sitni agregat (volumen)	
AbdelAleem i Hassan [43]	< 4,75	0, 5, 10, 15, 20, 25 i 40	Sitni agregat (volumen)	
Ismail i Hassan [40]	< 4,75	0, 5, 10, 15, 20, 25 i 30	Sitni agregat (volumen)	
Najim i Hall [52]	2 - 6	12	Sitni i krupni agregat (masa)	

Interpretirajući rezultate sumirane u [Tablici 2.4](#), može se istaknuti da se povećanjem udjela reciklirane gume u mješavinama samozbijajućeg betona povećava i njegova poroznost, tj. sadržaj zraka. Povećanje poroznosti može biti objašnjeno na isti način kao i zaključak dan u [Poglavlju 2.3.2.1](#). Granule gume imaju grubu površinu [49] i oštre rubove [43] te na taj način zadržavaju zrak i povećavaju poroznost samozbijajućeg betona.

2.3.2.3 Reologija samozbijajućeg betona s gumom

Güneyisi i sur. [53] istraživali su reološka svojstva svježeg samozbijajućeg betona s različitim vrstama gumenog agregata. Djelomično su mijenjali sitni i krupni agregat u mješavinama samozbijajućeg betona s gumenim agregatom veličine 0-4 mm i s komadićima gume duljine 10-40 mm. Tijekom eksperimentalnih istraživanja koristili su fiksni vodovezivni omjer (0,35), ukupni sadržaj veziva (520 kg/m^3) i leteći pepeo kao djelomičnu zamjenu cementu. Nadalje, koristili su tri različite veličine zrna gume, 0-1 mm, 1-4 mm i 0-4 mm i jednu veličinu komadića gume duljine 10-40 mm. Superplastifikator je korišten kako bi se postigla zahtijevana obradivost samozbijajućeg betona u svježem stanju. Reološka svojstva svježe mješavine samozbijajućeg betona s gumom istražena su uporabom reometra. Tijekom postupka ispitivanja vrijednosti momenta torzije bile su određene za različite vrijednosti brzine okretanja, tj. kutne brzine. Povećanjem sadržaja gume utvrđeno je i povećanje vrijednosti momenta torzije, neovisno o vrijednosti brzine okretanja (kružne/kutne brzine). Pri 25 %-tnoj zamjeni prirodnog agregata i kutnoj brzini od 0,050 okr/s vrijednosti momenta torzije za različite veličine zrna gume, tj. 0-1 mm, 1-4 mm, 0-4 mm i 10-40 mm, bile su veće za 4,2; 5,1; 4,6 i 6,5 puta. Nadalje, reološka svojstva svježeg samozbijajućeg betona bila su interpretirana dvjema vrstama modela – Herschel-Bulkley model i modificirani Binghamov model. Promatrane su varijacije u vrijednostima eksponenta n (Herschel-Bulkley model) i koeficijenta c/μ (modificirani Binghamov model). Uzimajući u obzir da su vrijednosti eksponenta n i koeficijenta c/μ za sve mješavine samozbijajućeg betona s gumom veće od jedan ($n > 1$) i veće od nula ($c/\mu > 0$), uočena je pojava posmičnog očvršćivanja (*engl. shear thickening*) ponašanja. Smanjenjem sadržaja gume u samozbijajućem betonu sustavno je smanjen eksponent n i koeficijent c/μ , što upućuje na povećanu vrijednost posmičnog očvršćivanja. Isto je ponašanje uočeno kod različitih vrsta gume kao zamjenskog materijala za prirodni agregat. S gumom veličine 0-1 mm, 1-4 mm, 0-4 mm i 10-40 mm povećanje u eksponentu n bilo je s 0,253 na 0,391; 1,054; 0,876 i 1,788, dok je povećanje koeficijenta c/μ bilo s 1,135 na 1,205; 1,410; 1,363 i 1,543, s povećanjem udjela gume s 0 % na 25 %.

Iz [Poglavlja 2.3.2.3](#) može se primijetiti da su potrebna dodatna ispitivanja reoloških svojstava samozbijajućeg betona s gumom kao zamjenskog materijala za prirodni krupni ili sitni agregat. S obzirom na nedostatan broj dosadašnjih eksperimentalnih ispitivanja reoloških svojstava samozbijajućeg betona s gumom, te zbog svoje važnosti u razumijevanju svojstava obradivosti te vrste samozbijajućeg betona, reološka svojstva SCRC trebala bi biti u području interesa budućih laboratorijskih ispitivanja.

2.3.3 Utjecaj reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

2.3.3.1 Gustoća u očvrslom stanju

Eksperimentalno istraživanje vezano za promjenu gustoće samozbijajućeg betona prilikom dodavanja gumenog agregata povezano je s činjenicom da je gustoća gume manja od gustoće prirodnog

agregata. U [Tablici 2.5](#) objedinjeni su rezultati nekoliko laboratorijskih istraživanja vezanih za gustoću samozbijajućeg i običnog betona s recikliranom gumom.

Tablica 2.5 Utjecaj veličine gume i udjela gume na gustoću samozbijajućeg i običnog betona

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Bideci i sur. [41]	SCC	Duljina 75, 50, 25 poprečni presjek 5 × 5	5, 10, 15	krupni agregat (volumen)	smanjenje s povećanjem udjela gume u betonu
Jedidi i sur. [54]	SCC	0/4, 4/8	10, 20 i 30	krupni agregat (volumen)	
Turatsinze i Garros [45]	SCC	4 - 10	10, 15, 20, 25	krupni agregat (volumen)	
Uygunoğlu i Topçu [46]	SCC	1 - 4	10, 20, 30, 40, 50	sitni agregat (volumen)	
AbdelAleem i Hassan [43]	SCC	< 4,75	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	
Zaoiai i sur. [39]	SCC	0/3, 3/8	5, 20	sitni i krupni agregat	
Kumar i sur. [55]	C	< 4,75 i 20	10, 20, 30 i 40	krupni i sitni agregat (masa)	
Zheng i sur. [56]	C	< 2,6 i 4 - 15	15, 30 i 45	krupni agregat (volumen)	
Paine i Dhir [57]	C	0,5 - 1,5; 2 - 8; 5 - 25	do 63	krupni i sitni agregat (masa)	
Pedro i sur. [58]	C	< 2	5 to 15	sitni agregat (volumen)	
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton					

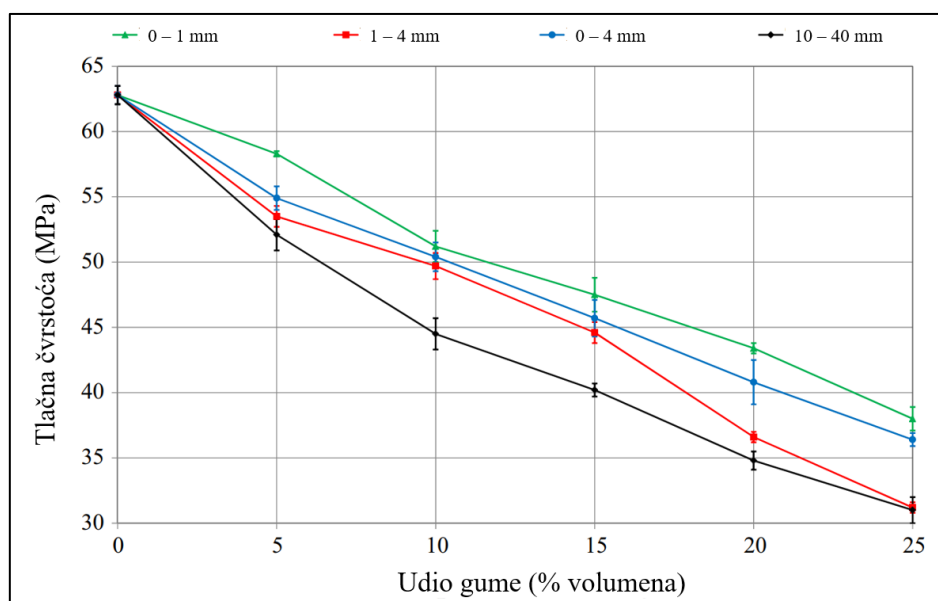
Iz danih rezultata vidljiv je jednak utjecaj gume kod svih istraživača, neovisno o vrsti betona, veličini gume, udjelu zamjene te zamijenjenom materijalu. Povećanjem udjela gume u sastavu betona, kako je i očekivano, smanjuje se gustoća betona kod obje vrste betona. Budući da je specifična težina gume manja od specifične težine prirodnog agregata, smanjenje gustoće neupitno je kod obje vrste betona, što doprinosi smanjenju ukupne mase potencijalne buduće (nosive) konstrukcije.

2.3.3.2 Tlačna čvrstoća

Velik broj znanstvenika u svojim se istraživanjima bavi proučavanjem utjecaja zamjene prirodnog agregata na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona. Smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona neizbježno je kada se prirodni krupni ili sitni agregat zamijeni recikliranom gumom, neovisno o veličini gume, vrsti gume, postotku zamjene ili vrsti zamijenjenog agregata.

Kako je prikazano u [Tablici 2.6](#) i na [Slici 2.7](#), s većim udjelom gume kao zamjenskim materijalom za prirodni agregat veća je i vrijednost opadanja konačne tlačne čvrstoće. Smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće može se pripisati slaboj adheziji i čvrstoći veze između zrna gume i cementne paste, maloj vrijednosti modula elastičnosti gume u odnosu na modul elastičnosti prirodnog agregata i većoj količini zarobljenog zraka između čestica gume i cementne paste [7], [43]. Prema [59], čestice

gume ponašaju se kao šupljine u uzorcima očvrstnalog betona uzrokujući smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona.



Slika 2.7 Utjecaj zamijenjenog materijala (sitni ili krupni agregat), udjela gume i vrste gume na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona [53]

Tablica 2.6 Utjecaj veličine gume i udjela gume na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona starosti 28 dana

Autori	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje (%)
Ganesan i sur. [51]	0 - 4,75	15, 20	sitni agregat (volumen)	7, 13
Bideci i sur. [41]	duljina - 25	5, 10, 15	krupni agregat (volumen)	17, 20, 47
	duljina - 50			52, 54, 52
	duljina - 75			60, 6, 58
AbdelAleem i Hassan [43]	< 4,75	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	22, 39, 48, 58
Ismail i Hassan [14]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	sitni agregat (volumen)	16, 21, 29, 42, 46, 53, 67
Uygunoğlu i Topçu [46]	1 - 4	10, 20, 30, 40, 50	sitni agregat (volumen)	12, 32, 42, 44, 48
Yung i sur. [60]	sito #30 (0,6)	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	10, 22, 16, 29
	sito #50 (0,3)			4, 27, 27, 32
	sito #30, #50			19, 25, 40, 40
AbdelAleem i sur. [44]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	12, 29, 41, 49, 51, 58
Aslani i sur. [7]	2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	29, 41, 49, 61
	5			19, 34, 41, 48
	10		krupni agregat (volumen)	38, 56, 62, 67

Najim i Hall [61]	2 - 6	5, 10, 15	sitni agregat (masa)	33, 42, 53
			krupni agregat (masa)	18, 40, 58
			krupni i sitni agregat (masa)	18, 31, 49
Emiroğlu i sur. [8]	5 - 12	15, 30, 45, 60	krupni agregat (masa)	11, 34, 54, 65
Güneyisi [42]	0 - 4	5, 15, 25	sitni agregat (volumen)	21, 40, 64
Topçu i Bilir [50]	0 - 4	8; 16,90; 26,87	sitni agregat (masa)	23, 40, 71
Hilal [59]	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	6, 12, 16, 21, 31
	1 - 4			38, 18, 26, 37, 46
	0 - 4			0, 10, 15, 21, 32
Rahman i sur. [3]	1 - 4	28	sitni agregat (volumen)	30
Turatsinze i Garros [45]	4 - 10	10, 15, 20, 25	krupni agregat (volumen)	33, 54, 65, 73
Ismail i sur. [62]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	12, 19, 28, 39, 50, 61
Bignozzi i Sandrolini [47]	0,5 – 2,0 0,05 – 0,7	22,2; 33,3	sitni agregat (volumen)	25, 39
Mishra i Panda [48]	5 i 10	5, 10, 15, 20	krupni agregat (masa)	11, 31, 39, 47
Si i sur. [49]	1,44 - 2,83	15, 25	sitni agregat (volumen)	33, 52
Khalil i sur. [38]	0 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	17, 26, 37, 40
Zaoiai i sur. [39]	0/3	5	sitni agregat	37
	3/8	20	krupni agregat	36
Güneyisi i sur. [53]	< 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	7, 18, 24, 31, 39
	1 - 4			15, 21, 29, 42, 50
	< 4			13, 20, 27, 35, 42
	duljina 10 - 40		krupni agregat (volumen)	17, 29, 36, 45, 51
Aslani i sur. [23]	5 - 10	20	krupni agregat (volumen)	56
Ismail i Hassan [40]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	12, 29, 41, 49, 51, 58

Iz nekoliko eksperimentalnih istraživanja u kojima je cement djelomično zamijenjen mineralnim dodatcima, utvrđeno je povećanje tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona s gumom. Metakaolin i silicijska prašina pokazali su se kao važniji mineralni dodatci s obzirom na njihov utjecaj na relativno povećanje ili održanje vrijednosti tlačne čvrstoće betona. S 20 % metakaolina relativno povećanje tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona iznosilo je 44 %, 47 % i 56 % s 20 %, 30 % i 40 %-tnom zamjenom prirodnog agregata s gumom [14]. U odnosu na beton s gumom gdje guma nije prethodno tretirana, manje poboljšanje tlačne čvrstoće betona s gumom uočeno je kod betona gdje je

guma prethodno tretirana natrijevim hidroksidom (NaOH) [49]. S druge strane, utjecaj letećeg pepela pokazao se negativnim jer su uzorci očvrstnalog samozbijajućeg betona imali manju tlačnu čvrstoću nego uzorci bez letećeg pepela [42].

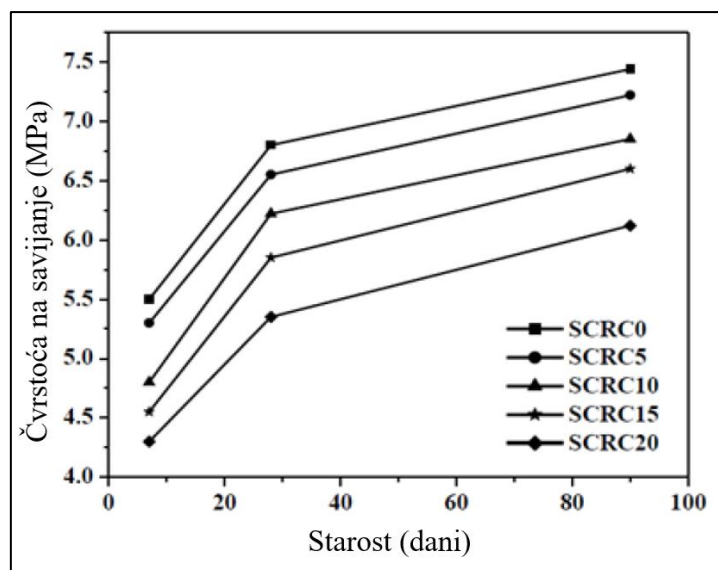
Prema rezultatima ispitivanja danim u [Poglavlju 2.3.3.2](#) može se zaključiti da je moguća primjena recikliranih otpadnih automobilskih guma kao zamjenskog materijala prirodnom sitnom i krupnom agregatu s vrijednostima tlačne čvrstoće iznad dopuštene donje granice za konstrukcijske primjene, tj. 17 MPa [61]. Ipak, postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranom gumom mora se racionalno odrediti kako bi se ograničilo smanjenje promatranog svojstva na prihvatljive vrijednosti.

2.3.3.3 Čvrstoća na savijanje

U većini su slučajeva različiti autori zaključili da se primjenom otpadne automobilske gume u samozbijajućem betonu smanjuje vrijednost čvrstoće na savijanje. Za isti postotak zamjene smanjenje čvrstoće na savijanje slično je, neovisno o veličini gumenog agregata, kako je i prikazano u [Tablici 2.7](#) i na [Slici 2.8](#).

Tablica 2.7 Utjecaj veličine gume i udjela gume na čvrstoću na savijanje samozbijajućeg betona starosti 28 dana

Autori	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje (%)
AbdelAleem i Hassan [43]	< 4,75	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	20, 35, 42, 46
Ganesan i sur. [51]	0 - 4,75	15, 20	sitni agregat (volumen)	15, 10 (povećanje)
Ismail i Hassan [14]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	sitni agregat (volumen)	3, 9, 13, 20, 24, 31, 42
Uygunoğlu i Topçu [46]	1 - 4	10, 20, 30, 40, 50	sitni agregat (volumen)	6, 3, 9, 18, 29
AbdelAleem i sur. [44]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	4, 11, 16, 19, 25, 32
Najim i Hall [61]	2 - 6	5, 10, 15	sitni agregat (masa)	11, 15, 35
			krupni agregat (masa)	5, 27, 39
			krupni i sitni agregat (masa)	10, 27, 27
Hilal [59]	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	12, 17, 20, 36, 42
	1 - 4			15, 21, 25, 40, 45
	0 - 4			14, 19, 23, 38, 44
Ismail i sur. [62]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	5, 7, 12, 16, 28, 35
Mishra i Panda [48]	5 i 10	5, 10, 15, 20	krupni agregat (masa)	4, 9, 14, 21
Khalil i sur. [38]	0 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	17, 27, 30, 33
Zaoiai i sur. [39]	0/3	5	sitni agregat	24
	3/8	20	krupni agregat	37
Ismail i Hassan [40]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	5, 11, 16, 20, 26, 32



Slika 2.8 Utjecaj zamjene prirodnog agregata s gumom na čvrstoću na savijanje uzoraka samozbijajućeg betona starosti 7, 28 i 90 dana [48]

Smanjenje čvrstoće samozbijajućeg betona na savijanje može biti objašnjeno na isti način kao i u [Poglavlju 2.3.3.2](#). Zarobljeni zrak između čestica gume i cementne paste, koji se pojavljuje zbog grube površine gume, ima negativan utjecaj na vrijednost čvrstoće na savijanje [61], kao što ima i negativan utjecaj na vrijednosti tlačne čvrstoće. Međutim, neki od ispitnih uzoraka nisu doživjeli brzi slom tijekom postupka ispitivanja, vrlo vjerojatno zbog elastičnog ponašanja čestica gume [46]. Prema [51] uočeno je povećanje vrijednosti čvrstoće na savijanje u laboratorijskim ispitivanjima. Slično zaključku [Poglavlja 2.3.3.2](#) relativno povećanje vrijednosti čvrstoće na savijanje moguće je djelomičnom zamjenom cementa mineralnim dodatcima koji mogu poboljšati promatrano svojstvo samozbijajućeg gumiranog betona te značajno umanjiti smanjenje vrijednosti čvrstoće na savijanje [62].

2.3.3.4 Vlačna čvrstoća cijepanjem

Iz rezultata pregleda literature može se nedvojbeno zaključiti da povećanjem sadržaja gume u samozbijajućem betonu dolazi do smanjenja vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem, neovisno o postotku zamjene, veličini gume i zamijenjenom materijalu, kao što je i prikazano u [Tablici 2.9](#).

Postotak zamjene raste maksimalno do 50 % [14] te je najizraženije smanjenje vlačne čvrstoće cijepanjem vidljivo pri ovom stupnju zamjene. Isto kao i u [Poglavljima 2.3.3.2](#) i [2.3.3.3](#) promatrano mehaničko svojstvo samozbijajućeg betona može biti poboljšano primjenom različitih mineralnih dodataka [62] ili metodama prethodnog tretiranja gume [49]. Ipak, potrebno je istaknuti da se prethodno tretiranje gume općenito pokazalo manje uspješnom metodom poboljšanja mehaničkih svojstava betona u odnosu na metodu uporabe različitih mineralnih dodataka. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem za 19 % vidljivo je kod uzoraka samozbijajućeg gumiranog betona starosti 28 dana koji se prethodno tretiraju metodom premazivanja mortom [52]. Dodatna metoda poboljšanja vlačne čvrstoće cijepanjem

može se postići dodavanjem vlakana većih duljina koja pozitivno utječu na vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem [44].

Tablica 2.9 Utjecaj veličine gume i udjela gume na vlačnu čvrstoću cijepanjem samozbijajućeg betona pri starosti 28 dana

Autori	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje (%)
AbdelAleem i Hassan [43]	< 4,75	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	17, 32, 34, 41
Ismail i Hassan [14]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	sitni agregat (volumen)	1, 8, 20, 31, 38, 42, 57
Aslani i sur. [7]	2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	8, 23, 27, 39
	5			17 (povećanje), 15, 15, 33
	10		krupni agregat (volumen)	21, 27, 32, 50
AbdelAleem i sur. [44]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	9, 16, 20, 27, 33, 40
Najim i Hall [52]	2 - 6	5, 10, 15	sitni agregat (masa)	29, 27, 42
			krupni agregat (masa)	18, 31, 44
			krupni i sitni agregat (masa)	38, 29, 47
Hilal [59]	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	16, 19, 24, 28, 44
	1 - 4			19, 23, 27, 36, 49
	0 - 4			18, 20, 26, 34, 48
Ismail i sur. [62]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	2, 10, 23, 31, 42, 52
Mishra i Panda [48]	5 i 10	5, 10, 15, 20	krupni agregat (masa)	5, 11, 19, 24
Si i sur. [49]	1,44 - 2,83	15, 25	sitni agregat (volumen)	20, 33
Khalil i sur. [38]	0 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	4, 12, 9, 26
Aslani i sur. [23]	5 - 10	20	krupni agregat (volumen)	56
Ismail i Hassan [40]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	4, 13, 19, 24, 33, 40

2.3.3.5 Statički i dinamički modul elastičnosti

Zamjena prirodnog sitnog i krupnog agregata s gumom ima negativan utjecaj na statički i dinamički modul elastičnosti samozbijajućeg betona. Statički i dinamički modul elastičnosti smanjeni su povećavanjem postotaka zamjene prirodnog agregata s gumom. Takvo ponašanje betona može se pripisati zarobljenom zraku između čestica gume i cementne paste te manjem modulu elastičnosti gume od modula elastičnosti prirodnog agregata [61]. Čestice gume imaju slabu vezu s cementnom pastom te se ponašaju kao šupljine u betonu [59]. Dodatno, pod tlačnim opterećenjem čestice gume odvajaju se od cementne paste te se granica sloma lakše i brže dosegne prilikom nanošenja navedenog tlačnog opterećenja [47]. Međutim, relativno povećanje vrijednosti modula elastičnosti moguće je postići

pomoću istih metoda kao i u [Poglavljima 2.3.3.2, 2.3.3.3 i 2.3.3.4](#). Sumarni tablični prikaz utjecaja gume na modul elastičnosti samozbijajućeg betona prikazan je u [Tablici 2.10](#).

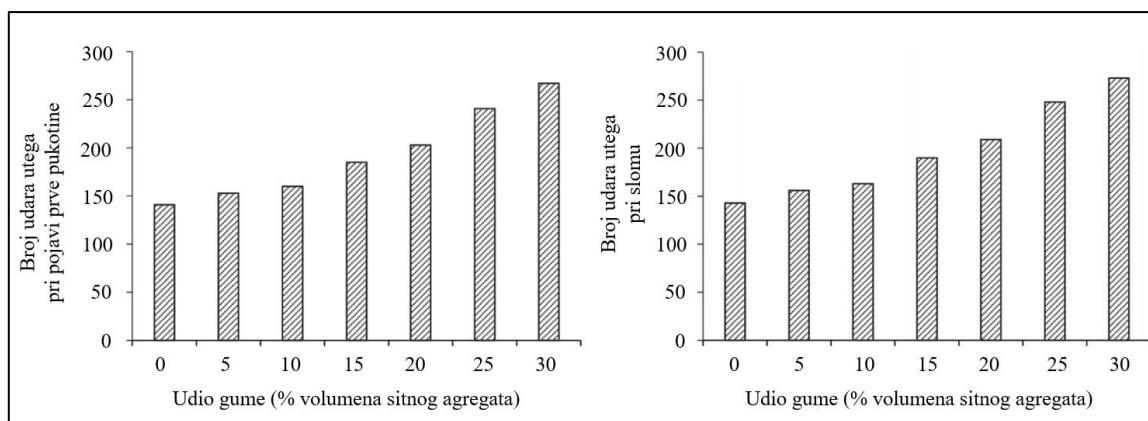
Tablica 2.10 Utjecaj veličine gume i udjela gume na modul elastičnosti samozbijajućeg betona pri starosti 28 dana

Autori	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje (%)
Ismail i Hassan [14]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	sitni agregat (volumen)	6, 8, 18, 31, 32, 40, 54
Uygunoğlu i Topçu [46]	1 - 4	10, 20, 30, 40, 50	sitni agregat (volumen)	7, 15, 24, 35, 44
AbdelAleem i sur. [44]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	12, 29, 41, 49, 51, 58
Najim i Hall [61]	2 - 6	5, 10, 15	sitni agregat (masa)	2, 7, 21
			krupni agregat (masa)	12, 21, 30
			krupni i sitni agregat (masa)	7, 16, 26
Hilal [59]	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	4, 9, 12, 21, 33
	1 - 4			10, 18, 26, 29, 39
	0 - 4			8, 15, 17, 25, 35
Rahman i sur. [3]	1 - 4	28	sitni agregat (volumen)	10 - 20
Turatsinze i Garros [45]	4 - 10	10, 15, 20, 25	krupni agregat (volumen)	34, 46, 57, 71
Ismail i sur. [62]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	4, 8, 19, 28, 34, 46
Bignozzi i Sandrolini [47]	0,5 - 2,0 0,05 - 0,7	22,2; 33,3	sitni agregat (volumen)	19, 28
Si i sur. [49]	1,44 - 2,83	15, 25	sitni agregat (volumen)	6, 7
Ismail i Hassan [40]	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	6, 12, 16, 25, 32, 36

2.3.3.6 Otpornost na udar

Utjecaj gumenog agregata na udarnu otpornost samozbijajućeg betona proučavali su AbdelAleem i sur. [44]. Zaključili su da se otpornost samozbijajućeg betona na udar povećala kada je guma zamijenila prirodni agregat, u obje vrste ispitivanja uzoraka metodom padajućeg utega (*engl. drop weight test*).

Rezultati ispitivanja metodom padajućeg utega ([Slika 2.8](#)) prikazuju povećanje broja udaraca pri konačnom slomu i povećanje broja udaraca pri pojavi prve pukotine za 91 % i 89 % kada je postotak zamjene prirodnog agregata s gumom variran od 0 % do 30 %, dok je ispitivanje metodom savijanja (*engl. flexural loading test*) pokazalo povećanje konačne udarne energije za 2,42 puta kada je postotak zamjene prirodnog agregata s gumom variran od 0 % do 25 %.



Slika 2.8 Otpornost samozbijajućeg betona s gumom na udar prilikom ispitivanja metodom padajućeg utega [44]

Khalil i sur. [38] također su proučavali utjecaj primjene gumenog agregata u samozbijajućem betonu na otpornost na udar. Rezultati ispitivanja metodom padajućeg utega pokazali su povećanje broja udaraca pri konačnom slomu i u broju udaraca pri pojavi prve pukotine za 2,8 i 3 puta, tj. 179 % i 200 % kada je postotak zamjene varirao od 0 % do 30 %. Ispitivanja koja su proveli Ismail i Hassan [40] ukazuju također na isti zaključak kao i kod prethodnih autora.

Budući da se manji broj autora bavio ispitivanjem udarne otpornosti samozbijajućeg betona s gumom, ispitivanje promatranog svojstva ostavlja dovoljno prostora i potencijala za buduća eksperimentalna istraživanja. Korisno je napomenuti da su se određeni autori bavili ispitivanjem udarne otpornosti običnog betona [6], [58], [63] te da su rezultati njihovih ispitivanja u sukladnosti s rezultatima ispitivanja otpornosti samozbijajućeg betona na udar (Tablica 2.11). Iz Poglavlja 2.3.3.6 može se zaključiti da se primjenom gumenog agregata, kako u običnom, tako i u samozbijajućem betonu, povećava udarna otpornost betona. Tako se ponašanje može pripisati maloj krutosti gumenog agregata koja uzrokuje povećanje otpornosti na stvaranje pukotina i poboljšanje duktilnosti uzoraka samozbijajućeg betona [40], [44]. Ipak, još uvijek postoji mnogo nepoznanica u ponašanju samozbijajućeg betona s gumom i njegove otpornosti na udar, stoga su potrebna buduća laboratorijska istraživanja zbog moguće primjene samozbijajućeg betona u betonskim konstrukcijama.

Tablica 2.11 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na udar

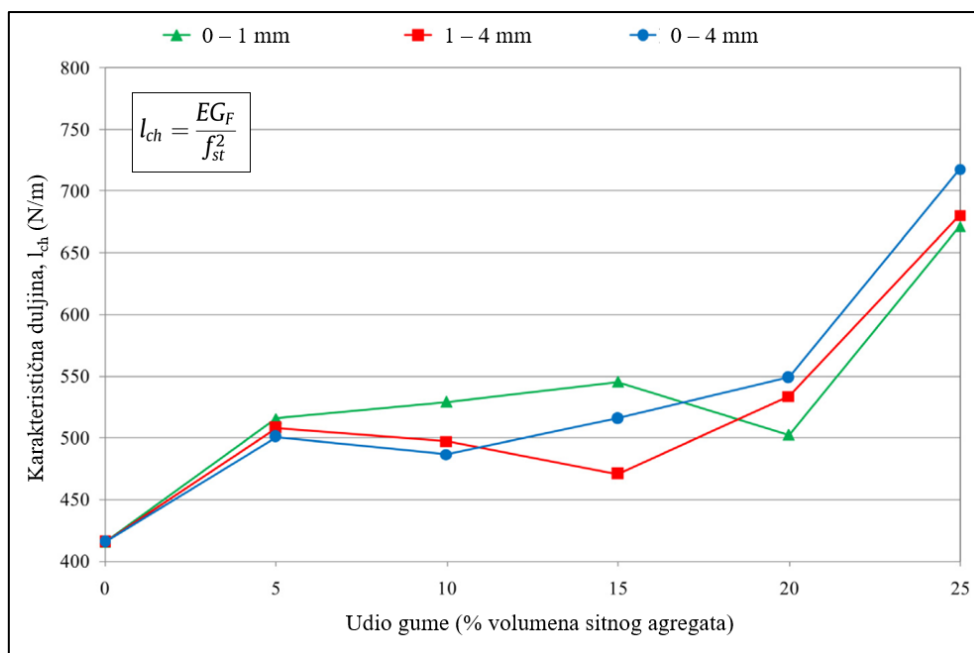
Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
AbdelAleem i sur. [44]	SCC	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	pri povećanju udjela gume s 0% na 30 % značajno je poboljšana otpornost na udar za 89 % pri pojavi prve pukotine te za 91 % pri otkazivanju (slomu) uzorka
Khalil i sur. [38]	SCC	0 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (volumen)	poboljšana otpornost na udar za 1,8; 2,5; 3; 2,5 puta pri pojavi prve pukotine i za 1,8; 2,4; 2,8; 2,4 pri otkazivanju (slomu)
Ismail i Hassan [40]	SCC	< 4,75	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni agregat (volumen)	poboljšana otpornost na udar za 9 %, 13 %, 31 %, 44 %, 71 %, 89 % pri pojavi prve pukotine i za 9 %, 14 %, 33 %, 46 %, 73 %, 91 % pri otkazivanju (slomu)
Miller i Tehrani [6]	C	< 4,75	20, 40, 60, 80, 100	krupni agregat (volumen)	nema značajnog trenda povećanja ili smanjenja otpornosti betona na udar
Vadivel i sur. [63]	C	< 2,36 i 20	6	sitni i krupni agregat (volumen)	poboljšanje otpornosti na udar za 20 %
Pedro u sur. [58]	M	< 2	5, 10, 15	sitni agregat (volumen)	poboljšana otpornost na udar, povećanje promjera udubljenja za 1,67 i 2 puta
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton, M – mort					

2.3.3.7 Duktilnost i krtost

Duktilnost uzoraka samozbijajućeg betona moguće je povećati djelomičnom zamjenom sitnog prirodnog agregata gumom (veličina 0-4 mm) [59]. Na [Slici 2.9](#) vidljivo je povećanje karakteristične duljine uzoraka (l_{ch}) za 21 %, 17 %, 24 %, 32 % i 73 % kada je 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % volumena sitnog agregata zamijenjeno gumom veličine 0-4 mm. U određenim istraživanjima mjera za duktilnost karakteristična je duljina (l_{ch}) i utvrđuje se pomoću izraza [59]:

$$l_{ch} = \frac{E \times G_F}{f_{st}^2} \quad (2.1)$$

gdje su E , G_F i f_{st} modul elastičnosti, energija loma i vlačna čvrstoća cijepanjem.



Slika 2.9 Odnos između karakteristične duljine (l_{ch}) i postotka zamjene sitne frakcije s gumom [59]

Utjecaj zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom na duktilnost uzoraka samozbijajućeg betona nije u potpunosti istražena, a očigledno je da se mali broj autora bavio tom tematikom. Veći dio autora bavio se ispitivanjem običnog betona i utjecaja primjene gume na njegovu duktilnost [56], [63]–[68], a objedinjeni rezultati njihovih istraživanja prikazani su u [Tablici 2.12](#).

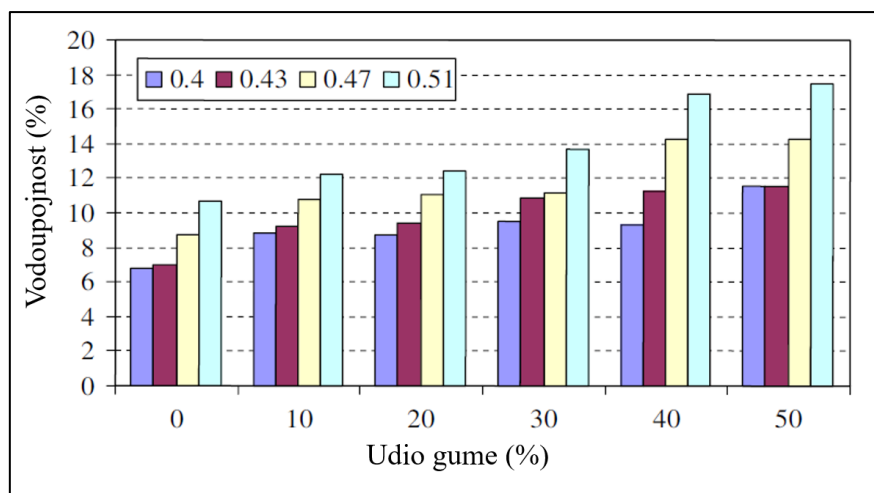
Rezultati prikazani u [Tablici 2.12](#) obećavajući su jer su svi autori naveli povećanje duktilnosti običnog betona s povećanjem udjela gume u betonu. Međutim, kako bi se mogao donijeti konkretan zaključak o utjecaju primjene gume u samozbijajućem betonu, moraju se provesti daljnja istraživanja zbog nedostatka rezultata ispitivanja duktilnosti samozbijajućeg betona s gumom.

Tablica 2.12 Utjecaj veličine gume i udjela gume na duktilnost samozbijajućeg i običnog betona

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Hilal [59]	SCC	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	povećana duktilnost za 24 %, 27 %, 31 %, 21 %, 62 %
		1 - 4			povećana duktilnost za 22 %, 20 %, 13 %, 28 %, 64 %
		0 - 4			povećana duktilnost za 21 %, 17 %, 24 %, 32 %, 73 %
Vadivel i sur. [63]	C	0 - 2,36 i 20	3, 6	sitni i krupni agregat (volumen)	beton s gumom (6 %) apsorbira 19 % više energije nego beton bez gume
Gesoglu i sur. [15]	C	1 - 4	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	povećana duktilnost za 44 %, 168 %
		< 10	10, 20	krupni agregat (ukupni volumen)	smanjena duktilnost za 20 %, 21 %
		0,1 - 1	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	smanjena duktilnost za 30 %, 11 %
Youssfi i sur. [65]	C	0,15 - 2,36	5, 10, 20	sitni agregat (volumen)	povećana duktilnost svih mješavina betona s gumom
Zheng i sur. [56]	C	< 2,6	15, 30, 45	krupni agregat (volumen)	povećana duktilnost, indeks krtosti manji za 45 %, 52 %, 54 %
		4 - 15	15, 30, 45		povećana duktilnost, indeks krtosti manji za 27 %, 46 %, 64 %
Elghazouli i sur. [66]	C	0/5, 5/10, 10/20	45, 60	sitni i krupni agregat	povećana duktilnost u odnosu na beton bez gume
Gesoglu i sur. [67]	C	< 4 i 10 - 40 (dužina)	5, 10, 15, 20, 25, 30	sitni i krupni agregat	pri 5 %-tnom i 20 %-tnom udjelu gume duktilnost (karakteristična dužina) povećana je za 1,85 i 3,39 puta
Xie i sur. [68]	C	0,85 - 1,4	4, 8, 12, 16	sitni agregat (volumen)	interakcija gume i čeličnih vlakana poboljšava duktilnost betona
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton					

2.3.3.8 Vodupojnost / Upijanje vode

Uygunoğlu i Topçu [46] bavili su se ispitivanjem upijanja vode samozbijajućih mortova te su došli do zaključka da se djelomičnom zamjenom sitnog agregata gumenim agregatom veličine 1-4 mm povećava upijanje vode promatranih uzoraka, za sva četiri vodopraškasta omjera (v/p) za koja su provjeravali navedeno svojstvo ([Slika 2.10](#)). Povećanjem omjera v/p, upijanje vode također ima trend povećanja, identično kao i kada se povećavao sadržaj gume. S v/p = 0,4, povećanje upijanja vode iznosilo je otprilike 38 %, 38 %, 46 %, 43 % i 77 % s postotkom zamjene sitnog agregata od 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 %.



Slika 2.10 Utjecaj vodopraškastog omjera (v/p) i postotka zamjene prirodnog sitnog agregata gumenim agregatom na svojstvo upijanja vode samozbijajućih mortova [46]

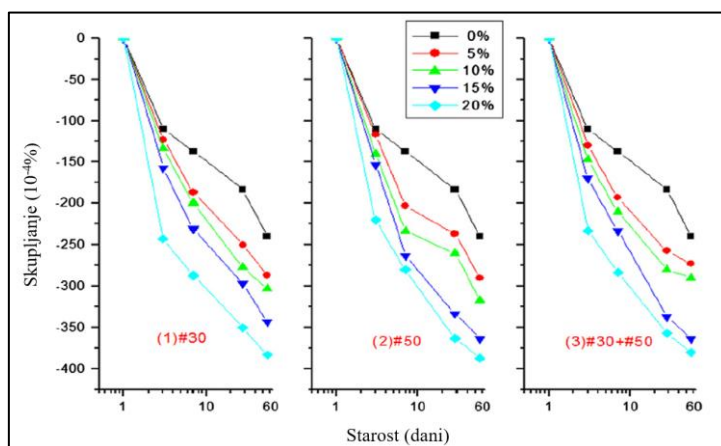
Bideci i sur. [41] također su se bavili ispitivanjem upijanja vode betona. Došli su do zaključka da se s 15 % gumenog agregata kao zamjene za prirodni agregat upijanje vode u uzorcima samozbijajućeg betona povećalo do 88 % za gumeni agregat različitih dužina (25, 50 i 70 mm). Bignozzi i Sandrolini [47] djelomično su zamijenili prirodni sitni agregat u mješavinama samozbijajućeg betona u postotku od 22,2 % i 33,3 % te su kao rezultat dobili povećano upijanje vode za navedene postotke od 4 % i 10 %. Rezultati ispitivanja upijanja vode (Gesoglu i Güneyisi) [69] pokazuju sličan trend povećanja upijanja vode s povećanjem sadržaja gume u samozbijajućem betonu. Povećanja upijanja vode u uzorcima samozbijajućeg betona starosti 28 i 90 dana iznosila su 3 %, 11 %, 34 % i 3 %, 8 %, 29 % s postotkom zamjene prirodnog agregata od 5 %, 15 % i 25 %. Brojni su se autori bavili proučavanjem upijanja vode običnog betona s gumom [55], [58], [70]–[72] te su došli do istog zaključka kao i autori koji su se bavili proučavanjem i istraživanjem svojstva upijanja vode kod samozbijajućeg betona.

Iz [Poglavlja 2.3.3.8](#) može se zaključiti da se mijenjajući prirodni agregat gumom povećava upijanje vode samozbijajućeg i običnog betona, i to po pravilu da je upijanje vode veće pri većem postotku zamjene prirodnog agregata gumom. To se ponašanje može objasniti pomoću zarobljenog zraka koji se nalazi na sučelju između čestica gume i cementne paste [46], [47] i pomoću grube površine granula gume [69]. Nadalje, povećanje upijanja vode može također biti postignuto povećanjem vodopraškastog omjera [46].

2.3.3.9 Skupljanje

Si i sur. [49] su u mješavinama samozbijajućeg betona djelomično zamijenili sitni agregat gumenim agregatom promjera 1,44–2,83 mm te su zaključili da povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata gumom raste skupljanje betona. Do sličnog su zaključka došli Uygunoğlu i Topçu [46] ispitivanjem uzoraka samozbijajućih mortova. Oni su djelomično zamijenili sitni agregat gumom

veličine 1-4 mm. Zamjena je bila na razini volumena i to u postotku od 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 %. S $v/p = 0,51$, povećanje skupljanja uzoraka betona nakon 180 dana bilo je otprilike 1,74; 1,83; 1,96; 3 i 4 puta veće u odnosu na referentnu mješavinu bez gume, s postotkom sadržaja gume od 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 %. Isti su autori zaključili da se povećanjem omjera v/p povećava i mjera skupljanja betona. Yung i sur. [60] grafički su prikazali kako povećanje udjela gume u betonu utječe na povećanje mjere skupljanja (Slika 2.11). Navedeni su autori sitni agregat (pijesak) zamijenili gumenim agregatom veličine #30 = 0,595 mm i #50 = 0,297 mm. Postotak zamjene iznosio je 0 %, 5 %, 10 %, 15 % i 20 % volumena. Prosječna promjena duljine uzorka s 5 %-tnom volumenskom zamjenom bila je 35 % veća nego promjena duljine referentnog uzorka. Kako se povećavala količina gumenog agregata u uzorcima, tako se povećavala i prosječna duljina uzorka. 20 %-tnom zamjenom prosječna promjena duljine uzorka bila je 95 % veća nego kod promjene duljine kontrolnog uzorka (Slika 2.11). Zaoia i sur. [39] također su se bavili ispitivanjem skupljanja uzoraka samozbijajućeg betona s gumom (veličina gume 0/3 i 3/8), starosti uzoraka tijekom ispitivanja bile su 28, 90, 200 i 300 dana. Skupljanje je bilo najviše izraženo nakon 300 dana, što i pokazuju rezultati ispitivanja, gdje je iznos skupljanja, uspoređujući s referentnim uzorkom, bio veći za 16 %, 33 %, 20 % i 59 % pri 2,5 %, 5 %, 10 % i 20 %-tnoj zamjeni prirodnog agregata gumom.



Slika 2.11 Utjecaj gumenog agregata na skupljanje [60]

Skupljanje može biti jedan od ključnih faktora za projektiranje nosivih elemenata konstrukcije zbog promjene duljine betonskih elemenata u vremenu te se zbog navedene činjenice pristupilo daljnjem pregledu literature o utjecaju gume na skupljanje običnog betona. Autori koji su se bavili proučavanjem običnog betona s gumom došli su do istog zaključka kao i autori koji su se bavili proučavanjem skupljanja samozbijajućeg betona s gumom. Povećanjem udjela gume u betonu povećavale su se vrijednosti skupljanja betona [58], [73], [74].

Iz Poglavlja 2.3.3.9 bitno je napomenuti da su autori složni oko činjenice da se povećanjem udjela gume povećava i vrijednost skupljanja betona te njegove dugotrajne deformacije. Skupljanje je u izravnoj vezi s vodovezivnim i vodopraškastim omjerom. Povećanjem bilo kojeg od navedena dva

omjera poroznost uzoraka također raste uzrokujući i povećanje skupljanja betona. Isto tako, povećane vrijednosti skupljanja betona s gumom mogu biti objašnjene i pomoću modula elastičnosti gume čija je vrijednost manja nego vrijednost modula elastičnosti prirodnog agregata, tj. krutost gumenog agregata manja je od prirodnog agregata, uzrokujući veće deformacije dok se cementna pasta skuplja [46], [49].

2.3.3.10 Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Djelomičnom zamjenom sitnog agregata u samozbijajućem betonu s gumom (0-4 mm) smanjuje se vrijednost tlačne čvrstoće uzoraka nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [50]. Smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće veće je što je veći postotak zamjene prirodnog agregata gumom. Postotkom zamjene od 0 kg/m³, 60 kg/m³, 120 kg/m³ i 180 kg/m³ smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće iznosilo je 15 %, 28 % i 28 % [50]. Nažalost, ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja samozbijajućeg betona s gumom do sada zauzima vrlo malen prostor u obliku eksperimentalnog istraživanja. Veći broj autora bavio se ispitivanjem otpornosti običnog betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te su mjerili otpornost na dva načina, putem smanjenja vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka te putem smanjenja mase uzoraka nakon izlaganja niskim i visokim temperaturama ([Tablica 2.13](#)).

Tablica 2.13 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Topçu i Bilir [50]	SCC	0 - 4	60, 120, 180 kg/m ³	sitni agregat (masa)	nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja tlačna čvrstoća smanjena je za 9 %, 15 %, 28 %, 28 %
Zhu i sur. [75]	C	#60 (0,250), #80 (0,177)	30 kg/m ³	sitni agregat (masa)	povećanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja za 88 (#60) i 13% (#80)
		#20 (0,841), #40 (0,420), #200 (0,074)			smanjenje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja za 38 %, 25 % i 13 %
Richardson i sur. [11]	C	< 2,36	0; 0,6	cement (masa) - guma kao dodatak betonu	nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak je mase 12 % i 1 %, dok je nakon istog broja ciklusa tlačna čvrstoća betona s gumom u usporedbi s tlačnom čvrstoćom betona bez gume 2,58 puta veća
Richardson i sur. [5]	C	0,5	0; 0,6	cement (masa) - guma kao dodatak betonu	nakon 70 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak mase uzoraka betona s gumom je 8 puta manji od gubitka mase referentnog betona, dok je nakon istog broja ciklusa smanjenje tlačne čvrstoće betona s gumom 3 puta manje u usporedbi sa smanjenjem tlačne čvrstoće referentnog betona
Liu i sur. [4]	C	2 - 4	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja smanjenje tlačne čvrstoće je 6 %, 5 %, 3 %, 3 %, 3 %
			1, 3, 5, 10	sitni agregat (ukupni volumen)	nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja smanjenje tlačne čvrstoće je 6 %, 5 %, 4 %, 2 %, 2 %
Gesoğlu i sur. [76]	C	1 - 4	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	nakon 120 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak mase uzoraka betona s gumom otprilike je 4 puta manji od gubitka mase referentnog betona
		< 10	10, 20	krupni agregat (ukupni volumen)	
		0,1 - 1	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	
Paine i sur. [77]	C	0,5 - 1,5	2, 4, 6	sitni agregat (volumen)	nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak mase betona s gumom bio je 18 %, 88 % i 91 % manji u usporedbi s gubitkom mase referentnog betona

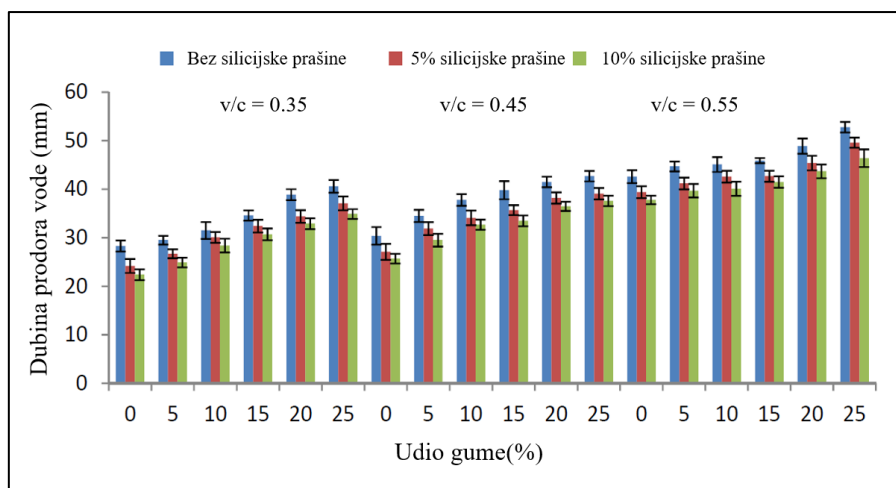
Tablica 2.13 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja (nastavak)

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Topçu i Demir [78]	C	1 - 4	0, 10, 20, 30	sitni agregat (volumen)	nakon 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja smanjenje tlačne čvrstoće je 9 %, 16 %, 19 %, 21%
Paine i Dhir [57]	C	0,5 - 1,5	4	krupni i sitni agregat (masa)	nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak mase betona s gumom bio je 82 % manji u usporedbi s gubitkom mase referentnog betona
		2 - 8			nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gubitak mase betona s gumom bio je 76 % manji u usporedbi s gubitkom mase referentnog betona
Pedro i sur. [58]	M	< 2	5, 10, 15	sitni agregat (volumen)	nije uočeno značajno smanjenje ili povećanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja
Chylík i sur. [79]	C	0 - 1	40, 80, 120 kg/m ³	sitni agregat (masa)	nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja granična vrijednost mase oljuštenog materijala za promatrani razred izloženosti betona (1000 g/m ²) nije bila postignuta dodavanjem gume u betonsku mješavinu

Rezultati su istraživanja različiti – dio autora zaključuje da je dodavanje gume utjecalo pozitivno na otpornost na smrzavanje i odmrzavanje [4], [5], [11], [75], [76], dio autora smatra da je utjecaj gume negativan na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [57], [78], dok neki autori nisu uočili nikakve promjene u otpornosti betona nakon spomenutih ciklusa [58]. Iz [Poglavlja 2.3.3.10](#) može se zaključiti da su rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom nedostatni zbog svoje kvantitete te da su rezultati ispitivanja betona s gumom kontradiktorni i nejednoznačni. Poboljšanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja u nekoliko je istraživanja objašnjeno pomoću zarobljenog zraka između čestica gume i cementne paste, a uzrok zarobljenog zraka objašnjen je grubom površinom gumenog agregata. Zhu i sur. [75] pišu o tome da je pojava zarobljenog zraka izraženija kod zamjene sitnog agregata manjim česticama gume. Šupljine zraka omogućuju dodatan prostor za širenje leda [79], a najbolji rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje dobiveni su kada je guma veličine 0-4 mm korištena kao zamjenski materijal prirodnom agregatu. S druge strane, povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata gumom povećava se i granično prijelazno područje između cementne paste i gumenog agregata uzrokujući smanjenu otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje. Gumirani beton ima veću vrijednost upijanja vode nego beton bez gume ubrzavajući slom uzoraka pri smrzavanju/odmrzavanju i smanjujući otpornost beton na cikluse smrzavanja/odmrzavanja [75]. Generalno se može zaključiti da promatrano svojstvo trajnosti betona treba dodatno ispitati, sve s ciljem boljeg razumijevanja ponašanja samozbijajućeg betona s gumom pod ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

2.3.3.11 Vodonepropusnost

Trenutno nema dostupnih rezultata ispitivanja vodonepropusnosti uzoraka samozbijajućeg betona s gumom te se preporuča provedba istraživanja navedenog svojstva kroz laboratorijska ispitivanja, sukladno važećim normama i propisima. Ipak, bitno je napomenuti da se nekoliko autora do sada bavilo istraživanjem vodonepropusnosti betona s gumom. Bjegović i sur. [70] ispitivali su vodopropusnost betona s gumom kao zamjenskim materijalom za prirodni agregat te su ustanovili da se vodopropusnost uzoraka povećala za 100 % kada je zamjena prirodnog agregata iznosila 10 %. Gupta i sur. [80] djelomično su zamijenili sitni agregat (pijesak) gumenim agregatom širine 2-3 mm i maksimalne duljine 20 mm. U laboratorijskim ispitivanjima koristili su različiti vodovezivni omjer (0,35; 0,45; 0,55) i superplastifikator. Na [Slici 2.12](#) prikazani su rezultati njihovih ispitivanja iz kojih se može zaključiti da se povećanjem udjela gume povećava i vodopropusnost uzoraka. Nadalje, silicijska prašina kao djelomična zamjena cementa doprinijela je smanjenju vodonepropusnosti uzoraka.

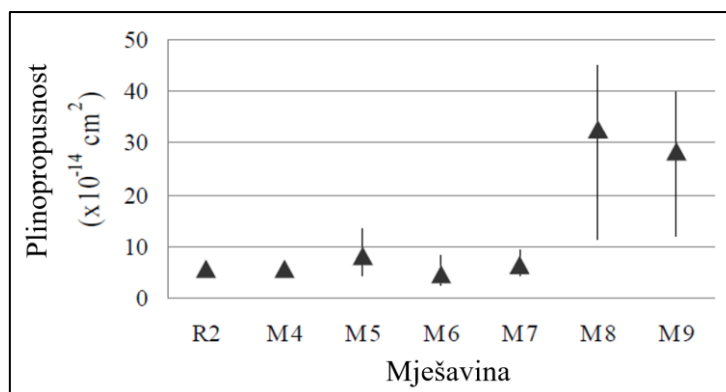


Slika 2.12 Vodonepropusnost betona s gumom [80]

Thomas i sur. [72] donijeli su sličan zaključak. U njihovu se slučaju dubina prodiranja vode povećala povećanjem udjela gume u betonu. Zamjenom prirodnog agregata gumom u postotku od 20 %, vrijednost dubine prodiranja vode povećana je za 4 puta. Gesoğlu i sur. [15], za razliku od prethodno navedenih autora, pisali su o smanjenju vodonepropusnosti povećanjem udjela gume u betonu, neovisno o vrsti gume i veličini čestica gume. Iz [Poglavlja 2.3.3.11](#) očigledno je da su daljnja ispitivanja vodonepropusnosti samozbijajućeg betona s gumom potrebna, sve s namjerom pronalaska znanstvenog odgovora na pitanje ponašanja samozbijajućeg betona s gumom u promatranim uvjetima.

2.3.3.12 Plinopropusnost

Pregledom literature ustanovljeno je da svojstvo plinopropusnosti samozbijajućeg betona s recikliranom gumom do sada nitko nije ispitivao te da se navedeno svojstvo tek treba istražiti kako bi se ustanovio utjecaj gume na njega. Ipak, korisno je napomenuti da je nekoliko autora istraživalo utjecaj gume na plinopropusnost običnog betona ([Tablica 2.14](#)). Bjegović i sur. [70] bavili su se proučavanjem plinopropusnosti običnog betona s gumom te su zaključili da guma kao zamjenski materijal za sitni agregat ima utjecaja na vrijednost plinopropusnosti betona, s tim da promatrana vrijednost ovisi o vrsti gume i veličini gume koja se koristi. [Slika 2.13](#) prikazuje kakav utjecaj imaju gumena vlakna (mješavine M4, M5 i M6) i gumeni granulat (mješavina M7, M8, M9) na vrijednost plinopropusnosti betona, u usporedbi s referentnom mješavinom betona bez gume [70]. Güneyisi i sur. [64] zaključili su da zbog visoke poroznosti pri 15 % i 25 %-tnom udjelu gume u običnom betonu plinopropusnost nije mogla biti izmjerena, dok je s 5 % udjela gume koeficijent plinopropusnosti smanjen za 43 %. U drugom eksperimentalnom istraživanju, koje su proveli Alsaif i sur. [81], zaključeno je da se s 30 % i 60 % udjela gume u betonu vrijednost koeficijenta plinopropusnosti povećao za 12 i 8,5 puta.



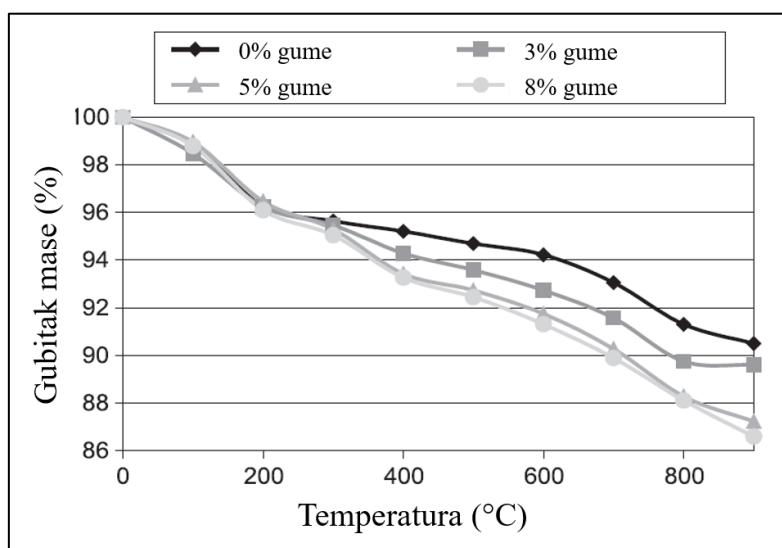
Slika 2.13 Utjecaj zamjene prirodnog agregata s gumom na plinopropusnost [70]

Tablica 2.14 Utjecaj veličine gume i udjela gume na plinopropusnost običnog betona

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Bjegović i sur. [70]	C	2 - 3,5	5, 10, 15	sitni agregat (ukupni volumen)	povećanje vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti za 4 puta u usporedbi s mješavinama s veličinom gume 2-4 mm
		2 - 4			nema promjene u usporedbi s referentnom mješavinom
Güneyisi i sur. [64]	C	dužina 10 - 40	5, 15, 25	sitni i krupni agregat (ukupni volumen)	S 5 % udjela gume koeficijent plinopropusnosti smanjen je za 43 %, pri 15 % i 25 % udjela gume plinopropusnost nije mogla biti izmjerena
Alsaif i sur. [81]	C	0 - 20	30, 60	sitni i krupni agregat (volumen)	povećanje vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti za 12 i 8,5 puta
LEGENDA: C – obični beton					

2.3.3.13 Otpornost na požar i visoke temperature

Topçu i Bilir [50] ispitivali su utjecaj visokih temperatura (400 °C i 800 °C) na uzorke samozbijajućeg betona s gumom (0-4 mm). Rezultati ispitivanja pokazuju smanjenje tlačne čvrstoće uzoraka za 14 % i 80 %, 42 % i 85 %, 38 % i 91 %, 39 % i 93 % sa sadržajem gume u iznosu od 0 kg/m³, 60 kg/m³, 120 kg/m³ i 180 kg/m³, nakon što su na uzorcima betona bile primijenjene visoke temperature od 400 °C i 800 °C. Pregledom literature zaključeno je da postoji manjak laboratorijskih istraživanja otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na požar i visoke temperature te da je navedeno područje potrebno dodatno istražiti. Do danas veći se broj znanstvenika bavio istraživanjem utjecaja visokih temperatura na obični beton ili mort s gumom [78], [82]–[85] te na beton visokih čvrstoća [86], [87]. Tipično ponašanje običnog betona s gumom pod utjecajem visokih temperatura prikazano je na Slici 2.14, a objedinjeni prikaz pregleda stanja područja otpornosti betona s gumom na požar i visoke temperature vidljiv je u Tablici 2.15.



Slika 2.14 Odnos između gubitka mase i temperature kod betona s gumom [86]

Tablica 2.15 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost betona na požar i visoke temperature

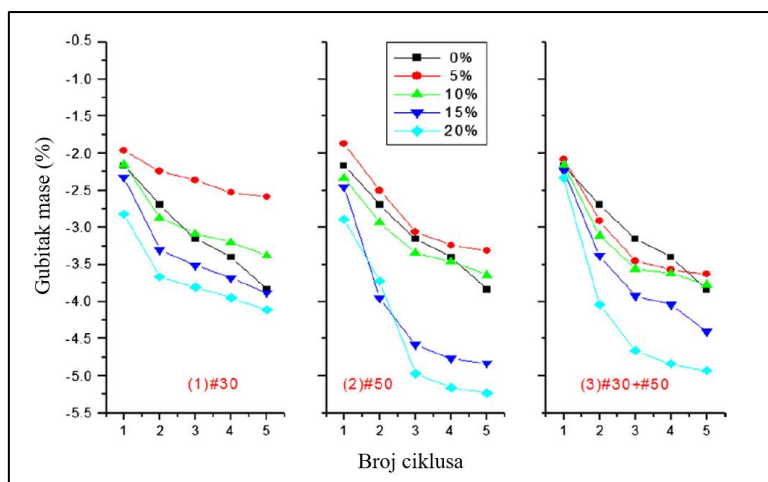
Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume
Topçu i Bilir [50]	SCC	0 - 4	0, 60, 120, 180 kg/m ³	sitni agregat (masa)	pri 400 °C - smanjenje tlačne čvrstoće za 14 %, 41 %, 38 %, 39 %; pri 800 °C - smanjenje tlačne čvrstoće za 80 %, 85 %, 91 %, 93 %
Correia i sur. [82]	C	0 – 9,5	5, 10, 15	sitni i krupni agregat (masa)	povećanjem ispitne temperature (605 °C, 782 °C, 902 °C) i povećanjem udjela gume povećan je gubitak mase te je smanjeno vrijeme paljenja izloženosti uzoraka
Topçu i Demir [78]	M, C	1 - 4	0, 10, 20, 30	sitni agregat (volumen)	povećanjem temperature s 20 °C na 400 °C, tlačna čvrstoća uzoraka smanjena je za 2 %, 20 %, 23 %, 17 %
Marques i sur. [83]	C	0 – 9,5	0, 5, 10, 15	sitni i krupni agregat (masa)	pri 800 °C - smanjenje tlačne čvrstoće za 51 %, 59 %, 63 %, 67 %; pri 400 °C i 600 °C - razlika u smanjenju tlačne čvrstoće između referentnog betona i betona s gumom relativno je zanemariva (1-7 %)
Hernandez-Olivares i Barluenga [86]	HSC	dužina 0,85 - 2,15	0, 3, 5, 8	sitni agregat (volumen)	smanjeno eksplozivno ljuštenje uzoraka nakon izlaganja požarnom opterećenju (0-1000 °C); smanjenje tlačne čvrstoće do 13 % s udjelom gume od 8 %
Mousa [87]	HSC	2	3	sitni agregat (masa)	pri temperaturama 105 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C - povećanje tlačne čvrstoće za 12 %, 3 %, 15 % i 28 %; najveće smanjenje mase uzoraka od 9 % uočeno je pri temperaturi od 800 °C

			5		pri temperaturi od 105 °C - značajno smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće za 32 %
		5	3	krupni agregat (masa)	pri temperaturama 400 °C do 800 °C - povećanje tlačne čvrstoće za 13 % do 41 %
Gupta i sur. [84]	C	širina 2 - 5 dužina do 20	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	pri temperaturama do 150 °C, udio gume u betonu može biti do 10 % bez izraženog utjecaja gume na vrijednost rezidualne tlačne čvrstoće betona; za sve temperature iznad 150 °C preporučeno je korištenje udjela gume do 5 % kako bi se zadržala stabilnost i rezidualna čvrstoća betona
Guelmine i sur. [85]	M	< 2,5	3, 6, 9	sitni agregat (masa)	udio gume < 9 % nema utjecaja na fizikalno mehaničku stabilnost morta do temperatura od 200 °C; za temperature iznad 200 °C te za udio gume > 3 %, stabilnost morta je narušena
LEGENDA: HSC – beton visokih čvrstoća, C – obični beton, SCC – samozbijajući beton, M - mort					

Iz rezultata ispitivanja običnog betona s gumom može se zaključiti da je požarna otpornost običnih betona s gumom generalno smanjena u odnosu na obični beton bez gume. Smanjenje požarne otpornosti veće je što je veći postotak zamjene prirodnog agregata gumenim agregatom. Međutim, uzorci betona bez gume pokazali su površinsko ljuštenje, dok kod uzoraka s gumom ljuštenje nije bilo prisutno [86], što može imati velik značaj pri upotrebi takvog materijala u budućnosti za elemente konstrukcije izložene požaru.

2.3.3.14 Otpornost na koroziju, abraziju i kiseline

Yung i sur. [60] proučavali su antikorozijska svojstva samozbijajućeg betona s gumom. Antikorozijska svojstva istraživana su u pogledu gubitka mase nakon sušenja i natapanja uzoraka betona u sulfatu. Nakon pet ciklusa sušenja i natapanja uzoraka betona u sulfatu došli su do zaključka da je otpornost betona na koroziju manja povećanjem udjela gumenog agregata u samozbijajućem betonu. Kako je prikazano na [Slici 2.15](#), gubitak mase kontrolne mješavine iznosio je 4 %, dok je gubitak mase za mješavine, u kojima je 20 % sitnog agregata (pijeska) zamijenjeno gumenim agregatom, iznosio 4 %, 6 % i 5 % za gumeni agregat čije čestice prolaze kroz sita #30 (0,595 mm), #50 (0,297 mm) i #30 i 50 (0,595 mm i 0,297 mm). Iz [Slike 2.15](#) također je vidljivo da je gubitak mase uzorka, tj. smanjenje otpornosti na koroziju, manji kada se koriste čestice gume manjeg promjera.



Slika 2.15 Gubitak mase uzoraka samozbijajućeg betona s gumom nakon pet ciklusa sušenja i natapanja u sulfatu [60]

Nekoliko drugih autora također se bavilo proučavanjem otpornosti uzoraka običnog betona s gumom na koroziju [4], abraziju [71], [72], [76], [88] i kiseline [89], kako je i prikazano u **Tablici 2.16**.

Zbog malenog broja ispitivanja navedenih svojstava samozbijajućeg betona s gumom zaključuje se da su potrebna dodatna eksperimentalna ispitivanja kako bi se mogao ustanoviti utjecaj gume na navedena svojstva samozbijajućeg betona. Međutim, valja napomenuti da su rezultati istraživača koji su se bavili proučavanjem običnog betona s gumom obećavajući i ulijevaju optimizam za buduća eksperimentalna ispitivanja toga svojstva trajnosti.

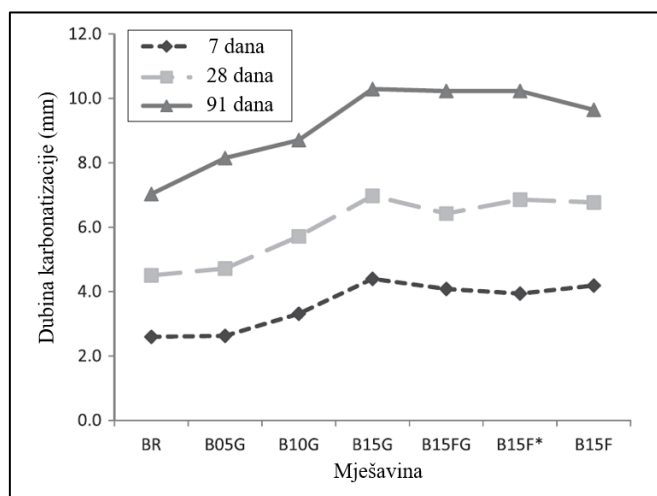
Tablica 2.16 Utjecaj veličine gume i udjela gume na otpornost samozbijajućeg i običnog betona na djelovanje korozije, abrazije i kiseline

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Vrsta otpornosti	Utjecaj gume na promatranu otpornost
Yung i sur. [90]	SCC	sito #30 (0,6), sito #50 (0,3)	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	otpornost na koroziju (sulfatna otpornost)	smanjenje povećanjem udjela gume u betonu; 5 %-tna zamjena pokazala se kao sulfatno otporna i dobrih svojstava trajnosti
Liu i sur. [4]	C	2 - 4	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	otpornost na koroziju (sulfatna otpornost)	povećanje do 5 %-tnog udjela gume; smanjenje nakon 5 %-tnog udjela gume
			1, 3, 5, 10	sitni agregat (ukupni volumen)		
Gupta i sur. [71]	C	0,15 - 1,9 širina 2-3, max. dužina 20	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	otpornost na abraziju	smanjenje pri korištenju frakcije gumenog agregata (0,15 – 1,9 mm); povećanje pri korištenju gumenog agregata (širina 2-3 mm, dužina 20 mm)

Gesoğlu i sur. [76]	C	1 – 4 < 10 0,1 - 1	10, 20	sitni i krupni agregat (ukupni volumen)	otpornost na abraziju	smanjenje povećanjem udjela gume u betonu; relativno poboljšanje otpornosti korištenjem frakcije gume 0,1-1 mm u usporedbi s ostalim korištenim frakcijama gume
Thomas i sur. [72]	C	0 - 4	20	sitni agregat (ukupni volumen)	otpornost na abraziju	povećanje povećanjem udjela gume u betonu
Grdić i sur. [88]	C	0,5 - 4	10, 20, 30	sitni agregat (volumen)	otpornost na abraziju	smanjenje pri 10 %-tnom udjelu gume, povećanje pri 20%-tnom i 30 %-tnom udjelu gume
Thomas i sur. [89]	C	0 - 4	2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20	sitni agregat (volumen)	otpornost na sumpornu kiselinu	povećanje povećanjem udjela gume u betonu
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton						

2.3.3.15 Otpornost na karbonatizaciju

Pregledom dostupne literature ustanovljeno je da se ispitivanjem otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na karbonatizaciju do sada nitko nije bavio te da se navedeno svojstvo trajnosti tek treba istražiti kako bi se ustanovio utjecaj gume kao zamjenskog materijala za prirodni agregat. Ipak, dobro je spomenuti nekoliko eksperimentalnih istraživanja autora koji su ispitivali običan beton s gumom. Gupta i sur. [71] zaključili su da se povećanjem udjela gumenog praha i gumenih vlakana smanjuje otpornost uzoraka betona na karbonatizaciju. Povećanje dubine karbonatizacije iznosi otprilike 35 % i 55 % s 20 % gumenog praha i 25 % gumenih vlakana kao zamjenskog materijala za prirodni agregat. Bravo i de Brito [74] donijeli su sličan zaključak. U njihovu slučaju povećanje dubine karbonatizacije nakon 91 dan iznosilo je otprilike 50 % kada je 15 % krupnog agregata zamijenjeno gumom (Slika 2.16).



Slika 2.16 Dubina karbonatizacije različitih mješavina betona s gumom [74]

Thomas i sur. [91] također su se bavili proučavanjem otpornosti betona s gumom na karbonatizaciju. Njihovo je istraživanje pružilo različitu vrstu rezultata. Do 12,5 % zamjene sitnog agregata gumom veličine 0-4 mm dubina karbonatizacije uzoraka starosti 91 dan bila je manja do 10 % od uzorka kontrolne mješavine, dok je dubina karbonatizacije uzoraka iste starosti bila za 9 %, 18 % i 27 % veća kada je 15 %, 18 % i 20 % sitnog agregata zamijenjeno gumenim agregatom.

U [Poglavlju 2.3.3.15](#) može se istaknuti da su potrebna dodatna istraživanja otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na karbonatizaciju. S obzirom na postotak zamjene prirodnog agregata gumom i s obzirom na veličinu reciklirane gume, ostali su autori donijeli različite zaključke o utjecaju gume na otpornost običnog betona na karbonatizaciju. Poboljšano ponašanje običnog betona s gumom s obzirom na otpornost na karbonatizaciju, koje se javlja kada se sitni agregat zamijeni izmravljenom gumom, Thomas i sur. [91] opisali su s manjom veličinom gume koja se koristila tijekom ispitivanja, što je spriječilo ulazak plina ugljikovog dioksida (CO₂) zbog svoje guste strukture. S druge strane, smanjenje otpornosti betona s gumom na karbonatizaciju Bravo i de Brito [74] opisuju pomoću visokog sadržaja vode u betonu s gumom te povećanim volumenom šupljina između čestica gume i cementne paste, što je uzrokovano grubom površinom čestica gume.

2.3.3.16 Otpornost na difuziju klorida

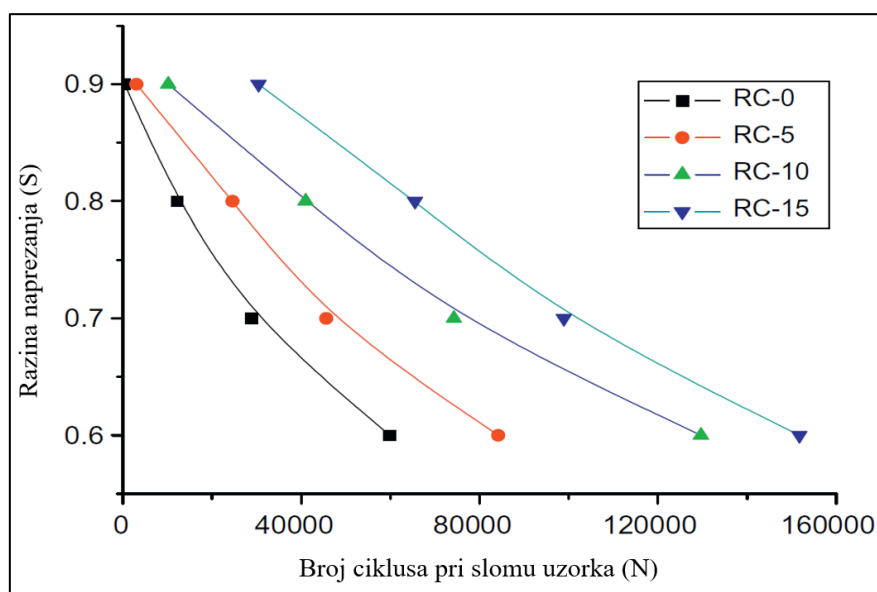
Gesoğlu i Güneyisi [69] bavili su se proučavanjem otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na difuziju klorida te su zaključili da je difuzija klorida veća kada se sitni agregat djelomično zamijeni granulama gume (0-4 mm). Povećanje difuzije klorida uzoraka starosti 28 i 90 dana iznosilo je otprilike 1 %, 29 %, 39 % i 15 %, 45 %, 47 % pri postotku zamjene od 5 %, 15 % i 25 %. Ugradnjom letećeg pepela u postotku od 20 % do 60 % nije imalo značajniji utjecaj na otpornost betona na difuziju klorida.

S obzirom na manjak eksperimentalnih istraživanja otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na difuziju klorida pregledan je dio literature koji se bavio istraživanjem otpornosti običnog betona s gumom na difuziju klorida. Veći broj autora bavio se tom tematikom te su dobiveni kontradiktorni rezultati. Naime, smanjenje otpornosti običnog betona s gumom na difuziju klorida utvrdili su Gesoğlu i Güneyisi [69] i Gesoğlu i Güneyisi [92], povećanje otpornosti utvrdili su Bjegović i sur. [70], Gupta i sur. [71] i Kumar i sur. [55], dok je prema [93] uočeno smanjenje i povećanje otpornosti. Stupanj povećanja dubine difuzije klorida uvelike je ovisio o količini gume ugrađene u beton. Postotkom zamjene do 10 % može se postići poboljšanje otpornosti betona s gumom na difuziju klorida [93]. Kumar i sur. [55] takvo su ponašanje betona objasnili smanjenom gustoćom i smanjenom vodljivošću uzoraka betona, dok su Gupta i sur. [80] utvrdili da je smanjena difuzija klorida uzrokovana smanjenjem šupljina između gume i cementne paste zbog bolje zbijenosti betona. Zbog manjka rezultata ispitivanja otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na difuziju klorida te zbog kontradiktornih rezultata različitih autora vezanih za otpornost običnog betona s gumom na difuziju klorida, preporuča se dodatno laboratorijsko istraživanje promatranog svojstva.

2.3.3.17 Ponašanje pri zamoru materijala

Ganesan i sur. [51] proučavali su ponašanja samozbijajućeg betona s gumom pri zamoru materijala. Ponašanje betona pratili su regulirajući dva faktora, maksimalna razina napreznja (S), koji je bio u rasponu od 60 % do 90 % vrijednosti statičke čvrstoće na savijanje, i broja ciklusa pri slomu (N). Zamor materijala bio je izraženiji kod uzoraka samozbijajućeg betona bez gume. Pri razini napreznja od $S = 90$ % broj ciklusa pri slomu (N) povećao se 1,44 puta za istu razinu napreznja, za uzorke samozbijajućeg betona s 15 % i 20 % zamijenjenog materijala, dok je pri razini napreznja od $S = 60$ % broj ciklusa pri slomu (N) povećan za otprilike istu vrijednost pri 15 %-tnoj i 20 %-tnoj zamjeni prirodnog agregata gumom, 1,62 i 1,63 puta.

Do danas se relativno malen broj istraživača bavio proučavanjem ponašanja samozbijajućeg betona s gumom pri zamoru materijala. Zbog navedene činjenice pristupilo se daljnjem istraživanju literature te se ustanovilo da su drugi autori koji su se bavili istraživanjem običnog betona s gumom također došli do zaključka da se povećanjem sadržaja gume u betonu smanjuje zamor materijala. Liu i sur. [94] grafički su prikazali odnos između broja ciklusa pri slomu uzorka (N) i razine napreznja (S) betona s gumom (Slika 2.17), gdje je očigledno da se životni vijek uzorka betona pod različitim razinama napreznja povećava povećanjem udjela gume u betonu. I drugi autori koji su se bavili proučavanjem ponašanja običnog betona s gumom došli su do istog zaključka [95], [96].



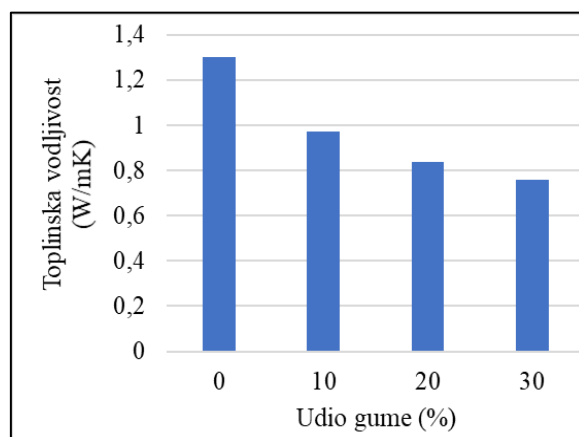
Slika 2.17 Odnos između broja ciklusa pri slomu uzorka (N) i razine napreznja (S) kod betona s gumom [94]

Iz Poglavlja 2.3.3.17 može se zaključiti da neovisno o vrsti betona, zamijenjenom materijalu ili veličini gume nije upitno poboljšanje otpornosti betona i samozbijajućeg betona na zamor. Ipak, zbog manjka rezultata iz područja ponašanja samozbijajućeg betona s gumom pri zamoru materijala i

njegovom usporedbom sa samozbijajućim betonom bez gume, preporuča se nastavak daljnjeg istraživanja toga svojstva samozbijajućeg betona.

2.3.3.18 Toplinska vodljivost

Jedidi i sur. [54] zamijenili su 0 %, 10 %, 20 %, i 30 % volumena prirodnog agregata u samozbijajućem betonu gumenim agregatom (veličina 0-4 mm i 4-8 mm). Pri 30 %-tnom udjelu gume koeficijent toplinske vodljivosti bio je smanjen s 1,3 W/mK na 0,76 W/mK, tj. za 41,5 % (Slika 2.18). U istom je istraživanju ispitivan i utjecaj gume na specifičnu toplinu. Povećanjem udjela gume s 0 % na 30 % karakteristična je pojava i povećanja specifične topline s 970 J/kgK na 1380 J/kgK, tj. za 42,3 %.



Slika 2.18 Utjecaj gume na toplinsku vodljivost samozbijajućeg betona [54]

Zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata toplinske vodljivosti samozbijajućeg betona s gumom preporuča se provedba dodatnih eksperimentalnih ispitivanja kako bi se evaluirao utjecaj gume na toplinska svojstva samozbijajućeg betona. Dosadašnji rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom pokazuju pozitivan utjecaj gume na promatrano termičko svojstvo, a radi boljeg razumijevanja ponašanja samozbijajućeg betona s gumom u Tablici 2.17 prikazano je i nekoliko rezultata ispitivanja toplinske vodljivosti običnog betona s gumom.

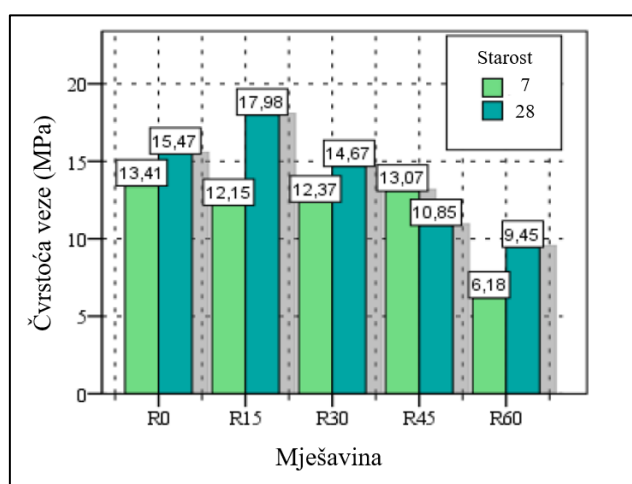
Iz Tablice 2.17 i Poglavlja 2.3.3.18 može se zaključiti da primjena gume u običnom i samozbijajućem betonu uzrokuje smanjenje toplinske vodljivosti obje vrste betona. Takvo ponašanje betona može se opisati ne samo činjenicom da se guma ponaša poput šupljina, već i činjenicom da gumeni agregat ima grubu površinu zbog čega uzrokuje zadržavanje zraka na sučelju cementne paste i gume. Budući da zrak ima znatno manju toplinsku vodljivost od prirodnog agregata, ali i betona, zračne šupljine pružaju bolji otpor toplinskom toku [54]. Nadalje, vodljivost gumenog agregata znatno je manja od toplinske vodljivosti prirodnog agregata [97], što uzrokuje poboljšanje toplinske izolacije običnog i samozbijajućeg betona.

Tablica 2.17 Utjecaj veličine gume i udjela gume na toplinsku vodljivost samozbijajućeg betona, običnog betona i morta

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje koeficijenta toplinske vodljivosti
Jedidi i sur. [54]	SCC	0/4, 4/8	10, 20, 30	krupni agregat (volumen)	25 %, 35 %, 42 %
Paine i Dhir [57]	C	0,5 - 1,5; 2 - 8; 5 - 25	6, 13, 19, 38, 50, 63	krupni i sitni agregat (masa)	22 %, 56 %, 48 %, 64 %, 59 %, 71 %
Eiras i sur. [97]	M	< 2	40, 50, 60	sitni agregat (volumen)	74 % pri povećanju udjela gume s 40 % na 60 %
Fadiel i sur. [98]	M	0 - 0,6; 0,84 - 2	10, 20, 30, 40	sitni agregat (masa)	13 - 28 %
Medina i sur. [99]	C	4 - 8	20, 40, 60, 80, 100	krupni agregat (volumen)	do 48 %
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton, M - mort					

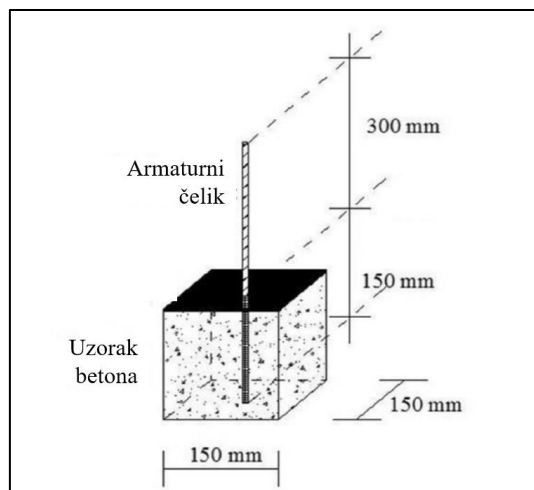
2.3.3.19 Veza između armature i betona

Emiroğlu i sur. [8] istraživali su vezu između armature i samozbijajućeg betona s gumom na uzorcima starosti 7 i 28 dana. Djelomično su zamijenili 15 %, 30 %, 45 % i 60 % mase krupnog agregata (veličine 5-12 mm) vlaknima otpadne reciklirane automobilske gume. Rezultati ispitivanja prikazani su na [Slici 2.19](#). Rezultati ispitivanja čvrstoće veze na uzorcima starosti 7 dana pokazivali su kontinuirano smanjenje čvrstoće veze za 9 %, 8 %, 19 % i 30 % pri 15 %, 30 %, 45 % i 60 % zamjene prirodnog agregata gumom. Čvrstoća veze ispitana na uzorcima starosti 28 dana pokazuje blago poboljšanje od 16,22 % nakon što je 15 % gume dodano u mješavinu samozbijajućeg betona, ali svi ostali rezultati ispitivanja pokazuju smanjenje vrijednosti čvrstoće veze za 5 %, 30 % i 39 % pri postotku zamjene 30 %, 45 % i 60 %.



Slika 2.19 Odnos između čvrstoće veze i postotka zamjene prirodnog agregata s gumom [8]

Hilal [59] se također bavila proučavanjem i eksperimentalnim ispitivanjem čvrstoće veze između armature i okolnog betona. Za razliku od prethodnih autora u ovom je slučaju zamijenjeni materijal bio sitni agregat (veličine 0-4 mm). Rezultati ispitivanja pokazali su smanjenje čvrstoće veze za 20 %, 25 %, 31 %, 41 % i 45 % pri postotku zamjene od 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 %. Na [Slici 2.20](#) detaljno su prikazani podaci o ispitanom uzorku korištenom za ispitivanje čvrstoće veze između betona i čelika kod Hilal [59], a koji se potencijalno može koristiti u budućim ispitivanjima promatranog svojstva.



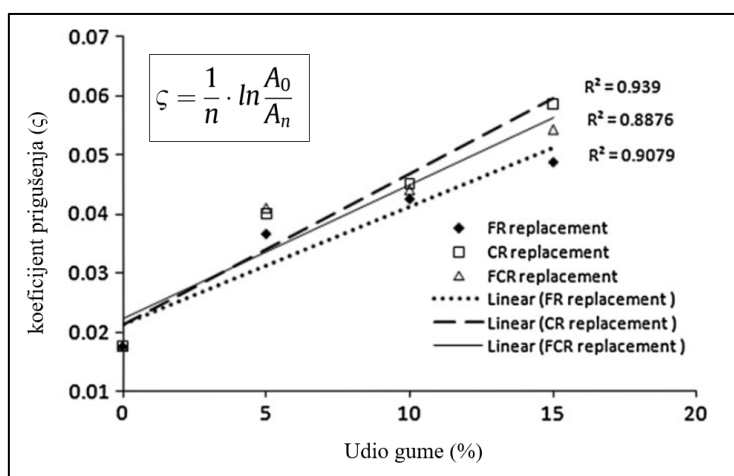
[Slika 2.20](#) Čvrstoća veze – prikaz ispitnog uzorka [59]

Drugi autori, poput Grdića i sur. [88] te Gesoğlu i sur. [67], također su se bavili ispitivanjem veze između armature i okolnog betona, ali ne kod samozbijajućeg betona s gumom, nego kod običnog betona s gumom. Njihovi zaključci mogu također poslužiti kao polazišna točka u definiranju utjecaja postotka gume na vrijednost čvrstoće veze jer su preko eksperimentalnih ispitivanja zaključili da se povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata gumom smanjuje vrijednost čvrstoće veze između armature i betona. Kada je riječ o čvrstoći veze između armature i okolnog samozbijajućeg betona s gumom, zbog nedostatka broja eksperimentalnih rezultata ispitivanja preporuča se provedba dodatnih laboratorijskih istraživanja promatranog svojstva, kako bi se jednoznačno moglo zaključiti u kolikom je postotku čvrstoća veza između armature i betona smanjena. Smanjenje čvrstoće veze može biti objašnjeno pomoću slabe adhezije između cementne matrice i reciklirane gume, uzrokujući slabu graničnu vezu između čestica gume i cementne paste [8], [59], [67].

2.3.3.20 *Prigušenje, disipacija energije, nosivost, deformabilnost i krutost na savijanje*

Najim i Hall [61] utvrdili su da se kapacitet prigušenja, tj. koeficijent prigušenja, povećava kada se 0 %, 5 %, 10 % i 15 % mase prirodnog sitnog i/ili krupnog agregata zamijeni gumenim agregatom (veličina 2-6 mm). Povećanje kapaciteta prigušenja veće je pri većem postotku zamjene ([Slika 2.21](#)).

Rezultati pokazuju povećanje koeficijenta prigušenja koji predstavlja mjeru kapaciteta prigušenja, za otprilike 16 %, 230 % i 206 % sa zamjenom od 15 % mase prirodnog agregata gumenim agregatom.



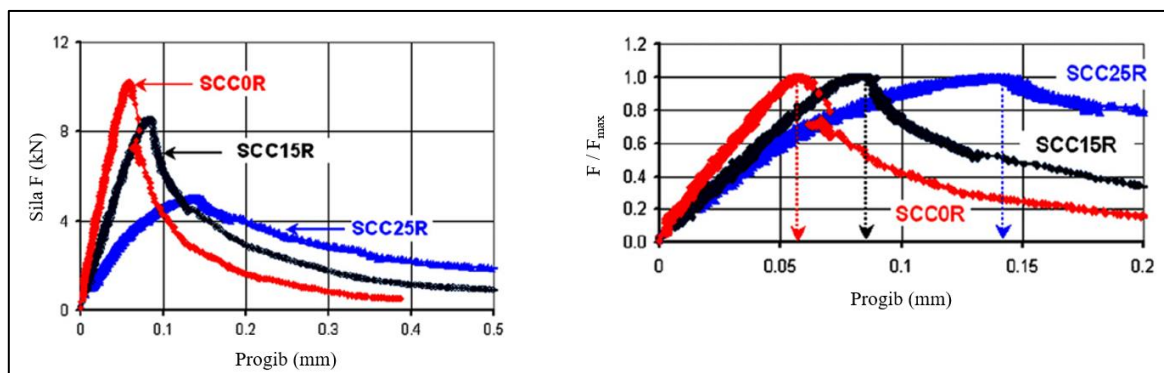
Slika 2.21 Utjecaj zamjene prirodnog agregata gumenim agregatom na koeficijent prigušenja [61]

Nadalje, Najim i Hall [52] također su utvrdili povećanje kapaciteta prigušenja nakon što se gumeni agregat prethodno tretirao metodom premazivanja mortom. Gumeni agregat (veličina 2-6 mm) zamijenio je 38 % volumena prirodnog sitnog i krupnog agregata, a rezultati ispitivanja pokazali su 33 % veću vrijednost koeficijenta prigušenja u slučaju prethodnog tretmana gume. Nekoliko drugih autora također se bavilo eksperimentalnim istraživanjem navedenog svojstva, ali analizirajući obični beton [97], [100]–[103] te su svi prijavili povećanje kapaciteta prigušenja običnog betona povećanjem udjela gume u betonu. Takvo ponašanje betona može se objasniti ponašanjem gume kao materijala koji apsorbira energiju dovodeći do visokih plastičnih deformacija uzoraka betona [103]. Stoga se može zaključiti da se, neovisno o vrsti betona, kapacitet prigušenja betona povećava povećanjem udjela gume u betonu, što je obećavajuće za ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom koja bi trebala uslijediti u budućim eksperimentalnim istraživanjima.

Što se tiče nosivosti, deformabilnosti i krutosti Turatsinze i Garros [45] utvrdili su smanjenje kapaciteta nosivosti, povećanje deformabilnosti i smanjenje krutosti na savijanje uzoraka samozbijajućeg betona kada je 10 %, 15 %, 20 % i 25 % volumena prirodnog krupnog agregata (veličine 4-10 mm) djelomično zamijenjeno gumenim agregatom. Rezultati ispitivanja pokazuju smanjenje kapaciteta nosivosti za 12 % i 42 %, povećanje deformabilnosti za 1,33 i 2 puta i smanjenje krutosti na savijanje za 1,93 i 3,19 puta, pri postotcima zamjene 15 % i 25 % (Slika 2.22).

Najim i Hall [61] proučavali su utjecaj zamjene mase prirodnog agregata gumenim agregatom (veličine 2-6 mm) na kapacitet nosivosti, deformabilnost i krutost uzoraka samozbijajućeg betona te su zaključili da je kapacitet nosivosti smanjen, deformabilnost povećana te krutost uzoraka betona smanjena kada se guma implementira u beton kao zamjenski materijal. Smanjenje kapaciteta nosivosti i krutosti te povećanje deformabilnosti povećava se povećanjem udjela gume u betonu. Smanjenje

kapaciteta nosivosti i krutosti iznosilo je 39 % i 24 % pri 15 % zamjene krupnog agregata i 15 % zamjene sitnog agregata, dok se najveće povećanje deformabilnosti moglo vidjeti pri 15 % zamjene sitnog agregata i iznosilo je 28 %.



Slika 2.22 Utjecaj postotka zamjene prirodnog agregata s gumom na (a) kapacitet nosivosti F_{max} i (b) deformabilnost $\delta_{F_{max}}$ [45]

Najim i Hall [52] također su mijenjali 28 % volumena agregata s gumom veličine 2-6 mm te su utvrdili da su se kapacitet nosivosti, deformabilnost i krutost uzoraka samozbijajućeg betona povećali 11 %, 5 % i 8 %, kada se gumeni agregat prethodno tretirao metodom premazivanja mortom. Turatsinze i sur. [73] proučavali su kapacitet nosivosti mortova s gumom te su u mortu djelomično zamijenili 20 % i 30 % ukupnog volumena sitnog agregata (pijeska) gumenim agregatom. Utvrdili su smanjenje kapaciteta nosivosti, povećanje deformabilnosti i smanjenje krutosti. Smanjenje kapaciteta nosivosti i krutosti bilo je 33 % i 67 % pri zamjeni od 30 %, dok je deformabilnost bila 2,5 puta veća pri istom postotku zamjene prirodnog agregata gumom. Zbog manjka istraživanja može se zaključiti da su potrebna dodatna istraživanja kapaciteta nosivosti, deformabilnosti i krutosti samozbijajućeg betona s gumom. Ipak, dosadašnji rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom vode prema zaključku da se povećanjem udjela gumenog agregata u samozbijajućem betonu smanjuje kapacitet nosivosti, povećava deformabilnosti te smanjuje krutost na savijanje, neovisno o veličini zrna gumenog agregata.

Bez obzira na vrstu betona, obični ili samozbijajući beton, generalni zaključak [Poglavlja 2.3.3.20](#) taj je da se povećanje disipacije energije [52], [56], [61], [97], [100]–[102], smanjenje nosivosti, povećanje deformabilnosti i smanjenje krutosti na savijanje [45], [52], [61], [73] mogu povezati s povećanjem sadržaja gume u betonskim mješavinama. Gumirani beton trebao bi se koristiti kao rješenje za poboljšanje kapaciteta deformabilnosti samozbijajućeg betona prije pojave lokaliziranih makropukotina. To može biti zanimljivo svojstvo za poboljšanje trajnosti betonskih konstrukcija kada je otpornost na stvaranje pukotina zbog prisilnih deformacija prioritet te je također zanimljiv pristup kontroli pukotina stvorenih skupljanjem betona, što je u drugu ruku opet posebno kod kolnika i AB ploča [45].

2.3.4 Utjecaj reciklirane gume na parametre mehanike loma samozbijajućeg betona

Pregledom literature ustanovljeno je da istraživanja parametara mehanike loma u većini slučajeva obuhvaćaju dva glavna parametra: energiju loma (*engl. fracture energy*) i žilavost loma (*engl. fracture toughness*), kako je i prikazano u [Tablici 2.18](#). Istraživanja parametara mehanike loma samozbijajućeg betona s gumom poprilično su nezastupljena u dostupnoj literaturi te broje svega nekoliko članaka napisanih na tu temu [41], [59]. Iz pregleda literature ipak se može donijeti nekoliko smjernica vezanih za određena svojstva trajnosti samozbijajućeg betona s gumom. Ustanovljeno je da samozbijajući beton s gumom ima povećanu energiju loma u odnosu na samozbijajući beton bez gume [41], [59]. Rezultati ispitivanja parametara mehanike loma običnog betona s gumom i njihova interpretacija mogu biti od velike koristi za definiranje ponašanja samozbijajućeg betona s gumom. Pregledom literature ustanovljeno je da je broj studija istraživanja običnog betona s gumom ipak nešto zastupljeniji [15], [67], [102], [104]–[106], ali bitno je napomenuti da rezultati tih istraživanja nisu jednoznačni te ih je potrebno dodatno istražiti kako bi se ispravno ustanovio utjecaj gume.

Rezultati su poprilično disipativni/kontradiktorni te se zasad ne može jednoznačno zaključiti kakav utjecaj guma kao zamjenski materijal ima na promatrano svojstvo betona. Budući da se do sada proveo manji broj istraživanja energije loma samozbijajućeg betona s gumom, preporučuje se daljnje istraživanje parametara mehanike loma betona kako bi se mogao donijeti zaključak o utjecaju primjene gume na promatrana svojstva samozbijajućeg betona.

Tablica 2.18 Utjecaj veličine gume i udjela gume na parametre mehanike loma samozbijajućeg i običnog betona

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume na energiju loma (<i>engl. fracture energy</i>)	Utjecaj gume na žilavost loma (<i>engl. fracture toughness</i>)
Hilal [59]	SCC	0 - 1	5, 10, 15, 20, 25	sitni agregat (volumen)	smanjenje za 8 %, 10 %, 13 %, 22 %, 26 %	-
		1 - 4			smanjenje za 12 %, 14 %, 19 %, 25 %, 29 %	
		0 - 4			smanjenje za 11 %, 13 %, 19 %, 24 %, 28 %	
Bideci i sur. [41]	SCC	dužina - 25	5, 10, 15	krupni agregat (volumen)	smanjenje za 35 %, 3 %, 10 %	-
		dužina - 50			smanjenje za 35 % i povećanje za 6 % i 3 %	
		dužina - 75			smanjenje za 32 %, 29 %, 84 %	
Gesoğlu i sur. [67]	C	< 4	5, 15	sitni agregat	povećanje za 33 %, 36 %	-
		dužina 10 - 40	15	krupni agregat	povećanje za 36 %	
		0 - 4 i 10 - 40	15, 20, 25, 30	sitni i krupni agregat	povećanje za 36 %, 26 %, 121 %, 20 %	
Grinys i sur. [104]	C	0/1	5, 10, 20, 30	sitni agregat (masa)	povećanje za 5,3; 3,8; 4,4; 4,8 puta	-
		1/2	5, 10, 20, 30		povećanje za 3,7; 3,8; 4,7; 5 puta	
		2/3	5, 10, 20		povećanje za 3,5; 5,4; 4 puta	
Xie i sur. [105]	C	0,85 - 1,4	5, 10, 15, 20	sitni agregat (volumen)	povećanje za 34 % i 75 % pri 5 %-tnom i 10 %-tnom udjelu gume; smanjenje za udio gume iznad 10 %	smanjenje s povećanjem udjela gume (smanjenje za 15 % pri 20 %-tnom udjelu gume)
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton						

Tablica 2.18 Utjecaj veličine gume i udjela gume na parametre mehanike loma samozbijajućeg i običnog betona (nastavak)

Autori	Vrsta betona	Veličina gume (mm)	Udio gume (%)	Zamijenjeni materijal	Utjecaj gume na energiju loma (<i>engl. fracture energy</i>)	Utjecaj gume na žilavost loma (<i>engl. fracture toughness</i>)
Guo i sur. [106]	C	0,85 - 1,4	4, 8, 12, 16	sitni agregat (volumen)	povećanjem udjela gume s 4 % na 16 % energija loma prvo se povećava, a potom smanjuje; pri 8 %-tnom udjelu gume vrijednost je energije loma najveća	povećanjem udjela gume s 4 % na 16 % žilavost loma prvo se povećava, a potom smanjuje; pri 4 %-tnom i 8 %-tnom udjelu gume vrijednost žilavosti je loma najveća
Gesoğlu i sur. [15]	C	1 - 4	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	povećanje za 42 %, 27 %	-
		< 10	10, 20	krupni agregat (ukupni volumen)	povećanje za 38 %, 33 %	
		0,1 - 1	10, 20	sitni agregat (ukupni volumen)	smanjenje za 25 %, 18 %	
Moustafa i ElGawady [102]	C	0 - 2,38	10, 20, 30	sitni agregat (volumen)	povećanje za 30 %, 62 %, 54%	-
LEGENDA: SCC – samozbijajući beton, C – obični beton						

2.3.5 Nosivi armiranobetonski elementi – grede od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom

Samo je nekoliko istraživanja objavljeno vezano za armiranobetonske grede s recikliranom gumom te je generalno u svim ispitivanjima zaključeno da je povećana duktilnost i kapacitet deformabilnosti takvih greda, kao i povećan broj pukotina manje širine [107]–[112], a u nastavku su dani dodatni zaključci svakog pojedinog ispitivanja. Hall i Najim [107] bavili su se ispitivanjem obje vrste armiranobetonskih greda s gumom, izrađene od običnog betona i samozbijajućeg betona. Uz već ranije navedene zaključke, dodatno su zaključili da je kod greda izrađenih od samozbijajućeg betona s gumom povećana sposobnost apsorpcije energije za 15 %, dok je kod greda izrađenih od običnog betona s gumom smanjena sposobnost apsorpcije energije za 24 %, u usporedbi s referentnim armiranobetonskim gredama bez gume. Smanjenje krutosti na savijanje također je bilo manje kod greda izrađenih od samozbijajućeg betona s gumom nego kod greda izrađenih od običnog betona s gumom, a iznosilo je zanemarivih 5 %. Nadalje, progib pri pojavi prve pukotine povećan je kod obje vrste betona s gumom, što upućuje na veću apsorpciju kinetičke energije s obzirom na granicu elastičnosti. Ismail i sur. [108] dodatno su zaključili da se do 20 %-tnog udjela gume u betonu deformabilnost i duktilnost armiranobetonskih greda povećava te da je do iste razine udjela gume u betonu zanemarivo smanjenje nosivosti na savijanje. Eisa i sur. [111] dodatno su zaključili da se žilavost i duktilnost betona s 10 %-tnim udjelom gume u betonu povećava za 6 % i 22 %. Mendis i sur. [110] nastavno su zaključili da obični beton s gumom može postići tlačne čvrstoće oko 45 MPa, što znači da se takav beton može koristiti u konstrukcijske svrhe. Ipak, nedostatak smjernica za projektiranje takvog betona ne dopušta inženjerima korištenje gumiranog betona tijekom projektiranja građevina. Takvo ponašanja armiranobetonskih greda može se objasniti malom krutošću gume, što doprinosi poboljšanju deformabilnosti gumiranog betonskog kompozita. Zbog istog razloga povećana je i duktilnost AB greda [108].

Pregledom dostupne literature uočeno je da se u niti jednom istraživanju nosivih armiranobetonskih greda ne spominje korištenje silicijske prašine kao djelomične zamjene cementu, što također predstavlja potencijal za daljnje istraživanje samozbijajućeg betona s gumom na razini konstrukcijskih elemenata. Postojeća literatura ne pokriva adekvatno ispitivanja uporabljivosti armiranobetonskih greda s gumom za konstrukcijsku primjenu, posebno kada se koristi samozbijajući beton s gumom. Zbog manjeg broja istraživanja nosivih armiranobetonskih elemenata s recikliranom gumom, potrebna su dodatna istraživanja, kako na mikrorazini (SEM), tako i na makrorazini (armiranobetonski elementi) s ciljem donošenja općenitih zaključaka i uspješnog razvoja metodologije za primjenu reciklirane gume u armiranobetonskim elementima izrađenim od samozbijajućeg betona.

2.3.6 Mikrostruktura samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i prethodno tretiranje gume

Emiroglu i sur. [8] prijenos opterećenja i vezu između gume i cementne matrice objasnili su pomoću mehaničkog uklještenja dvaju materijala (*engl. mechanical interlocking*) koje se pojavljuje zbog grube površine gume. Nadalje, zaključili su da je veza između gume i okolne cementne paste bolja s većom količinom finijih čestica i materijala u betonskoj mješavini, kao što su npr. zamjenski cementni dodaci.

Veza između cementne paste i gumenog agregata jedan je od najbitnijih faktora koji utječe na gotovo svako svojstvo samozbijajućeg betona u očvrslom stanju. Veza između cementne paste i zrna gumenog agregata bolje je ostvarena ukoliko se guma prethodno tretira [47]. Kako bi se poboljšala veza između čestica gume i veziva, Ganesan i sur. [51] prethodno su tretirali gumeni agregat polivinil alkoholom, Aslani i sur. [7] metodom upijanja vode (*engl. water soaking method*), a Si i sur. [49] natrijevim hidroksidom (NaOH). Si i sur. [49] pisali su o sporijem smanjenju sposobnosti tečenja samozbijajućeg betona s gumom kada su čestice gume prethodno tretirane natrijevim hidroksidom (NaOH). Pregledom literature utvrđeno je da je, do danas, prethodni tretman gume najučinkovitija metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste. Ipak, u niti jednom istraživanju nije navedeno koliki su troškovi prethodnog tretiranja gume na određeni način, stoga se postavlja pitanje isplativosti toga postupka s obzirom da se povećanje čvrstoće betona većinom kreće u granicama do maksimalnih 10 %, iznimno u određenim istraživanjima preko 10 % [52]. Kako bi se postigla ekonomska isplativost korištenja gume kao zamjenskog materijala prirodnom agregatu te s obzirom da bilo kakva kemijska obrada gume i prethodni tretman gume predstavljaju trošak (financijski i vremenski), potencijalno se može odabrati i pasivna metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste, a to je odabirom gume putem nekoliko parametara, kao što su: oblik zrna, zamijenjeni materijal, udio gume i veličina gume. Ono što svakako predstavlja bitan zaključak [Poglavlja 2.3.6](#) je da se samo manji broj istraživanja usredotočio na sučeljak između gume i cementne paste u samozbijajućem betonu s gumom. Također, manji je broj istraživanja u kojima su autori temeljito istražili sučeljak između gume i cementne paste pomoću EDS mikroanalize kemijskog sastava [102], kako bi utvrdili u čemu je točno problem u smislu kemijske veze između gume i okolne cementne paste. Stoga je ovome dijelu istraživanja također potrebno posvetiti dodatnu pažnju.

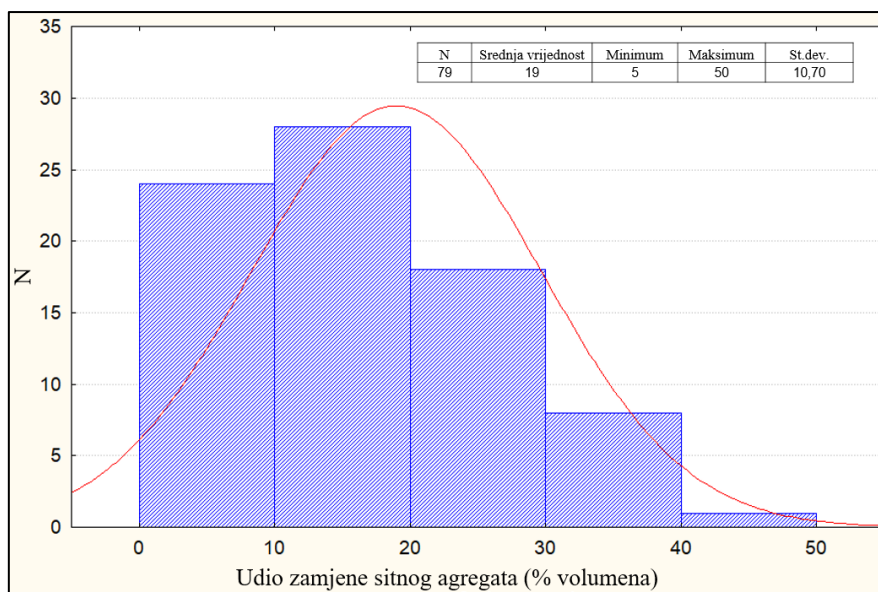
2.3.7 Optimalna veličina zrna i optimalni postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranom gumom

Pregledom stanja područja obuhvaćena su sveukupno 83 istraživanja običnog (RC) i samozbijajućeg betona s gumom (SCRC). Ako se promatraju sva pregledana istraživanja (obični i samozbijajući beton s gumom), sitni se agregat zamijenio recikliranom gumom u 53 istraživanja, krupni agregat u 19 istraživanja, cement u 2 istraživanja, a sitni i krupni agregat zajedno u 19 istraživanja. Statistički, od ukupno 83 istraživanja koja su obuhvaćena pregledom stanja područja (RC i SCRC), u

više od 60 % istraživanja sitni je agregat zamijenjen gumom. Promatraju li se istraživanja obuhvaćena pregledom stanja područja samozbijajućeg betona s gumom, zaključuje se da se sitni agregat zamijenio recikliranom gumom u 18 istraživanja, krupni agregat u 12 istraživanja, dok su se sitni i krupni agregat zajedno zamijenili recikliranom gumom u 6 istraživanja. Statistički, od ukupno 30 istraživanja koja su obuhvaćena pregledom stanja područja (samo SCRC) u više od 60 % istraživanja sitni je agregat zamijenjen gumom. Većina istraživača u svojim je laboratorijskim istraživanjima samozbijajućeg betona s gumom zamijenila prirodni sitni agregat (frakcija 0-4 mm), ponajviše zbog boljih rezultata u usporedbi s rezultatima kada je prirodni krupni agregat zamijenjen recikliranom gumom. Nadalje, pregledom literature zaključeno je da je reciklirana guma veličine zrna < 4 mm većinom okruglog ili okruglastog oblika, dok je, s druge strane, reciklirana guma veličine > 20 mm većinom plosnatog oblika. Općenito, okrugli agregat doprinosi boljoj zbijenosti betona i zato se preporuča njegovo korištenje prije nego korištenje plosnatog agregata [113]. Također, male granule gume (0-4 mm) imaju veću kontaktnu površinu nego isjeckana / usitnjena guma (duljine do 76 mm) formirajući na taj način potencijalno bolju vezu s okolnim materijalom, tj. cementnom pastom. Iz navedenog se zaključuje da se laboratorijska ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom provedu na način da reciklirana guma zamijeni prirodni sitni agregat (0-4 mm).

Pregledom stanja područja utvrđeno je da su drugi istraživači mijenjali krupni ili sitni agregat u postotku mase ili volumena krupnog i sitnog agregata. Ono što je iznimno bitno činjenica je da guma ima otprilike 2,5 puta manju specifičnu težinu, a samim time i manju gustoću od prirodnog agregata. Stoga, ista masa reciklirane gume zauzima 2,5 puta više volumena od iste mase prirodnog agregata. Zaključuje se da je prilikom definiranja vlastitih mješavina betona potrebno koristiti volumensku zamjenu prirodnog agregata. Isti zaključak proizlazi i iz broja pregledom stanja područja obuhvaćenih istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s gumom u kojima se prirodni agregat zamijenio ili u postotku volumena (preko 75 % istraživanja) ili u postotku mase (oko 25 % istraživanja). Ako se promatra samo pregled stanja područja samozbijajućeg betona s gumom, taj je postotak još veći u korist volumenske zamjene, tj. u 80 % ispitivanja prirodni se agregat zamijenio gumom u postotku volumena, a samo u 20 % ispitivanja u postotku mase.

Nakon analize vrste zamijenjenog agregata (sitni agregat ili krupni agregat) te nakon analize načina zamjene agregata (volumenska ili masena), poželjno je napraviti i analizu postotnog udjela zamijenjenog materijala u istraživanjima koja su obuhvaćena pregledom stanja područja. Statističkom obradom podataka zaključeno je da je srednja vrijednost volumenske zamjene sitnog agregata u istraživanjima običnog i samozbijajućeg betona iznosila 19 % volumena sitnog agregata (Slika 2.23), dok su se veći udjeli zamjene izbjegavali i ispitivani su u manjem obujmu, što predstavlja potencijal za buduća ispitivanja.



Slika 2.23 Distribucija udjela zamjene sitnog agregata (% volumena) – (uključuje 30 referenci samozbijajućeg betona s gumom)

2.4 Silicijska prašina kao djelomična zamjena cementa u samozbijajućem betonu s recikliranom gumom

Negativni utjecaj gume na mehanička svojstva samozbijajućeg betona može se neutralizirati ili umanjiti dodavanjem različitih vrsta mineralnih dodataka betonu. Korištenje mineralnih dodataka može značajno poboljšati mehanička svojstva samozbijajućeg betona [109]. Zbog svojih sitnih čestica sferičnog oblika silicijska prašina osigurava dobru koheziju i poboljšanu otpornost na segregaciju te uspješno eliminira segregaciju i izdvajanje vode [22], zbog čega potencijalno predstavlja najprikladniji dodatak cementu u promatranom slučaju. Vrlo mala zrna silicijske prašine, koja su 10-ak puta manja od zrna cementa, i velika specifična ploština silicijske prašine utječu na povećanje obujma koji okružuje cementne čestice. Nadalje, silicijska prašina povećava reaktivnost, ubrzava hidrataciju te reagira sa slobodnim vapijom stvarajući pritom CSH gel [114]. Silicijska prašina dodaje se u samozbijajući beton u postotku od mase cementa, čime se može pozitivno utjecati i na reološka svojstva samozbijajućeg betona. Povećanjem količine silicijske prašine u betonu povećavaju se i vrijednosti tlačnih čvrstoća betona, a samim time i njegova krutost, što u slučaju betona s gumom, koji ima povećanu duktilnost [59] i kapacitet deformabilnosti [107], ne predstavlja problem, nego je poželjna pojava. Zajedničkim efektom silicijske prašine i reciklirane gume potencijalno se može dobiti beton održanih početnih mehaničkih svojstava, ali i beton povećane deformabilnosti i duktilnosti. Djelomičnom zamjenom cementa sa silicijskom prašinom, i to u različitim postotcima zamjene, zastupljeno je u svega 3 od 30 pregledanih i pročitanih istraživanja samozbijajućeg betona s gumom [7], [23], [43]. Većina autora nije niti koristila tu vrstu materijala ili ju je koristila pri samo jednom postotku zamjene od 3 % ili 5 %. Sustavnom analizom utjecaja promatranih dviju varijabli, reciklirane gume i silicijske prašine, na

ponašanje SCC-a s gumom, može se doći do zaključka o optimalnim udjelima zamjene oba materijala. Budući da je u pojedinim primjenama poželjno da beton ima manju vlastitu težinu, visoku duktilnost i kapacitet apsorpcije energije, kombinacija granula gume i silicijske prašine može doprinijeti razvoju inovativnog betona s povećanom duktilnosti i fleksibilnosti, ali i potencijalno dobrih termičkih svojstava.

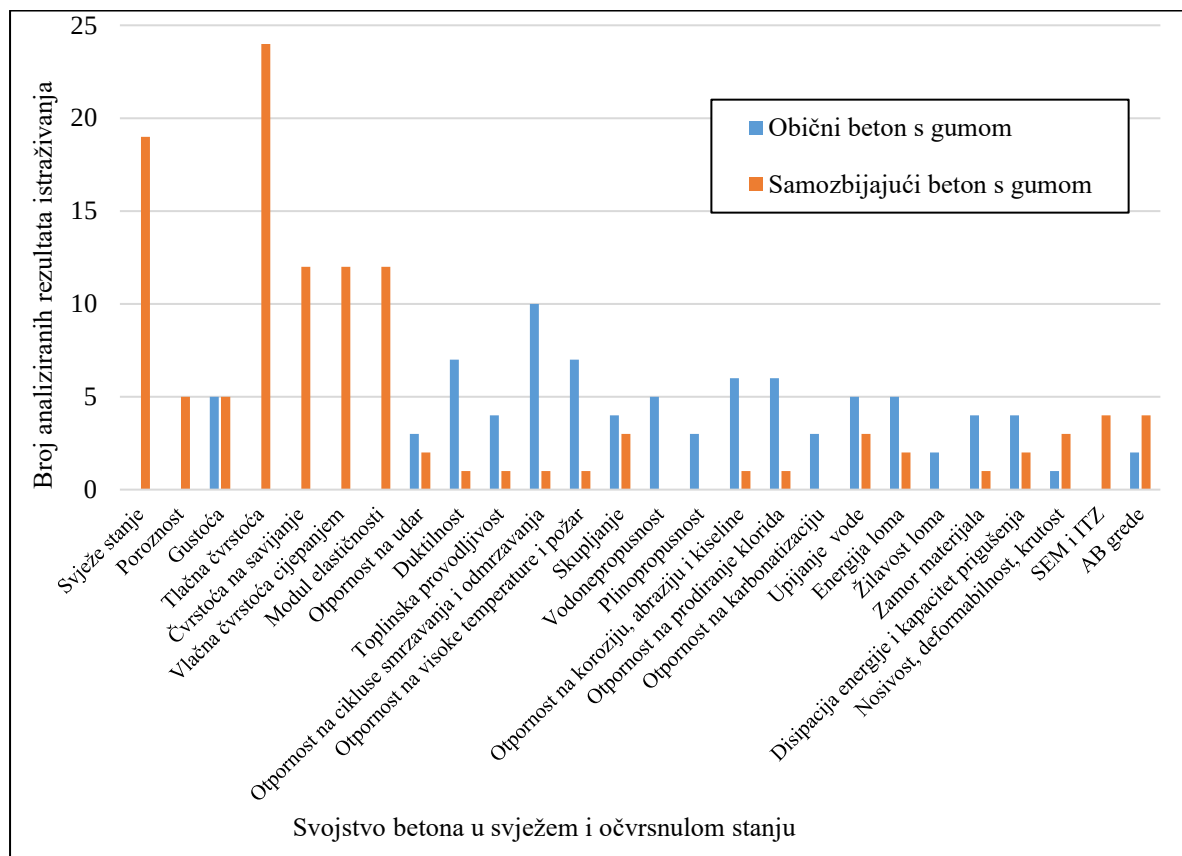
2.5 Trenutna primjena betona s recikliranom gumom u konstrukcijama

S obzirom na trenutne spoznaje o svojstvima betona s recikliranom gumom, primjena toga materijala još je uvijek ograničena na korištenje u svrhe pregradnih i nenosivih elemenata te zasigurno još nije ostvaren maksimalan potencijal betona i samozbijajućeg betona s gumom. Poznato je da se ta vrsta ekološki prihvatljivijeg betona koristi za izradu sportskih terena, bukobrana, pločnika [49], [54], [95], [101], ali i za relativno noviju primjenu kod fleksibilnih betonskih kolnika i autocesta te sigurnosnih betonskih barijera na lokacijama gdje je potreban beton dobre otpornosti na lom i povećane mogućnosti disipacije energije [104]. Spoznaje o ponašanju betona s gumom pri izlaganju različitim vrstama opterećenja otvorile su nova pitanja i prostor za istraživanje primjene toga materijala u konstrukcijske svrhe, npr. u konstrukcijama izloženima vanjskim utjecajima [109] ili za izradu unutarnjih betonskih elemenata s niskom ili umjerenom razinom vlažnosti zraka i vanjskih elemenata zaštićenih od kiše [107]. Na temelju dosadašnjih spoznaja, a uzimajući u obzir da je većina istraživanja bila usmjerena prema primjeni betona s gumom u nenosivim elementima, u doktorskoj disertaciji istražiti će se mogućnost primjene samozbijajućeg betona s gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će potencijalno biti namijenjeni za primjenu u području građevinarstva gdje je poželjna manja vlastita težina betona, visoka duktilnost, povećani kapacitet apsorpcije energije i poboljšana svojstva uporabljivosti armiranobetonskih elemenata.

2.6 Zaključci o pregledu stanja područja

Broj otpadnih guma svake godine raste, a s obzirom da je guma bio-nerazgradiv materijal, njezino recikliranje nužno je kako bismo se zaštitili od potencijalnih ekoloških prijetnji. Jedan od mogućih načina smanjenja broja neadekvatno zbrinutih otpadnih guma jest njihova mehanička obrada i korištenje u građevinskoj, tj. u betonskoj industriji kao zamjena za prirodni agregat. U pregledu stanja područja prikazan je utjecaj reciklirane gume kao zamjenskog materijala za prirodni sitni i krupni agregat na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Pregledom stanja područja obuhvaćena su sveukupno 83 istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s gumom ([Slika 2.24](#)). Pregledom literature vidljivo je da je veći broj istraživanja samozbijajućeg ili običnog betona s gumom temeljen na ispitivanju svojstava betona pri različitim udjelima zamjene prirodnog agregata gumom na razini materijala, tj. na manjim laboratorijskim uzorcima, te da postoji vrlo malen broj ispitivanja ponašanja i primjene takvog betona u armiranobetonskim elementima konstrukcije. Zbog manjka ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s gumom može se zaključiti i da je mnogo veći broj istraživanja i

ispitivanja na razini materijala, od pregledom stanja područja obuhvaćenih istraživanja, napravljen na običnom betonu s gumom, dok ih je manji broj napravljen na samozbijajućem betonu s gumom, 30 od ukupno 83 istraživanja.



Slika 2.24 Grafički prikaz pregledom stanja područja obuhvaćenih svojstava običnog i samozbijajućeg betona s gumom u svježem i očvrslulom stanju

Iz pregleda stanja područja može se donijeti nekoliko zaključaka bitnih za daljnje istraživanje mehaničkih, termičkih i svojstava trajnosti samozbijajućeg betona s recikliranom gumom:

- Otpadna guma u eksperimentalnim istraživanjima koristi se kao djelomična zamjena za agregat u običnom betonu i samozbijajućem betonu duže od dva desetljeća. Većinom se krupni i sitni agregat zamjenjuje gumenim agregatom, tj. gumenim granulatom dobivenim mehaničkim mljevenjem otpadne gume.
- Otpadne automobilske gume mogu se svrstati u četiri kategorije, ovisno o veličini, obliku i zamjenskom materijalu: usitnjena guma (13 - 76 mm), gumeni granulati (0,425 - 4,75 mm), gumeni prah (< 0,425 mm) i gumena vlakna (prosječna duljina 12,5 mm).
- Povećanje količine reciklirane gume negativno utječe na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju. Sposobnost tečenja, sposobnost zaobilaženja zapreka i otpornost na segregaciju smanjena je, a viskoznost povećana, dok manji broj autora tvrdi suprotno. Takvo ponašanje

betona može biti objašnjeno grubom površinom i površinskim trenjem gumenog agregata. Samo je manji broj autora zamijenio prirodni agregat gumom u postotku većem od 40 %.

- Kod samozbijajućeg betona bez gume uobičajeno se koriste kemijski dodatci kako bi se održala prihvatljiva svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju, stoga je većina autora prilikom projektiranja sastava mješavine samozbijajućeg betona s gumom također koristila različite vrste kemijskih dodataka, tj. superplastifikatore (SP) i dodatke za promjenu viskoznosti (VMA). Većina pregledanih rezultata ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju bila je unutar dozvoljenih granica Europskih smjernica za samozbijajući beton.
- Povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata gumom povećava se i poroznost svježeg samozbijajućeg betona, što se može objasniti oštrom i grubom površinom gumenog agregata te zbog navedene fizikalne karakteristike gume zrak ostaje zarobljen između zrna gumenog agregata i cementne paste.
- S obzirom na nedostatan broj dosadašnjih eksperimentalnih ispitivanja reoloških svojstava samozbijajućeg betona s gumom te zbog svoje važnosti u razumijevanju svojstava obradivosti te vrste samozbijajućeg betona, reološka svojstva samozbijajućeg betona s gumom trebala bi biti u području interesa budućih laboratorijskih ispitivanja.
- Povećanjem udjela gume u sastavu betona smanjuje se gustoća betona kod obje vrste betona, običnog i samozbijajućeg betona; smanjenje je gustoće neupitno kod obje vrste betona, što doprinosi smanjenju ukupne mase potencijalne buduće nosive konstrukcije, a objašnjava se činjenicom da je gustoća prirodnog agregata veća od gustoće reciklirane gume.
- Smanjenje vrijednosti mehaničkih svojstava, tj. tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, vlačne čvrstoće cijepanjem i modula elastičnosti uočeno je kada je različita vrsta gumenog agregata korištena kao djelomična zamjena prirodnog krupnog i sitnog agregata, neovisno o vrsti betona, udjelu gume, veličine gume ili zamijenjenom materijalu. Taj se efekt može opisati pomoću loše adhezije i čvrstoće veze na sučeljku gume i okolnog veziva, niskom vrijednošću modula elastičnosti samozbijajućeg betona s gumom u odnosu na modul elastičnosti samozbijajućeg betona bez gume te s povećanim udjelom zraka zarobljenog između čestica gume i cementne paste. Prema rezultatima istraživanja, objedinjenim u ovom pregledu stanja područja, samozbijajući beton s gumom mogao bi se koristiti za određene konstrukcijske svrhe, ali bi se postotak zamjene trebao racionalno odrediti s ciljem očuvanja prihvatljivih vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona.
- Uočava se poboljšanje otpornosti na udar samozbijajućeg betona i običnog betona kada gumu kao zamjenski materijal prirodnom agregatu ugrađujemo u svježu betonsku mješavinu. Ipak, još uvijek postoji mnogo nepoznanica u ponašanju samozbijajućeg betona s gumom i njegove otpornosti na udar, stoga su potrebna buduća laboratorijska istraživanja zbog moguće primjene samozbijajućeg betona u betonskim konstrukcijama.

- Kako bi se mogao donijeti konkretan zaključak o utjecaju primjene gume u samozbijajućem betonu na njegovu duktilnost, preporuča se provesti daljnja istraživanja zbog nedostatka rezultata ispitivanja duktilnosti samozbijajućeg betona s gumom.
- Otpadna guma povećava upijanje vode kod obje vrste betona, samozbijajućeg betona i običnog betona, što se može objasniti grubom površinom gumenog agregata. Isto tako, povećanje upijanja vode može se postići i povećanjem v/c omjera.
- Gumeni agregat povećava vrijednost skupljanja samozbijajućeg betona i običnog betona. Skupljanje je veće što je veći postotak zamjene prirodnog agregata, ali se svakako predlaže ispitivanje navedenog svojstva samozbijajućeg betona s gumom kako bi se ustanovilo kolike su ukupne deformacije od skupljanja.
- S obzirom na otpornost na smrzavanje/odmrzavanje nekoliko rezultata ispitivanja običnog betona upućuje na poboljšanje otpornosti na smrzavanje/odmrzavanje, dok ostali rezultati govore drugačije. Opći zaključak o promatranom svojstvu trajnosti betona jest taj da su potrebna dodatna istraživanja otpornosti samozbijajućeg betona s gumom na smrzavanje/odmrzavanje, kako bi se jednoznačno mogao donijeti zaključak o utjecaju primjene gume u betonu na promatrano svojstvo betona.
- Zbog nedostatnog broja rezultata ispitivanja i laboratorijskih istraživanja svojstava trajnosti samozbijajućeg betona s gumom, tj. vodonepropusnosti, zrakopropusnosti, plinopropusnosti, otpornosti na požar i visoke temperature, koroziju, abraziju, kiseline, karbonatizaciju i difuziju klorida, preporuča se provedba budućih eksperimentalnih istraživanja navedenih svojstava trajnosti samozbijajućeg betona.
- Poboljšanje otpornosti na zamor materijala uočeno je prilikom dodavanja gume kao zamjenskog materijala za prirodni agregat, neovisno o vrsti betona, zamijenjenom materijalu i veličini gume. Ipak, zbog nedostatnog broja rezultata iz područja zamora samozbijajućeg betona s gumom i njegovom usporedbom sa samozbijajućim betonom bez gume, preporuča se nastavak daljnjeg istraživanja toga svojstva samozbijajućeg betona.
- Toplinska vodljivost običnog betona može se poboljšati dodavanjem reciklirane gume, što je i dokazano u nekoliko eksperimentalnih istraživanja. Ipak, zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata toplinske vodljivosti samozbijajućeg betona s gumom preporuča se provedba dodatnih eksperimentalnih ispitivanja kako bi se evaluirao utjecaj gume na termička svojstva samozbijajućeg betona.
- Čvrstoća veze između armature i betona smanjuje se povećanjem sadržaja otpadnog gumenog agregata.
- Guma kao materijal apsorbira energiju dovodeći do visoko plastičnih deformacija uzoraka betona. Stoga se može zaključiti da se, neovisno o vrsti betona, kapacitet prigušenja betona i disipacija energije povećava povećanjem udjela gume u betonu, što je obećavajuće za

ispitivanja samozbijajućeg betona s gumom koja bi trebala uslijediti u budućim eksperimentalnim istraživanjima.

- Bez obzira na vrstu betona, obični beton ili samozbijajući beton, generalni zaključak taj je da se smanjenje nosivosti, povećanje deformabilnosti i smanjenje krutosti na savijanje može povezati s dodavanjem gume u betonskim mješavinama.
- Gumirani beton može se koristiti kao rješenje za poboljšanje kapaciteta deformabilnosti samozbijajućeg betona prije pojave lokaliziranih makropukotina, što predstavlja potencijal za poboljšanje svojstava trajnosti betonskih konstrukcija kada je otpornost na stvaranje pukotina uzrokovana prisilnim deformacijama prioriteta. Nadalje, takav pristup može biti zanimljiv i za kontrolu pukotina stvorenih skupljanjem betona.
- Pregledom literature ustanovljeno je da rezultati ispitivanja parametara mehanike loma, tj. energije loma i žilavosti loma, nisu jednoznačni, stoga se preporučuje daljnje istraživanje u navedenom području.
- Prilikom ispitivanja armiranobetonskih greda ustanovljeno je da se dodavanjem gume mogu povećati duktilnost i kapacitet deformabilnosti greda, kao i broj pukotina manje širine. Također, uočeno je da se u niti jednom istraživanju nosivih armiranobetonskih greda ne spominje korištenje silicijske prašine kao djelomične zamjene cementa, što predstavlja potencijal za daljnja istraživanja.
- Postojeća literatura nedovoljno pokriva ispitivanja uporabljivosti armiranobetonskih greda s gumom za konstrukcijsku primjenu, posebno u slučaju korištenja samozbijajućeg betona s gumom, a zbog nedostatnog broja eksperimentalnih istraživanja nosivih armiranobetonskih elemenata s recikliranom gumom predlaže se provedba dodatnih istraživanja na mikrorazini (SEM) i makrorazini (armiranobetonski elementi) s ciljem donošenja smjernica za upotrebu reciklirane gume u samozbijajućem betonu i uspješnog razvoja metodologije za primjenu reciklirane gume u armiranobetonskim elementima izrađenim od samozbijajućeg betona.
- Manji je broj istraživanja sučeljka gume i cementne paste pomoću SEM i EDS mikroanalize kemijskog sastava, stoga je i tom dijelu potrebno posvetiti dodatnu pažnju u rješavanju problematike veze između gume i cementne paste.
- Pregledom literature ustavljeno je da se u većini ispitivanja običnog i samozbijajućeg betona prirodni sitni agregat zamjenjivao recikliranom gumom. Stoga se predlaže u daljnjim ispitivanjima utjecaja gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju uvažiti navedenu činjenicu te provesti i vlastita ispitivanja sa zamjenom sitnog agregata, a izbjegavati zamjenu krupnog agregata. Zamjena prirodnog agregata recikliranom gumom treba biti volumenska, a ne masena.

- Srednja vrijednost volumenske zamjene sitnog agregata u istraživanjima običnog i samozbijajućeg betona iznosi 19 % volumena sitnog agregata ([Slika 2.23](#)). Veći postotni udjeli zamjene nedovoljno su ispitani, što predstavlja potencijal za buduća ispitivanja.
- Prethodni tretman gume može biti jedna od metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste, ali postavlja se pitanje vremenske i financijske isplativosti navedenog postupka s obzirom da se povećanje čvrstoće betona većinom kreće u granicama do maksimalnih 10 %, stoga se predlaže pasivna metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste pravilnim odabirom oblika zrna gumenog agregata, materijala koji se planira zamijeniti te udjelom i veličinom gume.
- Budući da se dodavanjem silicijske prašine može neutralizirati negativan utjecaj gume na mehanička svojstva samozbijajućeg betona, predlaže se napraviti dodatna eksperimentalna ispitivanja te sustavnom analizom utjecaja promatranih dviju varijabli, reciklirane gume i silicijske prašine, na ponašanje SCC-a s gumom, doći do zaključka o optimalnim udjelima zamjene oba materijala.

Trenutno ne postoje službeni normativni dokument ili smjernice za upotrebu reciklirane gume kao zamjene za prirodni agregat u samozbijajućem betonu, stoga će se u sklopu ove doktorske disertacije izraditi i smjernice s opisanom metodologijom izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Pregledom literature ustanovljeno je da na svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem i očvrsnulom stanju utječe nekoliko bitnih čimbenika na koje treba dodatno obratiti pozornost prilikom budućih eksperimentalnih ispitivanja:

- vrsta betona (obični beton, samozbijajući beton itd.),
- vodocementni (vodovezivni) omjer (obični i samozbijajući beton) i vodopraškasti omjer (samozbijajući beton),
- veličina gume (promjer u milimetrima) i udio gume u betonu (%),
- zamijenjeni materijal (sitni ili krupni agregat),
- dodatci betonu (kemijski, mineralni, vlakna),
- postupak miješanja svježe betonske mješavine.

U pojedinim primjenama poželjno je da beton ima manju vlastitu težinu, visoku duktilnost i kapacitet apsorpcije energije. Prethodna istraživanja dokazala su da se primjenom gume u betonu mogu poboljšati dinamička svojstva betona i smanjiti vlastita težina konstrukcijskih elemenata. Uključivanje otpadne gume u građevinsku industriju predstavlja ekološki prihvatljivo rješenje za zbrinjavanje otpadne gume, što ohrabruje i potiče taj koncept održive proizvodnje i održive gradnje. Postojeća znanstvena istraživanja u najvećoj mjeri obuhvaćaju ispitivanja mehaničkih svojstava betona s gumom. Istraživanja termičkih svojstava i svojstava trajnosti samozbijajućeg betona s gumom poprilično su nezastupljena u dostupnoj literaturi te broje svega nekoliko članaka napisanih na tu temu, što predstavlja

potencijal za buduća eksperimentalna istraživanja i dokazivanje mogućeg poboljšanja navedenih svojstava u usporedbi sa samozbijajućim betonom bez gume.

Većina istraživanja obuhvaćenih pregledom stanja područja usmjerena je prema primjeni betona s gumom u nenosivim elementima. U sklopu ove doktorske disertacije ispitat će se mogućnost primjene samozbijajućeg betona s gumom u nosivim armiranobetonskim gredama koje bi se potencijalno mogle primijeniti u područjima gdje je poželjna manja vlastita težina betona, povećana duktilnost i poboljšana svojstva uporabljivosti armiranobetonskih elemenata.

3 PRELIMINARNA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

SAMOBBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u sljedećim publikacijama:

- R. Bušić, N. Štirmer, I. Miličević, *Effect of tire powder and wood biomass ash on properties of self-compacting concrete*, *International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019), New Generation of Construction Materials*, Rovinj, Croatia, pp. 515–522, 2019. [115],
- R. Bušić, I. Miličević, *Influence of Waste Tire Rubber on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Rubberized Concrete (SCRC)*, *International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials (RheoCon2) and International Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC9)*, Dresden, Germany, pp. 3–10, 2020. [116],
- I. Miličević, M. Hadzima-Nyarko, R. Bušić, J. Simonović Radosavljević, M. Prokopijević, K. Vojisavljević, *Effect of Rubber Treatment on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Self-Compacting Rubberized Concrete*, *International Conference on Advanced Construction Materials (ICACM 2021)*, Paris, France, pp. 131–134, 2021. [117].

3.1 Cilj ispitivanja

S namjerom donošenja zaključaka o utjecaju primjene reciklirane gume na svojstva armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata izrađenih od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom, potrebno je provesti preliminarna istraživanja svojstava komponenti betona, uključujući i svojstva reciklirane gume, i samog samozbijajućeg betona s gumom, kako bi se donijeli dodatni zaključci o projektiranju sastava samozbijajućeg betona, materijalu koji će reciklirana guma zamijeniti, udjelu reciklirane gume u sastavu betonsku mješavinu te potrebi prethodnog tretiranja gume. Stoga su u ovom poglavlju opisana preliminarna eksperimentalna ispitivanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom provedena s ciljem određivanja ranije navedenih parametara.

3.2 Materijali i metode ispitivanja

3.2.1 Materijali

Prilikom projektiranja sastava mješavina samozbijajućeg betona (*engl. self-compacting concrete, SCC*) poštovani su svi parametri dani u EFNARC smjernicama za samozbijajući beton [1]. Korišten je portlandski cement CEM I 42,5 R iz obližnje tvornice cementa u Našicama (Hrvatska) sa specifičnom težinom od 3,17 g/cm³ i finoćom mliva po Blaineu od 4378 cm²/g, u skladu s normom HRN EN 197-1:2012 [118]. Kemijski sastav cementa prikazan je u [Tablici 3.1](#).

Tablica 3.1 Kemijski sastav cementa CEM I 42,5R

Kemijski spoj	% mase	Kemijski spoj	% mase
CaO	61,24	MgO	2,84
SiO ₂	21,33	MnO	0,14
Al ₂ O ₃	5,69	K ₂ O	0,74
Fe ₂ O ₃	2,27	Na ₂ O	0,37
SO ₃	3,52	LOI	1,52

Silicijska prašina (*engl. silica fume, SLF*), sa specifičnom težinom od 2,19 g/cm³ i specifičnom površinom od 20,5 m²/g, korištena je kao mineralni dodatak betonu (Tablica 3.2). Korištena SLF je iz mjesta Pocking (Njemačka) te je u skladu s normom HRN EN 13263-1:2009 [119].

Tablica 3.2 Fizikalna i kemijska svojstva silicijske prašine

Boja i forma	Glavna komponenta	Gustoća (g/cm ³)	SiO ₂ (%)	Specifična površina (m ² /g)	Veličina zrna (μm)	Najveća preporučena količina (% od mase cementa)
Sivi prah	amorfni SiO ₂	2,2	96 ± 1,5	20,5	0,1 - 0,3	11

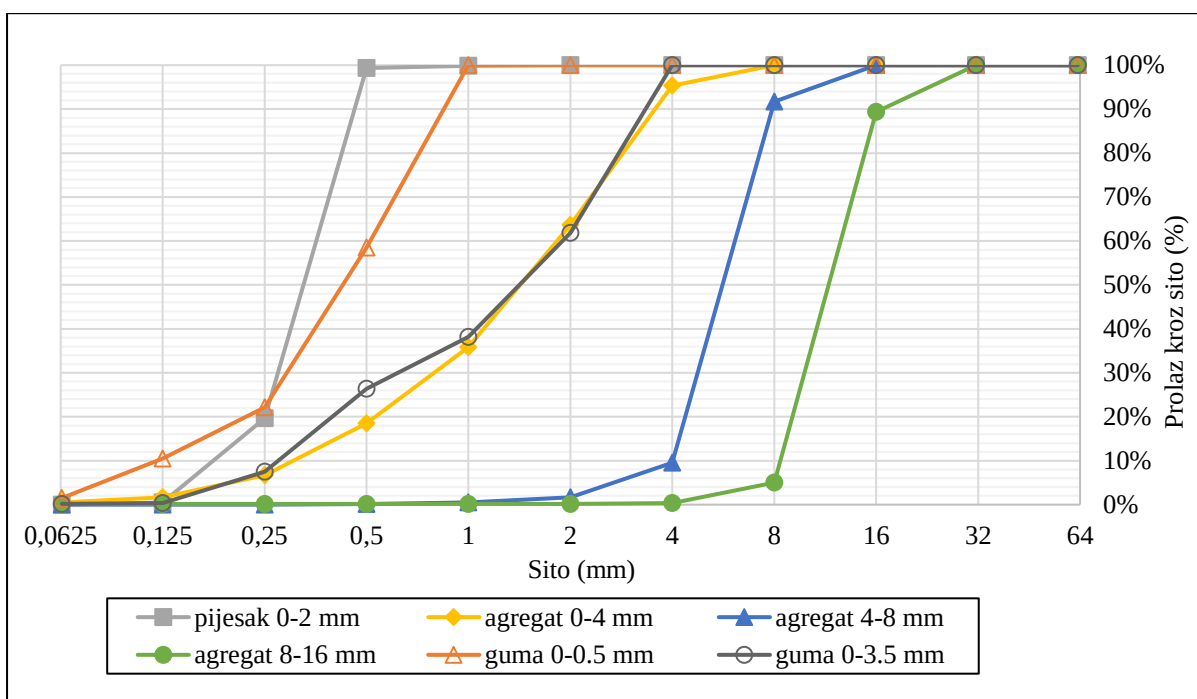
Korištena je voda iz slavine iz javnog sustava vodoopskrbe grada Osijeka, koja je u skladu s normom HRN EN 1008:2002 [120]. U namjeri postizanja željenih svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju, tj. razreda (klasa) sposobnosti tečenja i viskoznosti, kao kemijski dodatci korišteni su superplastifikatori (*engl. superplasticizer, SP*) Energy FM500 i Sika Viscocrete 20 Gold te dodatci za promjenu viskoznosti (*eng. viscosity modifying admixture, VMA*) Premadd Stabilizator X i RheoMatrix 100. Kemijski su dodatci u skladu s normom HRN EN 934-1:2008 [121] i HRN EN 934-2:2012 [122]. Ukoliko je bilo potrebno, količina superplastifikatora i dodatka za promjenu viskoznosti prilagođavala se tijekom miješanja, prvenstveno kako bi se postigle željene vrijednosti rasprostiranja slijevanjem. Glavna svojstva kemijskih dodataka, dobivena od proizvođača, prikazana su u Tablici 3.3.

Kao punilo (*engl. filler*) korišteno je dolomitno brašno (*eng. dolomite powder*), veličine zrna < 0,063 mm, iz obližnjeg kamenoloma, specifične težine 2,97 g/cm³ i finoće mliva po Blaineu od 5206 cm²/g. Gustoće cementa, silicijske prašine i dolomitnog brašna ispitane su prema normi ASTM C188-16 [123]. Prirodni pijesak i drobljeni kamen nominalne veličine zrna od 0-2 mm, 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm sa specifičnom težinom od 2,58 g/cm³, 2,79 g/cm³, 2,88 g/cm³ i 2,88 g/cm³ korišteni su kao sitni agregat (*engl. fine aggregate – FA*) i krupni agregat (*engl. coarse aggregate – CA*). Granule gume dobivene mehaničkim mljevenjem lokalnih otpadnih automobilskih guma, specifične težine od 1,05 g/cm³, korištene su u preliminarnom ispitivanju kao zamjena punilu (dolomitno brašno) i kao zamjena sitnom agregatu (frakcija 0-4 mm). Stoga je i grafički prikaz granulometrijskih krivulja prikazan odvojeno, tj. za dva slučaja korištenja reciklirane gume. U prvom slučaju, granule gume veličine zrna 0-0,5 mm korištene su kao zamjena za punilo (dolomitno brašno). U drugom slučaju, granule gume veličine zrna 0-3,5 mm korištene su kao zamjena za sitni agregat (frakcija 0-4 mm). Granulometrijski

sastavi sitnog agregata, krupnog agregata i gumenog agregata dobiveni metodom sijanja u skladu s normom HRN EN 933-1:2012 [124] prikazani su na [Slici 3.1](#).

Tablica 3.3 Svojstva kemijskih dodataka

Svojstvo	Superplastifikator		Dodatak za promjenu viskoznosti	
	Energy FM500	Sika Viscocrete 20 Gold	Premadd Stabilisator X	RheoMatrix 100
Agregatno stanje	tekuće	tekuće	tekuće	tekuće
Boja	jantarna	žućkasta	mliječno bijela	tamno smeđa
gustoća (kg/L)	$1,08 \pm 0,02$	1,06	$1,04 \pm 0,02$	1,01
pH vrijednost	$3,5 \pm 2,0$	Oko 4,0	$7,0 \pm 2,0$	7 – 9,5
Sadržaj klorida	-	< 0,1%	-	-
Sadržaj lužina	-	< 0,5%	-	-



Slika 3.1 Granulometrijski sastav prirodnog agregata i reciklirane gume

3.2.2 Metode ispitivanja

U preliminarnim ispitivanjima ispitana su svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju ispitana je sposobnost tečenja i viskoznost (rasprostiranjem slijeganjem), sposobnost zaobilaženja zapreka (J-prsten i L-kutija) sukladno važećim normama HRN EN 12350-8:2019 [30], HRN EN 12350-10:2010 [32], HRN EN 12350-12:2010 [34] te sukladno Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1]. U očvrslom stanju, pri starosti uzoraka od 28 dana, ispitana su tlačna čvrstoća i modul elastičnosti. Tlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima kocki dimenzija 150 mm × 150 mm × 150 mm sukladno normi HRN EN 12390-3:2019 [125], a statički modul

elastičnosti ispitan je na uzorcima valjka dimenzija 150 mm × 300 mm sukladno normi HRN EN 12390-13:2013 [126].

3.2.3 Projektiranje sastava betonskih mješavina

Trenutno ne postoji standardizirana metodologija projektiranja sastava samozbijajućeg betona s gumom [21]. Stoga su se za preliminarno projektiranje sastava referentne mješavine samozbijajućeg betona i mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom koristile Europske smjernice za samozbijajući beton [1] te dosadašnje spoznaje stečene pregledom literature, pomoću kojih je i izrađena [Tablica 3.4](#) u kojoj su prikazani sastavi referentnih betonskih mješavina samozbijajućeg betona 17 eksperimentalnih ispitivanja drugih autora. Sve usvojene vrijednosti količina pojedine komponente samozbijajućeg betona korištene za projektiranje sastava vlastite referentne mješavine nalaze se unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti za pojedinu komponentu samozbijajućeg betona navedenu u [Tablici 3.4](#).

Tri su glavne faze preliminarnih ispitivanja vezanih za projektiranje sastava samozbijajućeg betona i eksperimentalnog ispitivanja istog. U prvoj fazi prah reciklirane gume (*engl. tire powder*) veličine zrna 0-0,5 mm koristio se kao zamjena za punilo, tj. dolomitno brašno ([Tablica 3.5](#)), i to u postotku od 5 %, 10 %, 15 % i 20 % mase punila. Nadalje, korišteni su kemijski dodatci proizvođača Sika i BASF, superplastifikator Sika Viscocrete 20 Gold i dodatak za promjenu viskoznosti RheoMatrix 100. U drugoj fazi prah reciklirane gume veličine zrna 0-0,5 mm i granule reciklirane gume veličine 0,5 - 2 mm i 2 - 3,5 mm koristili su se kao zamjena za prirodni sitni agregat (frakcija 0-4 mm) i to u postotku od 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % i 30 % volumena sitnog agregata. U drugoj fazi silicijska je prašina korištena kao djelomična zamjena cementu u svim mješavinama, i to u postotku od 10 % mase cementa ([Tablica 3.6](#)). Za razliku do prve faze u drugoj su fazi korišteni kemijski dodatci proizvođača BT3, superplastifikator Energy FM 500 i dodatak za promjenu viskoznosti Premmad Stabilizator X. U trećoj fazi reciklirana guma korištena je na isti način kao i u drugoj fazi, ali u postotku od 10 % volumena sitnog agregata, s tim da je dodatno prethodno tretirana metodom upijanja vode u trajanju od 24 sata (*engl. water soaking method*), ili je prethodno tretirana kombinacijom metode upijanja vode i dodatnim izlaganjem gume natrijevom hidroksidu (NaOH) u trajanju od 20 minuta. U trećoj fazi nije korištena silicijska prašina, dok su kemijski dodatci jednaki onima koji su korišteni u drugoj fazi. ([Tablica 3.7](#)).

Tablica 3.4 Pregled literature - sastavi referentnih betonskih mješavina samozbijajućeg betona (kg/m³)

Autori	Komponenta samozbijajućeg betona														Ukupna masa (kg/m ³)
	Cement	Leteći pepeo	Metakaolin	Silicijska prašina	Zgura	Punilo	Voda	Ukupni sadržaj veziva	vodovezivni omjer	Sitni agregat	Krupni agregat	SP (% mase veziva)	aerant (% mase veziva)	VMA (% mase veziva)	
Ganesan i sur. [51]	410	112	0	0	0	0	193	522	0,37	887	710	1,6	0	0	2320,4
Emiroğlu i sur. [8]	465	0	0	0	135	0	170	600	0,28	1192	521	1,5	0,5	0	2495,0
Ismail i Hassan [14]	500	0	0	0	0	0	200	500	0,40	981	687	0,47	0	0	2369,7
Bideci i sur. [41]	375	0	0	0	175	0	192,5	550	0,35	1168	500	1,46	0,2	0	2419,6
Aslani i sur. [7]	180	135	0	33,8	101,3	0	202,5	450	0,45	917	759	3	0	0	2345,3
Güneyisi [42]	550	0	0	0	0	0	192,5	550	0,35	801	839	1,37	0	0	2389,1
AbdelAleem i Hassan [43]	495	0	0	55	0	0	220	550	0,40	915	641	0,65	0	0	2329,5
AbdelAleem i sur. [44]	275	165	110	0	0	0	220	550	0,40	886	620	0,62	0	0	2279,8
Turatsinze i Garros [45]	350	0	0	0	0	120,1	140	350	0,40	833	824	1,11	0,13	0,34	2273,0
Bignozzi i Sandrolini [47]	370	0	0	0	0	196	195	370	0,53	986	617	0,84	0	0,39	2368,6
Mishra i Panda [48]	511		0	0	0	0	191,6	511	0,37	706	798	0,40	0	0	2208,9
Si i sur. [49]	430	120	0	0	0	0	215	550	0,39	790	777	0,44	0	0	2334,4
Topçu i Bilir [50]	380	150	0	0	0	0	170	530	0,32	780	860	2	0	0	2350,6
Khalil i sur. [38]	450		0	0	0	0	202,5	450	0,45	806	806	2,00	0	0	2272,7
Zaoiai i sur. [39]	473		0	0	0	47,3	246	473	0,52	900	730	1,74	0	0	2404,5
Aslani i sur. [23]	180	135	0	33,8	101,3	0	202,5	450	0,45	917	595	0,44	0	0,37	2168,8
Ismail i Hassan [40]	275	165	110	0	0	0	220	550	0,4	886	620	0,62	0	0	2279,8

Tablica 3.5 Sastavi betonskih mješavina – prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m³)
[115]

Mješavina	SCC-0	SCC-5-TP	SCC-10-TP	SCC-15-TP	SCC-20-TP
CEM I 42,5R	450	450	450	450	450
Silicijska prašina	0	0	0	0	0
Voda	180	180	180	180	180
Vodovezivni omjer	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
SP (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
VMA (%)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Dolomitno brašno	150	142,5	135	127,5	120
Reciklirana guma	0	7,5	15	22,5	30
Agregat 0-2 mm	301,52	301,52	301,52	301,52	301,52
Agregat 0-4 mm	572,31	572,31	572,31	572,31	572,31
Agregat 4-8 mm	318,29	318,29	318,29	318,29	318,29
Agregat 8-16 mm	406,07	406,07	406,07	406,07	406,07
Vodopraškasti omjer	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82

Tablica 3.6 Sastavi betonskih mješavina – druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m³)
[116]

Mješavina	SCC-0CR	SCC-5CR	SCC-10CR	SCC-15CR	SCC-20CR	SCC-25CR	SCC-30CR
CEM I 42,5R	405	405	405	405	405	405	405
Silicijska prašina	45	45	45	45	45	45	45
Voda	180	180	180	180	180	180	180
Vodovezivni omjer	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
SP (%)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,50
VMA (%)	0	0	0	0	0	0	0
Dolomitno brašno	80	80	80	80	80	80	80
Reciklirana guma	0	32,82	65,63	98,45	131,26	164,08	196,90
Agregat 0-2 mm	322,54	322,54	322,54	322,54	322,54	322,54	322,54
Agregat 0-4 mm	610,38	523,18	435,99	348,79	261,59	174,39	87,20
Agregat 4-8 mm	360,04	360,04	360,04	360,04	360,04	360,04	360,04
Agregat 8-16 mm	450,05	450,05	450,05	450,05	450,05	450,05	450,05
Vodopraškasti omjer	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03

Tablica 3.7 Sastavi betonskih mješavina – treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja (kg/m³) [117]

Mješavina	SCC-D	SCC-W	SCC-T
CEM I 42,5R	450	450	450
Silicijska prašina	0	0	0
Voda	180	180	180
Vodovezivni omjer	0,4	0,4	0,4
SP (%)	1,25	1,25	1,25
VMA (%)	0,25	0,25	0,25
Dolomitno brašno	80	80	80
Reciklirana guma	66,13	66,13	66,13
Agregat 0-2 mm	324,99	324,99	324,99
Agregat 0-4 mm	439,3	439,3	439,3
Agregat 4-8 mm	362,78	362,78	362,78
Agregat 8-16 mm	453,47	453,47	453,47
Vodopraškasti omjer	1,07	1,07	1,07
Prethodni tretman	-	voda (24 sata)	voda (24 sata) + NaOH (20 minuta)

3.2.4 Priprema i ugradnja betona

Projektirani sastavi mješavina samozbijajućeg betona miješani su pomoću laboratorijske miješalice maksimalnog kapaciteta 50 L. Na samom početku miješanja zasićen površinski suh agregat promiješao se 120 sekundi. Potom su dodani cement, dolomitno brašno, guma, silicijska prašina i dio vode te se miješanje nastavilo za još 120 sekundi. Potom je u miješalicu dodana preostala voda i po potrebi su dodani kemijski dodatci, superplastifikator i dodatak za promjenu viskoznosti, te se miješanje nastavilo za dodatnih 240 sekundi (4 minute). Po završetku postupka miješanja samozbijajući beton ispitan je u svježem stanju te je potom ulijevan u kalupe normiranih veličina (kocke, valjci, prizme) bez vibriranja i zbijanja. Za potrebe ispitivanja preliminarnih mješavina samozbijajućeg betona od svake je mješavine izrađeno 6 uzoraka valjaka dimenzija Ø 150 mm × 300 mm, 3 uzorka za određivanje tlačne čvrstoće betona i 3 uzorka za određivanje modula elastičnosti betona. Raskalupljivanje uzoraka uslijedilo je nakon 24 sata te su potom uzorci njegovani u vodi dodatnih 28 dana, u laboratorijskim uvjetima (23 ± 2 °C), nakon čega su korišteni za ispitivanje svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju.

3.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija

3.3.1 Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja

3.3.1.1 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju za prvu fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u [Tablici 3.8](#).

Tablica 3.8 Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Mješavina	J-prsten		Rasprostiranje slijeganjem			L-kutija		
	PJ (mm)	Razred	SF (mm)	t ₅₀₀ (s)	Razred	PL	Razred	
SCC-0	6,25	< 10	695	2,01	SF2/VS2	0,80	= 0,80	PA2
SCC-5-TP	6,75	< 10	825	1,78	SF3/VS1	0,95	> 0,80	PA2
SCC-10-TP	7,75	< 10	810	2,43	SF3/VS2	0,90	> 0,80	PA2
SCC-15-TP	16,25	> 10	693	3,40	SF2/VS2	0,81	> 0,80	PA2
SCC-20-TP	21,25	> 10	680	3,50	SF2/VS2	0,79	< 0,80	PA2

Iz **Tablice 3.8** može se zaključiti da se povećanjem udjela reciklirane gume u samozbijajućem betonu kao zamjenskog materijala punilu smanjuje sposobnost zaobilaženja zapreka i sposobnost tečenja, ali povećava se viskoznost, što je u skladu s rezultatima prethodnih istraživanja [3], [14], [42], [46], [49]. Pri 20 %-tnoj zamjeni vrijednost PJ povećala se 3,4 puta, a promjer rasprostiranja slijeganjem smanjen je 2 %, s tim da je razred rasprostiranja slijeganjem ostao isti kao i kod referentne mješavine, tj. SF2. Vrijeme t₅₀₀ također je povećano 1,5 puta. Ipak, mješavine s 5 % i 10 % gume pokazuju kontradiktorne rezultate, tj. promjer rasprostiranja slijeganjem veći je od promjera referentne mješavine SCC-0, što nije u skladu s prethodnim istraživanjima.

3.3.1.2 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju za prvu fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u **Tablici 3.9**.

U usporedbi s referentnom mješavinom smanjenje tlačne čvrstoće valjaka iznosi 21 % pri 20 %-tnoj zamjeni punila prahom reciklirane gume. Ipak, pri 10 %-tnoj i 15 %-tnoj zamjeni tlačna se čvrstoća smanjila za svega 10 % i 7 %. Vrijednosti tlačnih čvrstoća veće su za sve mješavine od 40 MPa, što je poprilično obećavajuće za daljnja istraživanja. Što se tiče modula elastičnosti, uočeno je povećanje vrijednosti za 11 % i 10 % pri 5 %-tnoj i 10 %-tnoj zamjeni punila prahom reciklirane gume. Ipak, pri većim postotcima zamjene, tj. pri 15 % i 20 % zamjene, modul elastičnosti smanjen je za otprilike 4 %.

Tablica 3.9 Prva faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Mješavina	f _{c,cyl} (MPa)			E (GPa)		
	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent Varijacije (%)	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent Varijacije (%)
SCC-0	53,02	1,32	2,50	45,43	0,37	0,83
SCC-5-TP	52,34	0,76	1,44	50,41	5,33	10,57
SCC-10-TP	47,90	2,66	5,54	50,17	8,99	17,91
SCC-15-TP	49,17	0,68	1,38	43,78	2,93	6,70
SCC-20-TP	41,84	2,64	6,31	43,56	4,37	10,03

Bitno je napomenuti da se prah reciklirane gume u prvoj fazi preliminarnog ispitivanja koristio kao zamjenski materijal punilo, a nakon ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s gumom u svježem i očvrnulom stanju zaključeno je da ipak nije u potpunosti primjereno korištenje praha reciklirane gume (0-0,5 mm) kao zamjene za punilo (dolomitno brašno) s obzirom da prema normi HRN EN 12620:2008 [127] granulometrijski sastav praha reciklirane gume ne zadovoljava uvjete za punilo, tj. kroz sito otvora 0,063 mm ne prolazi između 70 % i 85 % materijala. Nadalje, količina primijenjenog gumenog praha poprilično je zanemariva u odnosu na količinu koja se može primijeniti ukoliko zamjenjujemo prirodni sitni ili krupni agregat recikliranom gumom. Iz navedenih razloga pristupilo se drugoj fazi preliminarnog eksperimentalnog istraživanja, u kojemu se reciklirana guma koristila kao zamjena za prirodni sitni agregat.

3.3.2 Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja

3.3.2.1 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju za drugu fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u [Tablici 3.10](#).

Iz rezultata prikazanih u [Tablici 3.10](#) može se zaključiti da se povećanjem postotka zamjene prirodnog sitnog agregata s recikliranom gumom smanjuje sposobnost tečenja i sposobnost zaobilaženja zapreka, dok je viskoznost povećana. Rezultati su u skladu s rezultatima prve faze preliminarnog ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju. Sukladno Europskim smjernicama za samozbijajući beton [1] vrijednosti PJ i PL trebale bi biti manje od 10 mm i veće od 0,8. Vidljivo je da navedene uvjete zadovoljavaju betonske mješavine s 0 %, 5 % i 10 % gume. Pri udjelu gume od 30 %, smanjenje promjera rasprostiranja slijeganjem iznosi 10 %, što je poprilično zanemarivo. Viskoznost je također povećana, a prema Europskim smjernicama za samozbijajući beton ciljana je vrijednost 2 sekunde, iz čega proizlazi da mješavine s udjelom gume od 25 % i 30 % ne zadovoljavaju uvjete dane u Europskim smjernicama. Međutim, silicijska prašina također negativno utječe na obradivost, a s obzirom da se u svim mješavinama koristila 10 %-tna zamjena cementa silicijskom prašinom, zaključuje se da bi trebalo ispitati i mješavine samozbijajućeg betona s manjim postotkom silicijske prašine.

Tablica 3.10 Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Mješavina	J-prsten		Rasprostiranje slijeganjem			L-kutija		
	PJ (mm)	Razred	SF (mm)	t ₅₀₀ (s)	Razred	PL	Razred	
SCC-0CR	6,25	< 10	690	1,45	SF2/VS1	0,87	> 0,80	PA2
SCC-5CR	9,50	< 10	685	1,55	SF2/VS1	0,86	> 0,80	PA2
SCC-10CR	9,75	< 10	670	1,71	SF2/VS1	0,81	> 0,80	PA2
SCC-15CR	11,00	> 10	670	1,83	SF2/VS1	0,74	< 0,80	PA2
SCC-20CR	12,00	> 10	685	1,86	SF2/VS1	0,78	< 0,80	PA2
SCC-25CR	13,75	> 10	655	2,10	SF1/VS2	0,78	< 0,80	PA2
SCC-30CR	26,25	> 10	620	2,36	SF1/VS2	0,77	< 0,80	PA2

3.3.2.2 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju za drugu fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u [Tablici 3.11](#).

Tablica 3.11 Druga faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Mješavina	f _{c,cyl} (MPa)			E (GPa)		
	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)
SCC-0CR	66,30	1,13	1,71	49,26	0,90	1,82
SCC-5CR	60,83	4,27	7,02	48,06	3,41	7,10
SCC-10CR	42,73	3,66	8,56	41,94	2,21	5,26
SCC-15CR	33,11	2,63	7,94	37,69	2,27	6,03
SCC-20CR	25,04	1,51	6,03	36,28	3,78	10,41
SCC-25CR	24,28	2,01	8,29	26,42	2,78	10,50
SCC-30CR	18,96	3,51	18,49	23,68	0,90	3,79

Rezultati prikazani u [Tablici 3.11](#) u skladu su s rezultatima prve faze preliminarnog ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju. Povećanjem udjela gume u betonu smanjuju se vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti samozbijajućeg betona. Ipak, primijećuje se da su vrijednosti tlačnih čvrstoća veće pri manjem udjelu gume u betonu, što se može objasniti pozitivnim utjecajem silicijske prašine na vrijednost tlačne čvrstoće. U usporedbi s prvom fazom preliminarnog istraživanja, rezultati druge faze preliminarnog istraživanja pokazali su bolju ujednačenost i trendove ponašanja samozbijajućeg betona s gumom. U drugoj fazi, trend pada vrijednosti ispitanih mehaničkih svojstava ujednačen je i vidljiv kod oba ispitana svojstva. Tako se ponašanje može opisati apsolutnom količinom, tj. volumenom materijala koji se mijenja. Naime, u prvoj fazi preliminarnog ispitivanja guma je korištena kao zamjenski materijal punilu te je, ako se promatraju apsolutne vrijednosti, poprilično malen volumen gume korišten kao zamjenski

materijal. U drugoj fazi preliminarnog istraživanja guma je korištena kao zamjenski materijal za prirodni sitni agregat, što znači da je apsolutna vrijednost, tj. volumen zamijenjenog materijala, veći od volumena materijala koji je zamijenjen u prvoj fazi preliminarnog istraživanja, za isti postotak zamjene. Npr. u prvoj fazi preliminarnog istraživanja, pri 10 %-tnoj zamjeni punila s gumom korišteno je svega 15 kg gume, dok je pri istom postotku zamjene u drugoj fazi preliminarnog istraživanja korišteno 65,63 kg gume, što je više od 4 puta veća količina od količine korištene u prvoj fazi preliminarnog istraživanja. Slično kao i u [Poglavlju 3.3.2.1](#) poznato je da silicijska prašina pozitivno utječe na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Stoga se predlaže da se prilikom izbora optimalnih mješavina u idućem koraku eksperimentalnog ispitivanja istraže i mješavine samozbijajućeg betona s manjim postotkom silicijske prašine, kako bi se mogao izraditi što prikladniji model za odabir optimalnih mješavina od kojih će se potom izraditi i ispitati armiranobetonski konstrukcijski elementi. Međutim, u prvoj i drugoj fazi preliminarnog istraživanja nije ispitan utjecaj prethodnog tretiranja gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Iz navedenog razloga pristupilo se i trećoj fazi preliminarnog eksperimentalnog istraživanja, u kojemu se reciklirana guma prethodno tretirala na različite načine.

3.3.3 Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja

3.3.3.1 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju za treću fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u [Tablici 3.12](#).

Tablica 3.12 Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Mješavina	Rasprostiranje slijeganjem					
	t ₅₀₀ (s)		Razred	SF (mm)		Razred
SCC-D	1,9	<2	VS1	750	660–750	SF2
SCC-W	1,9	<2	VS1	770	760–850	SF3
SCC-T	2,4	>2	VS2	730	660–750	SF2

Iz [Tablice 3.12](#) vidljivo je da se rezultati mješavine SCC-W, gdje je guma prethodno tretirana metodom upijanja vode, mogu istaknuti kao najprihvatljiviji s obzirom da je dobiven razred rasprostiranja slijeganjem SF3 i razred viskoznosti VS1, čime je potvrđeno da je navedena mješavina pogodna za ugradnju u konstrukcijske elemente s gusto raspoređenom armaturom. Ipak, potrebno je napomenuti da su svi rezultati poprilično zadovoljavajući i slični te da među njima ne postoji nekakva drastična razlika. Stoga se zaključuje da istraženi prethodni tretmani gume doprinose poboljšanju svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju, ali ne u tolikoj mjeri da bi se preporučila njihova upotreba.

3.3.3.2 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju za treću fazu preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja navedeni su u [Tablici 3.13](#).

Tablica 3.13 Treća faza preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja – svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Mješavina	$f_{c,cyl}$ (MPa)			E (GPa)		
	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent Varijacije (%)	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Koeficijent Varijacije (%)
SCC-D	34,8	0,2	3	32,92	0,3	11
SCC-W	35,2	0,1	1	33,13	0,3	11
SCC-T	37,9	0,2	3	34,45	0,4	14

Iz rezultata prikazanih u [Tablici 3.13](#) vidljivo je da prethodni tretmani gume doprinose poboljšanju mehaničkih svojstava, tj. tlačne čvrstoće i modula elastičnosti samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Prethodno tretiranje gume kombinacijom metode upijanja vode i dodatnim izlaganjem gume natrijevom hidroksidu (NaOH) u trajanju od 20 minuta pokazalo se najučinkovitijim u poboljšanju promatranih mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona. Ipak, dobiveni rezultati ne predstavljaju značajno poboljšanje mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona ako se guma prethodno tretira na promatrana dva načina. Stoga se za nastavak istraživanja utjecaja reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju preporuča ne koristiti niti jedan od ispitanih prethodnih tretmana gume, već se preporuča pasivna metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste, a to je odabirom gume putem nekoliko parametara, kao što su oblik zrna, zamijenjeni materijal, udio gume i veličina gume.

3.4 Zaključci o ispitivanju

U [Poglavljju 3](#) provedena su preliminarna eksperimentalna ispitivanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom koja su obuhvatila istraživanje svojstava komponenti betona i samog samozbijajućeg betona s gumom, i to u tri faze iz kojih se može donijeti nekoliko bitnih zaključaka za nastavak eksperimentalnog istraživanja:

- Prilikom preliminarnog projektiranja sastava referentne mješavine samozbijajućeg betona i mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom koristile su se Europske smjernice za samozbijajući beton te dosadašnje spoznaje stečene pregledom literature, a usvojene vrijednosti količina pojedinog materijala korištenog za spravljanje betonskih mješavina nalaze se unutar minimalnih i maksimalnih vrijednosti pojedine komponente samozbijajućeg betona navedenih u [Tablici 3.4](#).
- Miješanje betona izvršeno je vlastitom metodom opisanom u [Poglavljju 3.2.4](#).

- Iz rezultata prve faze preliminarnog istraživanja može se zaključiti da se iz dva razloga ne preporuča korištenje praha reciklirane gume (veličina zrna 0-0,5 mm) kao zamjene za punilo: (a) prah reciklirane gume ne zadovoljava uvjete za punilo propisane normom HRN EN 12620:2008 [127], (b) zamjenom punila recikliranom gumom udio reciklirane gume u betonu nije značajan, što posljedično dovodi do smanjene ujednačenosti rezultata istraživanja.
- Rezultati druge faze preliminarnog istraživanja, u usporedbi s rezultatima istraživanja prve faze preliminarnog istraživanja, pokazali su bolju ujednačenost i trendove ponašanja samozbijajućeg betona s gumom. Budući da su granulometrijske krivulje frakcije agregata 0-4 mm i reciklirane gume 0-3,5 mm poprilično slične, preporuča se da zamijenjeni materijal bude sitni agregat (frakcija 0-4 mm). Pozitivan utjecaj silicijske prašine na svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom nije zanemariv. Ipak, predlaže se dodatno istražiti utjecaj reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona bez silicijske prašine ili s manjim postotkom silicijske prašine od 10 % mase cementa, sve s ciljem izrade što prikladnijeg modela za odabir optimalnih mješavina od kojih će se potom izraditi i ispitati armiranobetonski konstrukcijski elementi.
- Trećom fazom preliminarnog eksperimentalnoga istraživanja dokazano je da se prethodnim tretmanom gume ne mogu značajno poboljšati mehanička svojstva samozbijajućeg betona, stoga se predlaže ne koristiti metodu prethodnog tretiranja gume, već se preporuča tzv. pasivna metoda poboljšanja veze između gume i cementne paste, a to je odabirom gume putem nekoliko parametara kao što su oblik zrna, zamijenjeni materijal, udio gume i veličina gume.

4 ODABIR OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM

Dijelovi ovog poglavlja objavljeni su u publikaciji R. Bušić, M. Benšić, I. Miličević, K. Strugar, *Prediction Models for the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Rubber and Silica Fume, Materials (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1821, 2020. [128].

4.1 Cilj ispitivanja

Mehanička svojstva samozbijajućeg betona s gumom mogu znatno varirati ovisno o sastavu betonske mješavine, materijalnim karakteristikama, djelomičnoj zamjeni cementa mineralnim dodatcima, vrsti i veličini reciklirane gume itd. Korištenje reciklirane gume i mineralnih dodataka u konstrukcijskom samozbijajućem betonu obećavajuća je metoda za potencijalno smanjenje negativnog utjecaja otpada na okoliš i smanjenje potrošnje cementa, a samim time i smanjenje količine CO₂ koji se dobiva tijekom proizvodnog procesa cementa. Prije primjene gume u samozbijajućem betonu te korištenja betona s gumom u konstrukcijskim armiranobetonskim elementima i sustavima, potrebno je provesti dodatna istraživanja betona na razini materijala, kako bi se mogao definirati sastav betonske mješavine s odgovarajućim materijalnim karakteristikama potrebnim za korištenje takve vrste betona u konstrukcijskim elementima.

Mineralni dodatci kao djelomična zamjena cementa većinom se koriste kako bi poboljšali mehanička svojstva i svojstva trajnosti samozbijajućeg betona. Do danas, velik je broj istraživanja utemeljen na ispitivanju utjecaja silicijske prašine i ostalih mineralnih dodataka na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Neka od navedenih istraživanja bave se ispitivanjem zajedničkog utjecaja silicijske prašine i drugih mineralnih dodataka poput letećeg pepela, metakaolina i zgure visoke peći na svojstva različitih cementnih kompozita [129]–[133], dok se neka istraživanja bave ispitivanjem pojedinačnog utjecaja silicijske prašine na svojstva samozbijajućeg betona [134]–[136]. Što se tiče samozbijajućeg betona s gumom, u nekoliko eksperimentalnih istraživanja ispitivao se zajednički efekt silicijske prašine i ostalih mineralnih dodataka te je donesen zaključak o poboljšanju mehaničkih svojstava [14], [40]. Nadalje, AbdelAleem i sur. [43] ispitivali su kako 10 %-tna zamjena cementa silicijskom prašinom utječe na svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Međutim, ne postoje istraživanja zajedničkog utjecaja reciklirane gume i silicijske prašine pri različitim postotcima oba zamjenska materijala na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. U ovome je poglavlju nekoliko glavnih ciljeva ispitivanja:

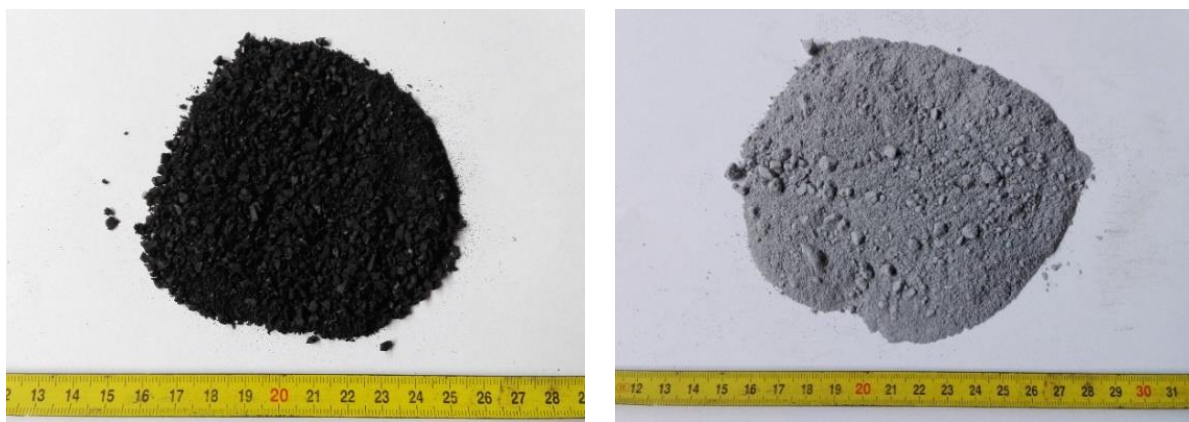
- ispitivanje zajedničkog utjecaja različitih postotnih udjela reciklirane gume (0 % - 30 %) i silicijske prašine (0 % - 10 %) na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju i to na 21 mješavini samozbijajućeg betona,

- statistička analiza, tj. izrada nekoliko regresijskih linearnih i nelinearnih modela koristeći računalne programe *Statistica 13* i *R* te odabir reprezentativnog modela i njegova verifikacija, što će na kraju rezultirati grafičkim prikazima ovisnosti mehaničkih karakteristika samozbijajućeg betona o postotnim udjelima reciklirane gume i silicijske prašine u betonu,
- definiranje optimalnih postotaka zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom i cementa silicijskom prašinom, pomoću kojih će se u idućem koraku pristupiti ispitivanju optimalnih mješavina samozbijajućeg betona na razini materijala i na razini konstrukcijskog elementa.

4.2 Materijali i metode ispitivanja

4.2.1 Materijali

Korišten je portlandski cement CEM I 42,5 R iz obližnje tvornice cementa u Našicama (Hrvatska) sa specifičnom težinom od $3,17 \text{ g/cm}^3$ i finoćom mliva po Blaineu od $4378 \text{ cm}^2/\text{g}$, u skladu s normom HRN EN 197-1:2012 [118]. Silicijska prašina (*engl. silica fume, SLF*), sa specifičnom težinom od $2,19 \text{ g/cm}^3$ i specifičnom površinom od $20,5 \text{ m}^2/\text{g}$ korištena je kao mineralni dodatak betonu ([Slika 4.1](#)). Korištena silicijska prašina je iz mjesta Pocking (Njemačka) te je u skladu s normom HRN EN 13263-1:2009 [119]. Korištena je voda iz slavine iz javnog sustava vodoopskrbe grada Osijeka koja je u skladu s normom HRN EN 1008:2002 [120]. U svrhu postizanja željenih svojstava samozbijajućeg u svježem stanju, tj. razreda (klasa) sposobnosti tečenja i viskoznosti, kao kemijski dodatci korišteni su superplastifikator (*engl. superplasticizer, SP*) Energy FM500 i dodatak za promjenu viskoznosti (*engl. viscosity modifying admixture, VMA*) Premadd Stabilizator X. Ukoliko je bilo potrebno, količina superplastifikatora i dodatka za promjenu viskoznosti prilagodila se tijekom miješanja prvenstveno kako bi se postigle željene vrijednosti rasprostiranja slijeganjem. Dolomitno brašno (*engl. dolomite powder*), veličine zrna $< 0,063 \text{ mm}$, iz obližnjeg kamenoloma, specifične težine $2,97 \text{ g/cm}^3$ i finoće mliva po Blaineu od $5206 \text{ cm}^2/\text{g}$ korišteno je kao punilo (*engl. filler*). Gustoća cementa, silicijske prašine i dolomitnog brašna ispitana je prema normi ASTM C188-16 [123] pomoću Le-Chatelierove tikvice. Prirodni pijesak i drobljeni kamen nominalne veličine zrna od 0-2 mm, 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm sa specifičnom težinom od $2,58 \text{ g/cm}^3$, $2,79 \text{ g/cm}^3$, $2,88 \text{ g/cm}^3$ i $2,88 \text{ g/cm}^3$ korišteni su kao sitni i krupni agregat (*engl. fine aggregate - FA, coarse aggregate - CA*). Granule gume (*engl. crumb rubber, CR*) veličine od 0 – 3,5 mm dobivene mehaničkim mljevenjem lokalnih otpadnih guma ([Slika 4.1](#)), specifične težine od $1,05 \text{ g/cm}^3$, korištene su kao zamjena sitnom agregatu (frakcija 0-4 mm). Granulometrijski sastav sitnog agregata, krupnog agregata i gumenog agregata dobiven je metodom sijanja u skladu s normom HRN EN 933-1:2012 [124] te je prikazan na [Slici 3.1](#) u [Poglavlju 3.2.1](#).



(a)

(b)

Slika 4.1 Korišteni materijali: (a) reciklirana guma, (b) silicijska prašina

4.2.2 Metode ispitivanja

U svrhu određivanja utjecaja reciklirane gume i silicijske prašine na svojstva samozbijajućeg betona ispitana su njegova reološka i mehanička svojstva. Ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju izvršena su u skladu s relevantnim Europskim normama. Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju, tj. ispitivanje sposobnosti tečenja i viskoznosti (rasprostiranja slijeganjem), sposobnosti zaobilaženja zapreka (L-kutija, J-prsten) i segregacije (otpornosti segregaciji) provedena su prema HRN EN 12350-8:2010 [30], HRN EN 12350-10:2010 [32], HRN EN 12350-12:2010 [34] i HRN EN 12350-11:2010 [33] (Slika 4.2).



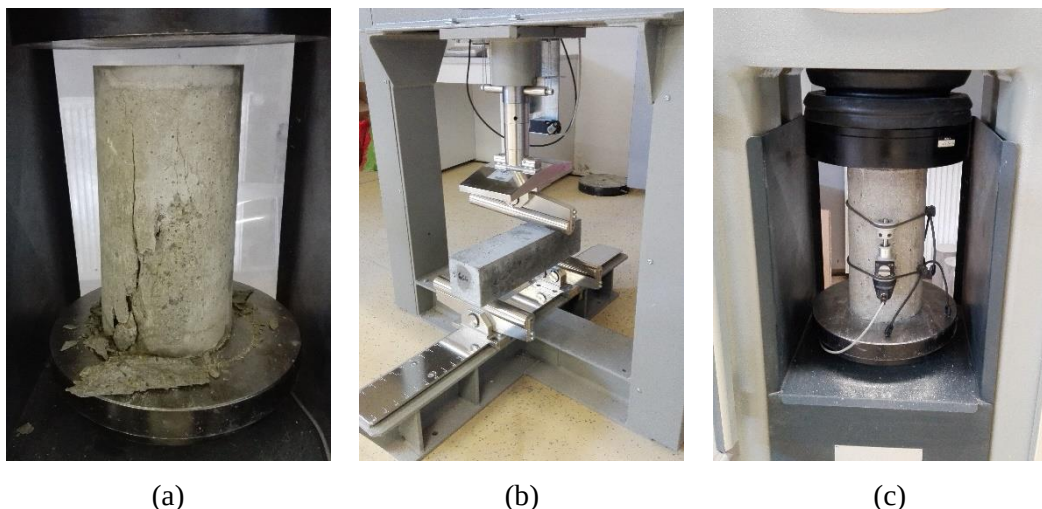
(a)

(b)

(c)

Slika 4.2 Ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju: (a) sposobnost tečenja i viskoznost (ispitivanje rasprostiranja slijeganjem), (b) sposobnost zaobilaženja zapreka (J-prsten i L-kutija), (c) otpornost segregaciji (ispitivanje segregacije sijanjem)

Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju, tj. ispitivanja gustoće očvrsluloga betona i mehaničkih karakteristika samozbijajućeg betona, tj. tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje, provedena su prema HRN EN 12390-7:2019 [137], HRN EN 12390-3:2019 [125], HRN EN 12390-13:2021 [126] i HRN EN 12390-8:2019 [138] (Slika 4.3).



Slika 4.3 Ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju: (a) tlačna čvrstoća, (b) vlačna čvrstoća savijanjem, (c) modul elastičnosti

Sažeti prikaz ispitanih svojstava samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju prikazan je u Tablici 4.1. Mehaničke karakteristike betona, tj. tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i čvrstoća na savijanje, prikazane su kao aritmetička sredina 3 mjerenja (3 uzorka betona za svaku mješavinu i za svaku mehaničku karakteristiku betona, sveukupno 63 valjka (tlačna čvrstoća) + 63 valjka (modul elastičnosti) + 63 prizme (čvrstoća na savijanje)).

Tablica 4.1 Ispitana svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju

Stanje	Svojstvo samozbijajućeg betona	Metoda ispitivanja	Norma
Svježe stanje	Sposobnost tečenja (SF)	rasprostiranje slijeganjem	HRN EN 12350-8:2010
	Viskoznost (t_{500})		
	Sposobnost zaobilaženja zapreka (PL i PJ)	L-kutija	HRN EN 12350-10:2010
		J-prsten	HRN EN 12350-12:2010
Očvrslulo stanje	Segregacija (SR)	otpornost segregaciji	HRN EN 12350-11:2019
	Tlačna čvrstoća ($f_{c,cyl}$)	uzorci valjaka ($\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$)	HRN EN 12390-3:2019
	Modul elastičnosti (E)		HRN EN 12390-13:2021
	Čvrstoća na savijanje (f_b)	uzorci prizmi ($100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$)	HRN EN 12390-8:2019
	Gustoća očvrsluloga betona	vaganje i mjerenje dimenzija	HRN EN 12390-7:2019

4.2.3 Projektiranje sastava betonskih mješavina

S obzirom na dvije varijable, količinu reciklirane gume i količinu silicijske prašine sveukupno je ispitana 21 mješavina samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Referentna mješavina samozbijajućeg betona s 0 % reciklirane gume i 0 % silicijske prašine označena je kao SCC-0CR-0SLF. Reciklirana guma (CR) korištena je kao zamjena za sitni agregat (frakcija 0-4 mm) u postotcima od 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % i 30 % ukupnog volumena agregata. Silicijska prašina (SLF) korištena je kao djelomična zamjena cementa, u postotcima od 0 %, 5 % i 10 % mase cementa. Sastav mješavina samozbijajućeg betona prikazan je u [Tablici 4.2](#).

Tablica 4.2 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona (u kg/m³)

Rb	Mješavina	Cement	SLF	Punilo	FA	CA	CR	v/b	SP (%)	VMA (%)
1	SCC-0CR-0SLF	450	0	80	941,61	817,65	0	0,4	1,25	0
2	SCC-5CR-0SLF	450	0	80	853,60	817,65	33,12	0,4	1,25	0
3	SCC-10CR-0SLF	450	0	80	765,59	817,65	66,24	0,4	1,25	0,24
4	SCC-15CR-0SLF	450	0	80	677,58	817,65	99,37	0,4	1,25	0,24
5	SCC-20CR-0SLF	450	0	80	589,57	817,65	132,49	0,4	1,25	0,24
6	SCC-25CR-0SLF	450	0	80	501,57	817,65	165,61	0,4	1,25	0,24
7	SCC-30CR-0SLF	450	0	80	413,55	817,65	198,73	0,4	1,25	0,24
8	SCC-0CR-5SLF	427,50	22,5	80	937,27	813,87	0	0,4	1,25	0
9	SCC-5CR-5SLF	427,50	22,5	80	849,66	813,87	32,97	0,4	1,25	0
10	SCC-10CR-5SLF	427,50	22,5	80	762,06	813,87	65,94	0,4	1,25	0
11	SCC-15CR-5SLF	427,50	22,5	80	674,46	813,87	98,91	0,4	1,25	0
12	SCC-20CR-5SLF	427,50	22,5	80	586,85	813,87	131,88	0,4	1,25	0
13	SCC-25CR-5SLF	427,50	22,5	80	499,25	813,87	164,85	0,4	1,25	0
14	SCC-30CR-5SLF	427,50	22,5	80	411,64	813,87	197,81	0,4	1,25	0
15	SCC-0CR-10SLF	405	45	80	932,92	810,05	0	0,4	1,25	0
16	SCC-5CR-10SLF	405	45	80	845,72	810,05	32,82	0,4	1,25	0
17	SCC-10CR-10SLF	405	45	80	758,53	810,05	65,63	0,4	1,25	0
18	SCC-15CR-10SLF	405	45	80	671,33	810,05	98,45	0,4	1,25	0
19	SCC-20CR-10SLF	405	45	80	584,13	810,05	131,26	0,4	1,25	0
20	SCC-25CR-10SLF	405	45	80	496,93	810,05	164,08	0,4	1,25	0
21	SCC-30CR-10SLF	405	45	80	409,79	810,05	196,90	0,4	1,25	0
LEGENDA: SLF – silicijska prašina, FA – sitni agregat, CA – krupni agregat, CR – reciklirana guma, SP – superplastifikator, VMA – dodatak za promjenu viskoznosti										

Vodovezivni omjer (v/b) i ukupni sadržaj veziva (450 kg/m³) jednak je za sve mješavine samozbijajućeg betona. Vodopraškasti omjer (v/p) iznosio je 1,07; 1,05 i 1,03 za mješavine samozbijajućeg betona s 0 %, 5 % i 10 % silicijske prašine te je u granicama dozvoljenih vrijednosti promatranog omjera

prema EFNARC smjernicama za samozbijajući beton [1]. Kod referentne mješavine samozbijajućeg betona postotni udio pojedine frakcije agregata u ukupnom volumenu agregata iznosio je 20 %, 35 %, 20 % i 35 % za frakcije agregata 0-2 mm, 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Količina superplastifikatora (SP) nepromijenjena je za sve mješavine, dok se dodatak za promjenu viskoznosti (VMA) koristio samo u mješavinama samozbijajućeg betona bez silicijske prašine, gdje je uočena pojava blage segregacije.

4.2.4 Priprema i njega uzoraka

Projektirani sastavi mješavina samozbijajućeg betona miješani su pomoću laboratorijske miješalice maksimalnog kapaciteta 50 litara (Slika 4.4). U prvom koraku zasićen površinski suh agregat promiješao se 120 sekundi. U drugom je koraku u miješalicu dodan cement, dolomitno brašno, guma, silicijska prašina i 75 % volumena ukupne vode te se miješanje nastavilo još 120 sekundi. U zadnjem su koraku u miješalicu dodani kemijski dodatci, superplastifikator i dodatak za promjenu viskoznosti, zajedno s preostalim 25 % volumena ukupne vode te se miješanje nastavilo dodatne 4 minute. Po završetku postupka miješanja, samozbijajući beton ispitan je u svježem stanju kako je opisano u [Poglavlju 4.2.2](#) te je potom ugrađen u kalupe normiranih veličina (kocke, valjci, prizme) bez vibriranja i zbijanja, koji su nakon ugradnje betona bili prekriveni najlonom. Uzorci su raskalupljeni 24 sata nakon ugradnje te su njegovani narednih 28 dana u spremniku s vodom (Slika 4.5), u laboratorijskim uvjetima (23 ± 2 °C), nakon čega su iskorišteni za ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju. U sklopu ovoga istraživanja za svaku su mješavinu izrađena 3 uzorka valjka dimenzija $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ za određivanje tlačne čvrstoće betona, 6 uzoraka valjaka dimenzija $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ za određivanje modula elastičnosti betona te 3 prizme dimenzija $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ za određivanje čvrstoće betona na savijanje.



Slika 4.4 Miješalice kapaciteta 50 litara

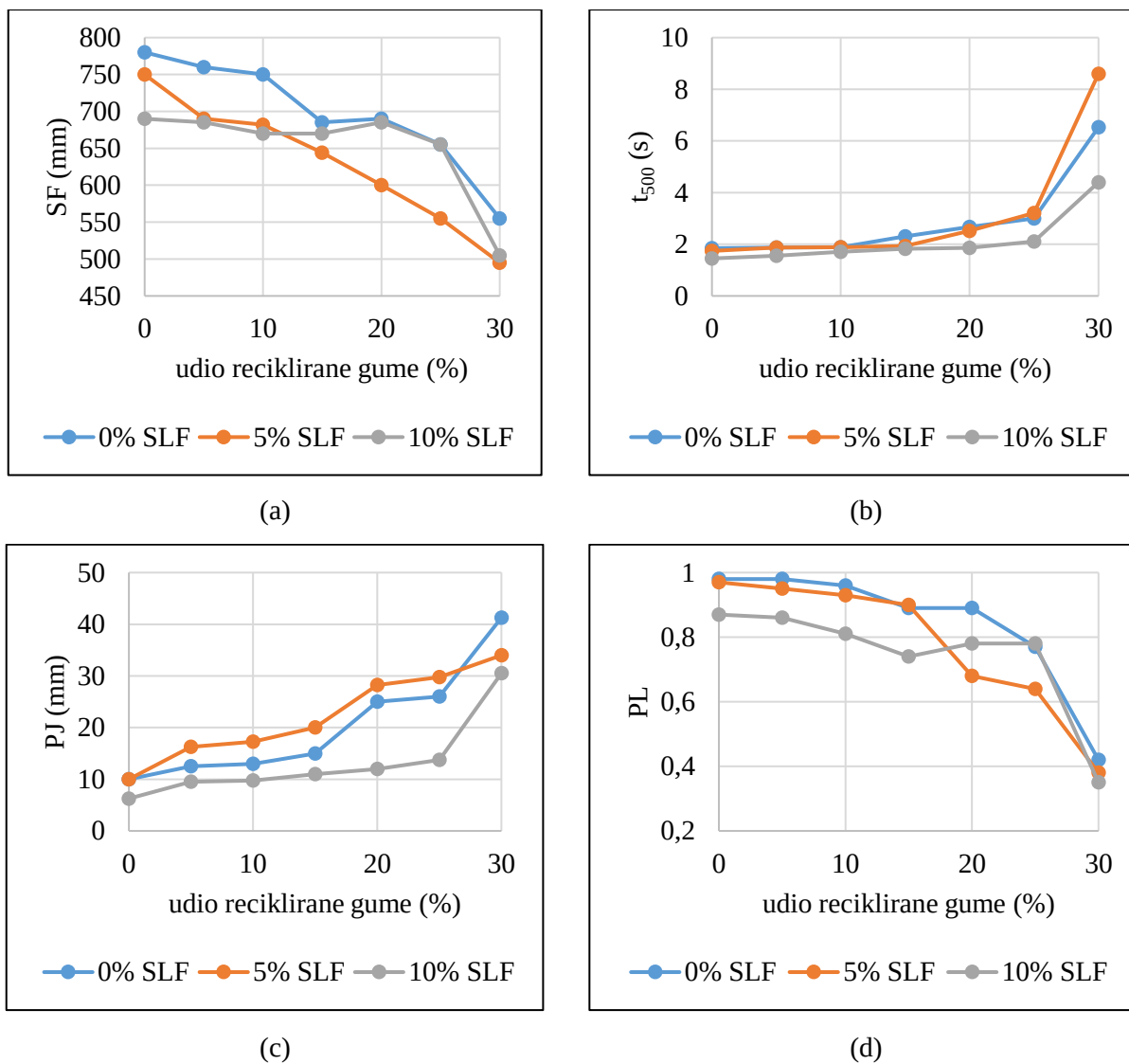


Slika 4.5 Njega uzoraka

4.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija

4.3.1 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju

Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju vidljivi su u [Tablici 4.3](#) te na [Slici 4.6](#). Ispitivanje otpornosti na segregaciju provedeno je samo za one mješavine kod kojih se vizualnim pregledom utvrdila segregacija agregata.



Slika 4.6 Grafički prikaz rezultata ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju: (a) sposobnost tečenja, (b) viskoznost, (c) i (d) sposobnost zaobilazanja zapreka (J-prsten i L-kutija)

Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju

Svojstvo svježeg betona		Viskoznost			Sposobnost tečenja			Sposobnost zaobilaženja zapreka				Otpornost segregaciji	
Vrsta ispitivanja		Rasprostiranje slijeganjem						J-prsten		L-kutija		Sito otvora 5 mm	
R.br.	Mješavina	t ₅₀₀ (s)	Razred		SF (mm)	Razred		PJ (mm)	Razred	PL	Razred	SR (%)	Razred
1	SCC-0CR-0SLF	1,85	<2	VS1	780	760–850	SF3	10	= 10	0,98	PA2	11,83	SR2
2	SCC-5CR-0SLF	1,87	<2	VS1	760	760–850	SF3	12,5	> 10	0,98	PA2	10,1	SR2
3	SCC-10CR-0SLF	1,89	<2	VS1	750	660–750	SF2	13	> 10	0,96	PA2	8,75	SR2
4	SCC-15CR-0SLF	2,31	>2	VS2	685	660–750	SF2	15	> 10	0,89	PA2	8,33	SR2
5	SCC-20CR-0SLF	2,67	>2	VS2	690	660–750	SF2	25	> 10	0,89	PA2	3,83	SR2
6	SCC-25CR-0SLF	3,00	>2	VS2	655	550–650	SF1	26	> 10	0,77	PA2	3,43	SR2
7	SCC-30CR-0SLF	6,53	>2	VS2	555	550–650	SF1	41,25	> 10	0,42	PA2	2,58	SR2
8	SCC-0CR-5SLF	1,74	<2	VS1	750	660–750	SF2	10	= 10	0,97	PA2	-	SR2
9	SCC-5CR-5SLF	1,87	<2	VS1	690	660–750	SF2	16,25	> 10	0,95	PA2	-	SR2
10	SCC-10CR-5SLF	1,89	<2	VS1	682	660–750	SF2	17,25	> 10	0,93	PA2	-	SR2
11	SCC-15CR-5SLF	1,93	<2	VS1	644	550–650	SF1	20	> 10	0,9	PA2	-	SR2
12	SCC-20CR-5SLF	2,52	>2	VS2	600	550–650	SF1	28,25	> 10	0,68	PA2	-	SR2
13	SCC-25CR-5SLF	3,21	>2	VS2	555	550–650	SF1	29,75	> 10	0,64	PA2	-	SR2
14	SCC-30CR-5SLF	8,60	>2	VS2	495	-	-	34	> 10	0,38	PA2	-	SR2
15	SCC-0CR-10SLF	1,45	<2	VS1	690	660–750	SF2	6,25	< 10	0,87	PA2	-	SR2
16	SCC-5CR-10SLF	1,55	<2	VS1	685	660–750	SF2	9,5	< 10	0,86	PA2	-	SR2
17	SCC-10CR-10SLF	1,71	<2	VS1	670	660–750	SF2	9,75	< 10	0,81	PA2	-	SR2
18	SCC-15CR-10SLF	1,83	<2	VS1	670	660–750	SF2	11	> 10	0,74	PA2	-	SR2
19	SCC-20CR-10SLF	1,86	<2	VS1	685	660–750	SF2	12	> 10	0,78	PA2	-	SR2
20	SCC-25CR-10SLF	2,11	>2	VS2	655	550–650	SF1	13,75	> 10	0,78	PA2	-	SR2
21	SCC-30CR-10SLF	4,40	>2	VS2	505	-	-	30,5	> 10	0,35	PA2	-	SR2

4.3.1.1 Sposobnost tečenja

Rasprostiranje slijeganjem, tj. promjer rasprostiranja slijeganjem d (mm), pokazatelj je sposobnosti tečenja samozbijajućeg betona. Iz rezultata ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju danih u [Tablici 4.3](#) i na [Slici 4.6](#) može se zaključiti da se povećavanjem postotka zamjene sitnog agregata recikliranom gumom te povećavanjem zamjene cementa silicijskom prašinom smanjuje sposobnost tečenja samozbijajućeg betona. Mješavina SCC-0CR-0SLF ima najveću vrijednost promjera rasprostiranja slijeganjem od svih ispitanih mješavina (780 mm), dok su vrijednosti promjera rasprostiranja slijeganjem kod mješavina SCC-30CR-5SLF i SCC-30CR-10SLF najmanje, 495 mm i 505 mm. Razred rasprostiranja slijeganjem (SF) također se mijenja s obzirom na količinu reciklirane gume i silicijske prašine u samozbijajućem betonu. Većom količinom reciklirane gume razred rasprostiranja slijeganjem prelazi iz razreda SF3 u razrede SF2 i SF1, što se može smatrati negativnim utjecajem oba zamjenska materijala na sposobnost tečenja. Korištenjem silicijske prašine kao djelomične zamjene cementa promjer rasprostiranja slijeganjem poprima vrijednosti koje se svrstavaju u razrede SF1 i SF2. Ipak, može se zaključiti da su rezultati rasprostiranja slijeganjem zadovoljavajući i u skladu s Europskim preporukama za samozbijajući beton [1], izuzev mješavina SCC-30CR-5SLF i SCC-30CR-10SLF kod kojih je promjer rasprostiranja slijeganjem manji od 550 mm. Smanjena sposobnost tečenja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom može se objasniti grubom površinom i rubovima reciklirane gume, što je uzrok dodatnom površinskom trenju i blokadi između reciklirane gume i cementne paste [43], [49].

4.3.1.2 Viskoznost

Vrijeme t_{500} pokazatelj je viskoznosti samozbijajućeg betona. Iz rezultata ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju danih u [Tablici 4.3](#) i na [Slici 4.6](#) može se zaključiti da se povećavanjem udjela gume u samozbijajućem betonu povećava i viskoznost samozbijajućeg betona. Slično ponašanje samozbijajućeg betona, tj. povećavanje viskoznosti, uočava se kod zamjene cementa sa silicijskom prašinom. Oba razreda viskoznosti (VS1 i VS2) mogu se povezati s rezultatima ispitivanja parametra t_{500} pa se tako mješavine samozbijajućeg betona do 15 % CR i 10 % SLF mogu svrstati u razred viskoznosti VS1, što je iznimno pogodno za armiranobetonske elemente s gusto složenom armaturom. Rezultati ispitivanja viskoznosti preko parametra t_{500} najveći su pri najvećim postotcima zamjene sitnog agregata gumom i cementa silicijskom prašinom. Može se zaključiti da su vrijednosti rezultata t_{500} prihvatljive sve do 20 %-tne zamjene prirodnog sitnog agregata s gumom te za sve postotne zamjene cementa silicijskom prašinom.

4.3.1.3 J-prsten i L-kutija

Sposobnost zaobilaženja zapreka svježeg samozbijajućeg betona može biti od velikog značenja tijekom izvedbe betonskih radova na gradilištu, posebno gdje je projektirana gusto raspoređena armatura. Zbog toga je prije ugradnje betona u kalupe ispitana sposobnost zaobilaženja zapreka pomoću J-prstena i L-kutije. Iz rezultata ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju danih u [Tablici 4.3](#) i na [Slici 4.6](#) može se zaključiti da se povećavanjem zamjene sitnog agregata recikliranom gumom (CR) te povećavanjem zamjene cementa silicijskom prašinom (SLF) smanjuje sposobnost zaobilaženja zapreka samozbijajućeg betona. Većina rezultata ispitivanja dobivenih pomoću J-prstena veća je od 10 mm, što je gornja dozvoljena granica prema EFNARC smjernicama za samozbijajući beton. Ipak, većina rezultata J-prstena manja je od 15 mm, što je korisno znati, s obzirom da se navedeni problem smanjene sposobnosti zaobilaženja zapreka može riješiti blagim povećanjem postotka superplastifikatora. S druge strane, rezultati dobiveni pomoću L-kutije pokazuju nam da je sposobnost zaobilaženja zapreka samozbijajućeg betona sve do 15 %-tne zamjene prirodnog sitnog agregata recikliranom gumom te do 10 %-tne zamjene cementa silicijskom prašinom još uvijek zadovoljavajuća. Vrijednost PL manja je za sve navedene mješavine od 0,8. Ipak, vrijednost PL opada drastično kada je 30 % prirodnog sitnog agregata zamijenjeno recikliranom gumom, što se može objasniti na isti način kao i smanjenje sposobnosti tečenja, grubom površinom reciklirane gume, što je uzrok dodatnom površinskom trenju i blokadi između reciklirane gume i cementne paste [43], [49], čime je uzrokovano smanjenje sposobnosti zaobilaženja zapreka.

4.3.1.4 Otpornost segregaciji

Pojava segregacije može biti izražena kod visokih vertikalnih armiranobetonskih elemenata poput stupova, pilona i sl. Ispitivanje otpornosti segregaciji sijanjem, koja je definirana kao postotak prolaska betona kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu, može biti od velike pomoći u donošenju zaključka o homogenosti betona i uniformnosti njegove tlačne čvrstoće po cijeloj visini laboratorijskih ispitnih uzoraka ili armiranobetonskog elementa. Prema rezultatima danim u [Tablici 4.3](#) i na [Slici 4.6](#) vidljivo je da mjerenje segregacije nije provedeno za sve mješavine jer segregacija nije bila izražena kod svih mješavina. Segregacija nije izražena kod mješavina sa 10 % silicijske prašine, a izraženija je kod mješavina bez silicijske prašine. Smanjena otpornost na segregaciju u manjoj je mjeri bila izražena kod mješavine SCC-15CR-0SLF, SCC-20CR-0SLF i SCC-10CR-5SLF, a u većoj mjeri kod mješavine SCC-10CR-0SLF. Zbog manje i više izražene segregacije navedenih mješavina korišten je kemijski dodatak za kontrolu viskoznosti (VMA) u iznosu od 0,24 % mase cementa, kako bi rezultati segregacije (SR) bili u dozvoljenim granicama do 15 %. Sukladno danim rezultatima u [Tablici 4.3](#) i na [Slici 4.6](#) može se zaključiti da sve mješavine imaju vrijednosti otpornosti na segregaciju (SR) u dozvoljenim granicama.

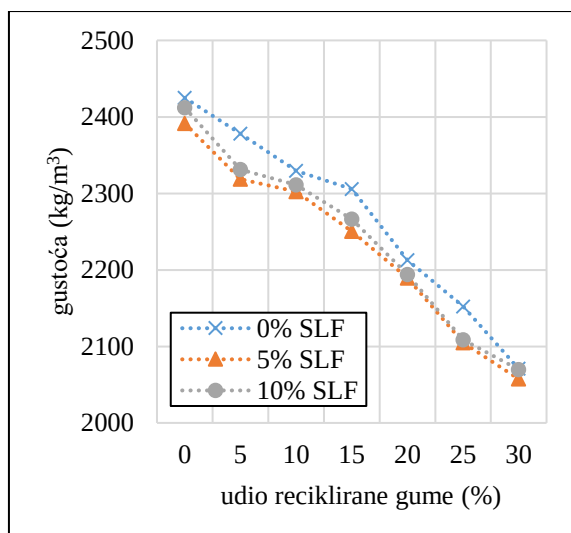
Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju u skladu su s prethodnim istraživanjima [3], [40], [44], [50], gdje je zamijenjeni materijal bio sitni agregat frakcije 0-4 mm. Kao što je već i ranije navedeno, takvo ponašanje samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u svježem stanju može biti objašnjeno oštrim rubovima reciklirane gume koji uzrokuju blokiranje kretanja, smanjenu sposobnost zaobilaženja zapreka, smanjenu sposobnost tečenja i povećanu viskoznost [43], [49]. Stoga, potrebno je više energije kako bi se svježa betonska mješavina kretala. Ipak, do 15 %-tne zamjene sitnog agregata recikliranom gumom te do 5 %-tne zamjene cementasilicijskom prašinom, dobiveni su povoljni razredi svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju.

4.3.2 Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslom stanju

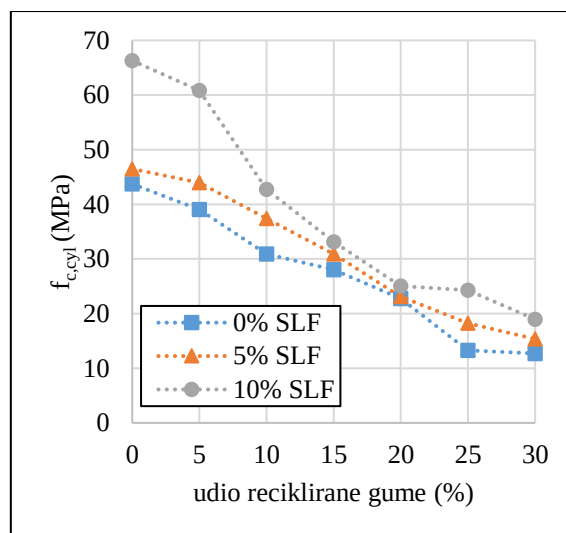
Rezultati ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u očvrslom stanju prikazani su u [Tablici 4.4](#) te na [Slici 4.7](#).

Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju (starost uzoraka 28 dana)

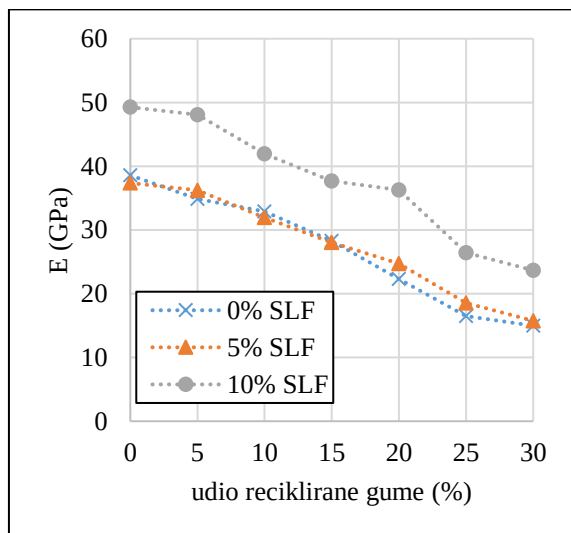
Svojstvo betona		Gustoća	Tlačna čvrstoća			Modul elastičnosti			Čvrstoća na savijanje		
R.br.	Mješavina	(kg/m ³)	f _{c,cyl} (MPa)			E (GPa)			f _b (MPa)		
		$\bar{x}_n$	$\bar{x}_n$	$\bar{s}_n$	V (%)	$\bar{x}_n$	$\bar{s}_n$	V (%)	$\bar{x}_n$	$\bar{s}_n$	V (%)
1	SCC-0CR-0SLF	2424,89	43,72	2,54	5,82	38,58	2,95	5,82	6,30	0,14	2,23
2	SCC-5CR-0SLF	2378,23	39,04	3,10	7,93	34,89	2,27	6,50	6,17	0,22	3,55
3	SCC-10CR-0SLF	2329,60	30,88	1,82	5,89	32,92	4,70	14,26	5,15	0,10	2,01
4	SCC-15CR-0SLF	2305,52	28,04	1,41	5,04	28,30	1,28	4,52	5,21	0,18	3,37
5	SCC-20CR-0SLF	2212,76	22,76	1,29	5,67	22,30	2,04	9,15	3,95	0,08	1,96
6	SCC-25CR-0SLF	2151,96	13,28	1,98	14,93	16,50	2,03	12,30	3,69	0,43	11,58
7	SCC-30CR-0SLF	2070,74	12,71	0,52	4,05	14,99	1,30	8,66	1,85	0,27	14,56
8	SCC-0CR-5SLF	2391,46	46,48	5,05	10,87	37,37	4,03	10,79	6,63	0,25	3,79
9	SCC-5CR-5SLF	2318,86	43,98	3,11	7,07	36,20	3,25	8,97	6,24	0,02	0,32
10	SCC-10CR-5SLF	2302,14	37,42	1,30	3,48	31,97	0,60	1,88	5,47	0,16	2,85
11	SCC-15CR-5SLF	2250,54	30,89	2,08	6,72	28,06	3,37	12,01	5,32	0,24	4,53
12	SCC-20CR-5SLF	2189,49	23,08	1,76	7,65	24,71	0,06	0,24	4,69	0,07	1,44
13	SCC-25CR-5SLF	2105,02	18,26	0,10	0,55	18,54	4,15	22,38	4,48	0,09	1,99
14	SCC-30CR-5SLF	2057,35	15,35	0,95	6,20	15,75	1,43	6,20	3,87	0,06	1,44
15	SCC-0CR-10SLF	2411,98	66,30	1,39	2,09	49,26	1,10	2,23	7,38	0,23	3,07
16	SCC-5CR-10SLF	2331,30	60,83	5,23	8,60	48,06	4,18	8,69	6,58	0,28	4,31
17	SCC-10CR-10SLF	2311,11	42,73	4,48	10,48	41,94	2,70	6,44	6,27	0,17	2,75
18	SCC-15CR-10SLF	2266,57	33,11	3,22	9,72	37,69	2,78	7,39	5,88	0,26	4,35
19	SCC-20CR-10SLF	2194,11	25,04	1,85	7,38	36,28	4,62	12,75	5,07	0,03	0,58
20	SCC-25CR-10SLF	2108,65	24,28	2,47	10,16	26,42	3,40	12,87	4,87	0,19	4,00
21	SCC-30CR-10SLF	2069,84	18,96	4,29	22,64	23,68	1,10	4,64	4,46	0,19	4,35
LEGENDA: $\bar{x}_n$ – srednja vrijednost (aritmetička sredina), $\bar{s}_n$ – standardna devijacija, V – koeficijent varijacije											



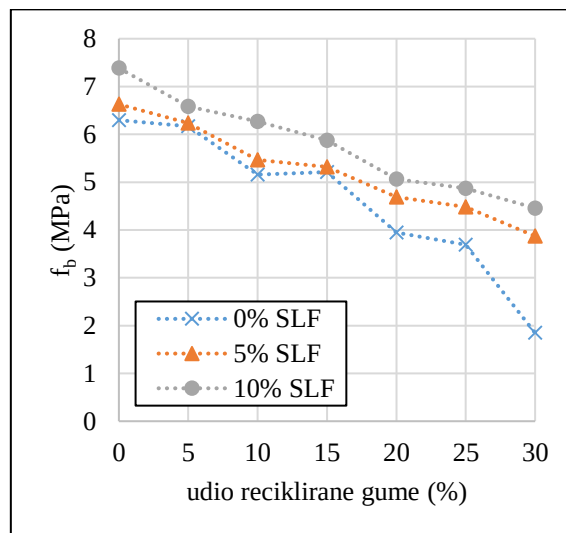
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 4.7 Utjecaj reciklirane gume i silicijske prašine na rezultate ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju (starost 28 dana): (a) gustoća, (b) tlačna čvrstoća, (c) modul elastičnosti, (d) čvrstoća na savijanje

4.3.2.1 Gustoća

Gustoća uzoraka valjaka i prizmi mjerena je pri starosti uzoraka od 28 dana. Rezultati dani u [Tablici 4.4](#) i na [Slici 4.7](#) pokazuju da se težina smanjuje povećanjem udjela reciklirane gume. Takvo se ponašanje može objasniti manjom specifičnom težinom reciklirane gume od težine prirodnog agregata. U odnosu na referentnu mješavinu samozbijajućeg betona smanjenje vrijednosti gustoće iznosi 7 % i 15 % pri 15 %-tnom i 30 %-tnom udjelu gume i 0 %-tnom i 5 %-tnom udjelu silicijske prašine u samozbijajućem betonu. Na [Slici 4.7](#) vidljiv je gotovo linearan odnos između postotka zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom i smanjenja vrijednosti gustoće betona. S 30 %-tnim udjelom gume može se dobiti lagani samozbijajući beton specifične težine od 2057,35 kg/m³, što posljedično dovodi do manje ukupne mase armiranobetonskih konstrukcija ukoliko se beton te vrste namjerava koristiti u konstrukcijske svrhe.

4.3.2.2 Tlačna čvrstoća

Kao što je bilo i očekivano, srednja vrijednost tri mjerenja tlačne čvrstoće betona starosti 28 dana očekivano je najmanja kada je postotak zamjene prirodnog sitnog agregata recikliranom gumom najveći, tj. pri 30 %-tnoj zamjeni ([Slika 4.7](#)). Negativan utjecaj gume na vrijednost tlačne čvrstoće betona može se opisati lošom vezom između granula gume i cementne paste te vrijednošću modula elastičnosti granula gume koji je manji od modula elastičnosti prirodnog sitnog agregata. Suprotno od navedenog, srednja vrijednost tri mjerenja tlačne čvrstoće betona starosti 28 dana najveća je kada je postotak zamjene cementa silicijskom prašinom najveći, tj. 10 %. Silicijska prašina doprinosi povećanju vrijednosti tlačne čvrstoće zbog svoje pucolanske aktivnosti. U odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće referentne mješavine SCC-0CR-0SLF vrijednost tlačne čvrstoće betona mješavine s 30 % reciklirane gume smanjila se za 71 %. Smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće manje je u slučaju mješavine s 30 % reciklirane gume te 5 % i 10 % silicijske prašine, ali je i dalje značajno i iznosi 65 % i 57 %, stoga se zaključuje da pri većim postotnim zamjenama prirodnog agregata gumom, veća postotna zamjena cementa silicijskom prašinom značajno ne doprinosi povećanju vrijednosti tlačne čvrstoće, tj. dodavanjem silicijske prašine ne može se anulirati negativan utjecaj većih udjela reciklirane gume na vrijednost tlačne čvrstoće betona. S obzirom na dobivene eksperimentalne rezultate, te s obzirom na ekonomski kriterij, predlaže se da se silicijska prašina u kombinaciji s recikliranom gumom koristi do 5 %-tne zamjene cementa silicijskom prašinom. Udio silicijske prašine iznad 5 % mase cementa dovodi u pitanje isplativost predmetne zamjene s obzirom da je smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće pri većim udjelima reciklirane gume u samozbijajućem betonu poprilično veliko te se zaključuje da se negativan utjecaj reciklirane gume na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona može djelomično ublažiti dodavanjem silicijske prašine, ali samo pri manjim postotcima zamjene sitnog agregata, tj. do 15 % zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom. Vrijednosti tlačnih čvrstoća samo tri mješavine, SCC-25CR-0SLF, SCC-30CR-0SLF i SCC-30CR-5SLF, su ispod 17 MPa, što Najim i Hall [61]

smatraju graničnom vrijednošću ukoliko se beton namjerava koristiti u konstrukcijske svrhe. Ipak, vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina SCC-15CR-5SLF i SCC-10CR-0SLF su iznad 30 MPa, što je poprilično obećavajuće za daljnja istraživanja utjecaja reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona, kako na razini materijala, tako i na razini konstrukcijskih elemenata.

4.3.2.3 *Statički modul elastičnosti*

Vrijednosti modula elastičnosti u izravnoj su vezi s vrijednostima tlačne čvrstoće, s tim da je u ovom slučaju izraženiji negativan utjecaj zamjene prirodnog sitnog agregata gumenim agregatom jer se pri 5 %-tnoj zamjeni cementa silicijskom prašinom ne može poništiti negativan učinak granula gume na vrijednosti modula elastičnosti. U odnosu na vrijednost modula elastičnosti referentne mješavine SCC-0CR-0SLF vrijednost modula elastičnosti betona mješavine s 30 % CR smanjila se za 56 %. Povoljan utjecaj zamjene cementa silicijskom prašinom očitovao se kod mješavina sa 0 %, 5 %, 10 % CR i 10 % SLF, gdje je silicijska prašina pozitivno doprinijela relativnom povećanju vrijednosti modula elastičnosti za 28 %, 25 % i 9 %. Ipak, pri 15 %-tnom udjelu reciklirane gume te pri 0 %, 5 % i 10 %-tnom udjelu silicijske prašine, smanjenje modula elastičnosti iznosilo je 27 %, 27 % i 2 %. Objašnjenje takvog ponašanja može se opisati na isti način kao u [Poglavlju 4.3.2.2](#). Do 20 %-tne zamjene prirodnog sitnog agregata recikliranom gumom vrijednosti modula elastičnosti su iznad 20 GPa iz čega proizlazi zaključak da se s obzirom na promatrano mehanički svojstvo samozbijajućeg betona može odrediti gornja granica korištenja reciklirane gume od 20 %.

4.3.2.4 *Čvrstoća na savijanje*

Čvrstoća na savijanje mehanička je karakteristika materijala kod koje je također uočen negativan utjecaj zamjene prirodnog agregata gumom. Može se istaknuti da je maksimalno smanjenje vrijednosti čvrstoće na savijanje, u odnosu na referentnu mješavinu SCC-0CR-0SLF, iznosilo 71 % za mješavinu SCC-30CR-0SLF. Navedeno je smanjenje ipak osjetno slabije, tj. iznosi 39 %, kada se 5 % cementa zamijeni silicijskom prašinom, za jednaku postotnu zamjenu prirodnog agregata gumom u iznosu od 30 % (SCC-30CR-5SLF). Unatoč istom relativnom smanjenju vrijednosti tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje pri 30 %-tnom udjelu gume u betonu od 71 %, relativno smanjenje čvrstoće na savijanje je u usporedbi s relativnim smanjenjem tlačne čvrstoće ipak značajno za sve ostale postotne udjele reciklirane gume u betonu, tj. 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 %. Npr. u usporedbi s vrijednosti čvrstoće referentne mješavine, relativno smanjenje vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka mješavine samozbijajućeg betona SCC-15CR-5SLF iznosi 16 %, dok je smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće za istu mješavinu 29 %. Slično je ponašanje uočeno i u prijašnjim istraživanjima [46], [52], [62], gdje je prirodni sitni agregat bio zamijenjen recikliranom gumom.

4.4 Modeliranje mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona

Laboratorijskim ispitivanjem samozbijajućeg betona prikupljeni su podaci o vrijednostima mehaničkih svojstava u ovisnosti o dvije varijable, postotnom udjelu reciklirane gume (skraćeno CR) i postotnom udjelu silicijske prašine (skraćeno SLF). Kako je već i ranije istaknuto, reciklirana guma (frakcija 0-3,5 mm) koristila se kao zamjenski materijal prirodnom sitnom agregatu (frakcija 0-4 mm), dok se silicijska prašina koristila kao djelomična zamjena cementa. U ovome će se poglavlju pomoću regresijskih modela definirati funkcijska ovisnost postotnih zamjena navedenih dviju varijabli i mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona na temelju statistički obrađenih eksperimentalnih podataka 21 mješavine. U [Tablicama 4.5, 4.6 i 4.7](#) prikazani su svi slučajevi ispitivanja mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona, tj. tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje, u ovisnosti o različitim postotnim udjelima granula reciklirane gume i silicijske prašine. Budući da su za proračun mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona za svaku mješavinu ispitana po tri uzorka, u [Tablicama 4.5, 4.6 i 4.7](#) su za sve ispitane mješavine samozbijajućeg betona prikazane tri vrijednosti tlačne čvrstoće ($f_{c,cyl}$), modula elastičnosti (E) i čvrstoće na savijanje (f_b).

Tablica 4.5 Slučajevi ispitivanja tlačne čvrstoće ($f_{c,cyl}$) samozbijajućeg betona

Slučaj	CR (%)	SLF (%)	$f_{c,cyl}$ (MPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	$f_{c,cyl}$ (MPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	$f_{c,cyl}$ (MPa)
1	0	0	42,25	22	0	5	58,26	43	0	10	70,56
2	0	0	48,53	23	0	5	56,90	44	0	10	64,22
3	0	0	47,85	24	0	5	57,76	45	0	10	64,12
4	5	0	34,66	25	5	5	47,55	46	5	10	58,64
5	5	0	37,80	26	5	5	49,21	47	5	10	62,97
6	5	0	37,16	27	5	5	47,81	48	5	10	60,88
7	10	0	30,10	28	10	5	32,45	49	10	10	45,89
8	10	0	27,20	29	10	5	37,12	50	10	10	39,76
9	10	0	28,62	30	10	5	37,05	51	10	10	42,54
10	15	0	20,35	31	15	5	25,34	52	15	10	29,54
11	15	0	22,12	32	15	5	29,16	53	15	10	37,53
12	15	0	23,05	33	15	5	27,88	54	15	10	32,26
13	20	0	17,50	34	20	5	20,56	55	20	10	28,16
14	20	0	17,12	35	20	5	24,89	56	20	10	22,90
15	20	0	17,55	36	0	5	22,92	57	0	10	24,06
16	25	0	14,56	37	25	5	15,2	58	25	10	22,24
17	25	0	14,10	38	25	5	23,05	59	25	10	24,36
18	25	0	14,18	39	25	5	20,55	60	25	10	26,24
19	30	0	11,02	40	30	5	17,10	61	30	10	17,65
20	30	0	10,24	41	30	5	15,01	62	30	10	19,98
21	30	0	10,75	42	30	5	13,22	63	30	10	19,25

Tablica 4.6 Slučajevi ispitivanja modula elastičnosti (E) samozbijajućeg betona

Slučaj	CR (%)	SLF (%)	E (GPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	E (GPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	E (GPa)
1	0	0	35,26	22	0	5	32,76	43	0	10	48,00
2	0	0	40,92	23	0	5	40,24	44	0	10	49,85
3	0	0	39,55	24	0	5	39,12	45	0	10	49,95
4	5	0	32,33	25	5	5	35,66	46	5	10	50,47
5	5	0	35,66	26	5	5	33,26	47	5	10	50,48
6	5	0	36,66	27	5	5	39,68	48	5	10	43,24
7	10	0	32,90	28	10	5	31,39	49	10	10	44,55
8	10	0	37,63	29	10	5	32,59	50	10	10	39,15
9	10	0	28,24	30	10	5	31,93	51	10	10	42,14
10	15	0	28,94	31	15	5	31,75	52	15	10	38,88
11	15	0	29,13	32	15	5	25,15	53	15	10	39,68
12	15	0	26,82	33	15	5	27,28	54	15	10	34,51
13	20	0	23,98	34	20	5	24,66	55	20	10	39,70
14	20	0	22,90	35	20	5	24,77	56	20	10	38,12
15	20	0	20,03	36	0	5	24,69	57	0	10	31,02
16	25	0	16,78	37	25	5	23,17	58	25	10	23,27
17	25	0	14,35	38	25	5	17,32	59	25	10	25,97
18	25	0	18,38	39	25	5	15,15	60	25	10	30,03
19	30	0	13,99	40	30	5	17,06	61	30	10	22,96
20	30	0	14,52	41	30	5	14,22	62	30	10	23,13
21	30	0	16,45	42	30	5	15,98	63	30	10	24,94

Tablica 4.7 Slučajevi ispitivanja čvrstoće na savijanje (f_b) samozbijajućeg betona

Slučaj	CR (%)	SLF (%)	f_b (MPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	E (MPa)	Slučaj	CR (%)	SLF (%)	E (MPa)
1	0	0	6,31	22	0	5	6,34	43	0	10	7,63
2	0	0	6,15	23	0	5	6,79	44	0	10	7,18
3	0	0	6,43	24	0	5	6,76	45	0	10	7,35
4	5	0	6,21	25	5	5	6,25	46	5	10	6,54
5	5	0	6,36	26	5	5	6,21	47	5	10	6,32
6	5	0	5,93	27	5	5	6,24	48	5	10	6,89
7	10	0	5,24	28	10	5	5,50	49	10	10	6,45
8	10	0	5,04	29	10	5	5,30	50	10	10	6,26
9	10	0	5,19	30	10	5	5,61	51	10	10	6,10
10	15	0	5,11	31	15	5	5,60	52	15	10	6,07
11	15	0	5,41	32	15	5	5,17	53	15	10	5,59
12	15	0	5,11	33	15	5	5,19	54	15	10	5,98
13	20	0	3,89	34	20	5	4,64	55	20	10	5,03
14	20	0	3,91	35	20	5	4,66	56	20	10	5,07
15	20	0	4,03	36	0	5	4,77	57	0	10	5,09
16	25	0	3,84	37	25	5	4,57	58	25	10	5,10
17	25	0	4,03	38	25	5	4,48	59	25	10	4,75
18	25	0	3,21	39	25	5	4,40	60	25	10	4,77
19	30	0	1,66	40	30	5	3,89	61	30	10	4,58
20	30	0	2,15	41	30	5	3,81	62	30	10	4,55
21	30	0	1,73	42	30	5	3,91	63	30	10	4,23

4.4.1.1 Regresijski modeli

Velik broj inženjerskih problema uključuje promatranje ovisnosti dvije ili više varijabli. Regresijska analiza predstavlja statističku tehniku koja je poprilično korisna kod problema ove vrste [139] s obzirom da se pomoću nje može procijeniti ovisnost između promatranih varijabli te se navedena ovisnost može prikazati grafički pomoću linearne ili nelinearne veze između vrijednosti promatranih varijabli. Regresijska metoda modeliranja pretpostavlja da se može uspostaviti funkcijska veza između nezavisne varijable x i zavisne varijable y do na dodanu grešku ε , stoga u jednadžbi pravca dodajemo navedenu grešku na desnu stranu jednadžbe:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (4.1)$$

Greška ε predstavlja udaljenost stvarne vrijednosti zavisne varijable y od procijenjene vrijednosti varijable y , tj. od regresijskog pravca. Prvi je korak svake regresijske analize uočiti grupiraju li se podaci oko pravca (linearna zavisnost) ili oko krivulje (nelinearna zavisnost). Sukladno navedenom postoji linearna i nelinearna regresijska analiza, a modeli korišteni u ovome radu modeli su jednostavne i višestruke regresije. Nadalje, dvije su promjenjive i nezavisne varijable: količina reciklirane gume (0 % - 30 %) i količina silicijske prašine (0 % - 10 %). U početnoj fazi statističke obrade podataka regresijskom je analizom ustanovljeno da modeli za sva tri mehanička svojstva kojima je samo jedna varijabla promjenjiva i nezavisna (Model 1 - postotni udio granula gume u betonskoj mješavini ili Model 2 - postotni udio silicijske prašine u betonskoj mješavini) mogu zadovoljavajuće objasniti i opisati utjecaj promjenjivih varijabli na vrijednost mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona koristeći statistički model jednostavne linearne regresije i jednostavne eksponencijalne regresije. Stoga se pri odabiru statističkog modela koji će obuhvatiti obje nezavisne varijable polazilo od pretpostavke da će se mehanička svojstva samozbijajućeg betona moći adekvatno procijeniti koristeći višestruke linearne regresijske analize ili kombinirane višestruke linearne i nelinearne (eksponencijalne) regresijske analize. Višestruka linearna regresijska analiza i višestruka linearna i eksponencijalna regresijska analiza provedene su na uzorku od 63 ispitivanja. Popis modela s pripadnim regresijskim jednadžbama te brojem parametara i vrstom regresije vidljiv je u [Tablici 4.8](#). Regresijski modeli izrađeni su u programskom paketu *Statistica 13* i *R*.

Tablica 4.8 Popis regresijskih modela s pripadnim regresijskim jednadžbama

Model	Regresijski model	Broj parametara	Vrsta regresije
1	$b_0 + b_1 \times cr$	2	Jednostavna linearna regresija
2	$b_0 + b_1 \times slf$	2	Jednostavna eksponencijalna regresija
3	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times slf$	3	Višestruka linearna regresija bez interakcijskog faktora
4	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times slf + b_3 \times cr \times slf$	4	Višestruka linearna regresija s interakcijskim faktorom
5	$b_0 + b_1 \times cr + \exp(b_2 \times slf) + b_3 \times cr \times slf$	4	Višestruka nelinearna regresija s interakcijskim faktorom
6	$b_0 + b_1 \times cr + \exp(b_2 \times slf)$	3	Višestruka nelinearna regresija bez interakcijskog faktora
7	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times \exp(slf)$	3	

LEGENDA: b_0, b_1, b_2, b_3 – regresijski koeficijenti, cr – udio reciklirane gume, slf – udio silicijske prašine

4.4.1.2 Odabrani regresijski modeli i inženjerska primjena

Odabrani regresijski modeli za tri promatrana mehanička svojstva dani su u [Tablici 4.9](#). Za procjenu nepoznatih parametara modula elastičnosti korištena je metoda najmanjih kvadrata (*engl. least square method*). Međutim, primjenom iste metode za procjenu nepoznatih parametara tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje uočena je varijabilnost varijance reziduala, u ovisnosti o razini zamjene silicijske prašine. Stoga se za procjenu nepoznatih parametara tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje koristila težinska metoda najmanjih kvadrata (*engl. weighted least square method*). U tim slučajevima težine su utvrđene modeliranjem kvadratne vrijednosti reziduala. Rezultati regresijske analize i procijenjenih koeficijenata za sva tri mehanička svojstva dani su u [Tablicama 4.10, 4.11 i 4.12](#). Za odabrane regresijske modele u programskom paketu *R* provedeni su testovi nestalnosti varijance (*engl. non-constant variance score test*) [140] te je zaključeno da navedeni testovi ne pokazuju prisutnost heteroskedastičnosti. Nadalje, Shapiro-Wilkov test normalnosti [141] ne upućuje na odstupanje standardnih reziduala od normalnosti (p -vrijednost bila je 0,6533; 0,1354 i 0,4971 za regresijske modele tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje).

Tablica 4.9 Odabrani regresijski modeli za predviđanje mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom

Mehaničko svojstvo samozbijajućeg betona	Odabrani regresijski model
Tlačna čvrstoća ($f_{c,cyl}$)	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times slf + b_3 \times cr \times slf + \varepsilon$
Modul elastičnosti (E)	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times \exp(slf) + \varepsilon$
Čvrstoća na savijanje (f_b)	$b_0 + b_1 \times cr + b_2 \times slf + b_3 \times cr \times slf + \varepsilon$

LEGENDA: b_0, b_1, b_2, b_3 – regresijski koeficijenti, cr – udio reciklirane gume, slf – udio silicijske prašine, ε – greška modela

Tablica 4.10 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – tlačna čvrstoća ($f_c = 43,09240 - 1,07104 \times cr + 1,72105 \times slf - 0,04515 \times cr \times slf$)

Koeficijent	Procjena	Standardna pogreška	Pr ($> t $)	Donja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	Gornja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	$\bar{R}^2$
b0	43,09240	0,81541	$<2e^{-16}$	41,46076	44,72403	0,9391
b1	-1,07104	0,04523	$<2e^{-16}$	-1,16154	-0,98053	
b2	1,72105	0,21431	$4,86e^{-11}$	1,29221	2,14988	
b3	-0,04515	0,01189	0,00034	-0,06893	-0,02136	

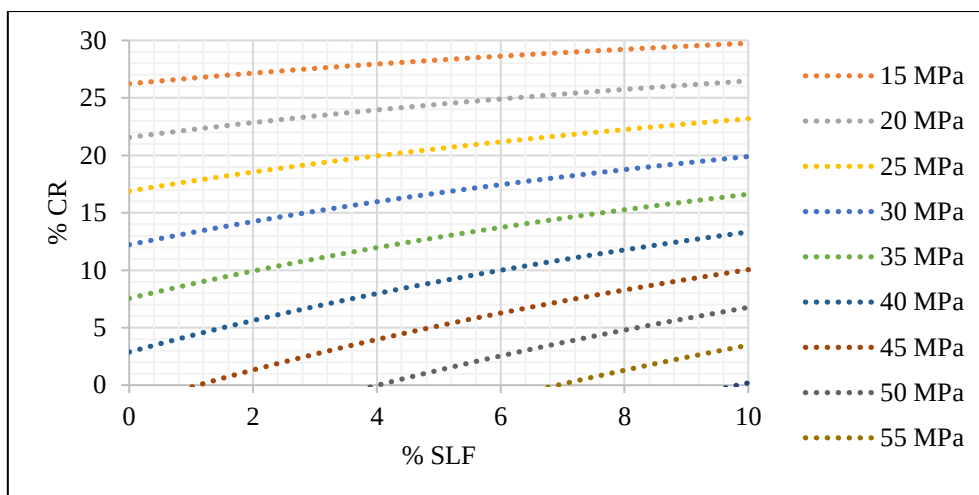
Tablica 4.11 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – modul elastičnosti ($E = 39,7295 - 0,836401 \times cr + 0,000473885 \times \exp(slf)$)

Koeficijent	Procjena	Standardna pogreška	Pr ($> t $)	Donja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	Gornja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	$\bar{R}^2$
b0	$3,973e^{+01}$	$6,934e^{-01}$	$<2e^{-16}$	38,34327	41,11725	0,922
b1	$-8,364e^{-01}$	$3,576e^{-02}$	$<2e^{-16}$	-0,90794	-0,76489	
b2	$4,739e^{-04}$	$3,455e^{-05}$	$<2e^{-16}$	0,00040	0,00054	

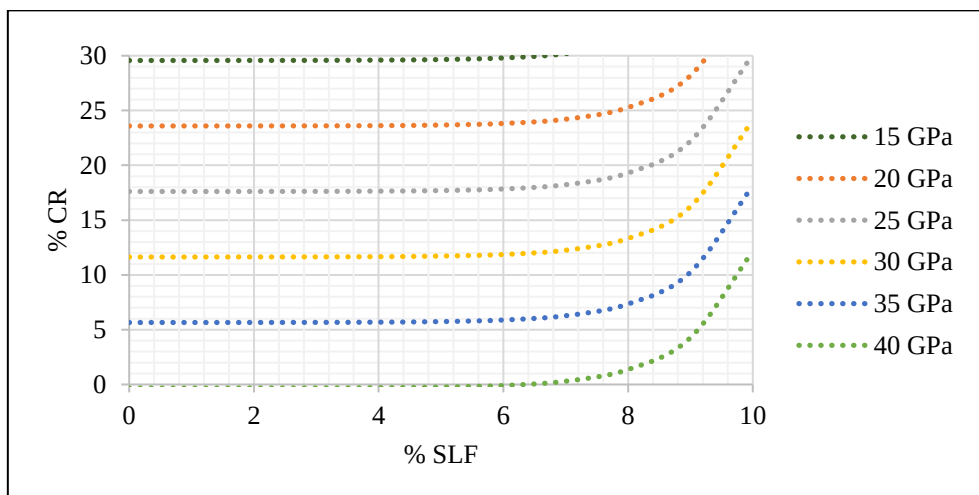
Tablica 4.12 Rezultati regresijske analize i procjene koeficijenata – čvrstoća na savijanje ($f_b = 6,489658 - 0,123341 \times cr + 0,070092 \times slf - 0,003003 \times cr \times slf$)

Koeficijent	Procjena	Standardna pogreška	Pr ($> t $)	Donja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	Gornja granična vrijednost intervala pouzdanosti (95%)	$\bar{R}^2$
b0	6,48965	0,16031	$<2e^{-16}$	6,16887	6,81044	0,9372
b1	-0,12334	0,00889	$<2e^{-16}$	-0,14113	-0,10554	
b2	0,07009	0,01860	0,00038	0,03286	0,10732	
b3	0,00300	0,00103	0,00509	0,00093	0,00506	

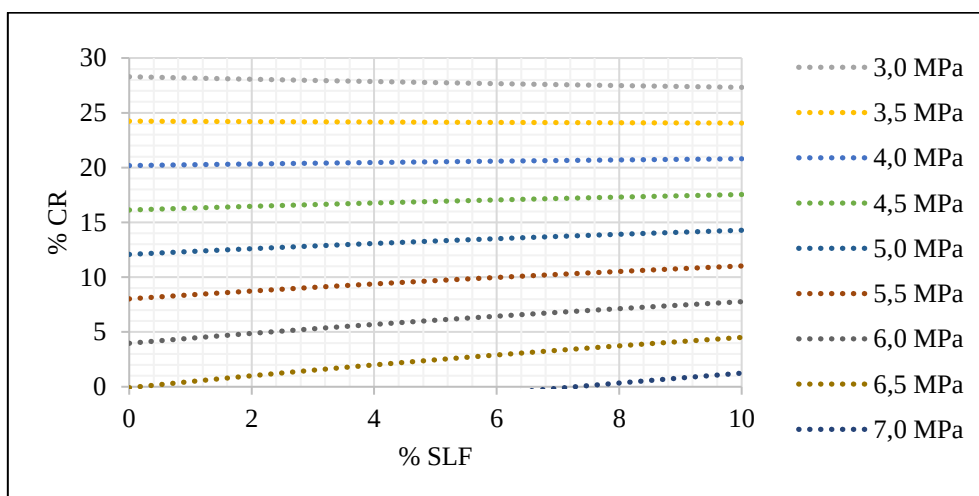
Kako bi se rezultati regresijskih analiza odabranih reprezentativnih modela približili širokom spektru korisnika, na [Slikama 4.8, 4.9 i 4.10](#) dani su dodatni grafički prikazi ovisnosti zavisnih varijabli (tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje) o nezavisnim varijablama (CR i SLF u %) na temelju kojih inženjeri mogu po svojoj želji odlučiti koliki postotak gume (os y - CR) i silicijske prašine (os x - SLF) ukomponirati u betonsku mješavinu sukladno unaprijed zahtijevanoj vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona.



Slika 4.8 Odabrani regresijski model za procjenu tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona ($f_c = 43,09240 - 1,07104 \times cr + 1,72105 \times slf - 0,04515 \times cr \times slf$)



Slika 4.9 Odabrani regresijski model za procjenu modula elastičnosti samozbijajućeg betona ($E = 39,7295 - 0,836401 \times cr + 0,000473885 \times \exp(slif)$)



Slika 4.10 Odabrani regresijski model za procjenu čvrstoće na savijanje samozbijajućeg betona ($f_b = 6,489658 - 0,123341 \times cr + 0,070092 \times slf - 0,003003 \times cr \times slf$)

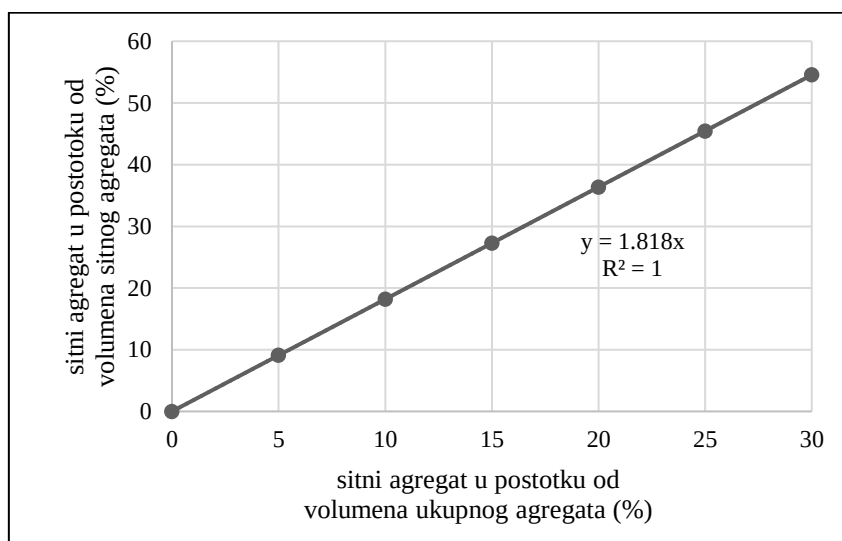
Pozitivan utjecaj silicijske prašine na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona je na [Slici 4.8](#) vidljiv čak i pri manjim postotnim udjelima silicijske prašine, dok je kod modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje taj utjecaj manje izražen. Takvo se ponašanje može objasniti činjenicom da silicijska prašina doprinosi povećanju tlačne čvrstoće betona zbog svojeg kemijskog sastava (SiO_2) i pucolanske aktivnosti, ali je zbog efekta povećanja čvrstoće smanjena deformabilnost betona, što je vidljivo iz [Slika 4.9](#) i [4.10](#).

4.4.1.3 Verifikacija modela

U ovome poglavlju je 12 eksperimentalnih istraživanja uspoređeno s odabranim regresijskim modelima za predviđanje mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom. 7 od 12 eksperimentalnih istraživanja uspoređeno je s odabranim regresijskim modelom za tlačnu čvrstoću [14], [43], [62], [135], [136], [142], [143], 6 od 12 eksperimentalnih istraživanja uspoređeno je s odabranim regresijskim modelom za modul elastičnosti [14], [40], [47], [62], [136], [142] i 8 od 12 eksperimentalnih istraživanja uspoređeno je s odabranim regresijskim modelom za čvrstoću na savijanje [14], [40], [43], [51], [62], [135], [142], [144]. Kako bi se izbjegle nepotrebne nesukladnosti i nedosljednosti u usporedbi eksperimentalnih rezultata s odabranim modelima, eksperimentalni rezultati istraživanja drugih autora pažljivo su odabrani kako slijedi:

- vrsta betona je samozbijajući beton, a ne obični beton,
- reciklirana guma zamjenjuje sitni agregat, a ne krupni agregat,
- zamjena sitnog agregata recikliranom gumom volumenska je, a ne masena,
- silicijska prašina zamjenjuje cement u postotku od ukupne mase cementa, a ne u postotku od ukupne mase praškastog materijala,
- izbjegava se usporedba eksperimentalnih istraživanja u kojima se pojavljuje više različitih materijala, tj. mineralnih dodataka koji djelomično mijenjaju cement, kao što su kombinacija silicijske prašine i metakaolina, letećeg pepela ili zgure,
- promatrani je udio gume i silicijske prašine unutar granica odabranih modela, tj. od 0 % do 30 % i od 0 % do 10 %,
- tlačna čvrstoća i modul elastičnosti dobiveni su ispitivanjem uzoraka valjaka, dok je čvrstoća na savijanje dobivena ispitivanjem uzoraka prizmi.

Kao što je već ranije spomenuto, u ovome je radu sitni agregat zamijenjen recikliranom gumom u postotku od volumena ukupnog agregata. Međutim, u svim eksperimentalnim istraživanjima drugih autora zamjena sitnog agregata gumom rađena je u postotku od volumena sitnog agregata. Stoga, kako bismo povezali rezultate eksperimentalnih istraživanja drugih autora s odabranim regresijskim modelima, primijenjen je koeficijent konverzije ([Slika 4.11](#)) kao poveznica između zamjene sitnog agregata u postotku od volumena ukupnog agregata i postotku od volumena sitnog agregata. Koeficijent konverzije iznosi $1 / 1,818 = 0,55$.



Slika 4.11 Koeficijent konverzije ($1 / 1,818 = 0,55$)

Slika 4.11 slikovito prikazuje da je, u usporedbi s istraživanjima drugih autora, u ovome radu zamijenjen poprilično velik dio sitnog agregata recikliranom gumom s obzirom da 30 %-tna zamjena sitnog agregata od volumena ukupnog agregata znači da je zamijenjeno više od polovice volumena sitnog agregata recikliranom gumom. Verifikacija regresijskih modela utemeljena na postojećim rezultatima ispitivanja drugih autora dana je u Tablicama 4.13, 4.14 i 4.15 i na Slici 4.12.

Tablica 4.13 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona

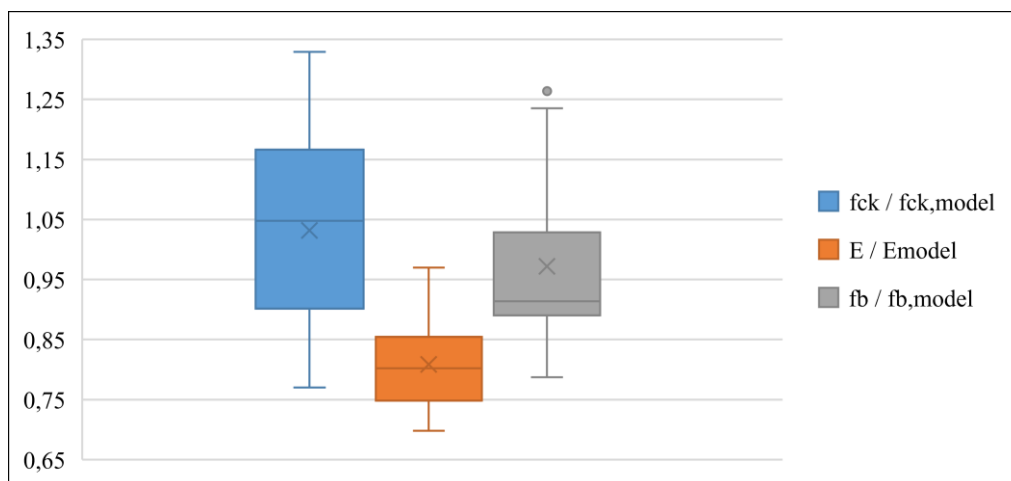
Referenca	CR (%)	SLF (%)	CR nakon konverzije (%)	f_c (MPa)	$f_{c,model}$ (MPa)	$f_c / f_{c,model}$
[14]	0	0	0	52,95	43,09	1,23
	5	0	2,75	44,54	40,15	1,11
	10	0	5,50	42,09	37,20	1,13
	15	0	8,25	37,35	34,26	1,09
	20	0	11,00	30,69	31,31	0,98
	25	0	13,75	28,83	28,36	1,02
	30	0	16,50	24,73	25,42	0,97
	20	0	11,00	32,81	31,31	1,05
	30	0	16,50	27,05	25,42	1,06
[43]	0	10	0	80,15	60,30	1,33
	5	10	2,75	62,12	56,12	1,11
	10	10	5,50	49,11	51,93	0,95
	15	10	8,25	41,5	47,74	0,87
	20	10	11,00	33,54	43,55	0,77
	5	10	2,75	58,1	56,12	1,04
	20	10	11,00	35,12	43,55	0,81
	25	10	13,75	30,76	39,37	0,78
[62]	0	0	0	53,5	43,09	1,24
	5	0	2,75	47,07	40,15	1,17
	10	0	5,50	43,39	37,20	1,17
	15	0	8,25	38,45	34,26	1,12
	20	0	11,00	32,81	31,31	1,05
	25	0	13,75	27,05	28,36	0,95
	30	0	16,50	21,1	25,42	0,83
[142]	0	0	0	50,8	43,09	1,18
	0	5	0	61,2	51,70	1,18
	0	10	0	62,1	60,30	1,03
[135]	0	0	0	38,85	43,09	0,90
	0	2	0	40,48	46,53	0,87
	0	4	0	45,41	49,98	0,91
	0	6	0	47,94	53,42	0,90
	0	8	0	50,03	56,86	0,88
	0	10	0	52,32	60,30	0,87
[143]	0	0	0	51,8	43,09	1,20
	0	10	0	56,5	60,30	0,94
	0	0	0	52,5	43,09	1,22
	0	10	0	63,4	60,30	1,05
[136]	0	0	0	50,8	43,09	1,18
	0	10	0	67,2	60,30	1,11

Tablica 4.14 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje modula elastičnosti samozbijajućeg betona

Referenca	CR (%)	SLF (%)	CR nakon konverzije (%)	E (GPa)	E _{model} (GPa)	E / E _{model}
[14]	0	0	0	33,61	39,73	0,85
	5	0	2,75	31,51	37,43	0,84
	10	0	5,50	30,78	35,13	0,88
	15	0	8,25	27,56	32,83	0,84
	20	0	11,00	23,14	30,53	0,76
	25	0	13,75	23,01	28,23	0,82
	30	0	16,50	20	25,93	0,77
	20	0	11,00	24,1	30,53	0,79
	30	0	16,50	22,03	25,93	0,85
[62]	0	0	0	33,59	39,73	0,85
	5	0	2,75	32,56	37,43	0,87
	10	0	5,50	30,86	35,13	0,88
	15	0	8,25	27,23	32,83	0,83
	20	0	11,00	24,1	30,53	0,79
	25	0	13,75	22,03	28,23	0,78
	30	0	16,50	18,1	25,93	0,70
	0	0	0	29,37	39,73	0,74
[40]	5	0	2,75	27,54	37,43	0,74
	10	0	5,50	25,71	35,13	0,73
	15	0	8,25	24,66	32,83	0,75
	20	0	11,00	21,97	30,53	0,72
	25	0	13,75	20,02	28,23	0,71
	30	0	16,50	18,7	25,93	0,72
	0	0	0	36,2	39,73	0,91
	0	5	0	38,6	39,80	0,97
[142]	0	10	0	38,9	50,17	0,78
	0	0	0	33	39,73	0,83
	22.2	0	12,21	26,6	29,52	0,90
[47]	0	0	0	36,2	39,73	0,91
	0	10	0	38,6	50,17	0,77
[136]	0	0	0	36,2	39,73	0,91
	0	10	0	38,6	50,17	0,77

Tablica 4.15 Verifikacija odabranog regresijskog modela za predviđanje čvrstoće na savijanje samozbijajućeg betona

Referenca	CR (%)	SLF (%)	CR nakon konverzije (%)	f_b (MPa)	$f_{b,model}$ (MPa)	$f_b / f_{b,model}$
[51]	0	0	0	5,65	6,49	0,87
	15	0	8,25	6,48	5,47	1,18
	20	0	11,00	6,2	5,13	1,21
[14]	0	0	0	5,78	6,49	0,89
	5	0	2,75	5,58	6,15	0,91
	10	0	5,50	5,28	5,81	0,91
	15	0	8,25	5,01	5,47	0,92
	20	0	11,00	4,65	5,13	0,91
	25	0	13,75	4,37	4,79	0,91
	30	0	16,50	3,96	4,45	0,89
	20	0	11,00	5	5,13	0,97
	30	0	16,50	4,25	4,45	0,95
[43]	5	10	2,75	8,36	6,77	1,24
	10	10	5,50	6,83	6,35	1,08
	15	10	8,25	6,1	5,93	1,03
	20	10	11,00	5,65	5,50	1,03
	5	10	2,75	7,3	6,77	1,08
	20	10	11,00	5,92	5,50	1,08
	25	10	13,75	5,36	5,08	1,05
[62]	0	0	0	5,92	6,49	0,91
	5	0	2,75	5,6	6,15	0,91
	10	0	5,50	5,52	5,81	0,95
	15	0	8,25	5,19	5,47	0,95
	20	0	11,00	5	5,13	0,97
	25	0	13,75	4,25	4,79	0,89
	30	0	16,50	3,85	4,45	0,86
[40]	0	0	0	5,74	6,49	0,88
	5	0	2,75	5,48	6,15	0,89
	10	0	5,50	5,12	5,81	0,88
	15	0	8,25	4,82	5,47	0,88
	20	0	11,00	4,57	5,13	0,89
	25	0	13,75	4,27	4,79	0,89
	30	0	16,50	3,92	4,45	0,88
[142]	0	0	0	8,2	6,49	1,26
	0	5	0	8,7	6,84	1,27
	0	10	0	8,8	7,19	1,22
[144]	0	0	0	6,59	6,49	1,02
	0	5	0	6,59	6,84	0,96
[136]	0	0	0	5,11	6,49	0,79
	0	2	0	5,61	6,63	0,85
	0	4	0	6,06	6,77	0,90
	0	6	0	6,22	6,91	0,90
	0	8	0	6,55	7,05	0,93
	0	10	0	6,74	7,19	0,94



Slika 4.12 Grafički prikaz verifikacije odabranih regresijskih modela

Verifikacijom odabranih regresijskih modela za tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje samozbijajućeg betona utvrđeno je da su u skladu s prethodnim eksperimentalnim rezultatima istraživanja. Omjer $f_c / f_{c,model}$ dobiven pomoću 39 verifikacijskih vrijednosti poprima raspon vrijednosti između 0,77 i 1,33 s prosjekom od 1,03 i medijanom od 1,05. Omjer $f_b / f_{b,model}$ dobiven pomoću 44 verifikacijskih vrijednosti poprima raspon vrijednosti između 0,79 i 1,27 s prosjekom od 0,97 i medijanom od 0,91. Međutim, verifikacijom regresijskog modela za modul elastičnosti utvrđeno je da je navedeni model nešto manje pouzdan od ostalih modela. Omjer E / E_{model} dobiven pomoću 30 verifikacijskih vrijednosti, poprima raspon vrijednosti između 0,7 i 0,97 s prosjekom od 0,81 i medijanom od 0,8. U sva tri slučaja nekoliko čimbenika utječe na razliku između eksperimentalnih vrijednosti drugih autora i vrijednosti dobivenih pomoću odabranih regresijskih modela:

- materijalne karakteristike (cement, agregat, punilo, mineralni dodatci kao djelomična zamjena cementa, reciklirana guma, kemijski dodatci i sl.),
- sastavi betonskih mješavina i omjeri (ukupna količina veziva, vodovezivni omjer, vodopraškasti omjer, količina mineralnih dodataka, omjer količine sitnog i krupnog agregata i sl.),
- postupak miješanja i uvjeti njege svježeg betona (priprema uzoraka),
- metode ispitivanja (norme i dimenzije uzoraka).

U svrhu budućih ispitivanja i daljnjeg razvoja modela samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom predlaže se provedba dodatnih eksperimentalnih ispitivanja, s varijacijom više od dvije varijable, kao što su npr. vodovezivni omjer, sadržaj, veziva, vrsta cementa i sl. S dodatnim varijablama uključenima u model veća baza podataka eksperimentalnih rezultata drugih autora može biti korištena u procesu verifikacije modela.

4.5 Zaključci o ispitivanju

U ovome poglavlju proučavao se utjecaj reciklirane gume (0 - 3,5 mm) i silicijske prašine ($d < 0,063$ mm) na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju potom su korišteni za izradu modela u računalnim programima *Statistica 13* i *R* koji bi najbolje mogao opisati utjecaj dvije nezavisne varijable (postotni udio granula gume u betonu i postotni udio silicijske prašine u betonu) na jednu od tri zavisne varijable, tj. tlačnu čvrstoću, modul elastičnosti ili čvrstoću na savijanje. Nekoliko zaključaka proizlazi iz provedenog eksperimentalnog istraživanja i izrade statističkih modela:

- Povećavanje udjela reciklirane gume i silicijske prašine ima negativan utjecaj na tečenje samozbijajućeg betona. Ipak, vrijednosti rasprostiranja slijeganjem su unutar prihvatljivih granica do 25 %-tne zamjene sitnog agregata gumom i do 10 %-tne zamjene cementa silicijskom prašinom.
- Mješavine samozbijajućeg betona s do 15 % reciklirane gume i 10 % silicijske prašine mogu se svrstati u razred viskoznosti VS1 ($t_{500} < 2$ sekunde), što je iznimno pogodno za armiranobetonske elemente s gusto složenom armaturom.
- Rezultati ispitivanja J-prstenom i L-kutijom pokazuju prihvatljivu sposobnost zaobilaženja zapreka sve do udjela gume od 15 % i udjela silicijske prašine do 10 %.
- Otpornost segregaciji mjerena je samo za mješavine kod kojih je uočeno da bi segregacija mogla stvarati problem, a to je kod mješavina bez silicijske prašine. Mješavine s 5 % i 10 % silicijske prašine nisu imale problem sa segregacijom.
- Vrijednosti tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje betona starosti 28 dana očekivano su najmanje kada je postotak zamjene prirodnog sitnog agregata granulama gume najveći (30 %).
- Negativan utjecaj granula gume na mehaničke karakteristike samozbijajućeg betona relativno se može ublažiti dodavanjem silicijske prašine, ali samo pri manjim postotcima zamjene sitnog agregata recikliranom gumom.
- Dodavanjem silicijske prašine ne može se anulirati negativan utjecaj granula gume na vrijednost tlačne čvrstoće kod svih mješavina. Ovaj zaključak odnosi se na veće postotke zamjena prirodnog agregata granulama gume.
- Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF i SCC-10CR-0SLF su iznad 30 MPa, što je bitno za daljnji nastavak istraživanja primjene samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima. Ipak, sukladno dobivenim rezultatima predlaže se da postotak silicijske prašine ne prelazi 5 % s obzirom da njezin pozitivni učinak na mehanička svojstva samozbijajućeg betona s gumom nije u linearnom odnosu s postotnim udjelom silicijske prašine, tj. mehanička svojstva nisu dvostruko poboljšana ukoliko je umjesto 5 % korišten udio zamjene cementa od 10 %.

- Vrijednosti modula elastičnosti su iznad 20 GPa pri postotku zamjene prirodnog agregata gumom od 20 %.
- Zamjena sitnog agregata recikliranom gumom uzrokuje negativan učinak i na vrijednost čvrstoće na savijanje samozbijajućeg betona, ali ipak u manjoj mjeri nego na vrijednost tlačne čvrstoće i modula elastičnosti.
- Pozitivan učinak silicijske prašine očitiji je do 10 %-tne zamjene sitnog agregata recikliranom gumom.
- Prema odabranom regresijskom modelu za predviđanje vrijednosti tlačne čvrstoće, s 10 % i 15 % gume te 0 % i 5 % silicijske prašine, može se dobiti tlačna čvrstoća betona od 30 MPa.
- Verifikacijom regresijskih modela dokazano je da se modeli za tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje dobro slažu s eksperimentalnim rezultatima drugih autora, dok je regresijski model za modul elastičnosti ipak manje pouzdan.

Pri odabiru vrijednosti postotaka gume i silicijske prašine u samozbijajućem betonu obavezno je u obzir uzeti rezultate ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem i u očvrslom stanju. Stoga se kao generalni zaključak [Poglavlja 4](#) može reći da se do 15 %-tnog udjela reciklirane gume i 5 %-tnog udjela silicijske prašine dobivaju svojstva samozbijajućeg betona u oba stanja, svježem i očvrslom, pogodna za ugradnju takvog betona u konstrukcijske elemente s gusto raspoređenom armaturom.

5 PARAMETRI MEHANIKE LOMA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM

5.1 Cilj ispitivanja

U [Poglavlju 4](#) dokazano je da su vrijednosti tlačnih čvrstoća uzoraka betonskih mješavina SCC-15CR-5SLF i SCC-10CR-0SLF iznad 30 MPa, što je bitno za daljnji nastavak istraživanja primjene samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima. Nadalje, sukladno dobivenim rezultatima predlaže se da postotak silicijske prašine ne prelazi 5 % jer njezin pozitivan učinak na mehanička svojstva samozbijajućeg betona s gumom nije u linearnom odnosu s postotnim udjelom silicijske prašine, tj. mehanička svojstva nisu dvostruko poboljšana ukoliko je umjesto 5 % korišten udio zamjene cementa od 10 %. Zbog svega navedenog, prije početka eksperimentalnih ispitivanja optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala i konstrukcijskog elementa, u [Poglavlju 5](#) provedeno je dodatno istraživanje kako se samozbijajući beton s recikliranom gumom ponašanja pri lomu. Otkazivanje nosive konstrukcije može biti uzrokovano dominantnim popuštanjem ili dominantnim lomom. Glavni cilj mehanike loma jest pružanje odgovora na specifične probleme koji se tiču pukotina u konstrukcijama. Pukotine mogu rasti zbog niza razloga, kao npr. zamor, naprezanje uslijed djelovanja korozije, puzanje i sl., a preostala (rezidualna) nosivost konstrukcije smanjuje se povećanjem duljine pukotine. Nadalje, preostala nosivost konstrukcije vremenom postaje toliko malena da konstrukcija može postati neuporabljiva. Stoga mehanika loma na sebe preuzima odgovornost davanja odgovora na pitanja vezana uz uporabni vijek konstrukcije, maksimalno dozvoljen rast pukotina s obzirom na njezinu početnu duljinu te potrebu za ispitivanjem pukotinskog stanja konstrukcija. Pregledom literature ustanovljeno je da ponašanje samozbijajućeg betona s recikliranom gumom pri lomu još uvijek nije dovoljno istraženo. Parametri mehanike loma najčešće se procjenjuju pomoću dvije metode ispitivanja: (a) metodom savijanja (*engl. three point bending test, 3PBT*) ili (b) metodom cijepanja klinom (*engl. wedge splitting test, WST*). Postupci određivanja parametara mehanike loma, tj. kritičnog koeficijenta intenziteta naprezanja (K_{Ic}), kritične vrijednosti otvaranja pri vrhu pukotine ($CTOD_c$) i energije loma (G_F) mogu se pronaći u preporukama RILEM 89-FMT [145] i RILEM 50-FMC [146].

Do danas, nekoliko se studija bavilo istraživanjem utjecaja reciklirane gume na ponašanje običnog i samozbijajućeg betona pomoću 3PBT metode. U istraživanju Hilal [59] proučavan je utjecaj tri različite veličine zrna reciklirane gume na energiju lomu uzoraka prizmi $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ s početnim zarezom, izrađenih od samozbijajućeg betona. Rezultati ispitivanja pokazali su sustavno smanjenje vrijednosti energije loma s povećanjem udjela reciklirane gume u betonu (veličina zrna 0-4 mm). Suprotno navedenom, Bideci i sur. [41] u svojem istraživanju betonskih uzoraka dimenzija $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ uočili su povećanje vrijednosti energije do 10 %-tne zamjene gume, dok je pad vrijednosti energije loma uočen s postotkom zamjene prirodnog agregata s gumom većim od 10 %.

Gesoğlu i sur. [67] određivali su energiju loma i karakterističnu duljinu uzoraka prizmi dimenzija $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ s 30 % udjela gume u betonu te su zaključili da je energija loma povećana za 35 % pri 15 %-tnom udjelu gume u betonu. Grinys i sur. [104] zaključili su da je energija loma i otpornost na vlačna naprezanja veća što je veći udio reciklirane gume u betonu. Nadalje, donijeli su preporuku za korištenje do 10 % udjela reciklirane gume u betonu kao zamjene za prirodni agregat. Svega se nekoliko istraživanja osim energijom loma bavilo i proučavanjem žilavosti loma [105], [106] te su zaključci oprečni. U istraživanju [105] se govori o smanjenju, dok se u istraživanju [106] govori o povećanju vrijednosti žilavosti loma. Kao alternativa metodi 3PBT može se koristiti metoda cijepanja klinom (WST metoda). Pregledom literature ustanovljeno je da ne postoji eksperimentalno ispitivanje parametara mehanike loma samozbijajućeg betona s gumom i silicijskom prašinom korištenjem WST metode. WST metodu predstavili su Linsbauer i Tschegg [147], a kasnije su je dodatno razvili Brühwiler i Wittmann [148]. Bit WST metode je u cijepanju uzoraka kocki i valjaka klinom pri čemu se bilježi krivulja *sila – deformacija* sve dok se uzorak ne prepolovi. WST metoda nije normirana, ali se koristi u jednakoj mjeri kao i 3PBT metoda iz nekoliko prednosti:

- konstrukcija uređaja za ispitivanje WST metodom je jednostavna [149],
- potrebna veličina uzorka manja je od veličine uzorka za 3PBT metodu, čineći WST metodu prihvatljivijom u pogledu brzine, jednostavnosti i cijene izrade uzoraka [149]–[152],
- utjecaj vlastite težine uzorka na rezultate je zanemariv [148], [151], [153]–[155],
- postoji mogućnost ispitivanja uzoraka različitog oblika i podrijetla (uzorci iz kalupa, bušeni uzorci i sl.) [150]–[153],
- u usporedbi s volumenom uzorka, površina ligamenta, predstavljena kao razlika između visine uzorka (W) i duljine inicijalnog zareza (a_0), relativno je velika [151],
- bolja stabilnost ispitivanja, što posljedično dovodi do preciznijih mjerenja energije loma [150]–[152].

Xu i Zhu [155] otkrili su da očvrsnula cementna pasta nije krhki materijal te da prije nastupanja nestabilnog loma postoji proces nelinearnog loma i stacionarna faza širenja pukotine (*engl. steady crack propagation stage*). Proces nelinearnog loma u betonu opisuje se pomoću tri područja: područje 1 – stvaranje pukotine (pukotina se nije počela širiti), područje 2 – stabilno širenje pukotine; i područje 3 – nestabilno širenje pukotine, tj. lom uzorka [156]. Postoji nekoliko različitih modela kojima se može opisati nelinearni lom: model fiktivne pukotine (*engl. fictitious crack model, FCM*) [157], model trakastih pukotina (*engl. crack band model, CBM*) [158], dvoparametarski model loma (*engl. two parameter fracture model, TPFM*) [159], model učinka veličine uzorka (*engl. size effect model*) [160], [161], model efektivne pukotine (*engl. effective crack model, ECM*) [162], model dvostruke K-žilavosti (*engl. double K-fracture model, DKFM*) [156], [163], [164]. Metode ispitivanja pomoću kojih je moguće odrediti odgovarajuće parametre mehanike loma koji se javljaju u navedenim modelima

navedene su u preporukama RILEM-a [146], [156], [165]. Metode TPFM, ECM i FCM pokušavaju opisati ponašanje betona pri lomu pomoću linearno elastične mehanike loma. Stoga se navedeni modeli mogu koristiti za predviđanje nestabilnog loma, ali se ne mogu koristiti za predviđanje stvaranja pukotine i stabilnog širenja pukotine [156]. Među nabrojanim modelima DFKM model opisuje cjelovit proces loma betona uključujući sva tri prethodno navedena područja [155]. Stoga, navedeni DFKM model, koji su predložili Xu i Reinhardt [156], [163], [164], može biti korišten kako bi se opisale tri različite situacije koje se javljaju tijekom širenja pukotine pa sve dok ne dođe do loma uzorka. DFKM model koristi dva parametra kako bi se opisalo ponašanje betona pri lomu, inicijalna ili početna žilavost loma (*engl. initial fracture toughness, $K_{Ic,ini}$*) i nestabilna žilavost loma (*engl. unstable fracture toughness, $K_{Ic,un}$*). U prethodnim istraživanjima zaključeno je da su navedena dva parametra neovisna o veličini uzorka koji se ispituje [155], [164] te da je samo potrebno izmjeriti uzlaznu granu krivulje *sila – pomak na mjestu unosa opterećenja* i to bez dodatnog rasterećenja uzorka.

U ovom poglavlju ispitani su parametri mehanike loma samozbijajućeg betona s recikliranom gumom s i bez silicijske prašine. Sitni agregat (0-4 mm) zamijenjen je recikliranom gumom pri različitim volumenskim udjelima. Ukupno je pripremljeno 14 mješavina samozbijajućeg betona. Mehanička svojstva navedenih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom usvojena su iz [Poglavljja 4](#), a u namjeri određivanja parametara mehanike loma korištena je metoda cijepanja klinom (WST metoda). Cilj ispitivanja bio je uočiti utjecaj visokog postotka zamjene sitnog agregata recikliranom gumom (do 30 % ukupnog volumena agregata) na parametre mehanike loma. Postupak loma opisan je upotrebom modela dvostruke-K žilavosti (DKFM model), a dodatno su određene i vrijednosti energije loma i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke.

5.2 Materijali i metode ispitivanja

5.2.1 Materijali i sastav betonskih mješavina

Materijali korišteni za ispitivanje identični su materijalima korištenim prilikom odabira optimalnih mješavina samozbijajućeg betona u [Poglavljju 4](#). Postotak zamjene sitnog agregata iznosio je 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % i 30% volumena ukupnog agregata. Sastavi betonskih mješavina usvojeni u ovome istraživanju razvili su i prvi puta predstavili Bušić i sur. [128] te se može naći u [Poglavljju 4](#). Izrađeno je 14 različitih mješavina samozbijajućeg betona prikazanih u [Tablici 5.1](#).

Tablica 5.1 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona (kg/m³)

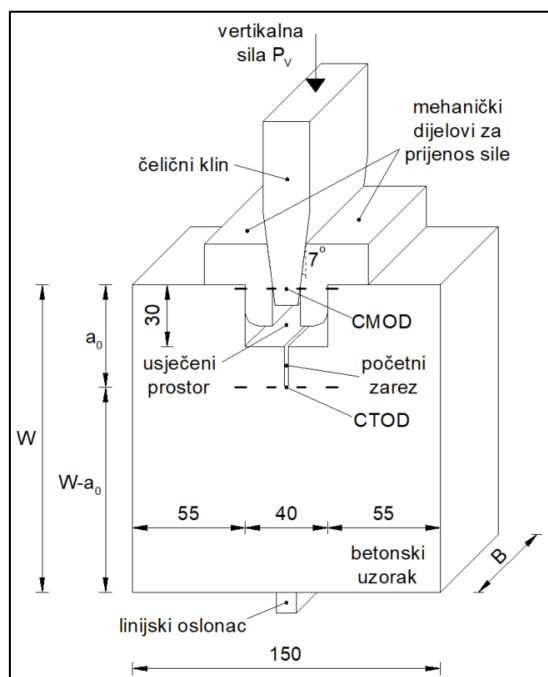
Oznaka mješavine	Cement	SLF	VMA	Guma	Prirodni agregat			
				0-4 mm	0-2 mm	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
SCC-0CR-0SLF	450	0	1,08	0	325,54	616,07	363,4	454,25
SCC-0CR-5SLF	427,5	22,5	0	0	324,04	613,23	361,72	452,15
SCC-5CR-0SLF	450	0	1,08	33,12	325,54	528,06	363,4	454,25
SCC-5CR-5SLF	427,5	22,5	0	32,97	324,04	525,62	361,72	452,15
SCC-10CR-0SLF	450	0	1,08	66,24	325,54	439,3	363,4	454,25
SCC-10CR-5SLF	427,5	22,5	0	65,94	324,04	438,02	361,72	452,15
SCC-15CR-0SLF	450	0	1,08	99,37	325,54	352,04	363,4	454,25
SCC-15CR-5SLF	427,5	22,5	0	98,91	324,04	350,42	361,72	452,15
SCC-20CR-0SLF	450	0	1,08	132,49	325,54	264,03	363,4	454,25
SCC-20CR-5SLF	427,5	22,5	0	131,88	324,04	262,81	361,72	452,15
SCC-25CR-0SLF	450	0	1,08	165,61	325,54	176,02	363,4	454,25
SCC-25CR-5SLF	427,5	22,5	0	164,85	324,04	175,21	361,72	452,15
SCC-30CR-0SLF	450	0	1,08	198,73	325,54	88,01	363,4	454,25
SCC-30CR-5SLF	427,5	22,5	0	197,81	324,04	87,6	361,72	452,15

5.2.2 Priprema i njega uzoraka

Nakon miješanja projektiranih mješavina samozbijajućeg betona u laboratorijskoj miješalici zapremine 50 litara, beton je ugrađen u normirane kalupe za kocke. Čelični lim postavljen je na dno kvadratnih kalupa kako bi se formirao usjek dimenzija 30 mm × 40 mm u sredini uzorka, predviđen za smještaj mehaničkih dijelova za prijenos sile. Od svake mješavine samozbijajućeg betona iz [Tablice 5.1](#) izrađena su tri uzorka dimenzija 150 mm × 150 mm × 150 mm. Na svim je uzorcima napravljen i početni zasjek, tj. inicijalni zarez u sredini uzorka kako bi stvaranje pukotina moglo biti na kontroliranom mjestu ([Slika 5.1](#)). Za izradu inicijalnog zareza korištena je kružna pila debljine 5 mm. Omjer između početne duljine zareza (a_0) i visine uzorka (W) bio je približno jednak $a_0/W = 1/3$. Geometrijske karakteristike svakog pojedinog uzorka precizno su izmjerene ([Slika 5.2](#)) i potom zapisane u [Tablicu 5.2](#).



Slika 5.1 Geometrija uzorka: (a) uzorci kocki s usječenim prostorom za smještaj mehaničkih dijelova za prijenos sile i inicijalnim zarezom, (b) mjerenje duljine inicijalne pukotine (inicijalnog zareza) na dvije suprotne strane uzorka, (c) mjerenje visine uzorka na četiri ruba uzorka



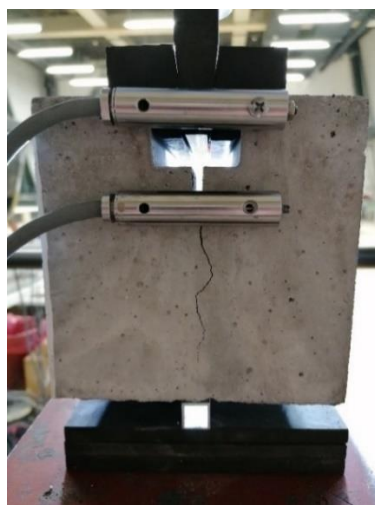
Slika 5.2 Geometrija uzoraka i postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma metodom cijepanja klinom

Tablica 5.2 Geometrijske karakteristike uzoraka kocki samozbijajućeg betona podvrgnutih ispitivanju metodom cijepanja klinom

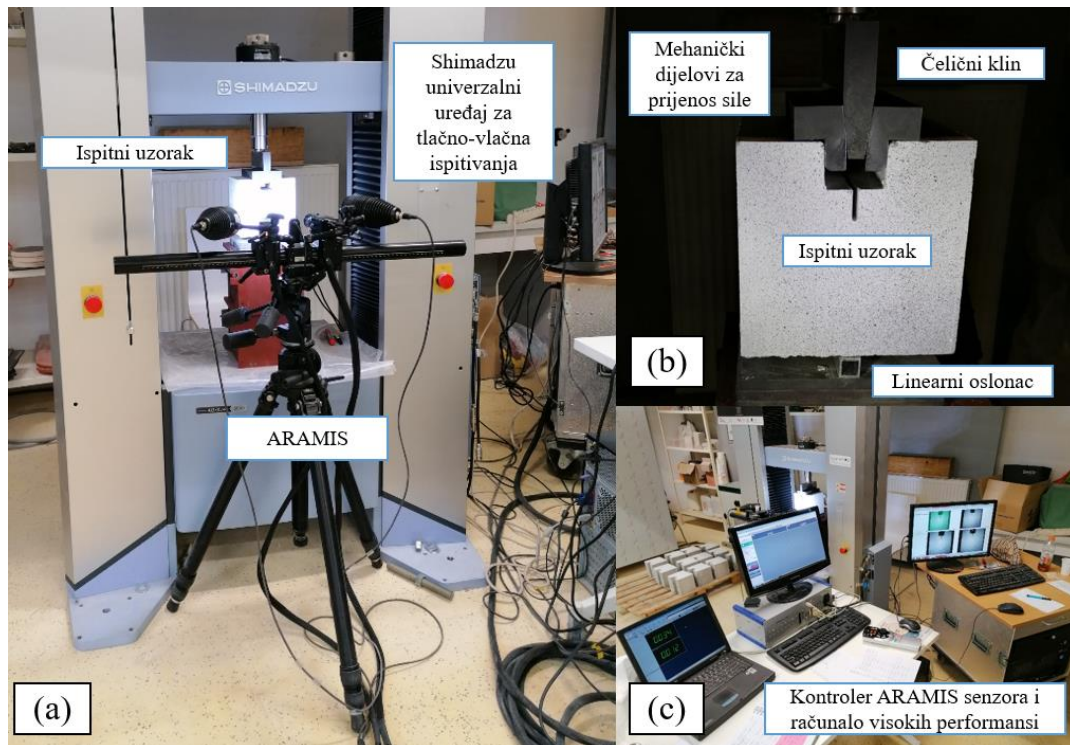
Mješavina	Uzorak	B	W	a_0	a_0/W
SCC-0CR-0SLF	0-0-1	150,80	147,60	50,55	0,34
	0-0-2	150,70	145,40	46,80	0,32
	0-0-3	150,20	148,10	48,65	0,33
SCC-0CR-5SLF	0-5-1	150,90	149,25	50,70	0,34
	0-5-2	151,20	146,05	47,50	0,33
	0-5-3	151,00	148,23	49,60	0,33
SSS-5CR-0SLF	5-0-1	151,20	149,05	50,40	0,34
	5-0-2	150,50	148,53	49,80	0,34
	5-0-3	150,60	146,93	50,75	0,35
SCC-5CR-5SLF	5-5-1	150,30	149,88	51,25	0,34
	5-5-2	150,30	148,90	50,40	0,34
	5-5-3	151,10	147,80	49,60	0,34
SCC-10CR-0SLF	10-0-1	150,90	146,88	48,40	0,33
	10-0-2	151,00	148,50	49,75	0,34
	10-0-3	151,20	145,28	47,55	0,33
SCC-10CR-5SLF	10-5-1	150,90	148,25	49,75	0,34
	10-5-2	151,00	148,53	50,05	0,34
	10-5-3	151,30	148,15	49,65	0,34
SCC-15CR-0SLF	15-0-1	150,30	147,45	49,20	0,33
	15-0-2	150,90	147,43	49,05	0,33
	15-0-3	150,30	147,08	51,25	0,35
SCC-15CR-5SLF	15-5-1	151,10	149,78	51,50	0,34
	15-5-2	150,90	146,25	48,30	0,33
	15-5-3	151,50	146,93	48,35	0,33
SCC-20CR-0SLF	20-0-1	151,10	147,98	49,75	0,34
	20-0-2	150,70	147,88	48,95	0,33
	20-0-3	150,80	148,05	49,65	0,34
SCC-20CR-5SLF	20-5-1	150,50	149,85	51,35	0,34
	20-5-2	150,90	148,98	51,80	0,35
	20-5-3	151,00	147,78	49,05	0,33
SCC-25CR-0SLF	25-0-1	150,40	145,35	46,90	0,32
	25-0-2	151,00	146,83	48,35	0,33
	25-0-3	150,40	144,70	46,50	0,32
SCC-25CR-5SLF	25-5-1	151,00	146,95	48,50	0,33
	25-5-2	150,80	147,50	48,90	0,33
	25-5-3	150,50	149,35	50,60	0,34
SCC-30CR-0SLF	30-0-1	150,40	147,78	49,20	0,33
	30-0-2	150,60	148,15	50,25	0,34
	30-0-3	151,10	147,83	49,65	0,34
SCC-30CR-5SLF	30-5-1	151,10	149,48	52,75	0,35
	30-5-2	150,60	151,20	52,90	0,35
	30-5-3	151,00	149,43	51,70	0,35
Visina uzorka (W) određena je kao prosječna vrijednost mjerenja na četiri ruba uzorka.					
Duljina početnog/inicijalnog zareza (a_0) određena je kao prosječna vrijednost mjerenja na obje strane uzorka.					

5.2.3 Postav za ispitivanje i postupak ispitivanja

Eksperimentalni program bio je usmjeren na određivanje parametara mehanike loma samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Na 42 uzorka kocki samozbijajućeg betona istraženo je stvaranje pukotine te njezino stabilno i nestabilno širenje. U ovom istraživanju prijenos sile s univerzalnog uređaja za tlačno-vlačna ispitivanja na betonski uzorak ostvaren je pomoću čeličnih mehaničkih dijelova za prijenos sile i čeličnog klina (Slika 5.3 i 5.4). Princip korištene metode ispitivanja detaljno je objasnio Tschegg [153]. Ispitni uzorci postavljeni su na linearni oslonac te su potom opterećeni vertikalnom silom (P_V). Vertikalna je sila (P_V) pomoću univerzalnog uređaja za tlačno-vlačna ispitivanja proizvođača Shimadzu nanošena postupno na uzorak preko čeličnog klina i dva mehanička dijela za prijenos sile (Slika 5.4). Opterećenje se nanosilo kontrolom vertikalnog pomaka od 0,4 mm/min sve do potpunog rascjepa uzorka (Slika 5.2). Kako bi se smanjilo trenje, tanak sloj teflona u spreju nanesen je između čeličnog klina i mehaničkih dijelova za prijenos sile. Mjerene su vrijednosti vertikalne sile (P_V), širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne sile (CMOD) i širenja pukotine pri vrhu pukotine (CTOD). Za mjerenje pomaka (CMOD i CTOD) primijenjene su dvije tehnike, svaka na jednoj od bočnih strana uzorka. Na stražnjoj bočnoj strani uzorka zalijepljena su dva ekstenzometra (Slika 5.3) koja su mjerila pomake CTOD i CMOD, dok je suprotna (prednja) strana uzorka bila praćena prostornom DIC tehnikom (*engl. digital image correlation*). Prostorna DIC tehnika praćenja provedena je pomoću Aramis 3D sustava za optičku analizu deformacija koju je razvilo njemačko društvo za optičku mjernu tehnologiju GOM (*njem. Gesellschaft für optische Messtechnik*). Razmak između kamera (senzora) sustava Aramis i udaljenost kamera od uzorka određeni su sukladno GOM preporukama. Kako bi se postigli dobar kontrast površine uzorka i odgovarajuće prepoznavanje uzorka, u prvom je koraku nanesen tanak sloj bijele boje. Potom je u drugom koraku korišten sprej crne boje kako bi se formirao odgovarajući točkasti uzorak na praćenoj bočnoj strani (Slika 5.4). Nadalje, kako bi se osigurala točnost DIC mjerenja, prije nanošenja vertikalnog opterećenja, sustavom Aramis ispitano je prepoznavanje odgovarajućeg točkastog uzorka.



Slika 5.3 Postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma pomoću LVDT-a

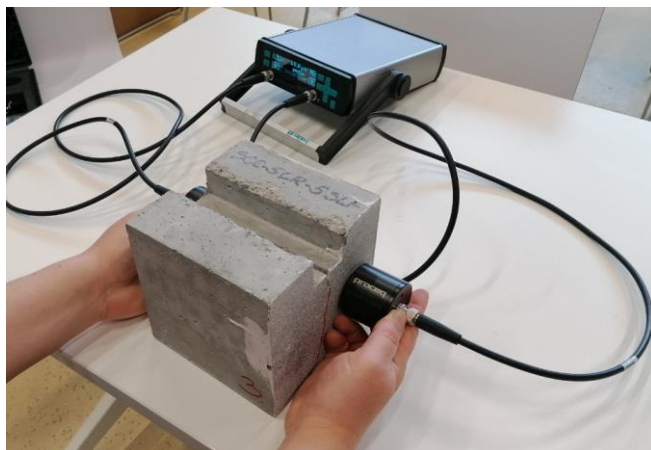


Slika 5.4 Postav instrumenata za ispitivanje parametara mehanike loma 3D DIC metodom: (a) Aramis, (b) pripremljena površina uzorka pomoću spreja crne boje, (c) računalo visokih performansi korišteno za obradu prikupljenih podataka

Nakon provedenog ispitivanja uzorka metodom cijepanja klinom na polovicama uzorka mjerena je brzina prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) radi dodatnog kvalitativnog opisa ponašanja samozbijajućeg betona s gumom, kako je prikazano na [Slici 5.5](#). UPV manji od 3000 m/s ukazuje na beton loše kvalitete, dok UPV veći od 4500 m/s ukazuje na beton visoke kvalitete [166]. Ispitivanje je izvršeno u skladu s normom HRN EN 12504-4:2021 [167], a brzina prolaska ultrazvučnog impulsa određena je jednadžbom:

$$UPV = \frac{l}{t} \quad (5.1)$$

gdje je l duljina uzorka, a t vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak.



Slika 5.5 Određivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak

Određivanje parametara mehanike loma

Proces loma samozbijajućeg betona s recikliranom gumom opisan je uporabom DKFM modela pomoću dva parametra: inicijalne žilavosti loma ($K_{Ic,ini}$) i nestabilne žilavosti loma ($K_{Ic,un}$). Uz to je određena i energija loma (G_F), sve s namjerom boljeg razumijevanja mehanike loma samozbijajućeg betona s gumom. $K_{Ic,ini}$ i $K_{Ic,un}$ su određene u 4 koraka koji su detaljno objašnjeni u nastavku:

Korak 1 – određivanje modula elastičnosti (E)

Tlačna čvrstoća (f_c) i modul elastičnosti (E) proučavanih mješavina samozbijajućeg betona određena je eksperimentalno, u skladu s HRN EN 12390-3:2019 [125] i HRN EN 12390-13:2021 [126] i rezultati su dani u Poglavlju 4. Pored toga, ispitana je mogućnost korištenja dva izraza za procjenu modula elastičnosti betona iz [162] i iz Eurokoda 2 [168] na način da su eksperimentalne vrijednosti modula elastičnosti samozbijajućeg betona s gumom uspoređene s vrijednostima modula elastičnosti dobivenima pomoću [Jednadžbi 5.3](#) i [5.4](#) kako bi se procijenila potencijalna upotreba postojećih izraza za praktičnu procjenu vrijednosti modula elastičnosti samozbijajućeg betona s gumom.

$$E_c = 4734\sqrt{f_c}(\text{MPa}) \quad (5.2)$$

$$E_c = 22[f_c/10]^{0,3}(\text{MPa}) \quad (5.3)$$

Korak 2 – izračun kritične duljine pukotine

Kritična duljina pukotine, tj. efektivna duljina pukotine pri kritičnom, tj. vršnom opterećenju (a_c) izračunata je iz empirijskog izraza danog u [164]:

$$CMOD = \frac{P}{BE} V_I(\alpha) \quad (5.4)$$

gdje je P horizontalna sila koja djeluje na uzorak kada je $P = P_{H,max}$, B je širina (debljina) uzorka, $CMOD = CMOD_c$ je kritična vrijednost širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne sile kada je $P_H = P_{H,max}$, a $V_I(\alpha)$ je koeficijent koji se može izraziti kao:

$$V_I(\alpha) = [2,163 + 12,219\alpha - 20,065\alpha^2 - 0,9925\alpha^3 + 20,609\alpha^4 - 9,9314\alpha^5] \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^2 \quad (5.5)$$

gdje je $\alpha = a/W$ i $a = a_c$ efektivna duljina pukotine pri vršnom (kritičnom) opterećenju, tj. kritična duljina pukotine i W visina je uzorka. Ovaj empirijski izraz valjan je s točnošću od 0,5 % za $0,2 \leq \alpha \leq 0,975$ [164]. Horizontalna sila koja djeluje na uzorak (P_H) može se izraziti kao:

$$P_H = \frac{1 - \mu \tan \theta}{2(\mu + \tan \theta)} P_V \quad (5.6)$$

gdje je P_V primijenjeno vertikalno opterećenje, θ je kut nagiba klina i μ je koeficijent trenja između klina i mehaničkih dijelova za prijenos sile [151], [153]. Prema [153] koeficijent trenja (μ) iznosi 0,05.

Korak 3 – određivanje nestabilne žilavosti loma ($K_{Ic,un}$)

$K_{Ic,un}$ može se odrediti koristeći LEFM formulu [164]:

$$K_{Ic,un} = \frac{P}{B\sqrt{W}} F(\alpha) \quad (5.7)$$

$$F(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)(0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (5.8)$$

gdje je $P = P_{H,max}$, $\alpha = a/W$, $a = a_c$. Ovaj empirijski izraz valjan je s točnošću od 0,5 % za $0,2 \leq \alpha \leq 1$ [164]. Maksimalna horizontalna sila ($P_{H,max}$) i kritična efektivna duljina pukotina (a_c) korišteni su za određivanje $K_{Ic,un}$.

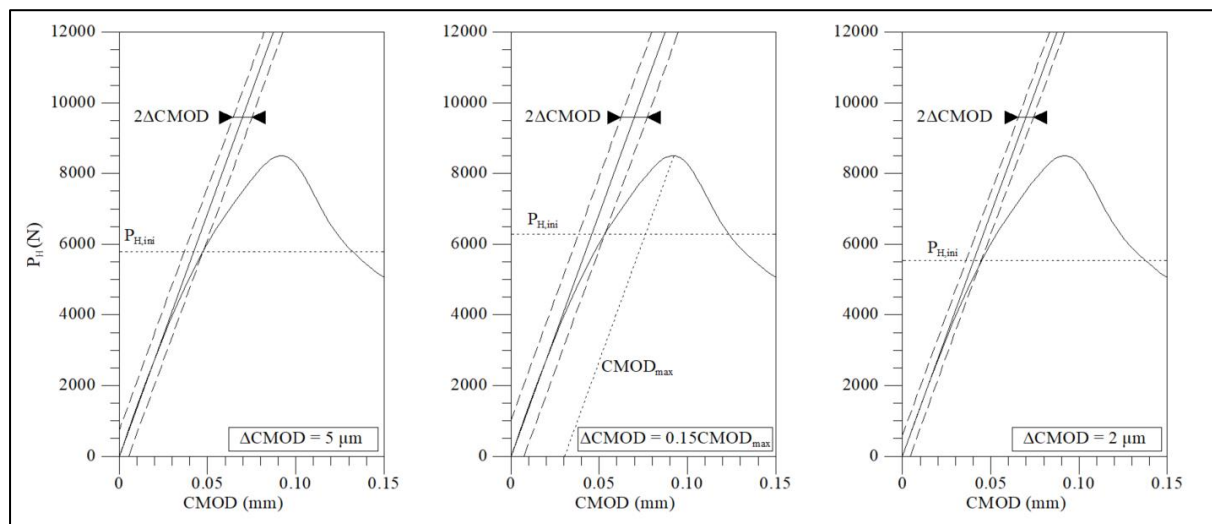
Korak 4 – izračun inicijalne horizontalne sile loma ($P_{H,ini}$) i inicijalna žilavosti loma ($K_{Ic,ini}$)

Da bi se izračunala inicijalna žilavost loma ($K_{Ic,ini}$), prvo je potrebno izračunati inicijalnu horizontalnu silu loma ($P_{H,ini}$), tj. početnu točku stabilnost širenja pukotine. U fizikalnom smislu inicijalna horizontalna sila loma predstavlja silu pri kojoj uzorak prelazi iz linearnog u nelinearno područje. $P_{H,ini}$ je definirana pomoću dvije različite metode, grafičke metode (Metoda (a)) i

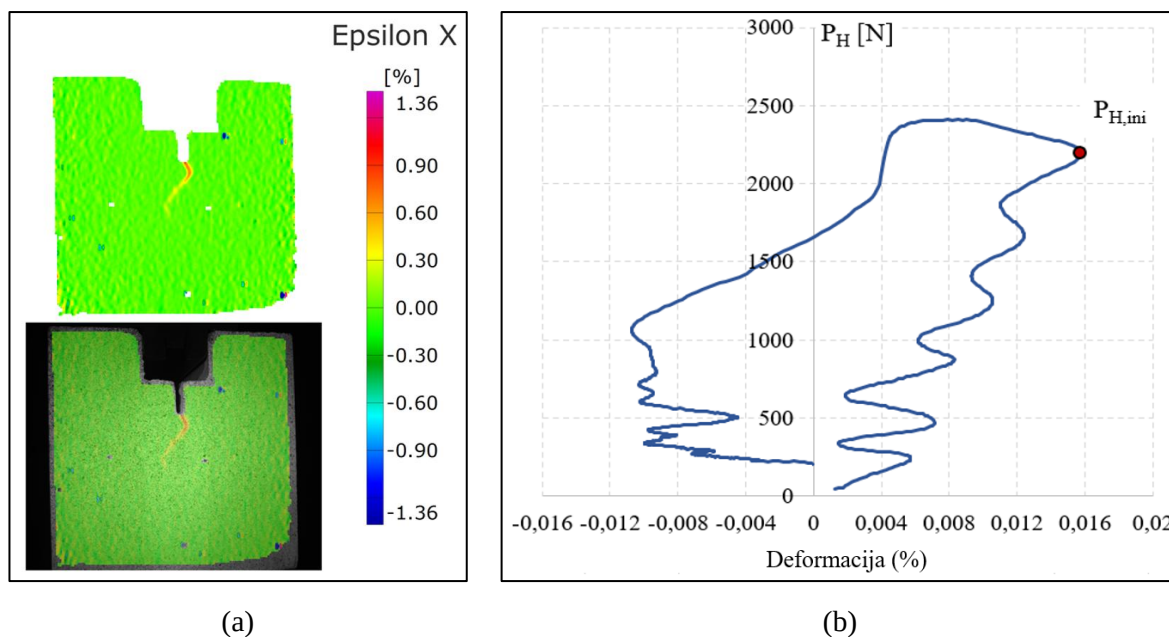
eksperimentalne metode (Metoda (b)). U prvom je koraku ispitana grafička metoda koju preporučuju Ruiz i sur. [169] te Wu i sur. [170]. U drugom koraku eksperimentalni su rezultati uspoređeni s rezultatima dobivenim pomoću grafičke metode te su dane preporuke za praktičnu primjenu određivanja $P_{H,ini}$ kod samozbijajućeg betona s recikliranom gumom.

Metoda (a) – grafička metoda ($P_{H,ini}$ dobivena iz P_H – CMOD krivulje), koju su prethodno predložili Ruiz i sur. [169] te Wu i sur. [170], gdje je $P_{H,ini}$ definirana s obzirom na širinu pojasa pogreške ($\Delta CMOD$). Tri različite vrijednosti širine pojasa pogreške su korištene za definiranje $P_{H,ini}$. Procijenjene širine pojasa pogreške bile su jednake $5 \mu m$ [170]; $0,15 \times CMOD_c$ [169], [170] i dodatno je ispitana vrijednost od $2 \mu m$ (Slika 5.6). Međutim, nije bilo jasno kako odrediti nagib tangentne P_H – CMOD krivulje. Stoga se pristupilo analizi linearne regresije koja je provedena uzimajući u obzir dva različita dijela P_H – CMOD krivulje, dio do 50 % i dio do 80 % vrijednosti $P_{H,max}$, dajući ukupno šest različitih kombinacija određivanja $P_{H,ini}$. Točnost određene kombinacije procijenjena je usporedbom s eksperimentalno utvrđenim vrijednostima $P_{H,ini}$ (Metoda (b)).

Metoda (b) – eksperimentalna metoda određivanja vrijednosti $P_{H,ini}$ koja se oslanja na eksperimentalne krivulje P_H – mjerac pomaka, dobivene pomoću optičkog mjernog sustava Aramis (Slika 5.7). Ta metoda prati princip koji su definirali Wu i sur. [170] i sastoji od postavljanja virtualnih mjerača pomaka duž visine ispitnog uzorka. Mjerači pomaka postavljeni su simetrično u odnosu na početni zarez, na horizontalnoj udaljenosti od 10 mm. Veličina mjerača pomaka je visina $\times$ dužina = 10 mm $\times$ 20 mm. Deformacije su izražene kao prosječne deformacije površine okomito na primijenjeno vertikalno opterećenje.



Slika 5.6 Grafička metoda određivanja $P_{H,ini}$ pomoću krivulje P_H – CMOD: (a) $\Delta CMOD = 5 \mu m$ [170]; (b) $\Delta CMOD = 0,15 \times CMOD_c$ [169], [170]; (c) $\Delta CMOD = 2 \mu m$



Slika 5.7 Eksperimentalna metoda određivanja $P_{H,ini}$: (a) optički mjerni sustav Aramis, (b) eksperimentalna krivulja P_H – mjerač pomaka dobivena pomoću optičkog mjernog sustava Aramis

Energija loma može biti definirana kao unutarnji rad koji razvija opterećenje sve do otkazivanja uzorka. Energija loma određena je prema Tscheggu [171] i prema preporukama RILEM 50-FMC [146]:

$$G_F = \frac{W_G}{A_{Lig}} \quad (5.9)$$

gdje je G_F vrijednost energije loma (N/m), W_G je površina ispod P_H – CMOD krivulje, A_{Lig} je površina ligamenta koja se dobije pomoću izraza $A_{Lig} = B \times (W - a)$.

5.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija

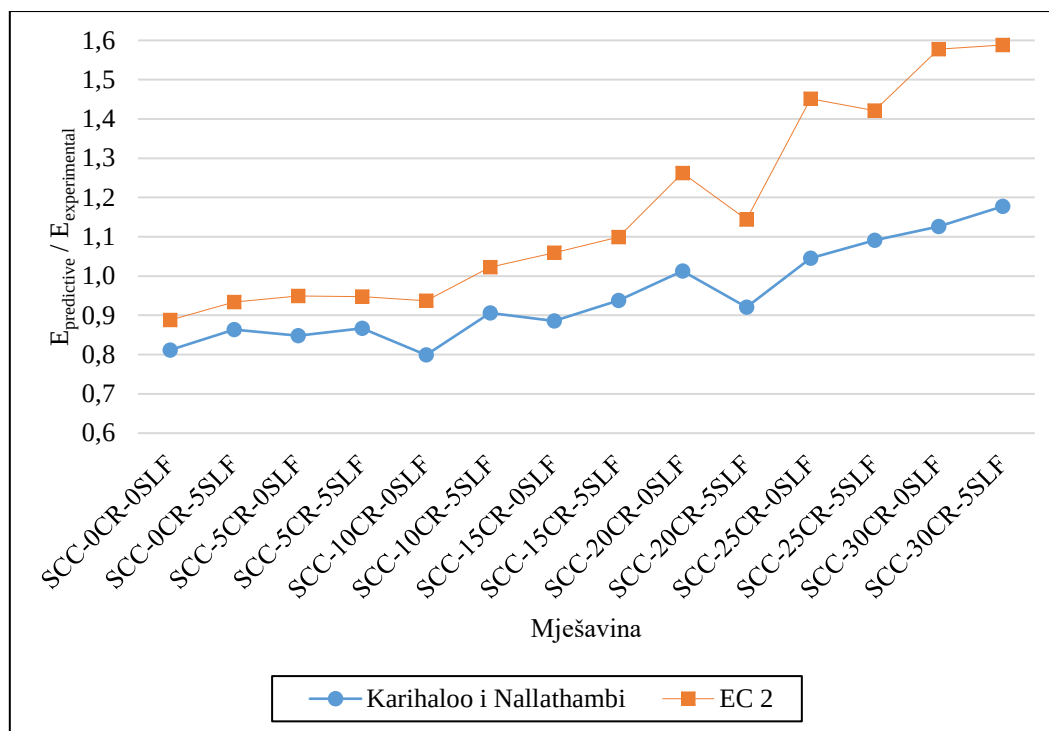
5.3.1 Jednadžbe za procjenu vrijednosti modula elastičnosti

Eksperiment i rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti usvojeni su iz istraživanja koje su proveli Bušić i sur. [128] i mogu se pronaći u [Poglavlju 4](#). Vidljiva su dva različita obrasca sloma uzoraka samozbijajućeg betona, jedan kod mješavina s gumom, a drugi kod mješavina bez gume. Mješavine s recikliranom gumom doživjele su mekši slom, što se može povezati sa značajno manjim modulom elastičnosti reciklirane gume u odnosu na modul elastičnosti prirodnog agregata. Dobivene vrijednosti modula elastičnosti uspoređene su s izrazima za procjenu modula elastičnosti predloženim u istraživanju koje su proveli Karihaloo i Nallathambi [162] te izrazima predloženim u Eurokodu 2 [168]. Usporedba rezultata vidljiva je u [Tablici 5.3](#). Eksperimentalne vrijednosti modula elastičnosti prikazane su kao prosječne vrijednosti tri uzorka. U [Poglavlju 4](#) raspravljano je o utjecaju

reciklirane gume i silicijske prašine na tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti samozbijajućeg betona. Zaključeno je da reciklirana guma ima negativan utjecaj na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Međutim, u istom poglavlju raspravljalo se o činjenici da silicijska prašina može umanjiti negativan utjecaj reciklirane gume na mehanička svojstva betona. U ovome poglavlju vrijednosti mehaničkih svojstava korištene su za definiranje ponašanja betona pri lomu i za definiranje svojstava loma samozbijajućeg betona s gumom i silicijskom prašinom. Vrijednosti dobivene jednadžbama za procjenu ($E_{\text{predictive}}$) normalizirane su u odnosu na eksperimentalne vrijednosti ($E_{\text{experimental}}$) te su prikazane na [Slici 5.8](#) kako bi se procijenila potencijalna upotreba postojećih izraza iz literature za praktičnu procjenu vrijednosti modula elastičnosti samozbijajućeg betona s gumom.

Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti dobiveni eksperimentalno i pomoću analitičkih izraza

Mješavina	Gustoća (kg/m ³)	Bušić i sur. [128]		Karihaloo i Nallathambi [162]	Eurokod 2 [168]
		f_c (MPa)	E (MPa)		
SCC-0CR-0SLF	2424,89	43,72	38576,62	31301,73	34247,33
SCC-0CR-5SLF	2391,46	46,48	37370,53	32274,63	34882,09
SCC-5CR-0SLF	2378,23	39,04	34885,30	29578,98	33103,63
SCC-5CR-5SLF	2318,86	43,98	36199,03	31394,67	34308,30
SCC-10CR-0SLF	2329,6	30,88	32923,33	26306,73	30855,02
SCC-10CR-5SLF	2302,14	37,42	31966,82	28958,77	32685,40
SCC-15CR-0SLF	2305,52	28,04	28298,03	25067,86	29974,79
SCC-15CR-5SLF	2250,54	30,89	28061,60	26310,99	30858,02
SCC-20CR-0SLF	2212,76	22,76	22304,37	22584,70	28156,22
SCC-20CR-5SLF	2189,49	23,08	24707,26	22742,92	28274,40
SCC-25CR-0SLF	2151,96	13,28	16502,33	17251,52	23954,22
SCC-25CR-5SLF	2105,02	18,26	18544,67	20229,20	26355,60
SCC-30CR-0SLF	2070,74	12,71	14986,33	16877,22	23641,03
SCC-30CR-5SLF	2057,35	15,35	15750,67	18547,37	25018,15

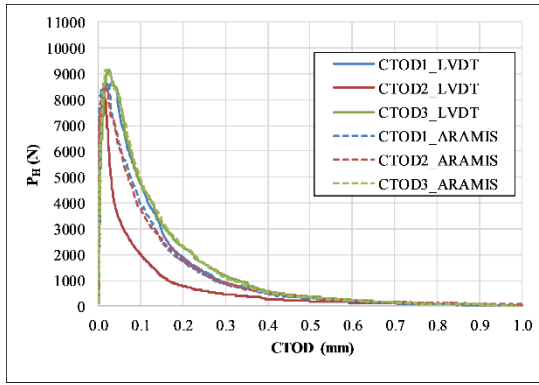


Slika 5.8 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti

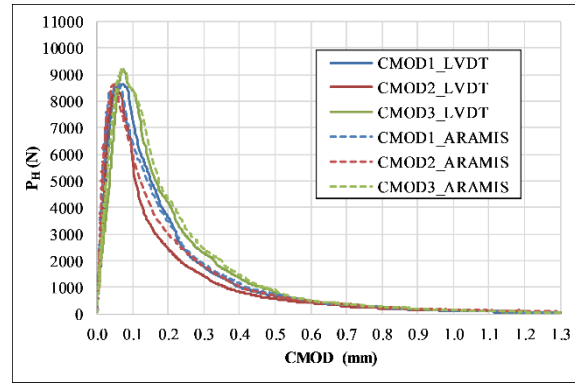
Može se zaključiti da su procijenjene vrijednosti modula elastičnosti u relativno dobroj korelaciji s eksperimentalnim vrijednostima modula elastičnosti samozbijajućeg betona s gumom, ali i da korelacija ovisi o postotku zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom. Pri udjelu gume do 15 % procijenjene vrijednosti modula elastičnosti definirane u Eurokodu 2 [168] bolje koreliraju s eksperimentalnim vrijednostima od procijenjenih vrijednosti dobivenih izrazom danim u [162]. Pri udjelu gume većem od 15 % slučaj je obratan. Najmanje odstupanje eksperimentalnih vrijednosti od obje procijenjene vrijednosti modula elastičnosti u iznosu do 11 % vidljivo je u slučaju mješavina SCC-15CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Dodavanje silicijske prašine ne utječe značajno na promjene u vidu uočenih odstupanja. Treba naglasiti da su obje jednadžbe za procjenu razvijene za običan beton te da usporedba prikazana u ovome poglavlju ukazuje na potencijalnu mogućnost njihovog korištenja za preliminarno predviđanje vrijednosti modula elastičnosti samozbijajućeg betona s recikliranom gumom uzimajući u obzir raspon vrijednosti dobiven eksperimentalno.

5.3.2 Odnos P_H -CMOD i P_H -CTOD

Slike 5.9 – 5.22 prikazuju odnos P_H -CMOD i P_H -CTOD za svih 14 mješavina samozbijajućeg betona. Svaki grafički prikaz sadrži maksimalno 6 krivulja, 2 krivulje za svaki od 3 ispitana uzorka jedne mješavine, jednu krivulju dobivenu pomoću rezultata prikupljenih LVDT-om (engl. *Linear Variable Differential Transformer*), a drugu krivulju iz rezultata Aramisa. Prosječne vrijednosti maksimalne horizontalne sile, kritičnog CTOD i kritičnog CMOD dane su u Tablici XX.

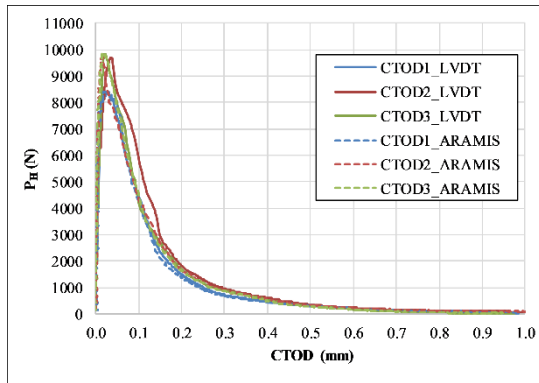


(a)

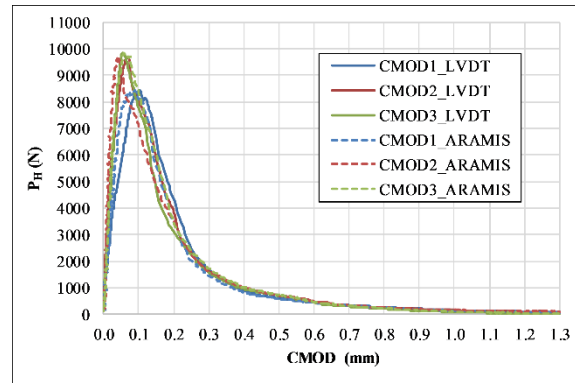


(b)

Slika 5.9 Mješavina SCC-0CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

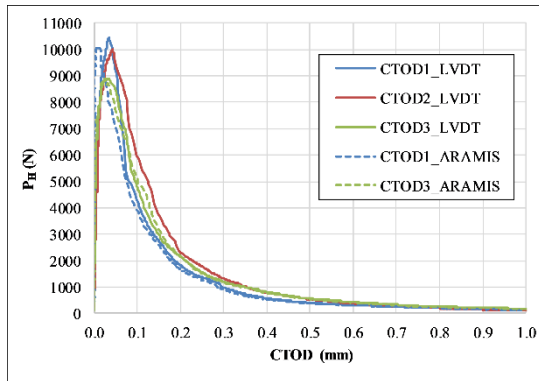


(a)

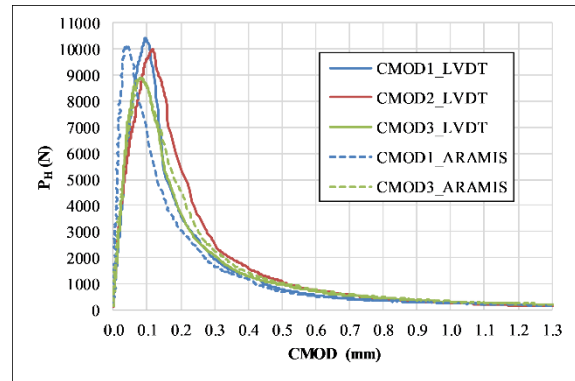


(b)

Slika 5.10 Mješavina SCC-0CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

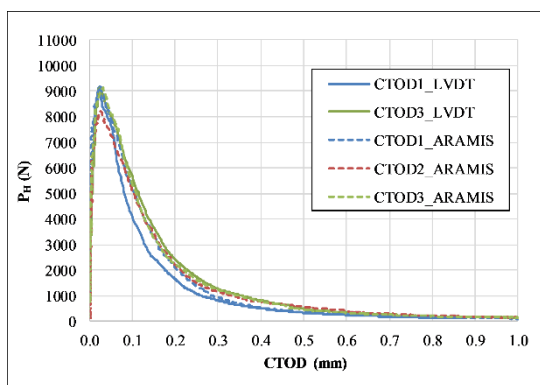


(a)

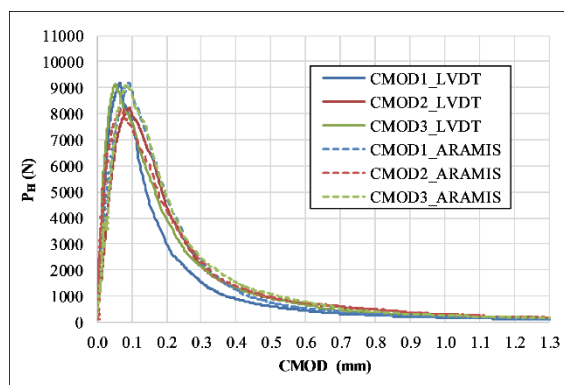


(b)

Slika 5.11 Mješavina SCC-5CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

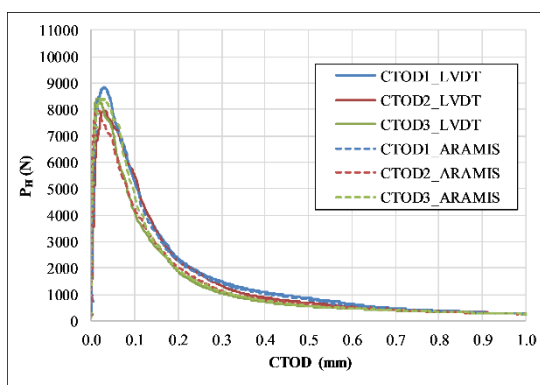


(a)

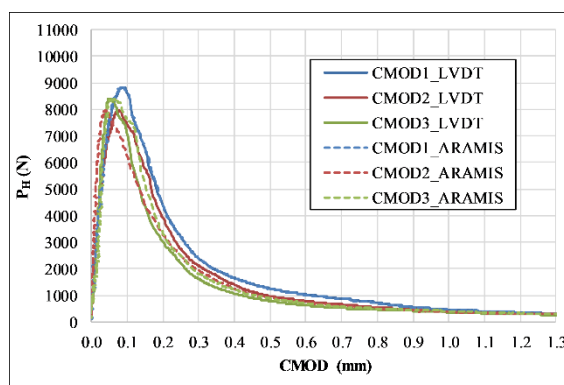


(b)

Slika 5.12 Mješavina SCC-5CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

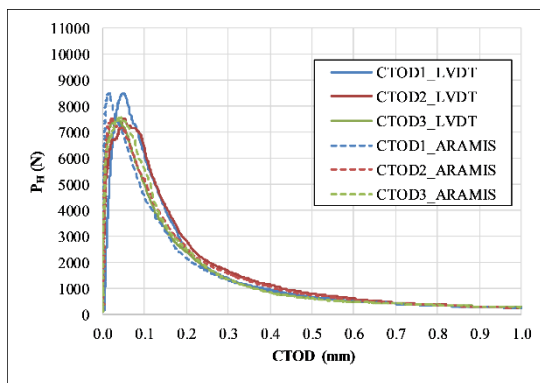


(a)

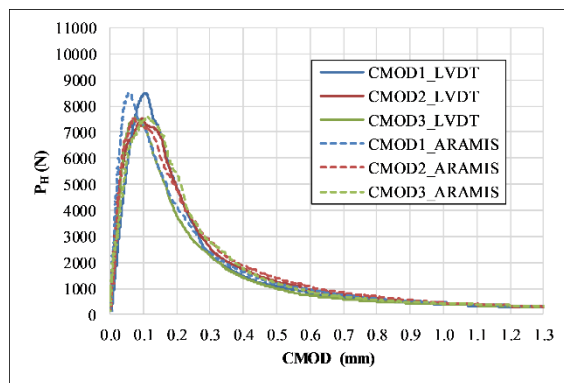


(b)

Slika 5.13 Mješavina SCC-10CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

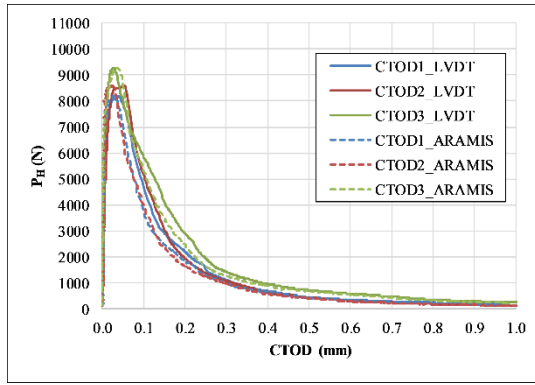


(a)

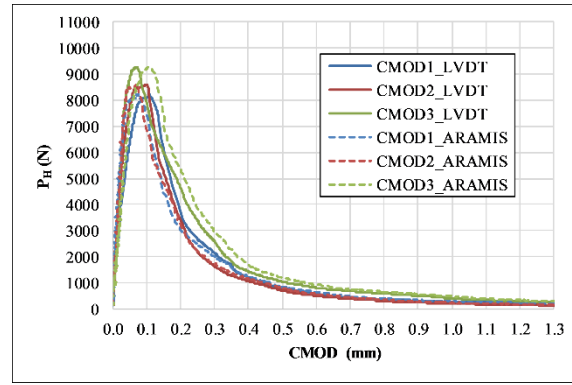


(b)

Slika 5.14 Mješavina SCC-10CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

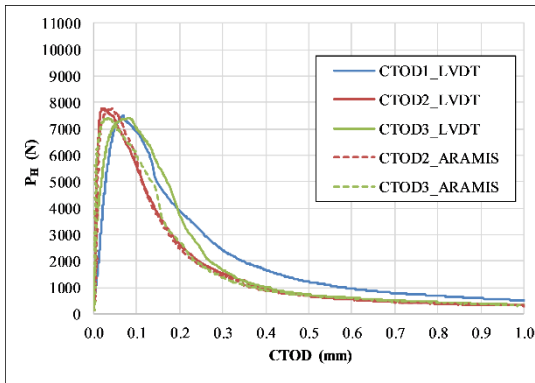


(a)

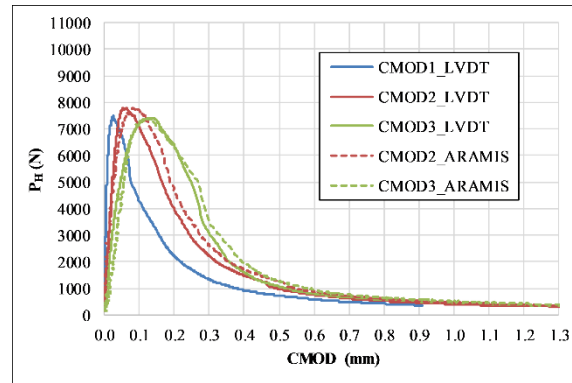


(b)

Slika 5.15 Mješavina SCC-15CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

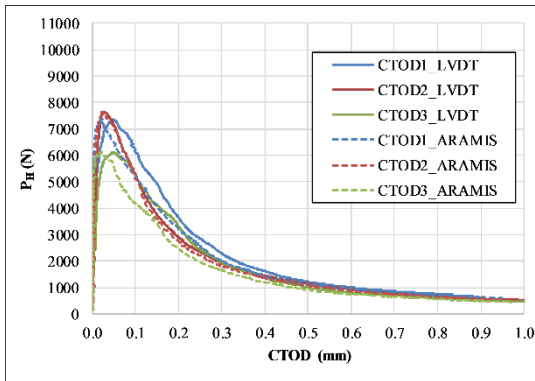


(a)

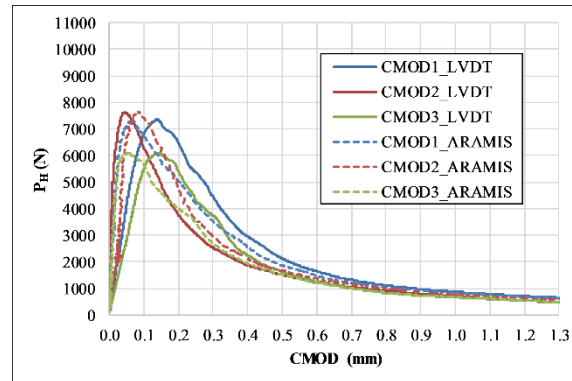


(b)

Slika 5.16 Mješavina SCC-15CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

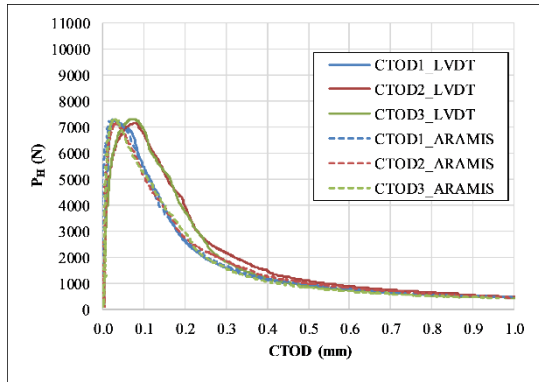


(a)

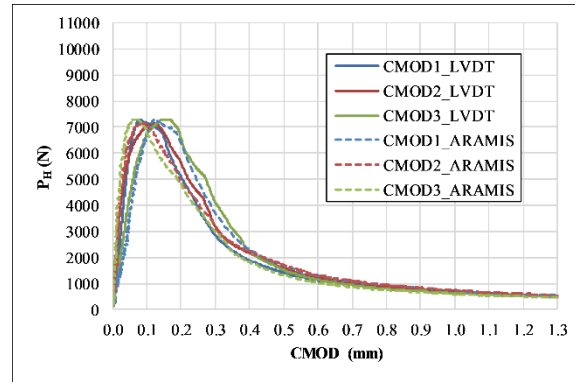


(b)

Slika 5.17 Mješavina SCC-20CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

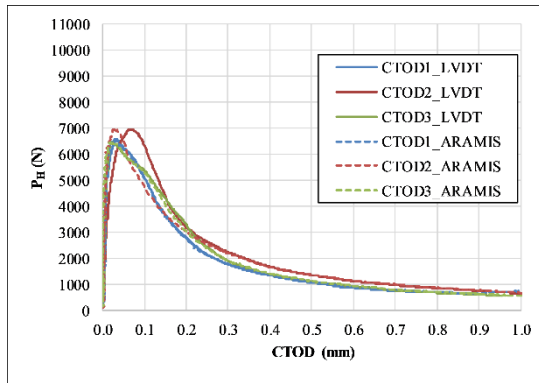


(a)

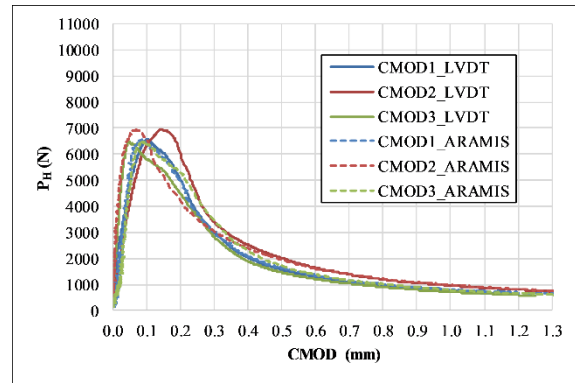


(b)

Slika 5.18 Mješavina SCC-20CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

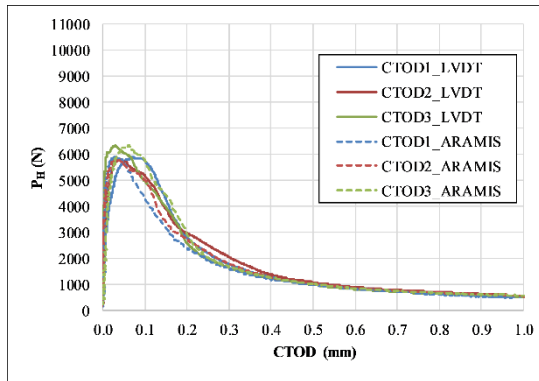


(a)

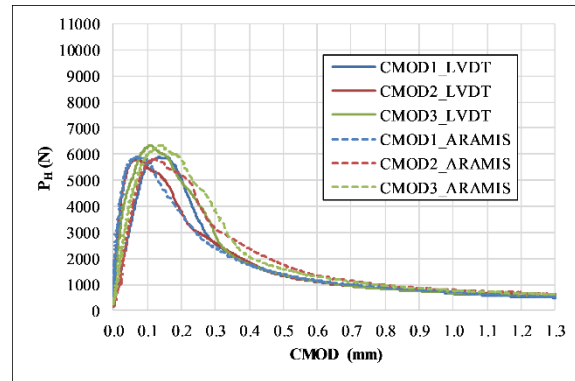


(b)

Slika 5.19 Mješavina SCC-25CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

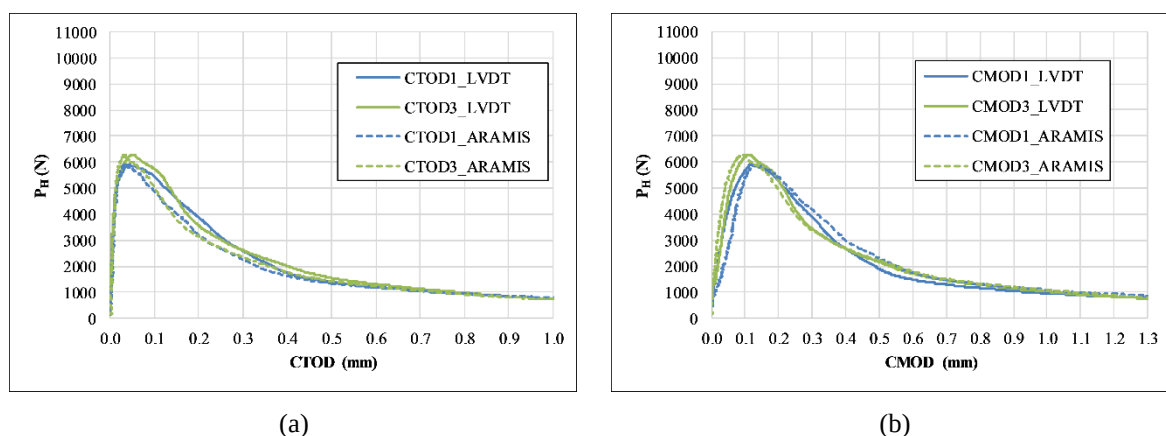


(a)

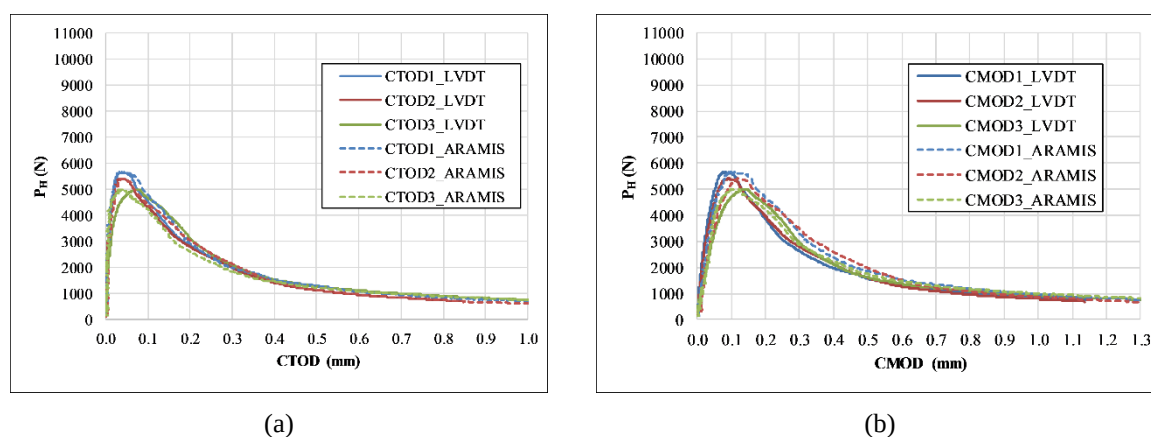


(b)

Slika 5.20 Mješavina SCC-25CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD



Slika 5.21 Mješavina SCC-30CR-0SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD



Slika 5.22 Mješavina SCC-30CR-5SLF: (a) krivulja P_H – CTOD, (b) krivulja P_H -CMOD

Tablica 5.4 Prosječne vrijednosti maksimalne horizontalne sile ($P_{H,max}$) i pripadajuće kritične vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja ($CMOD_c$) i kritične vrijednosti širenja pri vrhu pukotine ($CTOD_c$)

Mješavina	$P_{H,max}$ (N)	$CTOD_c$ (mm)	$CMOD_c$ (mm)	$CTOD_c / CMOD_c$
SCC-0CR-0SLF	8813,05	0,019802	0,060876	0,325286
SCC-0CR-5SLF	9313,05	0,024579	0,069244	0,354963
SCC-5CR-0SLF	9778,22	0,035158	0,097788	0,359535
SCC-5CR-5SLF	8843,95	0,027587	0,077533	0,355813
SCC-10CR-0SLF	8393,33	0,024950	0,068439	0,364567
SCC-10CR-5SLF	7861,57	0,035810	0,087481	0,409343
SCC-15CR-0SLF	8687,82	0,038386	0,088251	0,434961
SCC-15CR-5SLF	7569,12	0,052320	0,076847	0,680837
SCC-20CR-0SLF	7022,47	0,032167	0,089237	0,360465
SCC-20CR-5SLF	7244,19	0,046648	0,110153	0,423486
SCC-25CR-0SLF	6661,47	0,032438	0,088803	0,365278
SCC-25CR-5SLF	6002,93	0,044917	0,108063	0,415654
SCC-30CR-0SLF	6094,29	0,040254	0,113691	0,354066
SCC-30CR-5SLF	5344,55	0,043142	0,106061	0,406766

Iz rezultata ispitivanja danih na [Slikama 5.9 – 5.22](#) i u [Tablici 5.4](#) može se zaključiti da su vrijednosti maksimalnih horizontalnih sila ($P_{H,max}$) uzoraka betonskih mješavina SCC-0CR-5SLF, SCC-5CR-0SLF i SCC-5CR-5SLF veće od vrijednosti maksimalne horizontalne sile referentne mješavine za 5,7; 11 i 0,4%. Sve ostale vrijednosti $P_{H,max}$ manje su od vrijednosti $P_{H,max}$ referentne mješavine. Najizraženije smanjenje vidljivo je kod 25 %-tne i 30 %-tne zamjene prirodnog agregata gumom, gdje je zabilježeno smanjenje od 30 % vrijednosti $P_{H,max}$ referentne mješavine. Ono što je zanimljivo jest činjenica da je smanjenje veće kod mješavina koje sadrže recikliranu gumu i silicijsku prašinu u usporedbi s rezultatima koji su dobiveni kod mješavina gdje je korištena samo reciklirana guma. Suprotno navedenom trendu pada vrijednosti $P_{H,max}$ vrijednosti $CMOD_c$ i $CTOD_c$ povećavaju se porastom postotka zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom. Uz to, dobivene su i veće vrijednosti $CMOD_c$ i $CTOD_c$ kod mješavina koje sadrže recikliranu gumu i silicijsku prašinu u usporedbi s mješavinama koje sadrže samo recikliranu gumu. U usporedbi s referentnom mješavinom povećanje vrijednosti $CMOD_c$ i $CTOD_c$ iznosi 164,2 % za mješavinu SCC-30CR-0SLF. Može se zaključiti da reciklirana guma s i bez silicijske prašine doprinosi povećanju deformabilnosti i vlačne otpornosti samozbijajućeg betona. Takvo ponašanje betona može biti objašnjeno ponašanjem gume kao materijala koji apsorbira energiju i ima veću fleksibilnost od prirodnog agregata koji je manje elastičan materijal od gume, dovodeći do mogućnosti pojave većih plastičnih deformacija materijala. Nadalje, nagibi krivulja prije i poslije maksimalnog opterećenja smanjuju se povećanjem postotnog udjela reciklirane gume u betonu, a prosječni omjer $CTOD_c/CMOD_c$ svih ispitanih mješavina približno je jednak 0,4 te se može uzeti kao konstanta svih ispitanih mješavina samozbijajućeg betona.

5.3.3 Inicijalna sila loma ($P_{H,ini}$)

Inicijalna sila loma ($P_{H,ini}$) određena je dvjema različitim metodama, grafičkom metodom (Metoda (a)) i eksperimentalnom metodom (Metoda (b)). Nakon temeljite analize razmatranih grafičkih metoda odlučeno je da je najprikladnija metoda s procijenjenom širinom pojasa pogreške od 2 μm i nagibom tangente definiranim linearnom regresijom dijela P_H - $CMOD$ krivulje do $0,8P_{max}$. Odabrana grafička metoda prihvaćena je jer je dala vrijednosti najbliže onima utvrđenim eksperimentalno. Rezultati ispitivanja navedeni su u [Tablici 5.5](#) kao omjeri $P_{H,ini} / P_{H,max}$ za obje metode.

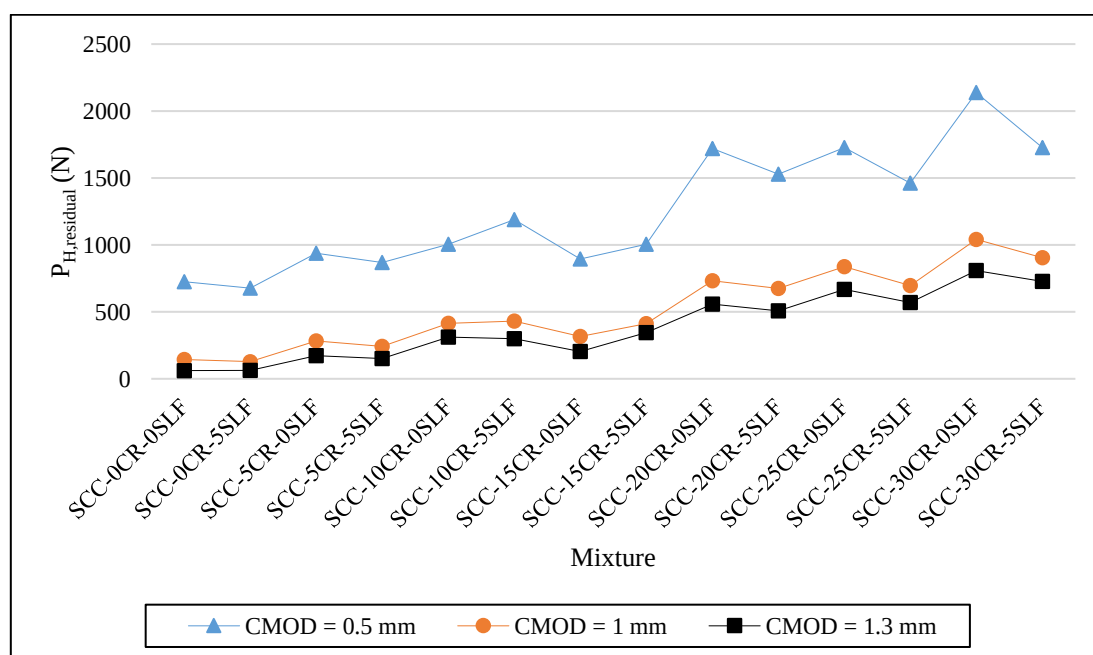
Usporedbom rezultata grafičke i eksperimentalne metode određivanja $P_{H,ini}$ može se donijeti generalni zaključak o omjeru $P_{H,ini} / P_{H,max}$. U oba slučaja prosječna vrijednost odnosa $P_{H,ini} / P_{H,max}$ iznosi 0,81 i 0,84, što ukazuje na činjenicu da inicijalna sila loma ima vrijednost od oko 81 % - 84 % vrijednosti maksimalne sile loma. Za odabranu grafičku metodu vrijednosti inicijalne sile loma variraju između $0,7 P_{H,max}$ i $0,87 P_{H,max}$, dok kod eksperimentalne metode vrijednosti inicijalne sile loma variraju između $0,78 P_{H,max}$ i $0,91 P_{H,max}$. Rezultati grafičke i eksperimentalne metode relativno se dobro slažu s rezultatima prethodnog istraživanja koje su proveli Xie i sur. [105], gdje je prosječni omjer $P_{H,ini} / P_{H,max}$ iznosio 0,77.

Tablica 5.5 Prosječne vrijednosti inicijalne ($P_{H,ini}$) i maksimalne sile loma ($P_{H,max}$) za obje metode određivanja $P_{H,ini}$ te za odabranu grafičku metodu određivanja $P_{H,ini}$

Mješavina	$P_{H,ini}$ (a)	$P_{H,ini}$ (b)	$P_{H,max}$	$P_{H,ini}$ (a) / $P_{H,max}$	$P_{H,ini}$ (b) / $P_{H,max}$
	(N)	(N)	(N)		
SCC-0CR-0SLF	7710,78	7450,06	8813,05	0,86	0,87
SCC-0CR-5SLF	7781,48	7265,37	9313,05	0,84	0,78
SCC-5CR-0SLF	7308,99	7714,65	9778,22	0,87	0,79
SCC-5CR-5SLF	6956,92	7089,10	8843,95	0,79	0,80
SCC-10CR-0SLF	7296,12	7043,18	8393,33	0,87	0,84
SCC-10CR-5SLF	6286,53	6429,49	7861,57	0,79	0,82
SCC-15CR-0SLF	6717,26	7114,51	8687,82	0,78	0,82
SCC-15CR-5SLF	6211,61	6149,36	7569,12	0,82	0,81
SCC-20CR-0SLF	6002,89	5978,75	7022,47	0,85	0,85
SCC-20CR-5SLF	6369,43	5814,83	7244,19	0,88	0,80
SCC-25CR-0SLF	6085,20	5474,80	6661,47	0,91	0,82
SCC-25CR-5SLF	4884,15	4782,56	6002,93	0,81	0,80
SCC-30CR-0SLF	5152,64	4983,21	6094,29	0,85	0,82
SCC-30CR-5SLF	4156,16	3983,85	5344,55	0,78	0,75

5.3.4 Rezidualna horizontalna sila ($P_{H,residual}$)

Plastičnost loma betona može se procijeniti pomoću rezidualne (preostale) horizontalne sile ($P_{H,residual}$) pri različitim CMOD vrijednostima. U ovome istraživanju vrijednosti $P_{H,residual}$ određene su pri CMOD-u od 0,5 mm, 1 mm i 1,3 mm, kako je prikazano u [Tablici 5.6](#) i na [Slici 5.23](#). Dane vrijednosti predstavljaju prosječnu vrijednost 3 ispitana uzorka.



Slika 5.23 Odnos između rezidualne horizontalne sile ($P_{H,residual}$) i definiranih maksimalnih vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja (CMOD)

Tablica 5.6 Odnos između rezidualne horizontalne sile ($P_{H,residual}$) i definiranih maksimalnih vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa horizontalne komponentne opterećenja (CMOD)

Mješavina	$P_{H,residual}$ (N)		
	CMOD = 0,5 mm	CMOD = 1 mm	CMOD = 1,3 mm
SCC-0CR-0SLF	725,73	143,54	61,36
SCC-0CR-5SLF	677,01	128,46	62,46
SCC-5CR-0SLF	938,03	281,85	173,55
SCC-5CR-5SLF	868,07	243,12	151,52
SCC-10CR-0SLF	1004,39	415,05	310,68
SCC-10CR-5SLF	1188,02	431,19	298,49
SCC-15CR-0SLF	894,11	316,78	205,06
SCC-15CR-5SLF	1004,65	411,98	344,25
SCC-20CR-0SLF	1718,85	732,35	557,38
SCC-20CR-5SLF	1528,75	675,82	508,69
SCC-25CR-0SLF	1725,95	837,76	667,40
SCC-25CR-5SLF	1462,19	696,21	569,26
SCC-30CR-0SLF	2137,40	1041,27	808,03
SCC-30CR-5SLF	1726,98	904,20	727,24

Iz prikazanih podataka vidljivo je da vrijednosti $P_{H,residual}$ za sve definirane vrijednosti CMOD-a rastu povećanjem udjela reciklirane gume u samozbijajućem betonu, što ukazuje na izraženije plastično ponašanje betona s gumom u usporedbi s običnim betonom. Reciklirana guma u usporedbi s prirodnim agregatom ima veću fleksibilnost te je sposobna, nakon dosezanja maksimalne sile, na sebe preuzeti dodatna vlačna opterećenja i deformacije prouzrokovane navedenim opterećenjem prije konačnog otkazivanja betona, što je u skladu s početnom pretpostavkom o povećanju kapaciteta deformabilnosti betona s gumom u usporedbi s betonom bez gume, definiranom u [Poglavlju 2](#). Nadalje, pri većem definiranom CMOD-u uzorci samozbijajućeg betona s gumom imaju veće vrijednosti $P_{H,residual}$. Za sve mješavine osim mješavina SCC-10CR-5SLF i SCC-15CR-5SLF vrijednosti $P_{H,residual}$ manje su kada se koristila silicijska prašina, u usporedbi s mješavinama u kojima se ona nije koristila, što još jednom potvrđuje da se betonski uzorci s recikliranom gumom ponašaju plastičnije od uzoraka s gumom i silicijskom prašinom. Pri CMOD = 1,3 mm, vrijednosti $P_{H,residual}$ mješavine SCC-30CR-0SLF veće su 12puta u odnosu na istu vrijednost referentne mješavine. Uz to, usporedbom omjera vrijednosti rezidualne horizontalne sile pri odabranim vrijednostima CMOD-a uočeno je smanjenje omjera $P_{H,residual}$ pri različitim vrijednostima CMOD-a povećanjem postotnog udjela gume u samozbijajućem betonu. Na primjer, omjer $P_{H,residual}$ (CMOD = 0,5 mm) / $P_{H,residual}$ (CMOD = 1,3 mm) za mješavinu SCC-0CR-0SLF iznosi 11,83, dok isti omjer za mješavinu SCC-30CR-0SLF iznosi 2,37, što ukazuje na stabilnije ponašanje materijala u fazi nestabilnog širenja pukotina i nestabilnog loma. Stoga se može zaključiti da vrijednosti $P_{H,residual}$ i omjeri $P_{H,residual}$ pri različitim vrijednostima CMOD-a ukazuju na potencijal

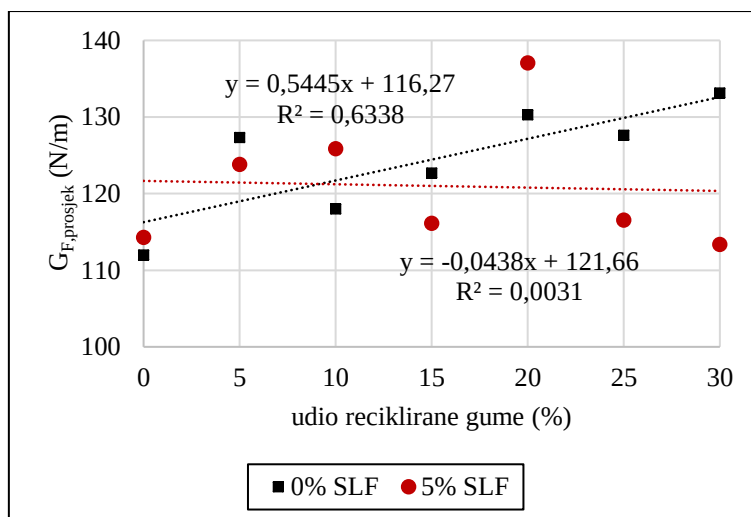
samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u pogledu povoljnijeg plastičnog ponašanja i apsorpcije opterećenja u trećoj fazi loma, tj. u fazi nestabilnog širenja pukotine.

5.3.5 Energija loma (G_F)

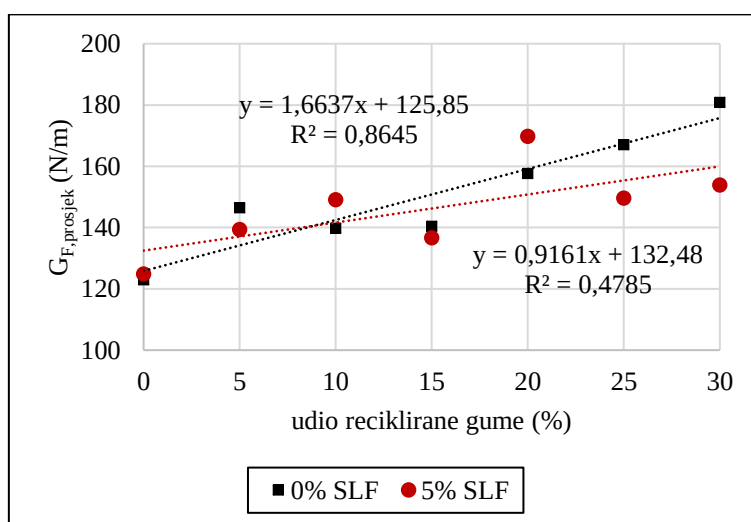
Budući da se energija loma (G_F) obično koristi za opisivanje mogućnosti disipacije energije, potrebno je definirati maksimalni CMOD do kojega će se promatrati energija loma. Do danas, nekoliko se autora bavilo proučavanjem energije loma betona s gumom. Odabrani maksimalni CMOD do kojega je promatrana energija loma bio je 1 [104] i 1,5 mm [15], [59], [67]. U ovom istraživanju za maksimalni CMOD odabrana je vrijednost od 1,3 mm, ali da bi se što kvalitetnije procijenio utjecaj reciklirane gume na promatranu veličinu, dodatno su uvedene još dvije vrijednosti CMOD-a od 0,5 i 1 mm. Vrijednosti energije loma prikazane su u [Tablici 5.7](#) i na [Slikama 5.24](#), [5.25](#) i [5.26](#), kao prosječne vrijednosti ($G_{F, \text{prosijek}}$) od tri uzorka iste mješavine samozbijajućeg betona.

Tablica 5.7 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona

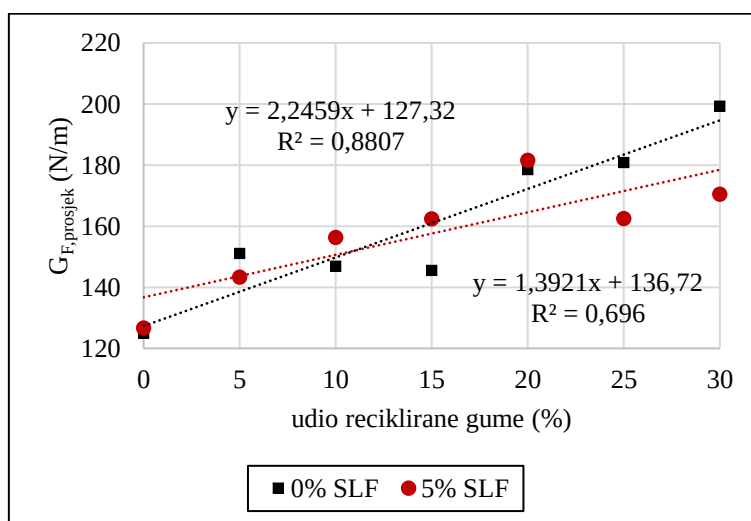
Mješavina	$G_{F, \text{prosijek}}$ (N/m)		
	CMOD = 0,5 mm	CMOD = 1 mm	CMOD = 1,3 mm
SCC-0CR-0SLF	112,01	123,00	124,94
SCC-0CR-5SLF	114,29	124,86	126,69
SCC-5CR-0SLF	127,34	146,52	151,04
SCC-5CR-5SLF	123,82	139,47	143,32
SCC-10CR-0SLF	117,99	139,82	146,84
SCC-10CR-5SLF	125,87	149,13	156,30
SCC-15CR-0SLF	122,70	140,45	145,51
SCC-15CR-5SLF	116,11	136,71	162,39
SCC-20CR-0SLF	130,28	157,75	178,55
SCC-20CR-5SLF	137,05	169,79	181,61
SCC-25CR-0SLF	127,63	167,15	180,88
SCC-25CR-5SLF	116,53	149,68	162,50
SCC-30CR-0SLF	133,13	180,92	199,30
SCC-30CR-5SLF	113,38	153,92	170,43



Slika 5.24 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 0,5 mm



Slika 5.25 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 1 mm



Slika 5.26 Energija loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona kada je CMOD = 1,3 mm

Povećanjem maksimalne promatrane vrijednosti CMOD-a vrijednost energije loma značajno se povećava. Relativni porast vrijednosti energije loma (G_F) kreće se između 2 % i 22 %, 2 % i 47 % te 1 % i 60 % za slučajeve kada su vrijednosti CMOD-a 0,5 mm, 1 mm i 1,3 mm. Za uzorke samozbijajućeg betona SCC-30CR-0SLF, pri CMOD-u od 1 mm, relativni porast vrijednosti energije loma iznosio je 36 %, u usporedbi s vrijednostima energije loma kada je CMOD = 0,5 mm. Sa [Slika 5.24](#), [5.25](#) i [5.26](#) može se zaključiti da je trend povećanja vrijednosti energije loma izraženiji kod mješavina samozbijajućeg betona bez silicijske prašine za sve tri promatrane vrijednosti CMOD-a. Također, primjećuje se da je taj trend izraženiji ako je usvojeni CMOD veći, tj. 1,3 mm, što je naznačeno većim nagibom linearno-regresijskog pravca na [Slici 5.26](#). Dodavanje reciklirane gume i kombinacije reciklirane gume i silicijske prašine značajno povećava vrijednost energije loma do 60 %. Većom razinom zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom veće je i povećanje vrijednosti energije loma, što je naočitije pri 30 %-tnom udjelu gume u betonu. Međutim, dodavanje samo silicijske prašine bez reciklirane gume nije doprinijelo povećanju energije loma, nego samo većem rasipanju rezultata kao što i prikazuje vrijednost koeficijenta determinacije (R^2) na [Slikama 5.24](#), [5.25](#) i [5.26](#), što je još jedan pokazatelj koliko zapravo guma pozitivno utječe na povećanu deformabilnost betona, stabilnost rasta pukotine i povećanu mogućnost rasipanja energije.

5.3.6 Žilavost loma (K_{Ic})

Za mjerenje žilavosti loma samozbijajućeg betona s recikliranom gumom potrebno je provesti stabilno ispitivanje loma ne samo prije, nego i nakon dosezanja maksimalne sile. Tijekom procesa loma samozbijajući beton s recikliranom gumom ponaša se kao kvazi-krhki materijal, a kako je već i ranije navedeno, proces loma sastoji se od tri faze: stvaranja pukotine (pukotina se nije počela širiti), stabilnog širenja pukotine i nestabilnog širenja pukotine te na kraju loma uzorka [156]. Za opisivanje širenja pukotine samozbijajućeg betona s gumom u ovom je istraživanju korišten DKFM model, a rezultati ispitivanja prikazani su u [Tablici 5.8](#) i na [Slikama 5.27](#), [5.28](#) i [5.29](#). Sve vrijednosti u [Tablici 5.8](#) prosječne su vrijednosti ispitivanja tri uzorka iz iste mješavine samozbijajućeg betona.

Povećavanjem udjela gume u betonu povećava se i kritična duljina pukotine (a_c) pri maksimalnoj sili. Međutim, povećanjem udjela gume u betonu vidljiv je trend smanjenja inicijalne ($K_{Ic,ini}$) i nestabilne žilavosti loma ($K_{Ic,un}$). Što se tiče inicijalne žilavosti loma, trend smanjenja bio je nešto izraženiji u mješavinama samozbijajućeg betona bez silicijske prašine. S druge strane, silicijska prašina nije imala utjecaja na smanjenje nestabilne žilavosti loma. Iz navedenog može se zaključiti da silicijska prašina ne može neutralizirati negativan utjecaj reciklirane gume na smanjenje žilavosti loma samozbijajućeg betona. Ipak, bitno je napomenuti da utjecaj reciklirane gume na žilavost loma nije ujednačen.

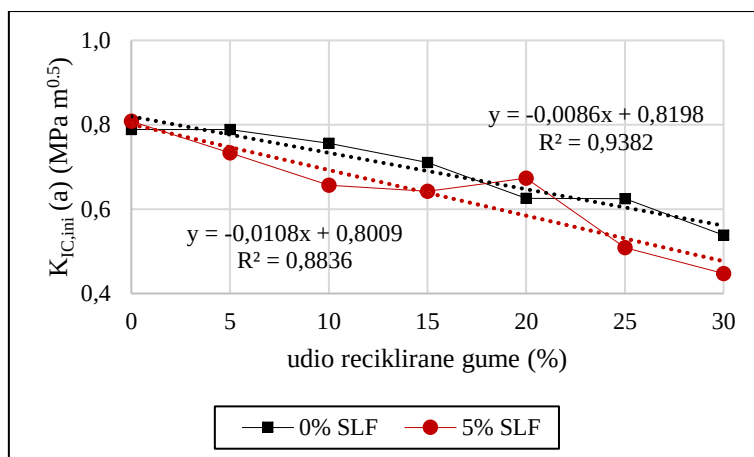
Tablica 5.8 Parametri mehanike loma (DKFM model) – ispitivanje samozbijajućeg betona s recikliranom gumom metodom cijepanja klinom

Mješavina	P _{H,ini} (a)	P _{H,ini} (b)	P _{H,max}	B	W	a ₀	Δa	a _c	α	V ₁	K _{IC,ini}	K _{IC,ini}	K _{IC,un}
	(a)	(b)								(α)	(a)	(b)	
	(N)			(mm)						(MPa m ^{0.5})			
SCC-0CR-0SLF	7710,7	7450,1	8813,1	150,6	147,0	48,7	26,7	75,4	0,51	40,01	0,79	0,80	1,52
SCC-0CR-5SLF	7781,4	7265,4	9313,1	151,0	147,8	49,3	26,7	76,0	0,51	42,99	0,81	0,75	1,64
SCC-5CR-0SLF	7308,9	7714,7	9778,2	150,8	148,2	50,3	33,5	83,8	0,57	52,49	0,79	0,80	2,00
SCC-5CR-5SLF	6956,9	7089,1	8844,0	150,6	148,9	50,4	30,7	81,1	0,54	48,00	0,73	0,75	1,70
SCC-10CR-0SLF	7296,1	7043,2	8393,3	151,0	146,9	48,6	26,2	74,8	0,51	40,33	0,76	0,60	1,46
SCC-10CR-5SLF	6286,5	6429,5	7861,6	151,1	148,3	49,8	33,9	83,8	0,56	54,03	0,66	0,67	1,62
SCC-15CR-0SLF	6717,2	7114,5	8687,8	150,5	147,3	49,8	27,6	77,5	0,53	43,39	0,71	0,75	1,57
SCC-15CR-5SLF	6211,6	6149,4	7569,1	151,2	147,7	49,4	22,8	72,2	0,49	44,13	0,64	0,64	1,35
SCC-20CR-0SLF	6002,9	5978,8	7022,5	150,9	148,0	49,5	21,7	71,1	0,48	40,36	0,63	0,62	1,17
SCC-20CR-5SLF	6369,4	5814,8	7244,2	150,8	148,9	50,7	34,3	85,0	0,57	56,65	0,67	0,62	1,55
SCC-25CR-0SLF	6085,2	5474,8	6661,5	150,6	145,6	47,3	20,4	67,6	0,46	33,03	0,63	0,56	1,02
SCC-25CR-5SLF	4884,2	4782,6	6002,9	150,8	147,9	49,3	31,9	81,2	0,55	50,14	0,51	0,50	1,19
SCC-30CR-0SLF	5152,6	4983,2	6094,3	150,8	147,8	49,4	28,0	77,4	0,52	42,29	0,54	0,52	1,08
SCC-30CR-5SLF	4156,2	3983,9	5344,6	150,9	150,0	52,5	28,8	81,2	0,54	47,64	0,45	0,43	1,01

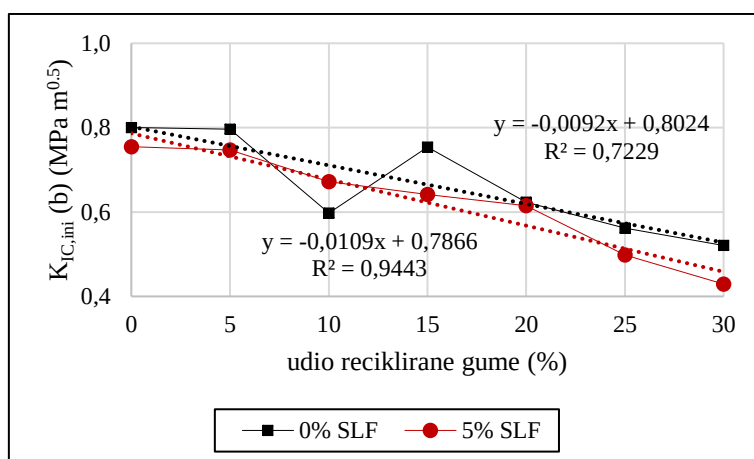
Vrijednost $K_{Ic,ini}$ za mješavinu samozbijajućeg betona SCC-5CR-0SLF gotovo je ista kao i $K_{Ic,ini}$ referentne mješavine SCC-0CR-0SLF, dok je vrijednost $K_{Ic,un}$ za mješavinu SCC-5CR-0SLF povećana za 31,35 %. Poboljšanje $K_{Ic,un}$ ipak je nešto manje kod mješavine SCC-5CR-5SLF i iznosi, u usporedbi s referentnom mješavinom, 3,7 %. Postotnim udjelom reciklirane gume u samozbijajućem betonu većim od 15 % utjecaj reciklirane gume na žilavost loma postaje negativan, a otpornost se prema krhkom lomu smanjuje.

Uspoređujući rezultate dviju metoda za određivanje inicijalne žilavosti loma, može se zaključiti da se izračunate vrijednosti pomoću eksperimentalne i grafičke metode poprilično podudaraju, tj. da obje metode daju slične rezultate, stoga se obje metode mogu koristiti za određivanje $K_{Ic,ini}$ bez dodatnih smjernica.

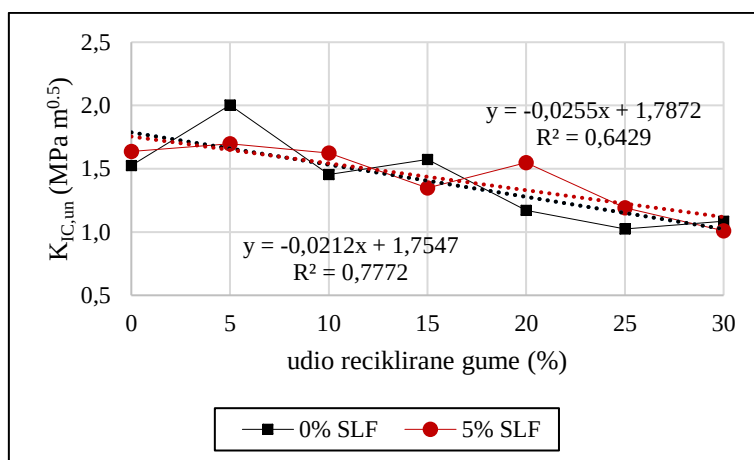
Omjer $K_{Ic,ini}/K_{Ic,un}$ uspoređen je s istim omjerom koji su u svojem istraživanju dobili Xie i sur. [105]. Omjer koji su dobili Xie i sur. [105] bio je 0,49, dok su rezultati ispitivanja ovoga istraživanja dali omjere 0,5 i 0,48, ovisno o metodi koja je korištena za određivanje inicijalne horizontalne sile loma ($P_{H,ini}$). Može se zaključiti da se rezultati ispitivanja dobro slažu s prethodnim istraživanjem unatoč tomu što su Xie i sur. [105] ispitivali inicijalnu i nestabilnu žilavost loma na običnom, a ne na samozbijajućem betonu s gumom.



Slika 5.27 Inicijalna žilavost loma ($K_{IC,ini}$ (a)) ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona: grafička metoda određivanja inicijalne horizontalne sile loma - metoda (a)



Slika 5.28 Inicijalna žilavost loma ($K_{IC,ini}$ (b)) ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona: eksperimentalna metoda određivanja inicijalne horizontalne sile loma - metoda (b)



Slika 5.29 Nestabilna žilavost loma ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona

5.3.7 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV)

Ispitivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) provedeno je u skladu s normom HRN EN 12504-4:2021 [167], a rezultati su prikazani u [Tablici 5.9](#). Prema američkoj normi ASTM C597 [166] veća brzina prolaska ultrazvučnog impulsa predstavlja beton bolje kvalitete. Srednja vrijednost brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke referentne mješavine SCC-0CR-0SLF poprima najveću vrijednosti, dok za uzorke mješavine SCC-30CR-0SLF poprima najmanju vrijednost. Vrijednost brzine prolaska ultrazvučnog impulsa smanjuje se povećanjem udjela gume u samozbijajućem betonu. Međutim, brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke betonskih mješavina do 15 %-tnog udjela gume i 5 %-tnog udjela silicijske prašine poprimaju vrijednosti iznad 4500 m/s, što prema ASTM C597 [166] ukazuje na betone visoke kvalitete. Nadalje, brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke svih mješavina su iznad 3500 m/s, što ukazuje na betone *dobre* kvalitete.

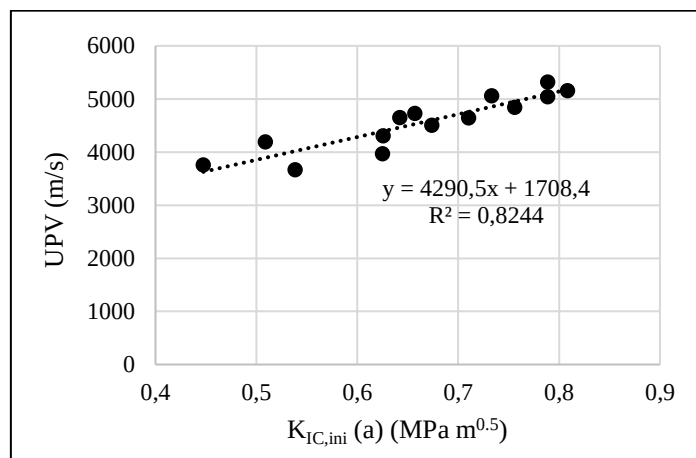
Tablica 5.9 Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) kroz uzorke

Mješavina	B _{prosje} (mm)	t _{prosje} (μs)	Gustoća (kg/m ³)	UPV (m/s)
SCC-0CR-0SLF	150,57	28,32	2424,89	5317,25
SCC-0CR-5SLF	151,03	29,31	2391,46	5153,74
SCC-5CR-0SLF	150,77	29,91	2378,23	5041,43
SCC-5CR-5SLF	150,57	29,74	2318,86	5062,01
SCC-10CR-0SLF	151,03	31,19	2329,60	4841,67
SCC-10CR-5SLF	151,07	31,96	2302,14	4727,40
SCC-15CR-0SLF	150,50	32,43	2305,52	4640,29
SCC-15CR-5SLF	151,17	32,51	2250,54	4649,69
SCC-20CR-0SLF	150,87	35,02	2212,76	4308,42
SCC-20CR-5SLF	150,80	33,49	2189,49	4502,99
SCC-25CR-0SLF	150,60	37,94	2151,96	3969,54
SCC-25CR-5SLF	150,77	35,99	2105,02	4188,61
SCC-30CR-0SLF	150,70	41,07	2070,74	3669,15
SCC-30CR-5SLF	150,90	40,14	2057,35	3759,45
LEGENDA:				
t _{prosje} – vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonski uzorak (prosje tri mjerenja)				
B _{prosje} – duljina/širina betonskog uzorka (prosje tri mjerenja)				

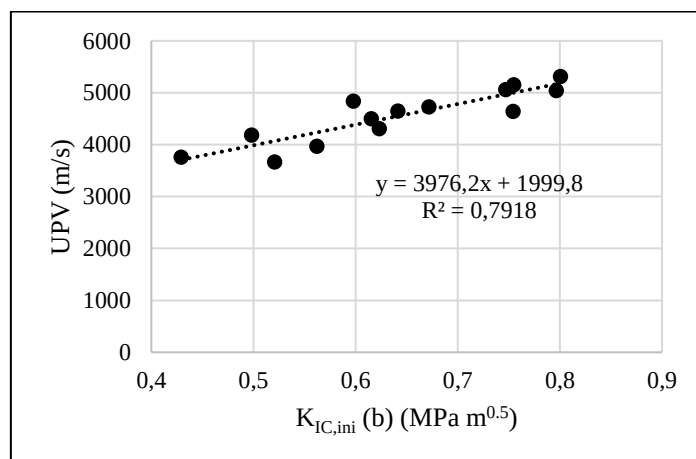
U nastavku se pokušalo povezati izmjerene vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa s parametrima mehanike loma. Odnosi između inicijalne žilavosti loma ($K_{Ic,ini}$), nestabilne žilavosti loma ($K_{Ic,un}$) i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) prikazani su na [Slikama 5.30](#), [5.31](#) i [5.32](#).

[Slike 5.30](#), [5.31](#) i [5.32](#) pokazuju da je linearnom regresijskom statističkom analizom između inicijalne žilavosti loma, nestabilne žilavosti loma i brzine prolaska ultrazvučnog impulsa dobiven koeficijent determinacije R^2 iznad 0,7. Rezultati također ukazuju na mogućnost korištenja vrijednosti UPV u praktične svrhe za predviđanje parametara mehanike loma. Metoda mjerenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa nerazorna je metoda ispitivanja betona i može se provesti *in situ*, što je u

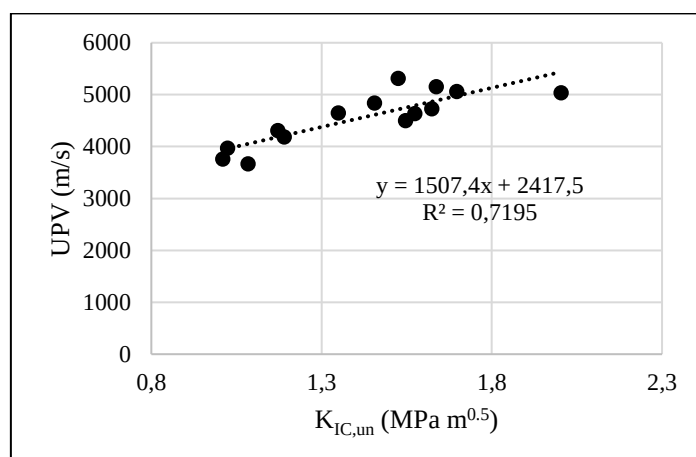
usporedbi s metodom cijepanja betonskih uzoraka klinom zasigurno jednostavnije, brže i ekonomičnije ako se želi utvrditi ponašanje betona pri lomu.



Slika 5.30 Korelacija između $K_{IC,ini} (a)$ i UPV



Slika 5.31 Korelacija između $K_{IC,ini} (b)$ i UPV



Slika 5.32 Korelacija između $K_{IC,un}$ i UPV

5.4 Zaključci o ispitivanju

U ovom istraživanju ispitana su svojstva samozbijajućeg betona pri lomu s maksimalno 30 %-tnim udjelom reciklirane gume i 5 %-tnim udjelom silicijske prašine. Ponašanje samozbijajućeg betona pri lomu i ispitivanje parametara mehanike loma određeno je metodom cijepanja uzoraka klinom (*engl. wedge splitting test method*) kao alternative metodi savijanja (*engl. three point bending test method*), a postupak loma opisan je modelom dvostruke K-žilavosti (*engl. double K-fracture model, DKFM*). Nadalje, ispitane su energija loma (G_F) i brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke (UPV). Iz [Poglavlja 5](#) mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- Rezultati eksperimentalnih ispitivanja u skladu su s vrijednostima dobivenima pomoću modela za procjenu modula elastičnosti predloženima u literaturi [162], [168] te se navedeni modeli mogu koristiti za preliminarne studije i zaključke o utjecaju određenog postotka zamjene gume na modul elastičnosti samozbijajućeg betona.
- Vrijednost vršne, tj. maksimalne horizontalne sile smanjuje se povećanjem udjela gume u betonu, dok je obratno za vrijednosti širenja pukotine na mjestu unosa opterećenja (CMOD) i širenja pri vrhu pukotine (CTOD).
- Najbolja aproksimacija za određivanje vrijednosti inicijalne sile loma ($P_{H,ini}$) dobivena je korištenjem širine pojasa pogreške od 2 μm i nagiba tangente definiranim linearnom regresijom do 80 % $P_{H,max}$.
- Prosječna vrijednost omjera $P_{H,ini} / P_{H,max}$ približno je jednaka 0,8, što znači da inicijalna sila loma poprima vrijednost od približno 80 % vrijednosti maksimalne sile loma.
- Vrijednost rezidualne horizontalne sile ($P_{H,residual}$) raste povećanjem udjela gume u samozbijajućem betonu, što ukazuje na plastičnije ponašanje betona s gumom u usporedbi s betonom bez gume.
- Dodavanjem reciklirane gume u beton energija je loma (G_F) povećana do 60 % u odnosu na vrijednost energije loma referentne mješavine samozbijajućeg betona.
- Trend smanjenja inicijalne žilavosti loma ($K_{Ic,ini}$) bio je nešto izraženiji u mješavinama bez silicijske prašine, dok na smanjenje nestabilne žilavosti loma ($K_{Ic,un}$) nije utjecalo dodavanje silicijske prašine u samozbijajući beton.
- Udjelom reciklirane gume u samozbijajućem betonu većim od 15 % utjecaj reciklirane gume na žilavost loma postaje negativan, a otpornost prema krhkom lomu smanjuje se, stoga se u pogledu poželjnih svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom pri lomu ne preporuča korištenje većeg udjela gume od 15 %.
- Brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke betonskih mješavina do 15 %-tnog udjela gume i 5 %-tnog udjela silicijske prašine poprimaju vrijednosti iznad 4500 m/s, što prema ASTM C597 [166] ukazuje na betone visoke kvalitete.

- Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa mogu se koristiti za praktičnu primjenu predviđanja žilavosti loma samozbijajućeg betona s gumom.

Generalno, maksimalna horizontalna sila loma ($P_{H,max}$) samozbijajućeg betona s recikliranom gumom smanjena je povećavanjem udjela gume u betonu, dok je kapacitet deformabilnosti povećan. Uz to, kapacitet disipacije energije (energija loma) povećan je za sve mješavine samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Nagibi uzlazne i silazne krivulje $P_H - CMOD$ i $P_H - CTOD$ smanjeni su ukazujući na stabilniji rast pukotine u usporedbi s uzorcima referentne mješavine, dovodeći do smanjene krtosti betona. Nerazorno ispitivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa može se koristiti za preliminarno određivanje žilavosti loma samozbijajućeg betona s recikliranom gumom.

6 EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM NA RAZINI MATERIJALA

6.1 Cilj ispitivanja

Nakon provedenih preliminarnih ispitivanja te odabira optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom odlučeno je da će se dodatno provesti eksperimentalna ispitivanja odabranih optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala. Budući da je u [Poglavlju 4](#) donesen generalni zaključak o tome da se do 15 %-tnog udjela reciklirane gume i 5 %-tnog udjela silicijske prašine dobivaju zahtijevana svojstva samozbijajućeg betona u oba stanja, svježem i očvrslom, pogodna za ugradnju ovakvog betona u konstrukcijske elemente s gusto raspoređenom armaturom, u namjeri nastavka eksperimentalnoga ispitivanja odabrane su tri mješavine: referentna mješavina SCC-0CR-0SLF te mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Rezultati ispitivanja navedenih mješavina u svježem stanju te rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava, tj. tlačne čvrstoće i modula elastičnosti, preuzeti su iz [Poglavlja 4](#), dok su u ovome poglavlju provedena dodatna ispitivanja na razini materijala koja su obuhvatila ispitivanje svojstava trajnosti, termičkih svojstava te ispitivanje mikrostrukture očvrslulog samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i vezu na sučelju cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa, sve s ciljem boljeg razumijevanja ponašanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala. U nastavku su prikazani korišteni materijali i metode ispitivanja, rezultati eksperimentalnog ispitivanja te bitni zaključci i smjernice vezani za upotrebu samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u nosivoj armiranobetonskoj konstrukciji, s posebnim naglaskom na odabir razreda izloženosti okoliša, sigurnost korištenja takvog materijala u konstrukcijskim elementima, te dodatnim zahtjevima za uporabljivost i trajnost.

6.2 Materijali i metode ispitivanja

6.2.1 Materijali

Materijali korišteni za ispitivanje identični su materijalima korištenim prilikom odabira optimalnih mješavina samozbijajućeg betona u [Poglavlju 4](#) te prilikom ispitivanja parametara mehanike loma samozbijajućeg betona u [Poglavlju 5](#). Korišten je portlandski cement CEM I 42,5R iz obližnje tvornice u Našicama (HRN EN 197-1:2012 [118]). Silicijska prašina (Pocking, Njemačka) korištena je kao djelomična zamjena cementu (HRN EN 13263-1:2009 [119]). Vodovezivni omjer (v/b) bio je jednak za sve mješavine samozbijajućeg betona i iznosio je 0,4. Kako bi se povećala otpornost segregaciji, korišten je kemijski dodatak za promjenu viskoznosti Premmad Stabilizator X.

Superplastifikator Energy FM 500 korišten je kako bi se postigli zadovoljavajući razredi rasprostiranja slijeganjem, zaobilaženja zapreka i viskoznosti. Oba su kemijska dodatka u skladu s normama HRN EN 934-1:2008 [121] i HRN EN 934-2:2012 [122]. Korišteno je 80 kg/m³ dolomitnog brašna kao punilo u svim mješavinama samozbijajućeg betona. Korištene su 4 frakcije agregata, riječni pijesak (0-2 mm) te drobljeni kamen (0-4, 4-8, 8-16 mm), u skladu s normom HRN EN 12620:2008 [127]. Reciklirana guma (0-3,5 mm), dobivena mehaničkim mljevenjem lokalnih otpadnih guma, korištena je kao zamjenski materijal za prirodni sitni agregat.

6.2.2 Projektiranje sastava betonskih mješavina

Postotak zamjene sitnog agregata iznosio je 0 %, 10 % i 15 % volumena ukupnog agregata. Postotak zamjene cementa silicijskom prašinom iznosio je 0 % i 5 %. Usvojene sastave betonskih mješavina razvili su i prvi puta predstavili Bušić i sur. [128] te se može naći u [Poglavlju 4](#). Izrađene su 3 različite mješavine samozbijajućeg betona prikazane u [Tablici 6.1](#).

Tablica 6.1 Sastav optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom

R.br.	Mješavina	Cement	SLF	Punilo	FA	CA	CR	v/b	SP (%)	VMA (%)
1	SCC-0CR-0SLF	450	0	80	941,61	817,65	0	0,4	1,25	0
3	SCC-10CR-0SLF	450	0	80	765,59	817,65	66,24	0,4	1,25	0,25
11	SCC-15CR-5SLF	427,50	22,5	80	674,46	813,87	98,91	0,4	1,25	0
LEGENDA: SLF – silicijska prašina, FA – sitni agregat, CA – krupni agregat, CR – reciklirana guma, SP – superplastifikator, VMA – dodatak za promjenu viskoznosti										

6.2.3 Metode ispitivanja, priprema i njega uzoraka

Iz [Poglavlja 4](#) usvojene su prethodno ispitane vrijednosti svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju te vrijednosti fizikalno mehaničkih svojstava, tj. tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na savijanje. U ovome su poglavlju ispitana svojstva trajnosti i termička svojstava samozbijajućeg betona s gumom u očvrslom stanju te je dodatno ispitana struktura očvrslulog samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i veza na sučeljku cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. U nastavku su opisane metode ispitivanja, priprema te način njege uzoraka do trenutka njihovog ispitivanja.

6.2.3.1 Plinopropusnost

Ispitivanje plinopropusnosti provodilo se sukladno CemBureau metodi danoj u preporukama RILEM TC 116-PCD [172] i to na propusnost kisika. Ta metoda daje rezultat u obliku koeficijenta plinopropusnosti (K) u vrijednosti 10⁻¹⁴ m² do 10⁻¹⁹ m². Od svake od odabrane tri optimalne mješavine ispitano je 9 valjaka promjera 150 mm i visine 50 mm. Uzorci su dobiveni rezanjem 3 uzorka oblika valjka, promjera 150 i visine 300 mm te su prije početka ispitivanja sušeni na 105 °C do stalne mase. Nakon sušenja podvrgnuti su djelovanju fluida, tj. plina pod određenim tlakovima (50 kPa, 100 kPa,

150 kPa, 200 kPa, 250 kPa i 300 kPa) te se mjerilo vrijeme prolaza mjehurića zraka u poznatim uvjetima okoline (Slika 6.2). Koeficijent plinopropusnosti izračunava se pomoću izraza:

$$K_{1,5} = \frac{2Qp_0H\eta}{A(p^2 - p_a^2)} \quad (6.1)$$

gdje je:

A – poprečna površina betonskog uzorka (m²)

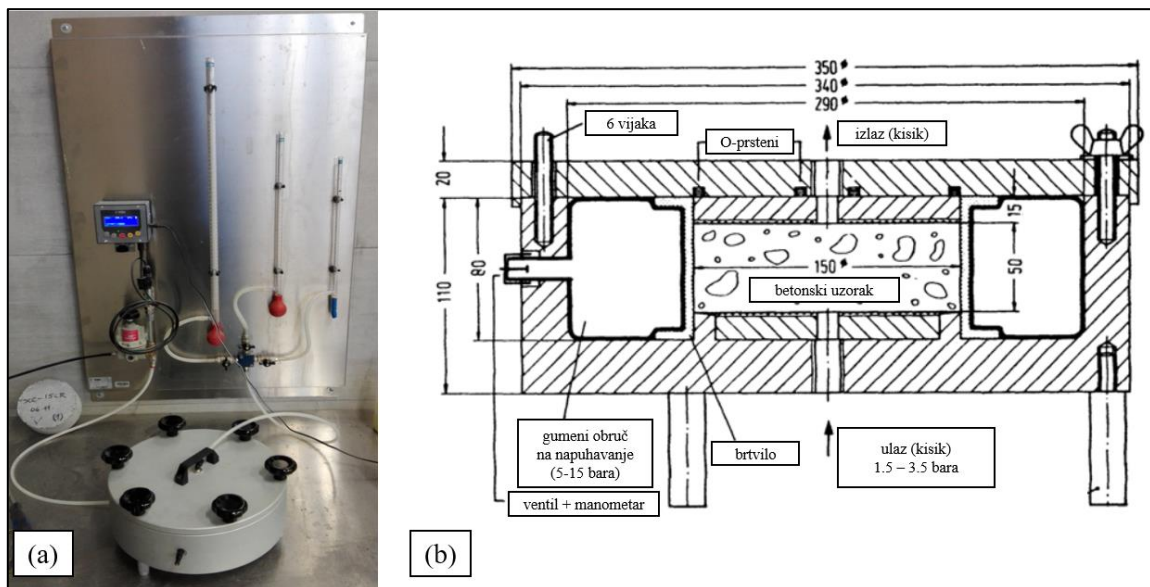
H – visina uzorka (m)

Q – protok plina (m³/s)

p – apsolutni ulazni tlak (Pa)

p_a i p₀ – atmosferski tlak (prema standardu pretpostavlja se da se radi o istim tlakovima)

η – dinamička viskoznost fluida



Slika 6.2 Ispitivanje plinopropusnosti: (a) uređaj za ispitivanje plinopropusnosti betonskih uzoraka, (b) shema i princip rada uređaja za ispitivanje plinopropusnosti [173], [174]

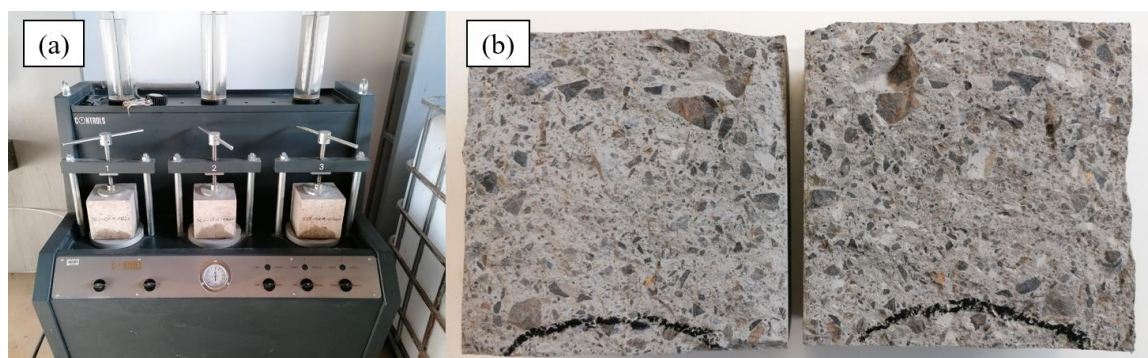
Prosječni specifični koeficijent plinopropusnosti računao se kao srednja vrijednost mjerenja plinopropusnosti pri različitim tlakovima. U preporukama RILEM TC 230-PSC [175] dani su kriteriji za određivanje kvalitete betona s obzirom na vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti (Tablica 6.1), koji su korišteni prilikom interpretacije rezultata ispitivanja.

Tablica 6.1 Kriteriji za određivanje kvalitete betona s obzirom na vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti [175]

K (m^2)	Plinopropusnost betona	Kvaliteta betona
$< 10^{-18}$	mala	dobar
$10^{-18} - 10^{-16}$	srednja	srednji
$> 10^{-16}$	velika	loš

6.2.3.2 Vodonepropusnost

Ispitivanje vodonepropusnosti, tj. dubine prodora vode pod tlakom, provodilo se sukladno normi HRN EN 12390-8:2019 [138] na uzorcima kocke brida 150 mm izloženim konstantnom tlaku od 500 ± 50 kPa u trajanju od 72 ± 2 sata na uređaju Controls 55-C0246/6 (Slika 6.3). Voda se pod tlakom nanosi na dno uzorka uz pomoć vodonepropusne gumene brtve. Dno uzoraka, tj. površina koja je bila izložena pritisku vode, odmah se nakon raskalupljivanja ohrapavila čeličnom četkom. Potom se idućih 28 dana uzorak njegovao pod vodom sukladno normi HRN EN 12390-2:2019 [176]. Ispitivanje se provodilo na serijama od 3 uzorka iz iste betonske mješavine, starosti 28 dana. Od svake betonske mješavine ispitane su 2 serije uzoraka, ukupno 6 uzoraka od svake betonske mješavine.



Slika 6.3 Ispitivanje vodonepropusnosti betonskih uzoraka: (a) uređaj za mjerenje tip Controls 55-C0246/6; (b) cijepanje betonskih uzoraka

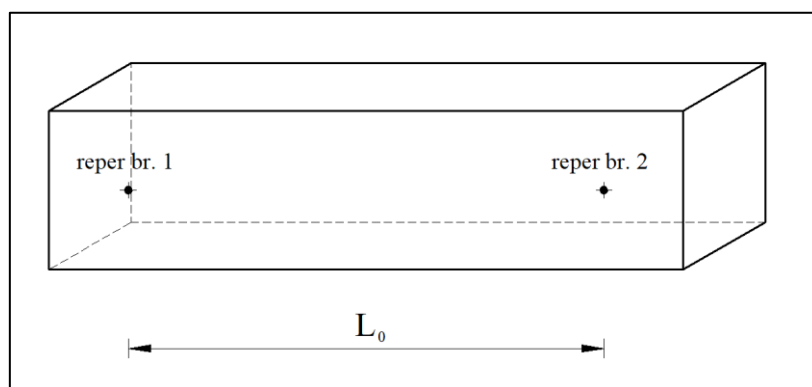
Tijekom ispitivanja pazilo se da je pritisak na betonske uzorke konstantan te da ne dolazi do curenja vode i popuštanja vodonepropusne gumene brtve. Nakon 72 ± 2 sata uzorci betonskih kocki uklonjeni su iz uređaja za ispitivanje te se višak vode sa stranice kocke, koja je bila izložena prodiranju vode, obrisao suhom krpom. Potom su se uzorci lomili cijepanjem te se mjerila dubina prodiranja vode u uzorak (Slika 6.3). Od 3 ispitana uzorka iz svake serije, za mjerodavnu dubinu prodora vode uzimala se prosječna vrijednost. U zadnjem je koraku za svaku betonsku mješavinu određen razred vodonepropusnosti betona prema dopuštenim prosječnim prodorima vode navedenim u Tablici 6.2.

Tablica 6.2 Razredi vodonepropusnosti betona sukladno normi HRN 1128:2007 [177]

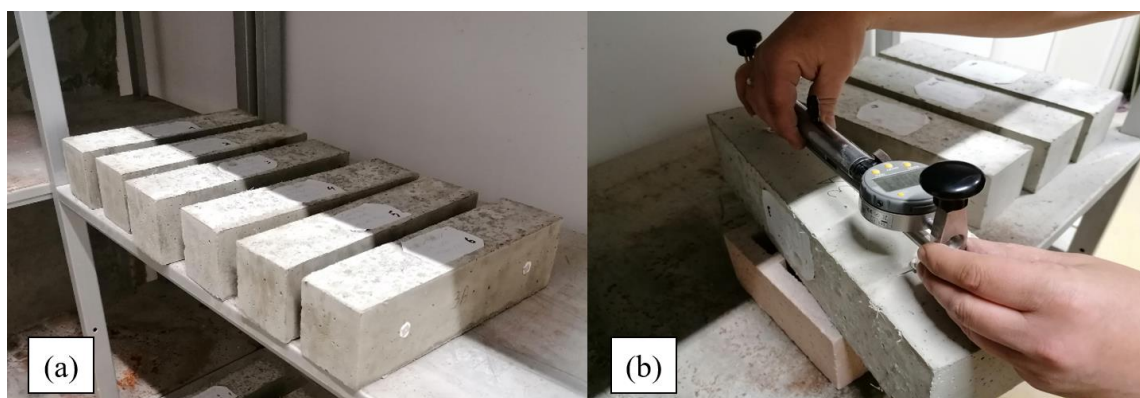
Razred vodonepropusnosti	Dopušteni prosječni prodor vode (mm)
VDP 1	50
VDP 2	30
VDP 3	15

6.2.3.3 Skupljanje

Ispitivanje skupljanja betona provodilo se sukladno normi HRN EN 12390-16:2019 [178]. Od svake od odabrane 3 optimalne mješavine izrađena su po 3 uzorka oblika prizme dimenzija 100 mm × 100 mm × 400 mm. 24 sata nakon betoniranja uzorci su raskalupljeni i označeni. Prije prvog mjerenja na sredinu uzorka na razmaku od 30 cm (tzv. mjerna udaljenost) postavljeni su reperi koji su služili za mjerenje skupljanja (Slika 6.4). Potom su ispitni uzorci stavljeni u komoru te je predmetno vrijeme označeno kao vrijeme t_0 . Nakon postavljanja uzoraka u komoru izmjerena je početna udaljenost između postavljenih repera $l(t_0)$. U komori je ispitnim uzorcima omogućeno slobodno deformiranje u kontroliranim uvjetima temperature od 20 ± 4 °C i relativne vlažnošću zraka od 70 ± 5 % (Slika 6.5).



Slika 6.4 Mjerne točke na liniji paralelnoj s glavnom osi



Slika 6.5 Ispitivanje skupljanja betona: (a) slobodno deformiranje betonskih uzoraka u komori; (b) mjerenje skupljanja betonskih uzoraka pomoću deformetra

Ispitivanje skupljanja provodilo se mjerenjem vrijednosti $l_{cs}(t)$ i to 1., 7., 14. dan te svakih tjedan dana u vremenu do 90 dana starosti betona. Pomoću deformetra mjerene su deformacije u mm/m u odnosu na prvo mjerenje nakon $24 \pm 0,5$ sata, a rezultati deformacija u određenom vremenu t izračunati su pomoću izraza:

$$\epsilon_{cs} = \frac{l(t_0) - l_{cs}(t)}{L_0} \quad (6.2)$$

gdje je:

L_0 - mjerna udaljenost, tj. udaljenost između repera (mm)

$l(t_0)$ – početna udaljenost između repera u trenutku t_0 (mm)

$l_{cs}(t)$ – udaljenost između repera u trenutku t (mm)

ϵ_{cs} – ukupna deformacija skupljanja betonskog uzorka u trenutku t .

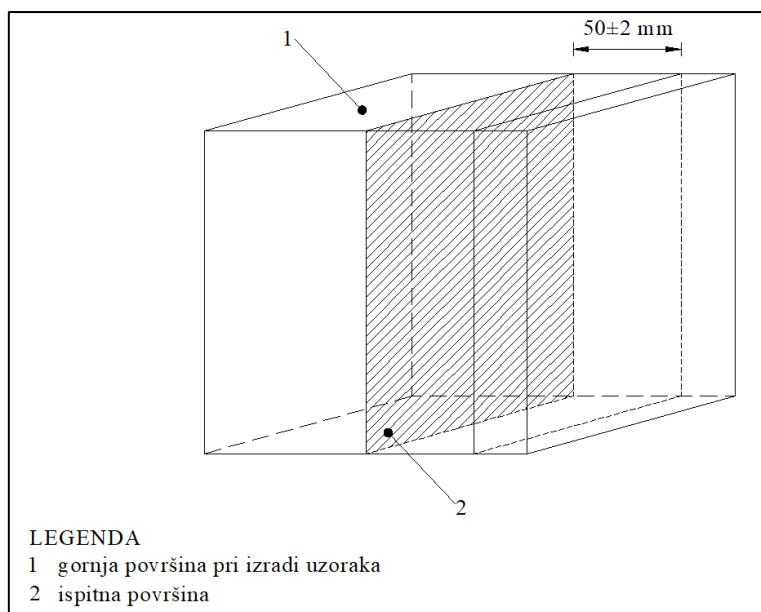
Deformacije su mjerene na svakom uzorku na dvije bočne strane prizme označene oznakama A i B te se kao konačna vrijednost ukupne deformacije skupljanja betonskog uzorka u određenom trenutku uzimala srednja vrijednost.

6.2.3.4 Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja provodilo se metodom ploče (*engl. slab test*) sukladno normi HRS CEN/TS 12390-9:2016 [179] na betonskim uzorcima dimenzija $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ prethodno izrađenim piljenjem kocke brida 150 mm pri starosti uzoraka od 21 dan ([Slika 6.6](#)). Od svake betonske mješavine ispitana su po 4 uzorka iz 4 kocke ([Slika 6.7](#)).



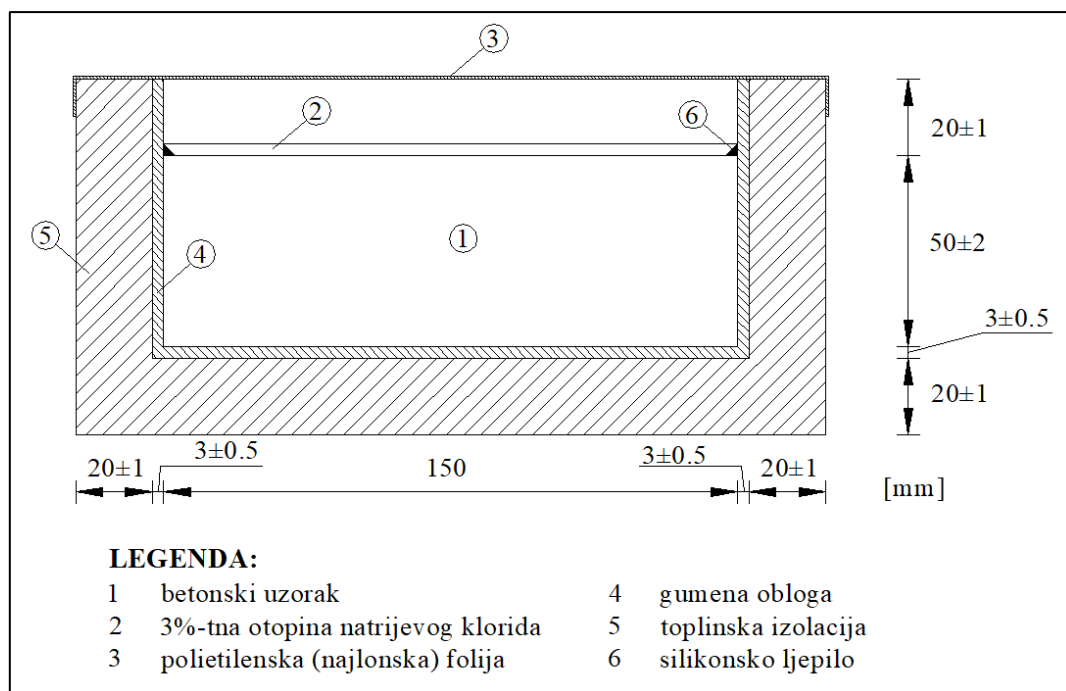
[Slika 6.6](#) Betonski uzorci pripremljeni za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja



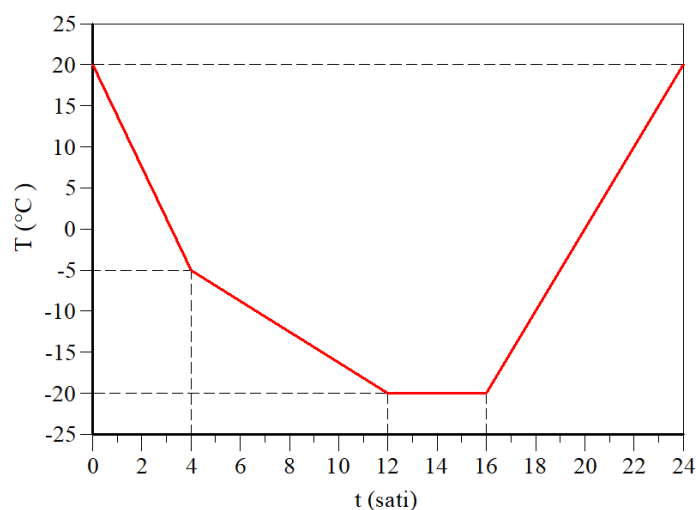
Slika 6.7 Mjesto piljenja betonske kocke u svrhu izrade betonskog uzorka za potrebe ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [179]

Otpornost betonskih uzoraka na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ispituje se na 1 od 2 piljene stranice uzorka dimenzija ispitne površine 150 mm × 150 mm, dok se na preostalih 5 stranica betonskog uzorka lijepi gumena obloga debljine 3 mm s nadvišenjem od 20 mm iznad ispitne površine, kako bi se agresivni medij (3 %-tna otopina natrijevog klorida) mogao tijekom trajanja ispitivanja zadržati na ispitnoj površini. Gumena obloga otporna je na djelovanje soli (NaCl) te je elastična do temperature - 27 °C. Navedenih 5 stranica izoliranih gumenom oblogom dodatno se toplinski izolira toplinskoizolacijskim materijalom debljine 20 mm i vrijednosti toplinske vodljivosti $\geq 0,036$ W/mK. Tako priređen uzorak, nakon dodavanja agresivnog medija, prekriva se najlonskom (polietilenskom) folijom debljine 0,1 mm kako ne bi došlo do hlapljenja agresivnog medija. Agresivni medij ulijeva se do dubine 3 mm ([Slika 6.8](#)).

Betonski su uzorci unutar klima komore izloženi 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja od kojih jedan ciklus traje 24 sata ([Slika 6.9](#)). Nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa mjeri se masa oljuštenog materijala koja služi za konačno određivanje otpornosti betona na djelovanje mraza i soli za odmrzavanje.



Slika 6.8 Shema pripreme betonskog uzorka [179]

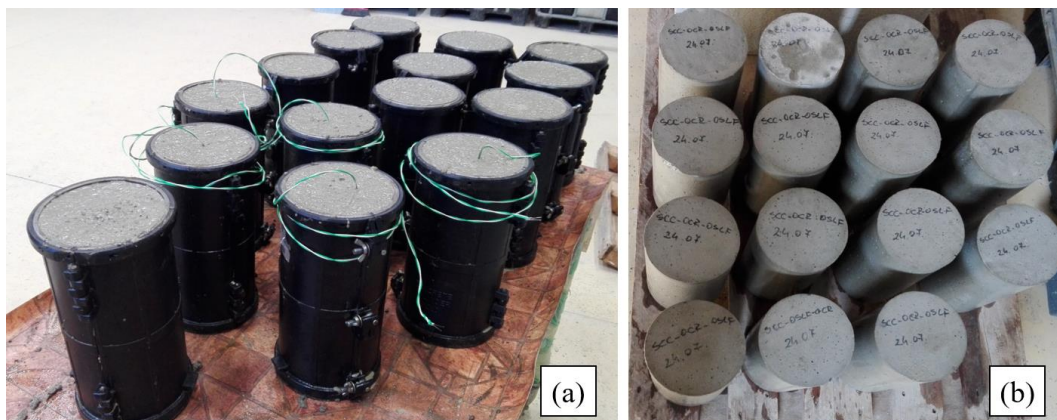


Slika 6.9 Grafički prikaz promjene temperature na površini uzorka u jednom 24-satnom ciklusu (u skladu s normom HRN CEN/TS 12390-9:2016)

6.2.3.5 Otpornost na izlaganje visokim temperaturama

Sukladno preporukama RILEM TC 200-HTC [180] te sukladno normi HRN EN 12390-13:2021 [126] ispitana su mehanička svojstva betonskih uzoraka oblika valjaka nakon izlaganja visokim temperaturama 0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C (tlačna čvrstoća, odnos *naprezanje-deformacija*, modul elastičnosti) (Slika 6.10). Dodatno uz mehanička svojstva praćena je i promjena mase uzoraka, brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak (UPV) ispitana sukladno normi HRN EN 12504-4:2021 [167], opažanja uočena na uzorcima poput eksplozivnog odlamanja prilikom ispitivanja tlačne

čvrstoće uzoraka, ljuštenja, promjene boje, pojave pukotina nakon izloženosti visokim temperaturama, izgaranja, pojave dima tijekom izlaganja uzoraka visokim temperaturama te promjene u mikrostrukturi pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa (SEM) nastale kao posljedica izlaganja uzoraka visokim temperaturama. Uzorci su izrađeni u laboratoriju. Uzorci su raskalupljeni 24 sata nakon betoniranja, nakon čega su stavljeni u vodu (Slika 6.11).



Slika 6.10 Cilindrični betonski uzorci u svježem stanju (a) i očvrslom stanju (b)



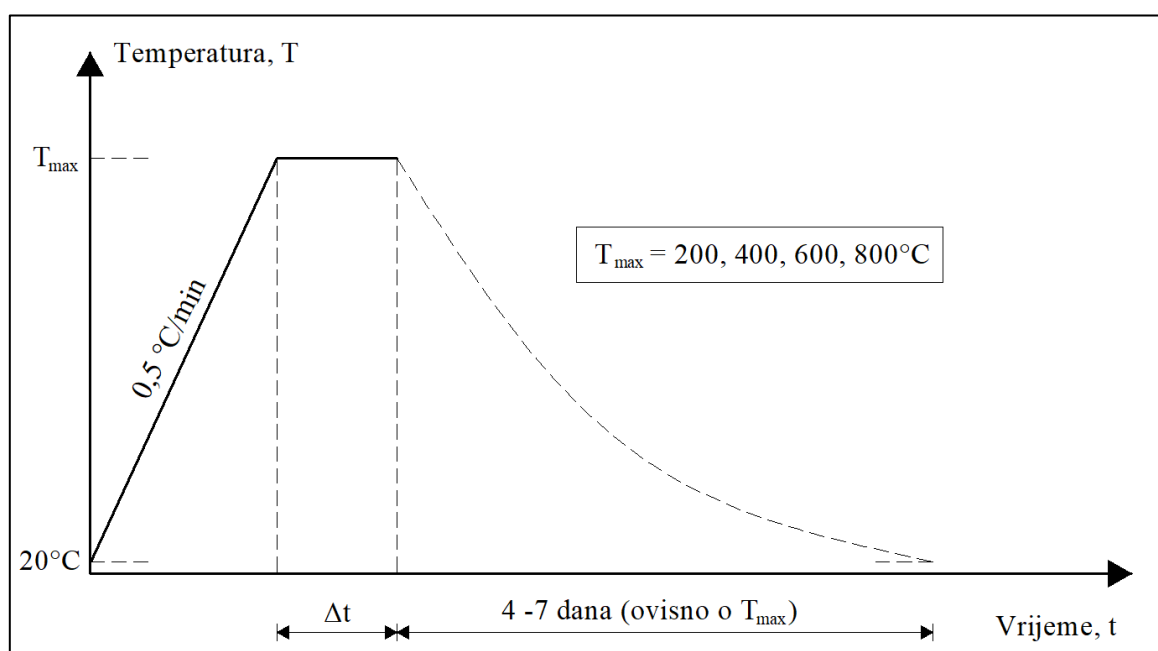
Slika 6.11 Njega betonskih uzoraka u vodi i sušenje betonskih uzoraka u sušioniku

Nakon 28 dana starosti uzorci su izvađeni iz vode te su do trenutka ispitivanja čuvani u laboratorijskim uvjetima (prosječne temperature $20 \pm 2^\circ \text{C}$ i relativne vlažnosti $30 \pm 5\%$) do njihove starosti od jedne godine. Pri starosti uzoraka od jedne godine isti su stavljeni na sušenje u sušionik na 105°C do stalne mase, sve dok promjena mase nije bila manja od $0,1\%$. Nakon postignute željene vlažnosti uzorci su izloženi visokim temperaturama. Visina i promjer uzoraka (300 mm i 150 mm) nisu bile u skladu s preporukama RILEM TC 200-HTC [180] zbog neposjedovanja kalupa oblika valjaka s omjerom dužina/promjer između 3-4. Sukladno navedenim preporukama RILEM-a i promjeru uzoraka valjaka usvojena je konstantna vrijednost prirasta temperature u peći od $0,5^\circ \text{C/min}$ (Tablica 6.3).

Tablica 6.3 Preporučene vrijednosti povećanja temperature na površini uzorka sukladno preporukama RILEM-a [180]

Promjer uzorka (mm)	Povećanje temperature (°C)
150	$\leq 0,5$
100	$\leq 1,0$
75	$\leq 2,0$
50	$\leq 4,0$

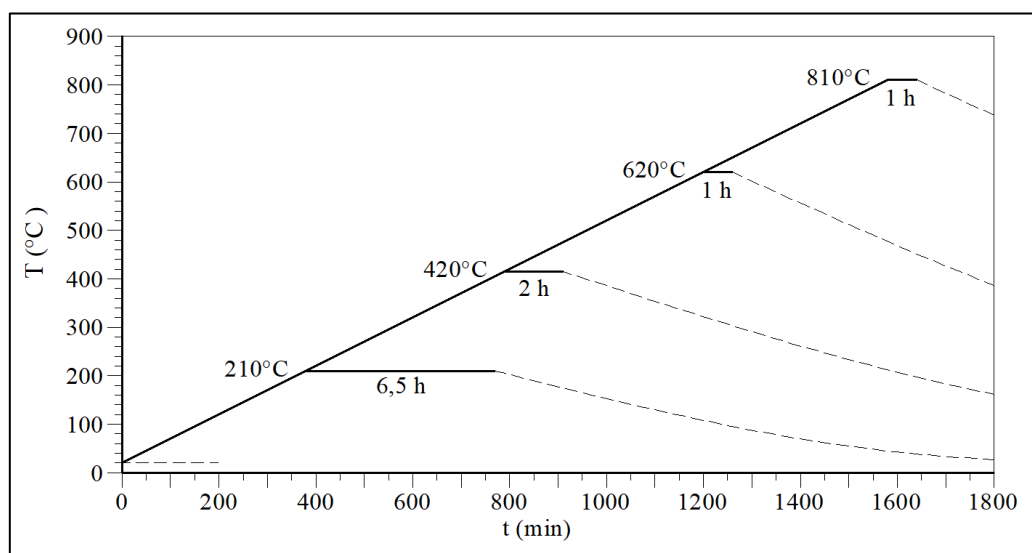
Od svake mješavine izrađeno je 30 betonskih uzoraka valjaka, po 6 uzoraka za svaku ispitnu temperaturu (0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C). Promjena temperature uzoraka praćena je pomoću NiCr termoparova tipa K (puženi vodiči), dok je promjena temperature peći praćena pomoću sonde. Sukladno preporukama RILEM-a [180] promjena temperature praćena je na površini uzorka. Na [Slici 6.12](#) prikazan je režim zagrijavanja betonskih uzoraka, dok je na [Slici 6.13](#) prikazana korištena peć. Nakon dosezanja predviđenih maksimalnih temperatura u peći (0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C), uzorci su ostavljeni na navedenim temperaturama na razdoblja prikazana na [Slici 6.14](#), kako bi se postigle željene temperature ne samo u peći, nego i na površini uzorka.



Slika 6.12 Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka



Slika 6.13 Električna peć korištena za ispitivanje otpornosti betonskih uzoraka valjaka na visoke temperature



Slika 6.14 Režim zagrijavanja uzoraka

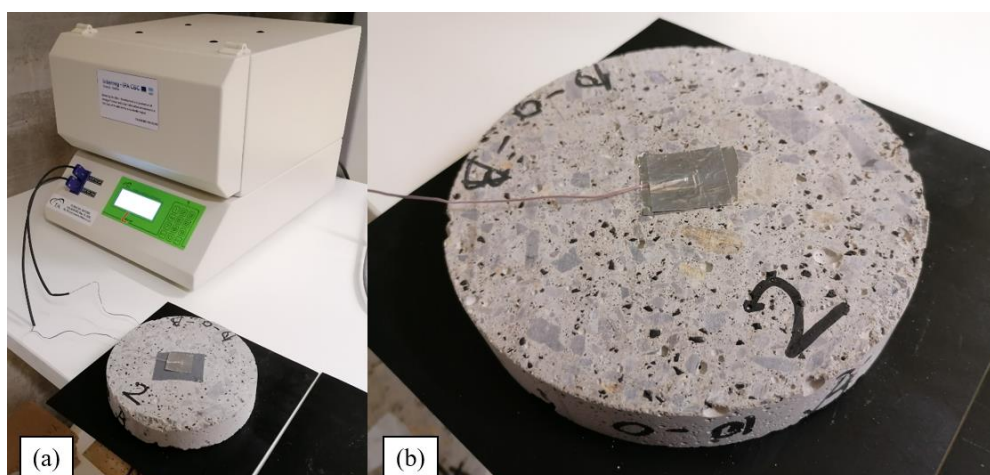
Kako bi se postigla jednaka temperatura u peći i na površini uzoraka, uzorci su se na manjim temperaturama morali ostavljati na duže vremensko razdoblje na maksimalnim temperaturama, dok su kod većih temperatura navedena vremenska perioda bila kraća. Po završetku procesa zagrijavanja, tj. nakon postizanja željene temperature na površini uzorka, peć se manualno gasila te su uzorci ostavljeni u peći do njihovog potpunog hlađenja prirodnim putem do sobne temperature. U Tablici 6.4 prikazana su ispitana svojstva betonskih uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama.

Tablica 6.4 Ispitana svojstva betonskih uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama

A) Fizikalna svojstva	B) Mehanička svojstva	C) Analiza mikrostrukture
A1) Vizualna opažanja (ljuštenje, pukotine, boja, izgaranje i pojava dima)	B1) Tlačna čvrstoća	Pretražni elektronski mikroskop (SEM)
A2) Gubitak mase	B2) Modul elastičnosti	
A3) Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak (UPV)	B3) Odnos <i>naprezanje – deformacija</i> Odnos <i>tlačna čvrstoća – UPV</i>	

6.2.3.6 Toplinska vodljivost

Ispitivanje toplinske vodljivosti provodilo se sukladno normi HRN EN 12667:2002 [181] i HRN ISO 8302:1998 [182] na uzorcima oblika valjka promjera $\varnothing 150$ dobivenih rezanjem uzoraka $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$. Srednje debljine ispitanih uzoraka dane su u [Tablici 6.5](#). Za ispitivanje toplinske vodljivosti korišten je uređaj FOX 200 s vanjskim termoparovima ([Slika 6.15](#)).



Slika 6.15 Ispitivanje toplinske vodljivosti: (a) uređaj za ispitivanje toplinske vodljivosti, (b) postavljanje vanjskih termoparova na betonski uzorak

Tablica 6.5 Srednje debljine uzoraka korištenih za ispitivanje toplinske vodljivosti

Mješavina	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4
SCC-0CR-0SLF	30,28	30,33	30,38	30,74
SCC-10CR-0SLF	30,89	30,74	30,74	30,63
SCC-15CR-5SLF	25,24	25,43	25,63	25,92

Za ispitivanje toplinske vodljivosti u suhom stanju uzorci su prije početka ispitivanja sušeni na 105°C do konstantne mase. Ispitano su po 4 uzorka od 3 odabrane optimalne mješavine ([Slika 6.16](#)). Betonski uzorci izloženi su djelovanju toplinskog toka, temperaturne razlike od 10°C . Za srednju

temperaturu hladnije strane uzorka uzete su vrijednosti od 5 °C, 10 °C i 15 °C, dok su za srednju temperaturu toplije strane uzorka uzete vrijednosti od 15 °C, 20 °C i 25 °C.



Slika 6.16 Betonski uzorci na kojima je ispitana toplinska vodljivost

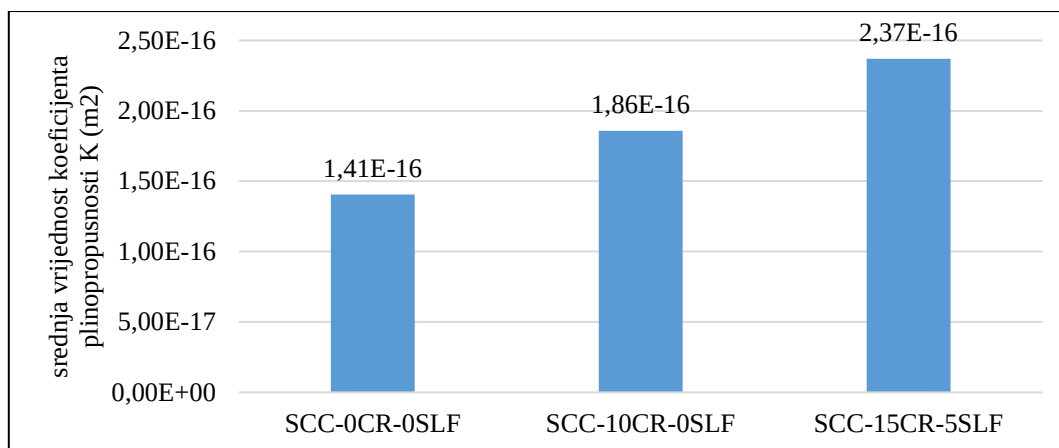
6.3 Eksperimentalni rezultati i diskusija

6.3.1 Plinopropusnost

U Tablici 6.6 i na Slici 6.17 dani su rezultati ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti za sve tri odabrane optimalne mješavine.

Tablica 6.6 Rezultati ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti K (m^2)

Uzorak	K (m^2)		
	SCC-0CR-0SLF	SCC-10CR-0SLF	SCC-15CR-5SLF
1	1,28E-16	1,87E-16	2,09E-16
2	1,52E-16	2,15E-16	2,28E-16
3	1,45E-16	2,08E-16	2,42E-16
4	1,50E-16	1,62E-16	2,23E-16
5	1,22E-16	1,61E-16	2,56E-16
6	1,58E-16	1,64E-16	2,55E-16
7	1,36E-16	2,23E-16	2,62E-16
8	1,45E-16	1,60E-16	2,18E-16
9	1,27E-16	1,92E-16	2,40E-16
$\bar{x}$	1,41E-16	1,86E-16	2,37E-16
$\bar{s}_n$	1,26E-17	2,53E-17	1,84E-17
V (%)	9	14	8



Slika 6.17 Srednje vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti K (m²)

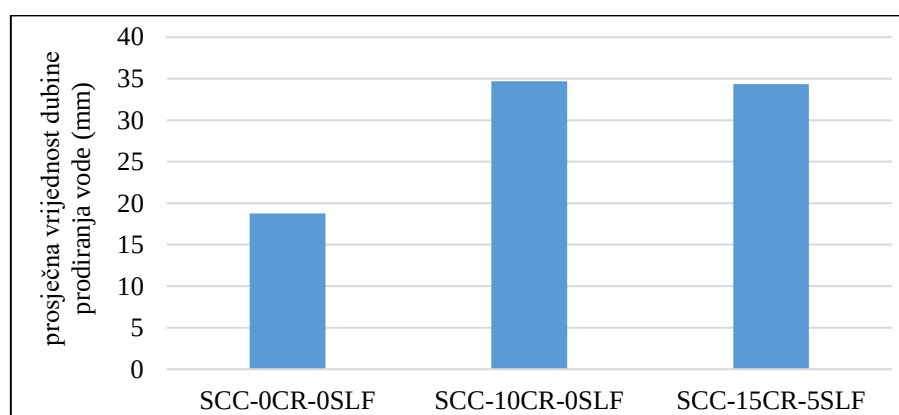
Pojedinačna i srednja vrijednost koeficijenta plinopropusnosti najmanja je za uzorke referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF, a najveća za uzorke betonske mješavine SCC-15CR-5SLF. Srednja vrijednost koeficijenta plinopropusnosti, izračunata kao srednja vrijednost koeficijenta plinopropusnosti od 9 uzoraka, za betonske je mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF 32 % i 69 % veća od srednje vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti referentne mješavine SCC-0CR-0SLF. Povećanje plinopropusnosti betona s povećanim udjelom reciklirane gume u betonu može biti objašnjeno s grubom površinom i oštrim rubovima gume koja na taj način zadržavaju zrak u strukturi uzoraka, povećavajući poroznost samozbijajućeg betona, a samim time i njegovu plinopropusnost. Povećanje se može opisati s deformabilnošću reciklirane gume koja se pri pritisku plina deformira te plin može lakše pronaći svoj put kroz uzorak [81]. Plinopropusnost se povećanjem udjela gume s 10 % na 15 % nije znatno povećala, o čemu je već ranije pisano u prethodnim istraživanjima [64] te objašnjeno poboljšanom strukturom pora u betonu kao rezultatom doprinosa silicijske prašine. Prema kriterijima za određivanje kvalitete betona s obzirom na vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti [175] sve 3 betonske mješavine ubrajaju se u beton srednje kvalitete. Na temelju prethodne klasifikacije zadane preporukama RILEM TC 230-PSC [175] zaključuje se da se samozbijajući beton s 10 % i 15 % udjela reciklirane gume može bez dodatnih ograničenja, koja su tiču svojstava plinopropusnosti, koristiti u nosivim armiranobetonskim elementima.

6.3.2 Vodonepropusnost

Rezultati ispitivanja dubine prodora vode vidljivi su u [Tablici 6.7](#) i na [Slikama 6.18](#) i [6.19](#). Prosječne vrijednosti dubine prodiranja vode uzete su kao mjerodavne.

Tablica 6.7 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom (vrijednosti u milimetrima)

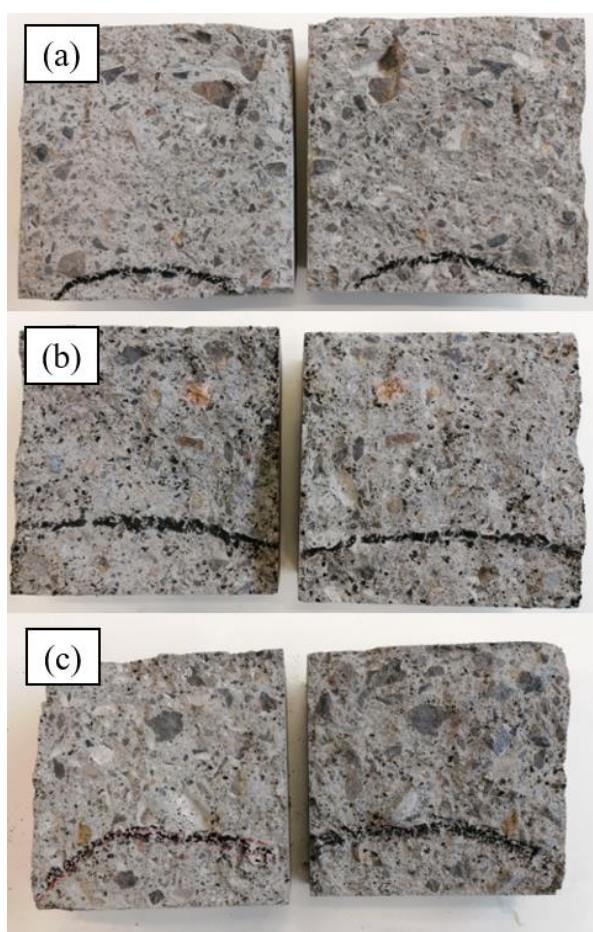
Seriya uzoraka	Oznaka uzorka	SCC-0CR-0SLF	SCC-10CR-0SLF	SCC-15CR-5SLF
I	uzorak 1	20,13	33,21	29,66
	uzorak 2	16,45	30,54	36,78
	uzorak 3	18,64	36,98	37,05
	$\bar{x}$	18,41	33,58	34,50
II	uzorak 4	18,64	35,88	36,00
	uzorak 5	17,59	33,20	37,00
	uzorak 6	20,02	34,97	30,00
	$\bar{x}$	18,75	34,68	34,33



Slika 6.18 Prosječna vrijednost dubine prodiranja vode

Referentna mješavina SCC-0CR-0SLF ima najmanju prosječnu vrijednost dubine prodiranja vode i moguće ju je prema normi HRN 1128:2007 [177] uvrstiti u razred vodonepropusnosti VDP2. Betonske mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF imaju približno istu prosječnu vrijednost dubine prodiranja vode te se prema normi HRN 1128:2007 [177] uvrštavaju u razred vodonepropusnosti VDP1. Dubina prodora vode u betonski uzorak povećava se dodavanjem reciklirane gume kao zamjene za prirodni agregat, što je u skladu s prethodnim istraživanjima [70], [80]. Takvo se ponašanje može objasniti smanjenjem kapilarne upojnosti prilikom dodavanja reciklirane gume [70] kao materijala koji nije vodoupojan i koji je hidrofoban, čime je zbog pojave zarobljenog zraka i slabije veze između reciklirane gume i cementne paste povećana vodopropusnost na dodirnom području između gume i cementne paste. Nadalje, u predmetnom istraživanju prosječna vrijednost dubine prodiranja vode betonskih mješavina s 10 % i 15 % reciklirane gume vrlo je slična (između 33-35 mm). Povećanje postotka zamjene gume s 10 % na 15 % zasigurno bi imalo utjecaj i na povećanje dubine prodora vode, ali je u ovom istraživanju pojava te vrste spriječena dodavanjem silicijske prašine koja je zbog svoje finoće mliva i čestica manjeg promjera od čestica cementa pozitivno utjecala na bolju vezu između reciklirane gume i cementne paste [80] ispunjavajući u većoj količini prostor u kojem se inače zadržavao zarobljeni zrak. Posljedično, silicijska prašina pozitivno je utjecala i na zadržavanje jednake prosječne

vrijednosti dubine prodiranja vode u usporedbi s betonskom mješavinom s 10 % gume. Sličan pozitivan utjecaj silicijske prašine na betonsku mješavinu s 15 % reciklirane gume vidljiv je i u prethodnom [Poglavlju 6.3.1](#), gdje je plinopropusnost betonskih mješavina s 10 % i 15 % gume poprilično slična, čime se dodatno zaključuje da su rezultati ispitivanja navedena dva svojstva trajnosti betona povezani te da je moguće ispitivanjem jednog od svojstva trajnosti zaključiti kako će se materijal ponašati prilikom ispitivanja drugog svojstva trajnosti. Za razliku od zaključka iz prethodnog poglavlja na temelju rezultata ispitivanja vodonepropunosti ipak se preporučuje djelomično ograničenje primjene samozbijajućeg betona s 10 % i 15 % gume i to na projektne situacije u kojima navedeni materijal nije izložen izravnom dodiru s vodom pod tlakom, kao npr. u nosivim armiranobetonskim elementima stambene građevine koji se nalaze iznad kote gotovog terena.



Slika 6.19 Ispitivanje vodonepropusnosti betonskih uzoraka - cijepanje betonskih uzoraka i određivanje dubine prodora vode u milimetrima: (a) SCC-0CR-0SLF; (b) SCC-10CR-0SLF; (c) SCC-15CR-5SLF

6.3.3 Skupljanje

Rezultati ispitivanja deformacije uzrokovane skupljanjem betona za svih 9 uzoraka, po 3 od svake mješavine, dani su u [Tablicama 6.8](#), [6.9](#) i [6.10](#) i na [Slikama 6.20](#), [6.21](#) i [6.22](#), gdje su

eksperimentalni podatci interpretirani i statistički, tj. iskazane su srednje vrijednosti, standardne devijacije te koeficijenti varijacije mjerenja skupljanja nakon 7, 14 dana i nakon toga svaki 7. dan sve do 91 dana kao zadnjeg dana mjerenja. Nadalje, za sve 3 mješavine napravljena je regresijska analiza rezultata.

Tablica 6.8 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF

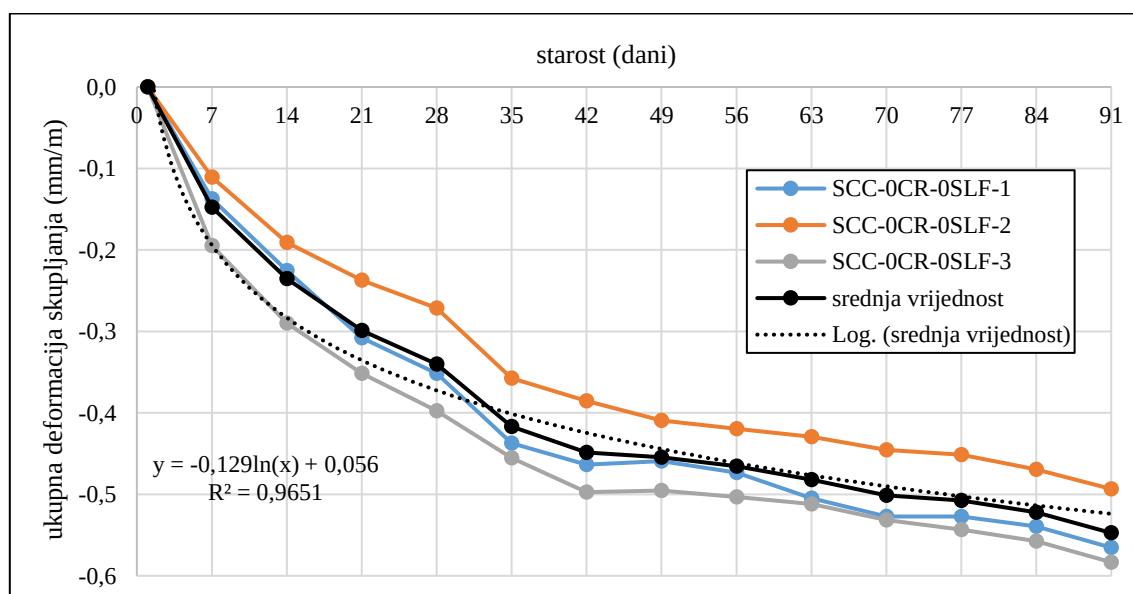
Starost (dani)	Mješavina SCC-0CR-0SLF			$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3			
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
7	-0,137	-0,111	-0,195	-0,148	0,043	29
14	-0,225	-0,191	-0,290	-0,235	0,050	21
21	-0,308	-0,237	-0,351	-0,299	0,058	19
28	-0,351	-0,271	-0,397	-0,340	0,064	19
35	-0,437	-0,357	-0,455	-0,417	0,052	13
42	-0,463	-0,385	-0,497	-0,449	0,057	13
49	-0,459	-0,409	-0,495	-0,455	0,043	9
56	-0,473	-0,419	-0,503	-0,465	0,043	9
63	-0,505	-0,429	-0,512	-0,482	0,046	9
70	-0,527	-0,445	-0,531	-0,501	0,049	10
77	-0,527	-0,451	-0,543	-0,507	0,049	10
84	-0,539	-0,469	-0,557	-0,522	0,046	9
91	-0,565	-0,493	-0,583	-0,547	0,048	9

Tablica 6.9 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-10CR-0SLF

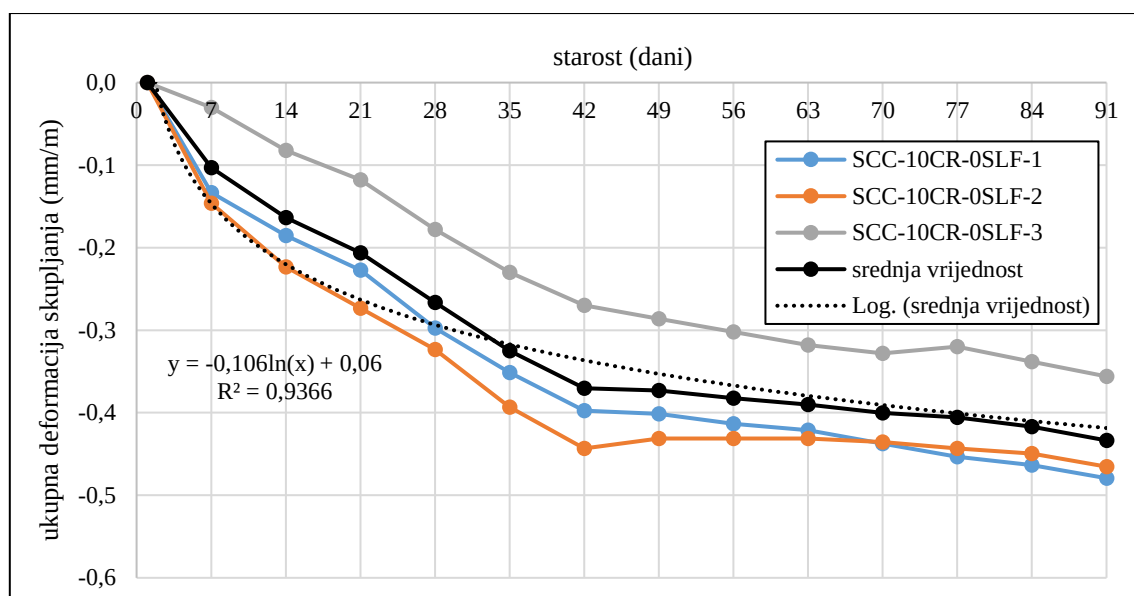
Starost (dani)	Mješavina SCC-10CR-0SLF			$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3			
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
7	-0,133	-0,146	-0,030	-0,103	0,064	62
14	-0,185	-0,223	-0,082	-0,164	0,073	45
21	-0,227	-0,273	-0,118	-0,206	0,080	39
28	-0,297	-0,323	-0,178	-0,266	0,078	29
35	-0,351	-0,393	-0,230	-0,325	0,085	26
42	-0,397	-0,443	-0,270	-0,370	0,090	24
49	-0,401	-0,431	-0,286	-0,373	0,077	21
56	-0,413	-0,431	-0,302	-0,382	0,070	18
63	-0,421	-0,431	-0,318	-0,390	0,063	16
70	-0,437	-0,435	-0,328	-0,400	0,063	16
77	-0,453	-0,443	-0,320	-0,406	0,074	18
84	-0,463	-0,449	-0,338	-0,417	0,069	16
91	-0,479	-0,465	-0,356	-0,434	0,068	16

Tablica 6.10 Rezultati ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-15CR-5SLF

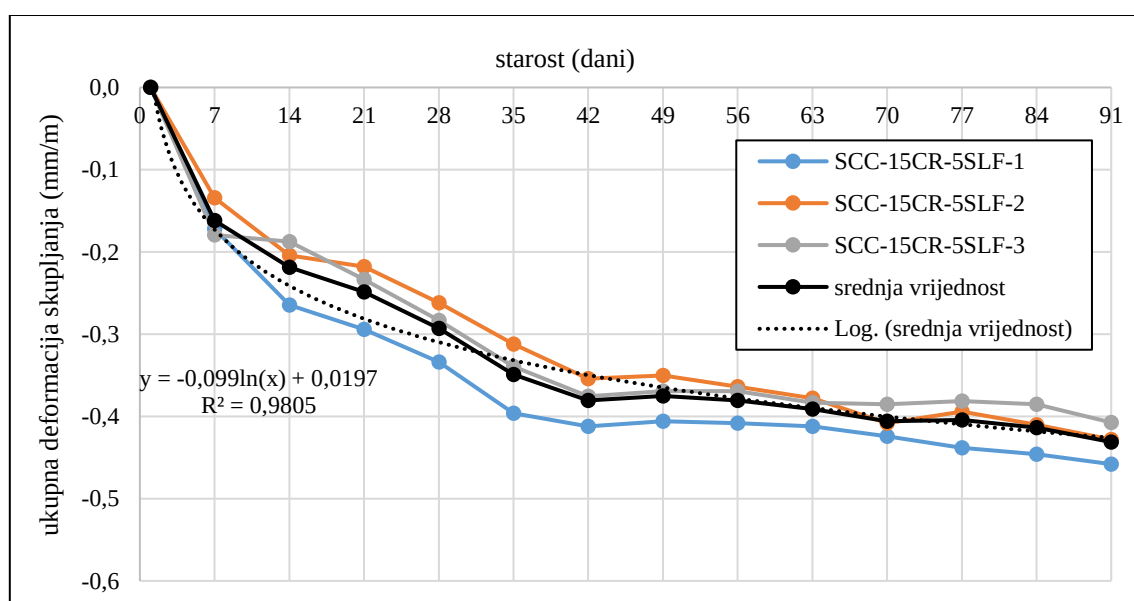
Starost (dani)	Mješavina SCC-15CR-5SLF			$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3			
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
7	-0,172	-0,134	-0,179	-0,162	0,024	15
14	-0,265	-0,204	-0,187	-0,219	0,041	19
21	-0,294	-0,218	-0,233	-0,248	0,040	16
28	-0,334	-0,262	-0,283	-0,293	0,037	13
35	-0,396	-0,312	-0,339	-0,349	0,043	12
42	-0,412	-0,354	-0,375	-0,380	0,029	8
49	-0,406	-0,350	-0,369	-0,375	0,028	8
56	-0,408	-0,364	-0,369	-0,380	0,024	6
63	-0,412	-0,378	-0,383	-0,391	0,018	5
70	-0,424	-0,408	-0,385	-0,406	0,019	5
77	-0,438	-0,394	-0,381	-0,404	0,030	7
84	-0,446	-0,410	-0,385	-0,414	0,031	7
91	-0,458	-0,428	-0,407	-0,431	0,025	6



Slika 6.20 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF



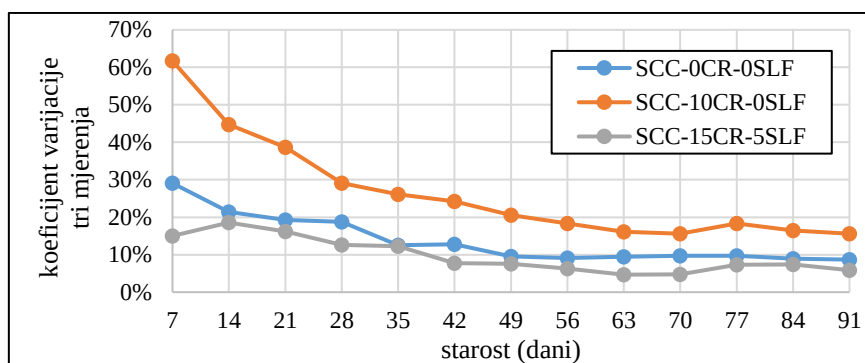
Slika 6.21 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-10CR-0SLF



Slika 6.22 Grafički prikaz rezultata ispitivanja deformacije skupljanja betonskih uzoraka mješavine SCC-15CR-5SLF

Na Slikama 6.20, 6.21 i 6.22 prikazani su logaritamski regresijski modeli. Predloženi modeli reprezentativniji su što je vrijednost koeficijenta determinacije (R^2) bliža broju 1. Vrijednost R^2 iznosi 0,9651; 0,9366 i 0,9805 za mješavine SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF, što pokazuje vrlo dobro podudaranje rezultata ispitivanja s predloženim logaritamskim modelima te se može zaključiti da je za sve 3 mješavine moguće koristiti logaritamski regresijski model kao

mjerodavan. Nadalje, kako bi se dobio što bolji uvid u statističku analizu podataka, na [Slici 6.23](#) prikazana je promjena koeficijenta varijacije u odnosu na starost uzoraka.



Slika 6.23 Skupljanje betona: promjena koeficijenta varijacije u odnosu na starost uzoraka

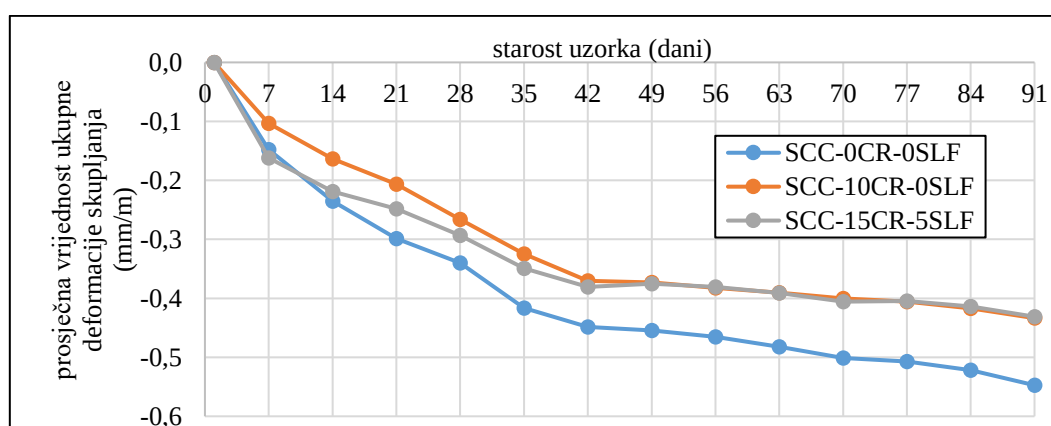
Najveće vrijednosti koeficijenta varijacije i to iznad 45 % vidljive su na 7. i 14. dan mjerenja deformacija uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0CR, dok najmanje vrijednost koeficijenta varijacije, u usporedbi s istom vrijednošću kod ostalih mješavina imaju uzorci betonske mješavine SCC-15CR-0SLF. Generalni zaključak za uzorke sve 3 mješavine jest taj da se koeficijent varijacije smanjuje povećanjem starosti uzoraka, što znači da se jednakost rezultata ispitivanja deformacija nastalih skupljanjem betona povećava povećanjem starosti uzoraka.

Konačni rezultati ispitivanja ukupne deformacije skupljanja prikazani u [Tablici 6.11](#) i na [Slici 6.24](#) srednje su vrijednosti mjerenja deformacija ukupnog skupljanja u određenom vremenu na 3 izrađene betonske prizme.

Tablica 6.11 Rezultati ispitivanja ukupnih deformacija skupljanja betonskih uzoraka

Starost (dani)	Mješavina		
	SCC-0CR-0SLF	SCC-10CR-0SLF	SCC-15CR-5SLF
1	0,000	0,000	0,000
7	-0,148	-0,103	-0,162
14	-0,235	-0,164	-0,219
21	-0,299	-0,206	-0,248
28	-0,340	-0,266	-0,293
35	-0,417	-0,325	-0,349
42	-0,449	-0,370	-0,380
49	-0,455	-0,373	-0,375
56	-0,465	-0,465	-0,380
63	-0,482	-0,482	-0,391
70	-0,501	-0,501	-0,406
77	-0,507	-0,507	-0,404
84	-0,522	-0,522	-0,414
91	-0,547	-0,547	-0,431

Iz rezultata ispitivanja prikazanih u [Tablici 6.11](#) i na [Slici 6.24](#) može se zaključiti da je prosječna vrijednost ukupnog skupljanja betonskih uzoraka referentne mješavine SCC-0CR-0SLF nakon 7 dana za 43 % veća i za 9 % manja od prosječne vrijednosti ukupnog skupljanja betonskih uzoraka mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Nadalje, vidljivo je da mješavina SCC-15CR-5SLF nakon prvih 7 dana ima najveću prosječnu vrijednost ukupne deformacije skupljanja, što se može objasniti utjecajem silicijske prašine koja doprinosi povećanom skupljanju betona u ranijoj fazi dozrijevanja betona zbog povećane finoće mliva u odnosu na finoću mliva cementa. Budući da se zbog naprezanja prouzročenih skupljanjem betona na površini betona javljaju pukotine, proces skupljanja betona predstavlja nepovoljnu pojavu u vidu uporabljivosti betona. U interesu je da vrijednost skupljanja betona bude što manja, posebno u prvim danima nakon betoniranja.



Slika 6.24 Ukupne deformacije nastale skupljanjem betonskih uzoraka

Uzimajući u obzir navedenu činjenicu, zaključuje se da mješavina SCC-10CR-0SLF pokazuje najpovoljnije rezultate ispitivanja s 36 % manjom vrijednošću prosječnog skupljanja betona u usporedbi s mješavinom SCC-15CR-5SLF i to nakon prvih 7 dana starosti betona. Nakon 14. dana pa sve do zadnjeg 91. dana ispitivanja uzorci referentne mješavine SCC-0CR-0SLF imaju najveću vrijednost ukupnog skupljanja betona u usporedbi s vrijednostima skupljanja uzoraka betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF, i to do maksimalno 45 % i 27 %, što je u skladu s [39], ali i u suprotnosti s nekim dosadašnjim istraživanjima [46], [49]. Smanjeno skupljanje betona s gumom može se objasniti povećanim kapacitetom deformabilnosti betona postignutim zahvaljujući recikliranoj gumi [39] koja je elastičnija od prirodnog agregata i hidrofobna te na sebe ne veže molekule vode. Iz navedenog može se zaključiti da zamjena prirodnog agregata recikliranom gumom ima pozitivan učinak na promatrano svojstvo betona jer na taj način guma doprinosi potencijalnom smanjenju broja i veličine pukotina u betonu, što posljedično može utjecati na veću trajnost betona i manje troškove održavanja tijekom projektiranog vijeka građevine.

6.3.4 Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Mase oljuštenog materijala i prosječne mase oljuštenog materijala do 56. ciklusa prikazane su u [Tablici 6.12](#).

Tablica 6.12 Mase oljuštenog materijala nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Mješavina	Uzorak	masa oljuštenog materijala nakon n dana (g)									
		7		14		28		42		56	
		$m_{s,7}$	$m_{s,7,sr}$	$m_{s,14}$	$m_{s,14,sr}$	$m_{s,28}$	$m_{s,28,sr}$	$m_{s,42}$	$m_{s,42,sr}$	$m_{s,56}$	$m_{s,56,sr}$
SCC-0CR-0SLF	1	0,60	0,38	2,56	1,69	9,62	8,23	18,45	16,86	29,82	29,07
	2	0,33		1,20		9,68		18,12		30,73	
	3	0,37		0,99		5,22		13,67		25,60	
	4	0,20		2,00		8,39		17,20		30,14	
SCC-10CR-0SLF	1	0,05	0,06	0,70	0,70	0,79	0,96	2,01	2,31	2,39	2,87
	2	0,12		0,49		0,96		3,40		3,63	
	3	0,06		0,50		0,69		1,37		2,14	
	4	0,02		1,10		1,40		2,46		3,33	
SCC-15CR-5SLF	1	0,07	0,09	1,02	1,21	3,20	2,52	8,29	6,37	9,85	8,88
	2	0,09		1,14		2,22		5,38		7,48	
	3	0,17		1,57		2,88		7,46		10,77	
	4	0,05		1,11		1,80		4,36		7,44	

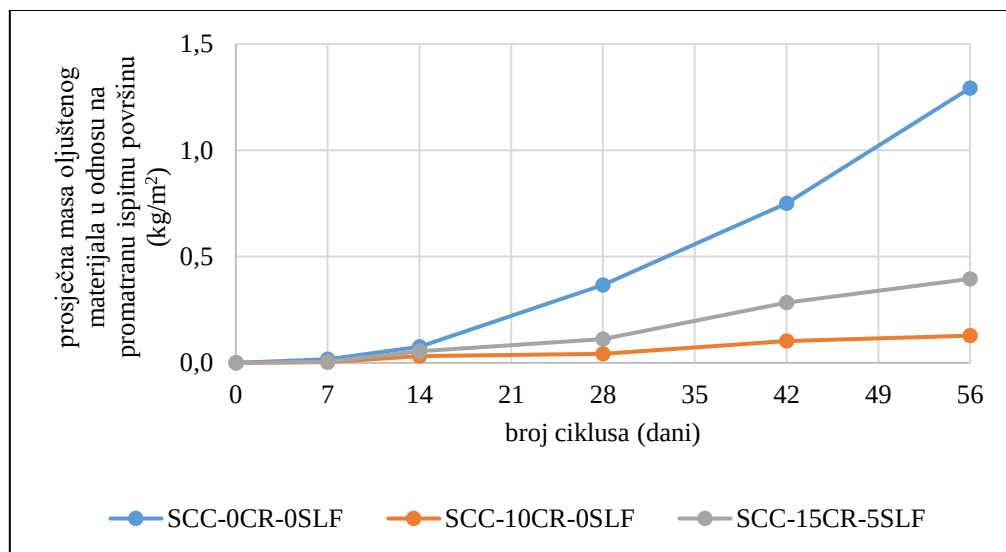
Srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala do 56. ciklusa u odnosu na promatrane ispitne površine (kg/m^2) prikazane su u [Tablici 6.13](#) i na [Slici 6.25](#).

Tablica 6.13 Srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Mješavina	srednja vrijednost mase oljuštenog materijala nakon n dana u odnosu na promatranu ispitnu površinu (kg/m^2)					
	0	7	14	28	42	56
SCC-0CR-0SLF	0,000	0,017	0,075	0,366	0,749	1,292
SCC-10CR-0SLF	0,000	0,003	0,031	0,043	0,103	0,128
SCC-15CR-5SLF	0,000	0,004	0,054	0,112	0,283	0,395

Pojedinačne i srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala su za sve promatrane cikluse (7, 14, 28, 42 dana) najveće za referentnu mješavinu SCC-0CR-0SLF, a najmanje za mješavinu SCC-10CR-0SLF. Nadalje, vrijednosti mase oljuštenog materijala za mješavinu SCC-15CR-5SLF su za sve promatrane cikluse manje od istih vrijednosti referentne mješavine SCC-0CR-0SLF. Nakon 7. i 14. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja razlika između pojedinačnih i srednjih vrijednosti masa oljuštenog materijala promatranih betonskih mješavina manje je vidljiva. Nakon 28. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja vidljiv je velik skok u navedenoj razlici, koji se nastavlja i nakon 42. i 56. ciklusa, nakon kojeg je i najviše izražen ([Slika 6.25](#)). Nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja masa oljuštenog materijala referentne mješavine je za 10 i 3 puta veća od mase oljuštenog materijala betonskih mješavina

SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Do danas, nekoliko istraživanja običnog betona s gumom dalo je slične rezultate [4], [70], [76], [79]. Ipak, rezultati nekoliko istraživanja dokazali su suprotno [4], [75], barem u pogledu većeg postotka zamjene prirodnog agregata gumom. Liu i sur. [4] zaključili su da je pozitivan utjecaj gume na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja izražen samo do 5 %-tne zamjene prirodnog agregata gumom, što u ovom istraživanju nije slučaj te je dokazano upravo suprotno, s tim da je potrebno osvrnuti se na činjenicu da je mješavina s 10 % zamjene ipak dala bolje rezultate, tj. manje ljuštenja od mješavine s 15 % gume.



Slika 6.25 Grafički prikaz povećanja srednje vrijednosti mase oljuštenog materijala (kg/m^2) nakon 7, 14, 28, 42 i 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

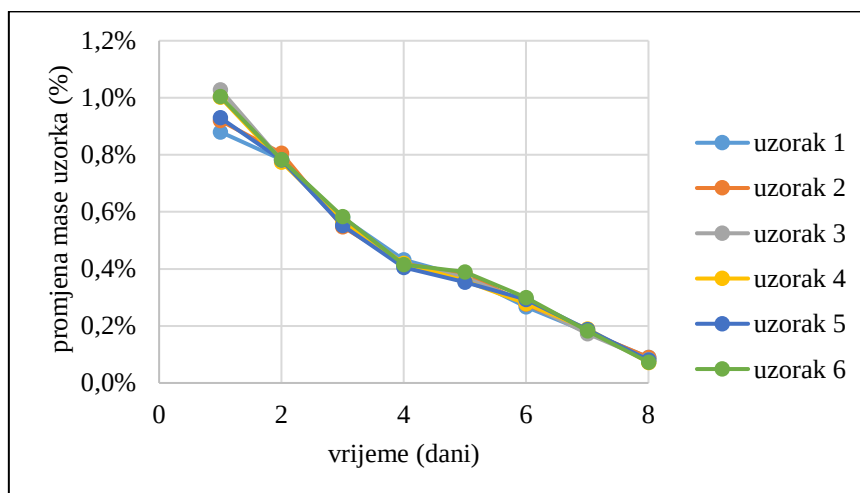
Autori [57], [76] su zaključili da veličina zrna gume igra bitnu ulogu u ponašanju, tj. ljuštenju betona nakon djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Najbolji rezultati dobiveni su kada je korišten sitni gumeni agregat, što je pregledom literature i bio jedan od ulaznih parametara ovoga istraživanja, u kojemu se reciklirana guma koristila kao zamjena za prirodni sitni agregat. Sitna reciklirana guma ima veću specifičnu površinu od krupne reciklirane gume uzrokujući povećan broj mikro-pora. Pore te vrste zahvaćaju i zarobljavaju mjehuriće zraka u cementnu pastu, čime je povećana poroznost betona. Poznato je da se otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja može poboljšati uz upotrebu aeranata [27]. Stoga navedeno povećanje poroznosti uzrokovano primjenom reciklirane gume u betonu pozitivno utječe na stvaranje dodatnog praznog prostora u betonskoj mikrostrukturi, što omogućuje prihvatanje unutarnjih naprezanja uzrokovanih povećanjem volumena uslijed prelaska vode iz tekuće u kruto stanje. Na taj način beton trpi manje razorne posljedice vlastitog širenja uzrokovanih unutarnjim silama s obzirom da reciklirana guma zbog svojih oštih rubova doprinosi stvaranju veće količine pora u betonu čime osigurava dodatni prostor za širenje kristala leda i soli [79] pri temperaturama ispod 0°C . Također, sama guma kao materijal vrlo je vjerojatno otpornija

na djelovanje smrzavanja od prirodnog agregata te je moguć i mehanizam u kojemu guma zbog svoje veće elastičnosti prima na sebe unutarnje tlakove uzrokovane povećanjem volumena prelaskom vode u led, čime se pod utjecajem razornog tlaka rasterećuje okolna cementa pasta. Opisani mehanizam sprječava i preuranjenu pojavu pukotina u betonu [4], što je povezano i s poboljšanjem uporabljivosti materijala. Bitno je istaknuti i da se guma može koristiti za postizanje otpornosti na smrzavanje, čime se mogu ostvariti i određene uštede vezano uz smanjenje kemijskih dodataka koji su potrebni da bi se takav beton mogao koristiti u okolišu u kojem postoji opasnost od korozije uzrokovane smrzavanjem i odmrzavanjem.

Primjena betona s gumom moguća je i u konstrukcijskim elementima i to u područjima gdje je betonska konstrukcija izložena djelovanju smrzavanja i odmrzavanja, kao npr. kod vanjskih elemenata konstrukcije koji mogu biti u dodiru sa soli za odmrzavanje poput vanjskih stupova ili zidova gdje je specifična pojava prskanja vode s prometnih površina. Prema normama HRN 1128:2007 [177] i HRN EN 206:2021 [183] riječ je o razredima izloženosti XF2 i XF4 u kojima beton može biti u dodiru s agresivnim medijem poput soli ili sulfata, što dovodi do zaključka o pozitivnom utjecaju primjene gume kao zamjene za prirodni agregat na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

6.3.5 Otpornost na izlaganje visokim temperaturama

Tijekom postupka sušenja masa uzoraka mjerena je svakodnevno (Slika 6.26). Cilj je bio postići promjenu mase manju od 0,1 % kako bi se dobili uzorci osušeni do stalne mase. Nakon postignute željene vlažnosti uzoraka manje od 0,1 % uzorci su izloženi visokim temperaturama.



Slika 6.26 Primjer tijeka sušenja - uzorci betonska mješavine SCC-15CR-5SLF

Vremensko razdoblje sušenja većine betonskih uzoraka do stalne mase iznosio je 7-9 dana, dok je najveći gubitak mase zabilježen u prva 2-4 dana sušenja.

A) Fizikalna svojstva

A1) Vizualna opažanja

Eksplzivno pucanje betonskih uzoraka tijekom izlaganja visokim temperaturama

Prilikom izlaganja uzoraka visokim temperaturama kod niti jednog uzorka nije se pojavilo eksplozivno pucanje, što je u skladu s prethodnim istraživanjem [83] i što je bilo očekivano jer su poštivane preporuke RILEM-a [180] vezane za porast temperature na površini uzoraka te za postupak sušenja uzoraka. Ujednačeni i blagi porast temperature od 0,5 °C/min te dugotrajan proces sušenja uzoraka do vlažnosti uzoraka manje od 0,1 % doprinijeli su takvom ponašanju betonskih uzoraka prilikom njihovog izlaganja visokim temperaturama.

Površinsko ljuštenje betonskih uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama

Uzorci betona bez gume pokazali su blago površinsko ljuštenje, dok kod uzoraka s gumom ljuštenje nije bilo prisutno. Slično ponašanje betonskih uzoraka s gumom uočeno je i u ispitivanju koje su proveli Hernandez-Olivares i Barluenga [86], gdje je uočeno smanjenje površinskog ljuštenja zahvaljujući dodavanju gumenog agregata. Smanjenje površinskog ljuštenja može se objasniti pojavom praznina nastalih na mjestima izgorjele gume koja se nalazi blizu površine uzoraka, što posljedično dovodi do smanjenja unutarnjih tlačnih naprezanja u betonskom uzorku prouzročenih plinovima i vodenom parom. Na taj način površinska struktura betona ostaje očuvana čime je moguće poboljšati svojstva trajnosti betona i armature u vidu smanjenog broja pukotina, očuvanja zaštitnog sloja, a samim time i bolje zaštite armature u nosivim konstrukcijskim elementima tijekom izlaganja visokim temperaturama ili požaru.

Pojava pukotina nakon izlaganja visokim temperaturama

Nakon izlaganja visokim temperaturama karakteristična je pojava pukotina kod betonskih uzoraka referentne mješavine SCC-0CR-0SLF i to pri temperaturama 400 °C, 600 °C i 800 °C. Nakon izlaganja uzoraka temperaturama od 400 °C i 600 °C pukotine su se pojavile na dnu uzorka ([Slika 6.27](#)), dok su se nakon izlaganja temperaturi od 800 °C pukotine pojavile po cijeloj visini betonskog uzorka ([Slika 6.28](#)). Broj pukotina betonskih uzoraka referentne mješavine povećava se povećanjem temperature kojoj su uzorci izloženi. Prema [184] u trenutku zagrijavanja uzoraka kalcijev oksid (CaO) prelazi u kalcijev hidroksid Ca(OH)₂ koji prolazi kroz pore, što dovodi do povećanja volumena i rezultira pojavom većih pukotina. Kod uzoraka betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF nisu uočene pukotine nakon izlaganja visokim temperaturama, što nije u skladu s prethodnim istraživanjima gdje su uzorci referentne mješavine i mješavina s različitim udjelima gume imali vidljive pukotine na površini uzoraka i nakon izlaganja temperaturama od 600 °C i 800 °C [83], [85], [87]. Različito ponašanje betonskih uzoraka moguće je objasniti na sljedeći način:

- Dugotrajniji postupak sušenja uzoraka u usporedbi s provedenim istraživanjima drugih autora, što može dovesti do zaključka da je, u usporedbi s prethodnim istraživanjima, manja količina apsorbirane vode prisutna u porama betonskih uzoraka prije početka ispitivanja uzoraka, što posljedično dovodi do manjih unutarnjih naprezanja, a samim time i do manjeg broja pukotina na površini uzoraka nakon izlaganja uzoraka visokim temperaturama.
- Prirast toplinskog opterećenja, tj. režim zagrijavanja uzoraka, u ovom je istraživanju sukladno preporukama RILEM-a [180] bio $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, dok je u prethodnim istraživanjima bio $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ i $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ [83], [84], što također može igrati ulogu u pojavi pukotina jer u manje vremena slična količina vode koja se nalazi u vezanom ili nevezanom obliku u uzorku treba ispariti stvarajući na taj način veće porne tlakove, što dovodi do stvaranja većeg broja pukotina.

Slično kao i kod postupka površinskog ljuštenja, smanjeni broj pukotina kod betonskih uzoraka s gumom doprinosi poboljšanju trajnosti betona kroz očuvanje površinske strukture betonskih uzoraka, a samim time i kroz očuvanje debljine zaštitnog sloja betona, što može spriječiti prodor atmosferilija i agresivnih tvari u unutarnju strukturu betona nakon što je isti bio izložen visokim temperaturama, štiteći na taj način armaturu od vanjskih utjecaja. S druge strane, uspoređujući relativni odnos tlačne čvrstoće betonskih uzoraka pri sobnoj temperaturi i preostale tlačne čvrstoće betonskih uzoraka nakon njihovog izlaganja visokim temperaturama, postotno smanjenje tlačne čvrstoće betonskih uzoraka s gumom bit će manje u odnosu na smanjenje tlačne čvrstoće betonskih uzoraka bez gume, što predstavlja potencijal i u očuvanju mehaničkih svojstava betona.



Slika 6.27 Pojava pukotina na dnu uzoraka referentne betonske mješavine ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $600\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Slika 6.28 Pojava pukotina po cijeloj visini uzorka referentne betonske mješavine ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Promjena boje

Površina betonskih uzoraka kontrolirana je vizualnim pregledom nakon izlaganja visokim temperaturama. Na [Slikama 6.29 – 6.32](#) prikazana je promjena boje betonskih uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama.



Slika 6.29 Promjena boje ispitanih betonskih uzoraka



Slika 6.30 Promjena boje uzoraka referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF



Slika 6.31 Promjena boje uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0SLF



Slika 6.32 Promjena boje uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF

Slično kao i kod prijašnjih ispitivanja betona s gumom [83], [87] nakon izlaganja uzoraka visokim temperaturama od 200 °C, 400 °C i 600 °C uzorci poprimaju ružičasto-sivu boju ili tamnije nijanse sive boje. U slučaju izlaganja uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF temperaturi od 400 °C siva boja uzorka ne postaje ružičasta niti tamnije siva, nego prelazi u smeđe-sivu boju sa smeđim mrljama, što je objašnjivo izgaranjem veće količine reciklirane gume koja u sebi sadrži i ugljik [83]. Izlaganjem uzoraka temperaturi od 800 °C boja betona mijenja se iz normalne u bjelkasto-sivu neovisno je li reciklirana guma jedna od komponenti betonske mješavine ili nije te se može zaključiti da je kod betonskih mješavina s gumom pri temperaturi od 800 °C raspadanje gume postignuto u osjetno većoj mjeri nego kod betonskih uzoraka s gumom izlaganih manjim temperaturama [83].

U Tablici 6.14 dan je prijedlog za vizualno prepoznavanje stanja betona nakon izloženosti visokim temperaturama. Na temelju dane tablice moguće je utvrditi kojoj je temperaturi beton bio izložen.

Tablica 6.14 Prijedlog vizualnog prepoznavanja stanja betona nakon izloženosti visokim temperaturama

Temperatura izloženosti	Boja betonskih uzoraka		
	SCC-0CR-0SLF	SCC-10CR-0SLF	SCC-15CR-5SLF
Sobna temperatura	svijetlo siva	svijetlo siva	svijetlo siva
200 °C	ružičasto-siva	ružičasto-siva	ružičasto-siva
400 °C	smeđe-siva	smeđe-siva	smeđe-siva sa smeđim mrljama
600 °C	tamno siva	tamno siva	tamno siva
800 °C	bjelkasto siva	bjelkasto-siva	bjelkasto-siva

Izgaranje i pojava dima

Prilikom izlaganja uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF temperaturama većim od 400 °C uočena je pojava dima, što je objašnjivo procesom raspadanja i izgaranja veće količine reciklirane gume na temperaturama većim od temperature tališta gume zbog njezinog organskog porijekla koje uglavnom čine ugljik i vodik [85]. O pojavi dima prilikom ispitivanja otpornosti betona s gumom na visoke temperature nije pisano niti u jednom od dosadašnjih istraživanja. Kod izlaganja uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0SLF temperaturama većim od 400 °C količina je dima zanemariva, kao i kod referentne mješavine SCC-0CR-0SLF. U pogledu sigurnosti korisnika građevine koja je potencijalno izrađena od nosivih armiranobetonskih elemenata s gumom, 10 %-tna zamjena prirodnog agregata gumom predstavlja optimalan postotak zamjene kako zdravlje ljudi prilikom pojave izvanrednog opterećenja poput požara ili visokih temperatura ne bi bilo dodatno ugroženo. Ipak, treba uzeti u obzir da se u npr. stambenim objektima rijetko koristi nosiva konstrukcija bez dodatnih slojeva poput produžne žbuke s unutarnje strane ili slojeva toplinske izolacije s vanjske strane, stoga se može pretpostaviti da u ranim fazama požara pojava dima niti ne bi imala presudnu ulogu u ugrozi zdravlja korisnika zgrada jer je velika vjerojatnost da bi korisnici zgrade u trenutku izloženosti nosive konstrukcije toplinskom opterećenju već bili evakuirani. Svakako se predlaže dodatno ispitivanje utjecaja izgaranja gume i pojave dima pri većim postotnim zamjena prirodnog agregata gumom s obzirom na namjenu građevine u kojoj bi se koristio beton te vrste.

A2) Gubitak mase

Masa svih ispitnih uzoraka mjerena je prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama. Rezultati mjerenja prikazani su u [Tablicama 6.15 – 6.19](#). Od 6 ispitanih uzoraka prosječni gubitak mase nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama prikazan je na [Slici 6.33](#). Nadalje, od 6 ispitanih uzoraka na [Slici 6.34](#) prikazana je prosječna preostala masa nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama.

Tablica 6.15 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=200$ °C)

Mješavina	Uzorak	m (kg) ($T = 20$ °C)	m (kg) ($T = 200$ °C)	Δm (kg)	$\Delta m_{\text{prosijek}}$ (kg)
SCC-0CR-0SLF	1	12,340	12,225	0,115	0,1378
	2	12,278	12,135	0,143	
	3	12,191	12,045	0,146	
	4	12,028	11,885	0,143	
	5	12,250	12,110	0,140	
	6	12,010	11,870	0,140	
SCC-10CR-0SLF	1	11,567	11,405	0,162	0,1425
	2	11,461	11,315	0,146	
	3	11,468	11,325	0,143	
	4	11,403	11,255	0,148	
	5	11,400	11,275	0,125	
	6	11,506	11,375	0,131	
SCC-15CR-5SLF	1	11,210	10,980	0,230	0,2250
	2	11,146	10,915	0,231	
	3	10,994	10,780	0,214	
	4	11,099	10,870	0,229	
	5	11,239	11,010	0,229	
	6	10,967	10,750	0,217	

Tablica 6.16 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama ($T=400$ °C)

Mješavina	Uzorak	m (kg) ($T = 20$ °C)	m (kg) ($T = 400$ °C)	Δm (kg)	$\Delta m_{\text{prosijek}}$ (kg)
SCC-0CR-0SLF	1	12,205	11,905	0,300	0,3130
	2	12,210	11,888	0,322	
	3	12,255	11,935	0,320	
	4	12,345	12,005	0,340	
	5	12,120	11,821	0,299	
	6	12,150	11,853	0,297	
SCC-10CR-0SLF	1	11,450	11,085	0,365	0,3610
	2	11,305	10,955	0,350	
	3	11,400	11,039	0,361	
	4	11,405	11,050	0,355	
	5	11,430	11,075	0,355	
	6	11,385	11,005	0,380	
SCC-15CR-5SLF	1	11,045	10,470	0,575	0,5267
	2	10,815	10,340	0,475	
	3	10,950	10,440	0,510	
	4	11,140	10,600	0,540	
	5	11,190	10,655	0,535	
	6	10,970	10,445	0,525	

Tablica 6.17 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama (T=600 °C)

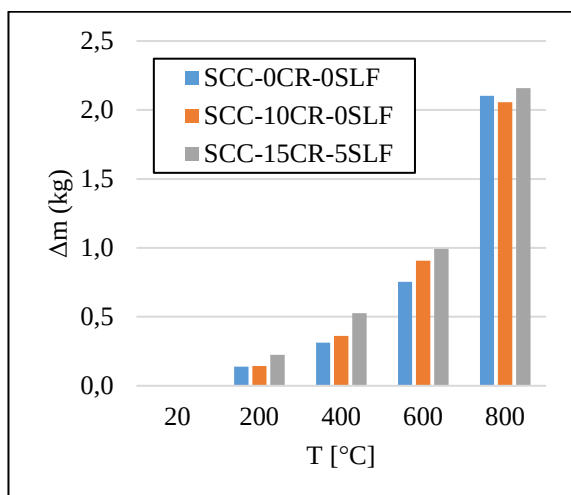
Mješavina	Uzorak	m (kg) (T = 20 °C)	m (kg) (T = 600 °C)	Δm (kg)	$\Delta m_{\text{prosjeck}}$ (kg)
SCC-0CR-0SLF	1	12,244	11,560	0,684	0,7542
	2	12,246	11,466	0,780	
	3	12,167	11,401	0,766	
	4	12,285	11,465	0,820	
	5	12,269	11,552	0,717	
	6	12,256	11,498	0,758	
SCC-10CR-0SLF	1	11,383	10,420	0,963	0,9073
	2	11,216	10,513	0,703	
	3	11,459	10,250	1,209	
	4	11,416	10,549	0,867	
	5	11,324	10,484	0,840	
	6	11,485	10,623	0,862	
SCC-15CR-5SLF	1	11,137	10,177	0,960	0,9942
	2	11,346	10,330	1,016	
	3	11,080	10,100	0,980	
	4	11,254	10,254	1,000	
	5	11,265	10,252	1,013	
	6	11,181	10,185	0,996	

Tablica 6.18 Masa ispitanih uzoraka prije i nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama (T=800 °C)

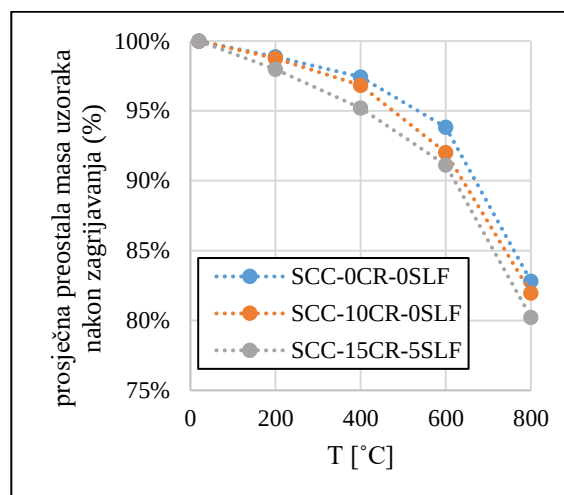
Mješavina	Uzorak	m (kg) (T = 20 °C)	m (kg) (T = 800 °C)	Δm (kg)	$\Delta m_{\text{prosjeck}}$ (kg)
SCC-0CR-0SLF	1	12,315	10,200	2,115	2,1025
	2	12,270	10,160	2,110	
	3	12,235	10,125	2,110	
	4	12,195	10,080	2,115	
	5	12,245	10,165	2,080	
	6	12,135	10,050	2,085	
SCC-10CR-0SLF	1	11,375	9,235	2,140	2,0567
	2	11,485	9,345	2,140	
	3	11,255	9,140	2,115	
	4	11,445	9,470	1,975	
	5	11,480	9,515	1,965	
	6	11,415	9,410	2,005	
SCC-15CR-5SLF	1	10,995	8,730	2,265	2,1592
	2	10,875	8,855	2,020	
	3	10,950	8,825	2,125	
	4	10,780	8,675	2,105	
	5	11,030	8,715	2,315	
	6	10,910	8,785	2,125	

Tablica 6.19 Prosječno smanjenje masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama

Mješavina	Δm (kg)				
	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
SCC-0CR-0SLF	0	0,1378	0,3130	0,7542	2,1025
SCC-10CR-0SLF	0	0,1425	0,3610	0,9073	2,0567
SCC-15CR-5SLF	0	0,2250	0,5267	0,9942	2,1592



Slika 6.33 Prosječno smanjenje masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama



Slika 6.34 Prosječna preostala masa uzoraka nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama

Prosječna preostala masa uzoraka referentnih mješavina SCC-0CR-0SLF izloženih temperaturama od 200 °C, 400 °C, 600 °C i 800 °C iznosi 99 %, 97 %, 94 % i 83 %. Slične, ali ipak nešto manje, prosječne preostale mase uzoraka uočene su kod preostale dvije betonske mješavine, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Kod mješavine SCC-10CR-0SLF prosječna preostala masa uzoraka izloženih temperaturama od 200 °C, 400 °C, 600 °C i 800 °C iznosi 99 %, 97 %, 92 % i 82 %, dok kod mješavine SCC-15CR-5SLF prosječna preostala masa uzoraka izloženih istim temperaturama iznosi 98 %, 95 %, 91 % i 80 %. Dobiveni su rezultati slični rezultatima istraživanja drugih autora [84], [87]. Takvo ponašanje, gdje postoji nešto veći gubitak mase kod betonskih uzoraka s gumom, može se objasniti izgaranjem i raspadanjem reciklirane gume pri temperaturama većim od njezinog tališta, što posljedično dovodi do povećanog gubitka mase betonskih uzoraka. Gubitak mase pri manjim temperaturama do 150 °C prisutan je i zbog isparavanja kapilare vode i vode koja se nalazi u C-S-H gelu. Pri većim temperaturama voda koja se otpušta kemijski je vezana voda te je za nju karakteristično što se otpušta iz betona prilikom raspadanja kalcijevog hidrata na kalcijev oksid i vodu [84]. Ipak, potrebno je napomenuti da su razlike u gubitcima mase betona s gumom u usporedbi s referentnim betonom poprilično niske. Najveći pad prosječne preostale mase za sve mješavine uočava se između temperatura 600 °C i 800 °C. Pri 512 °C kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) rasпада se na vodu (H_2O) i kalcijev oksid (CaO) [185] te je logično da se najveći pad prosječne preostale mase uočava između

navedenih temperatura jer vrijednost gubitka mase ovisi o duljini trajanja temperaturnog opterećenja [186], [187], a što su uzorci duže izloženi određenoj temperaturi, to struktura betona više slabi, što se primjećuje i pojavom smanjenja mase uzoraka. Može se zaključiti da sastav betonske mješavine, koji je djelomično izmijenjen dodavanjem gume kao zamjenskog materijala prirodnom agregatu i silicijske prašine kao zamjenskog materijala cementu, nema izraženijeg utjecaja na povećanje ili smanjenje gubitka mase uzoraka prilikom izlaganja istih visokim temperaturama. Smanjenje mase indikator je promjene unutrašnje strukture betona. Povećanjem temperature kojoj je beton izložen smanjuje se i masa, što ukazuje na povećanje poroznosti betona, a samim time i na smanjenje mehaničkih svojstava betona, kao što su njegova tlačna čvrstoća i modul elastičnosti s obzirom da su vrijednosti navedenih mehaničkih svojstava obrnuto proporcionalne s poroznošću betona.

A3) Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak (UPV)

Mjerenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kao jedne od nerazornih metoda ispitivanja ima velik potencijal za ispitivanje konstrukcijskih elemenata izloženih visokim temperaturama i požaru. Povezivanje vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa s procjenom preostalih mehaničkih svojstava betona izloženih visokim temperaturama predstavlja bitan parametar za utvrđivanje maksimalne temperature kojoj je beton izložen prilikom djelovanja visokih temperatura na uzorak. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak mjerena je na svih 6 uzoraka valjaka i to po 3 mjerenja na svakom uzorku. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa ispitana je 24 sata nakon što su se uzorci ohladili na sobnu temperaturu, ali prije ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kako bi uzorci bili cjeloviti i neoštećeni (Slika 6.35). Do trenutka ispitivanja, tj. u navedenih 24 sata nakon hlađenja uzoraka, uzorci su čuvani u laboratorijskim uvjetima prosječne temperature 20 ± 2 °C i relativne vlažnosti 30 ± 5 %. Razina povećanja mase uzoraka uslijed apsorpcije vlage u navedenom je razdoblju zanemariva.



Slika 6.35 Mjerenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa na betonskim uzorcima valjaka

Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) kroz uzorke koji su prethodno izloženi različitim temperaturama izloženi su u [Tablicama 6.20 - 6.24](#) i na [Slici 6.36](#).

Tablica 6.20 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Mješavina	Uzorak	h (mm)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	t_3 (μs)	t_{prosjeck} (μs)	UPV (m/s)	UPV _{prosjeck} (m/s)
SCC-0CR- OSLF	1	299	61,6	69	63,9	64,83	4611,83	4930,74
	2	297	59,5	59,6	59,4	59,50	4991,60	
	3	298	59,6	59,5	59,4	59,50	5008,40	
	4	299	60,3	60,5	60,1	60,30	4958,54	
	5	297	59,2	59,5	59	59,23	5014,07	
	6	298	59,8	59,7	59,3	59,60	5000,00	
SCC-10CR- OSLF	1	300	72,6	72,5	72,6	72,57	4134,13	4325,28
	2	299	69,1	69,3	69,1	69,17	4322,89	
	3	298	66,4	67,3	67,8	67,17	4436,72	
	4	296	67,8	67,3	68	67,70	4372,23	
	5	298	68,2	68,8	68,3	68,43	4354,60	
	6	300	69,1	69,2	69,5	69,27	4331,09	
SCC-15CR- 5SLF	1	296	71,3	71,7	75,3	72,77	4067,80	4090,53
	2	297	72,8	78,9	78,3	76,67	3873,91	
	3	296	71,3	71,3	71	71,20	4157,30	
	4	299	72,3	72,5	72,4	72,40	4129,83	
	5	297	71,6	71,3	71,5	71,47	4155,78	
	6	299	72	71,9	71,8	71,90	4158,55	

Tablica 6.21 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Mješavina	Uzorak	h (mm)	t_1 (μs)	t_2 (μs)	t_3 (μs)	t_{prosjeck} (μs)	UPV (m/s)	UPV _{prosjeck} (m/s)
SCC-0CR- OSLF	1	299	65,7	65,7	65,5	65,63	4555,61	4441,18
	2	298	67,2	67	67	67,07	4443,34	
	3	298	67,3	67,8	67,8	67,63	4406,11	
	4	295	65,6	67,5	66,9	66,67	4425,00	
	5	295	67	67,5	66,8	67,10	4396,42	
	6	295	66,4	66,5	67,3	66,73	4420,58	
SCC-10CR- OSLF	1	298	74,3	73,7	74,3	74,10	4021,59	3979,19
	2	297	76,4	75,1	75,4	75,63	3926,84	
	3	298	73,9	73,4	73,7	73,67	4045,25	
	4	300	75,4	74,8	74,9	75,03	3998,22	

	5	297	75,8	75,3	75,2	75,43	3937,25	
	6	297	75,2	75,6	75	75,27	3945,97	
SCC-15CR-5SLF	1	298	79,3	79,5	80,3	79,70	3739,02	3754,96
	2	299	78,3	78,8	79,1	78,73	3797,63	
	3	299	79,7	82,1	79,7	80,50	3714,29	
	4	297	85,1	77,2	78,2	80,17	3704,78	
	5	299	77,8	78,2	77,9	77,97	3834,97	
	6	299	79,9	79,8	80,2	79,97	3739,06	

Tablica 6.22 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke (T = 400 °C)

Mješavina	Uzorak	h (mm)	t ₁ (μs)	t ₂ (μs)	t ₃ (μs)	t _{prosjeak} (μs)	UPV (m/s)	UPV _{prosjeak} (m/s)
SCC-0CR-0SLF	1	300	79,3	79,2	79,5	79,33	3781,51	3805,65
	2	300	80,1	79,8	79,9	79,93	3753,12	
	3	299	78,2	78,5	78,9	78,53	3807,30	
	4	299	80,1	78	78,2	78,77	3796,02	
	5	298	77,2	77,3	78	77,50	3845,16	
	6	301	78,7	78	77,8	78,17	3850,75	
SCC-10CR-0SLF	1	299	86	84,7	84,2	84,97	3519,03	3433,98
	2	298	86	87	87	86,67	3438,46	
	3	301	86,7	87,2	87,3	87,07	3457,12	
	4	299	88,6	88,6	88,9	88,70	3370,91	
	5	295	86,5	87,3	86,7	86,83	3397,31	
	6	299	87,5	87,4	87,3	87,40	3421,05	
SCC-15CR-5SLF	1	299	101,3	98,3	99	99,53	3004,02	3070,44
	2	298	95,6	95,5	95,6	95,57	3118,24	
	3	299	96,5	97	97,4	96,97	3083,53	
	4	300	97,5	97,6	97,3	97,47	3077,98	
	5	300	96,3	97,1	96,8	96,73	3101,31	
	6	299	98,3	98,9	98,1	98,43	3037,59	

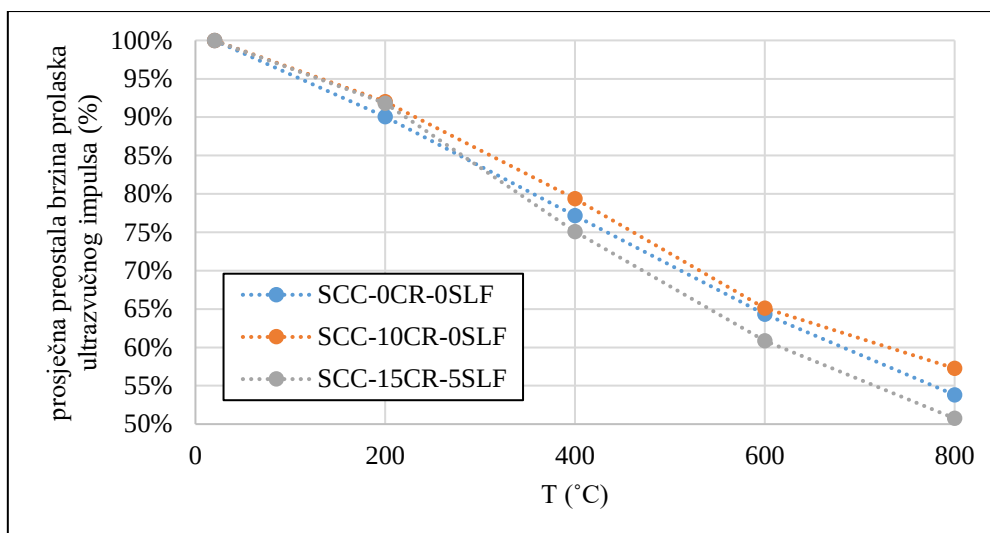
Tablica 6.23 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke (T = 600 °C)

Mješavina	Uzorak	h (mm)	t ₁ (μs)	t ₂ (μs)	t ₃ (μs)	t _{prosjeak} (μs)	UPV (m/s)	UPV _{prosjeak} (m/s)
SCC-0CR-0SLF	1	300	94,1	94	94,5	94,20	3184,71	3170,77
	2	300	92,7	92,6	92,8	92,70	3236,25	
	3	300	95	95,5	95,8	95,43	3143,56	
	4	301	95,5	95,6	95,8	95,63	3147,44	
	5	300	95,7	95,5	95,5	95,57	3139,17	

	6	300	94,4	94,7	94,5	94,53	3173,48	
SCC-10CR- 0SLF	1	298	105,4	106,5	105,5	105,80	2816,64	2815,41
	2	299	106,1	106,8	106,9	106,60	2804,88	
	3	300	106,6	106	105,5	106,03	2829,30	
	4	298	105,6	106,1	106,9	106,20	2806,03	
	5	299	106,7	106,9	106,5	106,70	2802,25	
	6	301	105,7	106,8	106,2	106,23	2833,39	
SCC-15CR- 5SLF	1	300	120	120,9	121,2	120,70	2485,50	2489,31
	2	301	119,3	120,8	121,1	120,40	2500,00	
	3	298	119,6	121,5	118,2	119,77	2488,17	
	4	299	120,1	119,2	120,8	120,03	2490,97	
	5	300	121,1	122,2	121,1	121,47	2469,81	
	6	300	118,9	120,2	120,7	119,93	2501,39	

Tablica 6.24 Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Mješavina	Uzorak	h (mm)	t ₁ (μs)	t ₂ (μs)	t ₃ (μs)	t _{prosjeak} (μs)	UPV (m/s)	UPV _{prosjeak} (m/s)
SCC-0CR- 0SLF	1	299	111	111,5	111,7	111,40	2684,02	2653,37
	2	300	110,9	110,5	110,7	110,70	2710,03	
	3	299	114,5	114,7	114,3	114,50	2611,35	
	4	299	114,8	114,3	114,8	114,63	2608,32	
	5	300	112,8	112,3	112,1	112,40	2669,04	
	6	299	113,6	113,2	113,3	113,37	2637,46	
SCC-10CR- 0SLF	1	299	120,9	120,7	120,7	120,77	2475,85	2476,88
	2	300	119,7	120,1	120	119,93	2501,39	
	3	300	120,5	120,1	120,3	120,30	2493,77	
	4	299	120,8	121,1	120,3	120,73	2476,53	
	5	299	122,3	122,5	122	122,27	2445,47	
	6	298	120,5	120,8	120,9	120,73	2468,25	
SCC-15CR- 5SLF	1	300	145,2	145,1	145,5	145,27	2065,17	2075,88
	2	300	144	141,8	144,1	143,30	2093,51	
	3	300	144,8	145,2	144,9	144,97	2069,44	
	4	299	143,7	143,5	144,9	144,03	2075,91	
	5	300	143,7	143,5	143,4	143,53	2090,11	
	6	299	145,5	144,5	145,2	145,07	2061,12	



Slika 6.36 Grafički prikaz prosječne preostale brzine prolaska ultrazvučnog impulsa nakon izloženosti uzoraka visokim temperaturama

Najveće vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa su za sve ispitane betonske uzorke uočene prilikom ispitivanja iste pri sobnoj temperaturi (20 °C), dok su najmanje vrijednosti uočene prilikom ispitivanja uzoraka valjaka prethodno izloženih temperaturi od 800 °C. Uspoređujući vrijednosti prosječne brzine prolaska ultrazvučnog impulsa između tri ispitane betonske mješavine, najveće vrijednosti uočene su kod referentne mješavine SCC-0CR-0SLF, neovisno o temperaturi kojoj su uzorci prije ispitivanja bili izloženi. U odnosu na referentnu mješavinu SCC-0CR-0SLF smanjenje u vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa je za uzorke betonske mješavine SCC-10CR-0SLF najveće prilikom ispitivanja provedenih na uzorcima koji nisu bili izloženi visokim temperaturama i iznosi 12 %, dok je ista razlika za uzorke betonske mješavine SCC-15CR-5SLF najveća prilikom ispitivanja provedenih na uzorcima koji su bili izloženi visokim temperaturama od 800 °C i iznosi 22 %. Relativni pad vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kod uzoraka prethodno izloženih temperaturi od 200 °C najmanji je za betonske mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF i iznosi 8 % za obje vrste betona, dok za referentnu mješavinu SCC-0CR-0SLF istoimeni pad iznosi 10 %. Najmanja razlika između vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa uzoraka betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF i SCC-10CR-0SLF uočava se kod uzoraka izloženih visokim temperaturama od 800 °C i ona iznosi 7 %, dok se najmanja razlika između vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa uzoraka betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF uočava kod uzoraka izloženih visokim temperaturama od 200 °C i ona iznosi 15 %. Uspoređujući vrijednosti prosječne brzine prolaska ultrazvučnog impulsa između betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF, veće su vrijednosti uočene kod uzoraka koji pripadaju betonskoj mješavini SCC-10CR-0SLF, neovisno o temperaturi kojoj su uzorci prethodno bili izloženi. Razlika u brzini prolaska ultrazvučnog impulsa za promatrane dvije mješavine koje su predmet usporedbe varira između 5 % i 16 %. Pad UPV-a povećanjem temperature, kao i pad istog svojstva povećanjem udjela gume u betonu,

uočen je i kod drugih autora [84], [85]. Rezultati istraživanja i pad brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonske uzorke ukazuju na značajniju štetu cementne paste prouzrokovanu negativnim utjecajem visokih temperatura na strukturu betonskih uzoraka. U usporedbi s referentnom mješavinom SCC-0CR-0SLF glavni razlog smanjenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa može se pripisati recikliranoj gumi te visini postotka zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom. Što je veći postotak zamjene prirodnog agregata gumom, to su manje vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonski uzorak.

Ta se pojava može objasniti činjenicom da guma ima manju specifičnu težinu od prirodnog agregata [11], posljedično povećavajući vrijeme potrebno ultrazvučnom impulsu da prođe kroz betonski uzorak. Ukoliko su uzorci izlagani visokim temperatura većim od 200 °C, tj. temperaturama od 400 °C, 600 °C i 800 °C, pojava smanjenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa može se objasniti povećanim brojem diskontinuiteta i zračnih šupljina unutar betonskih uzoraka nastalih zbog djelovanja visokih temperatura na betonske uzorke i izgaranjem reciklirane gume [84], [85]. Kako bi se prema brzini prolaska ultrazvučnog vala ocijenila kvaliteta betona starosti 365 dana nakon izlaganja visokim temperaturama, dobivene vrijednosti prosječnih brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke (Tablica 6.25) uspoređene su s vrijednostima danim u Tablici 6.26.

Tablica 6.25 Ocjena kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnog impulsa prema normi ASTM C597 [166]

UPV (m/s)	Kvaliteta betona
> 4500	Odlična
3600 – 4500	Vrlo dobra
3000 – 3600	Dobra
2100 – 3000	Općenito loša
< 2100	Iznimno loša / Slab beton

Tablica 6.26 Prosječne preostale brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke nakon izlaganja visokim temperaturama uspoređene s graničnim vrijednostima danim u normi ASTM C597 [166]

T (°C)	SCC-0CR-0SLF	Kvaliteta betona	SCC-10CR-0SLF	Kvaliteta betona	SCC-15CR-5SLF	Kvaliteta betona
20	4930,74	Odlična	4325,28	Vrlo dobra	4090,53	Vrlo dobra
200	4441,18	Vrlo dobra	3979,19	Vrlo dobra	3754,96	Vrlo dobra
400	3805,65	Vrlo dobra	3433,98	Dobra	3070,44	Dobra
600	3170,77	Dobra	2815,41	Općenito loša	2489,31	Općenito loša
800	2653,37	Općenito loša	2476,88	Općenito loša	2075,88	Iznimno loša

Uzimajući u obzir ocjenu kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnog impulsa, zaključuje se da se sve tri mješavine mogu svrstati u razred dobre kvalitete betona do temperature izlaganja od 400 °C, nakon koje kvaliteta betona za mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF postaje općenito ili iznimno loša, dok mješavina SCC-0CR-0SLF i nakon izlaganja temperaturi od 600 °C još uvijek pokazuje dobru kvalitetu. Pad brzine prolaska ultrazvučnog impulsa povećanjem

temperature kojoj su betonski uzorci izloženi u izravnoj je vezi s padom vrijednosti mehaničkih svojstava betona, tj. s padom vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona. Ocjenom kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnog impulsa može se procijeniti koliko je izloženost betona visokim temperaturama utjecala na smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona te na taj način, nerazornom metodom, potencijalno ocijeniti stanje nosivosti AB konstrukcije.

B) Mehanička svojstva (engl. Mechanical response)

Ovo poglavlje namijenjeno je usporedbi rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka nakon njihovog izlaganja visokim temperaturama. Betonski uzorci ispitani su na tlačnoj preši kapaciteta 3000 kN (Slika 6.37). Za potrebe mjerenja deformacija prilikom ispitivanja modula elastičnosti korišteni su ekstenzometri, dok su za iste potrebe prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće i odnosa *naprezanje-deformacija* korišteni LVDT-i.



Slika 6.37 Ispitivanje mehaničkih svojstava betonskih uzoraka: (a) tlačna čvrstoća i odnos *naprezanje-deformacija* (LVDT-i); (b) modul elastičnosti (ekstenzometri)

Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće i odnosa *naprezanje-deformacija* betonski su uzorci u prvom koraku izloženi naprezanju u iznosu od 0,05 MPa, u preporukama RILEM-a definiranog kao razina pred-naprezanja (engl. *pre-load level*) te su potom opterećeni naprezanjem od 0,5 MPa/s do konačnog sloma uzorka. Režim naprezanja uzoraka na kojima je ispitan sekantni modul elastičnosti pri tlaku zadan je normom HRN EN 12390-13:2021 [126]. Iz odnosa *naprezanje-deformacija* za daljnju analizu uzeta su dva parametra:

- tlačna čvrstoća definirana kao maksimalno dosegnuto naprezanje u materijalu tijekom ispitivanja ($f_c = \sigma_{\max}$),
- deformacija (ϵ) pri maksimalnom naprezanju ($\sigma = \sigma_{\max}$).

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka navedeni su u [Tablicama 6.27 - 6.31](#) i na [Slikama 6.38 - 6.44](#), dok je na [Slikama 6.45 - 6.49](#) prikazana usporedba krivulja *naprezanje-deformacija* za 3 uzorka od 3 različite betonske mješavine, za sve ispitne temperature (sveukupno 9 krivulja po jednom grafičkom prikazu).

Tablica 6.27 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka koji nisu izloženi visokim temperaturama ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Mješavina	Svojstvo	Vrijednost	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	E (MPa)	40053,36	41454,86	2377,71	5,74 %
		40111,01			
		44200,20			
SCC-10CR-0SLF		24295,30	26882,57	2246,77	8,36 %
		28010,32			
		28342,09			
SCC-15CR-5SLF		26634,30	27268,08	550,19	2,02 %
		27623,02			
		27546,92			
SCC-0CR-0SLF	$f_c = \sigma_{\max}$ (MPa)	56,39	55,55	1,11	1,99 %
		55,97			
		54,3			
SCC-10CR-0SLF		41,63	40,83	1,43	3,49 %
		41,67			
		39,18			
SCC-15CR-5SLF		33,12	33,42	3,01	9,00 %
		30,58			
		36,57			
SCC-0CR-0SLF	ε (mm/mm) ako je $\sigma = \sigma_{\max}$	0,00500	0,0044	0,0006	13,72 %
		0,00447			
		0,00379			
SCC-10CR-0SLF		0,00454	0,0051	0,0005	9,64 %
		0,00513			
		0,00551			
SCC-15CR-5SLF		0,00686	0,0064	0,0005	7,56 %
		0,00632			
		0,00590			

Tablica 6.28 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 200 °C

Mješavina	Svojstvo	Vrijednost	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	E (MPa)	35641,92	34352,50	1129,82	3,29 %
		33879,63			
		33535,94			
SCC-10CR-0SLF		26199,00	26251,25	45,25	0,17 %
		26277,37			
		26277,37			
SCC-15CR-5SLF		21631,06	21372,97	328,01	1,53 %
		21484,00			
		21003,86			
SCC-0CR-0SLF	$f_c = \sigma_{\max}$ (MPa)	51,97	52,60	0,82	1,55 %
		52,30			
		53,52			
SCC-10CR-0SLF		36,73	38,43	1,67	4,34 %
		40,06			
		38,51			
SCC-15CR-5SLF		33,39	33,52	0,54	1,60 %
		34,11			
		33,06			
SCC-0CR-0SLF	ε (mm/mm) ako je $\sigma = \sigma_{\max}$	0,00451	0,0051	0,0006	12,57 %
		0,00578			
		0,00499			
SCC-10CR-0SLF		0,00518	0,0055	0,0003	5,54 %
		0,00578			
		0,00545			
SCC-15CR-5SLF		0,00558	0,0048	0,0008	17,03 %
		0,00472			
		0,00397			

Tablica 6.29 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 400 °C

Mješavina	Svojstvo	Vrijednost	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	E (MPa)	29890,71	29190,56	792,93	2,72 %
		29351,44			
		28329,53			
SCC-10CR-0SLF		16858,74	16667,61	210,69	1,26 %
		16702,41			
		16441,69			
SCC-15CR-5SLF		12367,69	12551,73	204,78	1,63 %
		12515,16			
		12772,33			
SCC-0CR-0SLF	$f_c = \sigma_{\max}$ (MPa)	35,21	35,89	0,66	1,84 %
		36,53			
		35,93			
SCC-10CR-0SLF		31,8	29,87	1,87	6,25 %

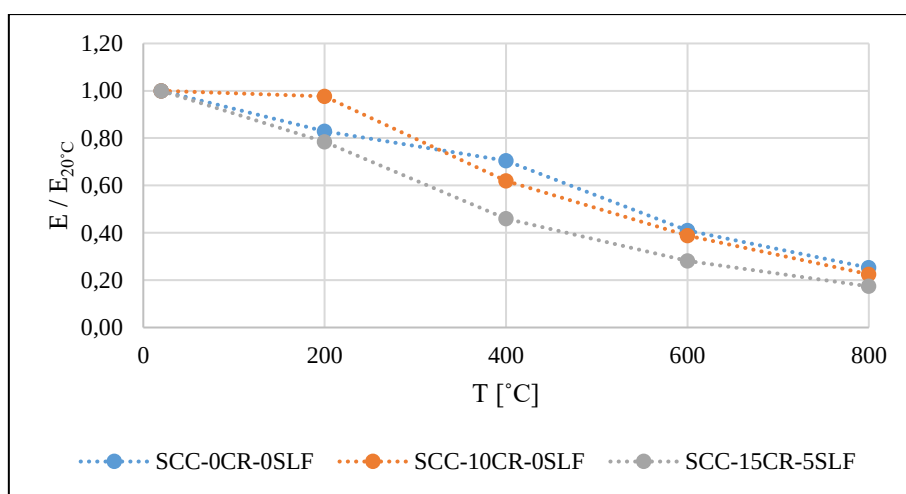
		29,75			
		28,07			
SCC-15CR-5SLF		22,24			
		23,72	21,92	1,98	9,06 %
		19,79			
SCC-0CR-0SLF		0,00334			
		0,00361	0,0037	0,0004	11,57 %
		0,00418			
SCC-10CR-0SLF	ε (mm/mm) ako je $\sigma = \sigma_{\max}$	0,00445			
		0,00431	0,0040	0,0006	16,01 %
		0,00328			
SCC-15CR-5SLF		0,00496			
		0,00436	0,0044	0,0005	11,72 %
		0,00393			

Tablica 6.30 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 600 °C

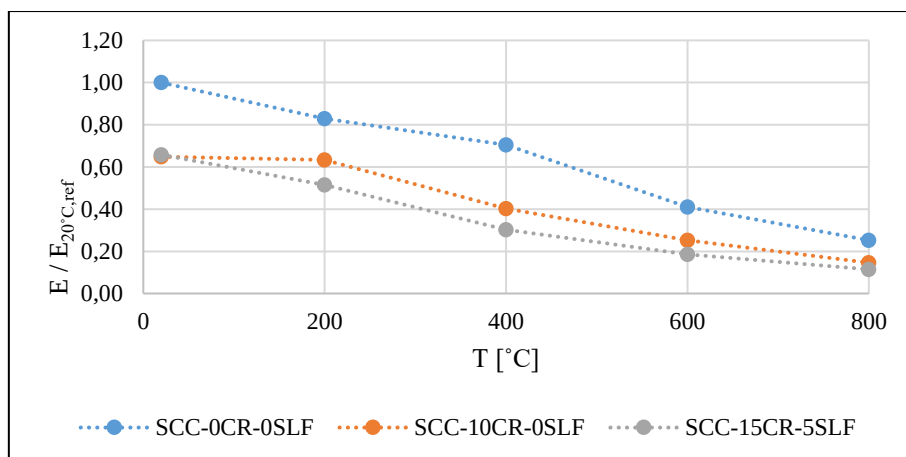
Mješavina	Svojstvo	Vrijednost	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF		17165,51			
		16666,67	17003,44	291,72	1,72 %
		17178,15			
SCC-10CR-0SLF	E (MPa)	10241,72			
		10778,79	10437,80	296,41	2,84 %
		10292,88			
SCC-15CR-5SLF		7594,75			
		8009,42	7673,42	304,38	3,97 %
		7416,10			
SCC-0CR-0SLF		35,14			
		31,11	33,57	2,16	6,43 %
		34,47			
SCC-10CR-0SLF	$f_c = \sigma_{\max}$ (MPa)	22,01			
		19,94	21,57	1,46	6,75 %
		22,75			
SCC-15CR-5SLF		15,67			
		16,33	15,95	0,34	2,15 %
		15,84			
SCC-0CR-0SLF		0,00402			
		0,00470	0,0044	0,0003	7,83 %
		0,00431			
SCC-10CR-0SLF	ε (mm/mm) ako je $\sigma = \sigma_{\max}$	0,00731			
		0,00617	0,0066	0,0007	10,05 %
		0,00617			
SCC-15CR-5SLF		0,00491			
		0,00484	0,0046	0,0004	8,86 %
		0,00416			

Tablica 6.31 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betonskih uzoraka valjaka nakon njihovog izlaganja visokoj temperaturi od 800 °C

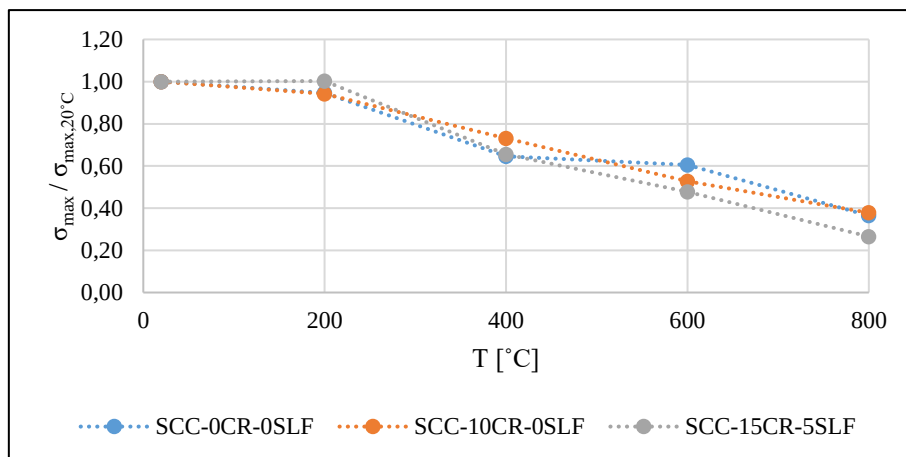
Mješavina	Svojstvo	Vrijednost	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	E (MPa)	10440,06	10470,33	39,09	0,37 %
		10456,47			
		10514,46			
SCC-10CR-0SLF		6104,58	6048,28	129,01	2,13 %
		6139,58			
		5900,69			
SCC-15CR-5SLF		4654,49	4741,43	81,43	1,72 %
		4753,89			
		4815,92			
SCC-0CR-0SLF	$f_c = \sigma_{\max}$ (MPa)	20,22	20,25	1,46	7,21 %
		21,72			
		18,8			
SCC-10CR-0SLF		15,86	15,44	0,79	5,13 %
		15,94			
		14,53			
SCC-15CR-5SLF		7,76	8,88	0,97	10,95 %
		9,34			
		9,53			
SCC-0CR-0SLF	ε (mm/mm) ako je $\sigma = \sigma_{\max}$	0,00723	0,0071	0,0003	4,53 %
		0,00669			
		0,00726			
SCC-10CR-0SLF		0,00464	0,0048	0,0006	11,40 %
		0,00547			
		0,00442			
SCC-15CR-5SLF		0,00348	0,0044	0,0008	18,73 %
		0,00489			
		0,00494			



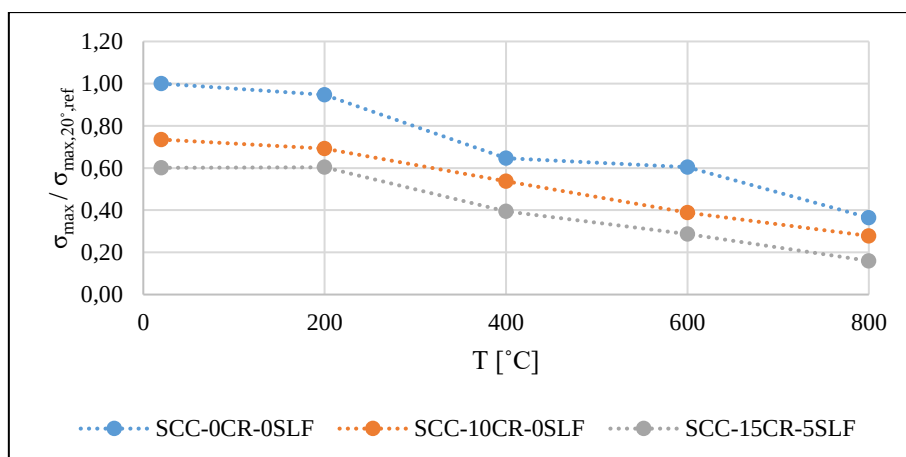
Slika 6.38 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti pri T = 20 °C



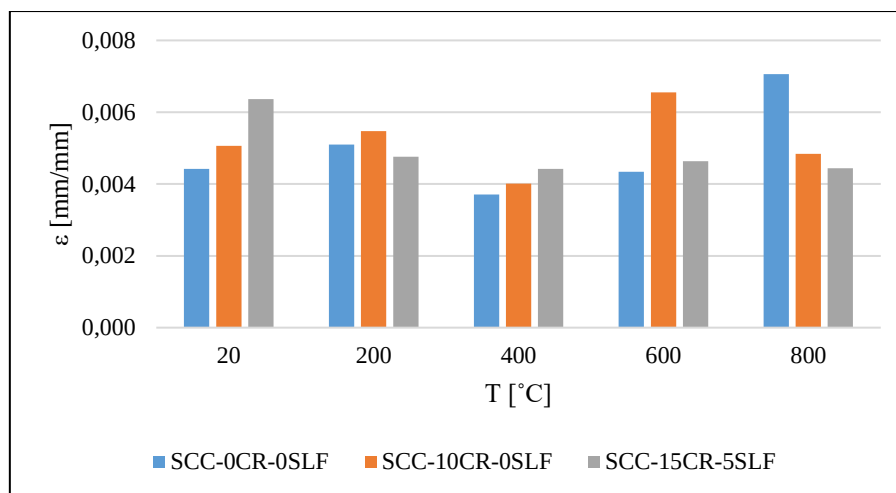
Slika 6.39 Normalizirane vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti referentne mješavine pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



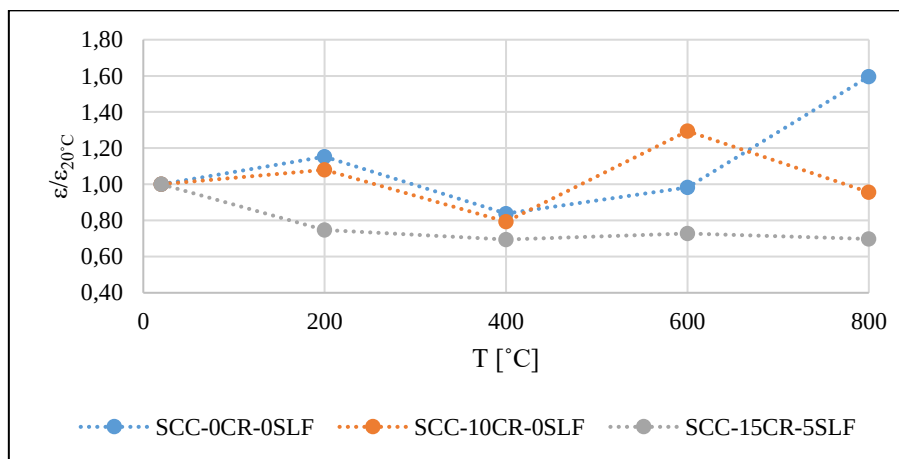
Slika 6.40 Normalizirane vrijednosti tlačnih čvrstoća u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



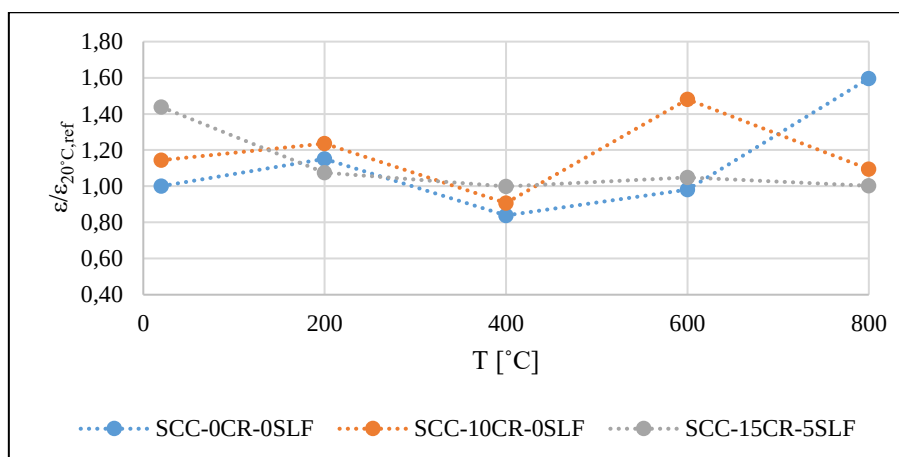
Slika 6.41 Normalizirane vrijednosti tlačnih čvrstoća u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće referentne mješavine pri $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



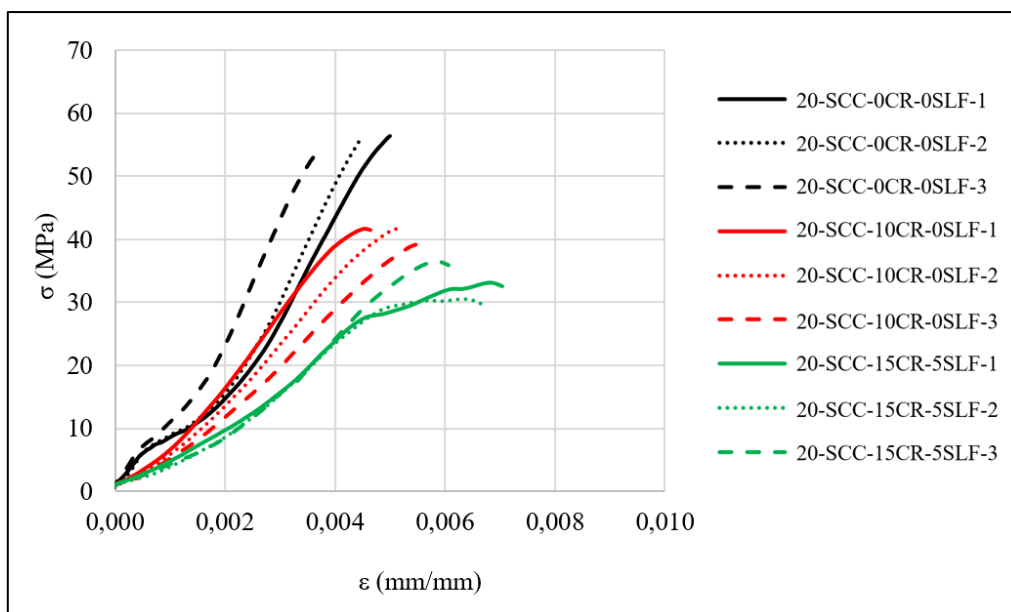
Slika 6.42 Vrijednosti deformacija pri maksimalnom naprezanju pri različitim temperaturama



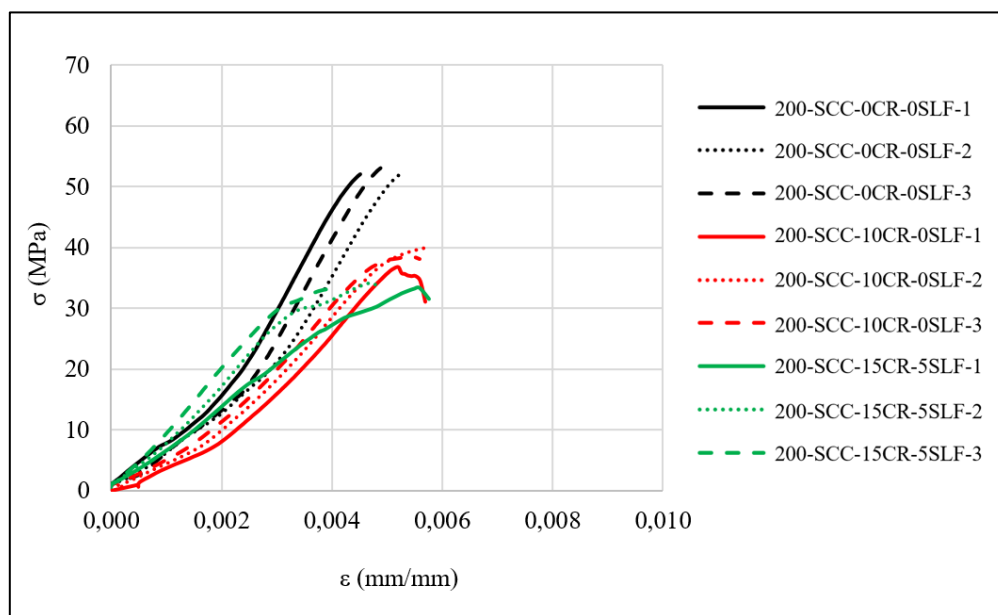
Slika 6.43 Normalizirane vrijednosti deformacije pri maksimalnom naprezanju u odnosu na vrijednost deformacije pri maksimalnom naprezanju pri $T = 20^\circ\text{C}$



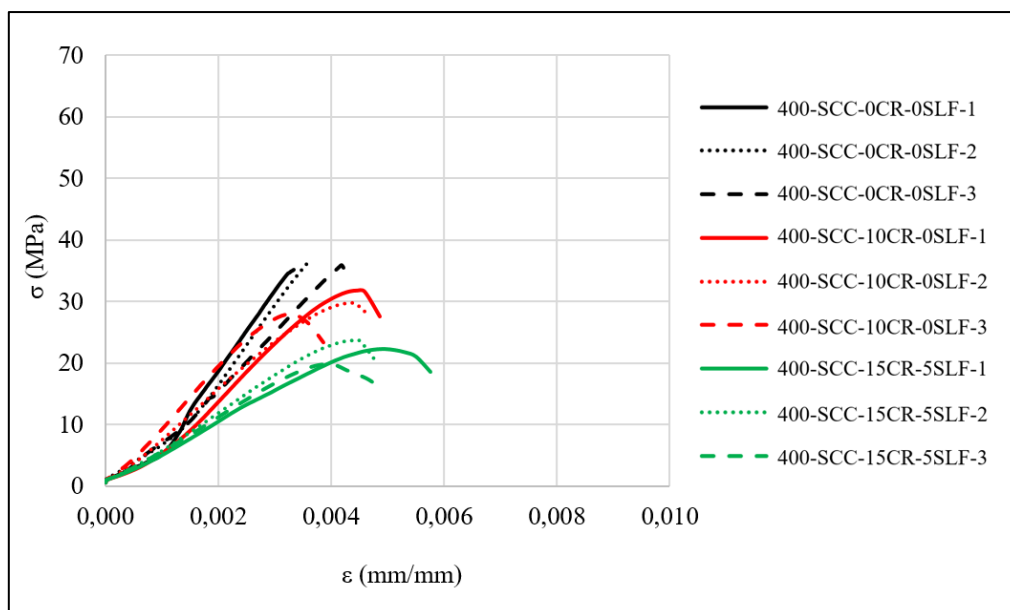
Slika 6.44 Normalizirane vrijednosti deformacije pri maksimalnom naprezanju u odnosu na vrijednost deformacije pri maksimalnom naprezanju referentne mješavine pri $T = 20^\circ\text{C}$



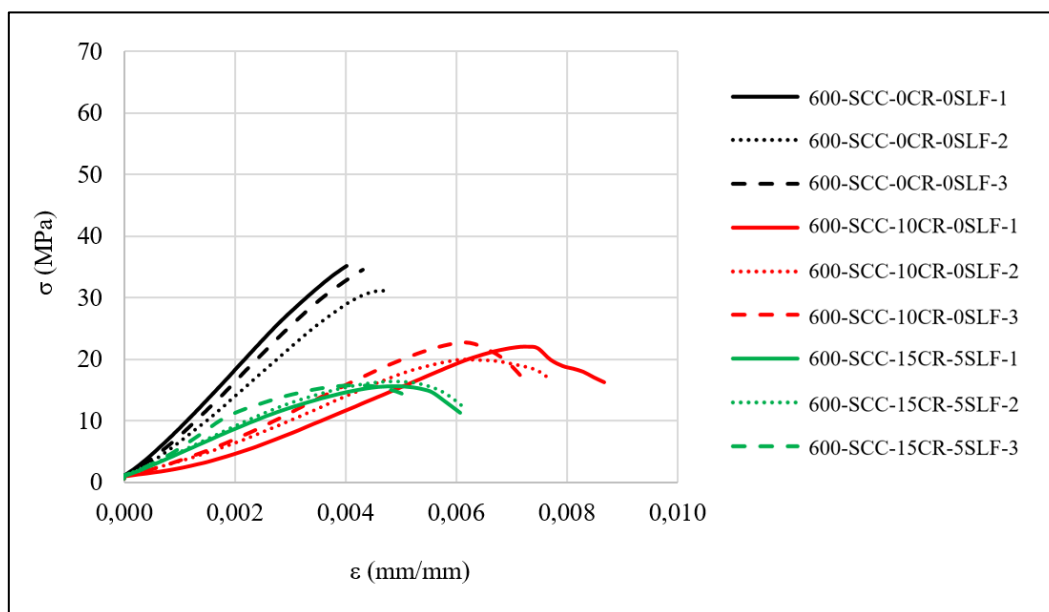
Slika 6.45 Odnos naprezanje-deformacija uzoraka koji nisu izloženi visokim temperaturama



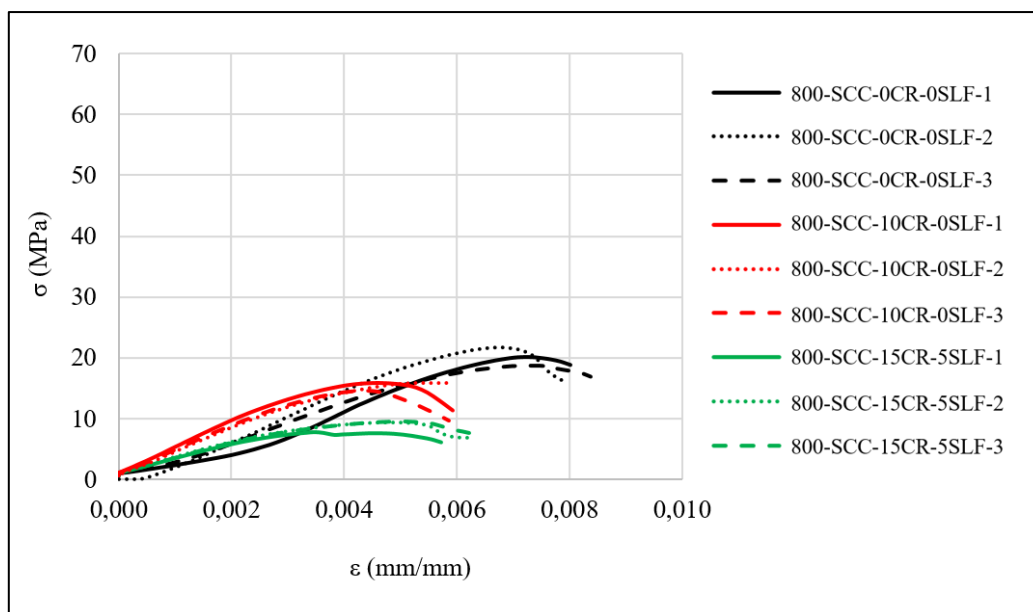
Slika 6.46 Odnos naprezanje-deformacija uzoraka izloženih visokoj temperaturi od 200 °C



Slika 6.47 Odnos naprezanje-deformacija uzoraka izloženih visokoj temperaturi od 400 °C



Slika 6.48 Odnos naprezanje-deformacija uzoraka izloženih visokoj temperaturi od 600 °C



Slika 6.49 Odnos naprezanje-deformacija uzoraka izloženih visokoj temperaturi od 800 °C

B1) Tlačna čvrstoća (maksimalno naprezanje)

Vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka najveće su za referentnu mješavinu SCC-0CR-0SLF, neovisno o visokoj temperaturi kojoj su uzorci izloženi, što je u skladu s prethodnim ispitivanjima samozbijajućeg betona s gumom [50] i običnog betona s gumom [78], [83], [84]. Reciklirana guma ima manju tlačnu čvrstoću u usporedbi s prirodnim agregatom [78], što objašnjava činjenicu da su najveće vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka mješavina s 10 % i 15 % gumom manje od vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka mješavina bez gume. Analizom rezultata ispitivanja uočava se i da je pad vrijednosti tlačne čvrstoće betonskih uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF najizraženiji nakon izloženosti uzoraka temperaturi od 400 °C i u usporedbi s vrijednostima tlačnih čvrstoća pri temperaturi od 20 °C iznosi 35 %, dok je isti pad manje izražen za betonske uzorke s 10 % gume i iznosi 27 %. Prosječne vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka sve 3 ispitane mješavine su i nakon izlaganja temperaturi od 600 °C bile veće od 15 MPa, dok su iste vrijednosti pri temperaturi od 800 °C bile veće od 8 MPa, s tim da je najmanju vrijednost tlačne čvrstoće imala mješavina s 15 % gume. Za razliku od prethodnih ispitivanja, gdje se betonski uzorci izloženi temperaturi od 750 °C nisu mogli ispitati zbog njihovog lošeg stanja [84], u ovome su ispitivanju svi uzorci zadržali svoj integritet te nije uočena nemogućnost njihovog ispitivanja tlačne čvrstoće nakon izlaganja temperaturi od 800 °C. Pozitivan utjecaj silicijske prašine na tlačnu čvrstoću betonskih uzoraka s 15 % gume uočen je nakon izlaganja temperaturi od 200 °C. Relativni pad tlačne čvrstoće promatranih uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF zanemariv je pri navedenoj temperaturi. Međutim, uzorci navedene betonske mješavine izloženi temperaturama 400 °C, 600 °C i 800 °C pokazuju najmanje rezultate tlačnih čvrstoća i veće relativne padove u odnosu na uzorke preostale dvije promatrane betonske mješavine. Uzorci betonske mješavine s 10 % gume pokazali su bolje ponašanje

od uzoraka s 15 % gume pri temperaturama većim od 400 °C, iz čega se može zaključiti da pozitivan utjecaj silicijske prašine na temperaturama većim od 400 °C ne može nadoknaditi negativan utjecaj 15 %-tne zamjene sitnog agregata recikliranom gumom koja u korištenom postotku doprinosi bržoj degradaciji strukture betonskih uzoraka nego 10 %-tna zamjena. Smanjenje vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka povećanjem količine reciklirane gume i povećanjem temperatura kojoj su betonski uzorci izloženi uočeno je i u prethodnim ispitivanjima samozbijajućeg betona s gumom [50], običnog betona s gumom [78], [84] i morta s gumom [85]. Kada je beton izložen djelovanju visokih temperatura, slobodna voda u kapilarnim porama betona i voda u C-S-H gelu isparava [85]. Pri temperaturama većim od 400 °C dolazi do raspadanja C-S-H gela [50], [84] čime je moguće objasniti zašto je najveći pad vrijednosti tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka pri temperaturi od 400 °C. Pri sličnim temperaturama dolazi i do sagorijevanja gume čime se betonskim uzorcima povećava poroznost [85], što posljedično uzrokuje slabiju strukturu i smanjenu mogućnost prijenosa tlačnih sila u uzorcima prilikom njihovog ispitivanja budući da je poroznost obrnuto proporcionalna s tlačnom čvrstoćom betona. Nadalje, pri 512 °C kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se raspada na vodu (H_2O) i kalcijev oksid (CaO) [185] zbog čega visoke temperature dovode do smanjenja vrijednosti tlačne čvrstoće betonskih uzoraka [50].

Promatranjem relativnog pada vrijednosti tlačne čvrstoće u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće pri temperaturi od 20 °C ($\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{max},20^\circ\text{C}}$) može se uočiti da je navedeni relativni pad nakon izlaganja temperaturi od 200 °C podjednak za uzorke SCC-0CR-0SLF i SCC-10CR-0SLF i iznosi 5 % i 6 %. Isti relativni pad, ali u ovom slučaju za uzorke koji su izloženi temperaturi od 400 °C, najveći je za uzorke referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF, a najmanji za uzorke betonske mješavine s 10 % gume. Prilikom interpretacije rezultata promatran je i relativni pad vrijednosti tlačne čvrstoće u odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće referentne mješavine SCC-0CR-0SLF pri temperaturi od 20 °C ($\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{max},20^\circ\text{C,ref}}$). Pri temperaturi od 400 °C taj se pad za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF i SCC-10CR-0SLF razlikuje u svega 12 %. Za uzorke izložene temperaturama od 600 °C promatrana razlika u relativnom padu ponovno se povećava na 21 %, dok je za uzorke izložene temperaturama od 800 °C, promatrana razlika u relativnom padu ponovno 12 %, što zapravo može ukazivati na relativno pozitivan utjecaj gume na otpornost betona na visoke temperature. Manji relativni pad vrijednosti tlačne čvrstoće može biti posljedica izlaska vodene pare iz betonskih uzoraka kroz kanale koji nastaju na mjestima reciklirane gume koja je u postupku određenog postotnog sagorijevanja oslobodila prostor kroz koji vodena para može slobodno prolaziti, što je posljedično uzrokovalo manji unutarnji (porni) tlak u betonu te manji stupanj unutarnjeg razaranja strukture betonskih uzoraka. Iz rezultata ispitivanja očigledno je da je pad vrijednosti tlačne čvrstoće betonskih uzoraka uzrokovan raspadanjem C-S-H gela veći od pada vrijednosti tlačne čvrstoće uzrokovanog sagorijevanjem reciklirane gume u betonu, do ispitne temperature od 400 °C. Za temperature iznad 400 °C stanje je obrnuto, tj. utjecaj sagorijevanja reciklirane gume na navedeni pad izraženiji je nego utjecaj raspadanja C-S-H gela. S obzirom na otpornost betona na visoke temperature te na vrijednosti preostalih tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka, predlaže se da maksimalni udio reciklirane gume u betonu bude 10 % od ukupnog volumena sitnog

agregata kako bi se održala stabilnost i nosivost betona i AB nosive konstrukcije u slučaju izloženosti visokim temperaturama.

B2) Modul elastičnosti

Vrijednosti modula elastičnosti uzoraka svih betonskih mješavina su i nakon izloženosti temperaturi od 200 °C iznad 20 GPa. Tek nakon što su uzorci izloženi temperaturama većim od 400 °C, vrijednosti modula elastičnosti padaju ispod 20 GPa, i to za uzorke betonske mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF. Modul elastičnosti referentne mješavine SCC-0CR-0SLF pri svim temperaturama izlaganja veći je od modula elastičnosti preostale dvije promatrane mješavine s gumom i silicijskom prašinom (SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF). Ipak, ako se promatra relativni pad vrijednosti modula elastičnosti pri visokim temperaturama u odnosu na vrijednost modula elastičnosti pri temperaturi od 20 °C ($E / E_{20^{\circ}\text{C}}$), može se zaključiti da je najveći relativni pad modula elastičnosti vidljiv kod referentne mješavine i to pri izlaganju visokoj temperaturi od 200 °C, dok su pri istoj temperaturi uzorci s 10 % gume imali vrijednost relativnog pada od svega 2 %. Kod uzoraka izlaganih temperaturi od 400 °C taj je odnos relativnog pada uzoraka mješavine SCC-0CR-0SLF i SCC-10CR-0SLF obratan, tj. relativni pad vrijednosti modula elastičnosti izraženiji je kod uzoraka s 10 % gume. Uzorci betonske mješavine SCC-15CR-5SLF pri svim temperaturama izlaganja imali su najizraženiji relativni pad vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti pri temperaturi od 20 °C. Prilikom interpretacije rezultata promatran je i relativni pad vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na vrijednost modula elastičnosti referentne mješavine pri temperaturi od 20 °C ($E / E_{20^{\circ}\text{C,ref}}$) te je zaključeno da je navedeni pad najizraženiji kod uzoraka s 15 % gume i 5 % silicijske prašine, za sve temperature kojima su uzorci izloženi. Ipak, pri temperaturi od 600 °C taj relativni pad vrijednosti modula elastičnosti uzoraka betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF je za 16 % i 22 % veći od pada vrijednosti modula elastičnosti referentne mješavine pri navedenim temperaturama, dok je pri temperaturi od 800 °C taj relativni pad još manji i iznosi 10 % i 14 %. Samo se manji broj istraživanja bavio proučavanjem promjene statičkog modula elastičnosti betona s gumom [84] te je uočen sličan pad vrijednosti modula elastičnosti. Praznine, tj. šupljine nastale nakon raspadanja reciklirane gume, rezultiraju ubrzanom daljnjom razgradnjom betona. Dodatno, oslobađanje vodene pare i propagacija pukotina kroz navedene praznine (šupljine) dovodi do gubitka vrijednosti modula elastičnosti [84], a manji modul elastičnosti može dati elastičniju konstrukciju, što bi bilo značajno u primjeni pri djelovanju potresnog opterećenja. Nadalje, manji modul elastičnosti potencijalno vodi tome da će se pri statičkom i dinamičkom proračunu AB konstrukcije dobiti manja vrijednost potrebne količine armature, što je isplativo s ekonomskog gledišta [188].

B3) Odnos „naprezanje – deformacija“

Prema trenutnim saznanjima autora, do sada se niti jedno istraživanje nije bavilo proučavanjem odnosa *naprezanje – deformacija* običnog ili samozbijajućeg betona s recikliranom gumom nakon

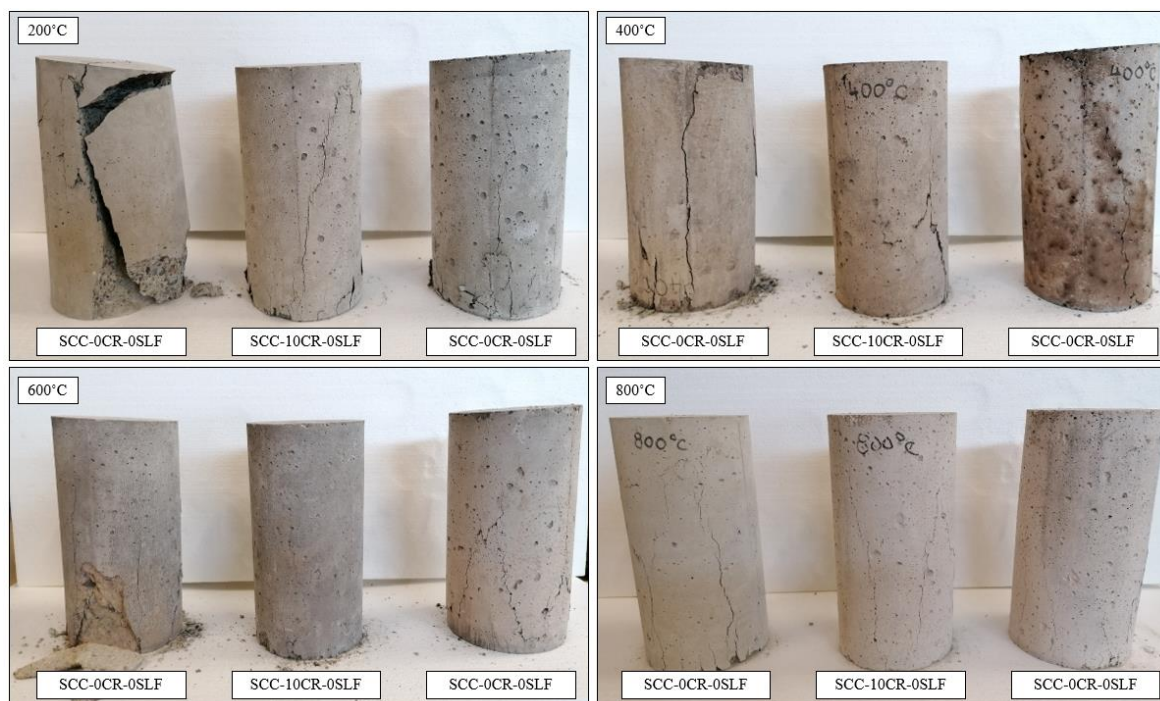
izlaganja visokim temperaturama. Iz odnosa *naprezanje-deformacija* prikazanih na [Slikama 6.45 - 6.49](#) može se zaključiti da su nagibi krivulja, a samim time i vrijednosti modula elastičnosti i deformacije pri maksimalnoj sili, u funkciji udjela gume i silicijske prašine te povećanja vrijednosti temperature kojoj su uzorci izloženi. Što je veći postotak zamjene prirodnog agregata gumom, nagib je krivulje manji, što se može objasniti smanjenim modulom elastičnosti reciklirane gume u odnosu na modul elastičnosti prirodnog agregata. To pravilo vrijedi za uzorke koji su izloženi visokim temperaturama do 600 °C. Uzorci izloženi temperaturi od 800 °C pokazuju drugačije ponašanje te u tom slučaju nagib krivulje nije uvjetovan količinom reciklirane gume u uzorcima.

Uspoređujući deformacije pri maksimalnoj sili pri istim temperaturama, vidljivo je da se povećanjem udjela gume u betonu povećava i deformacija pri maksimalnoj sili, osim u slučaju temperaturnog opterećenja od 800 °C, gdje najveću prosječnu deformaciju pri maksimalnoj sili imaju uzorci referentne mješavine SCC-0CR-0SLF. Kako je već i ranije navedeno, reciklirana guma ima manji modul elastičnosti od modula elastičnosti prirodnog agregata, uzrokujući i manja maksimalna naprezanja, tj. manju tlačnu čvrstoću betonskih uzoraka. S druge strane, betonski uzorci bez gume pokazuju manju deformabilnost od betonskih uzoraka s recikliranom gumom. Povećana deformabilnost betonskih uzoraka s recikliranom gumom može doprinijeti poboljšanoj otpornosti betona, ali i armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata na potresna djelovanja u vidu duktilnijeg sloma kroz stvaranje većeg broja manjih pukotina, povećavajući na taj način sposobnost disipacije, tj. rasipanja energije konstrukcijskih elemenata stvorene potresnim djelovanjem. Uspoređujući vrijednosti deformacije pri maksimalnoj sili između uzoraka iste mješavine, ali izlaganih različitim temperaturama, deformacija pri maksimalnoj sili za uzorke SCC-15CR-5SLF poprima maksimalnu vrijednost pri temperaturi od 20 °C. Svoj maksimum uzorci SCC-10CR-0SLF dostižu na temperaturi od 600 °C, dok uzorci referentne mješavine SCC-0CR-0SLF najveću vrijednost deformacije pri maksimalnoj sili imaju nakon izlaganja temperaturi od 800 °C. Analizom rezultata ispitivanja deformacije pri maksimalnoj sili uočena je velika disipacija rezultata te ne postoji trend povećavanja ili smanjenja promatrane veličine s povećanjem temperature kojoj su uzorci izloženi, što je najbolje vidljivo iz grafičkih prikaza na [Slikama 6.42, 6.43 i 6.44](#). Takve je rezultate moguće obrazložiti i statističkim podatkom koeficijenta varijacije koji je u većini slučajeva poprimao vrijednost iznad 5 %, a u nekim slučajevima i iznad 15 %, iz čega se može zaključiti da se kod ispitivanja deformacije pri maksimalnoj sili ne može postaviti nekakav trend pada ili rasta u ovisnosti o udjelu gume ili silicijske prašine u betonskim uzorcima.

Eksplzivno odlamanje prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka

Na [Slici 6.50](#) prikazani su tipični načini tlačnog sloma uzoraka izloženih visokim temperaturama. Eksplzivni slom, tj. eksplzivno odlamanje karakteristično je za uzorke referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF, dok je kod uzoraka betonskih mješavina s recikliranom gumom i silicijskom prašinom (SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF) uočen duktilniji slom uzoraka pojavom većeg broja manjih pukotina, ali niti u jednom slučaju navedeni slom nije bio eksplzivan, što se može

smatrati pozitivnim svojstvom obje promatrane betonske mješavine s recikliranom gumom. Takvo ponašanje, koje je uočeno i u drugim istraživanjima [86], [189], moguće je objasniti pozitivnim utjecajem reciklirane gume koja daje dodatnu elastičnost betonu, a samim time i povećanu otpornost na vlačna naprezanja. Nadalje, nakon izgaranja gumenog agregata na njegovim mjestima ostaju prazni prostori koji se slikovito mogu predložiti kao otvoreni kanali kroz koje je moguć slobodan prolaz vodene pare, smanjujući na taj način naprezanja uzrokovana nastankom vodene pare pri visokim temperaturama. Ipak, valja napomenuti da se razina eksplozivnog sloma kod uzoraka referentne mješavine SCC-0CR-0SLF smanjuje povećanjem temperature kojoj su betonski uzorci bili izloženi, posebno kod uzoraka koji su bili izloženi temperaturi od 800 °C. Unutarnja struktura betona oslabljena je gubitkom vode i raspadanjem C-S-H gela, čime se prilikom nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak slom ne manifestira kao eksplozivan zbog već ranije oštećenih veza u unutrašnjosti uzoraka te zbog manjeg otpora nanesenom opterećenju.



Slika 6.50 Načini sloma betonskih uzoraka

Budući da su se na tlačno naprezanje ispitivali i uzorci koji nisu izlagani visokim temperaturama, važno je napomenuti da je eksplozivno odlamanje uzoraka i u ovom slučaju bilo izraženo kod uzoraka referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF (Slika 6.51), dok kod uzoraka betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF nije uočena pojava eksplozivnog odlamanja.



Slika 6.51 Prikaz eksplozivnog odlamanja prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF

Pojava smanjenog eksplozivnog odlamanja betona s recikliranom gumom predstavlja još jedan pozitivan doprinos razvoju AB konstrukcijskih elemenata s recikliranom gumom u vidu sigurnijeg korištenja takvog materijala u slučaju pojave izvanrednog potresnog opterećenja u kojemu bi beton s recikliranom gumom imao potencijalno povećanu deformabilnost, što bi za posljedicu imalo stvaranje većeg broja pukotina manje širine i dubine, sa smanjenom opasnošću od eksplozivnog odlamanja betona.

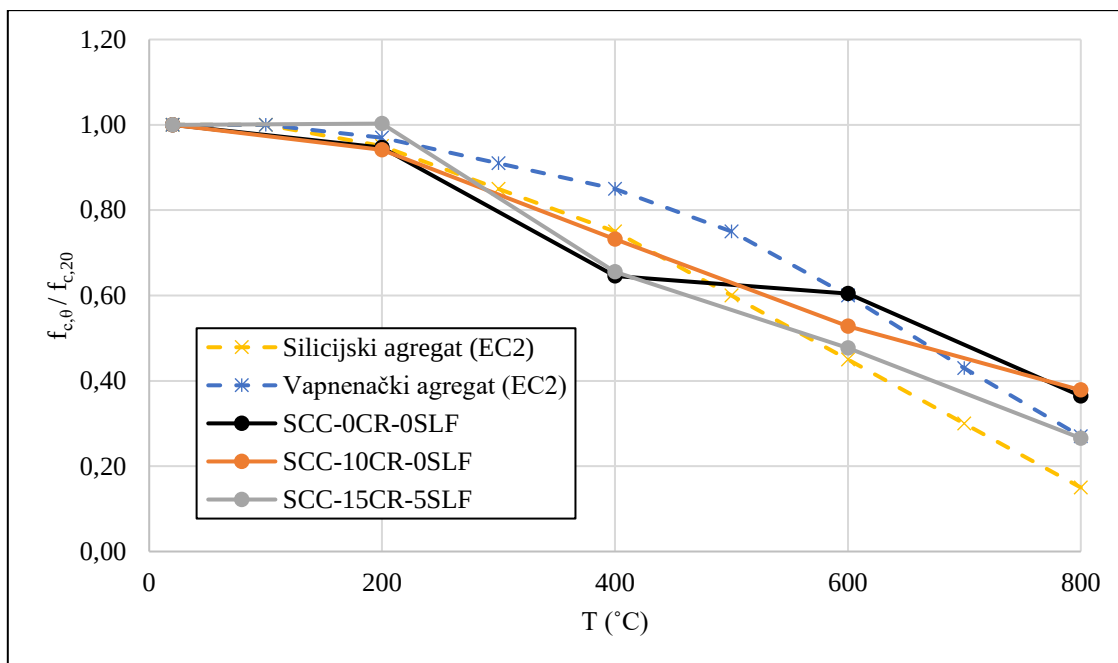
Usporedba dobivenih rezultata tlačne čvrstoće s preporukama norme HRN EN 1992-1-2:2013 (EC2)

Normom HRN EN 1992-1-2:2013 [190], skraćeno EC2, dane su vrijednosti tlačne čvrstoće kao funkcije temperature betona u slučaju djelovanja požara na betonsku konstrukciju (**Tablica 6.32**). Parametri dani u **Tablici 6.32** smiju se upotrebljavati za beton koji je jednoosno napregnut i beton obične težine s agregatom koji može biti silicijski ili vapnenački.

Tablica 6.32 Vrijednosti tlačne čvrstoće kao funkcije temperature betona sukladno normi HRN EN 1992-1-2:2013 [190]

Temperatura betona (°C)	omjer preostale tlačne čvrstoće i tlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi ($f_{c,\theta}/f_{c,20}$)	
	Silicijski agregat	Vapnenački agregat
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,75
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27

Na [Slici 6.52](#) prikazani su rezultati ispitivanja preostale tlačne čvrstoće dobiveni eksperimentalno prilikom ispitivanja betona na visoke temperature, uspoređeni s vrijednostima tlačne čvrstoće kao funkcije temperature betona sukladno modelu za vapnenačke i silicijske agregate danom u normi HRN EN 1992-1-2:2013.



Slika 6.52 Usporedba eksperimentalnih vrijednosti omjera preostale tlačne čvrstoće i tlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi ($f_{c,\theta} / f_{c,20}$) kao funkcije temperature betona s modelima za vapnenačke i silicijske agregate danim u normi HRN EN 1992-1-2:2013

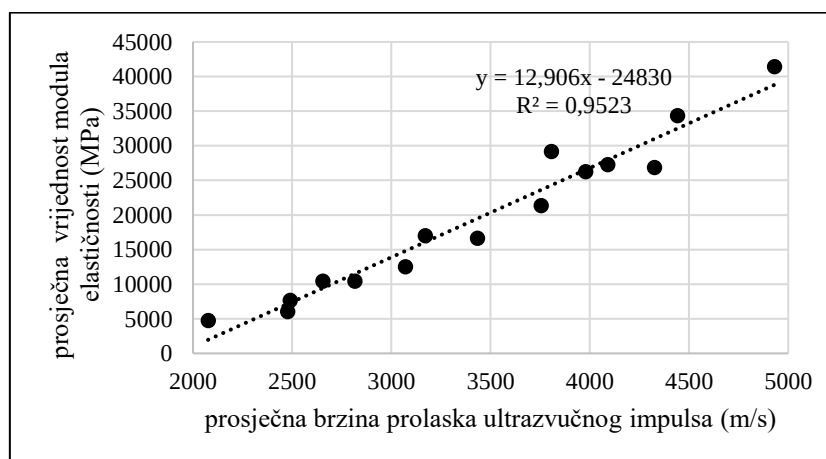
Prema [Slici 6.52](#) proizlaze sljedeći zaključci:

- Prema trenutnim saznanjima do sada se nitko nije bavio usporedbom omjera $f_{c,\theta} / f_{c,20}$ danih modelima u normi HRN EN 1992-1-2:2013 s omjerima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem samozbijajućeg betona s gumom.
- Budući da su tijekom laboratorijskih ispitivanja samozbijajućeg betona korištene obje vrste agregata (riječni kvarcni agregat, tj. silicijski agregat, frakcija 0-2 mm, te dolomitni vapnenački agregat, frakcije 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm), vrijednosti omjera $f_{c,\theta} / f_{c,20}$ za sve tri mješavine nije moguće uspoređivati samo s jednim modelom danim u normi HRN EN 1992-1-2:2013. Stoga se na temelju postotnih odstupanja vrijednosti omjera $f_{c,\theta} / f_{c,20}$ eksperimentalnih ispitivanja od vrijednosti istog omjera danih normom HRN EN 1992-1-2:2013 za oba modela predlaže procjena mogućnosti interpretacije rezultata i upotrebe oba modela, a ne samo jednog.
- Prema trenutnim saznanjima, normom HRN EN 1992-1-2:2013 nisu propisana dozvoljena odstupanja omjera $f_{c,\theta} / f_{c,20}$ modela od eksperimentalno dobivenih omjera.

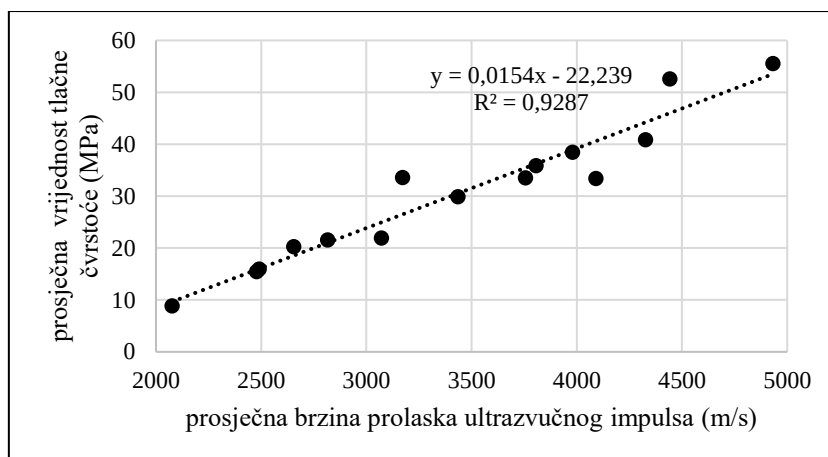
- Rezultati ispitivanja sve tri betonske mješavine pokazuju slične vrijednosti modelima za vapnenački i silicijski agregat. Maksimalna postotna razlika između modela za vapnenački agregat i eksperimentalno dobivenih vrijednosti omjera iznosi oko 20 % (SCC-0CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF pri 400 °C), dok maksimalna postotna razlika između modela za silicijski agregat i eksperimentalno dobivenih vrijednosti omjera iznosi 22,8 % (SCC-10CR-0SLF pri 800 °C).
- Zaključuje se da je za ispitane betonske mješavine moguće koristiti modele dane normom HRN EN 1992-1-2:2013.
- Predlaže se dodatno ispitivanje mješavina SCC-0CR-0SLF i SCC-15CR-5CR pri 400 °C s obzirom da je uočen nagli pad omjera $f_{c,0} / f_{c,20}$ pri navedenoj temperaturi. Nagli pad tlačne čvrstoće mješavine s 15 % gume moguće je objasniti postupkom sagorijevanja i ubrzanim raspadanjem gume nakon dosezanja njezinog tališta, dok je nagli pad vrijednosti tlačne čvrstoće betonske mješavine SCC-0CR-0SLF pri temperaturi od 400 °C moguće objasniti raspadanjem C-S-H gela.

Mogućnost primjene rezultata nerazornog ultrazvučnog ispitivanja za određivanje mehaničkih svojstava (tlačne čvrstoće i modula elastičnosti) nakon izlaganja visokim temperaturama

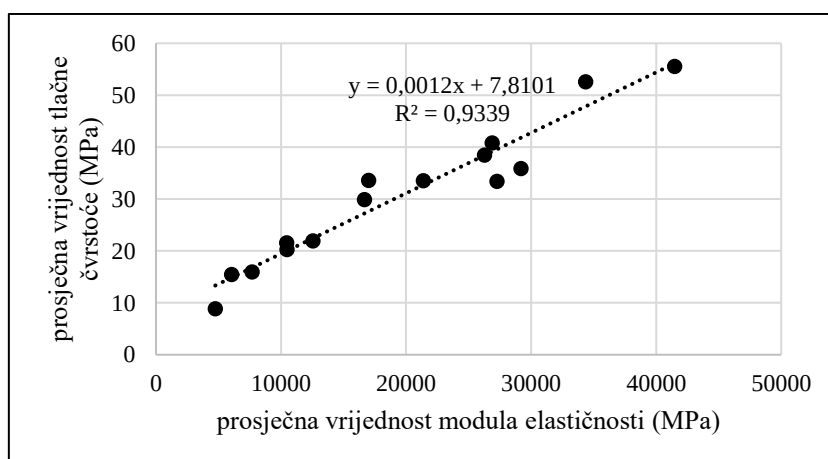
Rezultati ispitivanja prosječnih vrijednosti tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i brzine prolaska ultrazvučnog vala za uzorke sve tri promatrane betonske mješavine izloženi su u prethodnim poglavljima, a u nastavku su iskorišteni za izradu grafičkih prikaza međusobnih odnosa navedene tri vrijednosti (Slika 6.53, 6.54 i 6.55).



Slika 6.53 Odnos između brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i modula elastičnosti za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF



Slika 6.54 Odnos između brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i tlačne čvrstoće za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF



Slika 6.55 Odnos između tlačne čvrstoće i modula elastičnosti za uzorke betonskih mješavina SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-0SLF

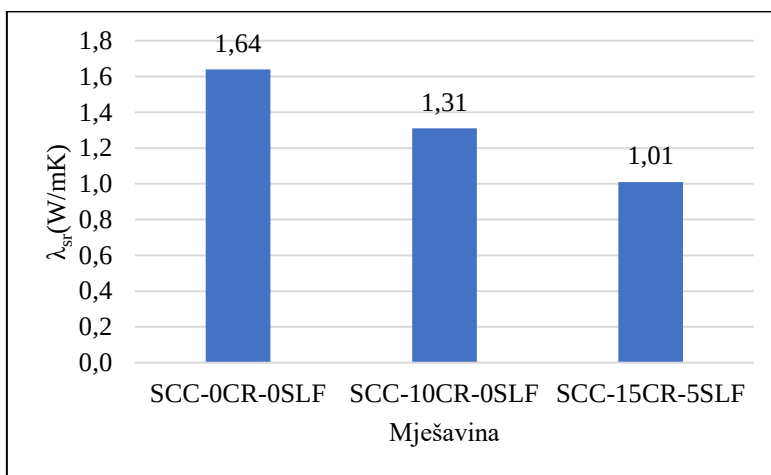
Iz grafičkog prikaza međusobnih odnosa prosječne brzine prolaska ultrazvučnog impulsa te prosječne vrijednosti modula elastičnosti i prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće zaključuje se da je vrijednost koeficijenta R^2 dobivena linearnom regresijskom analizom podataka za oba međusobna odnosa iznad 0,92, iz čega proizlazi mogućnost potencijalne primjene danih jednadžbi za procjenu, tj. određivanje vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti na temelju unaprijed poznate ili izmjerene vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonski uzorak. Također, vrijednost koeficijenta R^2 za odnos između prosječne tlačne čvrstoće i prosječnog modula elastičnosti, dobivenog također linearnom regresijskom analizom podataka, iznosi 0,9339, što također predstavlja potencijal za procjenu jednog mehaničkog svojstva na temelju poznate vrijednosti drugog mehaničkog svojstva.

C) Analiza mikrostrukture (engl. Microstructural analysis)

Opis postupka i rezultati ispitivanja mikrostrukture uzoraka samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama obrađen je u [Poglavlju 6.3.7](#).

6.3.6 Toplinska vodljivost

U [Tablici 6.33](#) i na [Slici 6.56](#) izloženi su rezultati ispitivanja toplinske vodljivosti za sve tri odabrane optimalne mješavine.



Slika 6.56 Srednje vrijednosti toplinske vodljivosti λ (W/mK)

Pojedinačne i srednje vrijednosti toplinske vodljivosti najmanje su za uzorke betonske mješavine SCC-15CR-5SLF, a najveće za uzorke referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF. Srednja vrijednost toplinske vodljivosti četiri uzorka je za betonske mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF za 20 % i 39 % manja od srednje vrijednosti toplinske vodljivosti uzoraka referentne betonske mješavine. Slični se rezultati mogu pronaći i u postojećoj literaturi gdje je toplinska vodljivost ispitana na uzorcima morta s gumom [97], [98], samozbijajućeg betona s gumom [54] i običnog betona s gumom [57].

Tablica 6.33 Rezultati ispitivanja toplinske vodljivosti λ (W/mK)

Mješavina	Uzorak	Srednja temperatura (°C)	Toplinska vodljivost (W/mK)						
			λ_G	λ_G	$(\lambda_G + \lambda_D)/2$	λ_i	λ_{sr}	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	1	20,22	1,63	1,69	1,66	1,67	1,64	0,021	1,30 %
		15,26	1,64	1,69	1,66				
		10,31	1,66	1,69	1,67				
	2	20,44	1,60	1,69	1,64	1,65			
		15,49	1,62	1,69	1,66				
		10,53	1,63	1,69	1,66				
	3	20,38	1,63	1,61	1,62	1,62			
		15,44	1,62	1,61	1,62				
		10,52	1,63	1,60	1,61				
	4	20,57	1,64	1,65	1,64	1,64			
		15,6	1,64	1,63	1,64				
		10,66	1,65	1,62	1,63				
SCC-10CR-0SLF	1	20,6	1,28	1,33	1,31	1,31	1,31	0,003	0,24 %
		15,64	1,29	1,33	1,31				
		10,67	1,30	1,32	1,31				
	2	20,33	1,30	1,32	1,31	1,31			
		15,36	1,31	1,32	1,31				
		10,4	1,32	1,30	1,31				
	3	20,18	1,29	1,33	1,31	1,30			
		15,22	1,29	1,32	1,30				
		10,25	1,30	1,30	1,30				
	4	20,18	1,30	1,33	1,32	1,31			
		15,22	1,30	1,32	1,31				
		10,26	1,31	1,31	1,31				
SCC-15CR-5SLF	1	20,11	1,07	1,05	1,06	1,06	1,01	0,064	6,35 %
		15,14	1,08	1,04	1,06				
		10,16	1,08	1,03	1,05				
	2	20,33	0,90	0,94	0,92	0,91			
		15,34	0,90	0,93	0,91				
		10,36	0,90	0,92	0,91				
	3	20,53	1,03	1,03	1,03	1,02			
		15,57	1,03	1,01	1,02				
		10,61	1,03	1,00	1,02				
	4	20,32	1,04	1,05	1,04	1,04			
		15,36	1,04	1,04	1,04				
		10,41	1,04	1,03	1,04				

Smanjenje vrijednosti toplinske vodljivosti betona povećanjem udjela reciklirane gume u betonu može biti objašnjeno dobrim termoizolacijskim svojstvima reciklirane gume, tj. manjom vrijednosti toplinske vodljivosti gume (0,16 - 0,50 W/mK) [54], [57], [97] u usporedbi s istom vrijednošću prirodnog agregata (1,5 - 5,20 W/mK) [57], [97]. Ipak, ukupna toplinska vodljivost betona u tom slučaju ne ovisi samo o toplinskoj vodljivosti promatranih komponenti betona, nego i o volumenu i rasporedu mreže pora te zarobljenom zraku na sučeljku agregata i cementne paste [97] koji je povećan

zamjenom prirodnog agregata gumenim, što također doprinosi smanjenju toplinske vodljivosti betonskog uzorka jer zrak ($0,025 \text{ W/mK}$) ima manju vrijednost toplinske vodljivosti od betona [54]. Sukladno Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [191] beton s recikliranom gumom se na temelju svoje vrijednosti toplinske vodljivosti može svrstati u beton s laganim agregatom. Gustoća betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF veća je od 2000 kg/m^3 te takav beton svrstavamo u kategoriju običnih betona [27]. Iako se prema svojoj gustoći beton s 10 % i 15 % gume kategorizira kao obični beton, njegova su termička svojstva prema Prilogu B, [Tablici 5](#) Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [191] slična toplinskim svojstvima betona s laganim agregatom, tj. laganim betonima gustoće 1800 ($\lambda_{sr} = 1,3084 \text{ W/mK}$) i 1600 kg/m^3 ($\lambda_{sr} = 1,0084 \text{ W/mK}$), iz čega proizlazi zaključak da betoni s gumom imaju slična termička svojstva kao lagani betoni, ali potencijalno mogu ostvariti veće čvrstoće u usporedbi s laganim betonima; jer je smanjenje čvrstoće betona jednim dijelom uvjetovano i smanjenjem njegove gustoće. Preporuka je da se navedena tvrdnja dodatno ispita u budućim istraživanjima.

Nadalje, kod laganih betona moguća je pojava povećanog skupljanja betona u usporedbi s običnim betonima [27]. U kontekstu betona s gumom takvo ponašanje ne predstavlja opći slučaj, tj. beton s gumom ima manje skupljanje od betona bez gume, što je i prikazano u rezultatima eksperimentalnih ispitivanja u [Poglavlju 6.3.3](#). Ako pretpostavimo da bi se beton s gumom koristio za izradu armiranobetonskih elemenata grijane građevine, povećanjem sadržaja gume u betonu iznad 15 % dodatno bi se povećao pozitivan učinak na smanjenje vrijednosti toplinske vodljivosti materijala, a ujedno bi se smanjila i količina korištenog agregata iz prirodnih resursa, što pozitivno utječe na dva temeljna zahtjeva za građevinu, tj. na racionalnije gospodarenje energijom i očuvanjem topline u građevini te na održivu uporabu prirodnih izvora [192] koji se u ovom slučaju zamjenjuju recikliranim materijalom. Ipak, s ciljem primjene samozbijajućeg betona s gumom u armiranobetonskim konstrukcijskim elementima potrebno je definirati maksimalni postotni udio gume u betonu kojim bi doprinijeli poboljšanju smanjenja potrošnje toplinske energije i održivoj uporabi prirodnih izvora, ali i zadržali adekvatnu mehaničku otpornost i stabilnost, kao ključni temeljni zahtjev za građevinu, sve u namjeri mogućeg korištenja navedenog betona u konstrukcijskim elementima. Budući da je tlačna čvrstoća samozbijajućih betona SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF slična i iznosi oko 30 MPa, predlaže se maksimalni udio gume u armiranobetonskim konstrukcijskim elementima do 15 %.

6.3.7 Struktura očvrsluloga samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i veza na sučelju cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata (SEM)

Dva su glavna cilja ispitivanja mikrostrukture pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa (*engl. scanning electron microscope*): (1) analiza strukture betona i kemijskog sastava betona te utvrđivanje utjecaja strukture betona i kemijskog sastava betona na ponašanje betona na makrorazini te na fizikalno-mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona; (2) analiza strukture reciklirane gume i kemijskog sastava reciklirane gume te utvrđivanje utjecaja reciklirane gume na ponašanje betona na makrorazini te na njegova fizikalno-mehanička svojstva i svojstva trajnosti.

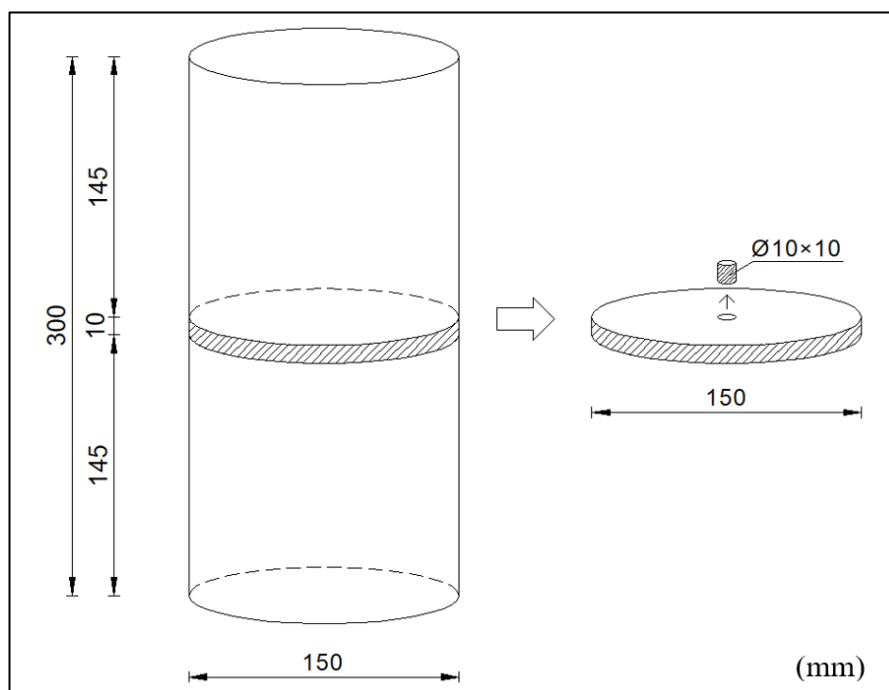
6.3.7.1 SEM analiza

Sukladno popisu danom u [Tablici 6.34](#) analizirana je mikrostruktura 18 betonskih uzoraka. Dodatno je napravljena i analiza mikrostrukture reciklirane gume s ciljem utvrđivanja morfologije materijala. Analiza mikrostrukture betona i sučeljka *reciklirana guma-cementna pasta* na uzorcima izloženim visokim temperaturama (0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C) provodila se na betonskim uzorcima dimenzija Ø 10 mm × 10 mm dobivenim rezanjem i bušenjem ([Slika 6.57](#)). Ispitivanje mikrostrukture armiranobetonskih greda (200 mm × 300 mm × 3000 mm) provodilo se na betonskim uzorcima izvađenim iz prethodno ispitanih armiranobetonskih greda.

Tablica 6.34 Popis ispitnih uzoraka za utvrđivanje mikrostrukture betona i sučeljka reciklirana guma-cementna pasta

Redni broj	Oznaka uzorka	Objašnjenje oznake uzorka
Uzorak 1	SCC-0CR-0SLF-0	Uzorci izloženi temperaturi od 0 °C
Uzorak 2	SCC-10CR-0SLF-0	
Uzorak 3	SCC-15CR-5SLF-0	
Uzorak 4	SCC-0CR-0SLF-200	Uzorci izloženi temperaturi od 200 °C
Uzorak 5	SCC-10CR-0SLF-200	
Uzorak 6	SCC-15CR-5SLF-200	
Uzorak 7	SCC-0CR-0SLF-400	Uzorci izloženi temperaturi od 400 °C
Uzorak 8	SCC-10CR-0SLF-400	
Uzorak 9	SCC-15CR-5SLF-400	
Uzorak 10	SCC-0CR-0SLF-600	Uzorci izloženi temperaturi od 600 °C
Uzorak 11	SCC-10CR-0SLF-600	
Uzorak 12	SCC-15CR-5SLF-600	
Uzorak 13	SCC-0CR-0SLF-800	Uzorci izloženi temperaturi od 800 °C
Uzorak 14	SCC-10CR-0SLF-800	
Uzorak 15	SCC-15CR-5SLF-800	
Uzorak 16	SCC-0CR-0SLF-G	Uzorci izvađeni iz prethodno ispitanih armiranobetonskih betonskih greda
Uzorak 17	SCC-10CR-0SLF-G	
Uzorak 18	SCC-15CR-5SLF-G	

Ispitivanje mikrostrukture betona provodilo se na pretražnom elektronskom mikroskopu *JEOL SEM JSM-IT200* (Slika 6.58) uz prethodnu pripremu uzoraka pomoću uređaja za napanje zlatom *AGAR manual sputter coater B7340* (Slika 6.59). Uzorci za SEM analizu pripremljeni su na način da ne ostane nevezanih čestica betona s obzirom da mikroskop radi u visokom vakuumu koji može *usisati* nevezane čestice. Analiza betona izvodi se pod elektronskim snopom, stoga ispitivani uzorci moraju biti provodljivi kako ne bi došlo do zagrijavanja ili naelektriziranosti uzoraka. Kako beton ne provodi struju, te kako bi se postigla što kvalitetnija slika i u što većem obimu eliminirao efekt punjenja (*engl. charging effect*), uzorke je bilo potrebno prethodno napaniti tankim slojem električki vodljivog materijala (slojem zlata) debljine, kako je prikazano u Tablici 6.35. Za napanje uzoraka korišteno je zlato jer se analizom htjela postići SE snimka na neobrađenim uzorcima, a zlato u tom slučaju daje bolji kontrast slike, bolje se ističu nagibi, pore i druge morfološke karakteristike uzorka.

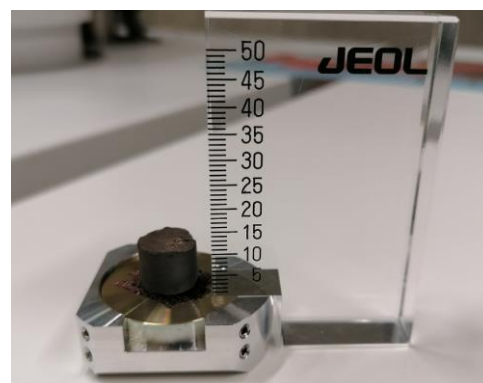


Slika 6.57 Princip izrade uzoraka za ispitivanje mikrostrukture betona i sučeljka reciklirana guma-cementna pasta na uzorcima izloženim visokim temperaturama (0 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C)

Prije postupka napanja sve površine uzoraka ispuhane su komprimiranim zrakom u spreju *Air Power* kako bi se uklonile nevezane čestice. Ciljana radna udaljenost (*engl. working distance WD*) je zbog što kvalitetnije analize iznosila oko 10 mm. Svi uzorci ispitani su u visokom vakuumu i u suhom stanju. Korišteni detektori elektrona pri analizi bili su SED, BED-S, BED-C. Napon ubrzanja (*engl. acceleration voltage*) pri kojem je vršena analiza uzoraka 15-20 kV, dok je struja snopa elektrona (*engl. probe current*) iznosila 45-55, čime je dobivena jasnija slika.



Slika 6.58 Pretražni elektronski mikroskop
JEOL SEM JSM-IT200

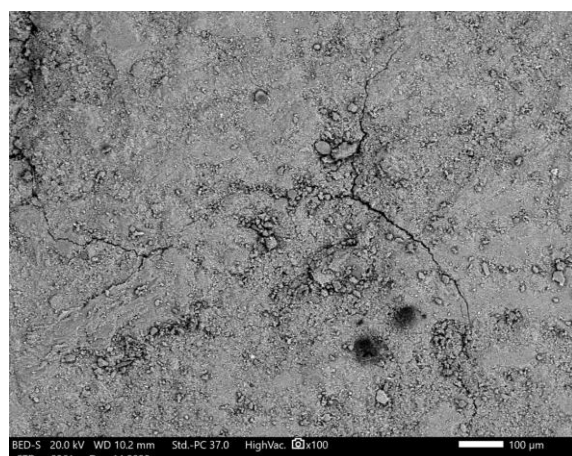


Slika 6.59 Uređaj za prethodnu pripremu
uzoraka *AGAR manual sputter coater B7340* i
prethodno mjerenje visine uzoraka

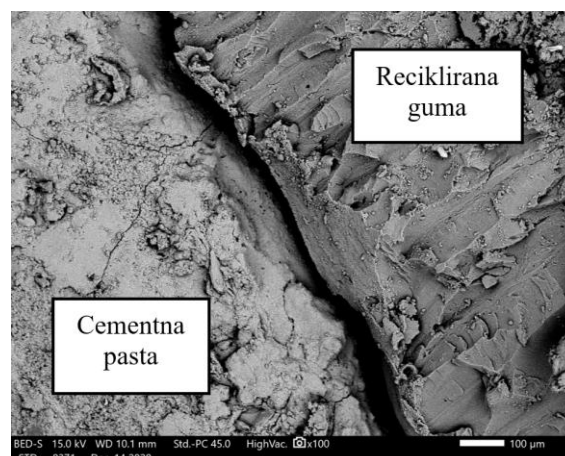
Tablica 6.35 Prethodna priprema betonskih uzoraka napanjanjem – debljine slojeva zlata

Redni broj	Oznaka uzorka	Debljina sloja zlata (nm)	Vrijeme napanjanja (sekunde)
Uzorak 1	SCC-0CR-0SLF-0	11,3	25
Uzorak 2	SCC-10CR-0SLF-0	11,2	25
Uzorak 3	SCC-15CR-5SLF-0	10,9	25
Uzorak 4	SCC-0CR-0SLF-200	11,0	25
Uzorak 5	SCC-10CR-0SLF-200	11,7	25
Uzorak 6	SCC-15CR-5SLF-200	11,3	25
Uzorak 7	SCC-0CR-0SLF-400	11,9	25
Uzorak 8	SCC-10CR-0SLF-400	11,8	25
Uzorak 9	SCC-15CR-5SLF-400	11,7	25
Uzorak 10	SCC-0CR-0SLF-600	10,8	25
Uzorak 11	SCC-10CR-0SLF-600	10,9	25
Uzorak 12	SCC-15CR-5SLF-600	11,0	25
Uzorak 13	SCC-0CR-0SLF-800	11,4	25
Uzorak 14	SCC-10CR-0SLF-800	10,9	25
Uzorak 15	SCC-15CR-5SLF-800	11,5	25
Uzorak 16	SCC-0CR-0SLF-G	11,1	25
Uzorak 17	SCC-10CR-0SLF-G	11,0	25
Uzorak 18	SCC-15CR-5SLF-G	10,9	25

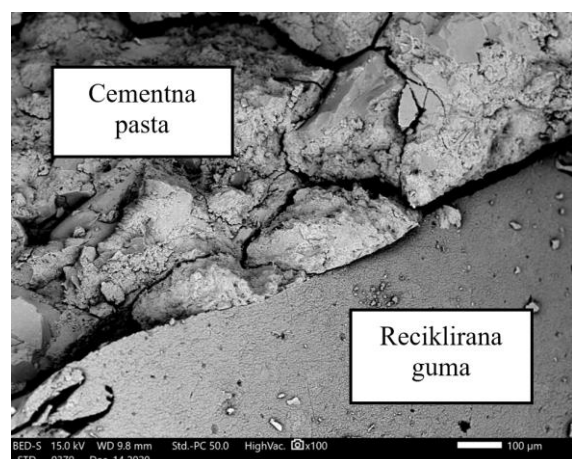
Na [Slikama 6.60 - 6.77](#) prikazani su mikrofotografiji svih 18 promatranih betonskih uzoraka.



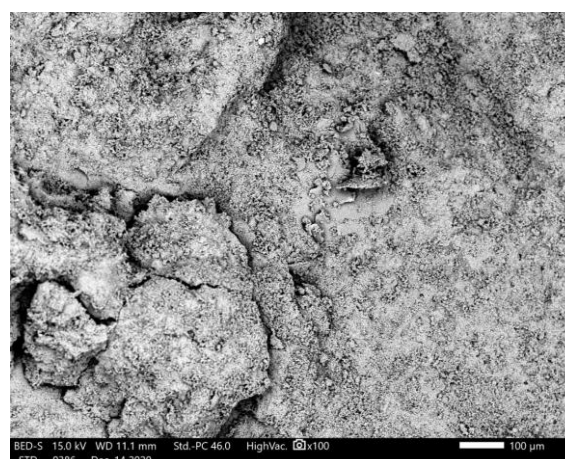
[Slika 6.60](#) Mikrograf - Uzorak 1 (SCC-0CR-0SLF-0)



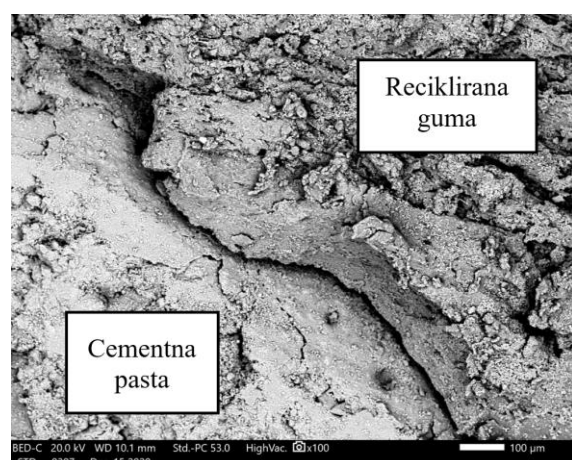
[Slika 6.61](#) Mikrograf - Uzorak 2 (SCC-10CR-0SLF-0)



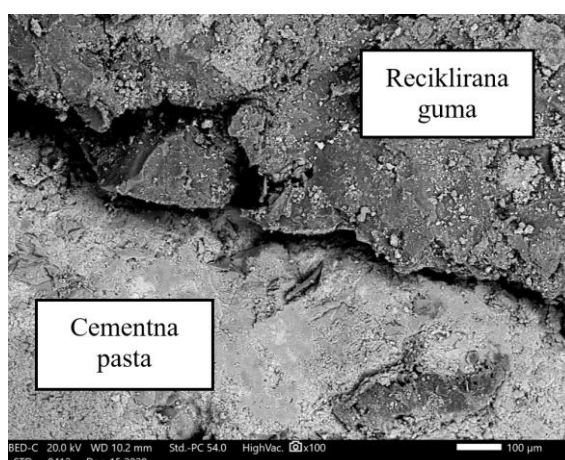
[Slika 6.62](#) Mikrograf - Uzorak 3 (SCC-15CR-5SLF-0)



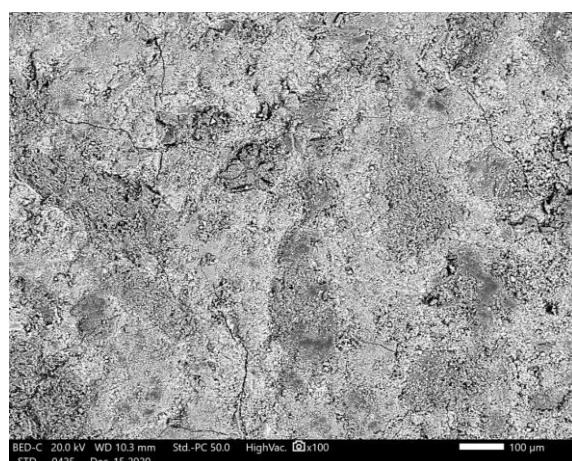
[Slika 6.63](#) Mikrograf - Uzorak 4 (SCC-0CR-0SLF-200)



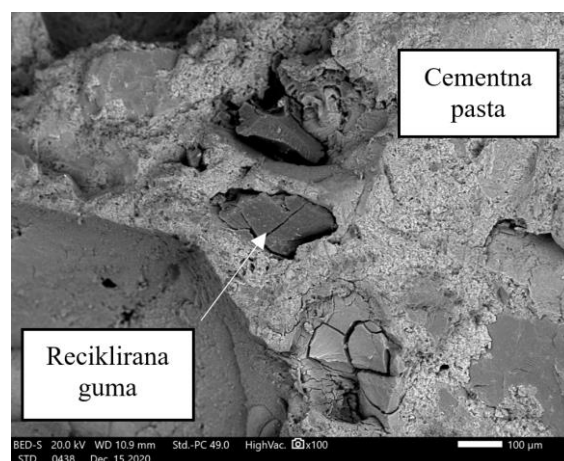
[Slika 6.64](#) Mikrograf - Uzorak 5 (SCC-10CR-0SLF-200)



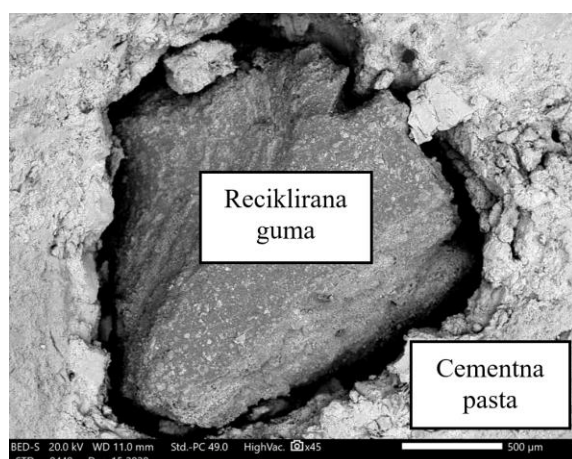
[Slika 6.65](#) Mikrograf - Uzorak 6 (SCC-15CR-5SLF-200)



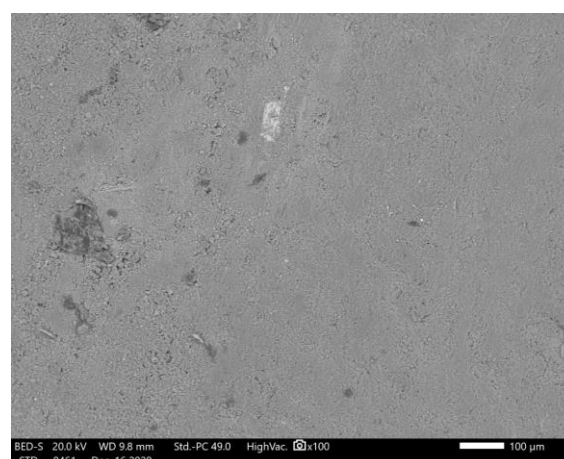
Slika 6.66 Mikrograf - Uzorak 7 (SCC-0CR-OSLF-400)



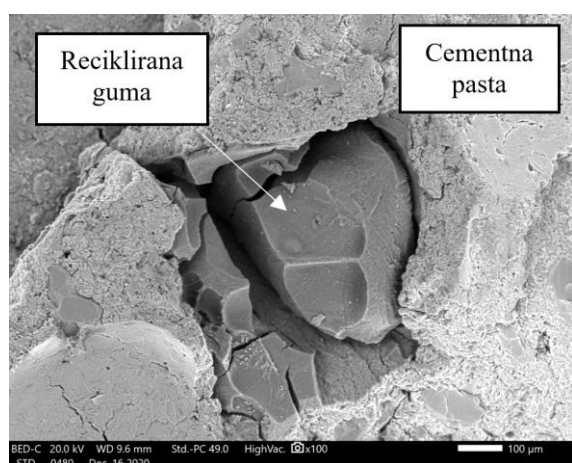
Slika 6.67 Mikrograf - Uzorak 8 (SCC-10CR-OSLF-400)



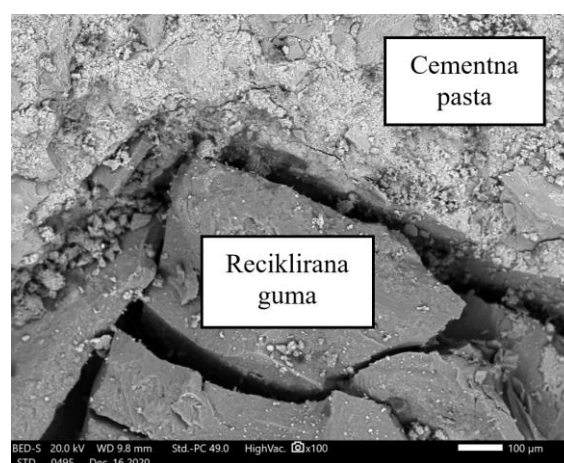
Slika 6.68 Mikrograf - Uzorak 9 (SCC-15CR-5SLF-400)



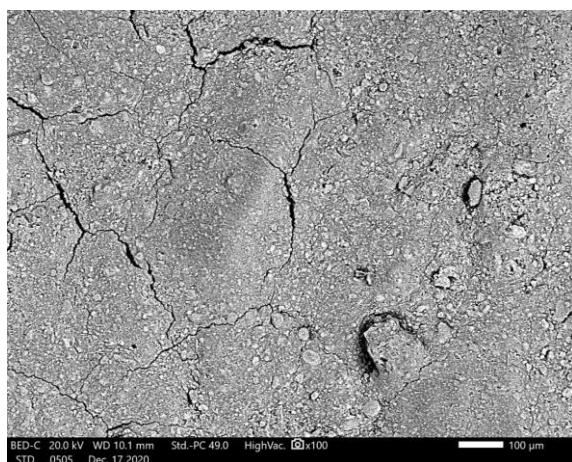
Slika 6.69 Mikrograf - Uzorak 10 (SCC-0CR-OSLF-600)



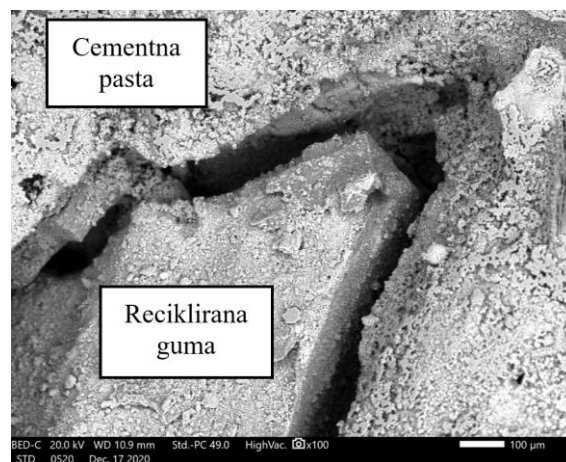
Slika 6.70 Mikrograf - Uzorak 11 (SCC-10CR-OSLF-600)



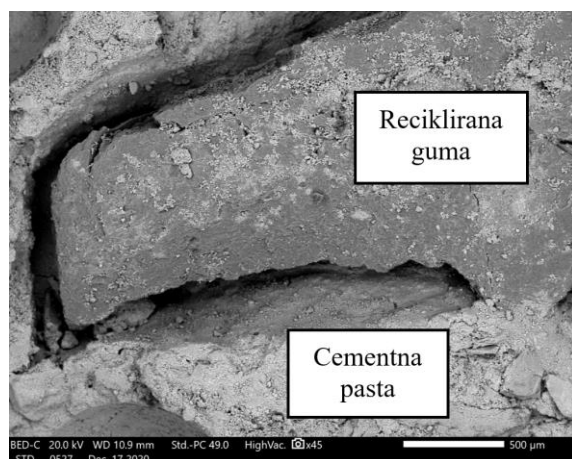
Slika 6.71 Mikrograf - Uzorak 12 (SCC-15CR-5SLF-600)



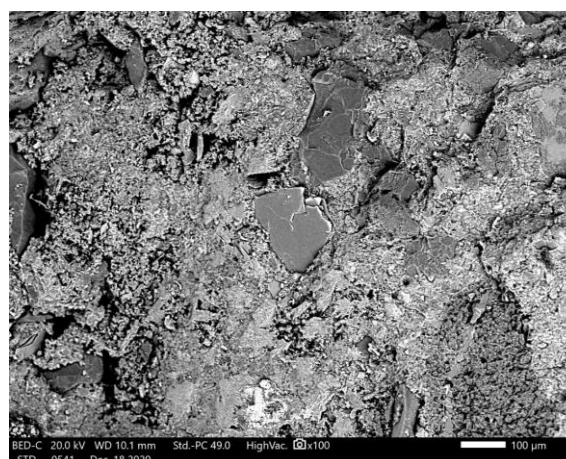
Slika 6.72 Mikrograf - Uzorak 13 (SCC-0CR-0SLF-800)



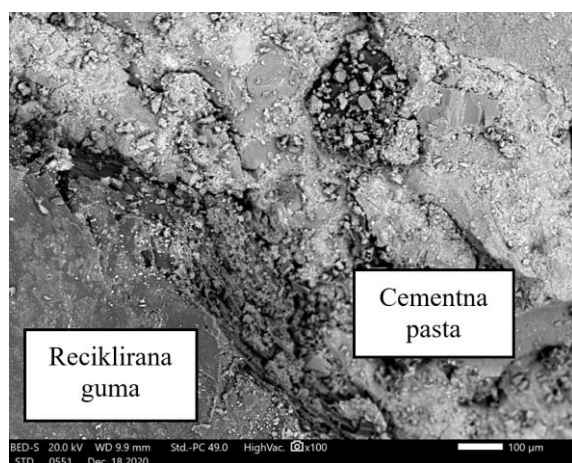
Slika 6.73 Mikrograf - Uzorak 14 (SCC-10CR-0SLF-800)



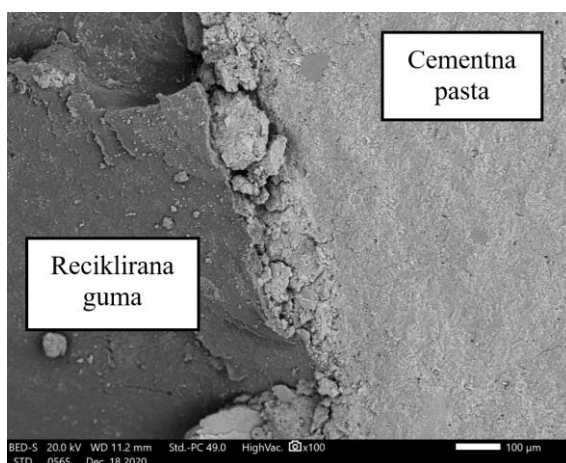
Slika 6.74 Mikrograf - Uzorak 15 (SCC-15CR-5SLF-800)



Slika 6.75 Mikrograf - Uzorak 16 (SCC-0CR-0SLF-G)



Slika 6.76 Mikrograf - Uzorak 17 (SCC-10CR-0SLF-G)

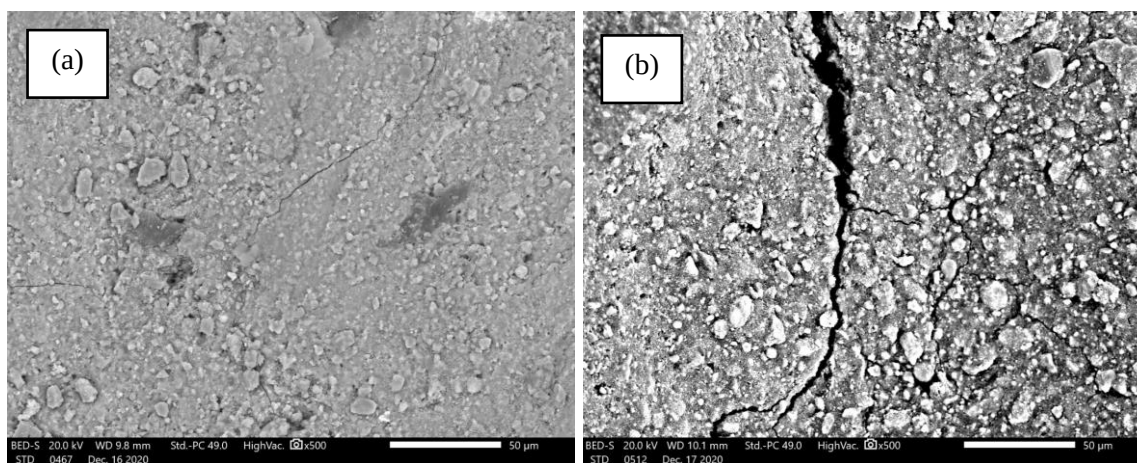


Slika 6.77 Mikrograf - Uzorak 18 (SCC-15CR-5SLF-G)

Iz prikazanih mikrografa vidljivo je da betonski uzorci s recikliranom gumom pokazuju lošiju vezu na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* od veze na sučeljku *prirodni agregat – cementna pasta*. Slični rezultati ispitivanja mogu se pronaći u literaturi [8], [72], [102]. Mikroskopska analiza pokazuje pukotine na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta*. Posljedično, poroznost je betona povećana [97], što utječe i na povećanje plinopropusnosti i povećanje vodopropunosti betona te na smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće betona. Granule reciklirane gume s nehomogenom površinom oštih rubova dovode do smanjenja obradivosti betona i povećanja sadržaja zraka u betonu [11], što se kod samozbijajućeg betona odražava na potrebu za povećanim udjelom superplastifikatora u betonskim mješavinama s recikliranom gumom. Utjecaj visokih temperatura na recikliranu gumu najbolje je vidljiv na uzorcima 8 (SCC-10CR-0SLF-400) i 11 (SCC-10CR-0SLF-600), gdje su se pod djelovanjem visokih temperatura granule reciklirane gume raspucale/raspale te se prazan prostor na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* dodatno povećao. Nadalje, kod svih betonskih uzoraka s recikliranom gumom povećanjem temperature povećavaju se i širine šupljina između reciklirane gume i cementne paste. O toj pojavi pisali su Gupta i sur. [84], a istu je moguće objasniti sagorijevanjem reciklirane gume, što je najbolje prikazano kod uzorka 9 (SCC-15CR-5SLF-400), gdje je očigledno da je rub granule reciklirane gume izgorio djelovanjem visoke temperature. Opisano ponašanje može se povezati s manjim relativnim padom vrijednosti tlačne čvrstoće betonskih uzoraka s gumom u usporedbi s betonskim uzorcima referentne mješavine izlaganih visokim temperaturama s obzirom da je potreba za dodatnim kanalima kroz koje prolazi vodena para povećan djelomičnim izgaranjem i smanjenjem volumena reciklirane gume, što posljedično uzrokuje manji pritižak na unutarnju strukturu betonskih uzoraka, a samim time i njihovo manje razaranje i ljuštenje. Uspoređujući vezu na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* betonskih uzoraka dobivenih iz laboratorijskih uzoraka valjaka s istom vezom na sučeljku betonskih uzoraka dobivenih iz greda, uočena je bolja veza na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* kod uzoraka dobivenih iz greda, što se manifestira kroz pojavu šupljina manje širine. Prema dosadašnjim spoznajama do danas nitko nije uspoređivao navedenu vezu na sučeljku uzoraka dobivenih iz laboratorijskih uzoraka sa sučeljkom uzoraka dobivenih iz greda. Bolja veza sučeljka *reciklirana guma – cementna pasta* kod uzoraka iz greda može biti objašnjena trajanjem miješanja reciklirane gume s ostatkom prirodnog agregata i ostalim komponentama betona. Dok je za izradu betonskih uzoraka valjaka reciklirana guma miješana s ostatkom prirodnog agregata u trajanju od 4-5 minuta, kod izrade betonskih greda navedeno je vrijeme povećano za minimalno 2-3 puta i to prvenstveno zbog tehnologije izvedbe greda. Naime, za izradu betonskih greda koristila se miješalica manje zapremine (Carmix, zapremine 5m³) u koju se materijal utovara ručno, čime je vrijeme miješanja komponenti betona produženo za minimalno 2-3 puta. Povećanjem vremena miješanja povećan je i mehanički utjecaj težeg prirodnog agregata na lakšu recikliranu gumu kroz mehanizam dodatnog usitnjavanja i lomljenja njezinih oštih rubova te prodora prirodnog sitnog agregata u tijelo reciklirane gume, čime se smanjuje količina pora u betonu inače uzrokovana zarobljenim zrakom na oštrim rubovima reciklirane gume. Prilikom analize mikrostrukture betonskih uzoraka uočena je i

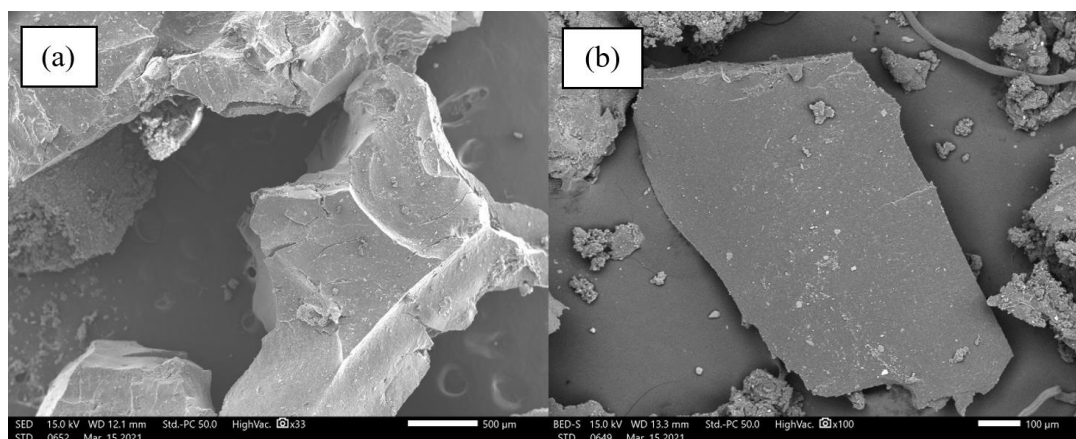
pojava mikropukotina na cementnoj pasti uzoraka 10 (SCC-0CR-0SLF-600) i 13 (SCC-0CR-0SLF-800), nastalih zbog unutarnjih naprezanja uzrokovanih djelovanjem visokih temperaturama (600 °C i 800 °C), što nije uočeno kod betonskih uzoraka s recikliranom gumom ([Slika 6.78](#)). Unutarnja naprezanja uzrokovana pornim tlakom vodene pare zbog manje poroznosti veća su kod betona bez gume.

Korištenjem reciklirane gume, koja pri visokim temperaturama gori te joj se smanjuje volumen, osigurava se dodatni slobodan prostor za prihvaćanje tlakova vodene pare uzrokovane isparavanjem nevezane i vezane vode u betonu, eliminirajući pojavu mikropukotina u betonu bez obzira kojoj je od ispitanih temperatura beton izložen, što se također može povezati i s manjim relativnim padom tlačne čvrstoće betona s gumom u usporedbi s običnim betonom. Na taj je način moguće, uz adekvatan postotak zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom, očuvati vrijednost preostale tlačne čvrstoće betona te smanjiti površinsko ljuštenje betona, osiguravajući trajnost gradiva u vidu očuvanja debljine zaštitnog sloja betona i sprječavanja korozivnog djelovanja na armaturu.



[Slika 6.78](#) Pojava mikropukotina: (a) uzorak 10 (SCC-0CR-0SLF-600); (b) uzorak 13 (SCC-0CR-0SLF-800)

Na [Slici 6.79](#) prikazan je mikrograf reciklirane gume na kojemu je vidljivo da guma u svojem izvornom obliku doista ima oštre rubove te nepravilni oblik, što predstavlja glavni uzrok smanjenja obradivosti svježe betonske mješavine te potrebu za dodatnom količinom superplastifikatora kako bi se ostvario željeni razred sposobnosti tečenja samozbijajućeg betona. Kako je već ranije i navedeno, nepravilan oblik reciklirane gume i jest glavni uzrok povećane poroznosti betona [97]. Ipak, prednost korištenja sitnije frakcije gume u usporedbi s krupnijom frakcijom gume u svojem su radu istaknuli Chylík i sur. [79], gdje je dokazano da sitnija frakcija reciklirane gume doprinosi stvaranju zračnih pora optimalne veličine i razmaka u očvrslom betonu, što je bio glavni razlog zašto je betonska mješavina koja sadrži sitniju frakciju reciklirane gume imala bolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.



Slika 6.79 SEM slike reciklirane gume različitih frakcija pri povećanju od (a) 33x i (b) 100x

6.3.7.2 EDS analiza

Samo se manji broj istraživanja usredotočio na granično prijelazno područje između reciklirane gume i cementne paste u betonu s gumom [102]. Također, manji je broj istraživanja u kojima su autori temeljito istražili granično prijelazno područje pomoću EDS mikroanalize kemijskog sastava kako bi utvrdili postoji li nekakav oblik kemijske veze između gume i okolne cementne paste. Stoga je na svim uzorcima provedena analiza kemijskog sastava kako bi se pokušala utvrditi veza između fizikalno-mehaničkih svojstava i kemijskog sastava betonskih mješavina. Analiza kemijskog sastava uzoraka provedena je pomoću energo-disperzivnog detektora rendgenskih zraka, skraćeno EDS (*engl. energy-dispersive X-ray spectroscopy*). U cementnim materijalima prvenstveno nas zanimaju kemijski elementi poput kisika (O), ugljika (C), natrija (Na), magnezija (Mg), aluminijs (Al), silicija (Si), fosfora (P), sumpora (S), klora (Cl), kalija (K), kalcija (Ca) i željeza (Fe) [193]. Raspon prepoznatljivih kemijskih elemenata ovisi o veličini napona ubrzanja. Stoga je u ispitivanjima korišten napon ubrzanja između 15 kV - 20 kV kako bi se pravilno detektirali prethodno navedeni kemijski elementi. [Prilozi 1-19](#) prikazuju rezultate EDS analize betonskih uzoraka s recikliranom gumom i bez nje te EDS analizu uzorka reciklirane gume.

Kako bi se dobio lakši uvid u rezultate EDS analize, u [Tablicama 6.36, 6.37 i 6.38](#) prikazana je zastupljenost pojedinih kemijskih elemenata u uzorcima za svaku betonsku mješavinu zasebno i to pri različitim temperaturama i u gredama. U [Tablici 6.39](#) prikazana je zastupljenost pojedinih kemijskih elemenata u ispitivanom uzorku reciklirane gume. Pogreške koje nastaju uslijed manjih promjena struje snopa elektrona te uslijed kvantificiranja kisika minimizirane su prikazom atomskih udjela pojedinih elemenata [193].

Tablica 6.36 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-0CR-0SLF

Kemijski element	Atomski udio (%)					
	SCC-0CR-0SLF-0	SCC-0CR-0SLF-200	SCC-0CR-0SLF-400	SCC-0CR-0SLF-600	SCC-0CR-0SLF-800	SCC-0CR-0SLF-G
C	17,16	19,48	19,05	18,52	15,78	16,37
O	58,66	61,97	58,51	58,53	59,78	62,56
Na	-	0,49	0,55	-	-	0,38
Mg	6,67	3,18	2,05	4,15	6,63	2,08
Al	0,00	0,89	0,63	0,82	0,89	1,38
Si	4,27	2,86	4,76	3,55	4,21	5,15
S	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-
Ca	13,24	11,13	14,18	14,02	12,72	11,66
Fe	-	-	0,28	0,41	0	0,42
As	-	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-
Suma:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablica 6.37 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-10CR-0SLF

Kemijski element	Atomski udio (%)					
	SCC-10CR-0SLF-0	SCC-10CR-0SLF-200	SCC-10CR-0SLF-400	SCC-10CR-0SLF-600	SCC-10CR-0SLF-800	SCC-10CR-0SLF-G
C	31,99	36,49	52,12	26,05	23,01	46,12
O	48,53	46,83	33,93	51,78	57,83	40,23
Na	-	0,73	0,74	0,52	-	0,30
Mg	1,24	1,93	0,29	1,95	3,41	1,22
Al	0,51	0,74	0,51	1,20	0,61	0,73
Si	3,87	3,11	2,83	5,45	3,80	2,96
S	-	-	1,21	-	-	0,41
K	-	-	0,97	-	-	-
Ca	13,86	9,81	6,71	12,63	11,05	7,77
Fe	-	0,23	0,23	0,41	0,29	0,27
As	-	-	-	-	-	-
Zn	-	0,13	0,48	-	-	-
Suma:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablica 6.38 Kvantitativni rezultati EDS analize uzoraka betonske mješavine SCC-15CR-5SLF

Kemijski element	Atomski udio (%)					
	SCC-15CR-5SLF-0	SCC-15CR-5SLF-200	SCC-15CR-5SLF-400	SCC-15CR-5SLF-600	SCC-15CR-5SLF-800	SCC-15CR-5SLF-G
C	51,62	42,00	44,78	47,53	32,43	34,37
O	36,39	43,44	41,82	39,05	50,51	47,39
Na	0,27	-	0,48	0,39	0,27	-
Mg	0,79	3,16	1,36	1,37	2,22	1,06
Al	0,50	0,63	0,47	0,64	0,61	1,15
Si	2,47	2,66	2,20	3,08	3,36	3,61
S	-	-	0,34	0,27	-	-
K	-	-	-	-	-	0,58
Ca	7,18	7,86	7,81	6,92	10,34	11,32
Fe	-	0,24	0,23	0,27	0,26	0,51
As	0,52	-	-	-	-	-
Zn	0,26	-	0,50	0,48	-	-
Suma:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablica 6.39 Kvantitativni rezultati EDS analize uzorka reciklirane gume

Kemijski element	Atomski udio (%)
C	99,33
Na	0,67
Suma:	100

Usporedbom EDS analiza betonskih uzoraka uočeno je sljedeće:

- Betonski uzorci bez gume imaju manji atomski i maseni udio ugljika (C) u usporedbi s uzorcima koji sadrže recikliranu gumu. Također, ispitani uzorak reciklirane gume pokazuju da većinski atomski udio uzorka reciklirane gume pripada ugljiku (99,33 %), što objašnjava i veći atomski i maseni udio ugljika kod betonskih uzoraka s gumom u usporedbi s betonskim uzorcima bez gume. Ugljik, prisutan u gumenom agregatu, mekani je element koji smanjuje čvrstoću betona [80]. EDS analiza uzorka reciklirane gume potvrđuje da ne postoji nekakav dodatni element osim ugljika koji bi utjecao kemijski na veze na sučelju reciklirane gume i cementne paste.
- Kao mjerodavni atomski udjeli kemijskih elemenata kojima je moguće utvrditi čvrstoću veze su silicij (Si) i kalcij (Ca) te njihov omjer (Ca / Si) [102]. Neovisno o temperaturi kojoj je betonski uzorak izložen vrijednosti omjera Ca / Si za sve su uzorke između 2,25 i 3,95 te nije uočen trend iz kojeg bi se moglo pomoću promatranih kemijskih elemenata kvantitativno objasniti i s čvrstoćom materijala povezati kvalitetu kemijske veze na sučelju.

Veza između fizikalno-mehaničkih svojstava betonskih mješavina i kemijskog sastava betonskih mješavina tom EDS analizom nije detaljno utvrđena te su potrebne daljnje kvantifikacije rezultata i dodatna ispitivanja kako bi se mogao donijeti pouzdan zaključak o vezi između fizikalno-mehaničkih svojstava i kemijskog sastava betonskih mješavina. Što se tiče uzoraka koji se ne izlažu

visokim temperaturama, predlaže se ispitivanje kemijskih elemenata na uzorcima starosti od nekoliko sati do nekoliko dana, najbolje do 7 dana starosti uzoraka s obzirom da se u tom razdoblju događa najveći broj kemijskih reakcija u uzorku u sklopu procesa hidratacije cementa. Što se tiče uzoraka koji se izlažu visokim temperaturama, predlaže se da se kao mjerodavni usvoje rezultati ispitivanja morfologije uzoraka i sučeljka *reciklirana guma – cementna pasta*.

6.4 Zaključci o ispitivanju

U [Poglavlju 6](#) ispitana su dodatna svojstva odabranih optimalnih mješavina samozbijajućeg betona na razini materijala koje je obuhvatilo ispitivanje svojstava trajnosti, termičkih svojstava te ispitivanje mikrostrukture očvrstnalog samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i veze na sučeljku cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. Iz dobivenih eksperimentalnih rezultata proizlazi nekoliko bitnih zaključaka:

- Plinopropusnost betona povećava se povećanjem udjela gume u betonu. Međutim, u skladu s kriterijima za određivanje kvalitete betona, koji se temelje na vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti prema preporukama RILEM TC 230-PSC [175], sve tri betonske mješavine ubrajaju se u beton srednje kvalitete. Zaključuje se da se samozbijajući beton s 10 % i 15 % udjela reciklirane gume može bez dodatnih ograničenja vezanih uz plinopropusnost koristiti u nosivim armiranobetonskim elementima.
- Povećanjem udjela reciklirane gume u betonu povećava se i vodopropusnost betona. Ipak, vidljiv je pozitivan učinak silicijske prašine na smanjenje dubine prodora vode. Preporučuje se ograničiti primjenu samozbijajućeg betona s promatranim postotnim udjelima reciklirane gume na projektne situacije u kojima materijal nije izložen direktnom dodiru s vodom pod tlakom, kao npr. u nosivim armiranobetonskim elementima stambene građevine koji se nalaze iznad kote gotovog terena.
- Zamjenom prirodnog agregata recikliranom gumom smanjuje se deformacija prouzročena skupljanjem betona. Budući da se zbog skupljanja betona na njegovoj površini javljaju pukotine te proces skupljanja betona u konačnici predstavlja nepovoljnu pojavu u pogledu uporabljivosti betona, doprinos gume može se smatrati pozitivnim s obzirom da guma, zbog smanjenog skupljanja betona, doprinosi potencijalnom smanjenju broja i veličine pukotina u betonu, što posljedično može utjecati na veću trajnost betona i manje troškove održavanja tijekom projektiranog vijeka građevine.
- Otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećana je primjenom reciklirane gume u samozbijajućem betonu. Nadalje, povećanje poroznosti uzrokovano prisutnošću gume u betonu pozitivno utječe na stvaranje dodatnog praznog prostora u betonskoj mikrostrukтури, što omogućuje prihvrat unutarnjih naprezanja uzrokovanih povećanjem volumena uslijed prelaska vode iz tekućeg u kruto stanje prilikom ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Navedenom pojavom moguće je spriječiti preuranjenu pojavu

pukotina u betonu, što posljedično utječe na poboljšanu uporabljivost materijala. Također, korištenjem reciklirane gume kao zamjene za prirodni agregat moguće su i dodatne uštede zbog manje potrebe za dodavanjem aeranta u beton u situacijama gdje je njegovo dodavanje neophodno. Primjena betona s gumom moguća je u konstrukcijskim elementima i to u područjima gdje je betonska konstrukcija izložena djelovanju smrzavanja i odmrzavanja, kao npr. kod vanjskih elemenata konstrukcije koji mogu biti u dodiru sa soli za odmrzavanje poput vanjskih stupova ili zidova gdje je specifična pojava prskanja vode s prometnih površina. Prema normama HRN 1128:2007 [177] i HRN EN 206:2021 [183] riječ je o razredima izloženosti XF2 i XF4 u kojima beton može biti u dodiru s agresivnim medijem poput soli ili sulfata, što dovodi do zaključka o pozitivnom utjecaju primjene gume kao zamjene za prirodni agregat na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

- Uzorci betona bez gume pokazali su blago površinsko ljuštenje i površinske pukotine nakon izlaganja visokim temperaturama, dok kod uzoraka s gumom ljuštenja i površinskih pukotina nije bilo, čime je dokazano da guma pozitivno utječe na očuvanje površinske strukture betona nakon izlaganja visokim temperaturama, što dovodi do zaključka o poboljšanju promatranog svojstva trajnosti betona i armature u vidu smanjenog broja pukotina, očuvanja zaštitnog sloja, a samim time i bolje zaštite armature u nosivim konstrukcijskim elementima tijekom izlaganja visokim temperaturama ili požaru.
- Što se tiče izgaranja reciklirane gume u betonu, a posljedično i pojave dima koji u pogledu sigurnosti može biti štetan, mješavina samozbijajućeg betona s 10 %-tnim udjelom reciklirane gume može se bez dodatnih ograničenja koristiti u konstrukcijske svrhe. Nadalje, kod uzoraka betonske mješavine s 15 % gume uočena je pojava dima prilikom izlaganja betonskih uzoraka visokim temperaturama, stoga se predlaže dodatna opreznost i dodatno ispitivanje utjecaja izgaranja gume i pojave dima pri većim postotnim zamjena prirodnog agregata gumom s obzirom na namjenu građevine u kojoj bi se beton te vrste potencijalno mogao koristiti. Ipak, potrebno je napomenuti da se npr. u većini stambenih građevina koristi nosiva konstrukcija s dodatnim slojevima poput žbuke ili toplinske izolacije, stoga se može pretpostaviti da u ranim fazama požara pojava dima niti ne bi imala presudnu ulogu u ugrozi zdravlja korisnika zgrada s obzirom da je velika vjerojatnost da bi korisnici zgrade u trenutku izloženosti nosive konstrukcije toplinskom opterećenju već bili evakuirani.
- Sastav betonske mješavine nema izraženijeg utjecaja na povećanje ili smanjenje gubitka mase uzoraka prilikom izlaganja istih visokim temperaturama. Povećanjem temperature izlaganja smanjuje se i masa betonskih uzoraka, što ukazuje na povećanje poroznosti betona, a samim time i na smanjenje mehaničkih svojstava betona kao što su njegova tlačna čvrstoća i modul elastičnosti.
- Ocjenom kvalitete betona pomoću brzine prolaska ultrazvučnog impulsa (UPV) zaključuje se da se sve tri mješavine mogu svrstati u razred dobre kvalitete betona do temperature izlaganja

od 400 °C, nakon koje kvaliteta betona za mješavine SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF postaje općenito ili iznimno loša, dok mješavina SCC-0CR-0SLF i nakon izlaganja temperaturi od 600 °C još uvijek pokazuje dobru kvalitetu. Ocjenom kvalitete betona pomoću vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa može se procijeniti koliko je izloženost betona visokim temperaturama utjecala na smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona te na taj način, nerazornom metodom, potencijalno ocijeniti stanje nosivosti AB konstrukcije.

- Reciklirana guma ima manji modul elastičnosti od modula elastičnosti prirodnog agregata, uzrokujući njezinom primjenom u samozbijajućem betonu i manja maksimalna naprezanja, tj. manju tlačnu čvrstoću betonskih uzoraka. Međutim, betonski uzorci bez gume pokazuju manju deformabilnost od betonskih uzoraka s recikliranom gumom. Povećana deformabilnost betonskih uzoraka s recikliranom gumom može doprinijeti poboljšanoj otpornosti betona, ali i armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata na potresna djelovanja u vidu duktilnijeg sloma kroz stvaranje većeg broja manjih pukotina, povećavajući na taj način sposobnost disipacije, tj. rasipanja energije konstrukcijskih elemenata stvorene potresnim djelovanjem.
- S obzirom na otpornost betona na visoke temperature te na vrijednosti preostalih tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka predlaže se da maksimalni udio reciklirane gume u betonu bude 10 % od ukupnog volumena sitnog agregata kako bi se održala stabilnost i nosivost betona i AB nosive konstrukcije u slučaju izloženosti visokim temperaturama.
- Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće, tj. maksimalnog naprezanja koje uzorci mogu podnijeti nakon što su izloženi visokim temperaturama, eksplozivni slom, tj. eksplozivno odlamanje karakteristično je za uzorke referentne betonske mješavine SCC-0CR-0SLF, dok je kod uzoraka betonskih mješavina s recikliranom gumom i silicijskom prašinom (SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF) uočen duktilniji slom uzoraka s pojavom većeg broja manjih pukotina, ali niti u jednom slučaju navedeni slom nije bio eksplozivan. Pojava smanjenog eksplozivnog odlamanja betona s recikliranom gumom predstavlja pozitivan doprinos razvoju AB konstrukcijskih elemenata s recikliranom gumom u vidu sigurnijeg korištenja takvog materijala u slučaju pojave izvanrednog potresnog opterećenja u kojemu bi beton s recikliranom gumom imao potencijalno povećanu deformabilnost, što bi za posljedicu imalo stvaranje većeg broja pukotina manje širine i dubine, sa smanjenom opasnošću od eksplozivnog odlamanja betona.
- Usporedbom dobivenih rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće s preporukama norme HRN EN 1992-1-2:2013 [190] zaključeno je da se za ispitane betonske mješavine mogu koristiti modeli dani u navedenoj normi.
- Na temelju grafičkih prikaza danih na [Slikama 6.53](#) i [6.54](#) zaključuje se da je moguće koristiti dane regresijske jednadžbe za procjenu vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti na osnovi unaprijed poznate ili izmjerene vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz betonski uzorak. Također, pomoću rezultata prikazanih na [Slici 6.55](#) zaključuje se da je moguće

pomoću regresijske jednadžbe procijeniti vrijednost jedne mehaničke karakteristike, tj. tlačne čvrstoće ili modula elastičnosti, na temelju poznate vrijednosti druge mehaničke karakteristike.

- Betoni s gumom imaju slična termička svojstva kao lagani betoni, ali potencijalno mogu ostvariti veće čvrstoće u usporedbi s laganim betonima jer je smanjenje čvrstoće betona jednim dijelom uvjetovano i smanjenjem njegove gustoće. Uz pretpostavku da se beton s gumom koristi za izradu armiranobetonskih elemenata grijane građevine, povećanjem sadržaja gume u betonu iznad 15 % dodatno bi se povećao pozitivan učinak na smanjenje vrijednosti toplinske vodljivosti materijala, a ujedno bi se smanjila i količina korištenog agregata iz prirodnih resursa, što pozitivno utječe na dva temeljna zahtjeva za građevinu, tj. na racionalnije gospodarenje energijom i očuvanjem topline u građevini, ali i na održivu uporabu prirodnih izvora. Međutim, dodatan je oprez potreban zbog utjecaja reciklirane gume na tlačnu čvrstoću betona koja je najbitnija ukoliko se beton s gumom namjerava koristiti u konstrukcijskim elementima, stoga se predlaže maksimalni postotni udio gume u betonu od 15 % ukupnog volumena agregata kako bi se poboljšala termička, ali i zadržala mehanička svojstva samozbijajućeg betona.
- Rezultati provedene analize strukture očvrsluloga samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i veze na sučeljku cementnog kamena i prirodnog i recikliranog agregata pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa ukazuju na lošiju vezu na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* od veze na sučeljku *prirodni agregat – cementna pasta*. Uspoređujući vezu na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* betonskih uzoraka dobivenih iz laboratorijskih uzoraka valjaka s istom vezom na sučeljku betonskih uzoraka dobivenih iz greda, uočena je bolja veza na sučeljku *reciklirana guma – cementna pasta* kod uzoraka dobivenih iz greda, što se manifestira kroz pojavu šupljina manje širine, a to se može obrazložiti povećanjem vremena miješanja prilikom izrade armiranobetonskih greda, čime je povećan i mehanički utjecaj težeg prirodnog agregata na lakšu recikliranu gumu kroz mehanizam dodatnog usitnjavanja i lomljenja njezinih oštih rubova te prodora prirodnog sitnog agregata u tijelo reciklirane gume, čime se smanjuje količina pora u betonu inače uzrokovana zarobljenim zrakom na oštrim rubovima reciklirane gume.
- Prilikom analize mikrostrukture betonskih uzoraka uočena je i pojava mikropukotina na cementnoj pasti uzorka 10 (SCC-0CR-0SLF-600) i uzorka 13 (SCC-0CR-0SLF-800), nastalih zbog unutarnjih naprezanja uzrokovanih djelovanjem visokih temperaturama (600 °C i 800 °C), što nije uočeno kod betonskih uzoraka s recikliranom gumom. Unutarnja naprezanja uzrokovana pornim tlakom vodene pare zbog manje poroznosti veća su kod betona bez gume.
- Korištenjem reciklirane gume, koja pri visokim temperaturama sagorijeva te joj se smanjuje volumen, osigurava se dodatni slobodan prostor za prihvaćanje tlakova vodene pare uzrokovanih isparavanjem nevezane i vezane vode u betonu eliminirajući pojavu mikropukotina u betonu, što se može povezati i s manjim relativnim padom tlačne čvrstoće

betona s gumom u usporedbi s običnim betonom. Na taj je način moguće, uz adekvatan postotak zamjene prirodnog agregata recikliranom gumom, očuvati vrijednost preostale tlačne čvrstoće betona te smanjiti površinsko ljuštenje betona, osiguravajući trajnost gradiva u vidu očuvanja debljine zaštitnog sloja betona i sprječavanja korozivnog djelovanja na armaturu.

- Veza između fizikalno-mehaničkih svojstava betonskih mješavina i kemijskog sastava betonskih mješavina tom EDS analizom nije detaljno utvrđena te je potrebna daljnja kvantifikacija rezultata i dodatna ispitivanja kako bi se mogao donijeti pouzdan zaključak o vezi između fizikalno-mehaničkih svojstava i kemijskog sastava betonskih mješavina.

Nakon provedene detaljne analize svih rezultata ispitivanja optimalnih mješavina na razini materijala može se donijeti generalni zaključak da je primjena reciklirane gume kao zamjene za prirodni sitni agregat u samozbijajućem betonu opravdana te da se u idućem koraku treba pristupiti eksperimentalnom ispitivanju optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini konstrukcijskih elemenata kako bi se dobila cjelovita slika utjecaja reciklirane gume na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju te kako bi se mogle donijeti preporuke i smjernice za korištenje reciklirane gume u samozbijajućem betonu.

7 EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA OPTIMALNIH MJEŠAVINA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S RECIKLIRANOM GUMOM NA RAZINI KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA

7.1 Uvod i cilj ispitivanja

Zaključci velikog broja istraživanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom utemeljeni su na ispitivanju laboratorijskih uzoraka betona poput valjaka, kocki i prizmi te primjena i ponašanje takvog materijala u nosivim konstrukcijskim elementima nisu dovoljno istraženi. Stoga se nakon provedenih ispitivanja optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom na razini materijala pristupilo eksperimentalnom ispitivanju istih na razini konstrukcijskih elemenata, tj. armiranobetonskih greda. Cilj ispitivanja bio je dokazati mogućnost korištenja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će imati zadovoljavajuću nosivost i poboljšana svojstva trajnosti, tj. povoljnije pukotinsko stanje pri djelovanju opterećenja na konstrukcijski element, a samim time i poboljšanu duktilnost i kapacitet apsorpcije energije. Zbog nedovoljne istraženosti predmetno ispitivanje obuhvatilo je i primjenu silicijske prašine kao zamjene dijela cementa u namjeri postizanja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava betona nužnih za primjenu takvog materijala u nosivim armiranobetonskim elementima.

7.2 Postupak izrade armiranobetonskih greda

7.2.1 Materijali i projektiranje sastava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom

Za izradu armiranobetonskih greda upotrijebljeni su identični materijali korišteni i za izradu uzoraka samozbijajućeg betona na razini materijala ([Poglavlje 6](#)). Korišteni su sastavi betonskih mješavina koji su u [Poglavlju 4](#) okarakterizirani kao optimalni, sukladno rezultatima laboratorijskih ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju te sukladno provedenoj detaljnoj statističkoj analizi. Oznake i njihova značenja ispitanih armiranobetonskih greda su sljedeća:

- SCC-0CR-0SLF – mješavina samozbijajućeg betona bez dodataka za potrebe usporedbe utjecaja dodataka (zamjena) u sljedećim dvjema mješavinama,
- SCC-10CR-0SLF – mješavina samozbijajućeg betona sa zamjenom sitnog agregata recikliranom gumom u iznosu od 10 % volumena (10CR),
- SCC-15CR-5SLF – mješavina samozbijajućeg betona sa zamjenom sitnog agregata recikliranom gumom u iznosu od 15 % volumena (15CR) i cementa silicijskom prašinom u iznosu od 5 % (5SLF).

Budući da mješavina SCC-0CR-0SLF ima veću tlačnu čvrstoću (≈ 43 MPa) od betonskih mješavina SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF (≈ 30 MPa), izrađene su i dodatne armiranobetonske grede oznake SCC-R čiji je sastav betonske mješavine projektiran na način da 28-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka valjaka iznosi 30 MPa. Cilj izrade i ispitivanja dodatnih armiranobetonskih greda oznake SCC-R usporedba je ponašanja greda s istim tlačnim čvrstoćama, s i bez reciklirane gume kao djelomične zamjene za prirodni sitni agregat. Kako bi se postigao navedeni cilj, prema Smjernicama za projektiranje sastava samozbijajućeg betona [1] projektiran je sastav dodatnih triju mješavina samozbijajućeg betona (Tablica 7.1). Na temelju rezultata ispitivanja navedenih triju dodatnih betonskih mješavina u svježem i očvrslulom stanju odabran je sastav samo jedne od tri ispitane dodatne betonske mješavine, i to one s tlačnom čvrstoćom valjaka od 30 MPa pri starosti uzoraka od 28 dana. Odabrana betonska mješavina kasnije je korištena za izradu dodatne tri armiranobetonske grede. Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u svježem i očvrslulom stanju dani su u Tablicama 7.2 i 7.3.

Tablica 7.1 Sastavi mješavina samozbijajućeg betona oznake SCC-R (u kg/m^3)

Komponenta		SCC-R-1	SCC-R-2	SCC-R-3
Cement		350	350	300
Silicijska prašina		-	-	-
Voda		192,5	157,50	165
Omjer v/c		0,55	0,45	0,55
Omjer v/p		1,07	1,07	1,18
SP - Energy FM 500 (% m_c)		1,25 %	1,25 % (1,75 %)	1,25 % (2 %)
VMA -Premadd Stabilisator X (% m_c)		0,25 %	0,25 %	0,25 %
Sadržaj zraka (%)		1,5 %	1,5 %	1,5 %
Punilo (dolomitno brašno)		205	110	135
Agregat	0-2 mm	313,82	347,55	347,59
	0-4 mm	593,88	657,71	657,80
	4-8 mm	350,31	387,96	388,01
	8-16 mm	437,89	484,95	485,01

Tablica 7.2 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona SCC-R u svježem stanju

Svojstvo svježeg betona		Poroznost	Viskoznost		Sposobnost tečenja		Sposobnost zaobilazjenja zapreka			
Vrsta ispitivanja			Rasprostiranje slijeganjem				J-prsten		L-kutija	
R.br.	Mješavina	%	t ₅₀₀ (s)	Razred	SF (mm)	Razred	PJ (mm)	Razred	PL	Razred
1	SCC-R-1	1,8	1,65	VS1	787,5	SF3	10	= 10	0,90	PA2
2	SCC-R-2	2,2	2,20	VS2	745,0	SF2	13	> 10	0,85	PA2
3	SCC-R-3	2,1	1,44	VS1	770,0	SF3	6	< 10	1,00	PA2

Tablica 7.3 Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona SCC-R u očvrslom stanju

Mješavina	Masa uzorka (kg)	Gustoća (kg/m ³)	f _{c,cyl} (MPa)	
SCC-R-1	12,725	2401,51	33,27	30,75
	12,710	2398,68	28,55	
	12,695	2395,85	30,44	
SCC-R-2	12,920	2438,31	32,98	34,25
	12,845	2424,16	35,49	
	12,895	2433,59	34,27	
SCC-R-3	12,845	2424,16	34,78	36,88
	13,095	2471,34	38,79	
	13,085	2469,45	37,06	

Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnih ispitivanja betonska mješavina SCC-R-1 odabrana je za izradu dodatnih armiranobetonskih greda i to iz dva glavna razloga. Prvi je razlog taj što se za dobivanje željenog razreda rasprostiranja slijeganjem (SF3 = 750-850 mm) količina superplastifikatora betonskih mješavina SCC-R-2 i SCC-R-3 trebala povećati s postojećih 1,25 % na 1,75 % i 2 %, što je posljedično negativno utjecalo na pojavu izdvajanja vode i segregacije. Drugi razlog vidljiv je iz [Tablice 7.3](#), iz koje se može uočiti da su tlačne čvrstoće uzoraka izrađenih od betonske mješavine SCC-R-2 i SCC-R-3 veće od 30 MPa, a cilj je bio dobiti tlačnu čvrstoću što bližu vrijednosti od 30 MPa kako bi rezultati ispitivanja greda mogli biti što više usporedivi. Radi lakšeg praćenja interpretacije rezultata eksperimentalnih ispitivanja u nastavku [Poglavlja 7](#) mješavina SCC-R-1 ima oznaku SCC-R.

7.2.2 Postupak izrade armiranobetonskih greda

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja pomoću samohodnog utovarnog miksera za pripremu betona (CARMIX) zapremine 5 m³ ([Slika 7.1](#)) betonirano je sveukupno 12 greda, po tri od svake odabrane betonske mješavine ([Slika 7.2](#) i [7.3](#)). Budući da samozbijajući beton teče pod vlastitom težinom, materijal se u oplatu ugrađivao bez potrebe za dodatnim zbijanjem betona ([Slika 7.4](#)). Prilikom izrade armiranobetonskih greda ispitana su i svojstva svježih betonskih mješavina u pogledu sposobnosti tečenja, viskoznosti, sposobnosti zaobilaženja zapreka te otpornosti segregaciji. Izrađeno je i 6 uzoraka valjaka kako bi se pri starosti betona od 28 dana ispitala tlačna čvrstoća (3 uzorka) i modul elastičnosti betona (3 uzorka) betonskih mješavina.



Slika 7.1 Samohodni utovarni mikser za pripremu betona CARMIX (zapremina 5 m³) korišten prilikom izrade AB greda



Slika 7.2 Prikaz oplata za AB grede

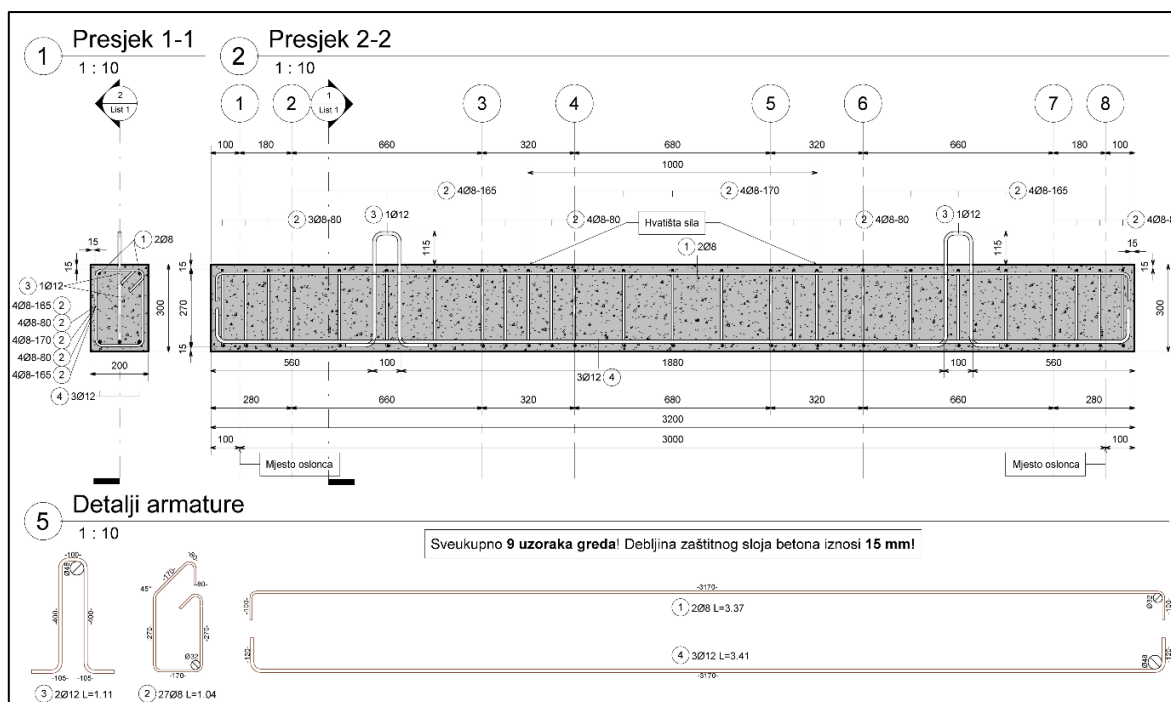


Slika 7.3 Prikaz armature za AB grede

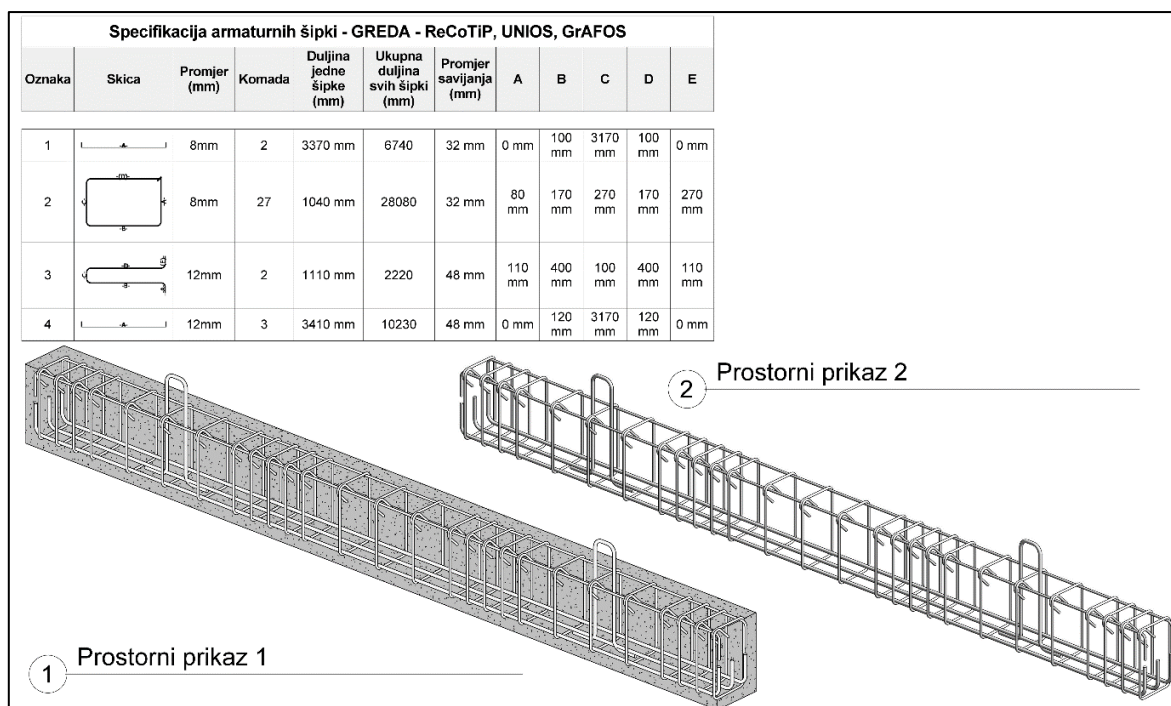


Slika 7.4 Tečenje betona pod djelovanjem vlastite težine

Uzdužna i poprečna armatura je u svim gredama, neovisno o betonskoj mješavini, bila jednaka. Korištena je armatura B500B, nabavljena od poduzeća KAPITAL GRUPA d.o.o. u Osijeku. Geometrija svih greda iznosi širina × visina × duljina = 20 cm × 30 cm × 3000 cm (Slike 7.5 i 7.6).



Slika 7.5 AB grede - armaturni nacrti i specifikacija količina armaturnih šipki – dvodimenzionalni prikaz

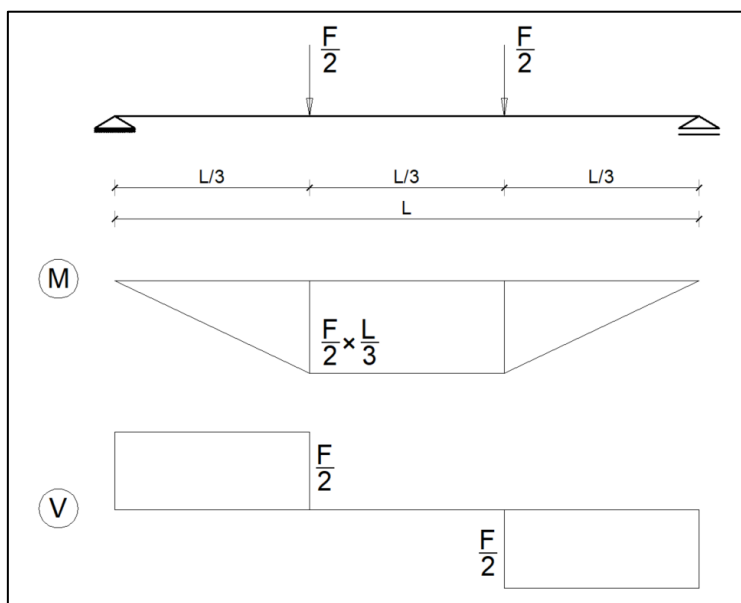


Slika 7.6 AB grede - armaturni nacrti i specifikacija količina armaturnih šipki – trodimenzionalni prikaz

Oplata armiranobetonskih greda uklonjena je 24 sata nakon betoniranja. Zbog procesa hidratacije cementa grede su u cijelosti bile prekrivene najlonom te su po potrebi zalijevane vodom. Grede su njegovane 28 dana, nakon čega su podvrgnute postupku eksperimentalnog ispitivanja

7.2.3 Postupak ispitivanja uzoraka armiranobetonskih greda

Ispitivanje slobodno oslonjenih armiranobetonskih greda izvršeno je u Laboratoriju za materijale i konstrukcije Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek pri starosti greda od 28 dana. Statički sustav slobodno oslonjenih armiranobetonskih greda prikazan je na [Slici 7.7](#). Uzorci su opterećivani pomoću univerzalnog uređaja za vlačno-tlačno ispitivanje materijala i elemenata (kidalica) koji može postići maksimalnu silu od 300 kN, Shimadzu AGS-300 kN ([Slika 7.8](#)). Koncentrirana sila koju nanosi kidalica posredno se prenosi na gornju površinu grede kako bi se simuliralo savijanje u dvije točke, čime se postiglo stanje čistog savijanja u srednjoj trećini grede, pri čemu je osmišljena posebna konstrukcija kako bi se simulirali zglobovno pomični i nepomični ležaji te preuzimala reakcija greda. Dvije koncentrirane sile djelovale su na trećinama raspona grede.

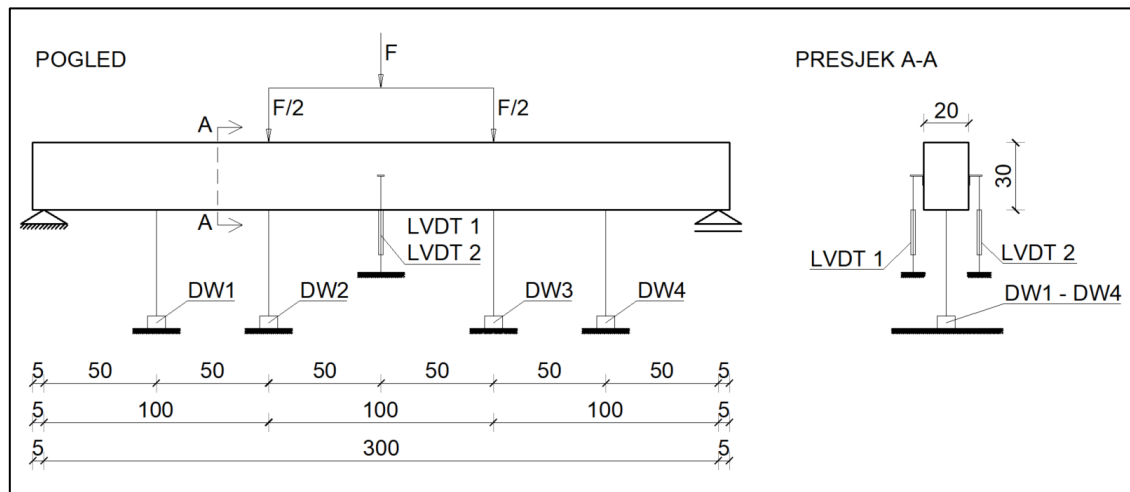


[Slika 7.7](#) Statički sustav za eksperimentalno ispitivanje armiranobetonskih greda



Slika 7.8 Laboratorijsko ispitivanje AB greda pomoću univerzalnog uređaja za vlačno-tlačno ispitivanje materijala i elemenata

Pomoću 2 LVDT-a i 4 žičana potencijometra (engl. *Draw Wire / String Potentiometer*) mjereni su vertikalni pomaci, tj. progibi duž grede u 5 fiksnih točaka. Shematski prikaz mjernih uređaja na gredama vidljiv je na [Slici 7.9](#).



Slika 7.9 Plan-pozicija mjernih uređaja na gredama

Brzina prirasta opterećenja kontrolirana je pomakom traverze kidalice u polovini raspona grede, što je omogućilo pouzdanije praćenje ponašanja grede nakon izlaska iz elastičnog područja ponašanja. Ispitivanje greda provedeno je za 18 ciljanih vrijednosti pomaka traverze kidalice sa sljedećim koracima: $D_v = \{0,50; 0,70; 0,98; 1,37; 1,92; 2,69; 3,76; 5,27; 7,38; 10,33; 14,46; 20,25; 28,35; 39,69; 55,56; 77,78; 108,9; 152,46\}$ [mm]. Svaki ciljani korak ponovljen je 2 puta ciklusom opterećenja i rasterećenja kontrolirajući tako degradacijska svojstva betonske mješavine. Time je ispitivanje svake

grede provedeno kroz ukupno 36 ciklusa tijekom kojih je praćen ciklički odgovor greda na zadano opterećenje, tj. vertikalni pomak.

7.3 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda i diskusija

7.3.1 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja greda – općenito

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda obuhvaćaju:

- rezultate ispitivanja betonskih mješavina u svježem i očvrslom stanju,
- opis načina sloma, tj. načina otkazivanja nosivosti armiranobetonskih greda,
- skice razvoja i položaja pukotina armiranobetonskih greda,
- grafički odnos sila-progib (F-d) te njihovo tumačenje u kontekstu relativnih odnosa kako bi se utvrdili kvalitativni pokazatelji ponašanja,
- iskaz krutosti elemenata kroz cikluse opterećenja i rasterećenja na temelju grafičkog odnosa sila-progib,
- iskaz kvantitativnih pokazatelja potrebnih za definiranje ponašanja armiranobetonskih greda,
- procjenu duktilnosti na temelju iskaza kvantitativnih pokazatelja ponašanja serija armiranobetonskih greda,
- deskriptivnu statistiku osnovnih kvantitativnih pokazatelja ponašanja serija armiranobetonskih greda,
- usporedbu međusobnih odnosa parametara serija armiranobetonskih greda.

Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u svježem i očvrslom stanju

U [Tablici 7.4](#) prikazani su rezultati ispitivanja betonskih mješavina u svježem stanju od kojih su izrađene armiranobetonske grede. Zbog potencijalne primjene svih ispitanih betonskih mješavina u armiranobetonskim konstrukcijskim elementima s gusto raspoređenom armaturom, ciljani razred rasprostiranja slijeganjem i razred viskoznosti bio je SF3 i VS1, što je kod svih mješavina i postignuto pravilnim doziranjem kemijskih dodataka, superplastifikatora (SP) i dodatka za promjenu viskoznosti (VMA). Kod svih mješavina dobivena je zadovoljavajuća sposobnost zaobilaženja zapreka. Otpornost segregaciji svih mješavina također je bila unutar razreda SR2 (< 15 %). Kod mješavine SCC-R otpornost je segregaciji ispitana vizualnom provjerom zbog nemogućnosti ispitivanja pomoću sita s veličinom otvora 5 mm te je utvrđena manje izražena segregacija.

Tablica 7.4 Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u svježem stanju

Mješavina	Rasprostiranje slijeganjem				J-prsten		L-kutija		Segregacija		
	d (mm)	Razred	t ₅₀₀ (s)	Razred	PJ (mm)		H ₂ / H ₁	Razred	%	Razred	
SCC-0CR-0SLF	775	SF3	1,70	VS1	5	<10	0,96	>0,80	11,89	<15	SR2
SCC-10CR-0SLF	770	SF3	1,61	VS1	7,5	<10	0,98	>0,80	1,98	<15	SR2
SCC-15CR-5SLF	760	SF3	1,40	VS1	9	<10	0,89	>0,80	3,82	<15	SR2
SCC-R	760	SF3	1,69	VS1	8	<10	0,82	>0,80	vizualna provjera		

U **Tablici 7.5** prikazani su rezultati ispitivanja betonskih mješavina u očvrslom stanju od kojih su izrađene armiranobetonske grede.

Tablica 7.5 Rezultati ispitivanja betonskih mješavina u očvrslom stanju

Mješavina	Gustoća (kg/m ³)	f _{c,cyl} (MPa)			E (GPa)		
		$\bar{x}$ (f _{cm})	$\bar{s}_n$	V (%)	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V (%)
SCC-0CR-0SLF	2407,88	42,41	3,00	0,07	39,73	0,88	0,02
SCC-10CR-0SLF	2360,58	30,72	1,22	0,04	31,21	0,51	0,02
SCC-15CR-5SLF	2295,76	30,60	0,98	0,03	27,77	0,80	0,03
SCC-R	2427,36	30,31	1,40	0,05	29,44	0,19	0,01

Minimalni ciljani razred čvrstoće betona bio je C25/30, što je provjereno pomoću uvjeta danih u normi HRN EN 206:2021 [183] i to za slučaj početne ($f_{cm} > f_{ck} + 4$; $f_{ci,min} > f_{ck} - 4$) i ustaljene proizvodnje ($f_{cm} > f_{ck} + 1,48\bar{s}_n$; $f_{ci,min} < f_{ck} - 4$).

Relevantnost podataka mjernih uređaja

LVDT-i pozicionirani u sredini raspona armiranobetonskih greda imali su efektivni hod, tj. maksimalni kapacitet pomaka od 150 mm. Budući da je progib pri slomu grede u gotovo svim slučajevima, a u nekim slučajevima i progib pri maksimalnoj sili, bio veći od 150 mm, rezultati LVDT-a smatraju se nedovoljno pouzdanima za donošenje zaključaka o ponašanju AB greda opterećenih savijanjem i za iskaz kvantitativnih pokazatelja potrebnih za definiranje ponašanja AB greda. Stoga su pomaci žičanih potencijometara oznake DW2 i DW3 (pogledati [Sliku 7.9](#)), postavljenih na mjestima djelovanja vertikalne sile na gredu, uzeti kao mjerodavni za interpretaciju rezultata eksperimentalnog ispitivanja te za donošenje zaključaka na temelju relativnih odnosa kvantitativnih pokazatelja.

Način sloma i razvoj pukotina

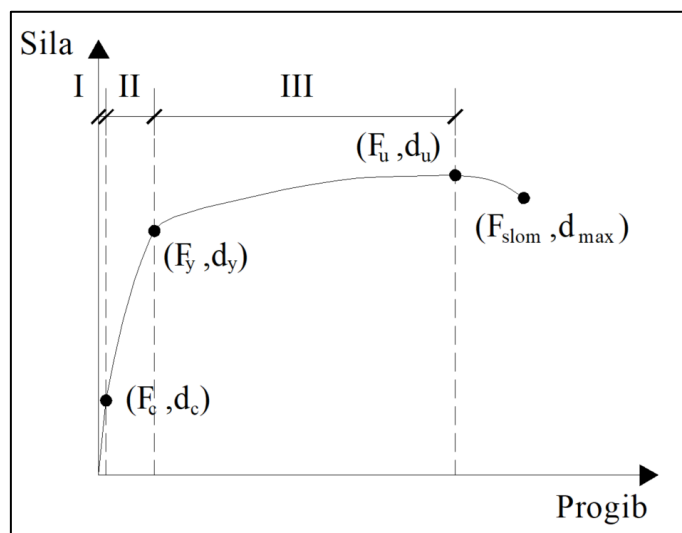
Pojava i razvoj pukotina praćeni su pri svakom od 18 koraka i to označavanjem pukotina na bočnim ploham AB greda (bočna ploha 1 i bočna ploha 2) pomoću voodopornih flomastera. Mjerenja širine pukotina izvršena su kod svakog ispitivanja u 16. koraku (kontrolirani pomak traverze kidalice od 77,78 mm). Navedeni 16. korak uzet je kao mjerodavan za mjerenje širine pukotina jer su za sve ispitane grede uspješno prikupljeni podatci o silama i pripadajućim progibima greda do navedene vrijednosti kontroliranog pomaka traverze kidalice. Grede iz serija SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-

5SLF nisu pokazivale povećanje nosivosti nakon kontroliranog pomaka traverze od 77,78 mm, stoga se nakon pomaka traverze od 77,78 mm širina pukotina nije niti mogla bilježiti za sve ispitane grede jer je rast širine pukotina bio nekontroliran. Svaka pukotina označena je rednim brojem koji označava točan korak opterećenja (redni broj od 1 do 18). Skice razvoja i položaja pukotina također obuhvaćaju i skice područja delaminacije (raslojavanja) i drobljenja u tlačnoj zoni greda i odlamanja betona u vlačnoj zoni greda praćenih u trenutku njihove pojave.

Nosivost, krutost i duktilnost

Iskazi kvantitativnih pokazatelja potrebnih za definiranje ponašanja AB greda uvjetovani su pojavom 3 područja ponašanja karakterističnih za AB grede (Slika 7.10):

- područje I (elastično područje) – prije nastanka prvih pukotina, tj. prije prekoračenja vlačne čvrstoće betona,
- područje II (plastično područje) – nakon pojave prve pukotine, a prije dosezanja granice popuštanja armaturnog čelika u vlačnoj zoni,
- područje III (plastično područje) – nakon dosezanja granice popuštanja armaturnog čelika u vlačnoj zoni; u ovom području armatura popušta, neutralna se os pomiče prema tlačnom rubu poprečnog presjeka, sve dok ne nastupi slom betona u tlačnoj zoni kritičnog poprečnog presjeka, a time i slom grede.



Slika 7.10 Karakteristični dijagram sila-progib AB greda

Kvantitativni pokazatelji prikazani na Slici 7.10 su sljedeći:

- sila pri prijelazu iz elastičnog u plastično ponašanje uz pripadni progib, tj. sila i progib pri pojavi prve pukotine (F_c , d_c),
- sila i progib u trenutku značajne promjene krutosti elementa koja je u direktnoj vezi s pojavom popuštanja armaturnog čelika (F_y , d_y),

- najveća dostignuta sila i pripadni pomak (F_u , d_u),
- najveći ostvareni pomak pri slomu i pripadna sila ($F_{sлом}$, d_{max}).

Krutost na savijanje svake pojedine grede izračunata je kao nagib pravca u linearnom području F - d krivulje [107] i to prema jednadžbi:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta d} = \frac{0,5F_{max} - 0,1F_{max}}{d_{0,5F_{max}} - d_{0,1F_{max}}} \quad (7.1)$$

gdje je:

F_{max} – maksimalna sila

$d_{0,5F_{max}}$ – pomak pri djelovanju sile intenziteta 0,5 F_{max}

$d_{0,1F_{max}}$ – pomak pri djelovanju sile intenziteta 0,1 F_{max}

Važna karakteristika AB greda jest njihova duktilnost, tj. njihovo svojstvo podnošenja plastične deformacije do momenta sloma, što je bitno radi mogućnosti predviđanja istog. Faktor duktilnosti (μ) u ovome je radu izražen kao omjer progiba grede pri maksimalnoj sili (d_u) i progiba grede pri pojavi popuštanja čelika (d_y) te je korišten kako bi se procijenio utjecaj reciklirane gume na duktilnost i deformabilnost ispitnih greda. Klasični omjer d_{max} / d_y , koji se čak i u većoj mjeri koristi za ocjenu duktilnosti ispitnih uzoraka, u ovome se radu nije koristio s obzirom da se zbog neočekivano velikih progiba u sredini raspona grede (LVDT1 i LVDT2) i na mjestu djelovanja vertikalnih sila (DW2 i DW3) prilikom ispitivanja greda nisu mogli prikupiti cjeloviti podatci progiba s korištenim mjernim uređajima zbog ograničenog hoda mjernih uređaja od 150 mm.

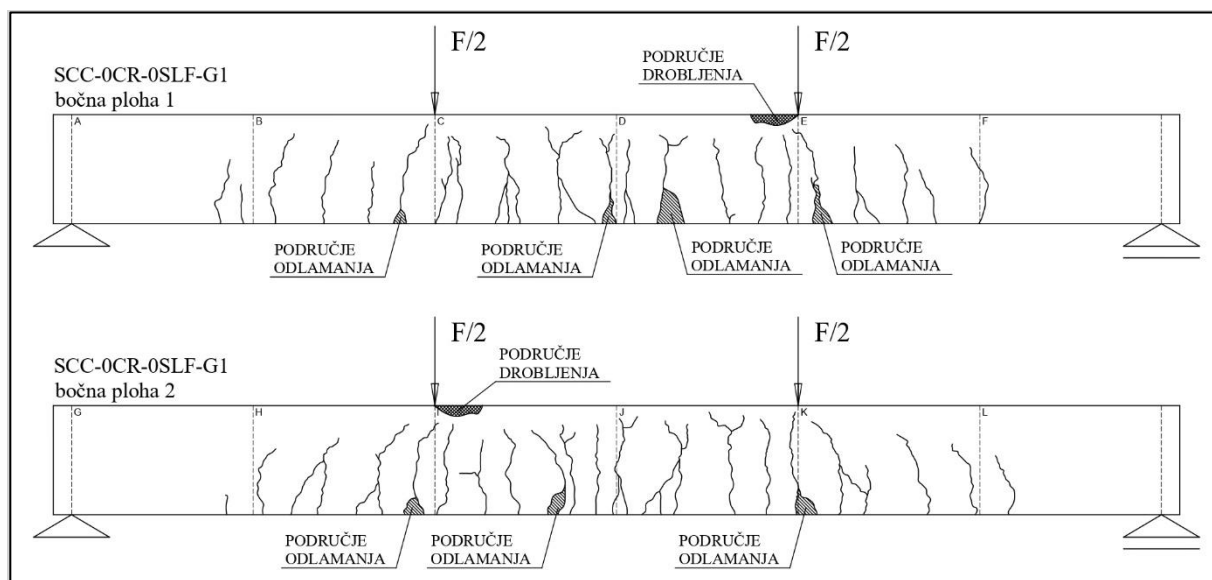
Deskriptivna statistika osnovnih kvantitativnih pokazatelja ponašanja serija AB greda

Na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja AB greda iskazani su osnovni kvantitativni pokazatelji ponašanja svake pojedine grede, a potom je za svaku seriju AB greda provedena statistička analiza koja obuhvaća iskaz aritmetičke sredine podataka ($\bar{x}$), minimum i maksimum, standardnu devijaciju ($\bar{s}_n$) i koeficijent varijacije (V). Na temelju mjera raspršenosti podataka, tj. standardne devijacije ($\bar{s}_n$) i koeficijenta varijacije (V) aritmetička sredina promatranih podataka bit će reprezentativna ako je koeficijent varijacije (V) manji od 30 % te će rezultati eksperimenta biti dovoljno pouzdani i moći će se koristiti za daljnju analizu rezultata.

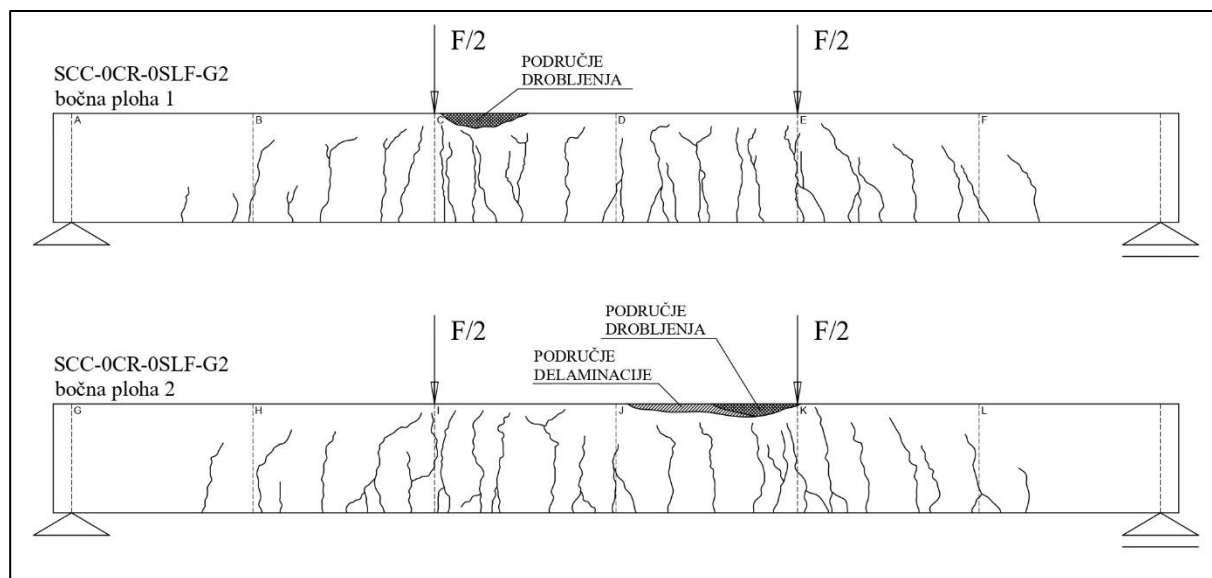
7.3.2 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF

7.3.2.1 Način sloma i razvoj pukotina

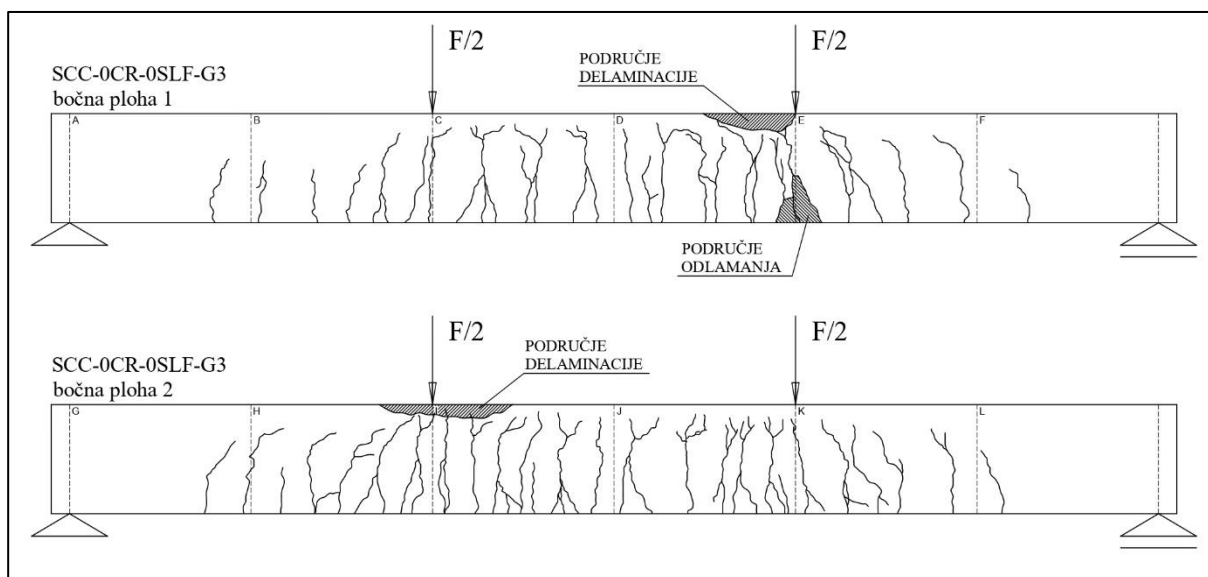
Slike 7.11 - 7.13 prikazuju raspored pukotina pri slomu za AB grede SCC-0CR-0SLF. Vertikalne linije i linije pod kutom, formirane duž opterećene grede, predstavljaju pukotine. Na Slikama 7.14 - 7.16 prikazani su detalji sloma greda.



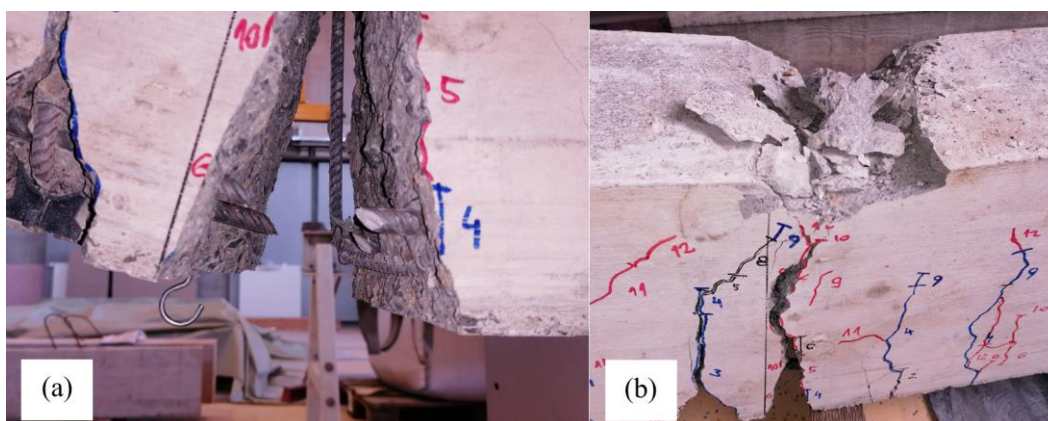
Slika 7.11 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G1



Slika 7.12 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G2



Slika 7.13 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-0CR-0SLF-G3



Slika 7.14 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G1: (a) slom armature u vlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni



Slika 7.15 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G2



Slika 7.16 Detalj sloma grede SCC-0CR-0SLF-G3

Iz detalja loma greda prikazanih na Slikama 7.14 - 7.16 vidljivo je da je za sve tri grede SCC-0CR-0SLF karakteristično drobljenje betona u tlačnoj zoni i to na mjestu djelovanja sile. Delaminacija betona u tlačnoj zoni karakteristična je za betonske grede SCC-0CR-0SLF-G2 i SCC-0CR-0SLF-G3, dok je kod betonske grede SCC-0CR-0SLF-G1, uz drobljenje betona u tlačnoj zoni, nastao i posmični slom armature u vlačnoj zoni. Nekoliko je mogućih razloga nastanka posmičnog sloma armature u vlačnoj zoni: (a) odstupanje zamišljene geometrije poprečnog presjeka i duljine grede (položaja unosa opterećenja i oslonaca) od realnog stanja, (b) odstupanje zamišljenog od realnog unosa opterećenja (jedna strana preuzima veću silu zbog nesavršenosti u ležajevima i čeličnim valjcima za unos opterećenja), (c) s postupnim otvaranjem pukotina promjena krutosti po duljini grede prestaje biti jednolika, (d) odstupanje svojstava betona po duljini grede, (e) odstupanje kvalitete armaturnog čelika u odnosu na projektirana svojstva. Ukupan broj pukotina pri slomu grede i maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm vidljivi su u Tablicama 7.6 i 7.7.

Tablica 7.6 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-0CR-0SLF

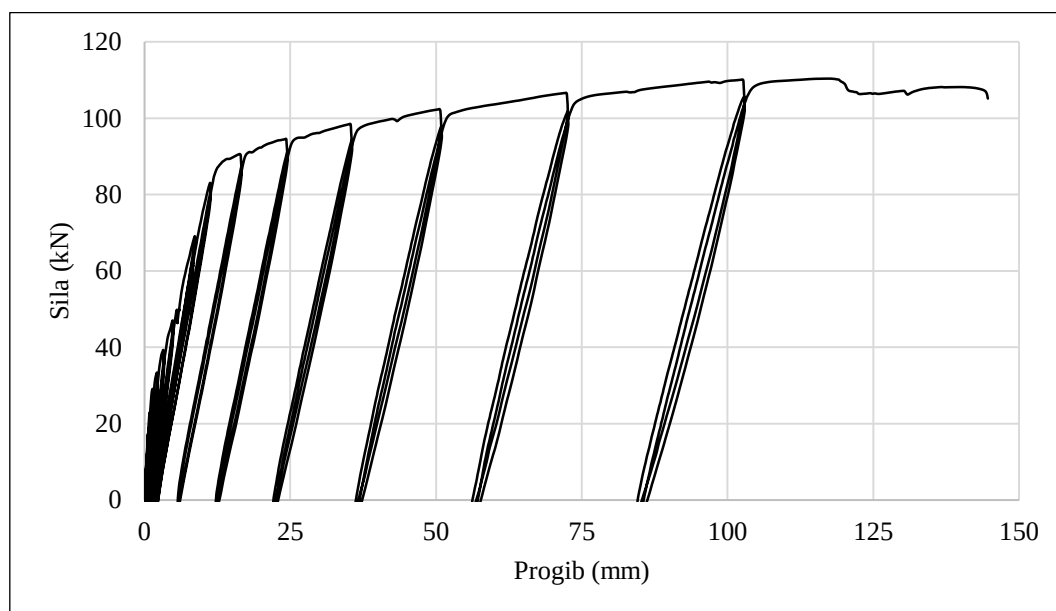
Oznaka grede	Bočna ploha	Ukupan broj pukotina pri slomu grede		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	30	29,5	29,5	31,5	30,7	0,8	2,77 %
	2	29						
G2	1	30	31,5					
	2	33						
G3	1	30	31					
	2	32						

Tablica 7.7 Maksimalna širina pukotina greda SCC-0CR-0SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara

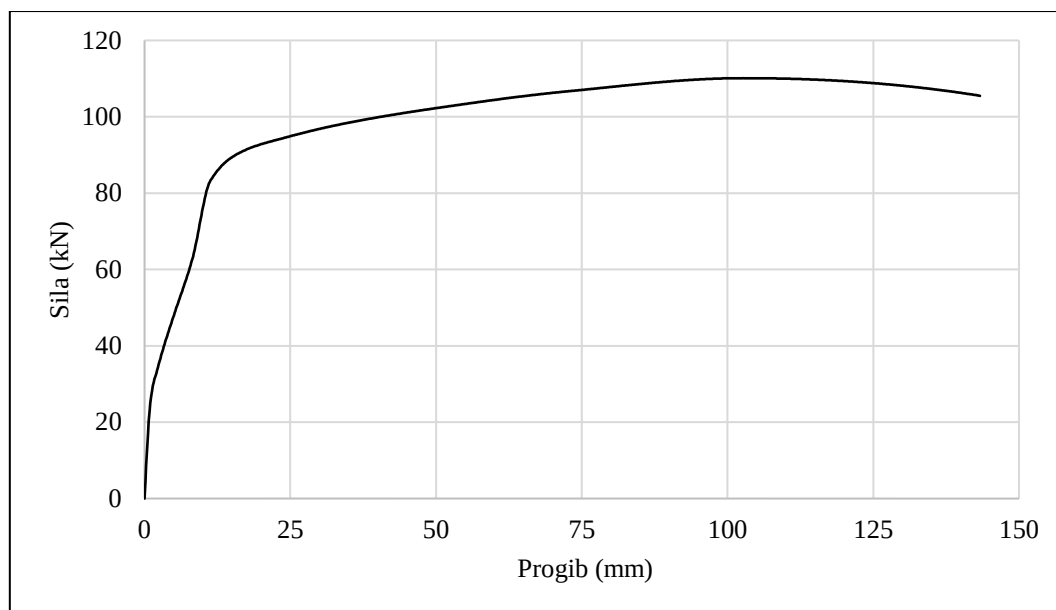
Oznaka grede	Bočna ploha	Maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm (mm)		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	4,6	5,1	3,7	6,4	5,1	1,1	22,24 %
	2	5,6						
G2	1	4,5	6,4					
	2	8,3						
G3	1	4,6	3,65					
	2	2,7						

7.3.2.2 Nosivost, krutost i duktilnost

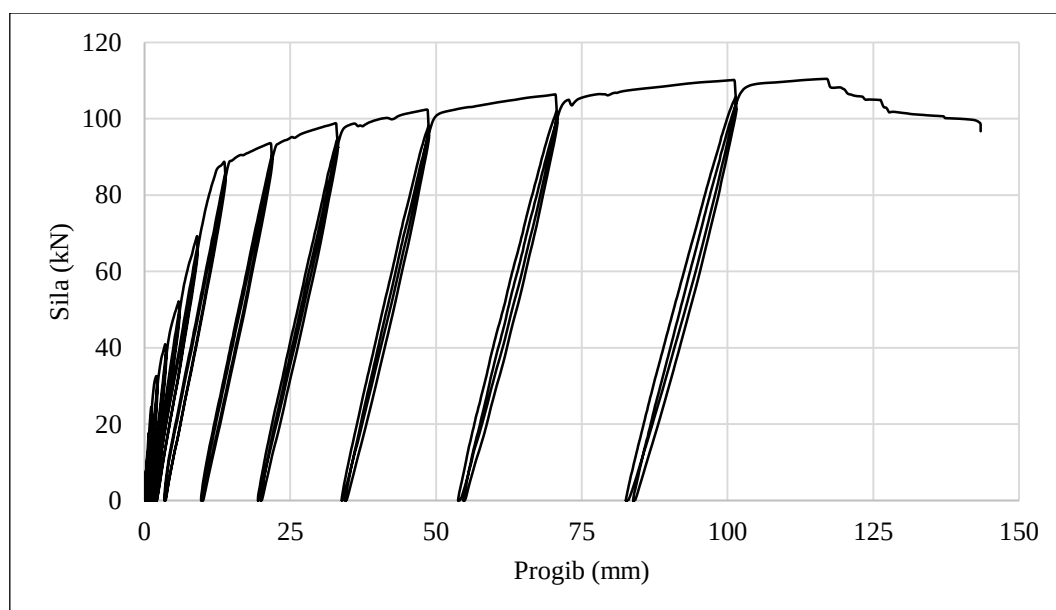
Na [Slikama 7.17, 7.19 i 7.21](#) prikazani su grafički odnosi *sila-progib* cikličkih odgovora greda SCC-0CR-0SLF na zadano opterećenje. Pripadajuće anvelope cikličkih odgovora greda SCC-0CR-0SLF prikazane su na [Slikama 7.18, 7.20 i 7.22](#). Na prikazanim anvelopama cikličkih odgovora greda SCC-0CR-0SLF vidljiva su 3 karakteristična područja ponašanja uzoraka greda, na temelju kojih su u [Tablici 7.8](#) iskazani kvantitativni pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF.



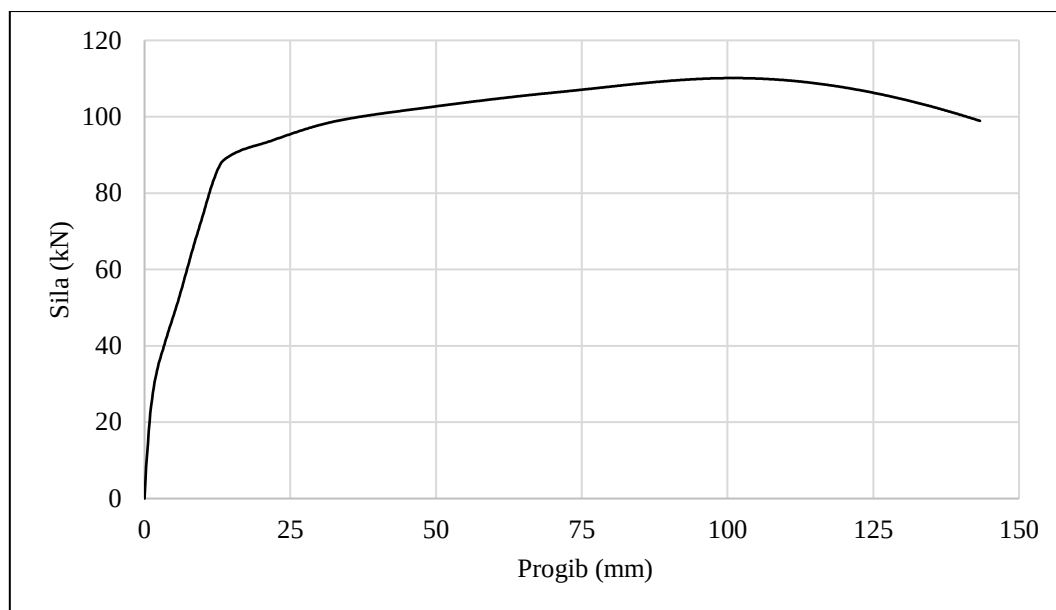
Slika 7.17 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede SCC-0CR-0SLF-G1



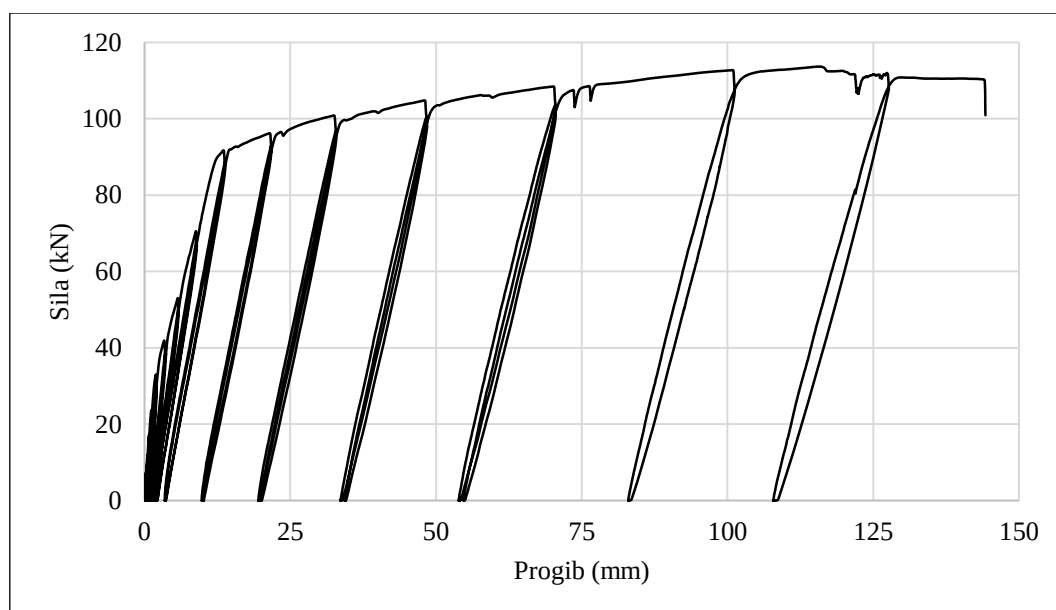
Slika 7.18 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-0CR-0SLF-G1



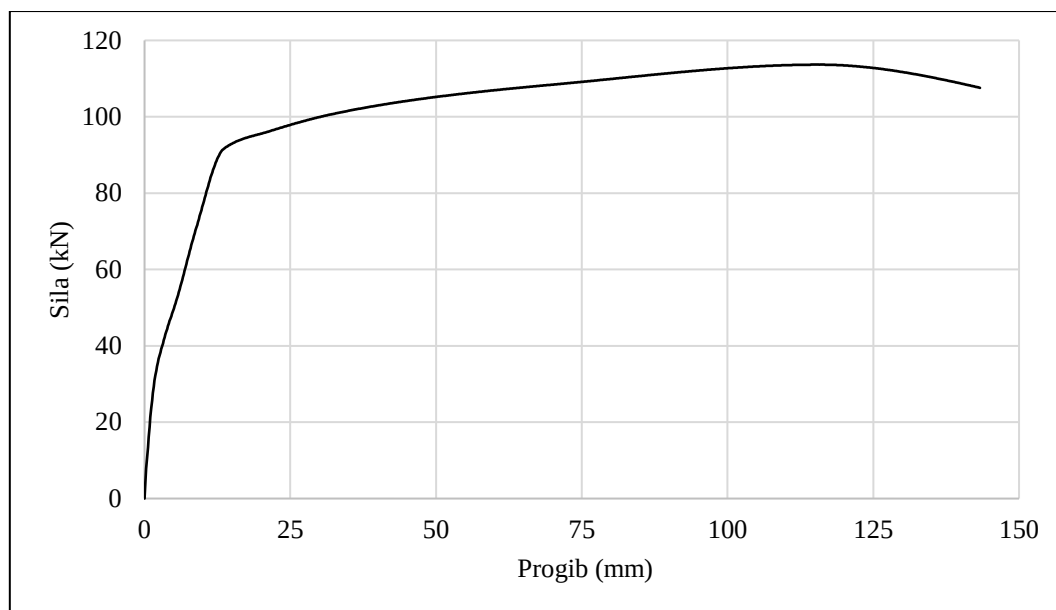
Slika 7.19 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-0CR-0SLF-G2



Slika 7.20 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-0CR-0SLF-G2



Slika 7.21 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-0CR-0SLF-G3



Slika 7.22 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-0CR-0SLF-G3

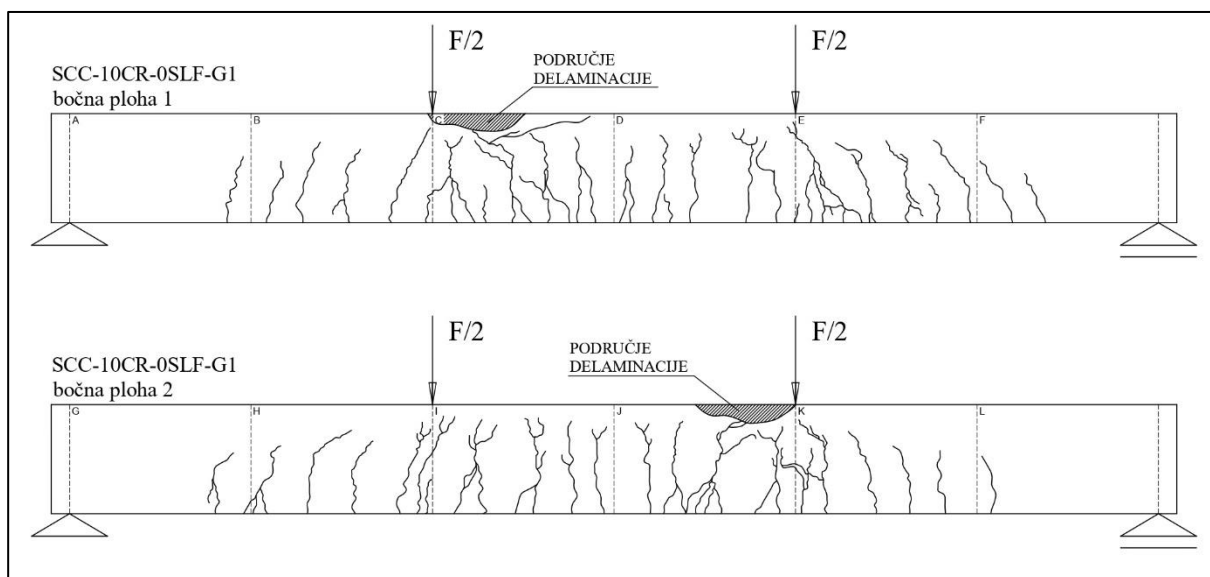
Tablica 7.8 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF

Greda	k	F_c	d_c	F_y	d_y	F_u	d_u	$F_{sлом}$	d_{max}	μ
	(kN/m)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(d_u/d_y)
G1	7949,45	17,32	0,59	90,62	16,38	110,12	102,65	105,17	144,64	6,27
G2	7396,98	17,74	0,73	88,75	13,65	110,14	100,96	98,92	143,30	7,40
G3	7913,44	17,24	0,78	91,65	13,61	113,65	115,75	107,28	144,18	8,51
min	7396,98	17,24	0,59	88,75	13,61	110,12	100,96	98,92	143,30	6,27
max	7949,45	17,74	0,78	91,65	16,38	113,65	115,75	107,28	144,64	8,51
$\bar{x}$	7753,29	17,43	0,70	90,34	14,55	111,30	106,45	103,79	144,04	7,39
$\bar{s}_n$	252,38	0,22	0,08	1,20	1,30	1,66	6,61	3,55	0,56	0,91
V (%)	3,26	1,27	11,52	1,33	8,91	1,49	6,21	3,42	0,39	12,37

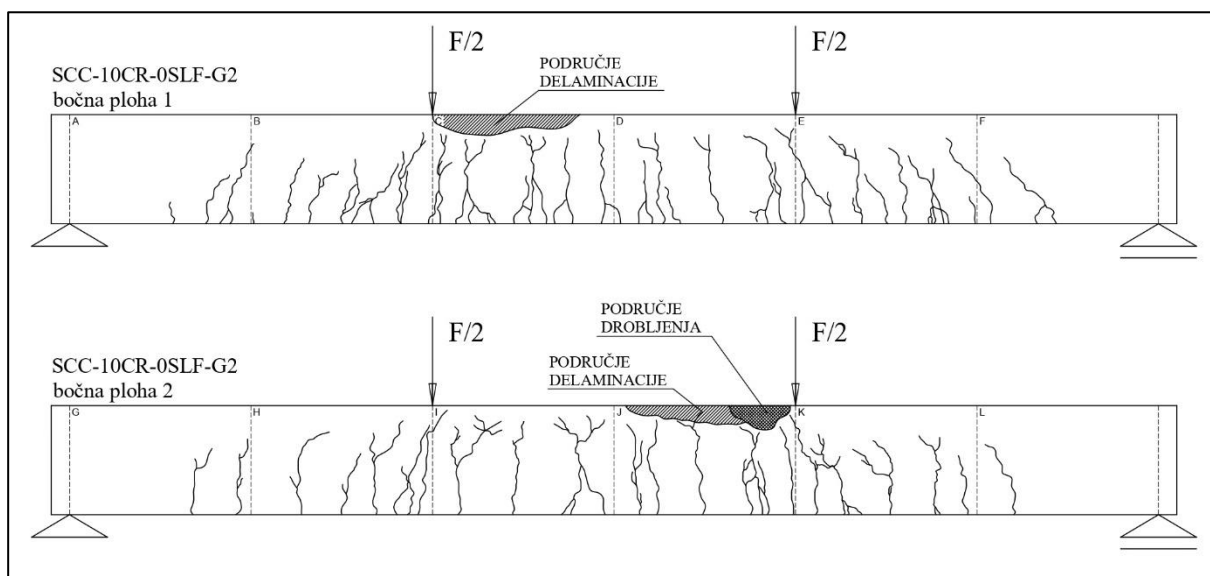
7.3.3 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-10CR-0SLF

7.3.3.1 Način sloma i razvoj pukotina

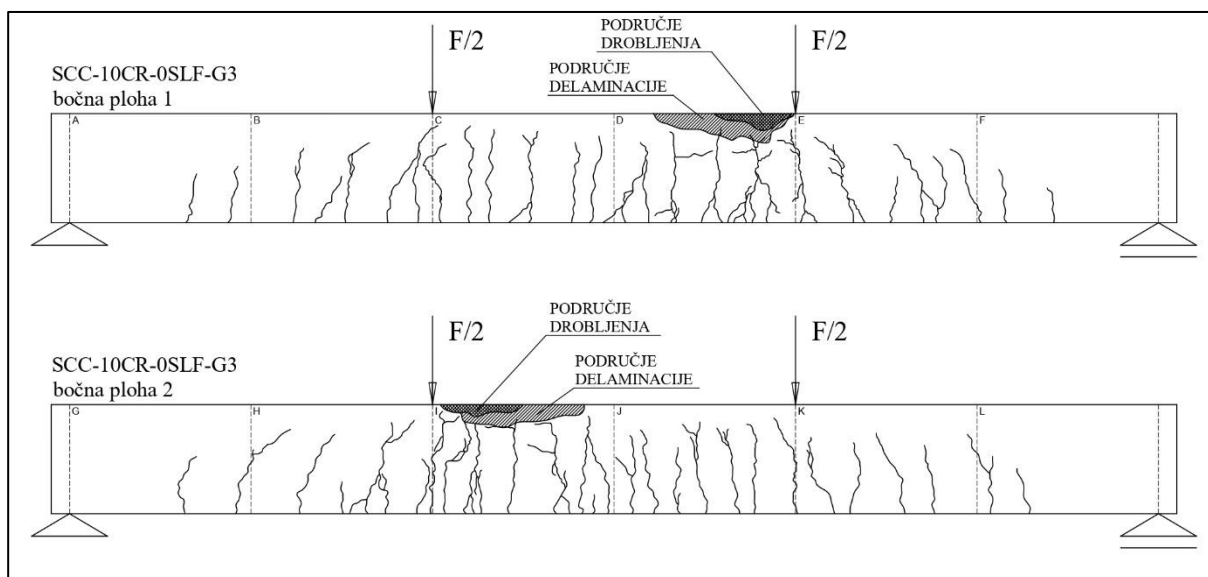
Slike 7.23 - 7.25 prikazuju raspored pukotina pri slomu za AB grede SCC-10CR-0SLF. Na Slikama 7.26 - 7.28 vidljivi su detalji sloma greda.



Slika 7.23 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G1



Slika 7.24 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G2



Slika 7.25 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-10CR-0SLF-G3



Slika 7.26 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G1



Slika 7.27 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G2



Slika 7.28 Detalj sloma grede SCC-10CR-0SLF-G3

Iz detalja loma greda prikazanih na Slikama 7.26 - 7.28 vidljivo je da je za sve 3 grede SCC-10CR-0SLF karakteristično drobljenje betona u tlačnoj zoni s izraženijom pojavom delaminacije betona koja se kod greda SCC-10CR-0SLF-G1 i SCC-10CR-0SLF-G3 javlja na mjestu djelovanja sile, a kod grede SCC-10CR-0SLF-G2 u sredini raspona grede. Ukupan broj pukotina pri slomu grede i maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm dani su u Tablicama 7.9 i 7.10.

Tablica 7.9 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-10CR-0SLF

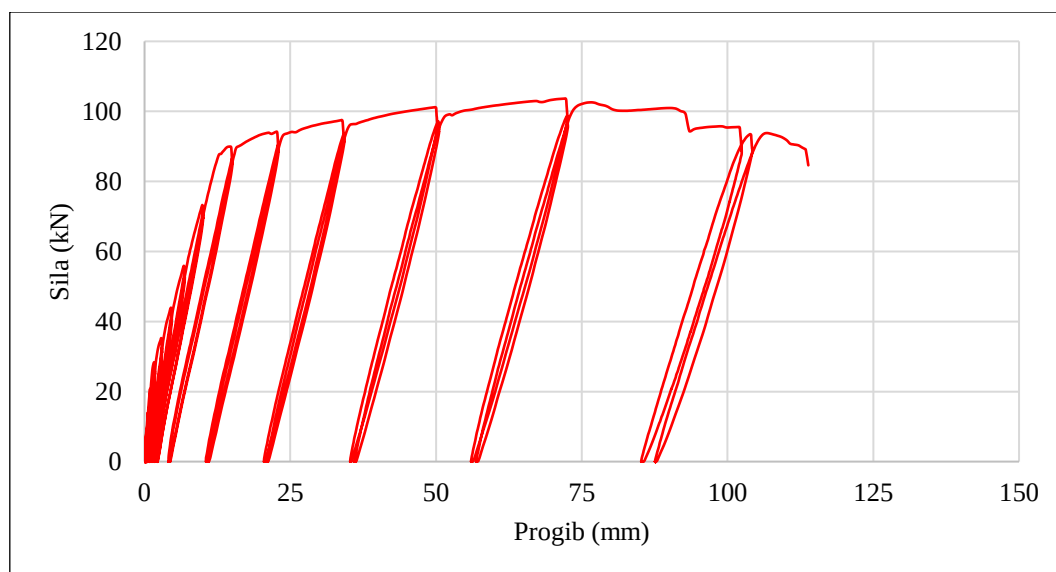
Oznaka grede	Bočna ploha	Ukupan broj pukotina pri slomu grede		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	34	32	32,0	38,0	34,7	2,5	7,20 %
	2	30						
G2	1	46	38					
	2	30						
G3	1	36	34					
	2	32						

Tablica 7.10 Maksimalna širina pukotina greda SCC-10CR-0SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara

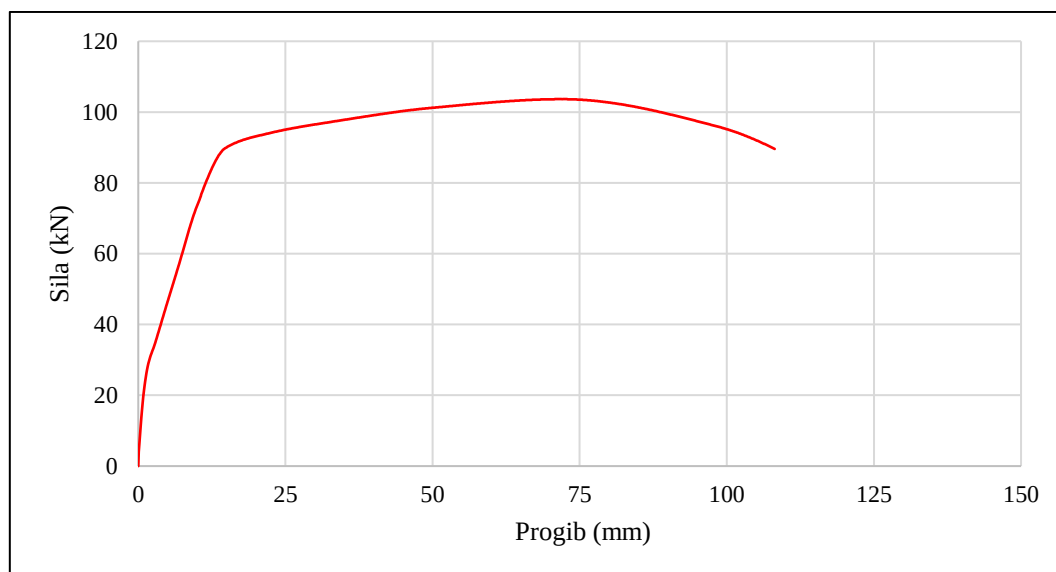
Oznaka grede	Bočna ploha	Maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm (mm)		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	3,2	3,1	3,1	3,8	3,5	0,3	7,76 %
	2	3,0						
G2	1	3,5	3,5					
	2	3,5						
G3	1	3,5	3,75					
	2	4,0						

7.3.3.2 Nosivost, krutost i duktilnost

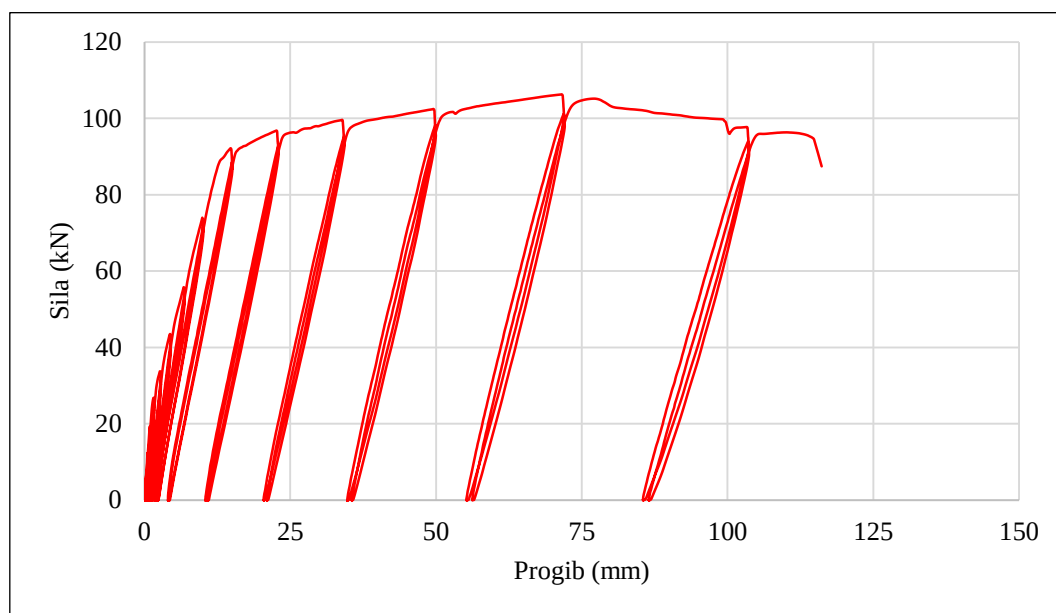
Na [Slikama 7.29, 7.31 i 7.33](#) vidljivi su grafički odnosi *sila-progib* cikličkih odgovora greda SCC-10CR-0SLF na zadano opterećenje. Pripadajuće anvelope cikličkih odgovora greda SCC-10CR-0SLF prikazane su na [Slikama 7.30, 7.32 i 7.34](#). Na prikazanim anvelopama cikličkih odgovora greda SCC-10CR-0SLF vidljiva su 3 karakteristična područja ponašanja uzoraka greda, na temelju kojih su u [Tablici 7.11](#) iskazani kvantitativni pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja armiranobetonskih greda SCC-10CR-0SLF.



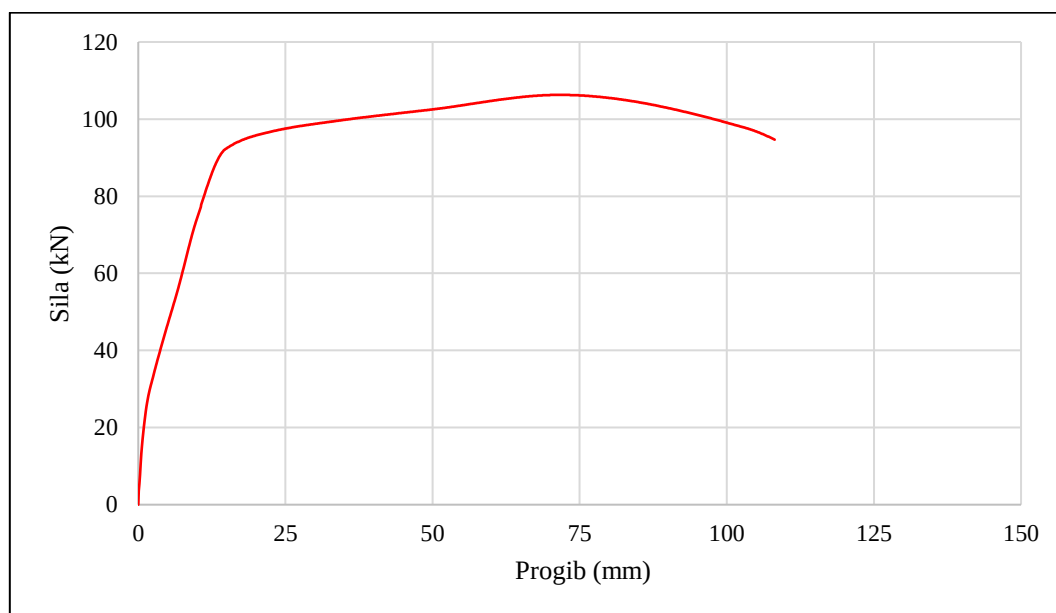
[Slika 7.29](#) Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede SCC-10CR-0SLF-G1



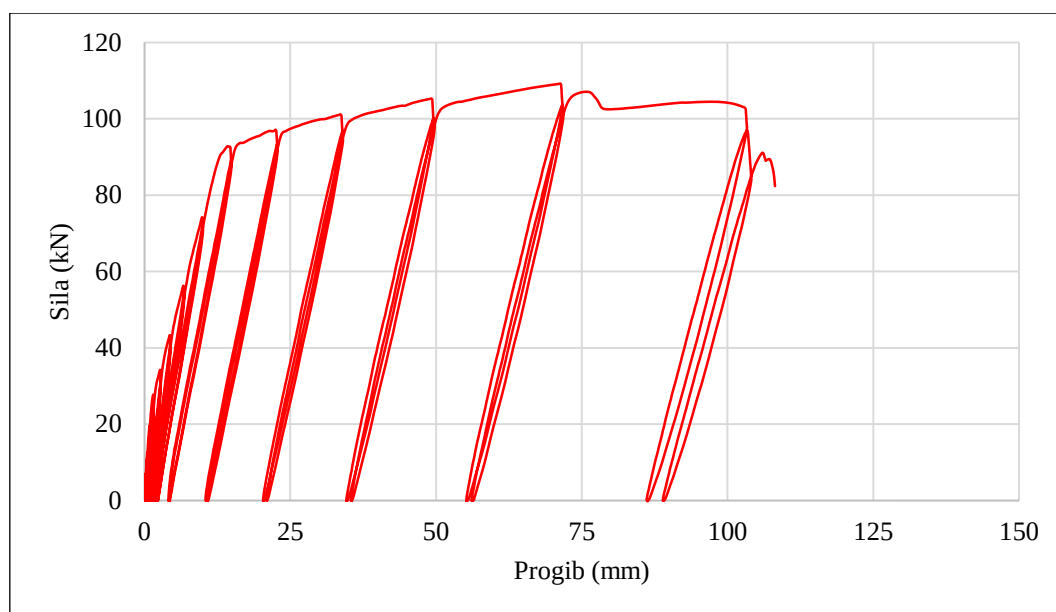
[Slika 7.30](#) Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede SCC-10CR-0SLF-G1



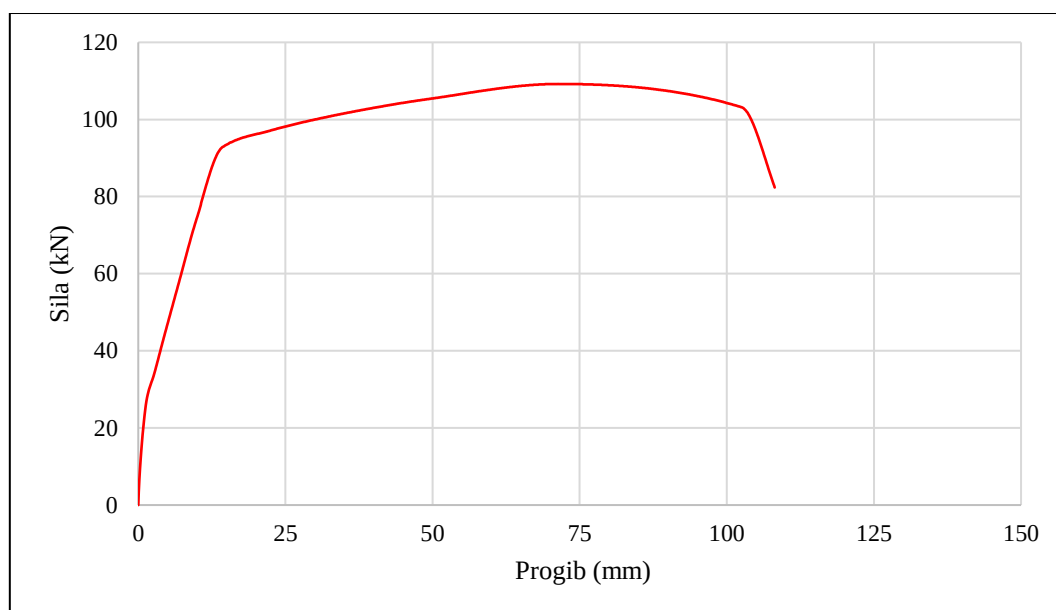
Slika 7.31 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-10CR-0SLF-G2



Slika 7.32 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-10CR-0SLF-G2



Slika 7.33 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-10CR-0SLF-G3



Slika 7.34 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-10CR-0SLF-G3

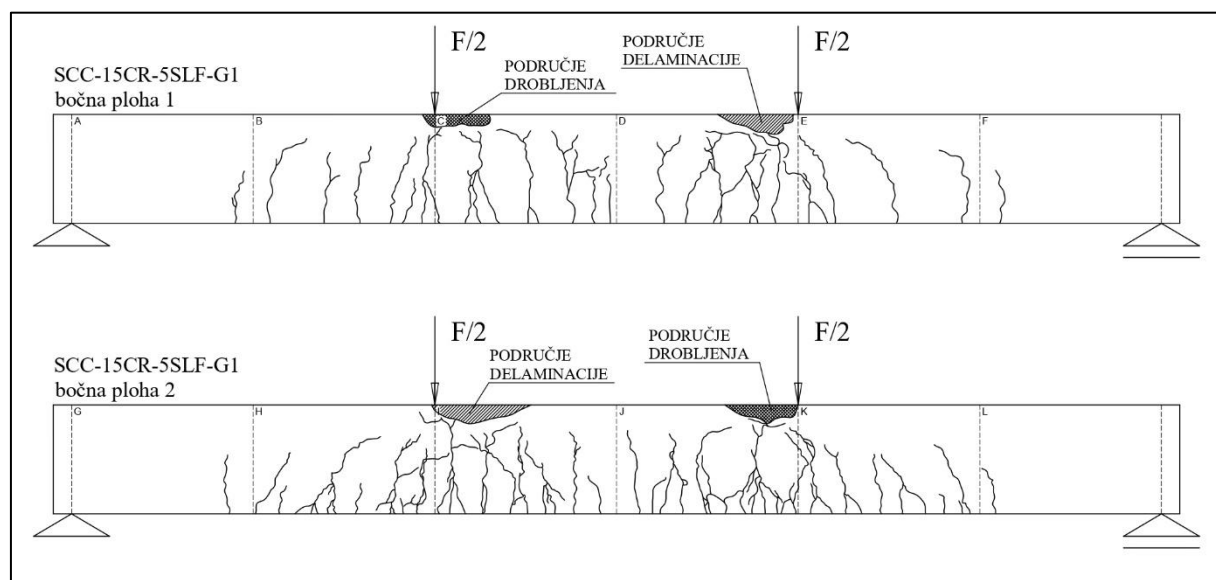
Tablica 7.11 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-10CR-0SLF

Greda	k	F _c	d _c	F _y	d _y	F _u	d _u	F _{sлом}	d _{max}	μ
	(kN/m)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(d _u /d _y)
G1	6804,99	28,39	1,65	89,87	14,84	103,65	72,05	84,61	113,85	4,86
G2	6987,90	26,84	1,56	92,18	14,79	106,28	71,57	87,44	116,14	4,84
G3	7059,52	27,73	1,49	92,81	14,31	109,21	71,35	82,36	108,14	4,99
min	6804,99	26,84	1,49	89,87	14,31	103,65	71,35	82,36	108,14	4,84
max	7059,52	28,39	1,65	92,81	14,84	109,21	72,05	87,44	116,14	4,99
$\bar{x}$	6950,80	27,65	1,57	91,62	14,64	106,38	71,66	84,80	112,71	4,89
$\bar{s}_n$	107,17	0,64	0,07	1,27	0,24	2,27	0,29	2,08	3,37	0,07
V (%)	1,54	2,30	4,28	1,38	1,63	2,13	0,41	2,45	2,99	1,34

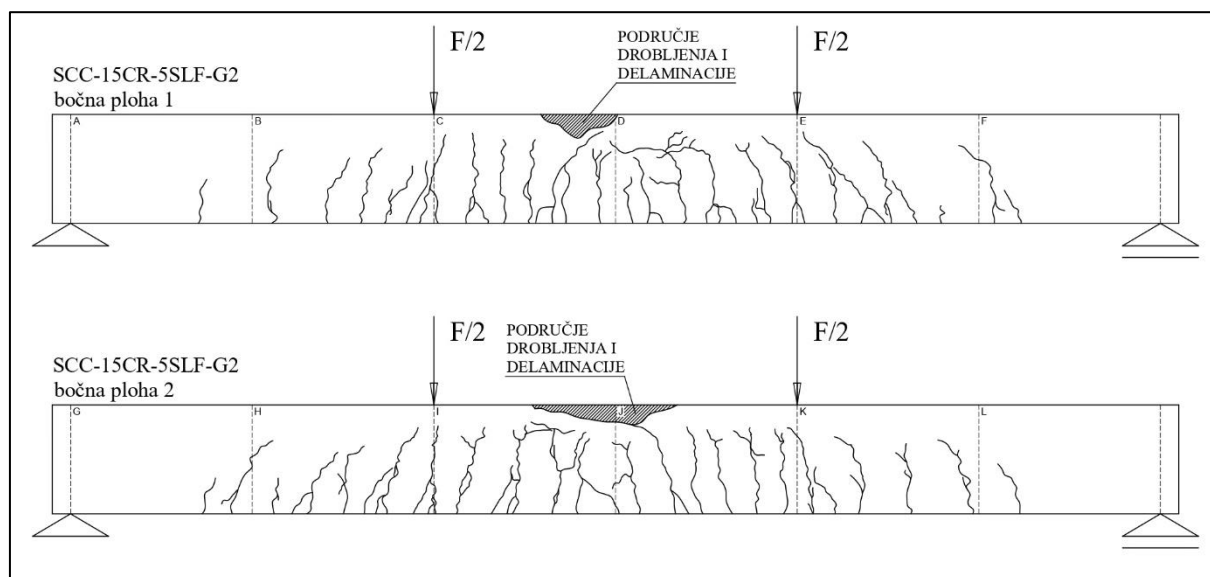
7.3.4 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-15CR-5SLF

7.3.4.1 Način sloma i razvoj pukotina

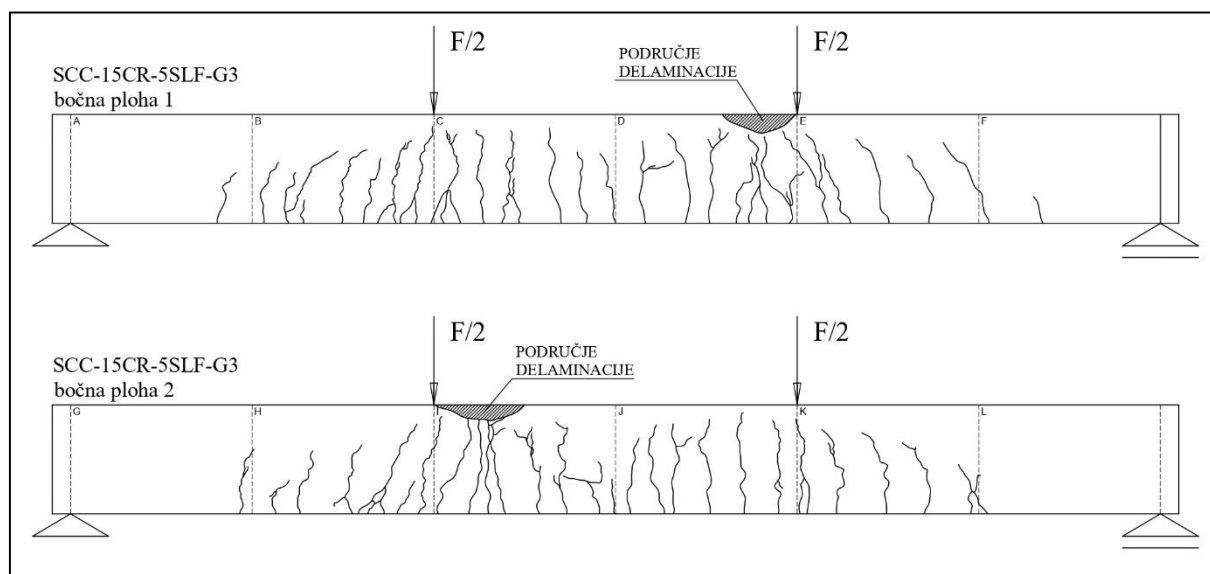
Slike 7.35 - 7.37 prikazuju raspored pukotina pri slomu za AB grede SCC-15CR-5SLF. Na Slikama 7.38 - 7.40 uočljivi su detalji sloma greda.



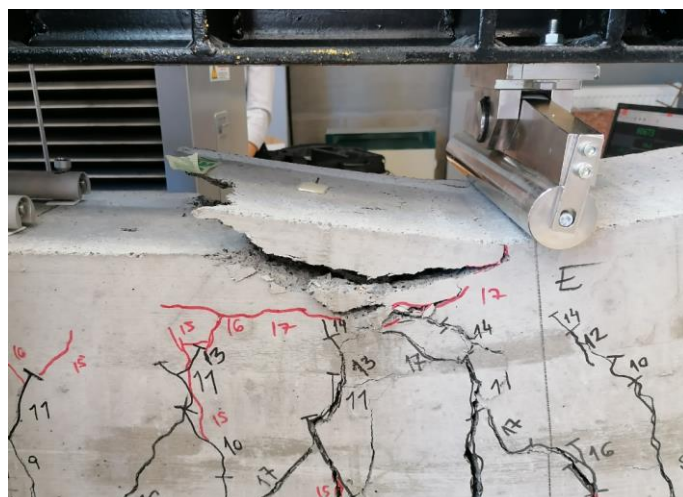
Slika 7.35 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G1



Slika 7.36 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G2



Slika 7.37 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-15CR-5SLF-G3



Slika 7.38 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G1



Slika 7.39 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G2



Slika 7.40 Detalj sloma grede SCC-15CR-5SLF-G3

Iz detalja loma greda prikazanih na [Slikama 7.38 - 7.40](#) vidljivo je da je za sve 3 grede SCC-15CR-5SLF karakteristično drobljenje betona u tlačnoj zoni na mjestu djelovanja sile. Delaminacija betona u tlačnoj zoni karakteristična je za sve betonske grede SCC-15CR-5SLF, dok je kod betonske grede SCC-15CR-5SLF-G3, uz drobljenje betona u tlačnoj zoni, nastao i posmični slom armature u vlačnoj zoni. Mogući razlozi nastanka posmičnog sloma armature u vlačnoj zoni jednaki su kao i u [Poglavlju 7.3.2.1](#). Ukupan broj pukotina pri slomu grede i maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm dani su u [Tablicama 7.12 i 7.13](#).

Tablica 7.12 Ukupan broj pukotina pri slomu greda SCC-15CR-5SLF

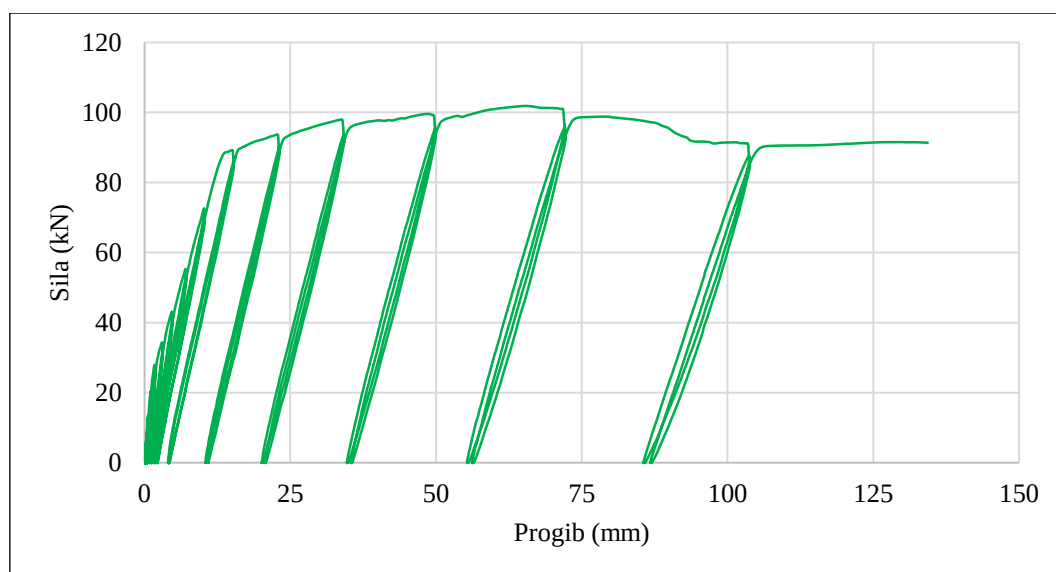
Oznaka grede	Bočna ploha	Ukupan broj pukotina pri slomu grede		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	29	38,5	31,0	38,5	34,8	3,1	8,80 %
	2	48						
G2	1	36	35					
	2	34						
G3	1	32	31					
	2	30						

Tablica 7.13 Maksimalna širina pukotina greda SCC-15CR-5SLF pri progibu traverze od 77,78 milimetara

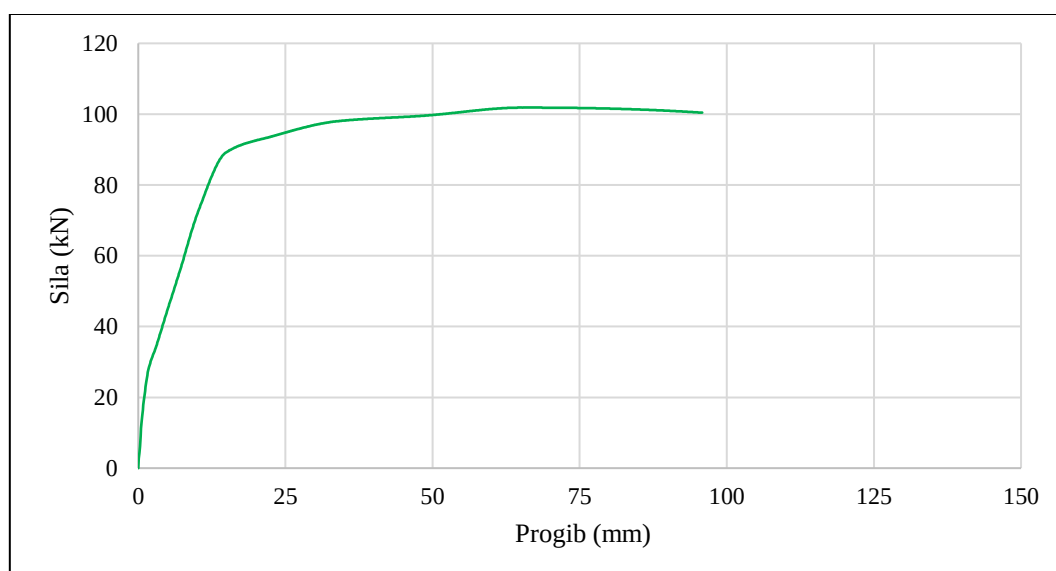
Oznaka grede	Bočna ploha	Maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm (mm)		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	5,6	4,15	2,8	4,2	3,3	0,6	17,94 %
	2	2,7						
G2	1	3,5	3					
	2	2,5						
G3	1	3,5	2,8					
	2	2,1						

7.3.4.2 Nosivost, krutost i duktilnost

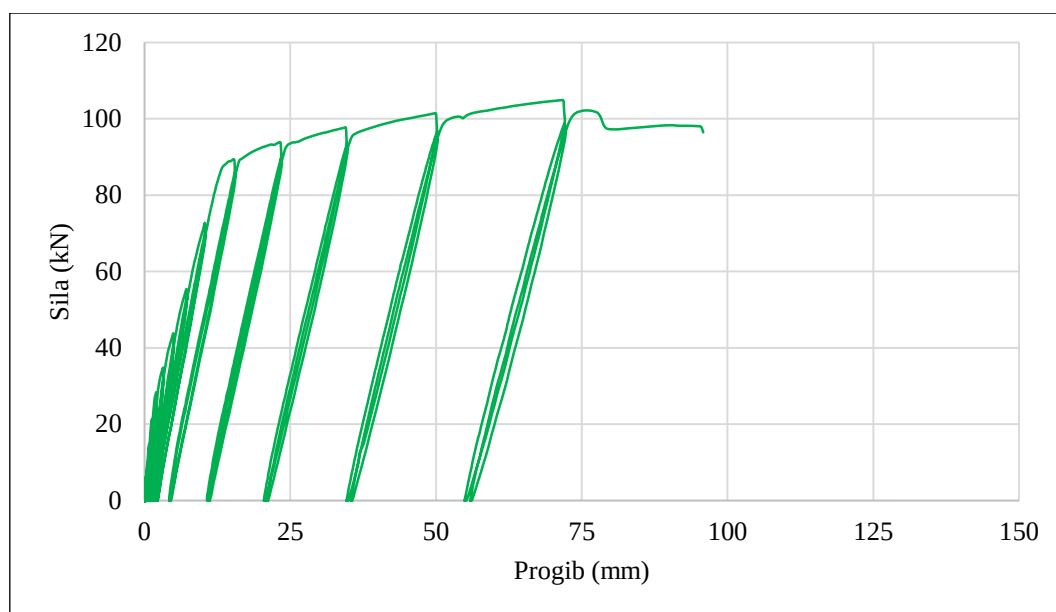
Na [Slikama 7.41, 7.43 i 7.45](#) prikazani su grafički odnosi *sila-progib* cikličkih odgovora greda SCC-15CR-5SLF na zadano opterećenje. Pripadajuće anvelope cikličkih odgovora greda SCC-15CR-5SLF prikazane su na [Slikama 7.42, 7.44 i 7.46](#). Na prikazanim anvelopama cikličkih odgovora greda SCC-15CR-5SLF vidljiva su 3 karakteristična područja ponašanja uzoraka greda, na temelju kojih su u [Tablici 7.14](#) iskazani kvantitativni pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja armiranobetonskih greda SCC-15CR-5SLF.



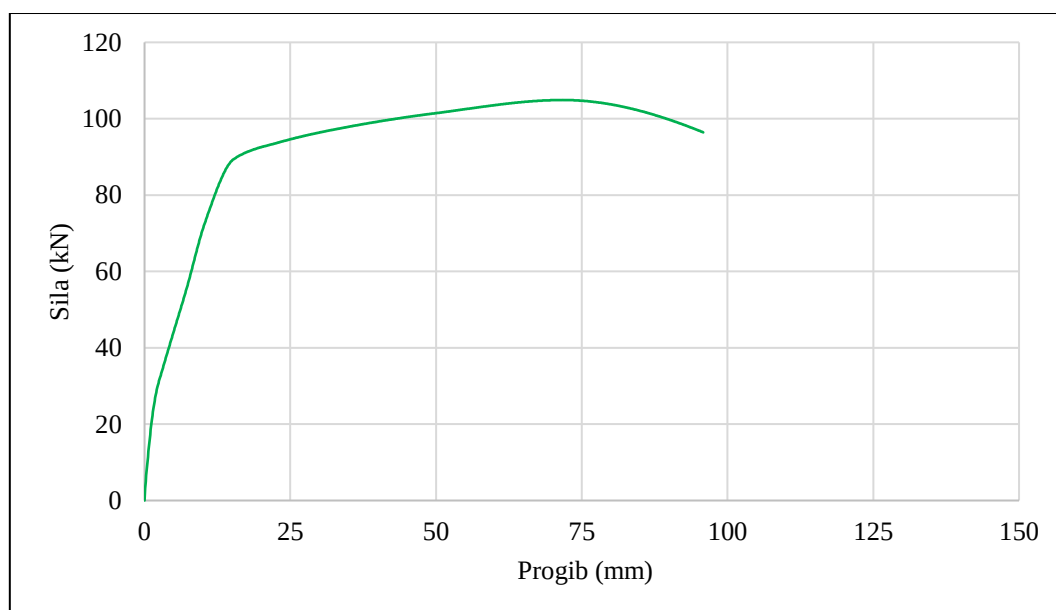
Slika 7.41 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-15CR-5SLF-G1



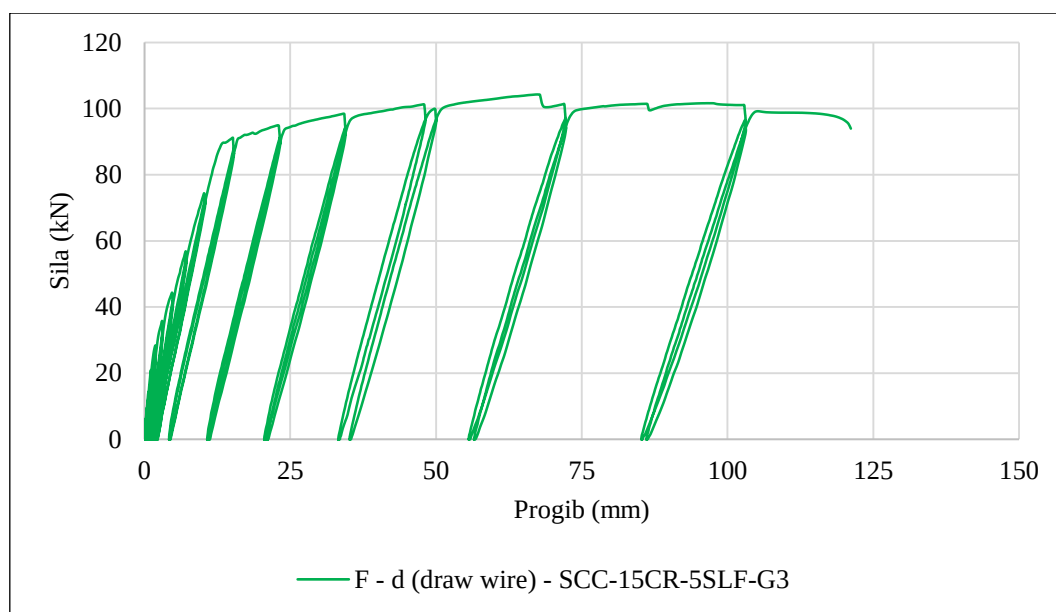
Slika 7.42 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-15CR-5SLF-G1



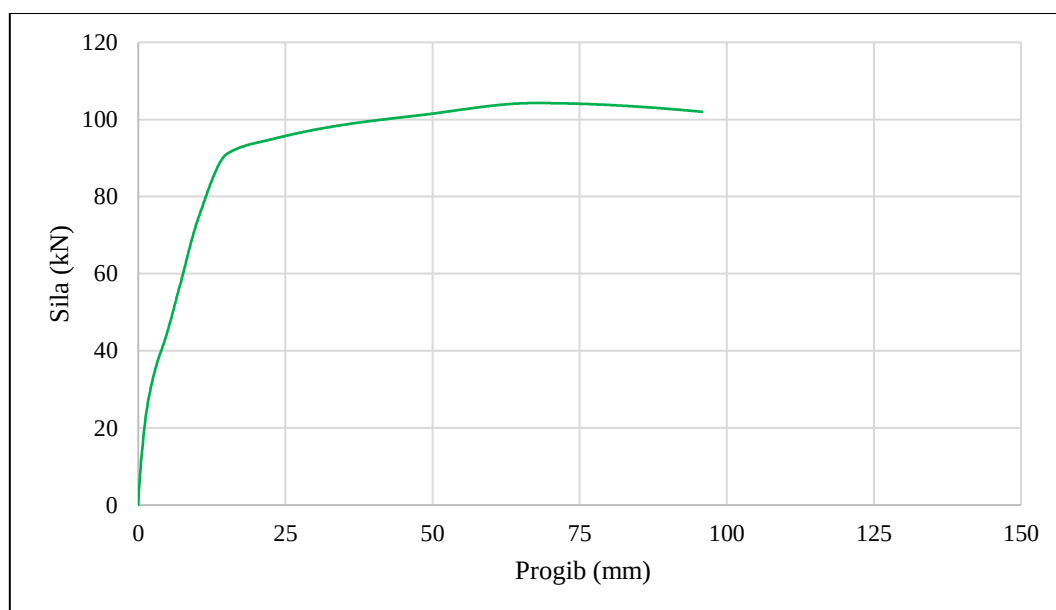
Slika 7.43 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-15CR-5SLF-G2



Slika 7.44 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-15CR-5SLF-G2



Slika 7.45 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede SCC-15CR-5SLF-G3



Slika 7.46 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede SCC-15CR-5SLF-G3

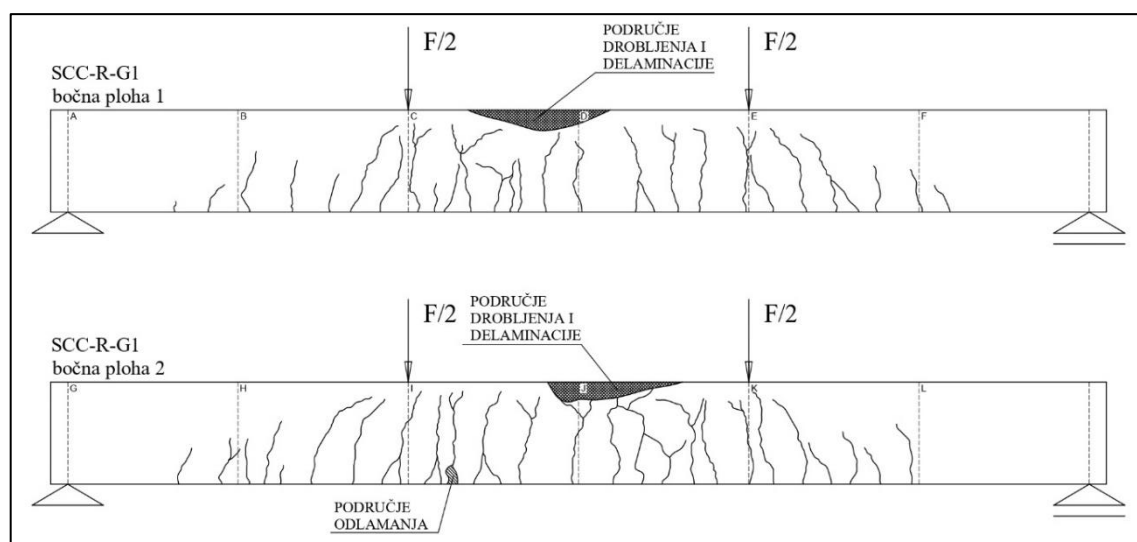
Tablica 7.14 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-15CR-5SLF

Greda	k	F_c	d_c	F_y	d_y	F_u	d_u	$F_{sлом}$	d_{max}	μ
	(kN/m)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(d_u/d_y)
G1	7042,34	27,96	1,74	89,22	14,94	101,85	65,25	91,34	134,33	4,37
G2	6768,10	28,40	2,02	89,42	15,31	104,90	71,77	96,44	95,83	4,69
G3	7080,51	28,37	1,85	91,19	15,16	104,27	67,40	93,94	121,15	4,44
min	6768,10	27,96	1,74	89,22	14,94	101,85	65,25	91,34	95,83	4,37
max	7080,51	28,40	2,02	91,19	15,31	104,90	71,77	96,44	134,33	4,69
$\bar{x}$	6963,65	28,25	1,87	89,94	15,14	103,67	68,14	93,90	117,10	4,50
$\bar{s}_n$	139,15	0,20	0,12	0,88	0,15	1,31	2,71	2,08	15,98	0,14
V (%)	2,00	0,71	6,21	0,98	1,01	1,27	3,98	2,22	13,64	3,03

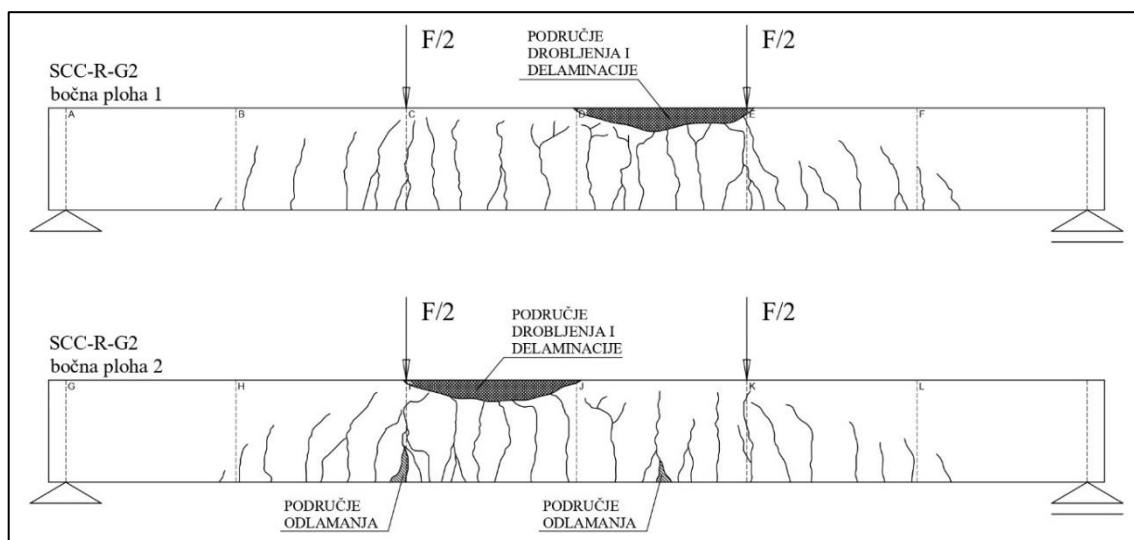
7.3.5 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja armiranobetonskih greda SCC-R

7.3.5.1 Način sloma i razvoj pukotina

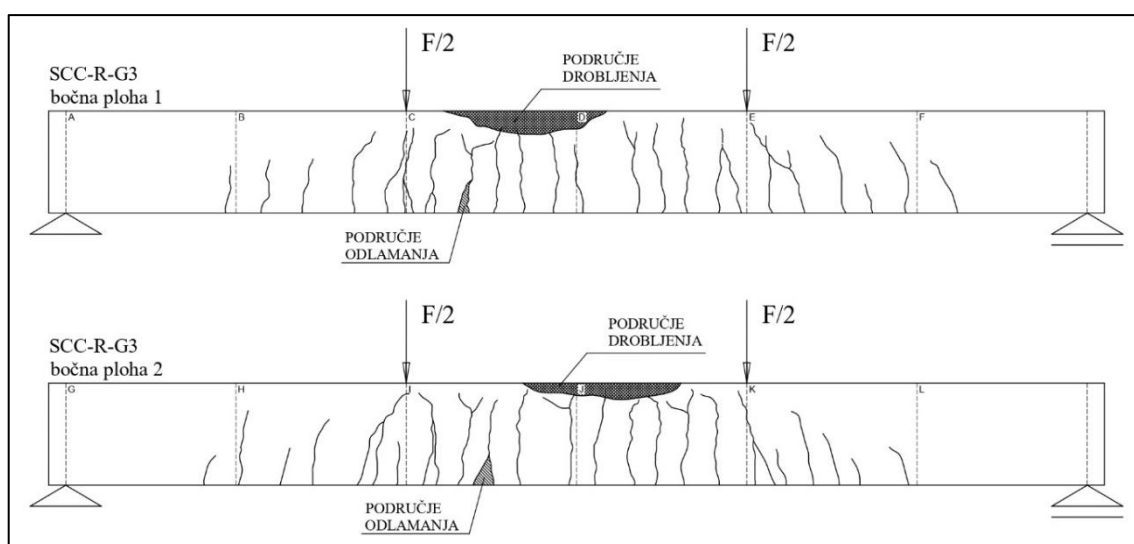
Slike 7.47 - 7.49 prikazuju raspored pukotina pri slomu za AB grede SCC-R.. Na Slikama 7.50 - 7.52 prikazani su detalji sloma greda.



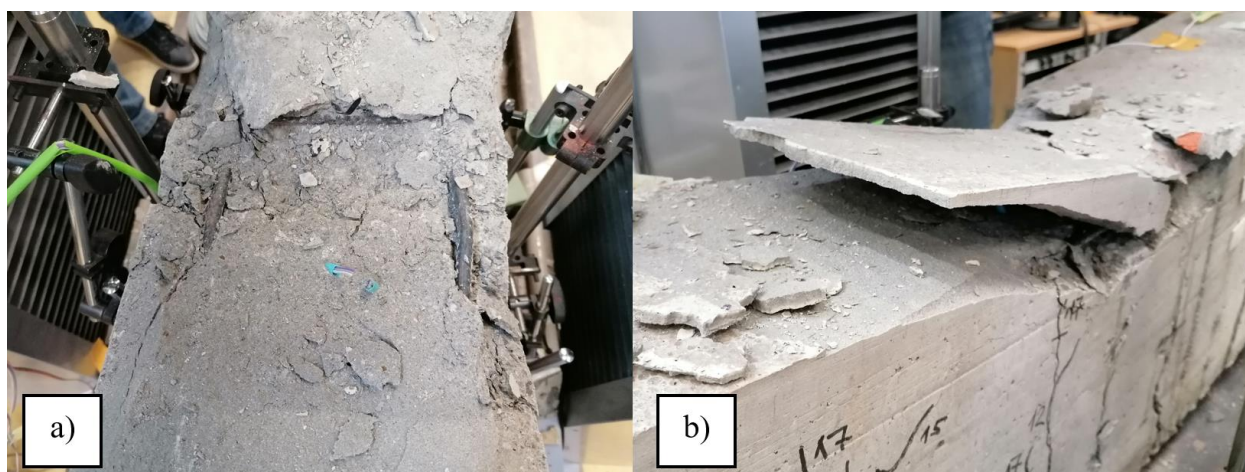
Slika 7.47 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G1



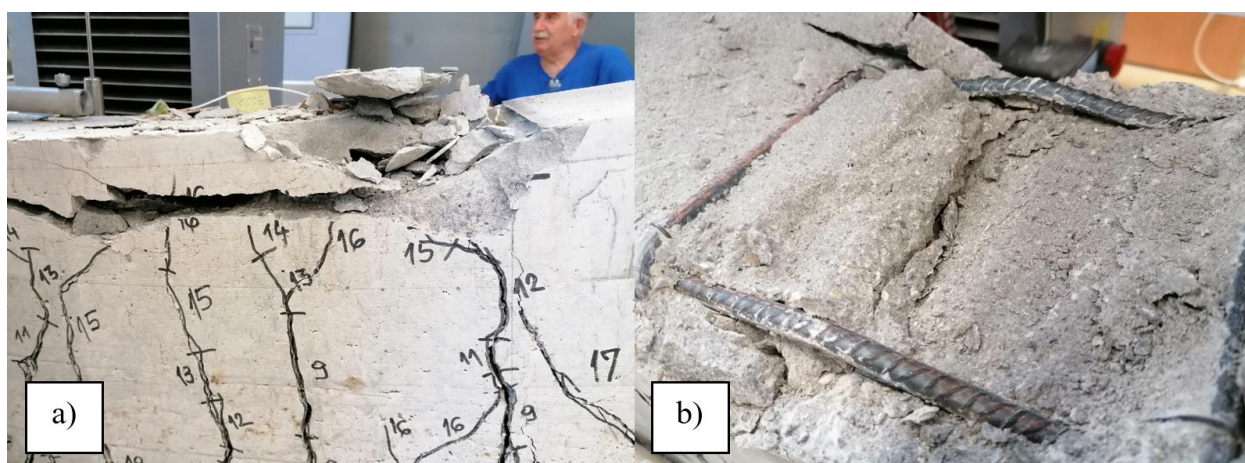
Slika 7.48 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G2



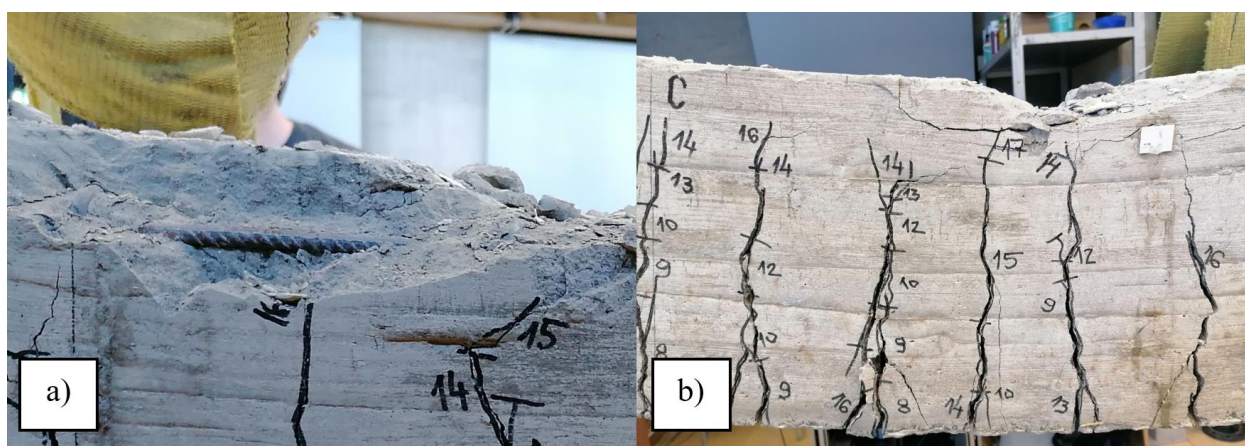
Slika 7.49 Raspored pukotina pri slomu - armiranobetonska greda SCC-R-G3



Slika 7.50 Detalji sloma grede SCC-R-G1: (a) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni



Slika 7.51 Detalji sloma grede SCC-R-G2: (a) slom betona u tlačnoj zoni; (b) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni



Slika 7.52 Detalj sloma grede SCC-R-G3: (a) lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni; (b) slom betona u tlačnoj zoni

Iz detalja loma greda prikazanih na [Slikama 7.50 - 7.52](#) vidljivo je da je za sve 3 grede SCC-0CR-0SLF karakteristično drobljenje betona u tlačnoj zoni na mjestu djelovanja sile, ali i lokalno izvijanje armature u tlačnoj zoni. Delaminacija betona u tlačnoj zoni karakteristična je za sve betonske grede SCC-R. Ukupan broj pukotina pri slomu grede i maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm izloženi su u [Tablicama 7.15 i 7.16](#).

Tablica 7.15 Ukupan broj pukotina pri slomu grede – grede SCC-R

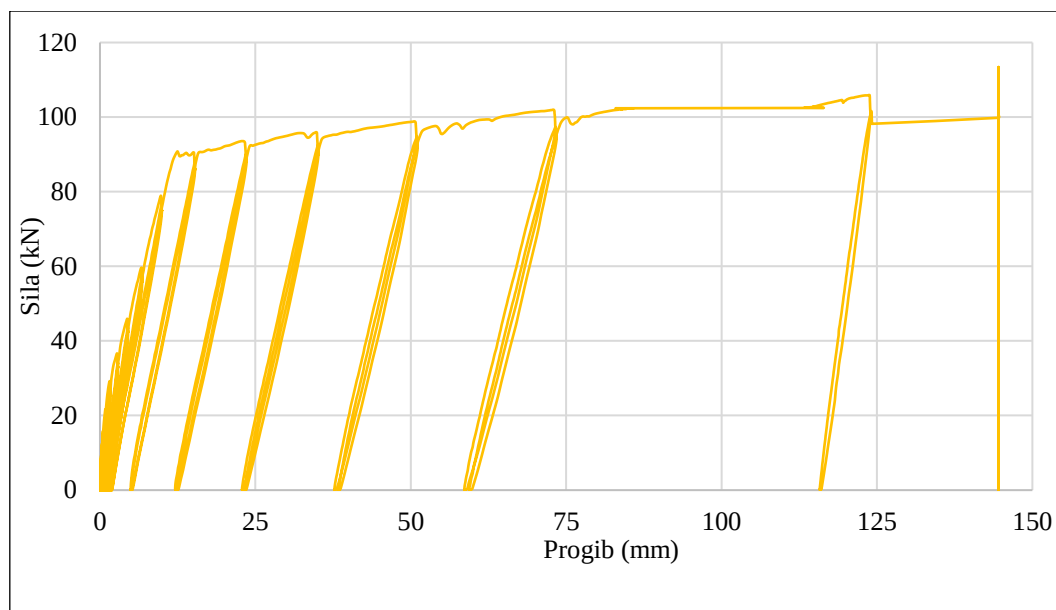
Oznaka grede	Bočna ploha	Ukupan broj pukotina pri slomu grede		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	28	28,5	26,0	31,0	28,5	2,0	7,16 %
	2	29						
G2	1	30	31					
	2	32						
G3	1	26	26					
	2	26						

Tablica 7.16 Maksimalna širina pukotina grede SCC-R pri progibu traverze od 77,78 milimetara

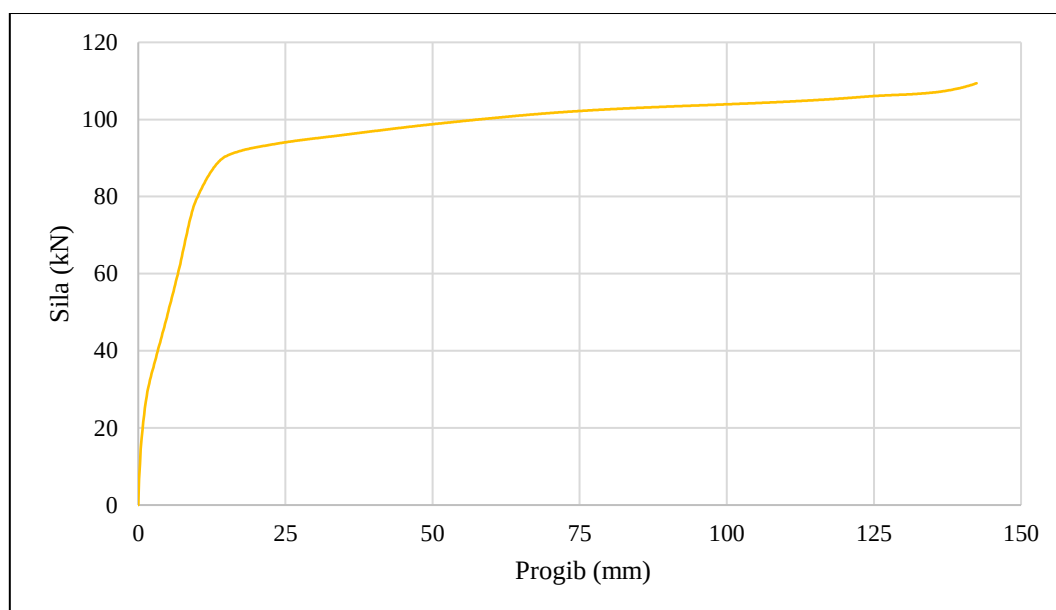
Oznaka grede	Bočna ploha	Maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm (mm)		Deskriptivna statistika				
				min	max	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
G1	1	5,3	6,25	5,4	7,2	6,3	0,7	11,40 %
	2	7,2						
G2	1	7,1	7,15					
	2	7,2						
G3	1	4,3	5,4					
	2	6,5						

7.3.5.2 Nosivost, krutost i duktilnost

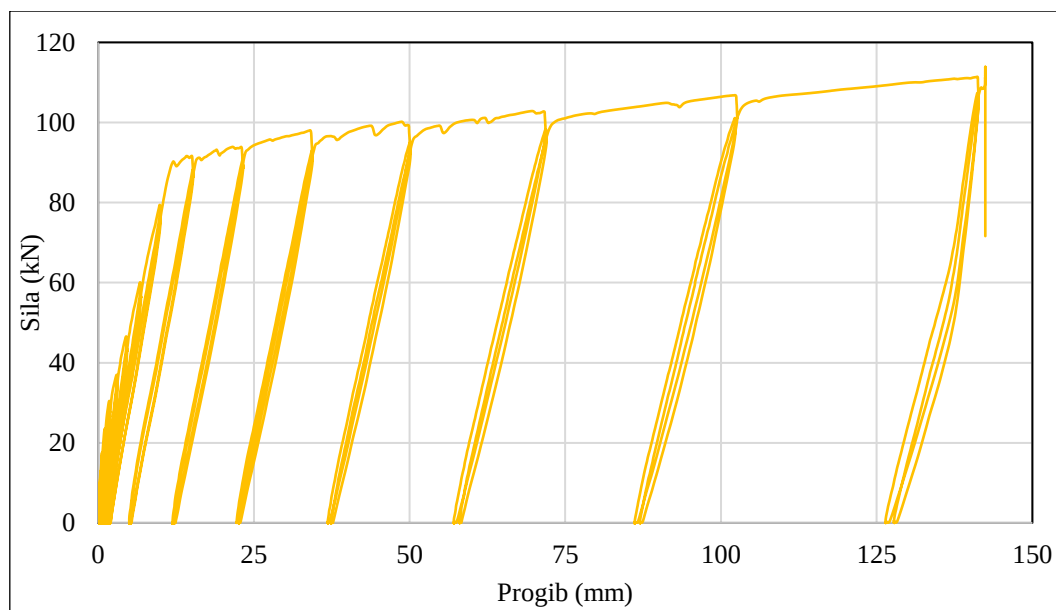
Na [Slikama 7.53, 7.55 i 7.57](#) prikazani su grafički odnosi *sila-progib* cikličkih odgovora grede SCC-R na zadano opterećenje. Pripadajuće anvelope cikličkih odgovora grede SCC-R vidljive su na [Slikama 7.54, 7.56 i 7.58](#). Na prikazanim anvelopama cikličkih odgovora grede SCC-R vidljiva su 3 karakteristična područja ponašanja uzoraka grede, na temelju kojih su u [Tablici 7.17](#) iskazani kvantitativni pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja armiranobetonskih grede SCC-R.



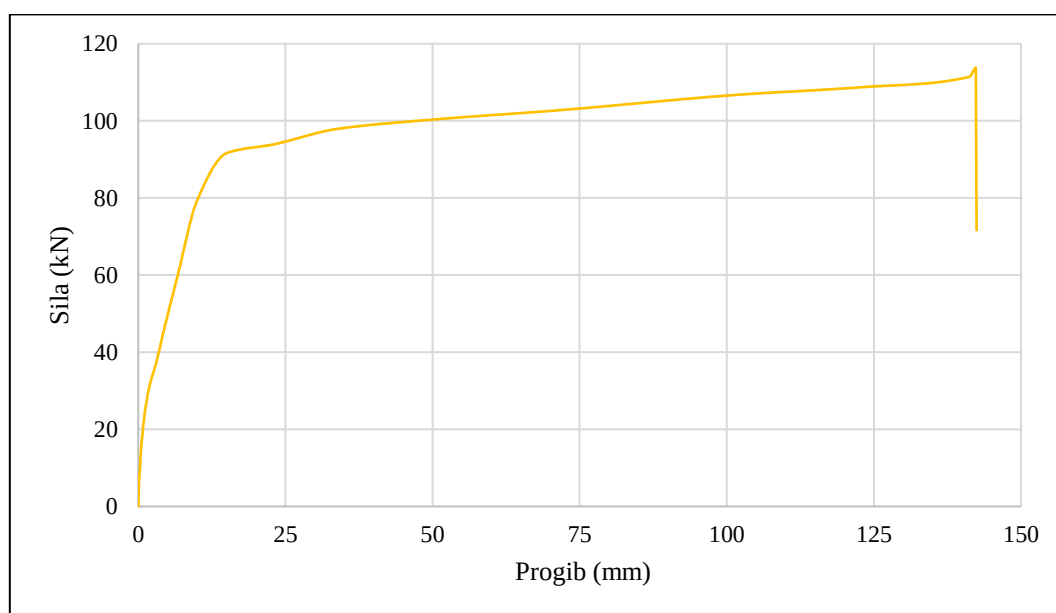
Slika 7.53 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G1



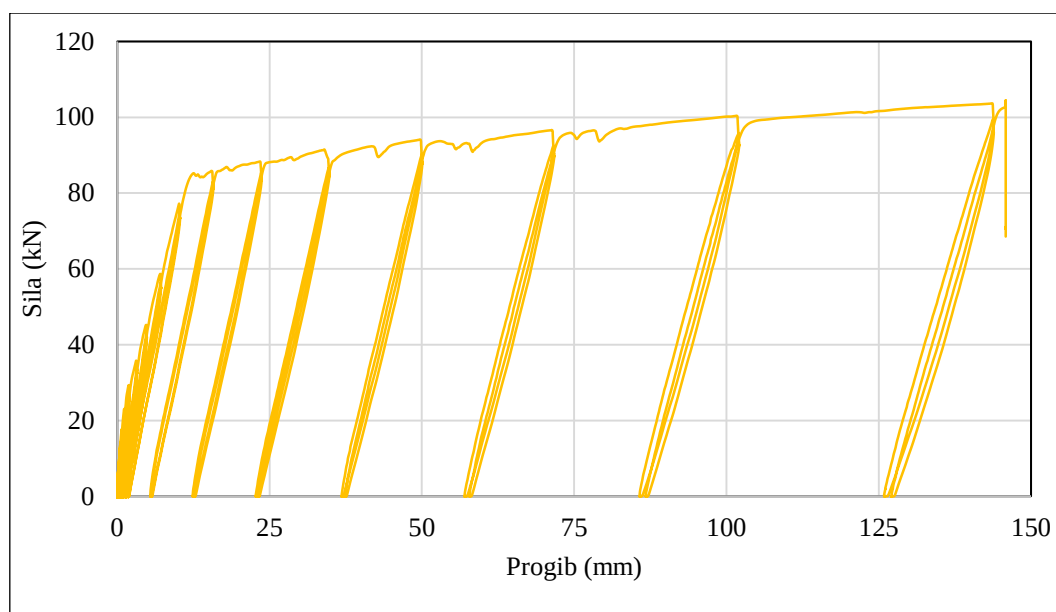
Slika 7.54 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G1



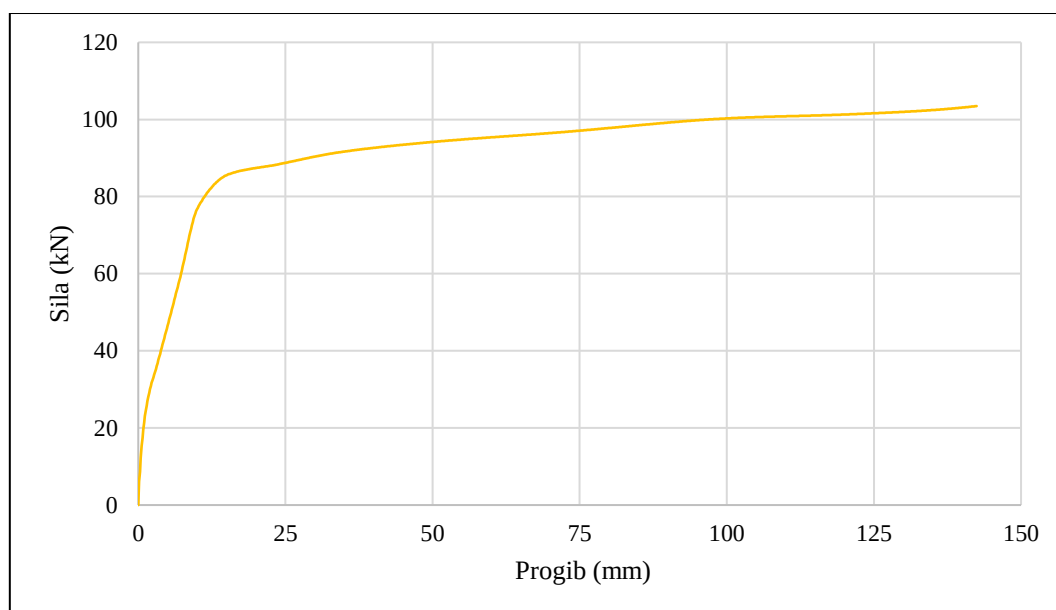
Slika 7.55 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G2



Slika 7.56 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G2



Slika 7.57 Grafički odnos *sila-progib* cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G3



Slika 7.58 Pripadajuća anvelopa cikličkog odgovora armiranobetonske grede
SCC-R-G3

Tablica 7.17 Kvantitativni i statistički pokazatelji potrebni za definiranje ponašanja serije armiranobetonskih greda SCC-R

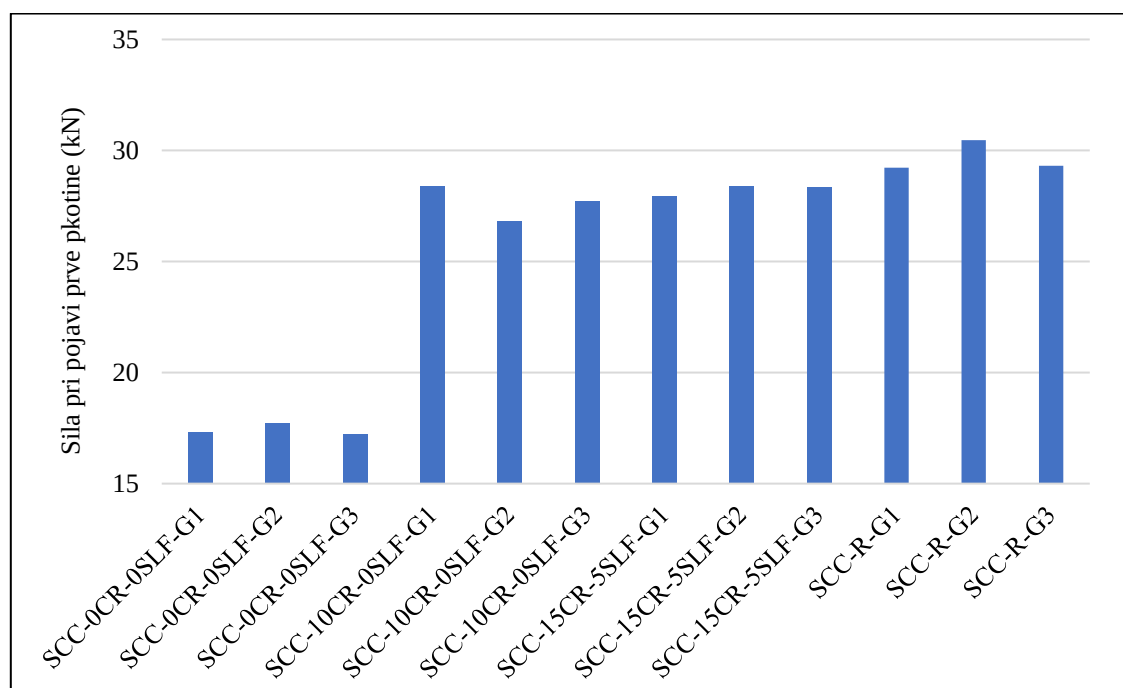
Greda	k	F _c	d _c	F _y	d _y	F _u	d _u	F _{sлом}	d _{max}	μ
	(kN/m)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(d _u /d _y)
G1	7435,12	29,22	1,54	90,52	14,97	113,15	144,57	101,90	144,57	9,65
G2	7439,42	30,46	1,79	91,66	15,05	113,90	142,44	71,62	142,44	9,46
G3	7252,74	29,32	1,88	85,83	15,42	104,44	145,84	68,53	145,84	9,46
min	7252,74	29,22	1,54	85,83	14,97	104,44	142,44	68,53	142,44	9,46
max	7439,42	30,46	1,88	91,66	15,42	113,90	145,84	101,90	145,84	9,65
$\bar{x}$	7375,76	29,67	1,74	89,34	15,15	110,50	144,28	80,68	144,28	9,53
$\bar{s}_n$	87,01	0,56	0,14	2,53	0,19	4,29	1,40	15,06	1,40	0,09
V (%)	1,18	1,90	8,33	2,83	1,28	3,88	0,97	18,66	0,97	0,95

7.3.6 Usporedba rezultata eksperimentalnih ispitivanja serija AB greda (diskusija)

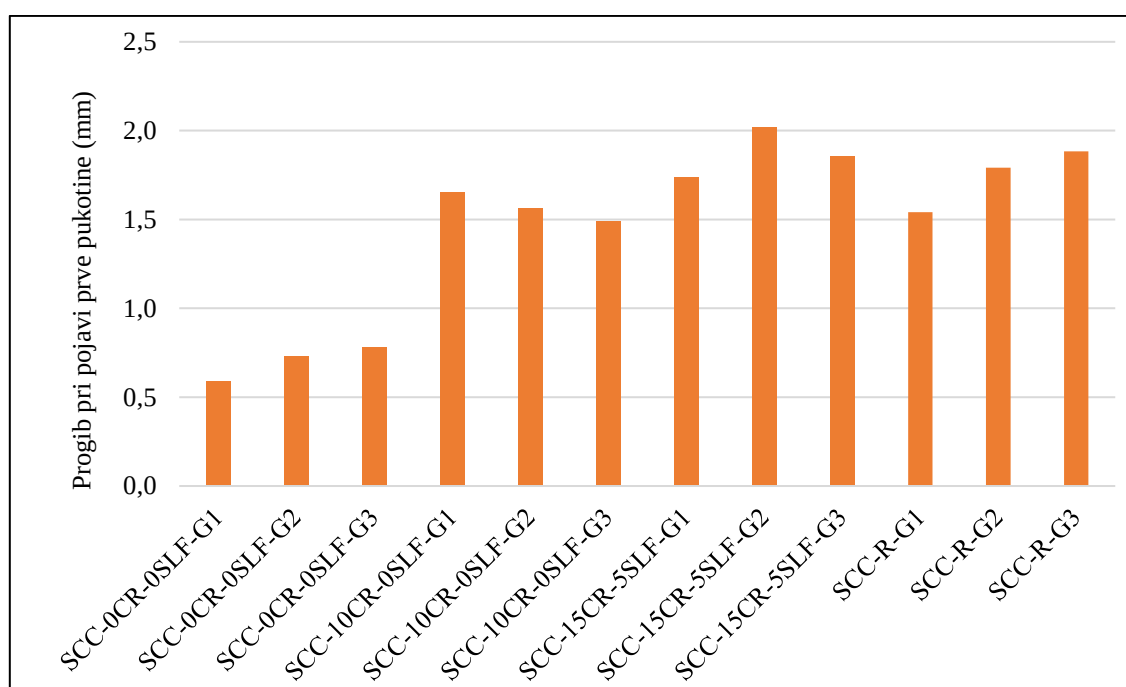
7.3.6.1 Način sloma i razvoj pukotina

U **Poglavljima 7.3.2 - 7.3.5** prikazana su područja drobljenja i delaminacije betona u gornjoj tlačnoj zoni (**Slike 7.14 - 7.16, 7.26 - 7.28, 7.38 - 7.40 i 7.50 - 7.52**) te područja odlamanja betona u donjoj vlačnoj zoni greda, što je karakteristična pojava pri slomu serija greda SCC-0CR-0SLF i SCC-R (**Slike 7.14 i 7.50 - 7.52**). Nadalje, kod greda bez gume karakterističan je nagli slom drobljenjem betona u tlačnoj zoni. Kod greda SCC-R karakterističan je čak i nagli slom eksplozivnim drobljenjem betona i lokalnim izvijanjem armature u tlačnoj zoni, dok je kod greda s gumom u prvom koraku izraženija pojava delaminacije, a potom dolazi do drobljenja. Zbog svoje deformabilnosti guma sprječava eksplozivno drobljenje betona u tlačnoj zoni, čime se slom betona u tlačnoj zoni može predvidjeti i naslutiti prije nego li se uopće i dogodi. Kod serija greda SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF nema i pojave odlamanja betona u vlačnoj zoni, što predstavlja pozitivan utjecaj reciklirane gume u sprječavanju površinskog ljuštenja i odlamanja betona u vlačnoj zoni. Pukotine se u najvećoj mjeri javljaju u srednjoj trećini raspona greda i na mjestu unosa opterećenja. Pukotine na svim ispitanim gredama pokazuju tipičan slom greda savijanjem (*engl. flexural failure mode*). U ranoj fazi nanošenja opterećenja fine vertikalne pukotine formirane su u srednjoj trećini greda u području čistog savijanja, a broj pukotina rastao je kako je rasla i primijenjena sila. Dodatnim povećanjem opterećenja javljaju se i nove vertikalne pukotine, ali i dijagonalne (kose) pukotine nastale zajedničkim djelovanjem posmičnih naprezanja i naprezanja od savijanja. Pri kasnijim fazama opterećenja, tj. nakon popuštanja čelika, postojeće pukotine postaju sve šire i dublje postupno napredujući prema gornjoj površini uzoraka. Prije sloma čelična armatura prvo popušta, a potom se beton počinje drobiti u tlačnoj zoni u blizini sredine raspona greda ili na mjestu djelovanja koncentriranih sila, što ukazuje na duktilni način sloma greda. Na **Slikama 7.59 i 7.60** prikazana je usporedba odnosa sila i progiba pri pojavi prve pukotine za sve ispitane grede. Prve pukotine kod uzoraka greda s istom tlačnom čvrstoćom javljaju se kod gotovo iste vrijednosti sile, što je u skladu s prethodnim istraživanjem [110], dok se kod uzoraka greda serije SCC-

0CR-0SLF pukotine javljaju pri manjoj vrijednosti sile, tj. pri manjim progibima. Progibi pri pojavi prve pukotine također su poprilično slični za uzorke greda s istom tlačnom čvrstoćom, dok su kod greda serije SCC-0CR-0SLF progibi pri pojavi prve pukotine manji u odnosu na ostale 3 ispitane serije greda.



Slika 7.59 Usporedba vrijednosti sila pri pojavi prve pukotine (F_c)



Slika 7.60 Usporedba vrijednosti progiba pri pojavi prve pukotine (d_c)

U [Tablici 7.17](#) prikazane su normalizirane vrijednosti ukupnog broja pukotina pri slomu grede i maksimalne širine pukotina pri progibu traverze od 77,78 milimetara za sve ispitane serije greda.

Tablica 7.17 Normalizirane vrijednosti ukupnog broja pukotina pri slomu grede i maksimalne širine pukotina pri progibu traverze od 77,78 milimetara (mm)

Oznaka serije greda	Ukupan broj pukotina pri slomu grede	Maksimalna širina pukotina pri progibu traverze od 77,78 mm (mm)
SCC-0CR-0SLF	0,880	0,806
SCC-10CR-0SLF	0,995	0,551
SCC-15CR-5SLF	1,000	0,529
SCC-R	0,818	1,000

Grede s recikliranom gumom pokazuju bolje pukotinsko ponašanje u odnosu na AB grede bez reciklirane gume. Grede SCC-15CR-5SLF imaju najveći prosječni broj pukotina pri slomu, ali i najmanju prosječnu širinu pukotina pri promatranom progibu traverze kidalice. Grede SCC-10CR-0SLF imaju tek nešto veću prosječnu širinu pukotina od greda SCC-15CR-5SLF, ali i dalje manju od prosječne širine pukotine greda bez reciklirane gume. Grede s recikliranom gumom imaju izraženije sekundarne pukotine, tj. pukotine koje nastaju u blizini već nastale pukotine. Eksperimentalnim ispitivanjem utvrđen je pozitivan doprinos reciklirane gume poboljšanju pukotinskog stanja AB greda. U nekoliko je istraživanja također pisano o poboljšanju graničnog stanja uporabljivosti u pogledu smanjenja širine pukotina prilikom primjene reciklirane gume kao zamjene za prirodni agregat [107], [108], [112]. Ismail i sur. [108] eksperimentalnim su ispitivanjem AB greda s recikliranom gumom dobili maksimalnu širinu pukotina koje su do 50 % F_{max} bile manje od propisima dopuštenih širina pukotina, tj. manje od 0,3 mm, te su zaključili da je potencijalno moguća upotreba betona s gumom u konstrukcijama izloženima atmosferilijama. Budući da je eksperimentalnim ispitivanjem utvrđen pozitivan utjecaj reciklirane gume na poboljšanje pukotinskog stanja AB greda u vidu smanjenja širine pukotina, što posljedično dovodi do potencijalnog očuvanja zaštitnog sloja betona, predlaže se dodatno detaljno eksperimentalno ispitivanje utjecaja reciklirane gume na granično stanje uporabljivosti AB konstrukcijskih elemenata s recikliranom gumom, npr. stupova i okvira potencijalno otpornih na potresna djelovanja, u vidu praćenja razvoja pukotina pri svakom koraku opterećenja, s povećanjem vremenskog trajanja svakog pojedinog ciklusa opterećenja, kako bi se ustanovio i moment pojave maksimalno dozvoljene širine pukotine od 0,3 mm, definirane u važećim normama za projektiranje betonskih konstrukcija [168]. Slično kao i u jednom od prethodnih istraživanja [110], dubina pukotina ne pokazuje jasnu povezanost s udjelom gume u betonu, stoga o navedenoj temi u ovome radu nije pisano.

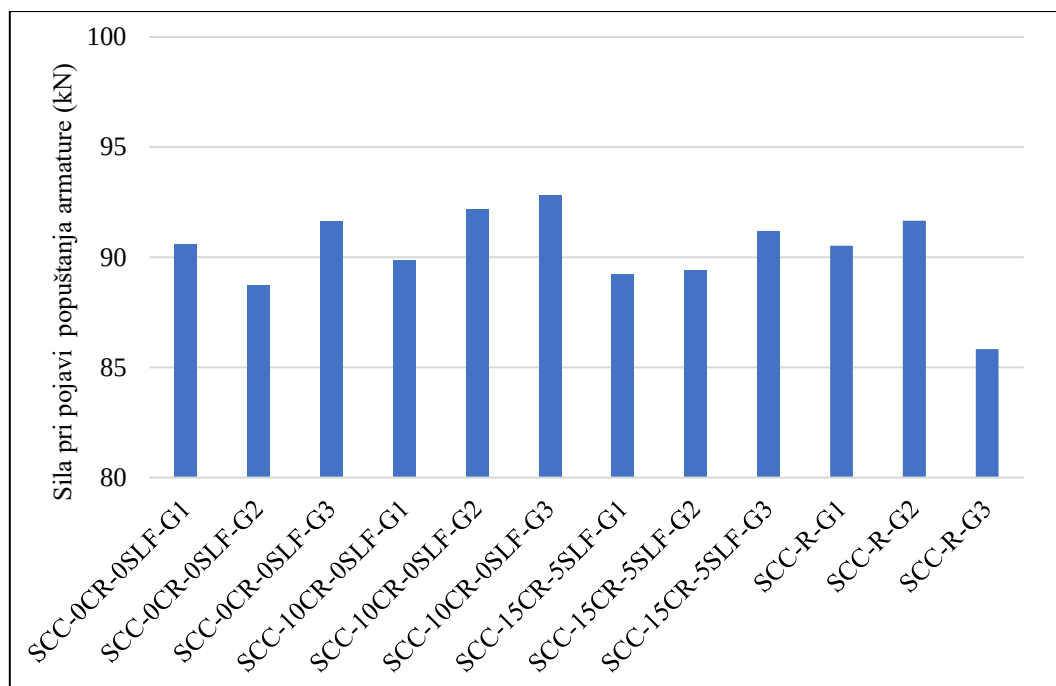
7.3.6.2 Nosivost, krutost i duktilnost

U [Tablici 7.18](#) izložene su normalizirane vrijednosti kvantitativnih pokazatelja ponašanja ispitanih serija armiranobetonskih greda.

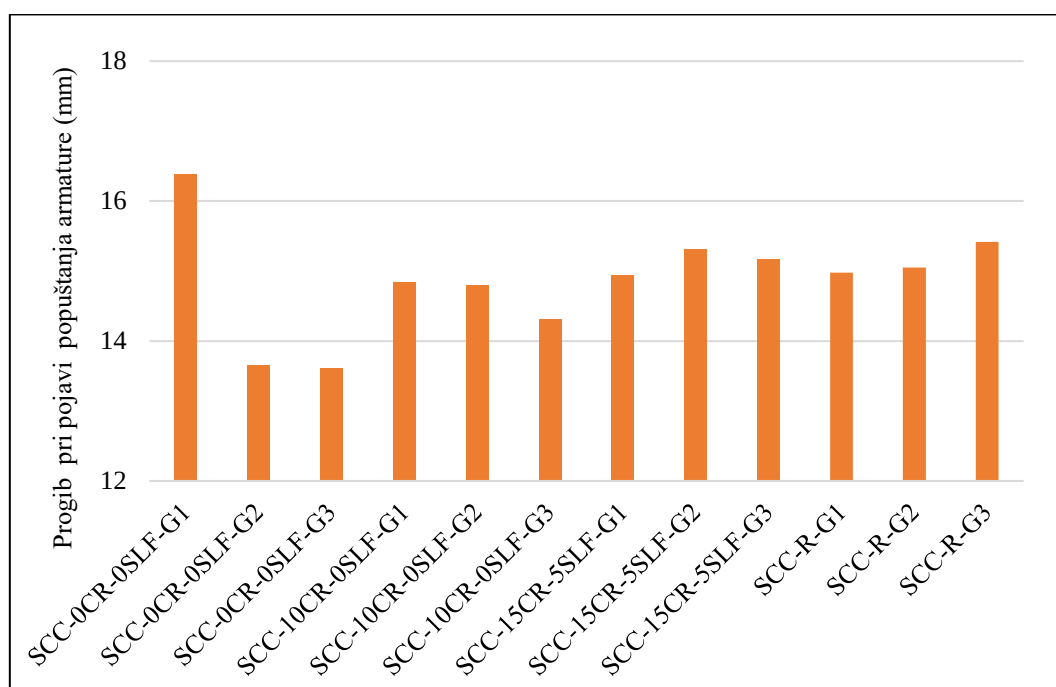
Tablica 7.18 Normalizirane vrijednosti kvantitativnih pokazatelja ponašanja ispitanih serija armiranobetonskih greda

Oznaka serije greda	k	F_c	d_c	F_y	d_y	F_u	d_u	$F_{sлом}$	d_{max}	μ
SCC-0CR-0SLF	1,00	0,59	0,37	0,99	0,96	1,00	0,74	1,00	0,99	0,78
SCC-10CR-0SLF	0,90	0,93	0,84	1,00	0,97	0,96	0,50	0,82	0,78	0,51
SCC-15CR-5SLF	0,90	0,95	1,00	0,98	1,00	0,93	0,47	0,90	0,81	0,47
SCC-R	0,95	1,00	0,93	0,98	1,00	0,99	1,00	0,78	1,00	1,00

Sve do pojave prvih pukotina i momenta savijanja pri pojavi prve pukotine (M_{cr}), tj. sile pri pojavi prve pukotine (F_c), odnos *sila - progib* linearan je i svi uzorci ponašaju se elastično, a nagib je krivulja naj strmiji. Samim je time u ovom području i krutost grede maksimalna. Iz relativnih odnosa danih u [Tablici 7.18](#) uočava se da je krutost armiranobetonskih greda s recikliranom gumom manja za 10 % i 5 % od krutosti armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF i SCC-R, što je bez obzira na pad krutosti zadovoljavajući rezultat iz kojega se može donijeti zaključak da su krutosti AB greda istih tlačnih čvrstoća betona gotovo iste, dok grede s većom tlačnom čvrstoćom betonom (SCC-0CR-0SLF) imaju i najveću krutost. U prethodnim istraživanjima [107], [112] također je potvrđena pojava pada krutosti i to do 12 % , što znači da je istraživanje provedeno u sklopu ovoga rada u skladu s rezultatima prethodnih istraživanja. Pad krutosti pripisuje se modulu elastičnosti gume koji je manji od modula elastičnosti prirodnog agregata [112]. Nakon nastanka prvih pukotina s daljnjim nanošenjem opterećenja krutost nosača i nagib krivulje dodatno se smanjuju sve do trenutka pojave popuštanja armaturnog čelika, tj. promjene krutosti grede (F_y , d_y). Na [Slikama 7.61](#) i [7.62](#) prikazana je usporedba odnosa sila i progiba pri pojavi popuštanja armature za sve ispitane grede.



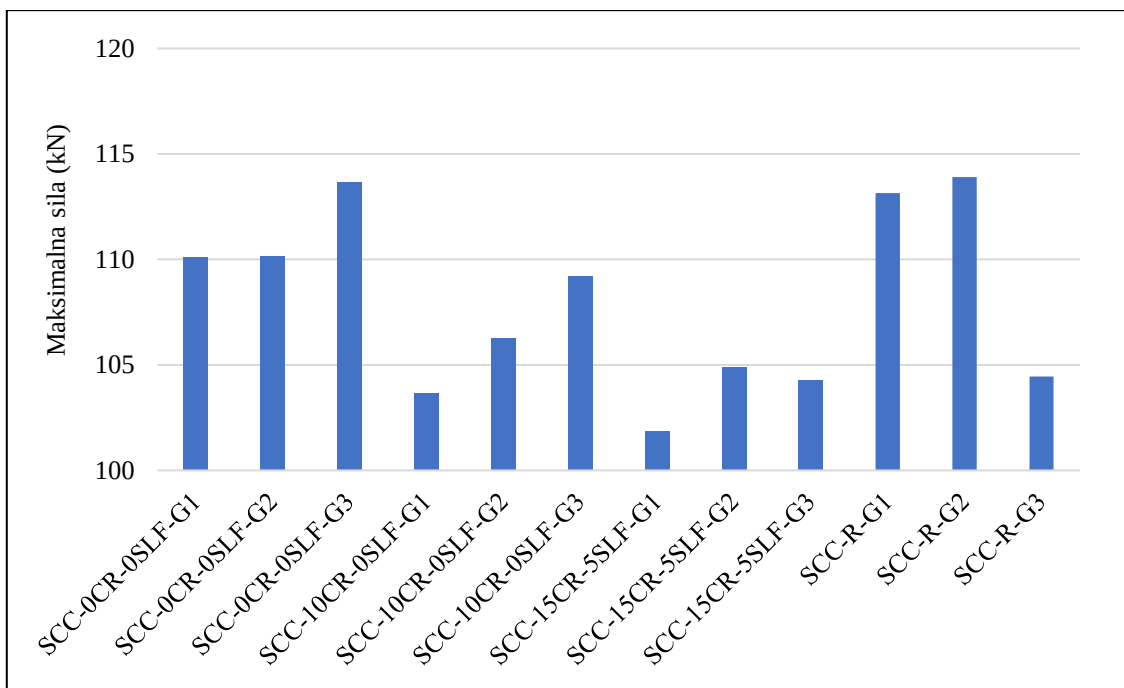
Slika 7.61 Usporedba vrijednosti sila pri pojavi popuštanja armature (d_y)



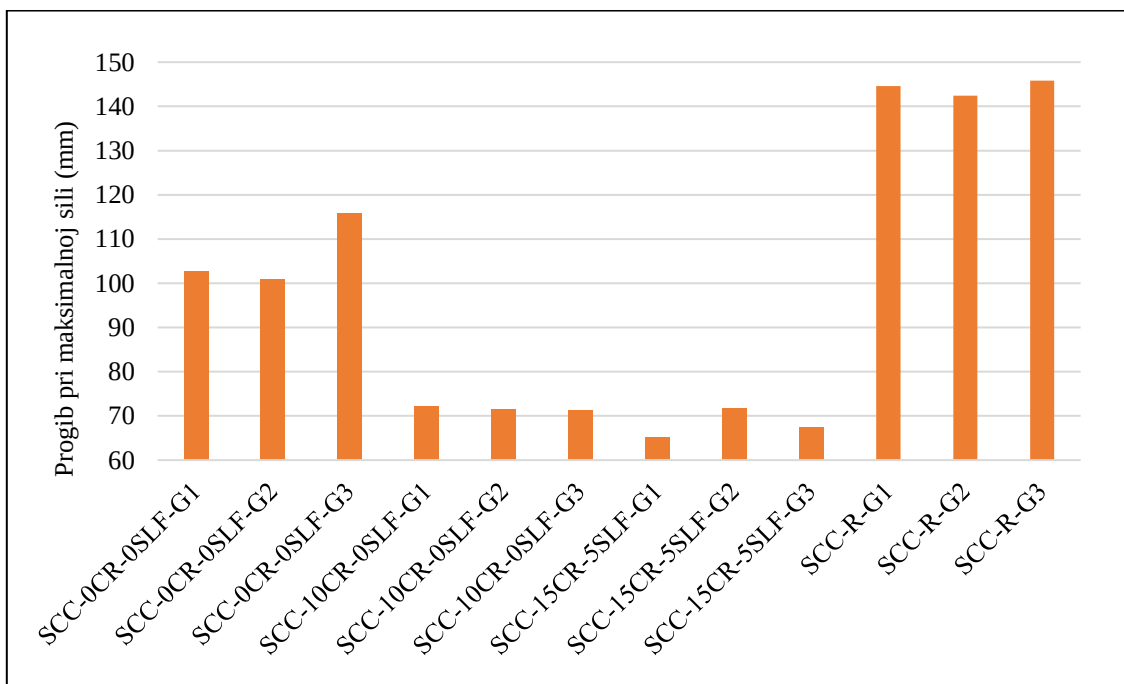
Slika 7.62 Usporedba vrijednosti progiba pri pojavi popuštanja armature (d_y)

Sve armiranobetonske grede imaju sličnu vrijednost sile i progiba u momentu popuštanja armature i to unutar 2 % i 4 % razlike. Takvo je ponašanje očekivano s obzirom da su sve AB grede jednako armirane [110]. Nakon pojave popuštanja armature greda dodatno gubi na svojoj krutosti te progib grede raste uz nezatno povećanje sile, što je vidljivo iz gotovo horizontalnih dijelova krivulja *sila-progib* svih ispitanih armiranobetonskih greda. U slučaju armiranobetonskih greda iz serije SCC-

R, maksimalni progib ($d_{\max}$) dosegnut je u trenutku djelovanja maksimalne sile (F_u). Kod greda iz serija SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF maksimalna je sila (F_u) dosegnuta prije sloma uzorka, stoga maksimalni progibi greda ($d_{\max}$) ne odgovaraju trenutku pojave maksimalne sile. Na [Slikama 7.63 i 7.64](#) prikazana je usporedba odnosa sila i progiba pri maksimalnoj sili.



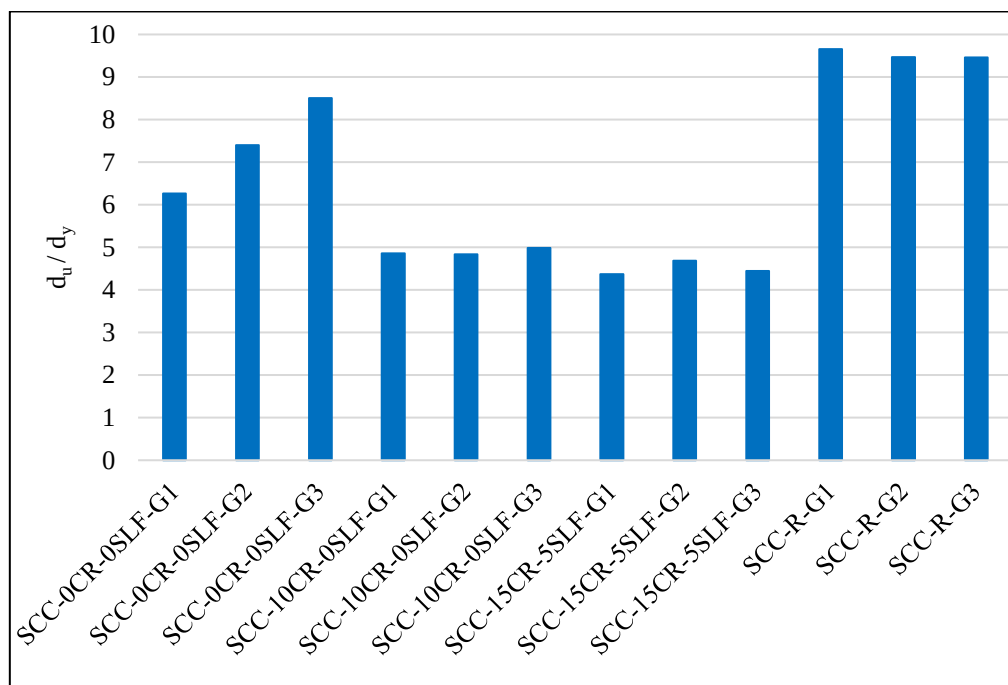
[Slika 7.63](#) Usporedba vrijednosti maksimalnih sila (F_u)



[Slika 7.64](#) Usporedba vrijednosti progiba pri maksimalnoj sili (d_u)

Na temelju podataka prikazanih u [Tablici 7.18](#) i na [Slici 7.63](#) može se zaključiti da grede SCC-0CR-0SLF imaju najveću prosječnu nosivost u usporedbi s ostalim gredama. U usporedbi s prosječnom nosivošću greda SCC-0CR-0SLF grede SCC-R imaju zanemarivo malenu razliku u prosječnoj nosivosti u iznosu od 1 %, dok grede SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF imaju pad vrijednosti prosječne nosivosti od 4 % i 7 %, što je u skladu s prethodnim istraživanjima [107], [108], [112]. Ipak, bitno je napomenuti da se nosivost AB greda s gumom nalazi u manje od 10 % razlike u usporedbi s AB gredama bez gume, a to je obećavajuće ako se beton s recikliranom gumom namjerava koristiti u nosivim konstrukcijskim elementima.

Grede su i nakon rasterećenja ostale deformirane, iz čega se može zaključiti da je armaturni čelik dosegnuo plastične deformacije. Na [Slici 7.65](#) pomoću omjera progiba pri maksimalnoj sili (d_u) i progiba pri popuštanju armature (d_y) uspoređena je duktilnost uzoraka 4 ispitane serije greda.



[Slika 7.65](#) Duktilnost uzoraka ispitanih serija armiranobetonskih greda (d_u / d_y)

Na temelju podataka prikazanih u [Tablici 7.18](#) i na [Slici 7.65](#) može se zaključiti da grede SCC-R imaju najveću prosječnu duktilnost. U usporedbi s prosječnom duktilnošću greda SCC-R, grede SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF imaju 22 %, 49 % i 53 % manju duktilnost. Navedeni su rezultati ispitivanja kontradiktorni s nekim rezultatima istraživanja drugih autora [108], [111], dok su u drugu ruku djelomično u skladu s istraživanjem koje su proveli Ismail i sur. [112], koji su pisali o povećanju duktilnosti AB greda s udjelom gume do 15 % volumena sitnog agregata te o smanjenju duktilnosti AB greda s udjelom gume većim od 15 % volumena sitnog agregata. Isti su autori pisali i o većoj duktilnosti AB greda izrađenih od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u usporedbi s AB gredama izrađenim od običnog betona s recikliranom gumom. Nadalje, Ismail i Hassan [112]

navode da elementi koji imaju vrijednost duktilnosti u rangu od 3-5 postižu primjerenu duktilnost prikladnu za konstrukcijske elemente izložene velikim pomacima, što je ovdje ostvareno te predstavlja još jedan dokaz primjene samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima.

7.3.7 Usporedba eksperimentalnih rezultata ispitivanja armiranobetonskih greda s analitičkim izrazima danim u normi HRN EN 1992-1-1:2013 (EC2)

7.3.7.1 Odnos „sila – progib na sredini grede“

Gotovo se svi armiranobetonski nosači tijekom eksploatacije, tj. uporabe nalaze u području do pojave popuštanja armature (F_{y,d_y}). Zbog toga postupak proračuna progiba prema HRN EN 1992-1-1:2013 (u nastavku EC2) [168] ne uzima u obzir niti daje rezultate za područje nakon popuštanja armature u nosaču. Za elemente konstantne visine, kao što je i slučaj kod svih ispitanih greda, može se koristiti pojednostavljena metoda proračuna progiba, po kojoj se proračuna zakrivljenost na mjestu maksimalnog momenta ($1 / r_{tot}$), a progib se računa prema izrazu:

$$v_{tot} = k \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r_{tot}} \quad (7.2)$$

gdje je:

k - koeficijent ovisan o statičkom sustavu i opterećenju

L - raspon između oslonaca

$1 / r_{tot}$ - ukupna zakrivljenost u presjeku u sredini raspona sastavljena od:

- zakrivljenosti zbog opterećenja i puzanja $1 / r_m$

- zakrivljenosti zbog skupljanja $1 / r_{csm}$

Budući da je u ovome radu riječ o slobodno oslonjenoj gredi opterećenoj dvjema vertikalnim silama, koeficijent ovisan o statičkom sustavu i opterećenju izračunat je iz izraza:

$$k = 0,125 - \frac{\left(\frac{a}{L}\right)^2}{6} \quad (7.3)$$

gdje je:

a - udaljenost mjesta djelovanja sila od bližeg oslonca

L – raspon između oslonaca

Sukladno EC2 u ovome je radu za ukupnu zakrivljenost u presjeku u sredini raspona ($1 / r_{\text{tot}}$) usvojena zakrivljenost zbog opterećenja ($1 / r_m$) koja se dobiva prema sljedećem izrazu:

$$\frac{1}{r_m} = \zeta \cdot \frac{1}{r_{\text{II}}} + (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_{\text{I}}} \quad (7.4)$$

gdje je:

ζ - koeficijent raspodjele naprezanja u armaturi uzduž elementa, $\zeta = 0$ za neraspucani element

$1 / r_{\text{I}}$ - odgovarajuća vrijednost zakrivljenosti za neraspucani element (naponsko stanje I – do pojave prve pukotine)

$1 / r_{\text{II}}$ - odgovarajuća vrijednost zakrivljenosti za potpuno raspucali element (naponsko stanje II – nakon pojave prve pukotine do pojave popuštanja armature)

Budući da je ispitivanje greda i mjerenje progiba provedeno u relativno kratkom vremenskom razdoblju od svega nekoliko sati, nisu se mogli ostvariti progibi od skupljanja i puzanja betona, stoga su u proračunu progiba promatrani samo progibi od kratkotrajnog djelovanja.

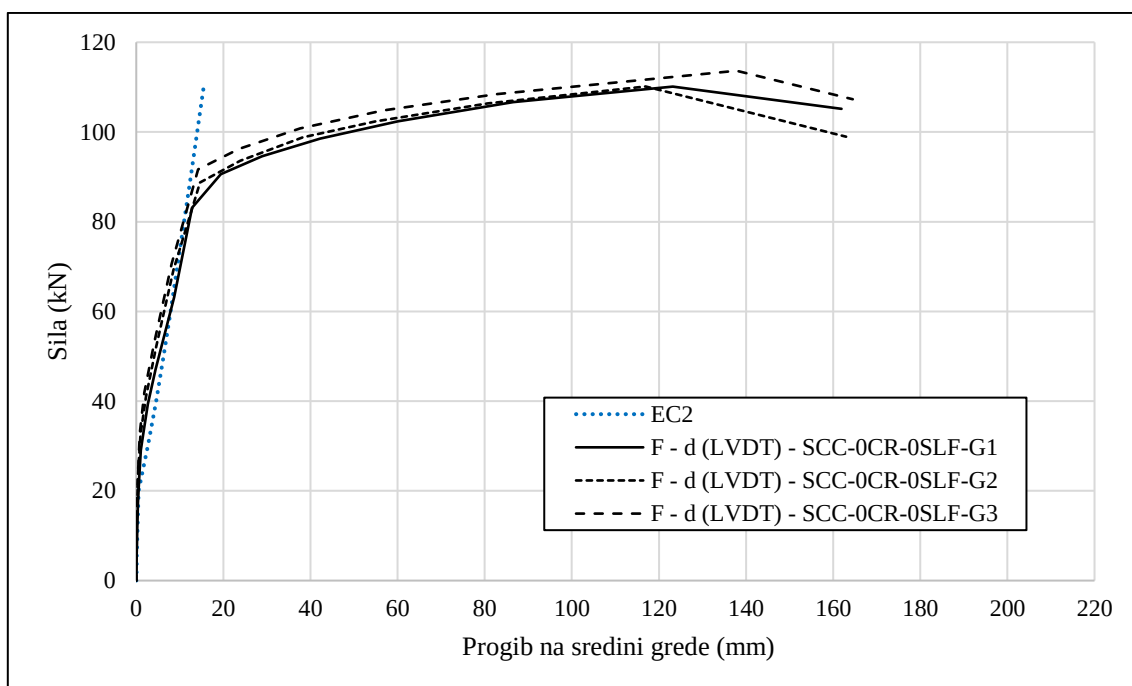
Svi izrazi u EC2 vrijede za prikaz odnosa *sila-progib na sredini grede*. Kako je već ranije spomenuto, zbog činjenice što se armiranobetonski konstrukcijski elementi tijekom uporabe najčešće nalaze u području do pojave popuštanja armature, norma EC2 prilikom proračuna progiba u obzir uzima samo područje do pojave popuštanja armature. Stoga se radi usporedbe eksperimentalnih rezultata i rezultata analitičkog proračuna prema EC2 mogu kao relevantni podatci uzeti podatci o progibima na sredini grede dobiveni pomoću LVDT-a jer se promatraju pomaci manji od 150 mm, koliko iznosi i maksimalni hod LVDT-a koji u ovom slučaju nije narušen kao kod međusobne usporedne eksperimentalnih rezultata ispitivanja različitih serija greda pomoću kvantitativnih pokazatelja prikazanih u [Poglavlju 7.3](#).

Koristeći analitičke izraze dane u normi EC2, napravljen je analitički proračun progiba za kratkotrajno djelovanje svaku seriju ispitanih greda. U analitičkom su proračunu kao ulazni parametri korišteni eksperimentalni podatci prikazani u [Tablici 7.19](#). Za armaturni čelik pretpostavljena je vrijednost modula elastičnosti čelika od 200000 N/mm².

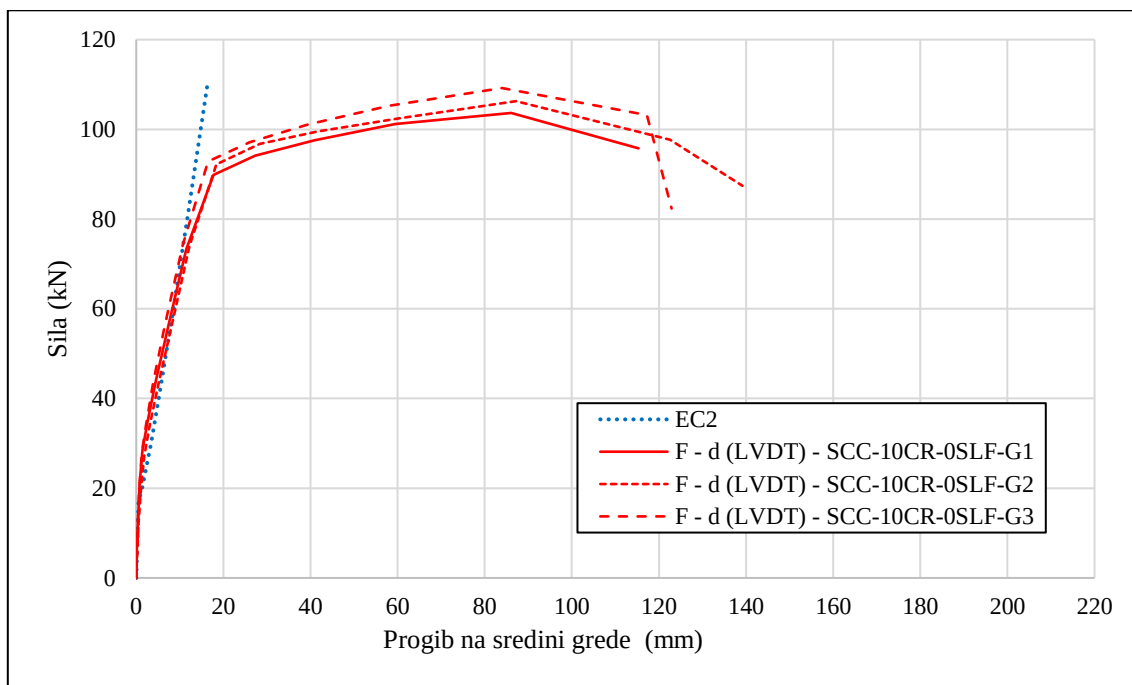
Tablica 7.19 Ulazni parametri za analitički proračun progiba prema EC2

Oznaka serije greda	f_{cm} (MPa)			E_{cm} (MPa)		
	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V	$\bar{x}$	$\bar{s}_n$	V
SCC-0CR-0SLF	42,41	3,00	0,07	39729,24	0,88	0,02
SCC-10CR-0SLF	30,72	1,22	0,04	31211,54	0,51	0,02
SCC-15CR-5SLF	30,60	0,98	0,03	27766,96	0,80	0,03
SCC-R	30,31	1,40	0,05	29444,33	0,19	0,01

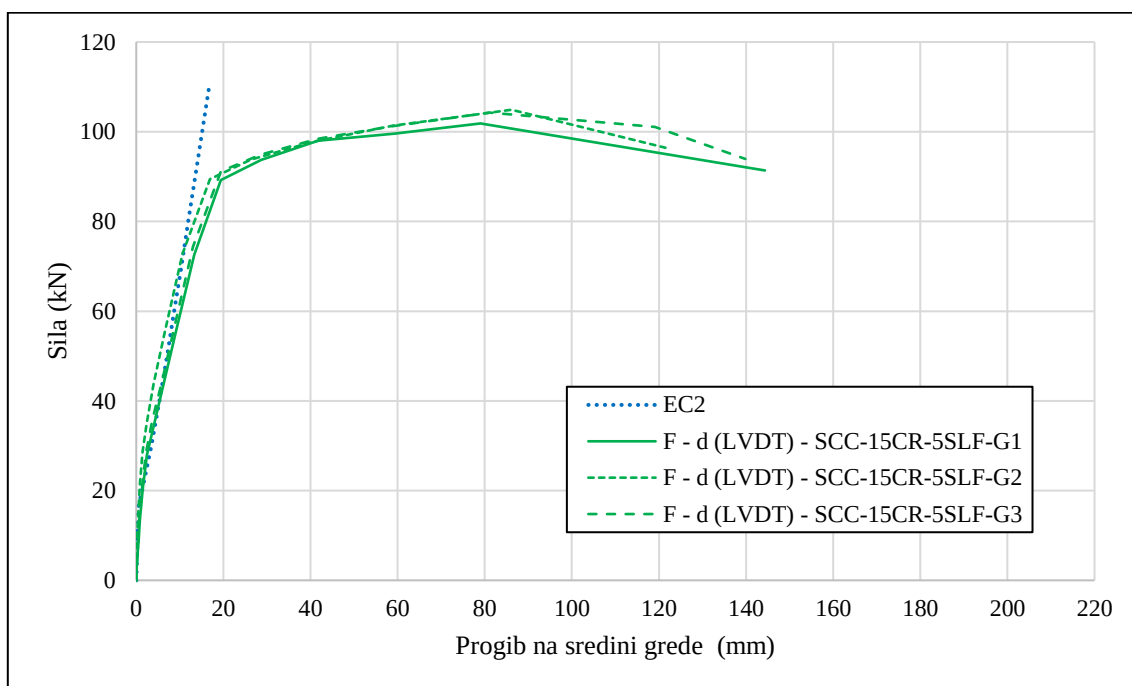
Na Slikama 7.66 - 7.69 uspoređeni su rezultati eksperimentalnog ispitivanja *sila-progib* s odnosom *sila-progib* proračunatim pomoću analitičkih izraza danih u EC2.



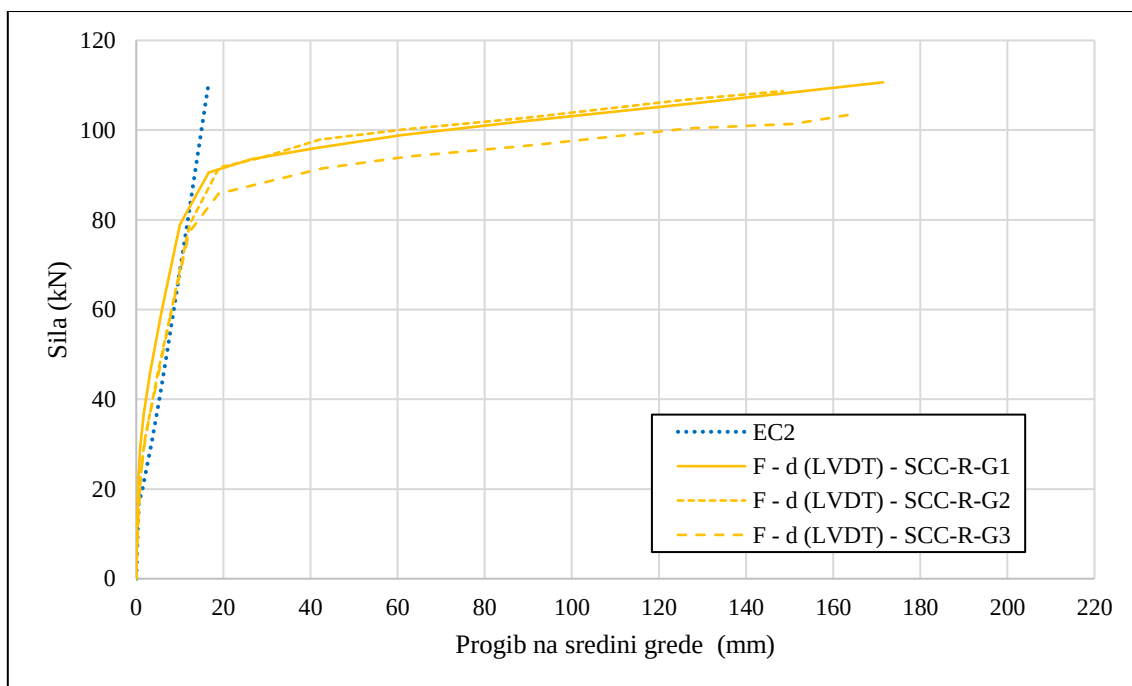
Slika 7.66 Grafički odnos *sila-progib* za uzorke greda iz serije SCC-0CR-0SLF



Slika 7.67 Grafički odnos *sila-progib* za uzorke greda iz serije SCC-10CR-0SLF



Slika 7.68 Grafički odnos *sila-progib* za uzorke greda iz serije SCC-15CR-5SLF



Slika 7.69 Grafički odnos *sila-progib* za uzorke greda iz serije SCC-R

Na Slikama 7.66 - 7.69 može se vidjeti dobro poklapanje eksperimentalnih rezultata ispitivanja armiranobetonskih greda i rezultata dobivenih pomoću analitičkih izraza danih u EC2. Iz navedenog se može zaključiti da je za sve 4 serije greda moguće koristiti analitičke izraze dane u EC2 kako bi se

proračunali progibi ispitanih serija armiranobetonskih greda i to do opterećenja koje uzrokuje popuštanje armature.

7.3.7.2 Moment pri pojavi prve pukotine (M_{cr})

Prema EC2 moment pri pojavi prve pukotine (M_{cr}) se računa prema sljedećem izrazu:

$$M_{cr} = \frac{M_{Ed}}{A_{s1} \cdot z} \quad (7.5)$$

gdje je:

M_{Ed} – proračunski moment savijanja

A_{s1} - glavna uzdužna armatura u vlačnoj zoni

z – krak unutarnjih sila za naponsko stanje II

U [Tablici 7.20](#) su uspoređene vrijednosti momenta pri pojavi prve pukotine (M_{cr}) dobivene iz rezultata eksperimentalnog ispitivanja i analitičkog izraza danog u EC2.

Tablica 7.20 Vrijednosti momenta pri pojavi prve pukotine (M_{cr}) – eksperimentalni i analitički rezultati (EC2)

Oznaka serije greda	Eksperiment			EC2	δ
	F_c (kN)	M_{cr} (kNm)	$M_{cr, \text{prosjeak}}$ (kNm)	M_{cr} (kNm)	
SCC-0CR-0SLF-G1	17,32	8,66	8,72	10,17	0,86
SCC-0CR-0SLF-G2	17,74	8,87			
SCC-0CR-0SLF-G3	17,24	8,62			
SCC-10CR-0SLF-G1	28,39	14,20	13,83	8,48	1,63
SCC-10CR-0SLF-G2	26,84	13,42			
SCC-10CR-0SLF-G3	27,73	13,86			
SCC-15CR-5SLF-G1	27,96	13,98	14,12	8,52	1,66
SCC-15CR-5SLF-G2	28,40	14,20			
SCC-15CR-5SLF-G3	28,37	14,19			
SCC-R-G1	29,22	14,61	14,83	8,35	1,78
SCC-R-G2	30,46	15,23			
SCC-R-G3	29,32	14,66			

Iz [Tablice 7.20](#) vidljivo je da se eksperimentalno dobiveni rezultati momenta pri pojavi prve pukotine razlikuju od istih rezultata dobivenih korištenjem analitičkih izraza danih u EC2. Nadalje, izraze dane u EC2 za predviđanje momenta pri pojavi prve pukotine (M_{cr}) potrebno je prilagoditi kako bi bili kompatibilni s ponašanjem armiranobetonskih greda izrađenih od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i bez nje. Zbog toga je u istoj tablici u zadnjem stupcu dan prijedlog koeficijenta

δ dobiven kao omjer eksperimentalne i analitički dobivene vrijednosti momenta pri pojavi prve pukotine s kojim bi se vrijednost M_{cr} dobivena preko analitičkog izraza u EC2 trebala pomnožiti kako bi se pomoću izraza danih u EC2 mogao utvrditi moment pri pojavi prve pukotine s većom točnošću rezultata.

7.4 Zaključci o ispitivanju

Zbog malenog broja istraživanja provedenih na armiranobetonskim konstrukcijskim elementima s recikliranom gumom pod opterećenjem, a time i malenog broja rezultata na temelju kojih bi bilo moguće donijeti konkretne zaključke o primjeni gume u konstrukcijskim elementima, pristupilo se izradi četiri serije armiranobetonskih greda od kojih je u dvije serije primijenjena reciklirana guma kao zamjenski materijal za sitni agregat (frakcija 0-4 mm). Iz rezultata istraživanja proizlaze zaključci i smjernice za upotrebu reciklirane gume u armiranobetonskim konstrukcijskim elementima:

- Sve ispitane mješavine samozbijajućeg betona u svježem su stanju pokazale poželjna svojstva, tj. dobru sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilaženja zapreka te otpornost segregaciji te ih je moguće koristiti u izradi armiranobetonskih elemenata s gusto raspoređenom armaturom.
- Tehnologija izvedbe greda s recikliranom gumom ista je kao i tehnologija izvedbe greda bez reciklirane gume, s tim da je potrebno dodatno obratiti pozornost na pravilno doziranje kemijskih dodataka koji se koriste prilikom betoniranja kako bi se spriječila segregacija agregata i izdvajanje granula gume na površini ugrađenog betona u armiranobetonskim gredama.
- Prilikom nanošenja opterećenja te na kraju sloma uzorka kod greda s recikliranom gumom nije uočena pojava odlamanja betona u vlačnoj zoni, što u usporedbi s AB gredama bez gume predstavlja pozitivan utjecaj reciklirane gume u sprječavanju površinskog ljuštenja betona i odlamanja betona u vlačnoj zoni.
- Prve se pukotine kod uzoraka greda s istom tlačnom čvrstoćom javljaju kod gotovo iste vrijednosti sile. Kod uzoraka greda serije SCC-0CR-0SLF pukotine se javljaju pri manjoj vrijednosti sile, tj. pri manjim progibima, iz čega proizlazi zaključak da povećanje tlačne čvrstoće betona negativno utječe na razvoj pukotina kod armiranobetonskih greda. Nadalje, progibi pri pojavi prve pukotine također su poprilično slični za uzorke greda s istom tlačnom čvrstoćom, dok su progibi pri pojavi prve pukotine kod greda serije SCC-0CR-0SLF manji u odnosu na ostale tri ispitane serije greda. Eksperimentalnim ispitivanjem utvrđen je pozitivan doprinos reciklirane gume poboljšanju pukotinskog stanja AB greda u vidu smanjenja širine pukotina, što posljedično dovodi do poboljšanja svojstava trajnosti AB elemenata i potencijalnog očuvanja zaštitnog sloja betona, čime je dokazano da je moguće koristiti samozbijajući beton s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će

imati poboljšana svojstva trajnosti, tj. povoljnije pukotinsko stanje pri djelovanju opterećenja na konstrukcijski element.

- Dubina pukotina ne pokazuje jasnu povezanost s udjelom gume u betonu.
- Krutost armiranobetonskih greda s recikliranom gumom manja je za 10 % i 5 % od krutosti armiranobetonskih greda SCC-0CR-0SLF i SCC-R, što je zadovoljavajući rezultat iz kojega se može donijeti zaključak da su krutosti AB greda istih tlačnih čvrstoća betona gotovo iste bez obzira na odabrani postotak reciklirane gume koja se nalazi u betonu, dok grede s većom tlačnom čvrstoćom betona (SCC-0CR-0SLF) imaju i najveću krutost.
- Nosivost AB greda s recikliranom gumom je unutar 10 % razlike u usporedbi s AB gredama bez gume, čime je dokazano da je moguće koristiti samozbijajući beton s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će imati jednakovrijednu nosivost.
- U usporedbi s prosječnom duktilnošću greda SCC-R grede SCC-0CR-0SLF, SCC-10CR-0SLF i SCC-15CR-5SLF imaju 22 %, 49 % i 53 % manju duktilnost. Time je dokazano da armiranobetonske grede s gumom nemaju poboljšanu duktilnost u usporedbi s AB gredama bez gume, ali ostvarene vrijednosti duktilnosti potvrđuju primjenu samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima.
- Za sve četiri serije greda moguće je koristiti analitičke izraze dane u EC2 kako bi se proračunali progibi ispitanih serija armiranobetonskih greda i to do opterećenja koje uzrokuje popuštanje armature, a preporuka je da se izraz za moment pri pojavi prve pukotine modificira korištenjem koeficijenta δ iz [Tablice 7.20](#).

Iz navedenih zaključaka proizlazi generalni zaključak da je moguće koristiti samozbijajući beton s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će imati zadovoljavajuću nosivost i poboljšana svojstva trajnosti, tj. povoljnije pukotinsko stanje pri djelovanju opterećenja na konstrukcijski element.

Korištenje reciklirane gume u armiranobetonskim konstrukcijskim elementima predstavlja učinkovit način za sigurno uklanjanje velikih količina otpadnog materijala, čime se potiče koncept održivosti i razvoj ekološki prihvatljivih građevina. Dodatna prednost korištenja betona s gumom jest njegova smanjena težina u odnosu na beton bez gume, što može dovesti do razvoja novog oblika laganog betona uz zadovoljavanje ne samo inženjerskog i ekološkog, nego i ekonomskog aspekta.

8 ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja bio je utvrditi utjecaj reciklirane gume kao zamjene za sitni agregat na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju, sve s ciljem razvijanja ekološki prihvatljivijeg armiranobetonskog elementa zadovoljavajućih mehaničkih i poboljšanih svojstava trajnosti. Na temelju pregleda stanja područja provedena su preliminarne eksperimentalna ispitivanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom te su u idućim koracima odabrane optimalne mješavine samozbijajućeg betona s recikliranom gumom, ispitani parametri mehanike loma te provedena eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala i na razini konstrukcijskih elemenata.

Pregledom stanja područja utvrđeno je da je u većini istraživanja običnog i samozbijajućeg betona s gumom prirodni sitni agregat (frakcija 0-4 mm) zamijenjen recikliranom gumom, ponajviše zbog boljih rezultata u usporedbi s rezultatima kada je zamijenjen prirodni krupni agregat. Zajedničkim efektom silicijske prašine i reciklirane gume potencijalno se dobiva beton zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, ali i povećane deformabilnosti i duktilnosti. Veći broj istraživanja samozbijajućeg i običnog betona s recikliranom gumom proveden je na manjim laboratorijskim uzorcima te je broj ispitivanja utjecaja reciklirane gume na konstrukcijske elemente ograničen. Također, veći broj postojećih istraživanja utjecaja reciklirane gume proveden je koristeći obični beton, a ne samozbijajući beton. Dosadašnja istraživanja u velikoj mjeri obuhvaćaju ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava betona s gumom, dok su npr. istraživanja termičkih svojstava i svojstava trajnosti samozbijajućeg betona s gumom poprilično nezastupljena u dostupnoj literaturi. Nadalje, većina istraživanja obuhvaćenih pregledom stanja područja usmjerena je prema upotrebi betona s gumom u nenosivim elementima, dok se naglasak ovoga rada stavlja na ispitivanje i potencijalnu primjenu reciklirane gume u nosivim armiranobetonskim konstrukcijskim elementima, tj. gredama koje bi se potencijalno koristile u područjima gdje je poželjna manja vlastita težina betona, povećana duktilnost i poboljšana svojstva uporabljivosti armiranobetonskih elemenata.

Preliminarnim eksperimentalnim ispitivanjem samozbijajućeg betona s recikliranom gumom dokazano je da se guma ne može koristiti kao punilo jer ne zadovoljava uvjete za punilo propisane normom HRN EN 12620:2008 [127]. Preporučeno je zamijeniti prirodni sitni agregat recikliranom gumom, dok se negativan utjecaj reciklirane gume na mehanička svojstva samozbijajućeg betona treba pokušati neutralizirati korištenjem silicijske prašine. Nadalje, dokazano je da prethodni tretman gume ne može značajno poboljšati mehanička svojstva samozbijajućeg betona te je predložena tzv. pasivna metoda poboljšanja veze između reciklirane gume i cementne paste pomoću pravilnog odabira oblika zrna gume, zamijenjenog materijala te udjela i veličine gume.

Prilikom odabira optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom dokazano je da su do 15 %-tne zamjene sitnog agregata gumom i 5 %-tne zamjene cementa silicijskom

prašinom svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrnulom stanju prihvatljiva za korištenje takvog materijala u nosivim armiranobetonskim elementima s gusto raspoređenom armaturom.

Nadalje, na temelju rezultata ispitivanja 21 mješavine samozbijajućeg betona prikupljeni su podatci o vrijednostima mehaničkih svojstava u ovisnosti o 2 varijable: postotnom udjelu reciklirane gume i postotnom udjelu silicijske prašine; te su u [Poglavlju 4.4.1.2](#) odabrani i predloženi regresijski modeli za tlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i čvrstoću na savijanje, čijom je verifikacijom dokazano da se modeli za tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje dobro slažu s eksperimentalnim rezultatima drugih autora, dok je regresijski model za modul elastičnosti ipak manje pouzdan.

Eksperimentalnim ispitivanjem parametara mehanike loma utvrđen je povećan kapacitet disipacije energije, tj. energija loma s povećanjem udjela gume u betonu. Međutim, pri udjelu gume većem od 15 % utjecaj reciklirane gume na žilavost loma postaje negativan, stoga se u pogledu poželjnih svojstava samozbijajućeg betona s recikliranom gumom pri lomu ne preporuča korištenje udjela gume većeg od 15 %, što je dokazano i nerazornom metodom ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke gdje su uzorci betonskih mješavina s do 15 % udjela gume i 5 % udjela silicijske prašine poprimili vrijednosti iznad 4500 m/s, što prema normi ASTM C597 [166] ukazuje na beton visoke kvalitete. Dobiveni rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa mogu se koristiti za praktičnu primjenu predviđanja žilavosti loma samozbijajućeg betona s gumom.

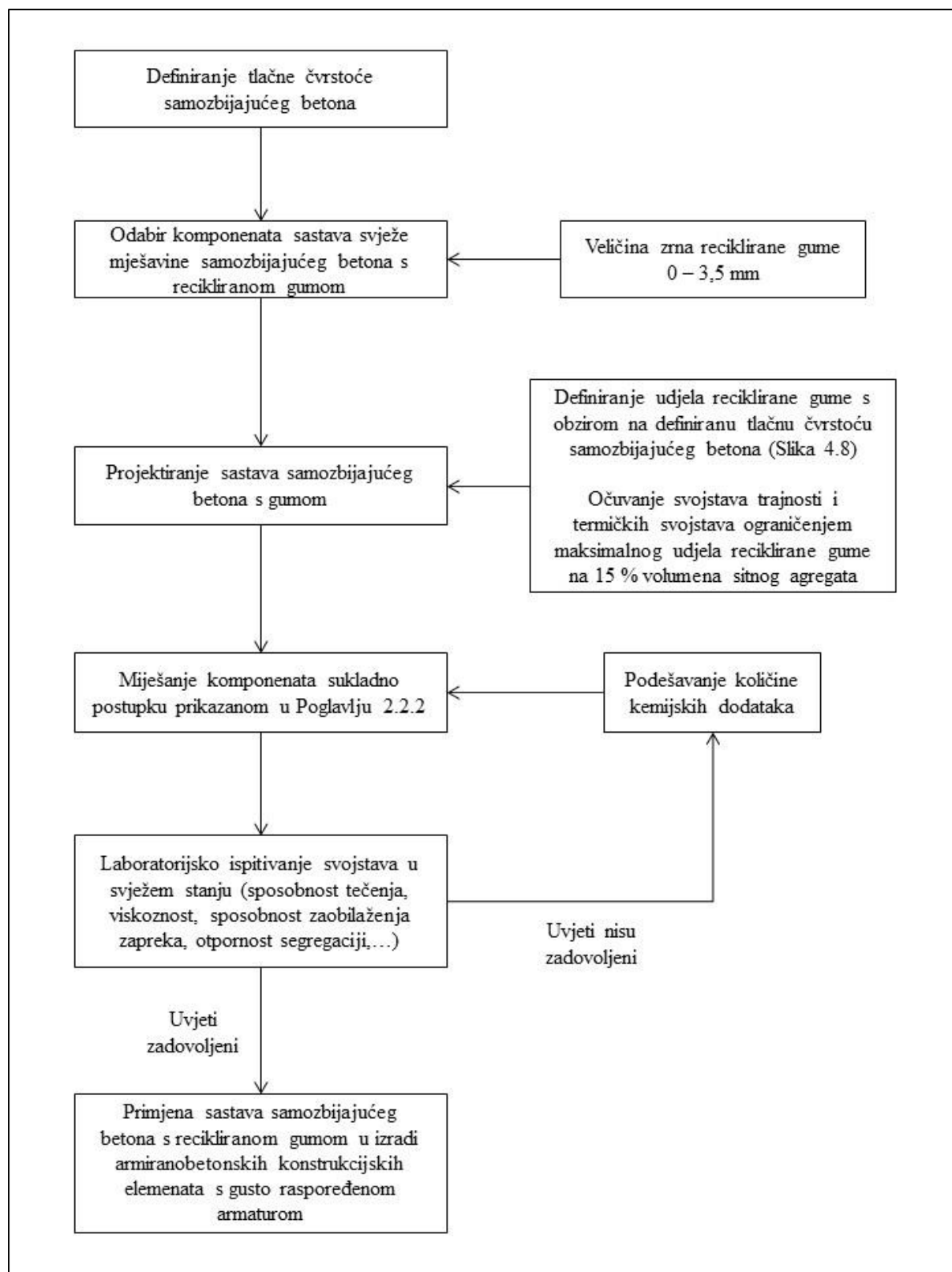
Eksperimentalnim ispitivanjem optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini materijala dokazan je pozitivan utjecaj primjene gume na neka od ispitanih svojstava trajnosti i termičkih svojstava samozbijajućeg betona. S druge strane, dokazana je mogućnost korištenja ispitanih optimalnih mješavina u nosivim armiranobetonskim elementima bez dodatnih ograničenja vezanih uz ispitana svojstva na razini materijala. Što se tiče zaključaka koji su proizašli iz eksperimentalnog ispitivanja optimalnih mješavina samozbijajućeg betona s recikliranom gumom na razini konstrukcijskih elemenata, dokazano je da sve ispitane mješavine samozbijajućeg betona u svježem stanju imaju poželjna svojstva, tj. dobru sposobnost tečenja, viskoznost, sposobnost zaobilazanja zapreka te otpornosti segregaciji, te ih je moguće koristiti u izradi armiranobetonskih elemenata s gusto raspoređenom armaturom. Nadalje, eksperimentalnim ispitivanjem utvrđeno je da reciklirana guma doprinosi poboljšanju pukotinskog stanja armiranobetonskih greda u vidu smanjenja širine pukotina, što posljedično dovodi do poboljšanja svojstava trajnosti armiranobetonskih elemenata i potencijalnog očuvanja zaštitnog sloja betona, čime je dokazano da je moguće koristiti samozbijajući beton s recikliranom gumom u nosivim armiranobetonskim elementima koji će imati poboljšana svojstva trajnosti, tj. povoljnije pukotinsko stanje pri djelovanju opterećenja na konstrukcijski element. Nosivost armiranobetonskih greda s recikliranom gumom je unutar 10 %-tne razlike u usporedbi s armiranobetonskim gredama bez reciklirane gume, čime je dokazano da noseve armiranobetonske grede izrađene od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom imaju zadovoljavajuću nosivost u usporedbi s armiranobetonskim gredama bez gume. Nadalje, dokazano je da grede s gumom nemaju poboljšanu

duktilnost, ali da je vrijednost duktilnosti tolika da se navedene grede mogu koristiti u seizmički aktivnim područjima.

Smjernice s identificiranim ključnim parametrima i opisanom metodologijom izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom

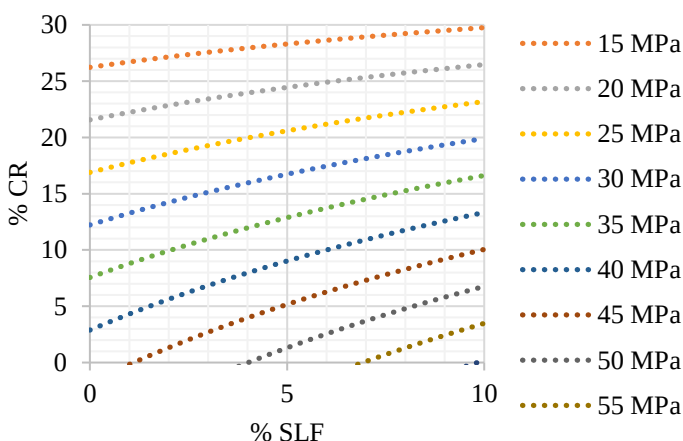
Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnih ispitivanja konstrukcijskih elemenata, tj. greda izrađenih od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom, donosi se nekoliko bitnih smjernica s identificiranim ključnim parametrima i opisanom metodologijom izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona recikliranom gumom ([Slika 8.1](#) i [Tablica 8.1](#)):

- Preporuča se korištenje reciklirane gume frakcije 0-3,5 mm kao zamjene za prirodni sitni agregat frakcije 0-4 mm, a ne kao zamjene za punilo. S obzirom na trenutne spoznaje prethodno tretiranje gume ne pridonosi uvelike poboljšanju veze s cementnom pastom te nije potrebno.
- Maksimalni postotni udio gume treba biti određen u skladu s unaprijed zahtijevanom, tj. projektiranom vrijednošću tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona s gumom i to uz pomoć dijagrama prikazanog na [Slici 4.8](#). Preporuka je da se radi očuvanja svojstava trajnosti i termičkih svojstava prilikom izrade armiranobetonskih greda koristi maksimalni udio reciklirane gume od 15 %.
- Preporuča se pratiti korake postupka miješanja danih u [Poglavlju 2.2.2](#) s mogućnošću manjih promjena vremenskih intervala s obzirom na tehnologiju izvedbe, konkretno misleći na brzinu utovara materijala u mikser.
- Prije izrade nosivih armiranobetonskih elemenata obavezno ispitati svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju te po potrebi regulirati količine kemijskih dodataka, tj. superplastifikatora i dodatka za promjenu viskoznosti, kako bi se spriječila segregacija agregata i izdvajanje granula gume na površini ugrađenog betona u armiranobetonskim gredama, što je u slučaju korištenja betona s recikliranom gumom identificirano kao vrlo bitan korak prilikom izrade nosivih konstrukcijskih elemenata.
- Budući da samozbijajući beton teče pod vlastitom težinom, materijal je u oplatu potrebno ugrađivati bez dodatnog zbijanja betona.



Slika 8.1 Metodologija izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom

Tablica 8.1 Smjernice za primjenu samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u konstrukcijskim elementima s gusto raspoređenom armaturom

Uvodne napomene i smjernice za ograničenje primjene samozbijajućeg betona s recikliranom gumom		
Tlačna čvrstoća	HRN EN 206:2021	razredi tlačne čvrstoće $\geq C25/30$
Svojstva trajnosti	HRN EN 206:2021	razredi izloženosti X0, XC1, XC2, XF2, XF4
	HRN 1128:2007	razred vodonepropusnosti VDP1
	RILEM TC 230-PSC	srednja plinopropusnost
Otpornost na djelovanje požara	HRN EN 1992-1-2:2013	vrijednosti tlačne čvrstoće kao funkcije temperature betona u slučaju djelovanja požara na betonsku konstrukciju u skladu s normom
Sastav mješavine samozbijajućeg betona s recikliranom gumom		
Projektiranje sastava mješavine samozbijajućeg betona		Europske smjernice za samozbijajući beton
Zamijenjeni materijal		Sitni agregat
Maksimalni postotni udio reciklirane gume (% volumena sitnog agregata)		do 15
Veličina zrna gume (mm)		$\leq 3,5$
Prethodni tretman gume		Nije potreban
Maksimalno zrno agregata D_{max} (mm)		16
Količina cementa (kg)		≤ 450
Mineralni dodatci	SLF (% m_c)	≤ 5
Kemijski dodatci	SP (% m_c)	$\leq 1,25$
	VMA (% m_c)	$\leq 0,25$
Svojstva samozbijajućeg betona s recikliranom gumom u očvrslulom stanju		
Tlačna čvrstoća (HRN EN 206:2021)		
Toplinska vodljivost (W/mK) (HRN EN 12667:2002, HRN ISO 8302:1998)	1,01 - 1,31	
Armiranobetonski konstrukcijski elementi (grede)		
Nosivost	jednakovrijedna kao i mješavine bez reciklirane gume (razlika unutar 10 %)	
Duktilnost	zadovoljavajuća (du/dy > 3)	
Mogućnost korištenja analitičkih izraza danih u normi HRN EN 1992-1-1:2013	potrebno koristiti koeficijent korekcije ($\delta = 1.63 - 1.66$)	
Uvjeti ugradnje		
Temperatura betona pri ugradnji (°C)	5 do 30	
Namjena betona	Za ugradnju s armaturom ili bez nje	

8.1 Izvorni znanstveni doprinos

Predstavljeni zaključci rezultat su proučavanja postojeće literature, eksperimentalnog istraživanja i statističke obrade dobivenih rezultata koji su rezultirali sljedećim znanstvenim doprinosima:

- Utvrđen je utjecaj reciklirane gume kao zamjene dijela sitnog agregata na mehanička i termička svojstva, parametre mehanike loma i mikrostrukturu samozbijajućeg betona.
- Ocijenjena su mehanička svojstva i svojstva trajnosti nosivih armiranobetonskih greda od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom i silicijskom prašinom.
- Izrađene su smjernice s identificiranim ključnim parametrima i opisanom metodologijom izrade konstrukcijskih elemenata od samozbijajućeg betona s recikliranom gumom.

8.2 Smjernice za daljnja istraživanja

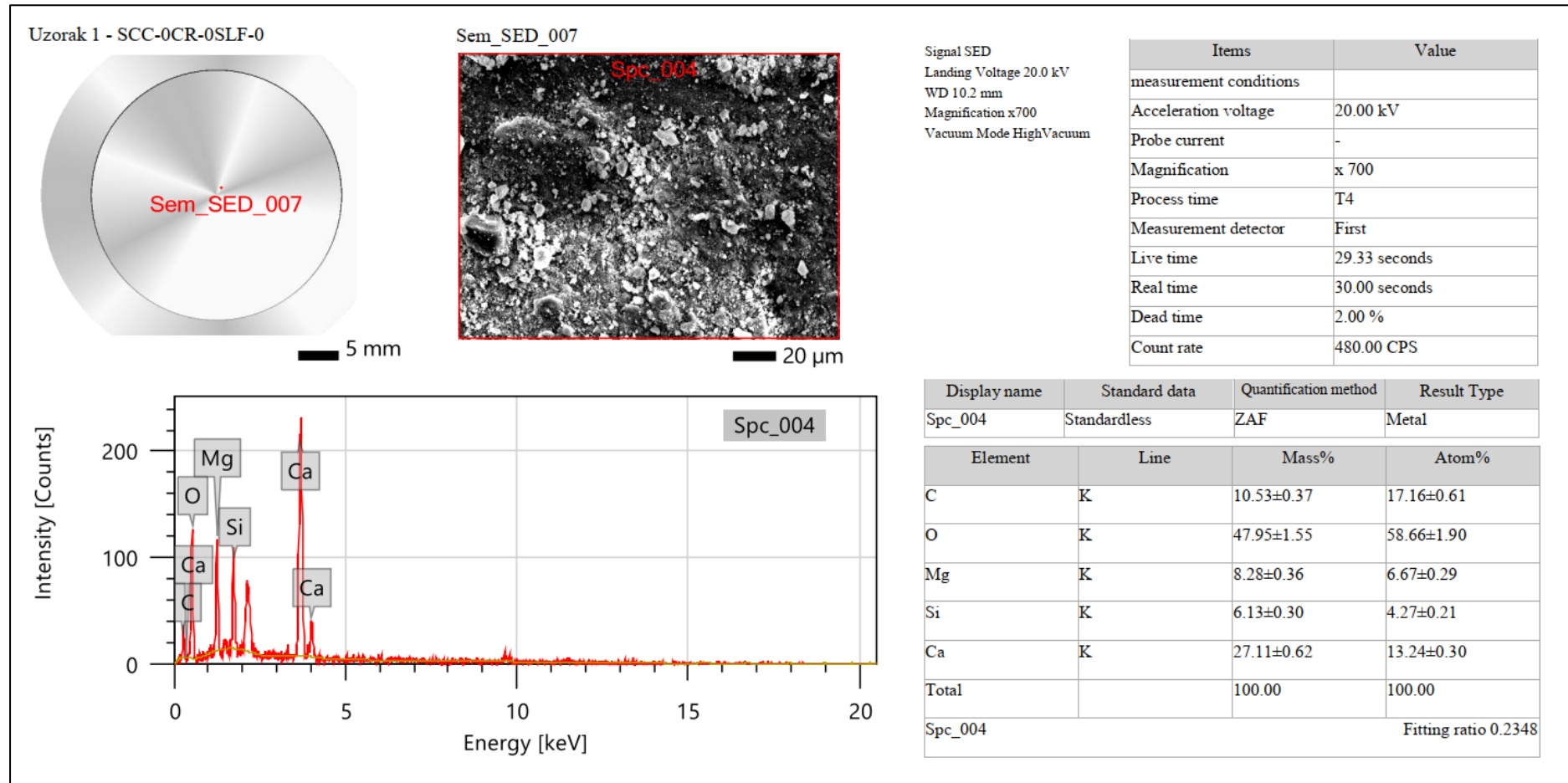
Provedena su istraživanja doprinijela boljem razumijevanju utjecaja reciklirane gume na svojstava samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju, kako na razini materijala, tako i na razini konstrukcijskog elementa, tj. greda. Ipak, moguće je postaviti dodatne smjernice za nastavak istraživanja samozbijajućeg betona s recikliranom gumom. Budući da je eksperimentalnim ispitivanjem utvrđen pozitivan utjecaj reciklirane gume na poboljšanje pukotinskog stanja AB greda u vidu smanjenja širine pukotina, što posljedično dovodi do potencijalnog očuvanja zaštitnog sloja betona, predlaže se dodatno detaljno eksperimentalno ispitivanje utjecaja reciklirane gume na granično stanje uporabljivosti armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata, npr. stupova i okvira potencijalno otpornih na potresna djelovanja u vidu praćenja razvoja pukotina pri svakom koraku opterećenja, s povećanjem vremenskog trajanja svakog pojedinog ciklusa opterećenja, kako bi se ustanovio i moment pojave maksimalno dozvoljene širine pukotine od 0,3 mm definirane u važećim normama za projektiranje betonskih konstrukcija. Predlaže se i provođenje dodatnih ispitivanja AB greda s recikliranom gumom pod dugotrajnim opterećenjem kako bi se ocijenio utjecaj reciklirane gume na puzanje betona te kako bi se ocijenila mogućnost primjene izraza iz EC2 za proračun progiba koji uključuju i puzanje betona. Budući da samozbijajući beton s recikliranom gumom predstavlja obećavajući održivi konstrukcijski materijal, predlaže se i provođenje ispitivanja utjecaja dinamičkih opterećenja poput eksplozije i potresa, koja su također nedovoljno ispitana te ih je prije korištenja ovakvog materijala u praksi nužno ispitati.

PRILOZI

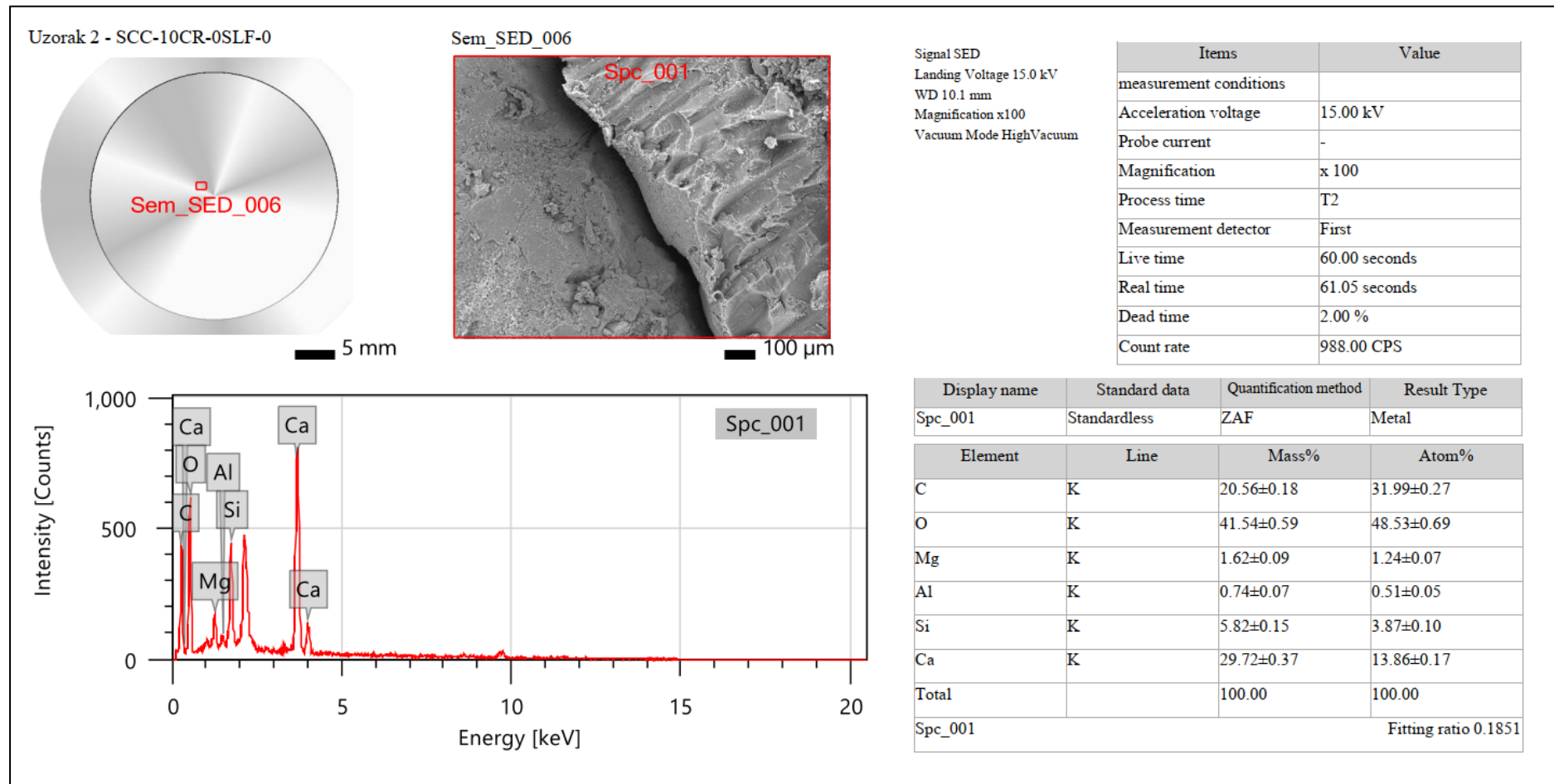
POPIS PRILOGA

- Prilog 1 Rezultati EDS analize uzorka 1 (SCC-0CR-0SLF-0)
- Prilog 2 Rezultati EDS analize uzorka 2 (SCC-10CR-0SLF-0)
- Prilog 3 Rezultati EDS analize uzorka 3 (SCC-15CR-5SLF-0)
- Prilog 4 Rezultati EDS analize uzorka 4 (SCC-0CR-0SLF-200)
- Prilog 5 Rezultati EDS analize uzorka 5 (SCC-10CR-0SLF-200)
- Prilog 6 Rezultati EDS analize uzorka 6 (SCC-15CR-5SLF-200)
- Prilog 7 Rezultati EDS analize uzorka 7 (SCC-0CR-0SLF-400)
- Prilog 8 Rezultati EDS analize uzorka 8 (SCC-10CR-0SLF-400)
- Prilog 9 Rezultati EDS analize uzorka 9 (SCC-15CR-5SLF-400)
- Prilog 10 Rezultati EDS analize uzorka 10 (SCC-0CR-0SLF-600)
- Prilog 11 Rezultati EDS analize uzorka 11 (SCC-10CR-0SLF-600)
- Prilog 12 Rezultati EDS analize uzorka 12 (SCC-15CR-5SLF-600)
- Prilog 13 Rezultati EDS analize uzorka 13 (SCC-0CR-0SLF-800)
- Prilog 14 Rezultati EDS analize uzorka 14 (SCC-10CR-0SLF-800)
- Prilog 15 Rezultati EDS analize uzorka 15 (SCC-15CR-5SLF-800)
- Prilog 16 Rezultati EDS analize uzorka 16 (SCC-0CR-0SLF-G)
- Prilog 17 Rezultati EDS analize uzorka 17 (SCC-10CR-0SLF-G)
- Prilog 18 Rezultati EDS analize uzorka 18 (SCC-15CR-5SLF-G)

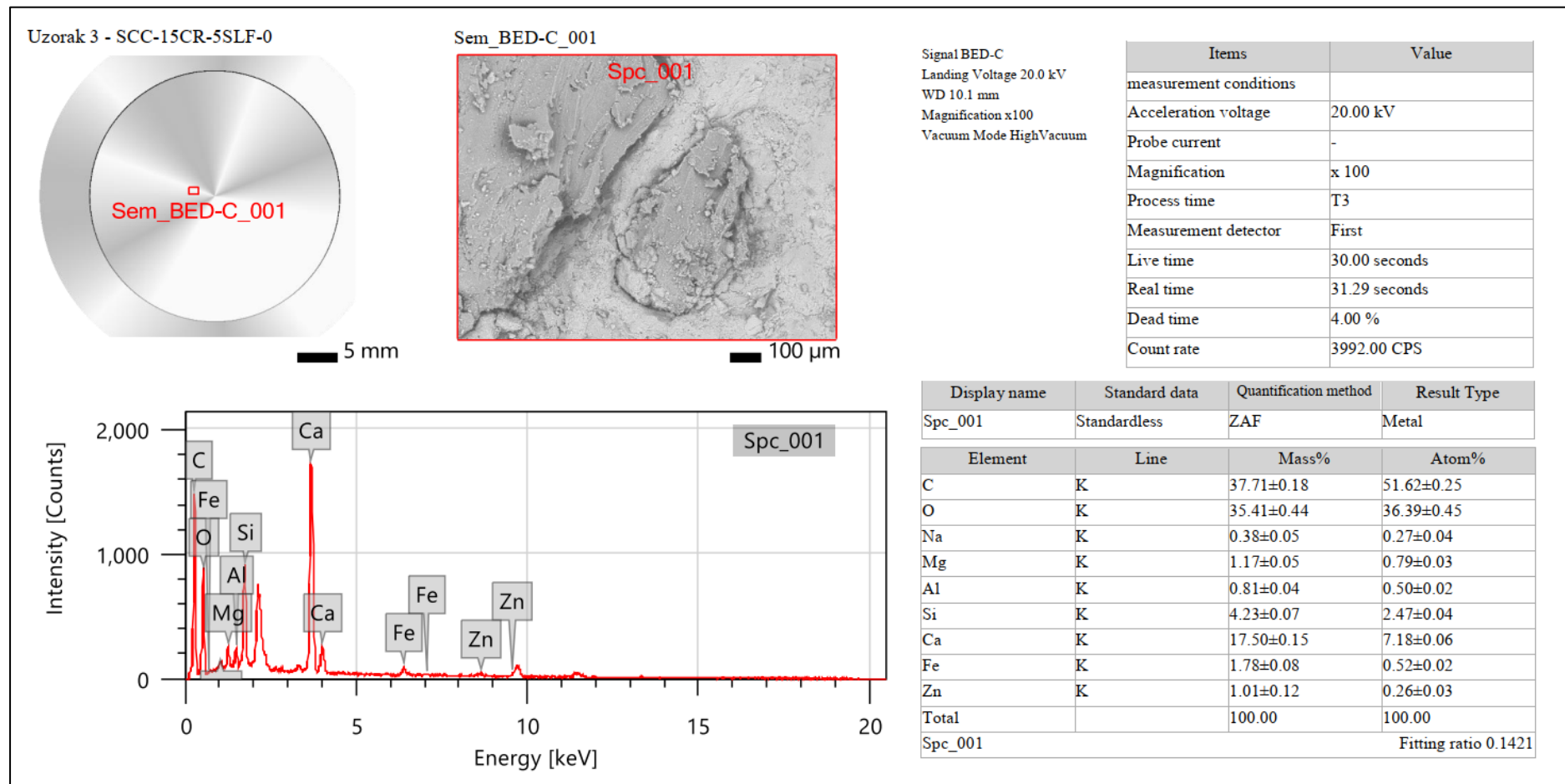
Prilog 1 Rezultati EDS analize uzorka 1 (SCC-0CR-0SLF-0)



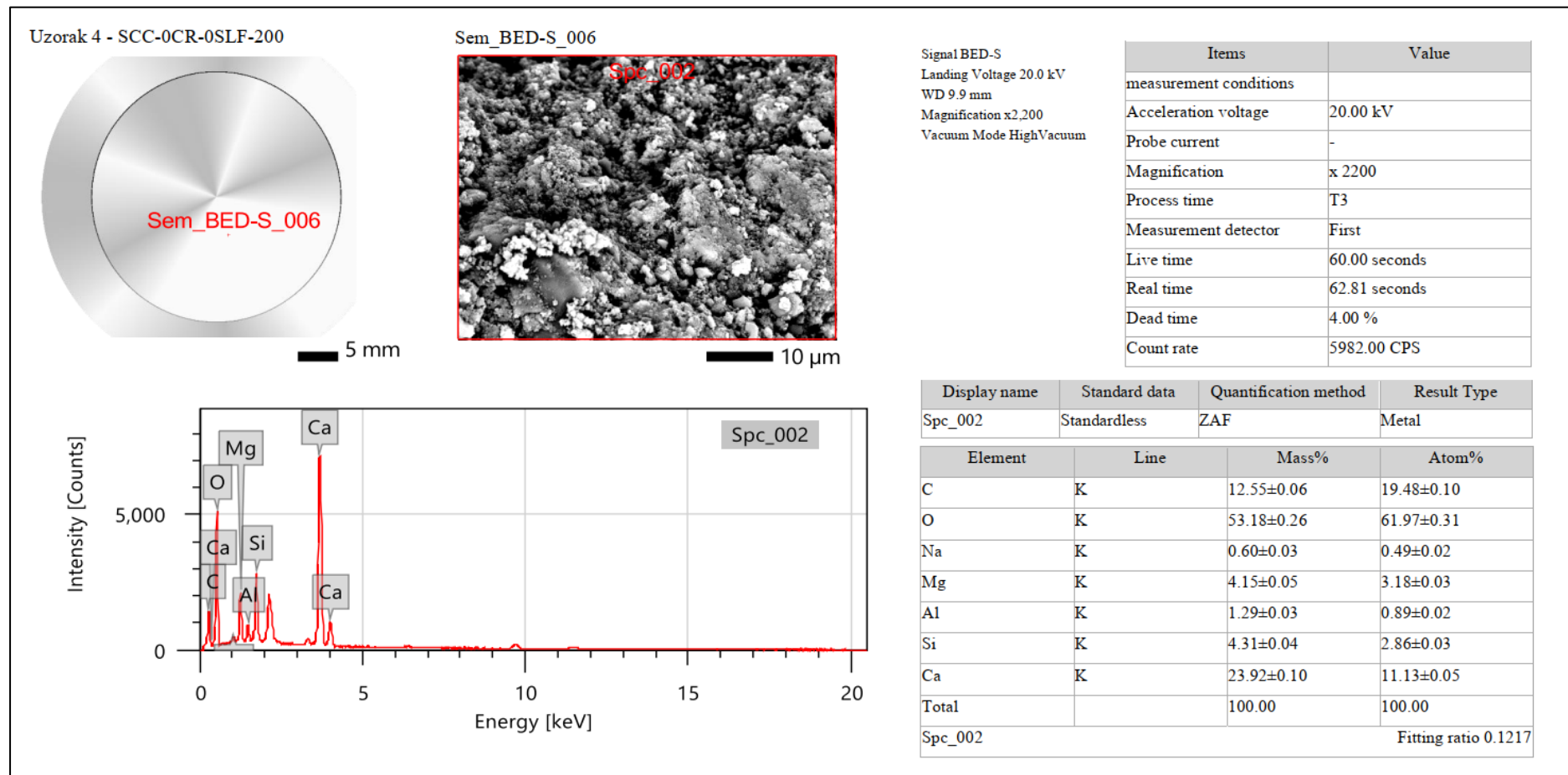
Prilog 2 Rezultati EDS analize uzorka 2 (SCC-10CR-0SLF-0)



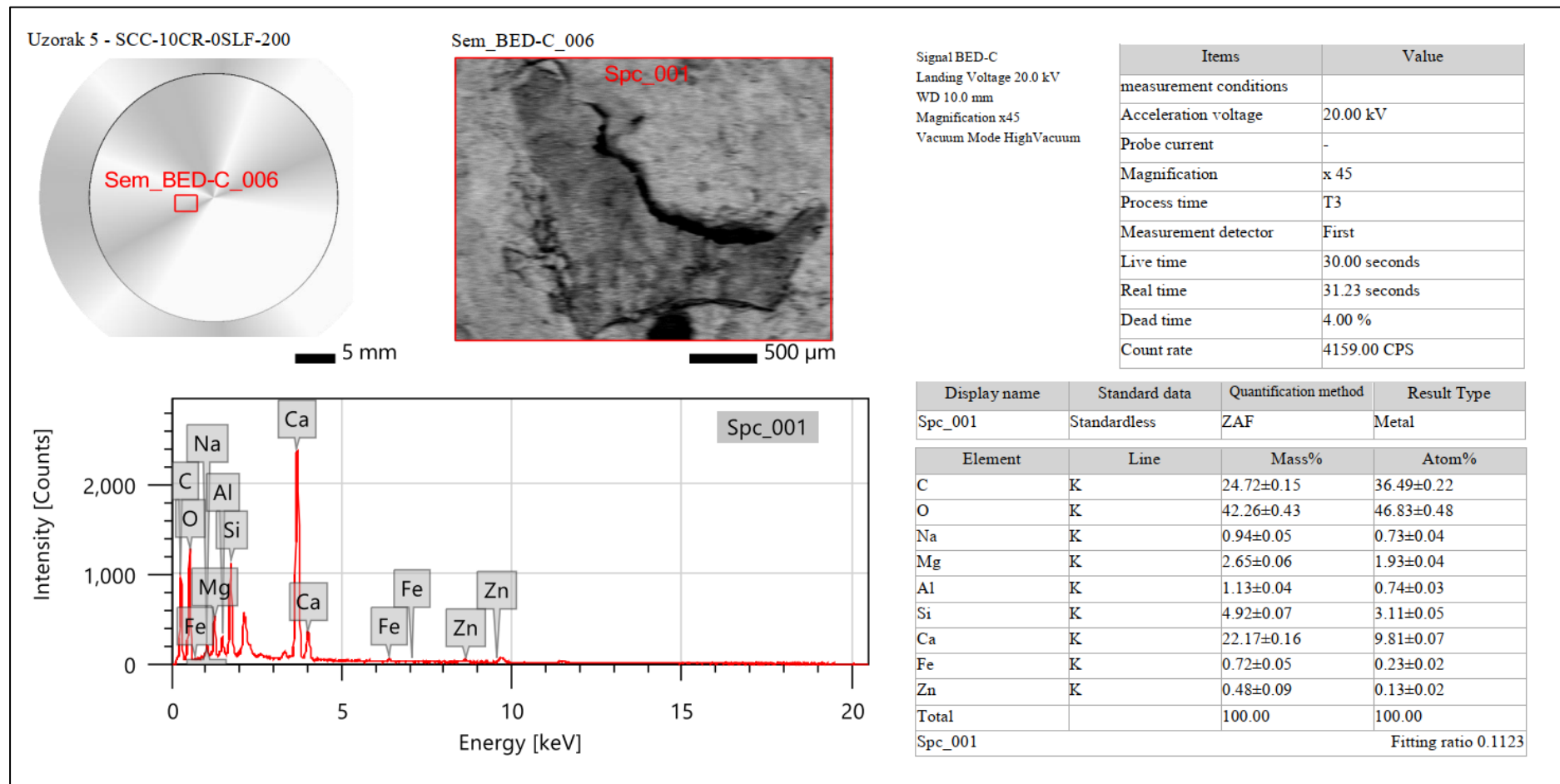
Prilog 3 Rezultati EDS analize uzorka 3 (SCC-15CR-5SLF-0)



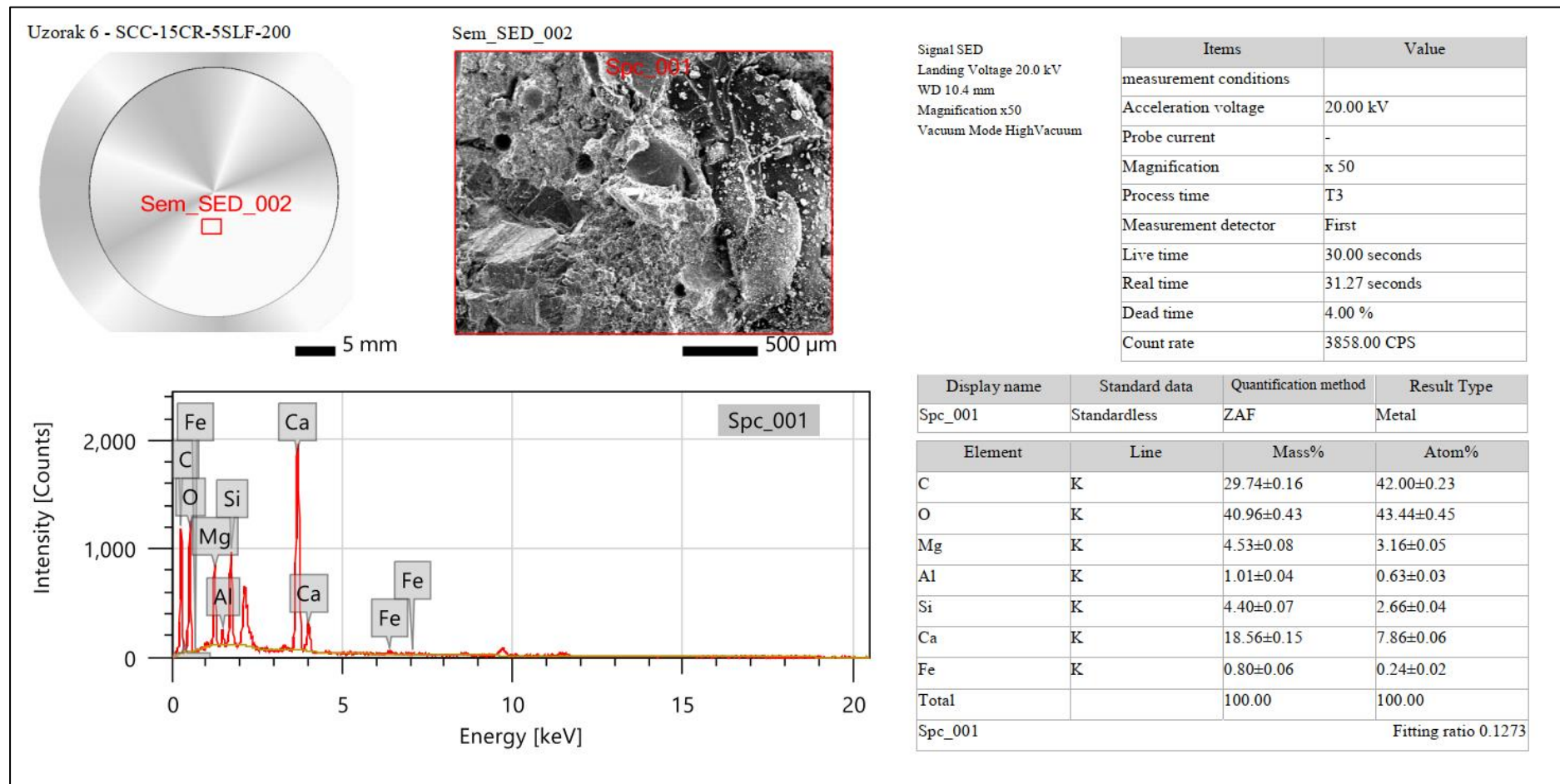
Prilog 4 Rezultati EDS analize uzorka 4 (SCC-0CR-0SLF-200)



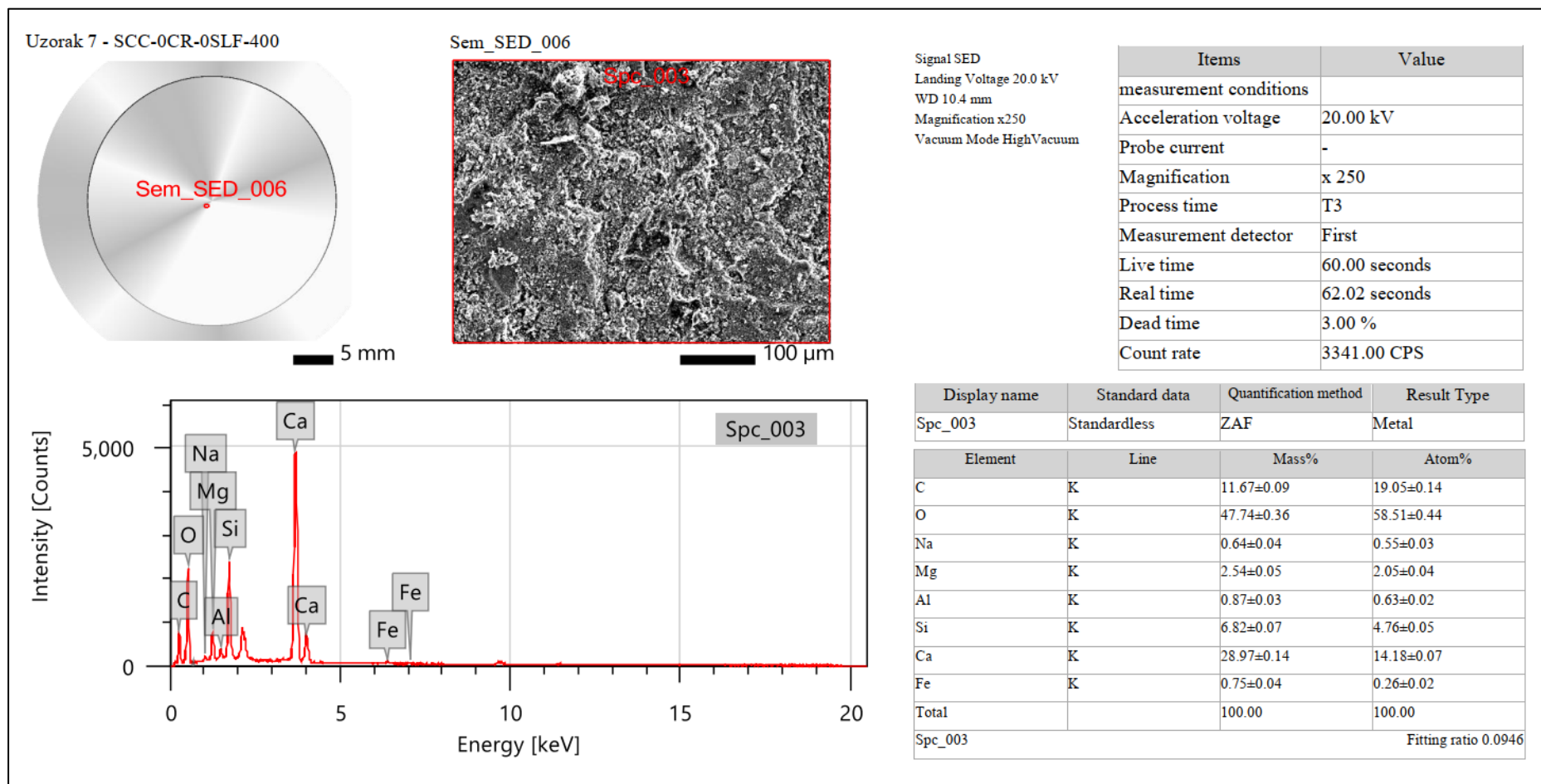
Prilog 5 Rezultati EDS analize uzorka 5 (SCC-10CR-0SLF-200)



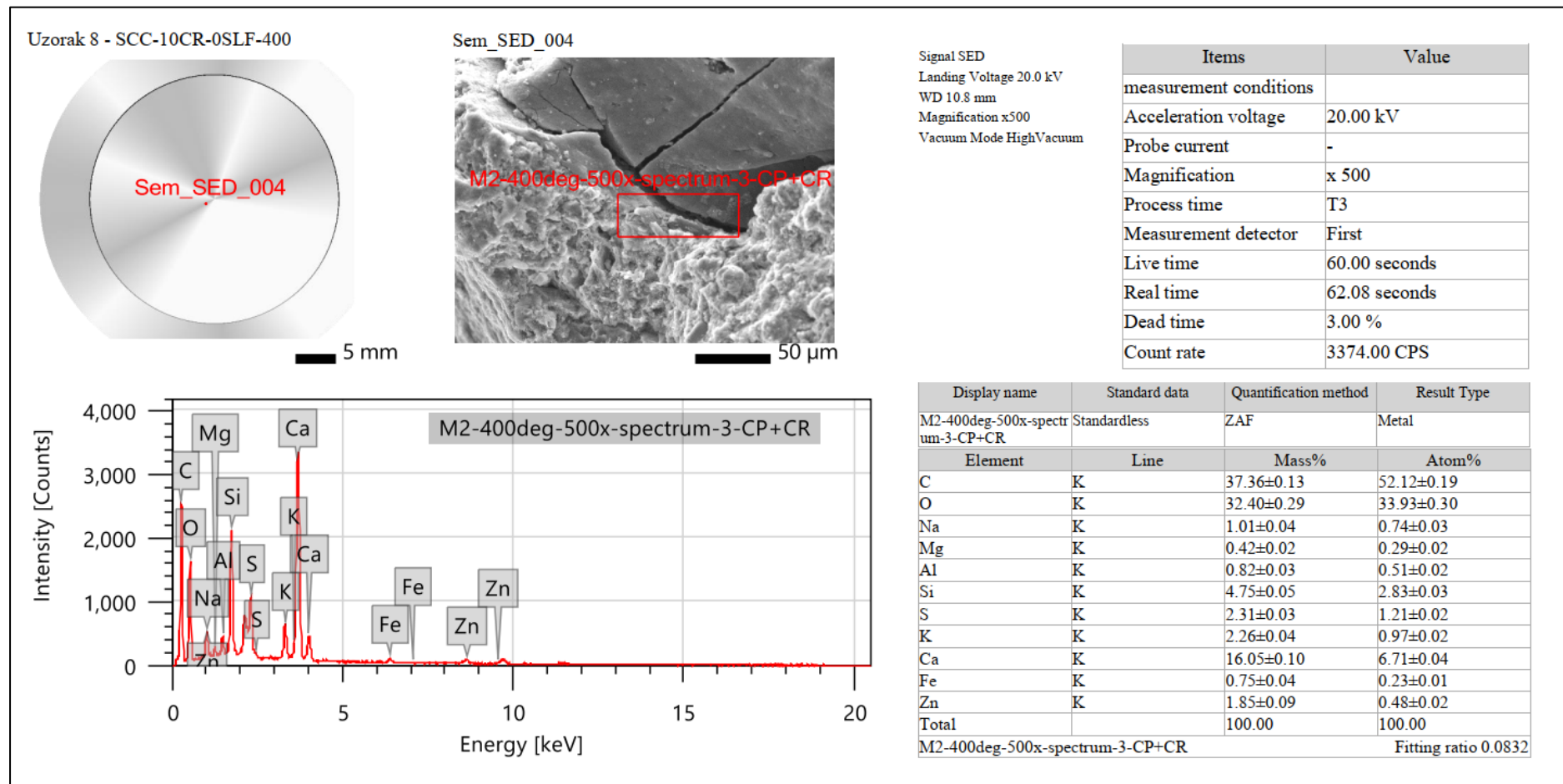
Prilog 6 Rezultati EDS analize uzorka 6 (SCC-15CR-5SLF-200)



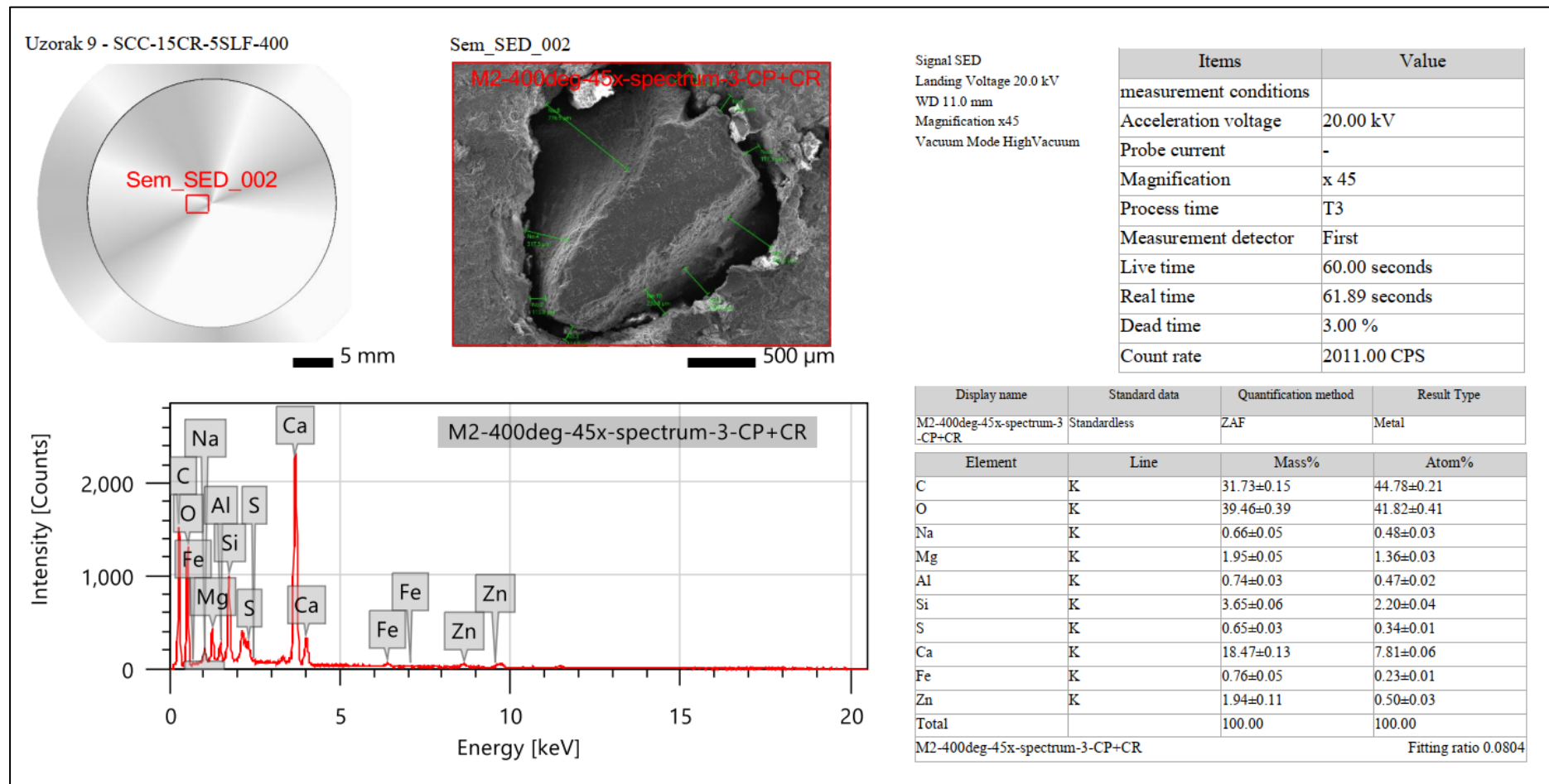
Prilog 7 Rezultati EDS analize uzorka 7 (SCC-0CR-0SLF-400)



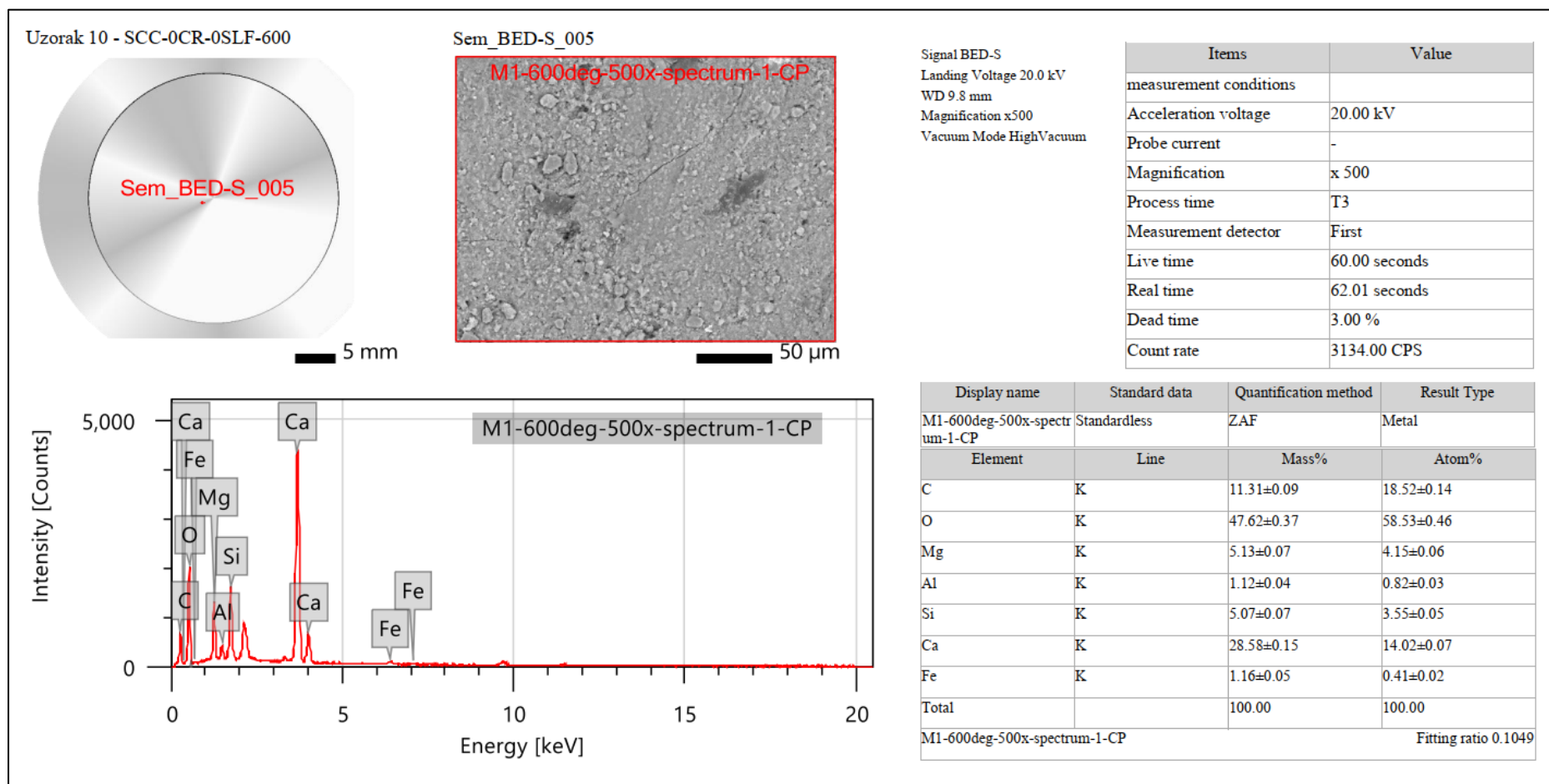
Prilog 8 Rezultati EDS analize uzorka 8 (SCC-10CR-0SLF-400)



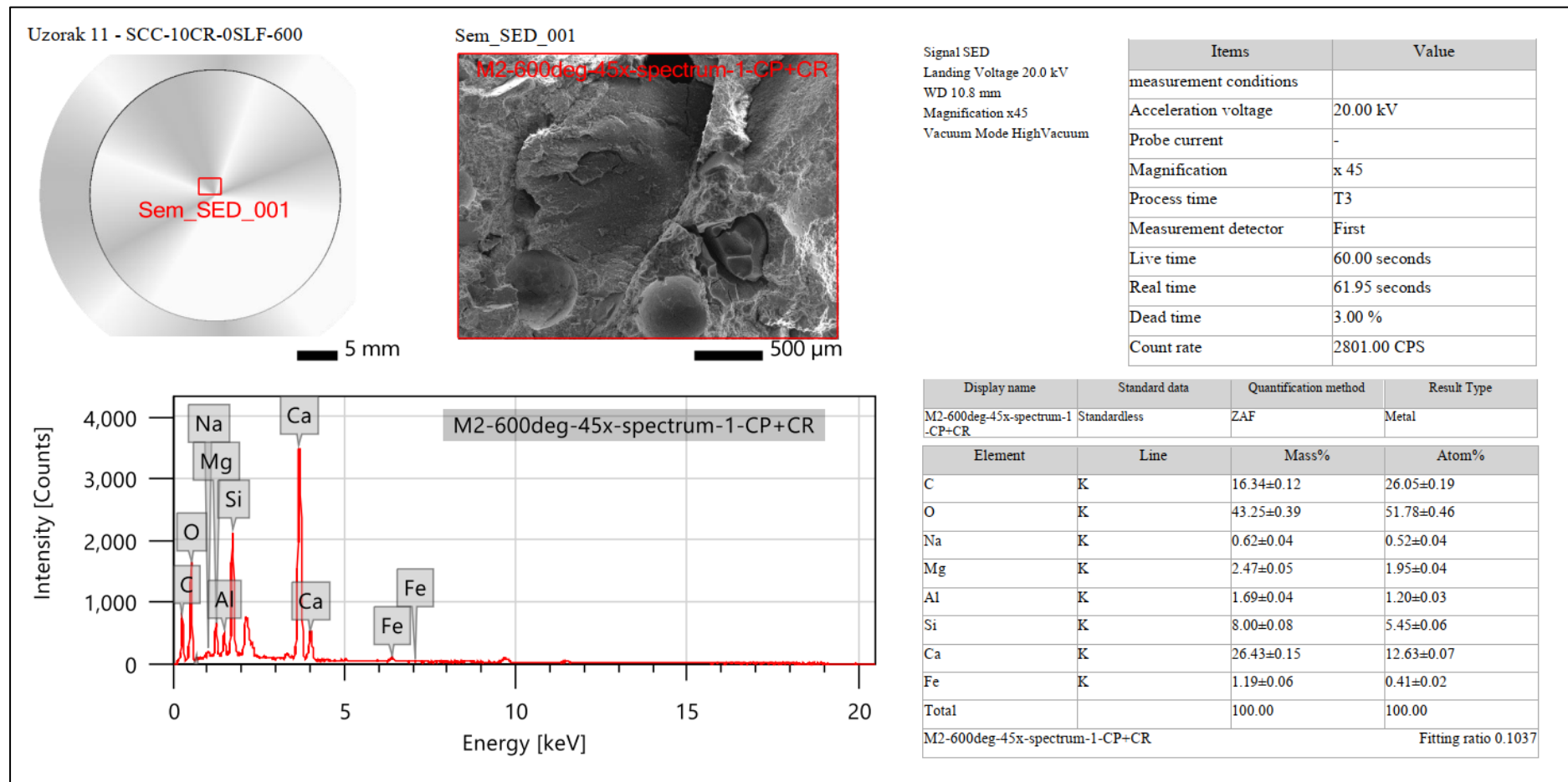
Prilog 9 Rezultati EDS analize uzorka 9 (SCC-15CR-5SLF-400)



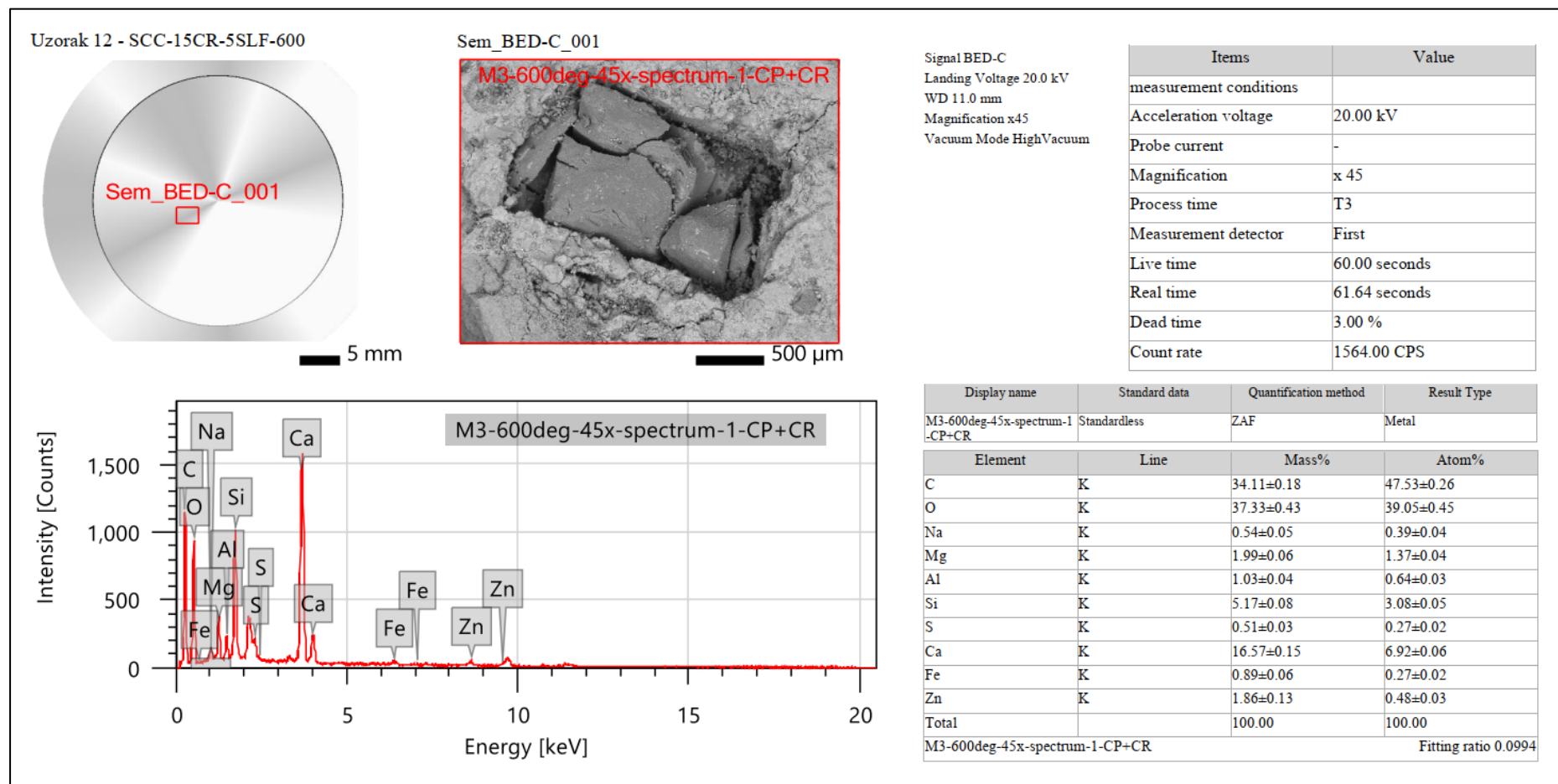
Prilog 10 Rezultati EDS analize uzorka 10 (SCC-0CR-0SLF-600)



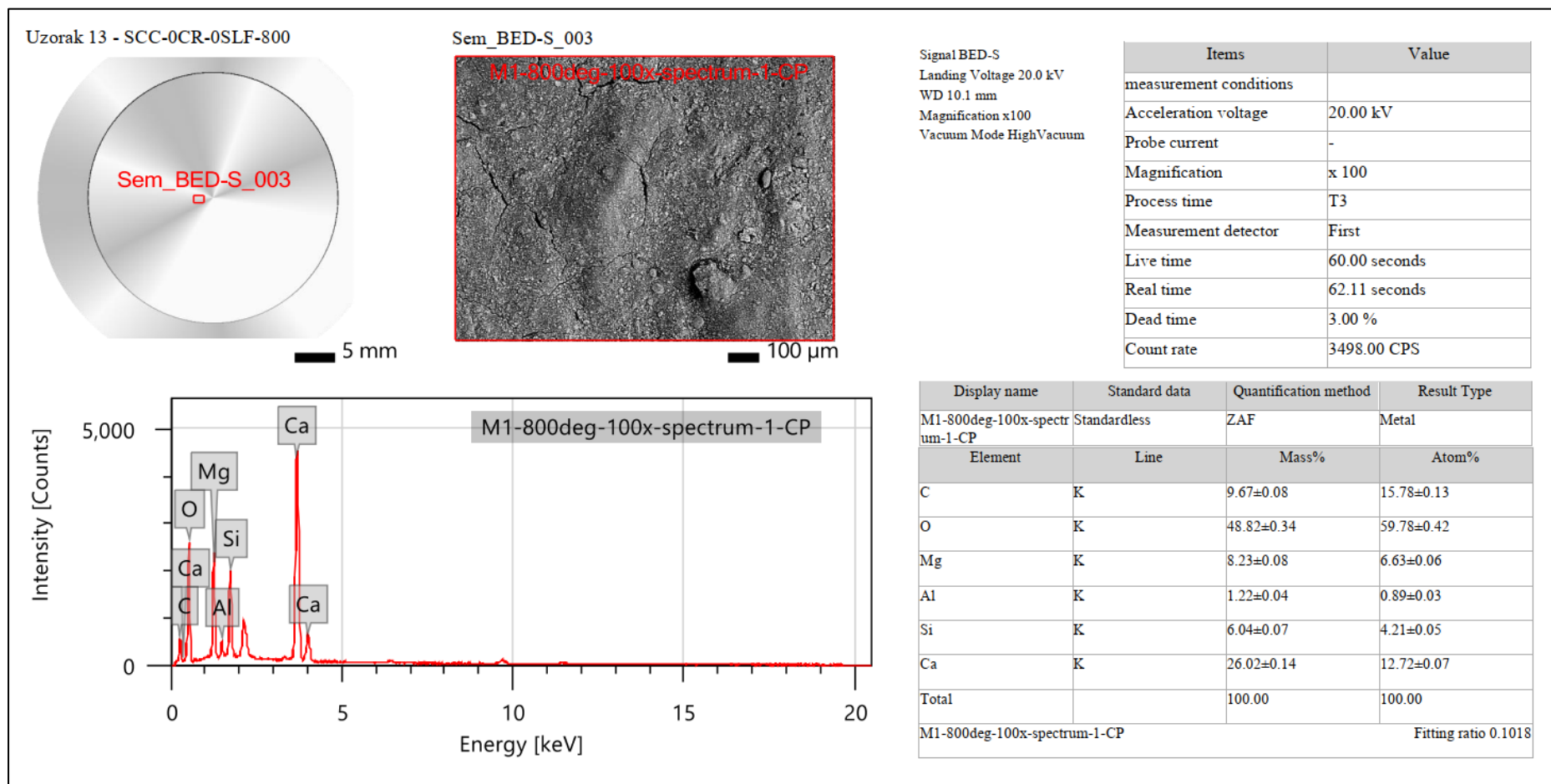
Prilog 11 Rezultati EDS analize uzorka 11 (SCC-10CR-0SLF-600)



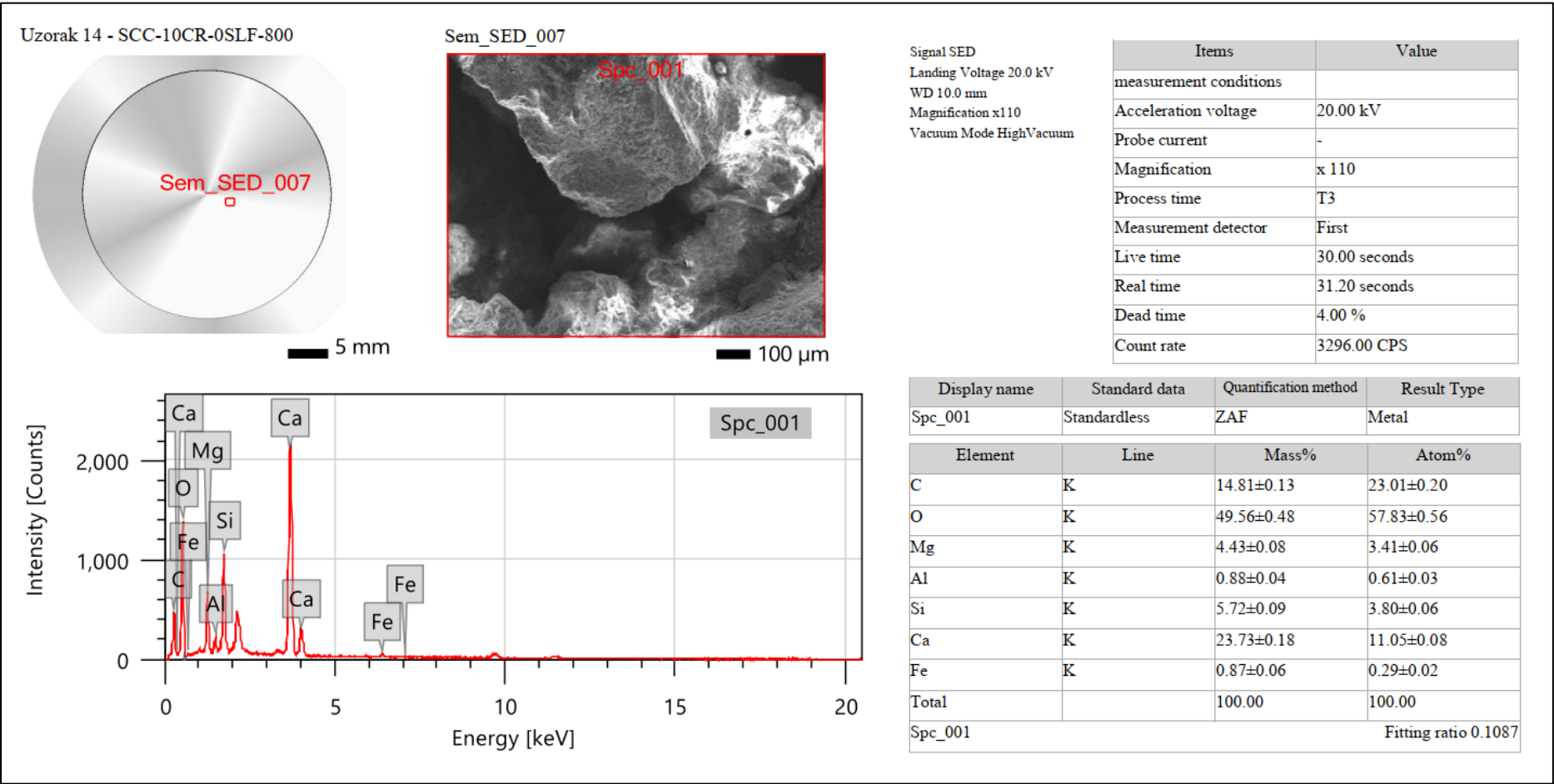
Prilog 12 Rezultati EDS analize uzorka 12 (SCC-15CR-5SLF-600)



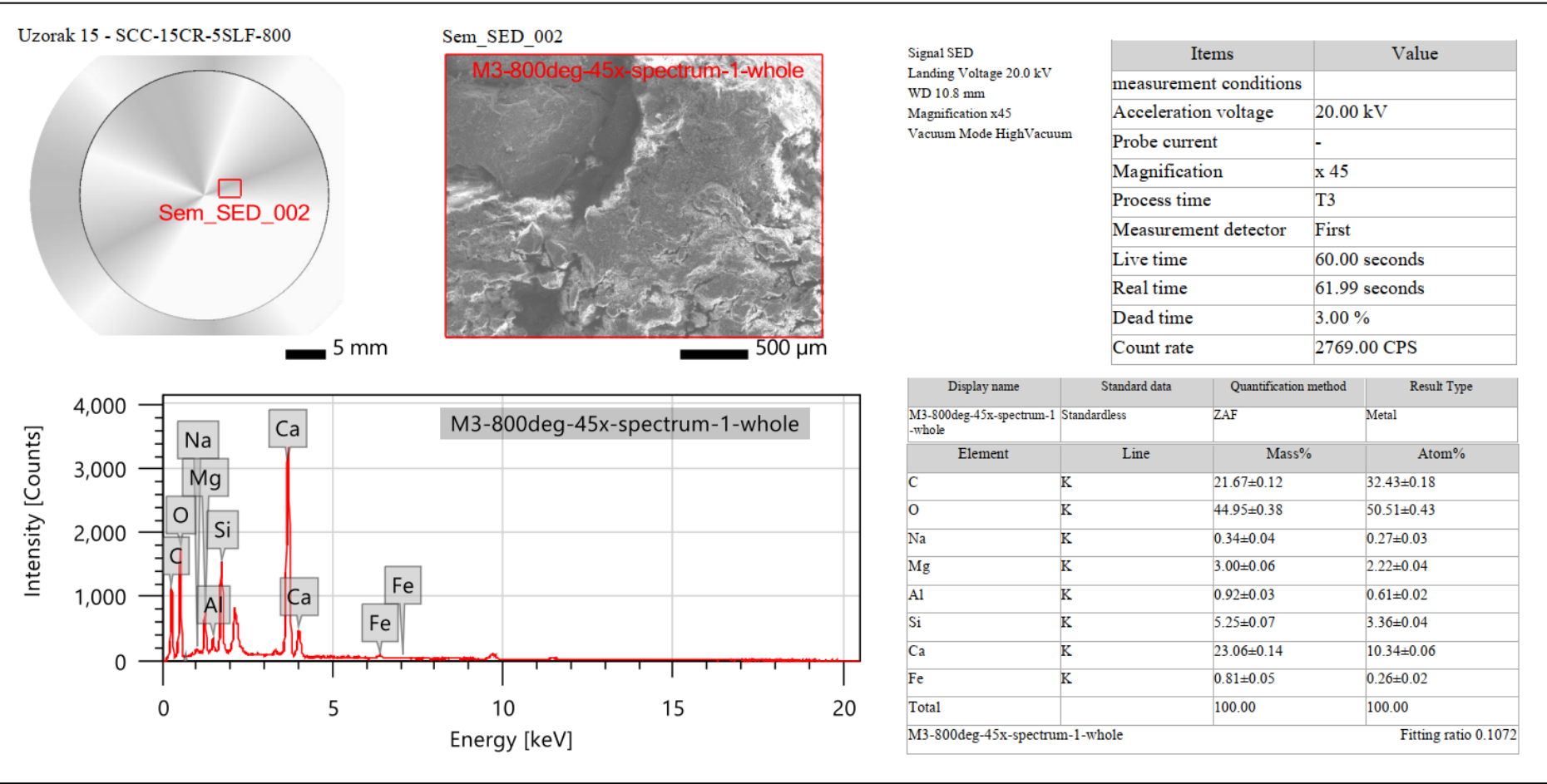
Prilog 13 Rezultati EDS analize uzorka 13 (SCC-0CR-0SLF-800)



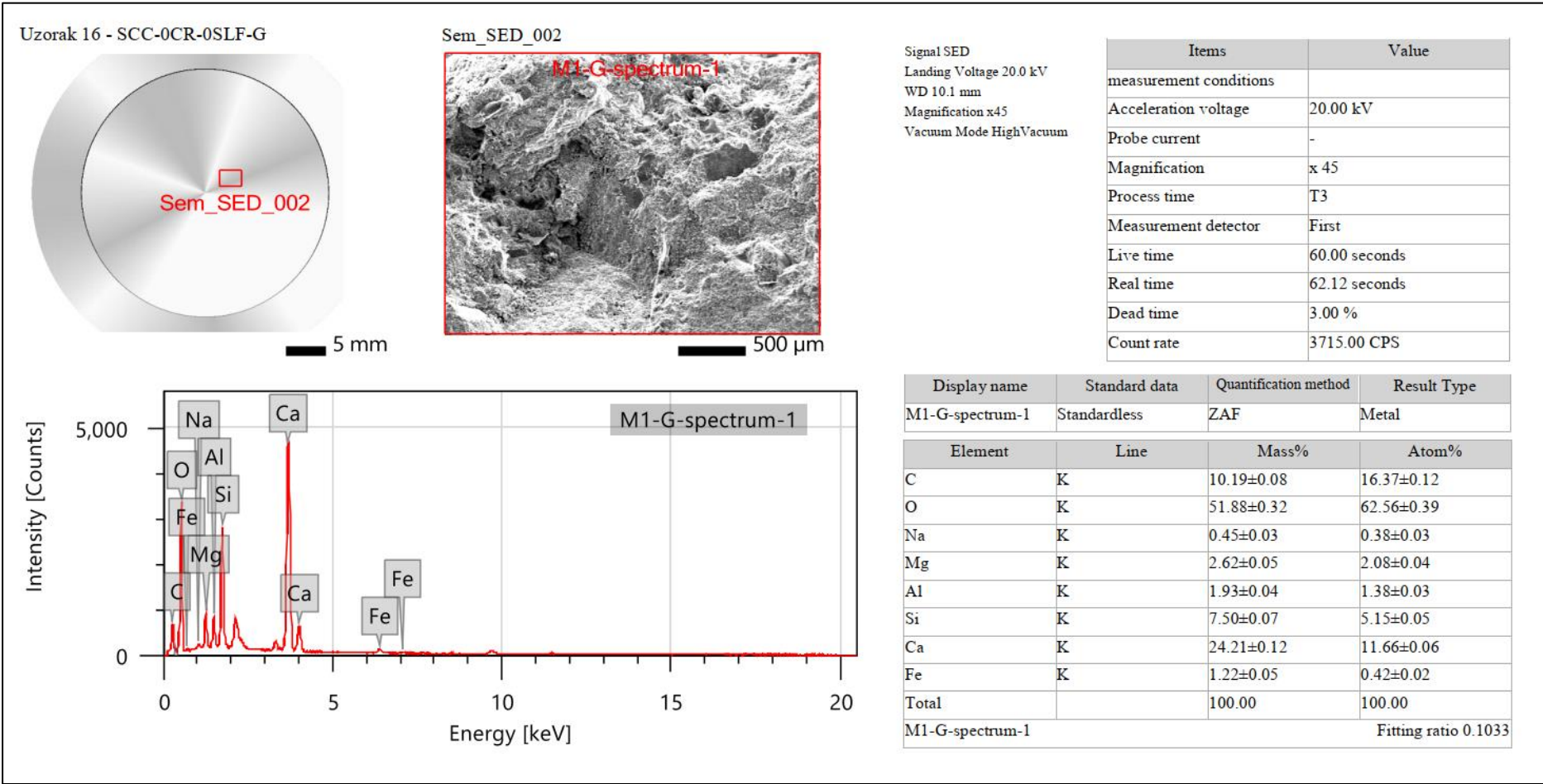
Prilog 14 Rezultati EDS analize uzorka 14 (SCC-10CR-OSLF-800)



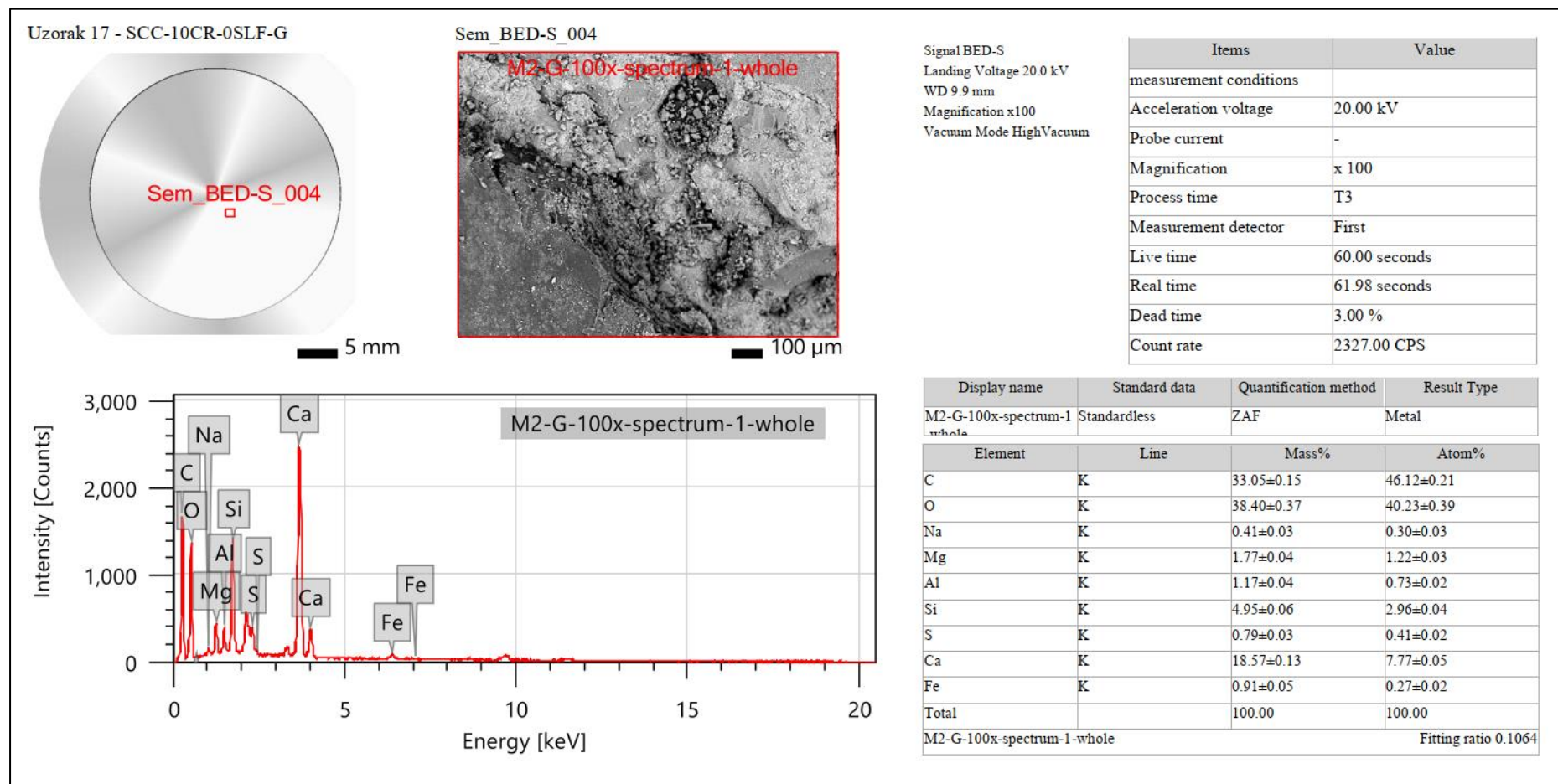
Prilog 15 Rezultati EDS analize uzorka 15 (SCC-15CR-5SLF-800)



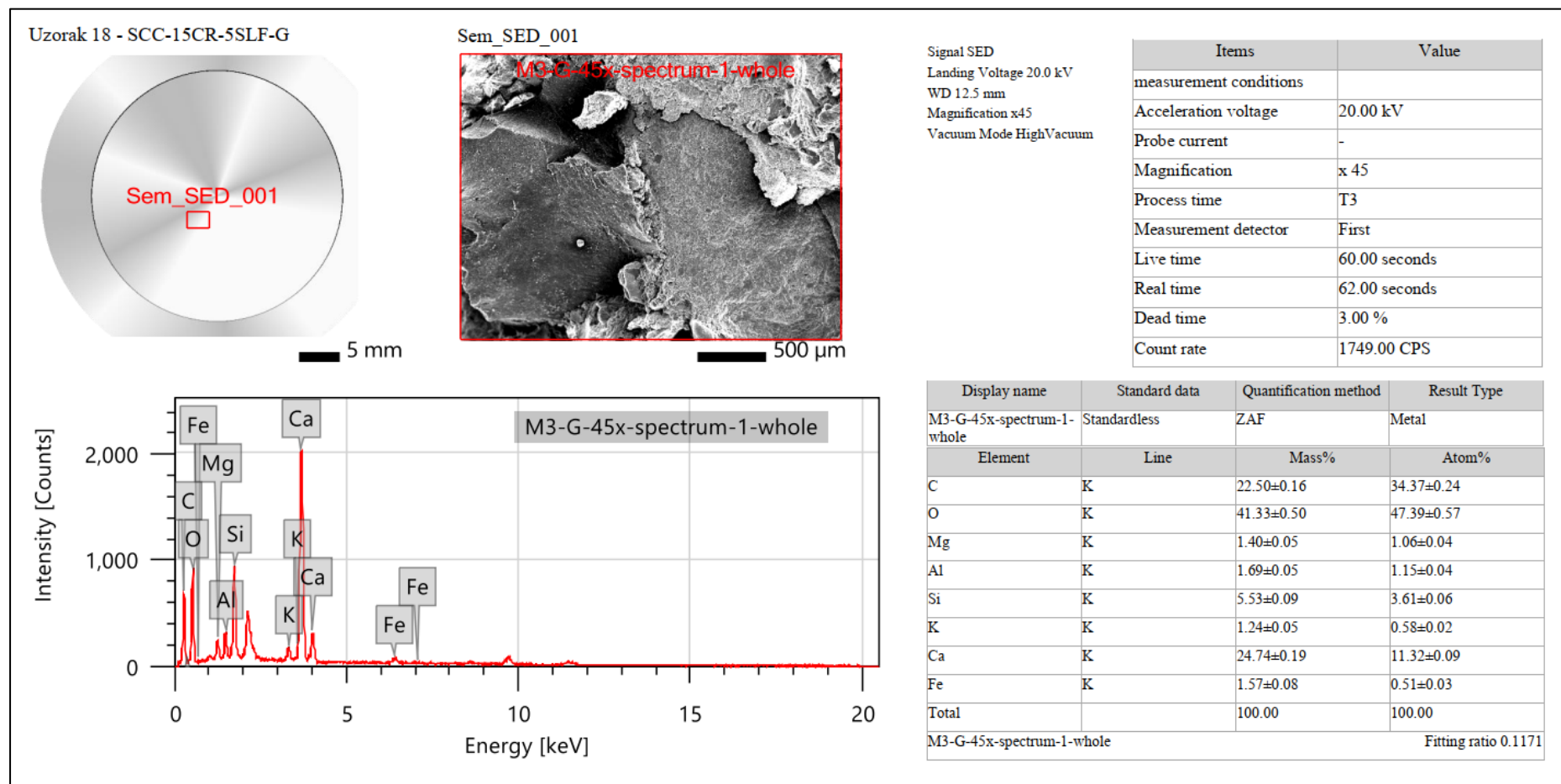
Prilog 16 Rezultati EDS analize uzorka 16 (SCC-0CR-0SLF-G)



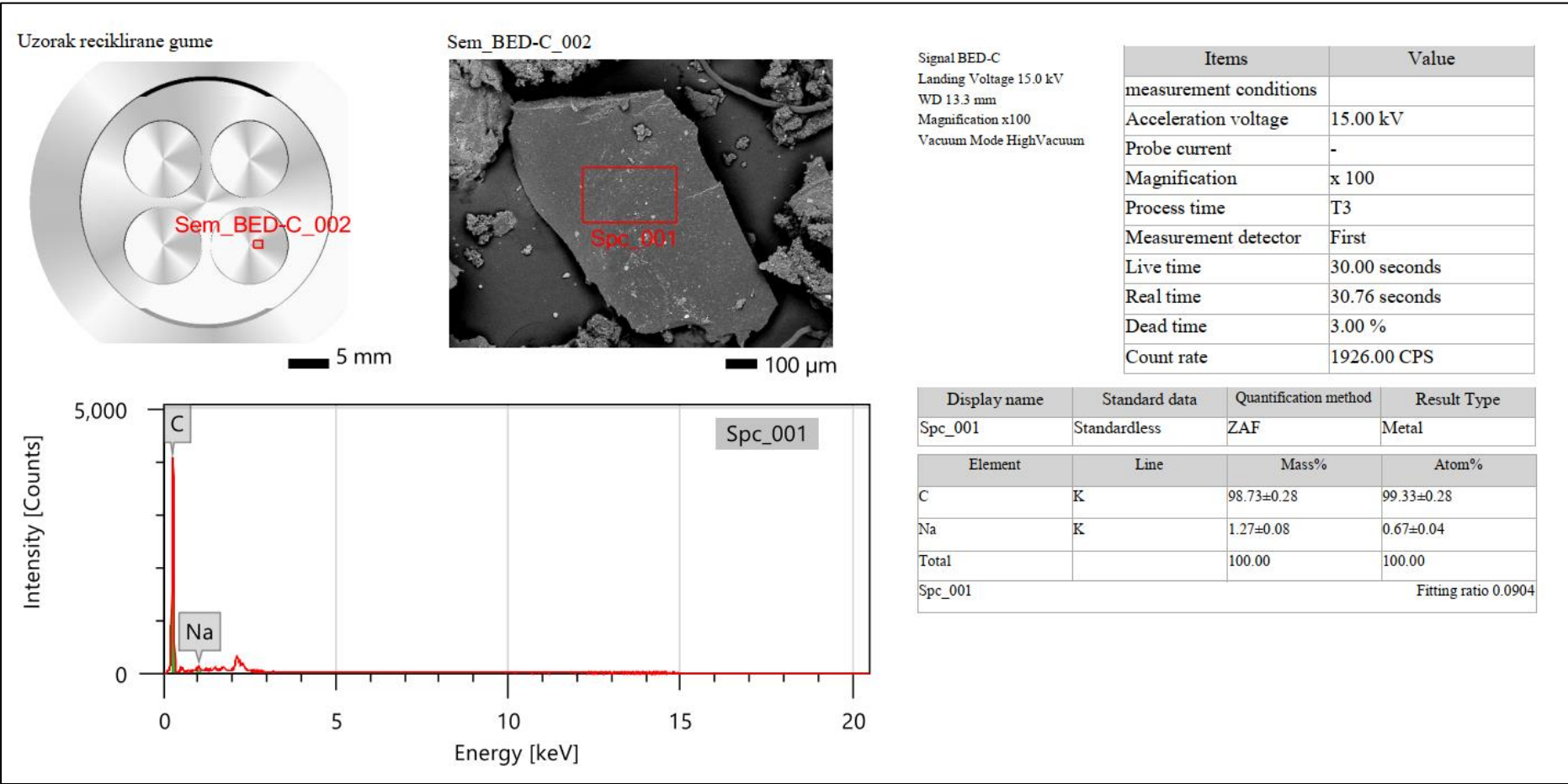
Prilog 17 Rezultati EDS analize uzorka 17 (SCC-10CR-0SLF-G)



Prilog 18 Rezultati EDS analize uzorka 18 (SCC-15CR-5SLF-G)



Prilog 19 Rezultati EDS analize uzorka reciklirane gume



BIBLIOGRAFIJA

- [1] EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, 2005.
- [2] R. Bušić, I. Miličević, T. Šipoš, K. Strukar, *Recycled Rubber as an Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete—Literature Overview*, Materials (Basel), vol. 11, no. 9, p. 1729, 2018.
- [3] M. M. Rahman, M. Usman, A. A. Al-Ghalib, *Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)*, Construction and Building Materials, vol. 36, pp. 630–637, 2012.
- [4] H. Liu, X. Wang, Y. Jiao, T. Sha, *Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete*, Materials (Basel), vol. 9, no. 3, pp. 1–12, 2016.
- [5] A. Richardson, K. Coventry, V. Edmondson, E. Dias, *Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size)*, Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 599–606, 2016.
- [6] N. M. Miller, F. M. Tehrani, *Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete*, Construction and Building Materials, vol. 147, pp. 264–271, 2017.
- [7] F. Aslani, G. Ma, D. L. Yim Wan, V. X. Tran Le, *Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*, Journal of Cleaner Production, vol. 172, pp. 1835–1847, 2018.
- [8] M. Emiroğlu, S. Yildiz, O. Keleştemur, M. H. Keleştemur, *Bond performance of rubber particles in the self-compacting concrete*, Bond in Concrete 2012 - Bond in New Materials and under Severe Conditions, Brescia, Italy pp. 779–786, 2012.
- [9] ETRMA, *End-of-life Tyre Report 2015*, 2015.
- [10] ERMCO, *Ready-mixed concrete industry statistics*, 2015.
- [11] A. E. Richardson, K. A. Coventry, G. Ward, *Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content*, Journal of Cleaner Production, vol. 23, no. 1, p. 96–103, 2012.
- [12] WBCSD & The Tire Industry Project, *Global ELT Management - A global state of knowledge on regulation, management systems, impacts of recovery and technologies*, 2019.
- [13] Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva, 2008.
- [14] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, *Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber*, Journal of Cleaner Production, vol. 125, pp. 282–295, 2016.
- [15] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, S. Ipek, *Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers*, Construction and Building Materials, vol. 63, pp. 206–213, 2014.
- [16] Zakon o gospodarenju otpadom (NN 84/21), 2021.
- [17] Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama (NN 113/16), 2016.

- [18] Republika Hrvatska, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike - Izvješće o otpadnim vozilima i otpadnim gumama u 2018. godini, 2018.
- [19] P. Purnell, A. Dunster, *Recycling of concrete*, Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, Elsevier, pp. 569–591, 2010.
- [20] GUMIIMPEX-GRP, *Elaborat gospodarenja otpadom*, 2014.
- [21] K. B. Najim, M. R. Hall, *A review of the fresh/hardened properties and applications for plain-(PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC)*, Construction and Building Materials, vol. 24, no. 11, pp. 2043–2051, 2010.
- [22] N. Štirmer, I. Banjad Pečur, *Projektiranje sastava samozbijajućeg betona*, Građevinar, vol. 61, pp. 321–329, 2009.
- [23] F. Aslani, G. Ma, D. L. Yim Wan, G. Muselin, *Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules*, Journal of Cleaner Production, vol. 182, pp. 553–566, 2018.
- [24] K. H. Khayat, *Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete*, ACI Materials Journal, vol. 96, no. 3, pp. 346–353, 1999.
- [25] H. Okamura, M. Ouchi, *Self-Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [26] P. Simonsson, J. Larsson, *Advantages of Industrialized Methods Used in Small Bridge Construction*, Proceedings IGLC-18, Technion, Haifa, Israel, pp. 569–579, 2010.
- [27] D. Bjegović, N. Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [28] J. S. Malherbe, *Self-compacting concrete versus normal compacting concrete: A techno-economic analysis*, Stellenbosch University, diplomski rad, 2015.
- [29] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, L. Wu, *A review on mixture design methods for self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, vol. 84, pp. 387–398, 2015.
- [30] HRN EN 12350-8, Ispitivanje svježega betona -- 8. dio: Samozbijajući beton -- Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem (EN 12350-8:2019)
- [31] HRN EN 12350-9, Ispitivanje svježega betona -- 9. dio: Samozbijajući beton -- Ispitivanje V-lijevkom (EN 12350-9:2010)
- [32] HRN EN 12350-10, Ispitivanje svježega betona -- 10. dio: Samozbijajući beton -- Ispitivanje L-posudom (EN 12350-10:2010)
- [33] HRN EN 12350-11, Ispitivanje svježega betona -- 11. dio: Samozbijajući beton -- Ispitivanje segregacije sijanjem (EN 12350-11:2010)
- [34] HRN EN 12350-12, Ispitivanje svježega betona -- 12. dio: Samozbijajući beton -- Ispitivanje J-prstenom (EN 12350-12:2010)
- [35] F.W. Wellmer, J. Becker-Platen, *Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review*, International Journal of Earth Sciences, vol. 91, no. 5, pp. 723–745,

- 2002.
- [36] R. Bleischwitz, B. Bahn-Walkowiak, *Aggregates and Construction Markets in Europe: Towards a Sectoral Action Plan on Sustainable Resource Management*, Minerals & Energy - Raw Materials Report, vol. 22, no. 3–4, pp. 159–176, 2007.
- [37] EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, 2002.
- [38] E. Khalil, M. Abd-Elmohsen, A. M. Anwar, *Impact Resistance of Rubberized Self-Compacting Concrete*, Water Science, vol. 29, no. 1, pp. 45–53, 2015.
- [39] S. Zaoiai, A. Makani, A. Taфраoui, F. Benmerioul, *Optimization and mechanical characterization of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates*, Asian Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 6, pp. 817–829, 2016.
- [40] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, *Impact Resistance and Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete Reinforced with Steel Fibers*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, no. 1, pp. 1-14, 2016.
- [41] A. Bideci, H. Öztürk, Ö. S. Bideci, M. Emiroğlu, *Fracture energy and mechanical characteristics of self-compacting concretes including waste bladder tyre*, Construction and Building Materials, vol. 149, pp. 669–678, 2017.
- [42] E. Güneyisi, *Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash*, Materials and Structures, vol. 43, no. 8, pp. 1037–1048, 2010.
- [43] B. H. AbdelAleem, A. A. A. Hassan, *Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume*, Construction and Building Materials, vol. 161, pp. 389–397, 2018.
- [44] B. H. AbdelAleem, M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, *The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete*, Construction and Building Materials, vol. 162, pp. 816–829, 2018.
- [45] A. Turatsinze, M. Garros, *On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates*, Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, no. 10, pp. 1209–1215, 2008.
- [46] T. Uygunoğlu, I. B. Topçu, *The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars*, Construction and Building Materials, vol. 24, no. 7, pp. 1141–1150, 2010.
- [47] M. C. Bignozzi, F. Sandrolini, *Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 36, no. 4, pp. 735–739, 2006.
- [48] M. Mishra, K. C. Panda, *An Experimental Study on Fresh and Hardened Properties of Self Compacting Rubberized Concrete*, Indian Journal of Science and Technology, vol. 8, no. 29, 2015.
- [49] R. Si, J. Wang, S. Guo, Q. Dai, S. Han, *Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber*, Journal of Cleaner Production, vol. 180, pp. 823–831, 2018.

- [50] I. B. Topçu, T. Bilir, *Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete*, Materials and Design, vol. 30, no. 8, pp. 3056–3065, 2009.
- [51] N. Ganesan, J. Bharati Raj, A. P. Shashikala, *Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete*, Construction and Building Materials, vol. 44, pp. 7–14, 2013.
- [52] K. B. Najim, M. R. Hall, *Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC)*, Materials and Structures, vol. 46, no. 12, pp. 2029–2043, 2013.
- [53] E. Güneyisi, M. Gesoglu, N. Naji, S. Ipek, *Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 9–19, 2016.
- [54] M. Jedidi, A. Gargouri, A. Daoud, *Effect of Rubber Aggregates on the Thermophysical Properties of Self-Consolidating Concrete*, International Journal of Thermal & Environmental Engineering, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [55] G. Nagesh Kumar, V. Sandeep, Ch. Sudharani, *Using Tyres Wastes As Aggregates in Concrete To Form Rubcrete – Mix for Engineering Applications*, International Journal of Research in Engineering and Technology, vol. 03, no. 11, pp. 2319–1163, 2014.
- [56] L. Zheng, X. S. Huo, Y. Yuan, *Strength, Modulus of Elasticity, and Brittleness Index of Rubberized Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20, no. 11, pp. 692–699, 2008.
- [57] K. A. Paine R. K. Dhir, *Research on new applications for granulated rubber in concrete*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, vol. 163, no. 1, pp. 7–17, 2010.
- [58] D. Pedro, J. de Brito, R. Veiga, *Mortars Made with Fine Granulate from Shredded Tires*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 25, no. 4, pp. 519–529, 2013.
- [59] N. N. Hilal, *Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content*, International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 6, no. 1, pp. 191–206, 2017.
- [60] W. H. Yung, L. C. Yung, L. H. Hua, *A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, vol. 41, pp. 665–672, 2013.
- [61] K. B. Najim, M. R. Hall, *Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete*, Construction and Building Materials, vol. 27, no. 1, pp. 521–530, 2012.
- [62] M. K. Ismail, M. T. De Grazia, A. A. A. Hassan, *Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials*, International Conference on Transportation and Civil Engineering (ICTCE'15), London, UK, pp. 68–74, 2015.
- [63] T. S. Vadivel, R. Thenmozhi, M. Doddurani, *Experimental behaviour of waste tyre rubber*

- aggregate concrete under impact loading*, Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering, vol. 38, no. C1+, pp. 251–259, 2014.
- [64] E. Güneyisi, M. Gesoglu, K. Mermerdas, S. Ipek, *Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete*, Advances in concrete construction, vol. 2, no. 3, pp. 193–207, 2014.
- [65] O. Youssf, M. A. Elgawady, J. E. Mills, X. Ma, *An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes*, Construction and Building Materials, vol. 53, pp. 522–532, 2014.
- [66] A. Y. Elghazouli, D. V. Bompa, B. Xu, A. M. Ruiz-Teran, P. J. Stafford, *Performance of rubberised reinforced concrete members under cyclic loading*, Engineering Structures, vol. 166, pp. 526–545, 2018.
- [67] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. Ipek, D. S. Asaad, *Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete*, Construction and Building Materials, vol. 101, pp. 1113–1121, 2015.
- [68] J. Xie, Y. Guo, L. Liu, Z. Xie, *Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber*, Construction and Building Materials, vol. 79, pp. 263–272, 2015.
- [69] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, *Permeability properties of self-compacting rubberized concretes*, Construction and Building Materials, vol. 25, no. 8, pp. 3319–3326, 2011.
- [70] D. Bjegović, A. Baričević, M. Serdar, *Durability properties of concrete with recycled waste tyres*, 12th International Conference on Durability of Building Materials and Composites, Porto, Portugal, pp. 1659–1667, 2011.
- [71] T. Gupta, S. Chaudhary, R. K. Sharma, *Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate*, Construction and Building Materials, vol. 73, pp. 562–574, 2014.
- [72] B. S. Thomas, R. C. Gupta, P. Kalla, L. Cseteneyi, *Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates*, Construction and Building Materials, vol. 59, pp. 204–212, 2014.
- [73] A. Turatsinze, J. L. Granju, S. Bonnet, *Positive synergy between steel-fibres and rubber aggregates: Effect on the resistance of cement-based mortars to shrinkage cracking*, Cement and Concrete Research, vol. 36, no. 9, pp. 1692–1697, 2006.
- [74] M. Bravo, J. De Brito, *Concrete made with used tyre aggregate: Durability-related performance*, Journal of Cleaner Production, vol. 25, pp. 42–50, 2012.
- [75] X. Zhu, C. Miao, J. Liu, J. Hong, *Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism*, Procedia Engineering, vol. 27, no. 2011, pp. 206–213, 2012.
- [76] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, S. Ipek, *Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers*, Construction and Building Materials, vol. 73, pp.

- 19–24, 2014.
- [77] K. A. Paine, R. K. Dhir, R. Moroney, K. Kopasakis, *Use of crumb rubber to achieve freeze / thaw resisting concrete*, International conference on concrete for extreme conditions, Dundee, Scotland, pp. 485–498, 2002.
- [78] Ć. B. Topçu, A. Demir, *Durability of Rubberized Mortar and Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 19, pp. 173–178, 2007.
- [79] R. Chylík, T. Trtík, J. Fládr, P. Bílý, *Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Prague, Czech Republic, vol. 236, pp. 1–7, 2017.
- [80] T. Gupta, S. Chaudhary, R. K. Sharma, *Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume*, Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 702–711, 2016.
- [81] A. Alsaif, S. A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, *Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides*, Construction and Building Materials, vol. 188, pp. 130–142, 2018.
- [82] J. R. Correia, A. M. Marques, C. M. C. Pereira, J. de Brito, *Fire reaction properties of concrete made with recycled rubber aggregate*, Fire and Materials, vol. 36, no. 2, pp. 139–152, 2012.
- [83] A. M. Marques, J. R. Correia, J. De Brito, *Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate*, Fire Safety Journal, vol. 58, pp. 49–57, 2013.
- [84] T. Gupta, S. Siddique, R. K. Sharma, S. Chaudhary, *Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber*, Construction and Building Materials, vol. 137, pp. 35–45, 2017.
- [85] L. Guelmine, H. Hadjab, A. Benazzouk, *Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar*, Construction and Building Materials, vol. 126, pp. 77–85, 2016.
- [86] F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, *Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 1, pp. 109–117, 2004.
- [87] M. I. Mousa, *Effect of elevated temperature on the properties of silica fume and recycled rubber-filled high strength concretes (RHSC)*, HBRC Journal, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [88] Z. Grdić, G. Topličić-Čurčić, N. Ristić, D. Grdić, P. Mitković, *Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete*, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, vol. 66, pp. 11–20, 2014.
- [89] B. S. Thomas, R. C. Gupta, V. J. Panicker, *Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance*, Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 504–513, 2016.
- [90] W. H. Yung, L. C. Yung, L. H. Hua, *A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, vol. 41, pp. 665–672,

- 2013.
- [91] B. S. Thomas, R. C. Gupta, P. Mehra, and S. Kumar, *Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment*, Construction and Building Materials, vol. 83, pp. 320–326, 2015.
- [92] M. Gesoğlu and E. Güneyisi, *Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume*, Materials and Structures, vol. 40, no. 9, pp. 953–964, 2007.
- [93] A. Sofi, *Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete - A review*, Ain Shams Engineering Journal, pp. 1–10, 2017.
- [94] F. Liu, W. Zheng, L. Li, W. Feng, G. Ning, *Mechanical and fatigue performance of rubber concrete*, Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 711–719, 2013.
- [95] R. B. Murugan, E. R. Sai, C. Natarajan, S.-E. Chen, *Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete*, Građevinar, vol. 69, no. 11, pp. 983–990, 2017.
- [96] I. Mohammadi, H. Khabbaz, K. Vessalas, *In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements*, Construction and Building Materials, vol. 71, pp. 456–471, 2014.
- [97] J. N. Eiras, F. Segovia, M. V. Borrachero, J. Monzó, M. Bonilla, J. Payá, *Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires*, Materials and Design, vol. 59, pp. 550–557, 2014.
- [98] A. Fadiel, F. Al Rifaie, T. Abu-Lebdeh, E. Fini, *Use of Crumb Rubber To Improve Thermal Efficiency of Cement-Based Materials*, American Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2014.
- [99] N. F. Medina, D. F. Medina, F. Hernández-Olivares, and M. A. Navacerrada, *Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling*, Construction and Building Materials, vol. 144, pp. 563–573, 2017.
- [100] I. O. Toma, O. M. Banu, R. G. Taran, N. Taranu, *Complete Characteristic Curve of Concrete and Rubberized Concrete*, ICAMS 2014 - 5th International Conference of Advanced Materials and Systems, Bucharest, Romania, pp. 1–6, 2014.
- [101] A. Moustafa, M. A. Elgawady, *Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber*, Construction and Building Materials, vol. 93, pp. 249–256, 2015.
- [102] A. Moustafa and M. ElGawady, *Dynamic Properties of High Strength Rubberized Concrete*, ACI Special Publication, vol. 2017-January, no. SP 314, pp. 33–54, 2017.
- [103] L. Zheng, X. Sharon Huo, Y. Yuan, *Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete*, Construction and Building Materials, vol. 22, no. 5, pp. 939–947, 2008.
- [104] A. Grinys, H. Sivilevičius, D. Pupeikis, E. Ivanauskas, *Fracture of concrete containing crumb rubber*, Journal of Civil Engineering and Management, vol. 19, no. 3, pp. 447–455, 2013.
- [105] J. Xie et al., *Combination effects of rubber and silica fume on the fracture behaviour of steel-*

- fibre recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, vol. 203, pp. 164–173, 2019.
- [106] Y. C. Guo, J. H. Zhang, G. Chen, G. M. Chen, Z. H. Xie, *Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber*, Construction and Building Materials, vol. 53, pp. 32–39, 2014.
- [107] M. R. Hall, K. B. Najim, *Structural behaviour and durability of steel-reinforced structural Plain/Self-Compacting Rubberised Concrete (PRC/SCRC)*, Construction and Building Materials, vol. 73, pp. 490–497, 2014.
- [108] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, B. H. Abdelaleem, *Flexural behaviour of reinforced scc beams containing recycled crumb rubber*, Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2016, London, Canada, vol. 3, pp. 2452–2462, 2016.
- [109] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, *Ductility and Cracking Behavior of Reinforced Self-Consolidating Rubberized Concrete Beams*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, no. 1, pp. 04016174 1–10, 2017.
- [110] A. S. M. Mendis, S. Al-Deen, M. Ashraf, *Effect of rubber particles on the flexural behaviour of reinforced crumbed rubber concrete beams*, Construction and Building Materials, vol. 154, pp. 644–657, 2017.
- [111] A. S. Eisa, M. T. Elshazli, M. T. Nawar, *Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams*, Construction and Building Materials, vol. 252, p. 119078 1–13, 2020.
- [112] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, *An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres*, Engineering Structures, vol. 145, pp. 97–108, 2017.
- [113] N. F. Medina, R. Garcia, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, S. Raffoul, *Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction*, Construction and Building Materials, vol. 188, pp. 884–897, 2018.
- [114] M. Skazlić, M. Vujica, *Environmentally-friendly self-compacting concrete*, Građevinar, vol. 64, no. 11, pp. 905–913, 2012.
- [115] R. Bušić, N. Štirmer, I. Miličević, *Effect of tire powder and wood biomass ash on properties of self-compacting concrete*, International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019), New Generation of Construction Materials, Rovinj, Croatia, pp. 515–522, 2019.
- [116] R. Bušić, I. Miličević, *Influence of Waste Tire Rubber on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Rubberized Concrete (SCRC)*, International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials (RheoCon2) and International Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC9), Dresden, Germany, pp. 3–10, 2020.
- [117] I. Miličević, M. Hadzima-Nyarko, R. Bušić, J. Simonović Radosavljević, M. Prokopijević, K.

- Vojisavljević, *Effect of Rubber Treatment on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Self-Compacting Rubberized Concrete*, International Conference on Advanced Construction Materials (ICACM 2021), Paris, France, pp. 131–134, 2021.
- [118] HRN EN 197-1, Cement -- 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene (EN 197-1:2011)
- [119] HRN EN 13263-1, Silicijska prašina za beton -- 1. dio: Definicije, zahtjevi i kriteriji sukladnosti (EN 13263-1:2005+A1:2009)
- [120] HRN EN 1008, Voda za pripremu betona -- Specifikacije za uzorkovanje, ispitivanje i potvrđivanje prikladnosti vode, uključujući vodu za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona, kao vode za pripremu betona (EN 1008:2002)
- [121] HRN EN 934-1, Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje -- 1. dio: Opći zahtjevi (EN 934-1:2008)
- [122] HRN EN 934-2, Dodaci betonu, mortu i smjesi za injektiranje -- 2. dio: Dodaci betonu -- Definicije, zahtjevi, sukladnost, označivanje i obilježavanje (EN 934-2:2009+A1:2012)
- [123] ASTM C188-16, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, USA, 2011.
- [124] HRN EN 933-1, Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sijanja (EN 933-1:2012)
- [125] HRN EN 12390-3, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2019)
- [126] HRN EN 12390-13, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 13. dio: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku (EN 12390-13:2021)
- [127] HRN EN 12620, Agregati za beton (EN 12620:2002+A1:2008)
- [128] R. Bušić, M. Benšić, I. Miličević, K. Strukar, *Prediction Models for the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Rubber and Silica Fume*, Materials (Basel), vol. 13, no. 8, p. 1821, 2020.
- [129] Z. Guo, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, D. E. Lehman, *Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume*, Construction and Building Materials, vol. 231, pp. 117115 1-11, 2020.
- [130] A. M. Falmata, A. Sulaiman, R. N. Mohamed, A. U. Shettima, *Mechanical properties of self-compacting high-performance concrete with fly ash and silica fume*, SN Applied Sciences, vol. 2, 2020.
- [131] D. Nasr, B. Behforouz, P. R. Borujeni, S. A. Borujeni, B. Zehtab, *Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling*, Construction and Building Materials, vol. 229, pp. 116888 1-12, 2019.
- [132] W. Meng, M. Valipour, K. H. Khayat, *Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete*, Materials and Structures, vol. 50, no. 1, 2017.

- [133] W. Meng, K. H. Khayat, *Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers*, Composites Part B: Engineering, vol. 107, pp. 113–122, 2016.
- [134] H. Salehi, M. Mazloom, *Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete*, Construction and Building Materials, vol. 222, pp. 622–632, 2019.
- [135] S. Ahmad, A. Umar, A. Masood, M. Nayeem, *Performance of self-compacting concrete at room and after elevated temperature incorporating silica fume*, Advances in Concrete Construction, vol. 7, no. 1, pp. 31–37, 2019.
- [136] M. Benaicha, A. Belcaid, A. H. Alaoui, O. Jalbaud, Y. Burtschell, *Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete*, Structural Concrete, vol. 20, no. 5, pp. 1702–1709, 2019.
- [137] HRN EN 12390-7, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 7. dio: Gustoća očvrsluloga betona (EN 12390-7:2019/AC:2020)
- [138] HRN EN 12390-8, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom (EN 12390-8:2019)
- [139] D. C. Montgomery, G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers (Third Edition)*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003.
- [140] T. S. Breusch, A. R. Pagan, *A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation*, Econometrica, vol. 47, no. 5, p. 1287, 1979.
- [141] S. S. Shapiro, M. B. Wilk, *An analysis of variance test for normality (complete samples)*, Biometrika, vol. 52, pp. 591–611, 1965.
- [142] M. Benaicha, X. Roguiez, O. Jalbaud, Y. Burtschell, A. H. Alaoui, *Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete*, Construction and Building Materials, vol. 84, pp. 103–110, 2015.
- [143] M. Jalal, A. Pouladkhan, O. F. Harandi, D. Jafari, *Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete*, Construction and Building Materials, vol. 94, pp. 90–104, 2015.
- [144] H. A. F. Dehwah, *Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash*, Construction and Building Materials, vol. 26, no. 1, pp. 547–551, 2012.
- [145] RILEM TC-89-FTM, *Fracture Mechanics of Concrete – Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete*, 1991.
- [146] RILEM TC-50 FMC, *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*, Materials and Structures, vol. 18, no. 106, p. 285–290, 1985.
- [147] H. N. Linsbauer, E. K. Tschegg, *Fracture energy determination of concrete with cube-shaped*

- specimens*, Zement und Beton, vol. 31, pp. 38–40, 1986.
- [148] E. Brühwiler, F. H. Wittmann, *The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 35, no. 1–3, pp. 117–125, 1990.
- [149] I. Guljaš, *Ispitivanje parametara mehanike loma metodom cijepanja na betonskim uzorcima*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, magistarski rad, 1998.
- [150] D. C. González, J. Mínguez, M. A. Vicente, F. Cambroner, G. Aragón, *Study of the effect of the fibers' orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete from wedge-splitting tests and computed tomography scanning*, Construction and Building Materials, vol. 192, pp. 110–122, 2018.
- [151] S. Kumar, S. V. Barai, *Determining double-K fracture parameters of concrete for compact tension and wedge splitting tests using weight function*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 76, no. 7, pp. 935–948, 2009.
- [152] G. V. Guinea, M. Elices, J. Planas, *Stress intensity factors for wedge-splitting geometry*, International Journal of Fracture, vol. 81, no. 2, pp. 113–124, 1996.
- [153] E. Tschegg, *New equipments for fracture tests on concrete*, Materialprüfung, vol. 33, no. 11, pp. 338–343, 1991.
- [154] J. Xiao, H. Schneider, C. Dönnecke, G. König, *Wedge splitting test on fracture behaviour of ultra high strength concrete*, Construction and Building Materials, vol. 18, no. 6, pp. 359–365, 2004.
- [155] S. Xu, Y. Zhu, *Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar*, International Journal of Fracture, vol. 157, no. 1–2, pp. 33–43, 2009.
- [156] S. Xu, H. W. Reinhardt, *Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation*, International Journal of Fracture, vol. 98, no. 2, pp. 111–149, 1999.
- [157] A. Hillerborg, M. Modéer, P. E. Petersson, *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, Cement and Concrete Research, vol. 6, no. 6, pp. 773–781, 1976.
- [158] Z. P. Bažant, B. H. Oh, *Crack band theory for fracture of concrete*, Materials and Structures, vol. 16, no. 3, pp. 155–177, 1983.
- [159] Y. S. Jenq, S. P. Shah, *A Fracture toughness criterion for concrete*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 21, no. 5, pp. 1055–1069, 1985.
- [160] Z. P. Bažant, P. Pfeiffer, *Determination of fracture energy from size effect and brittleness number*, ACI Materials Journal, vol. 84, no. 6, pp. 463–480, 1987.
- [161] Z. P. Bažant, M. T. Kazemi, *Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete*, International Journal of Fracture, vol. 44, no. 2, pp. 111–131, 1990.

- [162] B. L. Karihaloo, P. Nallathambi, *Effective crack model for the determination of fracture toughness (K_{Ic}) of concrete*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 35, no. 4–5, pp. 637–645, 1990.
- [163] S. Xu, H. W. Reinhardt, *Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams*, International Journal of Fracture, vol. 98, no. 2, pp. 151–177, 1999.
- [164] S. Xu, H. W. Reinhardt, *Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens*, International Journal of Fracture, vol. 98, no. 2, pp. 179–193, 1999.
- [165] S. P. Shah, *Determination of fracture parameters (K_{Ic} s and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests*, Materials and Structures, vol. 23, no. 6, pp. 457–460, 1990.
- [166] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, USA, 2009.
- [167] HRN EN 12504-4, Ispitivanje betona u konstrukcijama -- 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa (EN 12504-4:2021)
- [168] HRN EN 1992-1-1, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004/A1:2014)
- [169] G. Ruiz, J. J. Ortega, R. C. Yu, S. Xu, Y. Wu, *Effect of size and cohesive assumptions on the double- K fracture parameters of concrete*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 166, pp. 198–217, 2016.
- [170] Y. Wu, S. Xu, Q. Li, G. Ruiz, R. C. Yu, *Estimation of real fracture parameters of a dam concrete with large size aggregates through wedge splitting tests of drilled cylindrical specimens*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 163, pp. 23–36, 2016.
- [171] E. K. Tschegg, M. Elser, *Biaxial Fracture Tests on Concrete-Development and Experience*, Cement and Concrete Research, vol. 17, no. 1, pp. 57–75, 1995.
- [172] RILEM TC 116-PCD, *Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability, Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete*, Materials and Structures, vol. 32, pp. 174–179, 1999.
- [173] H. Hilsdorf, J. Kropp, *Performance Criteria for Concrete Durability*. CRC Press, 1995.
- [174] J. J. Kollek, *The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method-a recommendation*, Materials and Structures, vol. 22, no. 3, pp. 225–230, 1989.
- [175] RILEM TC 230-PSC, *Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability: State-of-Art Report*, Springer, 2015.
- [176] EN 12390-2, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 2. dio: Izrada i njega ispitnih uzoraka za ispitivanja čvrstoće (EN 12390-2:2019)
- [177] HRN 1128:2007, Beton -- Smjernice za primjenu norme HRN EN 206-1
- [178] HRN EN 12390-16, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 16. dio: Određivanje skupljanja betona (EN 12390-16:2019)

- [179] HRN CEN/TS 12390-9, Ispitivanje očvrslaga betona -- 9. dio: Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje -- Ljuštenje (CEN/TS 12390-9:2006)
- [180] RILEM TC 200-HTC, *Mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications*, Materials and Structures, vol. 40, no. 9, pp. 841–853, 2007.
- [181] HRN EN 12667, Toplinske značajke građevnih materijala i proizvoda -- Određivanje toplinskog otpora metodom sa zaštićenom vrućom pločom i tokomjernom metodom -- Proizvodi s visokim i srednjim toplinskim otporom (EN 12667:2001)
- [182] HRN ISO 8302, Toplinska izolacija -- Mjerenje toplinskog otpora i srodnih veličina u ustaljenom stanju -- Pločasti uređaj sa zaštićenom vrućom pločom (ISO 8302:1991)
- [183] HRN EN 206, Beton -- Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021)
- [184] N. Yüzer, F. Aköz, L. D. Öztürk, *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature*, Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 10, pp. 1803–1807, 2004.
- [185] P. E. Halstead, A. E. Moore, 769. *The thermal dissociation of calcium hydroxide*, Journal of the Chemical Society (Resumed), p. 3873, 1957.
- [186] F. M. Nazri, S. Shahidan, N. K. Baharuddin, S. Beddu, B. H. Abu Bakar, *Effects of heating durations on normal concrete residual properties: compressive strength and mass loss*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Johor Bahru, Malaysia, vol. 271, pp. 012013 1-7, 2017.
- [187] V. Kodur, *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*, ISRN Civil Engineering, vol. 2, pp. 1–15, 2014.
- [188] I. Kraus, M. Paradžiković, I. Miličević, *Utjecaj ispunja od betona s opekarskim lomom kao agregatom na potresni odziv kratkih stupova*, Elektronski časopis građevinskog fakulteta Osijek, vol. 5, pp. 43-51, 2012.
- [189] K. Strukar, T. Kalman Šipoš, T. Dokšanović, H. Rodrigues, *Experimental Study of Rubberized Concrete Stress-Strain Behavior for Improving Constitutive Models*, Materials (Basel), vol. 11, no. 11, p. 2245, 2018.
- [190] HRN EN 1992-1-2, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-2: Opća pravila -- Proračun konstrukcija na djelovanje požara (EN 1992-1-2:2004/A1:2019)
- [191] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/2020)
- [192] Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)
- [193] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, Eds., *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, CRC Press, 2017.

CURRICULUM VITAE

Robert Bušić, mag.ing.aedif. rođen je 19. srpnja 1990. godine u Vinkovcima. U rodnom je gradu 2009. godine završio gimnaziju općeg smjera, a iste godine upisao je Građevinski fakultet u Osijeku. Tijekom preddiplomskog i diplomskog studija bio je primatelj državne/sveučilišne stipendije za osobito nadarene redovite studente. Diplomirao je 2015. godine na Građevinskom fakultetu Osijek, smjer Nosive konstrukcije. Za vrijeme trajanja diplomskog studija sudjelovao je na jednom međunarodnom skupu, a u sklopu ERASMUS+ programa za mobilnost studenata izabran je za praktikanta te je u 2014. godini odradio stručnu praksu u građevinskom poduzeću NAUE GmbH u Njemačkoj. Tijekom studiranja aktivno je sudjelovao u radu, organizaciji i provedbi aktivnosti Udruge studenata Građevinskog fakulteta Osijek, čiji je suosnivač.

Po završetku diplomskog studija, u razdoblju od 2015. do 2018. godine, ostvario je tri godine radnog staža u gospodarstvu radeći kao projektant suradnik u projektnom uredu B2 inženjering d.o.o. te kao voditelj tehničke pripreme i pomoćnik voditelja građenja u građevinskom poduzeću METAL LOVRETIĆ d.o.o. u Vinkovcima. Program pedagoško-psihološko-didaktičko-metodičke izobrazbe upisuje i završava 2017. godine te stječe pedagoške kompetencije.

Od ožujka 2018. godine radi kao asistent na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, Zavodu za materijale i konstrukcije. Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo upisuje na spomenutom fakultetu početkom 2018. godine. Od 2018. godine do danas sudjeluje kao suradnik na tri znanstveno-istraživačka projekta koji su usko vezani za njegove istraživačke interese. Sudjelovao je na tri međunarodna i jednom domaćem znanstvenom skupu te je u koautorstvu objavio tri znanstvena rada u WoSCC bazi (kvartil Q1 i Q2). Od 2021. godine aktivni je član Povjerenstva za popularizaciju znanosti i tehničke kulture Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek te Hrvatskog društva za potresno inženjerstvo. Njegove nastavne aktivnosti, stručna djelatnost te znanstveno-istraživački interesi pripadaju polju temeljnih tehničkih znanosti, grani materijali.