



Univerzitet u Nišu
Građevinsko - arhitektonski fakultet



Dušan Z. Grdić

**Uticaj dodatka fino samlevnog recikliranog
stakla od katodnih cevi na svojstva cementnog
maltera i betona**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2019.



University of Niš
Faculty of Civil Engineering and Architecture



Dušan Z. Grdić

**Effect of addition of finely milled recycled glass
obtained from cathode tubes on the properties
of cement mortar and concrete**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2019.

Članovi komisije:

1. **Dr Nenad Ristić**, docent (mentor)
Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
2. **Dr Gordana Topličić - Ćurčić**, vanredni profesor
Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
3. **Dr Vlastimir Radonjanin**, redovni profesor
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
4. **Dr Mirjana Malešev**, redovni profesor
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
5. **Dr Dimitrije Zakić**, vanredni profesor
Građevinski fakultet u Beogradu

Datum odbrane doktorske disertacije:

ZAHVALNOST

Želeo bih da iskoristim priliku i da se najiskrenije zahvalim svima koji su mi pomogli prilikom izrade ove doktorske disertacije a posebno:

Docentu dr Nenadu Ristiću, mom mentoru, na velikoj pomoći, korisnim savetima i sugestijama prilikom izrade i pisanja disertacije. Njegova neizmerna podrška i razumevanje su učinili da svaka prepreka na ovom višegodišnjem istraživačkom radu bude premostiva.

Prof. dr Gordani Topličić - Čurčić na korisnim savetima prilikom obrade eksperimentalnih rezultata i važnim smernicama prilikom pretrage literature koja je prethodila samom eksperimentalnom radu.

Kolegi i prijatelju Dejanu Krstiću, dipl. građ. inženjeru, na pruženoj stručnoj i svakoj drugoj pomoći tokom izrade eksperimentalnog dela, kao i prilikom različitih merenja i praćenja reoloških svojstava cementnih kompozita.

Prof. dr Goranu Radenkoviću, veliko hvala, na uloženom trudu i pomoći oko konstruisanja i izrade specijalnog laboratorijskog mlina koji je korišćen za usitnjavanje katodnog stakla.

Marku Saviću, kumu i prijatelju, koji mi je nesebično pomogao oko usitnjavanja velike količine otapadnog stakla.

Dipl. hem. Ljiljani Miličić, na pomoći oko praćenja razvoja ASR malterskih uzoraka sa otpadnim staklom u Laboratoriji za veziva, hemiju i maltere Instituta IMS u Beogradu. Takođe, zahvaljujem se i dipl. hem. Mariji Cvetković na pomoći oko hemijske analize sprasenog CRT stakla i cementa.

Prof. dr Draganu Đorđeviću, Doc. dr Nenadu Krstiću i Miroslavu Miljkoviću dipl. inž. el. velika zahvalnost na pomoći oko hemijske analize stakla, snimanja i obrade rezultata SEM analize uzoraka maltera i betona.

Gospodinu Ninoslavu Milenkoviću iz kompanije "E - reciklaža" d.o.o., posebna zahvalnost, na ustupljenom katodnom staklu i finansijskoj pomoći vezanoj za proces usitnjavanja stakla i izrade eksperimentalnih uzoraka.

Kompanijama: "CRH", "Sika", "Šilo - Prom" i "Vodogradnja" izražavam zahvalnost na ustupljenim materijalima koji su korišćeni za izradu eksperimentalnih cementnih kompozita.

Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja u okviru čijeg projekta TR 36017 pod nazivom "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji" je sprovedeno predmetno istraživanje.

Roditeljima Ljiljani i Zoranu i supruzi Jovani na podršci i razumevanju, a sinu Vukanu na dodatnoj inspiraciji. Vaša безусловna ljubav mi je bila najveći oslonac i vodilja tokom višegodišnjeg rada. Vi ste učinili da svako odricanje u zadnjih par godina ima smisla, da svaka prepreka bude savladiva, a da visoko postavljen cilj bude dostižan.

Podaci o doktorskoj disertaciji	
Mentor:	Doc. dr Nenad Ristić, Univerzitet u Nišu, Građevinsko - arhitektonski fakultet
Naslov:	Uticaj dodatka fino samlevenog recikliranog stakla od katodnih cevi na svojstva cementnog maltera i betona
Rezime:	<p>U eksperimentalnom delu disertacije istražena je i analizirana mogućnost primene fino samlevenog CRT stakla ($<0,063 \mu m$) za izradu maltera i betona. Napravljeno je osam malterskih i osam betonskih mešavina. Sprašeno staklo poslužilo je kao zamena za deo cementa, pri čemu je procenat te zamene kod obe vrste kompozita iznosio: 5%, 10%, 15%, 20% i 35%, po masi. Za gornju granicu zamene cementa staklom odabran je najveći procenat prisustva mineralnih dodataka kod cementa CEM II. Takođe, napravljene su i dve serije maltera i betona sa dodatkom 5% i 10% CRT-a na celokupnu količinu cementa. Sprovedeno je sveobuhvatno ispitivanje svojstava ovako modifikovanih cementnih kompozita u svežem stanju, zatim mehaničkih čvrstoća, reoloških svojstava i provere trajnosti. U cilju provere trajnosti betona, između ostalih, sprovedena su sledeća ispitivanja: otpornost na dejstvo mraza i na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, vodonepropustljivosti, otpornosti na dejstvo sulfata i izluživanje betona. Takođe, sprovedena je i SEM i EDS analiza za karakterizaciju maltera i betona.</p> <p>Analizom i obradom rezultata izneti su zaključci u pogledu mogućnosti upotrebe CRT stakla za izradu maltera i betona, kao i ocena trajnosti ovih modifikovanih cementnih kompozita. Fino samleveno katodno staklo je pucolanski aktivno i ne izaziva alkalno - silikatnu reakciju. Kod maltera se može izvršiti zamena cementa katodnim staklom do nivoa do 20% i time neće doći do značajnijeg smanjenja pritisne i savojne čvrstoće, dok će malter ostati postojan u pogledu otpornosti na delovanje mraza. Dodatak stakla do 10% na celokupnu količinu cementa kod maltera dovodi do poboljšanja fizičko - mehaničkih svojstava.</p> <p>Kod betona sa zamenom dela cementa katodnim staklom do 15% poboljšavaju se mehaničke čvrstoće. Trajnost betona do navedenog nivoa zamene cementa staklom nije dovedena u pitanje. Gornjom granicom zamene dela cementa staklom kod betonskih mešavina može se smatrati vrednost do 20% po masi, pri čemu su tada mehaničke čvrstoće betona neznatno smanjene, dok je trajnost u pogledu delovanja mraza i mraza i soli za odmrzavanje diskutabilna. Rezultati izluživanja betona sa CRT staklom potvrđuju da ovi betoni ne predstavljaju ekološki problem za životnu sredinu.</p>
Naučna oblast:	Građevinarstvo
Naučna disciplina:	Građevinski materijali i tehnologija betona

Ključne reči:	katodno staklo, malteri, betoni, mehaničke čvrstoće, trajnost, ekologija, životna sredina
UDK:	691:620.1(043.3) 691.6(043.3) 691.555:004.353.253(043.3) 691.3:004.353.253(043.3)
CERIF klasifikacija:	T 002, T 150, T 152
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation	
Doctoral Supervisor:	Ass. Prof. Nenad Ristić, University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture
Title:	Effects of addition of finely milled recycled glass obtained from cathode tubes on the properties of cement mortar and concrete
Abstract:	<p>In the experimental part of the dissertation, the potential of usage of finely milled CRT glass ($<0,063 \mu m$) in making mortar and concrete is tested and analyzed. Eight mortar and concrete mixtures each have been made. Pulverized glass is used to replace a share of cement, the replacement percentage in both composites being: 5%, 10%, 15%, 20% and 35%, by mass. The adopted upper limit for replacement of cement with glass is in accordance with the maximum share of other mineral admixtures in CEM II cement. Also, two batches of mortars and concretes were made with addition of 5% and 10% of CRT to total amount of cement. A comprehensive testing of properties of fresh cement composites modified in this manner has been conducted, as well as of mechanical strengths, rheological characteristics and durability. Among other things, durability tests included: freeze/thaw resistance and freeze/thaw resistance with de-icing salt, water impermeability, sulphate attack and leaching tests. Also, a SEM and EDS analysis of mortar and concrete samples is conducted.</p> <p>The analysis and processing of the results helped form the conclusions regarding potential of usage of CRT glass for making mortar and concrete, and assess durability of these modified cement composites. Finely milled cathode ray tube glass is pozzolanically active and does not cause alkali-silicate reaction. In mortars, CRT glass can be used for replacement up to 20% without causing any considerable decline of compressive or flexural strengths, while mortar retains its integrity under freeze/thaw conditions. Addition of glass up to 10% in relation to the total amount of cement in mortar improves physical-mechanical properties.</p> <p>Mechanical strengths of concrete with a share of cement replaced with CRT up to 15% are improved. Durability of concrete with the same share of replacement is not compromised. The replacement of 20% by mass can be considered the upper limit for replacement of a share of cement with glass in concrete mixes, whereby the mechanical strengths of concrete are negligibly degraded, while durability in terms of action of freeze/thaw with de-icing salt is questionable. The results the leaching test of concrete with CRT glass confirm that these concretes do not present an environmental challenge.</p>
Scientific Field:	Civil Engineering

Scientific Discipline:	Civil engineering materials and Concrete technology
Key Words:	cathode ray tube glass, mortars, concretes, mechanical properties, durability, environment
UDC:	691:620.1(043.3) 691.6(043.3) 691.555:004.353.253(043.3) 691.3:004.353.253(043.3)
CERIF Classification:	T 002, T 150, T 152
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Predmet istraživačkog rada	1
1.2. Ciljevi istraživačkog rada	2
1.3. Metodologija istraživačkog rada	3
1.4. Struktura doktorske disertacije	4
2. KATODNO STAKLO TELEVIZIJSKIH I KOMPJUTERSKIH MONITORA.....	6
2.1. Izgled katodne cevi i princip rada.....	6
2.2. Količine otpadnog CRT stakla.....	7
2.2.1. Količine katodnog stakla u svetu.....	7
2.2.2. Količine katodnog stakla u Sjedinjenim Američkim državama.....	9
2.2.3. Količine katodnog stakla u Kini.....	10
2.2.4. Količine katodnog stakla u Evropi.....	12
2.2.5. Količine katodnog stakla u Srbiji.....	15
2.2.6. Proces reciklaže i tehnologija rasklapanja CRT ekrana	16
3. PRIMENA OTPADNOG STAKLA ZA IZRADU NOVIH PROIZVODA.....	20
3.1. Katodno staklo kao sirovina u industriji keramike.....	20
3.2. Katodno staklo kao sirovina za proizvodnju kristala.....	22
3.3. Primena otpadnog stakla za izradu maltera.....	23
3.3.1. Staklo od katodnih cevi kao zamena za deo agregata u malteru.....	24
3.3.2. Otpadno staklo kao zamena za deo cementa u malteru..	28
3.4. Primena otpadnog stakla za izradu betona.....	38
3.4.1. Otpadno staklo kao zamena za deo agregata u betonu....	39
3.4.2. Otpadno staklo kao zamena za deo cementa u betonu....	51
4. ALKALNO - SILIKATNA REAKTIVNOST MALTERA I BETONA SA DODATAKOM OTPADNOG STAKLA.....	67
4.1. Mehanizam nastanka alkalno - silikatne reakcije.....	67
4.2. Prevencija pojave alkalno - silikatne reakcije.....	68
4.3. Uticaj finoće mliva recikliranog stakla na pojavu ASR-a.....	69
4.4. Uticaj hemijskog sastava recikliranog stakla na pojavu ASR-a....	71
4.5. Ispitivanje potencijalne alkalne reaktivnosti kombinacije cement - agregat (ASTM C227-10).....	74
5. PRETHODNA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA.....	76
5.1. Uticaj zamene prirodnog agregata recikliranim staklom od katodnih cevi na promenu svojstava cementnog maltera.....	76
5.1.1. Sastav malterskih mešavina i rezultati ispitivanja.....	77
5.1.2. Diskusija rezultata	78

5.2. Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka u betonu.....	80
5.2.1. Sastav betonskih mešavina sa CRT agregatom.....	80
5.2.2. Rezultati ispitivanja i diskusija.....	81
5.3. Ispitivanje alkalno - silikatne reakcije maltera sa dodatkom stakla od katodnih cevi.....	84
5.3.1. Sastav malterskih mešavina i nega uzoraka.....	84
5.3.2. Rezultati ispitivanja i diskusija.....	86
5.4. Ispitivanje alkalno - silikatne reaktivnosti prirodnog rečnog agregata i cementa čiji je deo zamenjen fino samlevenim katodnim staklom.....	87
5.5. Najvažniji zaključci prethodnih eksperimentalnih istraživanja....	89
6. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE.....	91
6.1. Program eksperimentalnog istraživanja.....	91
6.2. Materijali korišćeni u eksperimentu.....	94
6.2.1. Cement	94
6.2.2. Agregat	96
6.2.3. Mineralni dodatak - fino samleveno CRT staklo.....	99
6.2.4. Hemijski dodatak.....	103
6.2.5. Voda	104
6.3. Ispitivanje pucolanske aktivnosti CRT-a	104
6.4. Ispitivanja cementne paste sa različitim procentom dodatka CRT	106
6.5. Sastav malterskih mešavina	107
6.6. Rezultati ispitivanja maltera u svežem stanju.....	108
6.7. Rezultati ispitivanja očvrslog maltera.....	109
6.7.1. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju	109
6.7.2. Ispitivanje otpornosti maltera na dejstvo mraza.....	111
6.7.3. Ispitivanje skupljanja maltera	112
6.7.4. SEM analiza maltera	114
6.8. Sastav betonskih mešavina.....	115
6.9. Izrada betonskih mešavina.....	116
6.10. Rezultati ispitivanja svežeg betona.....	118
6.11. Rezultati ispitivanja očvrslog betona	120
6.11.1. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju.....	120
6.11.2. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku.....	121
6.11.3. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem	122
6.11.4. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem	124
6.11.5. Čvrstoća prionjivosti - "Pull - off" test.....	125
6.11.6. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra ..	127
6.11.7. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton	128
6.11.8. Statički modul elastičnosti	130

6.11.9.	Ispitivanje udarne otpornosti betona - "Drop weight test"	133
6.11.10.	Ispitivanje skupljanja betona	136
6.11.11.	Ispitivanje upijanja vode pod atmosferskim pritiskom..	138
6.12.	Rezultati ispitivanja trajnosti betona sa dodatkom CRT stakla...	139
6.12.1.	Ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza	139
6.12.2.	Ispitivanje otpornosti na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje	140
6.12.3.	Ispitivanje otpornosti betona prema delovanju vode pod pritiskom - vodonepropustljivost.....	141
6.12.4.	Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata	143
6.12.5.	Otpornost prema habanju brušenjem	147
6.12.6.	Ispitivanje izluživanja betona - "Leaching test"	148
6.12.7.	Ispitivanje radioaktivnosti.....	151
6.13.	SEM i EDS analiza betona	153
7.	ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA.....	158
7.1.	Pucolanska aktivnost stakla.....	158
7.1.1.	Mehanizam delovanja finog staklenog praha u cementnoj matrici.....	160
7.2.	Cementna pasta sa različitim procentom dodatka CRT - a.....	161
7.3.	Malter sa dodatkom CRT stakla u svežem stanju.....	162
7.4.	Malter sa dodatkom CRT stakla u očvrsлом stanju.....	163
7.4.1.	Čvrstoća pri pritisku i pri savijanju.....	163
7.4.2.	Otpornost maltera na dejstvo mraza.....	166
7.4.3.	Skupljanje maltera.....	168
7.4.4.	SEM analiza maltera.....	169
7.5.	Beton sa dodatkom CRT stakla u svežem stanju.....	170
7.6.	Beton sa dodatkom CRT stakla u očvrsлом stanju.....	172
7.6.1.	Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju.....	172
7.6.2.	Čvrstoća pri pritisku.....	173
7.6.3.	Čvrstoća pri zatezanju cepanjem.....	175
7.6.4.	Čvrstoća pri zatezanju savijanjem.....	176
7.6.5.	Čvrstoća prionjivosti - "Pull - off" test.....	177
7.6.6.	Indeks sklerometra.....	178
7.6.7.	Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa.....	180
7.6.8.	Statički modul elastičnosti.....	182
7.6.9.	Udarne otpornost betona - "Drop weight test"	185
7.6.10.	Skupljanje betona.....	185
7.6.11.	Upijanje vode pod atmosferskim pritiskom.....	187
7.7.	Trajnost betona sa dodatkom CRT stakla.....	188
7.7.1.	Otpornost betona na delovanje mraza.....	188

7.7.2.	Otpornost betona na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje.....	190
7.7.3.	Vodonepropustljivost betona.....	191
7.7.4.	Otpornost betona na delovanje sulfata.....	192
7.7.5.	Otpornost prema habanju brušenjem.....	195
7.7.6.	Izluživanje betona.....	196
7.7.7.	Radioaktivnost	197
7.8.	SEM i EDS analiza betona.....	198
8.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	200
8.1.	Završna razmatranja.....	200
8.2.	Pravci daljeg istraživanja.....	210
9.	LITERATURA	212
10.	LISTA SLIKA I TABELA, PRILOZI	224
10.1.	Lista slika.....	224
10.2.	Lista tabela.....	230
10.3.	Prilozi	230
10.3.1.	Prilog 1. Korišćene oznake u doktorskoj disertaciji.....	232
10.3.2.	Prilog 2. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju maltera.....	235
10.3.3.	Prilog 3. Ispitivanje skupljanja maltera.....	236
10.3.4.	Prilog 4. SEM analiza maltera.....	237
10.3.5.	Prilog 5. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju.....	239
10.3.6.	Prilog 6. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku betona.....	240
10.3.7.	Prilog 7. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem.....	241
10.3.8.	Prilog 8. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem.....	242
10.3.9.	Prilog 9. Ispitivanje čvrstoće prionjivosti.....	243
10.3.10.	Prilog 10. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra.....	246
10.3.11.	Prilog 11. Brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton.....	248
10.3.12.	Prilog 12. Statički modul elastičnosti.....	250
10.3.13.	Prilog 13. Ispitivanje udarne otpornosti betona.....	253
10.3.14.	Prilog 14. Ispitivanje skupljanja betona.....	256
10.3.15.	Prilog 15. Ispitivanje upijanja vode metodom postupnog potapanja.....	257
10.3.16.	Prilog 16. Ispitivanje otpornosti na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje.....	258
10.3.17.	Prilog 17. Ispitivanje vodonepropustljivosti betona.....	260
10.3.18.	Prilog 18. Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata.....	262
10.3.19.	Prilog 19. Otpornost prema habanju brušenjem.....	265
10.3.20.	Prilog 20. SEM analiza betona.....	266
10.3.21.	Prilog 21. Matrica ispitivanja CRT stakla i cementne	

paste.....	268
10.3.22. Prilog 22. Matrica ispitivanja maltera.....	269
10.3.23. Prilog 23. Matrica ispitivanja betona.....	270
Biografija.....	271

1. UVOD

1.1. Predmet istraživačkog rada

Razvoj elektronske industrije je doveo do ubrzanog nagomilavanja zastarelih električnih aparata i generisanja značajne količine otpada, što predstavlja veliki ekološki problem za ceo svet. Krajem 2011. godine proizvodnja i prodaja televizijskih i kompjuterskih ekrana sa katodnim cevima je u značajnoj meri obustavljena. Ove ekrane zamenili su novi TFT - LCD ekrani. Stari katodni ekrani najčešće završe na deponijama širom sveta gde se njihove količine neprestano uvećavaju. Najveći deo ovih ekrana čini katodno staklo (*Cathode Ray Tube Glass*) koje zbog svog hemijskog sastava ne može biti reciklirano na uobičajen način, kao neke druge vrste otpadnog stakla. Evropski katalog za otpad je 2002. godine staklo koje potiče od katodnih cevi i kompjuterskih monitora klasifikovao kao opasan otpad koji, pre skladištenja na deponiji, mora da prođe odgovarajući tretman kako bi se odstranile potencijalno opasne materije po prirodu i čoveka. Savremeni trend u industriji građevinarstva u svetu je upotreba alternativnih izvora građevinskih materijala koji makar jednim delom mogu zameniti tradicionalne materijale, pre svega u cilju smanjenja štetnih uticaja na životnu sredinu.

Svakako da je problem elektronskog otpada aktuelan i u našoj zemlji. Da bi se staklo od katodnih cevi recikliralo mora da prođe kroz sledeće faze: sakupljanje, izdvajanje po vrstama, prerada i izrada novog proizvoda. Katodne cevi se prvenstveno sastoje od silicijum - dioksida (oko 60%). Same cevi su "premazane" oksidima barijuma i gvožđa koji služe kao zaštita od štetne radijacije prilikom korišćenja uređaja. Nažalost, u ovom trenutku, u našoj zemlji se staklo od katodnih cevi ne može smatrati reciklatom, jer nedostaje poslednja faza u procesu reciklaže, tj. od njega se ne pravi novi proizvod. Katodno staklo se samo izdvaja, sakuplja i onda izvozi u Zapadnu Evropu. Ovaj se izvoz razlikuje od uobičajnog značenja tog termina jer se za njega ne dobija novac, već naprotiv, ova usluga mora da se plati. Upravo ova činjenica bila je jedan od glavnih motiva i razlog predmetnog istraživanja. Postavljeno je pitanje kako upotrebiti katodno staklo i na taj način ostvariti dvostruku korist: sa jedne strane uštedeti novac kojim se plaća izvoz i sa druge strane upotrebiti ga kao mineralnu sirovinu za novi proizvod, što bi i sa ekološke strane bio značajan doprinos.

Jedan od mogućih pravaca u primeni recikliranog stakla od katodnih cevi je njegova upotreba za spravljanje cementnog maltera i betona. Pregledom inostrane literature

ustanovljeno je da postoje dva aspekta primene stakla od katodnih cevi: prvi podrazumeva primenu stakla kao punioca kojim se može zameniti deo konvencionalnog agregata, dok drugi aspekt podrazumeva upotrebu stakla za zamenu jednog dela veziva, odnosno dela cementa.

Potencijalni problem koji može da se javi prilikom upotrebe recikliranog stakla kao agregata za beton je mogućnost pojave alkalno - silikatne reakcije (ASR), koja može da dovede do pojave prslina, a u dužem vremenskom periodu i do potpune degradacije očvrslog betona. Naime, krupnoća zrna stakla značajno utiče na ASR. Istraživanja pokazuju da veličina prslina unutar zrna stakla, nastalih usled procesa drobljenja, određuje stepen alkalno - silikatne reakcije. Usitnjavanjem stakla, smanjuje se broj i veličina mikroprrslina čime se sprečava mogućnost pojave alkalno - silikatne reakcije.

Ovo je i glavni razlog zbog kojeg su istraživanja usmerena u pravcu upotrebe stakla kao zamene dela cementa. Ispitivanja iz ove oblasti u svetu su pokazala da je kritična veličina zrna stakla za pojavu alkalno - silikatne reakcije 100 mikrometara. Iz tog razloga krupni komadi katodnog stakla ustupljeni laboratoriji, usitnjeni su do frakcije 0/4 mm u lokalnoj asfaltnoj bazi. Dalje mlevenje i usitnjavanje urađeno je pomoću specijano konstruisanog laboratorijskog kugličnog mlina. Nakon mlevenja, staklo je prosejano kroz sito otvora 0,063 milimetara i korišćeno je u daljem eksperimentalnom radu.

Prethodna ispitivanja na fino samlevenom staklu od katodnih cevi su pokazala zadovoljavajuću pucolansku aktivnost, što je jedan od glavnih preduslova za njegovu primenu kao zamene dela cementa ili dodatka cementu. Predmet ove doktorske disertacije je utvrđivanje uticaja dodatka pucolanski aktivnog recikliranog stakla od katodnih cevi, velike finoće mliva, na svojstva cemente paste, cementnog maltera i cement betona. U tom smislu planirana je izrada i sveobuhvatno ispitivanje dovoljnog broja malterskih i betonskih mešavina sa različitim procentom dodatka stakla.

1.2. Ciljevi istraživačkog rada

Dokazivanje mogućnosti primene recikliranog stakla od katodnih cevi kao zamene dela cementa u malteru i betonu biće jedan od glavnih ciljeva ove doktorske disertacije. Dosadašnja iskustva u našoj zemlji ukazuju da se prikupljeno katodno staklo ne koristi za proizvodnju novih proizvoda, već se ono uz plaćanje za uslugu izvozi u zemlje Zapadne Evrope. Dokazivanjem mogućnosti primene fino samlevenog CRT-a, kao zamena dela cementa za spravljanje maltera i betona, doprinelo bi rešavanju ekoloških problema u našoj zemlji, a stvorila bi se mogućnost i za određenu finansijsku uštedu. Jedan od glavnih ciljeva

istraživanja biće utvrđivanje najveće moguće zamene cementa recikliranim staklom, uz uslov da osobine cementnog maltera i betona budu na nivou koji omogućava njihovu praktičnu primenu u građevinarstvu.

Početna ispitivanja u okviru eksperimentalnog dela imaće za cilj utvrđivanje uticaja dodatka fino samlevenog CRT-a na osobine sveže cemente paste. U ovom delu eksperimenta biće ispitane sledeće osobine cemente paste: standardna konzistencija, vreme vezivanja i stalnost zapremine. Nastavak eksperimentalnog dela obuhvata ispitivanje svojstava cementnog maltera: konzistencija, zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku i savijanju, skupljanje maltera i otpornost na dejstvo mraza.

Takođe, cilj istraživanja će biti i utvrđivanje sveobuhvatnog uticaja katodnog stakla na različite osobine svežeg i očvrslog betona. U tom smislu, biće sprovedena sledeća eksperimentalna istraživanja na svežem betonu: određivanje konzistencije sleganjem, određivanje sadržaja uvučenog vazduha i određivanje zapreminske mase svežeg betona. Na očvrsлом betonu biće sprovedena sledeća ispitivanja: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, modul elastičnosti, čvrstoća prionjivosti, udarna otpornost, skupljanje betona, merenje površinske tvrdoće sklerometrom i merenje brzine ultrazvučnog impulsa.

Jedan od najvažnijih ciljeva je utvrđivanje trajnosti predmetnih betona što podrazumeva sledeća ispitivanja: ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza, ispitivanje otpornosti površine betona na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, otpornost na dejstvo sulfata, ispitivanje dubine prodiranja vode pod pritiskom, otpornost prema habanju brušenjem, ispitivanje eluata dobijenih izluživanjem, kao i ispitivanje radioaktivnosti. Posebna pažnja, u domenu trajnosti betona, biće posvećena ispitivanju alkalno - silikatne reakcije. Veliki broj publikovanih rezultata ukazuje na to da se ova reakcija odvija na kontaktu između zrna stakla i cementnog kamena. Međutim, najnovija istraživanja u svetu pokazuju da se ova reakcija zapravo odvija u mikroporslinama staklenog granulata. Kako bi se stekao što bolji uvid u to da li u eksperimentalnom betonu dolazi do ASR-a i gde se ova reakcija zapravo odvija, biće sprovedena i mikroskopska analiza na odgovarajućim uzorcima pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (*SEM analiza*) i EDS analiza.

1.3. Metodologija istraživačkog rada

Polazne hipoteze koje treba dokazati su:

- upotreba fino samlevenog stakla od katodnih cevi kao mineralnog dodatka cementnom malteru i betonu je moguća i opravdana;

- zamena dela cementa fino samlevenim CRT staklom u malteru i betonu do određenog procenta neće negativno uticati na njihova mehanička svojstva i trajnost;
- dodatak fino samlevenog CRT stakla na celokupnu količinu cementa u malteru i betonu, u malom procentu, dovešće do poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava i trajnosti;
- zamena dela cementa ili dodatak CRT stakla neće štetno uticati na životnu sredinu.

Ove hipoteze treba dokazati primenom eksperimentalnih metoda. U eksperimentu će se odgovarajući uticajni faktori varirati (*procenat zamene cementa recikliranim staklom*), dok će drugi ostati konstantni (*konzistencija betona, vodocementi faktor itd.*). Dobijeni eksperimentalni rezultati biće obrađeni metodama matematičke statistike, nakon čega će biti sprovedena i komparativna analiza. Komparacijom dobijenih rezultata ispitivanja očekuje se da će polazne hipoteze biti dokazane.

1.4. Struktura doktorske disertacije

Prvo poglavlje doktorske disertacije predstavlja uvodni deo u kome su definisane postavke problema, željeni ciljevi eksperimentalnog istraživanja, kao i sama metodologija istraživačkog rada.

U drugom poglavlju ukratko je prikazan izgled katodne cevi i ukazano je na količine katodnog otpada koje se generišu širom sveta. U tom smislu dat je pregled količina katodnog otpada i problemi koji se javljaju u procesu skladištenja i reciklaže globalno u svetu, u SAD-u, Kini, Evropi i u Republici Srbiji. Detaljno je objašnjen proces reciklaže i tehnologija rasklapanja ove vrste ekrana.

Treće poglavlje čini "*State of the art*", odnosno pregled dosadašnjeg stanja u oblasti istraživanja upotrebe CRT stakla za izradu novih proizvoda. Najviše pažnje posvećeno je pregledu radova vezanih za istraživanje mogućnosti primene upotrebe stakla za izradu maltera i betona. S obzirom da su istraživanja u svetu podeljena na upotrebu otpadnog stakla kao zamene dela punioca i kao zamene dela cementa pri izradi maltera i betona, u skladu sa tim izvršena je i podela na odgovarajući broj podpoglavlja.

Četvrto poglavlje se bavi istraživanjem mogućnosti nastanka alkalno - silikatne reakcije u malteru i betonu sa dodatkom stakla. Ovoj reakciji je posvećena posebna pažnja iz razloga što njena eventualna pojava može da ograniči upotrebu otpadnog stakla, poput CRT-a, u procesu izrade cementnih kompozita. U tom smislu objašnjen je mehanizam nastanka

alkano - silikatne reakcije, prevencija njene pojave, kao i uticaj finoće mliva i hemijskog sastava recikliranog stakla na mogućnost pojave ove štetne reakcije.

U petom poglavlju dat je pregled prethodnih eksperimentalnih istraživanja sprovedenih u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko - arhitektonskog fakulteta u Nišu. Najveće dileme koje su se javile u radu sa katodnim staklom poput odabira odgovarajuće finoće mliva stakla i ispitivanja alkalno - silikatne reaktivnosti stakla "otklonjene" su u istraživanjima koja su prethodila izradi ove doktorske disertacije. Na kraju petog poglavlja definisani su i najvažniji zaključci ovih istraživanja, što je poslužilo kao osnov za precizno definisanje eksperimentalnog dela doktorske disertacije.

Šesto poglavlje predstavlja sopstveno eksperimentalno istraživanje uticaja dodatka fino samlevenog recikliranog stakla od katodnih cevi na svojstva cementnog maltera i betona. Na početku poglavlja prikazan je program eksperimentalnog istraživanja i materijali korišćeni u eksperimentu. Nakon toga dat je sastav malterskih i betonskih mešavina i prikazani su rezultati sprovedenih ispitivanja.

Sedmo poglavlje se odnosi na analizu i diskusiju eksperimentalnih rezultata. Dobijeni rezultati obrađeni su metodama matematičke statistike. Analizirani rezultati prikazani su grafički putem dijagrama. Zatim je sprovedena komparativna analiza rezultata, nakon čega je urađena diskusija.

U osmom poglavlju su navedeni najvažniji zaključci eksperimentanog istraživanja. Dat je konačan sud o mogućnosti upotrebe samlevenog katodnog stakla u procesu izrade maltera i betona, kao i uticaj prisustva stakla na trajnost ovih kompozita. Ovi su zaključci u isto vreme dali neke nove ideje i pravce daljeg istraživanja u ovoj oblasti.

U devetom poglavlju navedena je literatura korišćena tokom izrade ove doktorske disertacije.

Deseto poglavlje čini lista slika i spisak tabela. U želji da eksperimentalni deo ne bude previše opterećen velikim brojem pojedinačnih rezultata kao i pratećom foto dokumentacijom, formirano je ukupno dvadeset tri priloga.

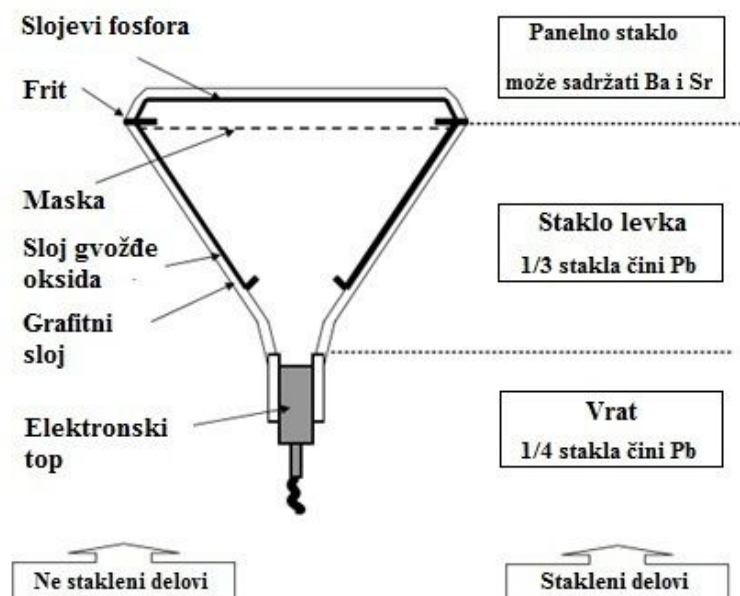
2. KATODNO STAKLO TELEVIZIJSKIH I KOMPJUTERSKIH MONITORA

2.1. Izgled katodne cevi i princip rada

Nemački fizičar i pronalazač Ferdinand Braun projektovao je prvu staklenu katodnu cev 1897. godine. Prvu serijsku proizvodnju televizijskih uređaja započela je nemačka firma Telefunken 1934. godine. Sredinom dvadesetog veka uvedene su katodne cevi u boji, a krajem sedamdestih godina počinje proizvodnja kompjuterskih monitora sa katodnim cevima [1].

Katodna cev je specijalna vakuumaska cev koja se sastoji od sledećih delova (*slika 2.1.*): elektronski top, kalem za fokusiranje snopa, otklonski kalem, priključak anode, anoda, fosforni sloj i povećani deo ekrana sa tačkama slike. Nakon zagrevanja katode, dolazi do pojave katodnog zračenja koje stvara elektronski top. Elektroni koje katoda emituje su negativno naelektrisani i njih privlači pozitivno naelektrisana anoda. Negativno naelektrisane elektrone specijalni usmerivači usmeravaju pomoću magnetnog i električnog polja ka anodi i ekranu. Ekran je prekriven fosforim materijalom koji svetli ako je “pogođen” elektronom. Fosforni sloj se sastoji od crvenih, zelenih i plavih zona pomoću kojih se dobijaju osnovne boje na ekranu. Ima nekoliko načina filtriranja slike, a najpoznatiji su: Maska (*Shadow mask*), Roštilj (*Aperture - grill*) i Maska sa prorezom (*Slot-mask*) pomoću kojih se formira konačna slika na ekranu koju vidimo [2].

Postoje dve vrste katodnih cevi: crno – bele i u boji. Tri osnovna staklena elementa CRT ekrana su: vrat (*neck glass*), levak (*funnel glass*) i panel (*panel glass*). Njihov maseni udeo se razlikuje i iznosi: 1%, 33% i 66%, respektivno. Vrat, iako maseno malo zastupljen u monitoru, sadrži oko 25% olova, što je više nego kod ostalih delova. Levak je najveći deo katodne cevi i sadrži oko 20% olova. Panel je prednji, vidljivi deo katodne cevi koji gotovo da ne sadrži olovo (0-3%). Panel je premazan slojevima barijuma i stroncijuma koji imaju ulogu da štite korisnika od štetnog uticaja UV i X-rej zračenja koju stvara elektronski top [3]. Panelni deo i deo levka međusobno su povezani olovnom glazurom (*frit*). Kao što se iz navedenog može zaključiti, sve tri vrste stakla se po hemijskom sastavu veoma razlikuju. Nakon procesa reciklaže, rastavljanja na osnovne delove i čišćenja od štetnih materija, o čemu će više reći biti u narednom poglavlju, CRT staklo se može primeniti u keramičarskoj, građevinskoj ili industriji proizvodnje nakita.



Slika 2.1. - Izgled katodne cevi i njeni osnovni delovi [3]

2.2. Količine otpadnog CRT stakla

2.2.1. Količine katodnog stakla u svetu

Elektronska industrija je jedna od najvažnijih u svetu i istovremeno industrija koja se najbrže razvija. Njen rast i razvoj u poslednjih par decenija otvorio je brojna radna mesta, ubrzao tehnološki napredak i, u isto vreme, doprineo stvaranju značajne količine elektronskog otpada (*e-waste*) nakon zastarevanja elektronskih uređaja. E – otpad, kako se označava u stranim publikacijama, se uvećava daleko brže od drugih čvrstih otpada u svetu. Prema procenama Univerziteta Ujedinjenih Nacija elektronski otpad će se uvećati i dostići gotovo 50 miliona tona do 2018. godine [4]. U tabeli 2.1. prikazane su količine generisanog E- otpada u svetu. Na primer, od ukupno 41,8 miliona tona elektronskog otpada u 2014. godini, 6,3 miliona tona čine televizijski i kompjuterski ekrani. Od toga 2,5 miliona tona TV i PC ekrana završi na otpadu u Aziji, zatim slede Evropa i Amerika sa po 1,7 miliona tona, dok se ostatak nakupi na otpadima u Africi i Australiji.

Iako su televizori sa katodnim cevima praktično prestali da se proizvode, količine otpadnog katodnog stakla se i dalje uvećavaju. Rast proizvodnje katodnog stakla (*Cathode Ray Tube*) uvećavao se sa sve većom potražnjom za televizorima i kompjuterskim monitorima do kraja prošlog veka. Međutim, napretkom tehnologije pojavile su se i nove vrste televizijskih i kompjuterskih ekrana poznate pod nazivom TFT (*Thin Film Transistor*) i

LCD (*Liquid Crystal Displays*) koji su od početka dvadeset prvog veka u potpunosti zaustavile dalju proizvodnju katodnih ekrana.

Tabela 2.1. - Globalne količine generisanog E – otpada u svetu [4]

Globalne količine generisanog E- otpada u svetu			
Godina	Generisani otpad [Mt]	Populacija [milijarde]	E – otpad [kg/stanovik]
2010	33,8	6,8	5,0
2011	35,8	6,9	5,2
2012	37,8	6,9	5,4
2013	39,8	7,0	5,7
2014	41,8	7,1	5,9
2015	43,8	7,2	6,1
2016	45,7	7,3	6,3
2017	47,8	7,4	6,5
2018	49,8	7,4	6,7

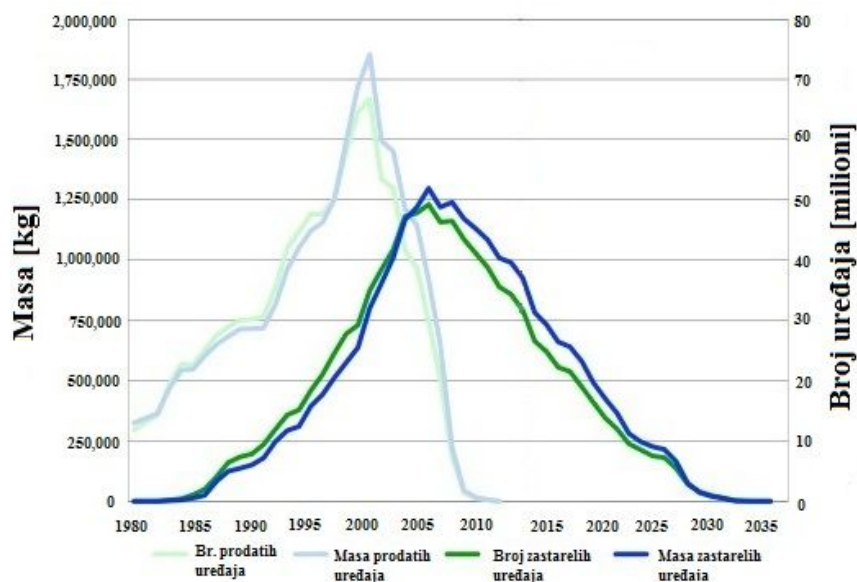
U tabeli 2.2. prikazani su statistički podaci Marije Sokolof i saradnika [5], koji potvrđuju da se proizvodnja CRT stakla drastično smanjila početkom ovog veka. U zemljama u razvoju, potražnja za televizorima sa katodnim cevima nije u potpunosti prestala. Razlog tome jeste što su ovakvi televizori jeftiniji od TFT i LCD televizora. Svakako da će i u ovim zemljama u narednim godinama prodaja televizora sa katodnim cevima u potpunosti prestati. S obzirom da je potražnja za novim CRT uređajima svedena na minimum na deponijama širom sveta javio se veliki problem sa nagomilanim zastarelim uređajima čija reciklaža i upotreba za nove ekrane više nije moguća. Hemijski sastav katodnog stakla u velikoj meri otežava dalju primenu stakla za proizvodnju nekog drugog proizvoda. Ipak, brojna istraživanja u proteklom periodu ohrabruju i stvaraju mogućnost da se i ova vrsta stakla uspešno upotrebi, što će svakako dati nemerljiv doprinos ekologiji i zaštiti životne sredine.

Tabela 2.2. - Broj proizvedenih ekrana u svetu u milionima jedinica [5]

Tip ekrana	1998	2002	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CRT	80,7	83,3	36	21	18	12	7	5	5
LCD	1,3	32,2	178	197	205	222	238	250	261
Ukupno:	82,0	115,5	214	218	223	234	245	255	266

2.2.2. Količine katodnog stakla u Sjedinjenim Američkim Državama

Prikupljanje i reciklaža E – otpada u Americi se uvećavala sa razvitkom industrije u poslednjih par decenija. Prikupljeno otpadno CRT staklo se dalje tretira na dva načina: proizvodnja novih CRT uređaja ili odvoženje do topionica kako bi se olovo odvojilo od stakla. Do pre nekoliko godina, isključivo se prvi način primenjivao za reciklažu katodnog stakla. Međutim, pojavom savremenih ekrana, potražnja za novim CRT televizorima i monitorima se višestruko smanjila, tako da danas postoje samo četiri fabrike u Severnoj Americi koje proizvode nove katodne ekrane, a samo jedna se nalazi u Sjedinjenim Državama [6].



Slika 2.2. - Količina CRT otpada u periodu 1980-2033. godina u SAD-u [6]

U 2001. godini, u Sjedinjenim Državama vrednost proizvodnje monitora i televizora sa CRT-om dostigla je 19,5 milijardi dolara, dok je samo te godine proizvedeno oko 108 miliona uređaja. Međutim, vrlo brzo usled napretka tehnologije, CRT uređaji bivaju zamenjeni novim ekranima. Na taj način, u poslednjih petnaestak godina, ogromne količine CRT-a završavaju na otpadu. CRT uređaji čine čak 43% elektronskog otpada u Americi. Procena je da u Americi ima oko 232 miliona CRT uređaja koji se i dalje koriste, tako da značajne količine tih uređaja završe na otpadu svake godine, uprkos činjenici da se ovi uređaji gotovo ne prodaju. Smatra se da će oko 85% ovih uređaja biti prikupljeno u narednih desetak godina. Postojeći reciklažni centri nemaju dovoljno kapaciteta za odlaganje i recikliranje procenjenih količina CRT uređaja. Dat je predlog od strane nadležnih organa da se u

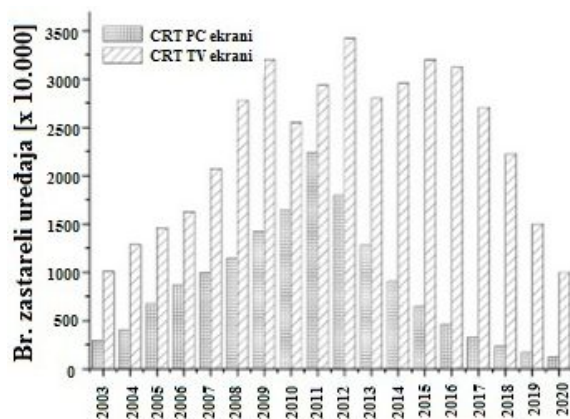
narednom periodu izgrade još četiri reciklažna centra koja bi prikupljala i tretirala katodno staklo.

Procenjeni vek trajanja CRT ekrana je četiri do pet godina, dok je vek trajanja CRT televizora znatno duži i iznosi od četrnaest do dvadeset pet godina. Na osnovu veka trajanja izvršena je procena količine CRT otpada koji će se prikupiti do 2033. godine (*slika 2.2.*). Veliki problem koji se javlja u procesu reciklaže katodnog stakla je taj što je cena koštanja reciklaže katodnih ekrana skoro dva puta veće od cene koštanja reciklaže drugog elektronskog otpada. U Americi cena transporta i kompletne reciklaže 1 kg stakla košta između 14 i 24 dolar centi. U budućnosti, izgradnjom novih postrojenja za reciklažu CRT ova cena će se smanjiti.

2.2.3. Količine katodnog stakla u Kini

Kina je najveći svetski proizvođač, potrošač i izvoznik elektronske opreme. U isto vreme ona se susreće sa velikim problemima nastalim usled nagomilavanja E – otpada i ilegalnog uvoza istog iz drugih zemalja sveta [7]. Kao odgovor na značajno povećanje elektronskog otpada i moguće štetne posledice na životnu sredinu, kineska vlada je donela set mera i zakona kojima se uređuje prikupljanje tog otpada, skladištenje i proces reciklaže istog. Ne postoje potpuno tačni podaci koliko se na godišnjem nivou prikupi CRT uređaja, tako da su podaci prikazani u nastavku rezultat opsežnih procena na osnovu životnog veka televizora (*10 godina*) i monitora (*5 godina*) u Kini [8]. Zaključeno je da će se količina otpadnog katodnog stakla značajno povećavati do 2017 godine (*slika 2.3.*).

Televizorski ekrani čine najveći deo E – otpada u Kini sa učešćem od gotovo 50%. Akcijom “Staro za novo” od 2009. godine do 2011. godine prikupljeno je više od 14 miliona TV uređaja u 28 kineskih provincija. U poslednjih par decenija u Kini se najčešće primenjuje neformalan način reciklaže katodnih ekrana. Ovaj način podrazumeva ručno rastavljanje ekrana u malim privatnim firmama. Na taj način se brzo odvajaju najvredniji delovi ekrana kao što su elektronski top i maska. Plastika i gvožđe se prodaje lokalnim sakupljačima sekundarnih sirovina dok se panelno staklo i staklo koje čini levak meša i zatim ostavlja na deponijama. Ovaj način reciklaže je svakako najjeftiniji jer se koristi jednostavan alat, vredni delovi ekrana sa brzo prodaju, ali se sa druge strane stvara veliki ekološki problem odlaganjem stakla na otvorenim deponijama, gde štetno olovo usled izluživanja može dospeti u vodu za piće. Oko 700 hiljada ljudi je uključeno u ovaj vid reciklaže pri čemu se oko 60% E- otpada tretira upravo na ovaj način.



Slika 2.3. - Procenjena količina otpadnih TV i PC monitora u Kini do 2020. godine [8]

Od 2003. godine, sa pojavom novih zakona koji ograničavaju neformalan način reciklaže E – otpada, javlja se formalan način recikliranja koji podrazumeva upotrebu modernijih tehnologija i postrojenja za reciklažu. U ovim postrojenjima se razdvajanje stakla koje čini levak i panelnog stakla najčešće vrši pomoću užarene žice. Ova metoda nije mnogo skupa i zahteva malo radne snage. Reciklažni centri su razvili i poluautomatsku metodu za koju treba tri operatera, a vreme rasklapanja jednog ekrana je od 3-5 minuta. Metoda zagrejanje žice je najpogodnija za ekrane dijagonale od 17 do 25 inča. Ova metoda ima i svoje mane, a to su povećana buka prilikom procesa reciklaže i emisija prašine koja može da šteti ljudskom zdravlju. Još jedna metoda za odvajanje metalnih delova ekrana od ostalih je metoda “termalnog acidnog kupatila”. I kod ove metode prednost je niska cena reciklaže, a glavni nedostatak je taj što se ne može izvršiti potpuno odvajanje panelnog stakla i stakla levka. Najsavremenije lasersko sečenje i razdvajanje elemenata ekrana za sada se ne primenjuje u Kini zbog visoke cene.

Usled visoke cene koštanja reciklaže CRT stakla i male vrednosti dobijenih sekundarnih sirovina, nakon reciklaže u Kini se samo jedan mali deo otpadnog stakla reciklira na formalan način uz poštovanje svih zakona koji štite zdravlje ljudi i životnu sredinu. Najveći deo CRT stakla prolazi kroz delimično recikliranje, dok se potencijalno opasni delovi ekrana na kraju odlažu na otvorenim deponijama. Trenutno u Kini postoje samo tri kompanije koje proizvode nove CRT ekrane. Ova tri proizvođača koriste oko 100 hiljada tona prikupljenog otpadnog stakla godišnje, što predstavlja samo mali deo ukupno generisanog stakla u Kini. Prema istraživanjima Quinghua Univerziteta ukupna količina prikupljenog otpadnog CRT stakla premašiće 5,2 miliona tona, od čega je 3,5 miliona tona panelno CRT staklo u boji, 1,7 miliona tona staklo levka i 0,7 miliona tona je crno-belo CRT staklo.

2.2.4. Količine katodnog stakla u Evropi

Količine otpadnog stakla u Evropi se uvećavaju svake godine za 3-5%, što je otprilike tri puta brže nego bili koja druga vrsta čvrstog otpada. Procenjeno je da je samo u 2009. godini oko 5 miliona tona E – otpada prikupljeno i uskladišteno što predstavlja povećanje od gotovo 120% u odnosu na 1999. godinu. Prodaja CRT uređaja u Evropi dostigla je rekordnih 20 miliona jedinica 1996 godine. Od te godine dolazi do laganog opadanja prodaje da bi deset godina kasnije bila prepolovljena. Od 2011. godine CRT uređaji se praktično više ne prodaju u Evropi, ali se u isto vreme javlja porast CRT otpada na deponijama [9]. Danas nije moguće naći CRT kompjuterski monitor ili televizor u prodavnicama elektronske opreme. Međutim, i dalje ima takvih uređaja u domaćinstvima i procena je da na godišnjem nivou na deponijama u Evropi završi oko 50 – 150 hiljada tona zastarelih CRT ekrana. Predviđanja Fernande Anderole i saradnika je da se količina prikupljenog CRT stakla neće smanjivati u narednom periodu [10].

Kao i na drugim kontinentima, upotreba recikliranog CRT stakla u Evropi u otvorenoj petlji reciklaže (*primena stakla kao sirovine za neki drugi proizvod*) nailazi na određene prepreke. Evropski katalog za otpad je CRT staklo svrstao u opasan otpad zbog prisustva olova [11]. Ovde se još jednom napominje da se staklo panela, levka i vrata CRT ekrana razlikuje po hemijskom sastavu i po količini olova koje sadrži. U tom smislu njegova primena nije moguća za proizvodnju nove staklene ambalaže i prozora bez prethodnog uklanjanja štetnog olova. Međutim, u Evropi je urađeno i trenutno je u toku više projekata čiji je cilj pronalažanje alternativne upotrebe CRT stakla u proizvodima u kojima je određena količina olova dopuštena i nema štetne posledice na životnu okolinu. Dosadašnja istraživanja na tom polju u Evropskoj uniji ukazuju na mogućnost primene reciklažnog CRT stakla za izradu: opeka, keramičkih pločica, za izradu specijalnih prostorija za odlaganje i čuvanje nuklearnog otpada, kao agregata u građevinarstvu. U narednim poglavljima biće više reči o mogućnosti primene CRT stakla za izradu pomenutih proizvoda.

Nulife Glass Ltd i Sweep Kuusakoski Ltd su trenutno vodeće fabrike u Evropi koje izdvajaju olovo iz CRT stakla. Obe fabrike se nalaze u Velikoj Britaniji. Olovo se iz stakla izdvaja u pećima uz pomoć odgovarajućih hemikalija. Prema navodima ovih kompanija peći koje oni koriste su jedinstvene u svetu jer se proces izdvajanja toksičnog olova radi na bezbedan i ekološki način. Prilikom ovog procesa nema otpada i izbegava se izvoz otpadnih materija u druge zemlje. Kompanija Nulife Glass poseduje peć koja dnevno može da preradi oko 10 tona stakla koje potiče od levka CRT ekrana. To je ekvivalentno količini stakla levka

koje se dobija prikupljanjem 60 tona televizora, pri čemu se od jednog televizora dobije oko 1 kg olova. Odvojeno olovo se potom dalje koristi kao sirovina za nove proizvode [12, 13].

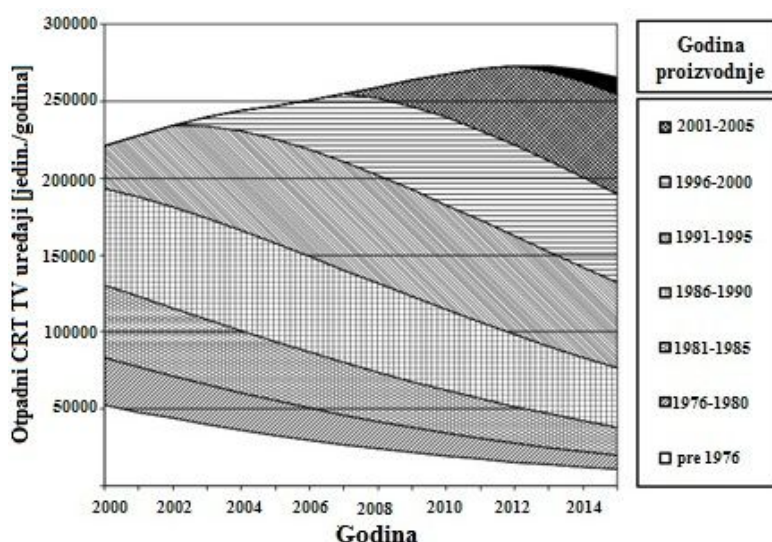
U Švedskoj se celokupan proces reciklaže katodnih ekrana vrši unutar same zemlje. Procena je da se 90-95% prikupljenih televizijskih i kompjuterskih uređaja reciklira i upotrebljava za izradu novih proizvoda ili se koristi kao izvor energije. Stena Recycling je vodeća kompanija u Švedskoj za recikliranje CRT i LCD monitora. Prikupljeni uređaji se ručno razdvajaju na sastvane komponente koje se zatim razvrstavaju na: metalne, plastične, električne delove (*na pr. transformator*) i elektronske delove (*napr. štampana ploča*) itd. Metalne komponente se zatim dalje razvrstavaju i tretiraju prema vrsti metala u odgovarajućim centrima za preradu metala. Katodno staklo se lomi, zatim razvrstava prema tipu postupnom flotacijom (*staklo sa sadržajem barijum-oksida, staklo sa sadržajem olovo – oksida*). Flotacija je proces odvajanja hidrofobnih čvrstih supstanci od hidrofilnih supstanci pomoću mehurića vazduha. Dodavanjem vazduha u suspenziju, u kojoj se nalaze dodaci za lakše stvaranje pene, stvaraju se mehurići vazduha koji se hvataju za hidrofobne čvrste delove i iznose ih na površinu suspenzije, dok se hidrofilni delovi talože na dnu suspenzije. Prečišćeno staklo se zatim koristi za izradu tuš kabina ili, alternativno, kao konstruktivni materijal u okviru nepropusnih zidova deponija [14]. U tabeli 2.3. je data količina i ekonomska vrednost recikliranih materijala u Švedskoj koji potiču od prikupljenih ekrana i monitora u 2016. godini. Procena švedske organizacije Elkretsen koja je zadužena za elektronski i električni otpad je da će se u narednim godinama povećati količina prikupljenog CRT stakla usled isteka veka trajanja ovih uređaja i promene tehnologije izrade ekrana.

Tabela 2.3. - Količina i vrednost recikliranih ekrana i monitora u 2016. godini u Švedskoj [14]

	Zlato	Plastika	Paladijum	Bakar	Kalaj	Gvožđe	Olovo	Srebro
Tone	0,645	8.888,1	0,123	330,6	87,348	8.860.621	572.417	1.721
Milioni €	21,984	10,666	2,855	1,719	1,485	1,063	0,973	0,885
	Alum.	Staklo	Nikl	Volfram	Indijum	Barijum	Molibden	Antimon
Tone	447.647	8.192.824	19.415	1.947	0,243	0,098	1.947	5.073
Milioni €	0,671	0,410	0,272	0,138	0,134	0,054	0,041	0,039
	Titanijum	Itrium	Ferit	Cink	Evropij.	Terbijum	Vanadij.	Galijum
Tone	1.947	0,147	47.122	3.116	0,003	0,003	0,098	0,009
Milioni €	0,021	0,007	0,006	0,005	0,002	0,002	0,002	0,002

Wolfgang Walk, nemački istraživač sa departmana za Tehnologiju iz grada Karlsruhe, sproveo je studiju slučaja 2008. godine za oblast Baden – Württemberg kako bi predvideo

količinu CRT otpada koja će se akumulirati u pomenutoj pokrajini koja broji 10,5 miliona stanovnika. Za ovo predviđanje uzeti su u obzir rok trajanja CRT ekrana i savremeni tehnološki trendovi, slika 2.4. Wolfgang zaključuje, da se uz odgovarajuće izmene ulaznih parametara, njegov metod za predviđanje količine otpadnih CRT ekrana može primeniti i u drugim državama.



Slika 2.4. - Količina otpadnih CRT televizora po godinama u oblasti Baden – Wurttemberg [15]

U Francuskoj postoji oko stotinu preduzeća koja se bave preradom i reciklažom elektronskog otpada. U 2011. godini u ovim preduzećima prikupljeno je oko 100 hiljada tona ekranskog stakla. Eco – systemes, Ecologic i ERP su tri najveća reciklažna centra koja su unapredila proces prikupljanja i reciklaže CRT stakla u Francuskoj i omogućila da nivo prerade ekrana bude u skladu sa evropskom direktivom 2012/19/EU, tj. da se 65% reciklira [16].

Španska kompanija LIFE ClayGlass i američka kompanija Camarcho Recycling su radile na zajedničkom projektu u cilju pronalaženja pogodnog rešenja za upotrebu prikupljenog CRT stakla. Njihovo rešenje ogleda se u primeni katodnog stakla u keramičkoj industriji za proizvodnju pločica [17]. Pritom se može koristiti i panelno i staklo levka (*koje sadrži olovo*). Navedene kompanije su dobile podršku od strane američke Agencije za zaštitu životne sredine (*U.S. Environmental Protection Agency*) kao i Evropske komisije (*European Commission*). SAD su 2015. godini izvezle u Španiju oko 67 hiljada tona CRT stakla kako bi se upotrebilo za izradu pločica [18].

2.2.5. Količine katodnog stakla u Srbiji

U Srbiji postoji više reciklažnih centara koji se bave sakupljanjem i preradom CRT stakla. Reciklažni centri koji na godišnjem nivou prikupe najviše stakla su: "Jugo – Impex E.E.R." d.o.o. iz Niša, "SET reciklaža" iz Beograda, "Božić i sinovi" iz Pančeva i "Eko Metal" iz Vrdnika. U tabeli 2.4. prikazane su količine stakla koje su pomenuta preduzeća prikupila u proteklih nekoliko godina.

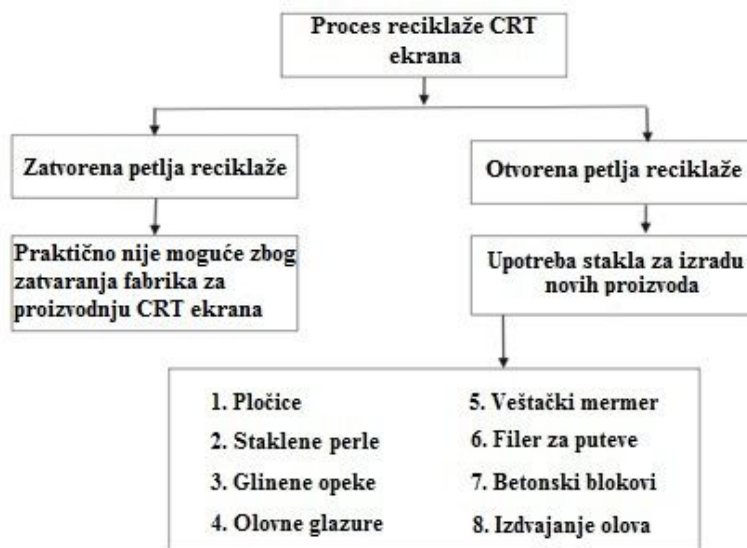
Tabela 2.4. - Količine prikupljenog stakla u Srbiji

Preduzeće:	Sakupljena količina po godinama [kg]		
	2014 god.	2015 god.	2016 god.
Jugo – Impex E.E.R.	1.287.194	1.892.388	2.218.175
Božić i sinovi	315.750	522.936	728.955
EKO metal	180.627	90.046	132.995
SET Reciklaža	~ 9.061.000 (za tri godine)		

Tehnologija razdvajanja CRT ekrana na sastavne delove u potpunosti prati najsavremeniju tehnologiju koja se koristi i u razvijenim zemljama sveta. Preduzeće Jugo – Impex katodne ekrane reciklira primenom tehnologije usijane žice (*Hot Band Technology*). Oko dve trećine prikupljenog stakla čini staklo bez olova, dok jednu trećinu čini staklo sa olovom. Preduzeće “Božić i sinovi” vrši rasklapanje katodnih ekrana pomoću dijamantskog sečiva (*Diamond Saw Method*). Ova aparatura omogućava rasklapanje CRT ekrana dijagonale od 14 do 32 inča. Kapacitet postrojenja je 60 do 100 komada za 60 minuta. Preduzeće “Božić i sinovi” panelno staklo monitora odlaže na deponiju ili zbrinjava kod drugih operatera, dok konusno staklo predaje operaterima koji imaju dozvolu za izvoz te vrste otpada. Prema podacima koji su dobijeni od strane Udruženja Reciklera Srbije, preduzeće "SET Reciklaža" spada među najveće sakupljače CRT stakla u Srbiji. Ovo preduzeće je u periodu od 2014. godine do 2017. godine sakupilo 6091 tona CRT stakla, dok je u prvih šest meseci 2018. godine pomenuto preduzeće prikupilo 930 tona katodnog stakla. Na osnovu prikazanih vrednosti u tabeli 2.4. može se zaključiti da se količina prikupljenog stakla u Srbiji uvećava svake godine. Ovaj trend nagomilavanja otpadnog CRT – a prati trend uvećanja ove vrste otpada u Evropi i svetu.

2.2.6. Proces reciklaže i tehnologija rasklapanja CRT ekrana

Reciklaža CRT otpada je svakako jako važan proces sa ekološkog aspekta. Postoje dva moguća sistema reciklaže – otvorena i zatvorena reciklažna petlja. Izgled otvorene i zatvorene petlje reciklaže katodnog stakla prikazan je na slici 2.5. U oba slučaja reciklaže javljaju se određeni problemi. Zatvorena petlja podrazumeva reciklažu starih ekrana i proizvodnju novih CRT ekrana. Praktično da više nema fabrika koje proizvode nove CRT ekrane tako da se može konstatovati da zatvorena petlja reciklaže više nije opcija. Otvorena petlja koristi stare CRT ekrane za proizvodnju novih i drugačijih proizvoda. Proces reciklaže stakla započinje njegovim prikupljanjem, privremenim skladištenjem i čišćenjem ekrana. S obzirom da se katodno staklo smatra opasnim otpadnim materijalom, transport i skladištenje istog mora da zadovolji posebne regulative koje su propisane u slučaju rukovanja takvom vrstom otpadnog materijala. Rasklapanje CRT monitora na osnovne komponente je sledeći korak u procesu reciklaže. Rasklapanje se radi ručno, a komponente se odvajaju jedna po jedna. Polimeri se usitnjavaju i šalju u klasične reciklažne sisteme. Metalni delovi se šalju u topionice na dalju obradu dok se štampane ploče prosleđuju specijalizovanim reciklažnim centrima.



Slika 2.5. - Izgled otvorene i zatvorene reciklažne petlje

Najvažniji korak u procesu reciklaže CRT stakla je razdvajanje stakla po vrstama. Separisanje po vrstama je neophodno jer tri vrste stakla u okviru katodne cevi imaju različiti hemijski sastav, pa shodno tome, i različite metode reciklaže. Uobičajeno je da se prvo polomi vrat katodne cevi čime se dekompresuje unutrašnjost cevi. Razdvajanje staklenih delova se vrši na više načina: vrelom žicom, dijamantskom testerom, mlaznim sečenjem i laserskim

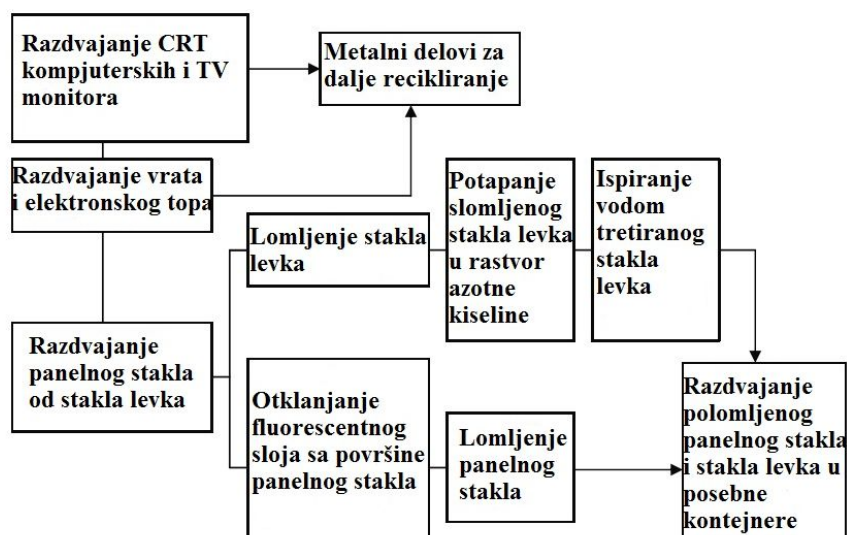
sečenjem. Ako panelno staklo sadrži određenu količinu olova, njegova reciklaža se ne može direktno nastaviti. Levak i elektronski top se mogu koristiti kao sirovine za proizvodnju novog stakla koje sme da sadrži olovo, kao što su kristalno staklo i staklo za zaštitu od radioaktivnog zračenja, pa čak i za proizvodnju nakita. Količina olova u staklu varira od 1% kod ukrasnog nakita do 65% kod zaštitnog stakla koje treba da štiti od radijacije. Takođe, moguća je i upotreba stakla koje sadrži olovo za proizvodnju nekih proizvoda u čijem sastavu je dozvoljeno prisustvo izvesne količine olova, kao što su: keramičke pločice, staklene perle, opeke od gline, olovne providne glazure, filer za puteve, veštački mermer i peščano – cementne opeke.

Proces reciklaže CRT stakla ilustrovan je na slici 2.6. Ovaj proces započinje odvajanjem elektronskih delova, plastičnog kućišta i metalnih delova. Panelno staklo se od stakla levka najčešće odvaja na jedan od već pomenutih načina. S obzirom da se panelno i staklo levka razlikuju po sastavu, ove dve vrste stakla se u nastavku različito tretiraju. Proces reciklaže panelnog stakla uključuje uklanjanje sloja fluorescencije, nakon čega se ono mehaničkim delovanjem lomi na sitnije delove. Tako usitnjeno panelno staklo može se upotrebiti na različite načine u industriji o čemu će više reći biti poglavlju 3.

U slučaju stakla levka, uzevši u obzir da ono sadrži 22 - 25% olova, neophodno je da se sprovede specijalan proces čišćenja kako bi ono bilo spremno za ponovnu upotrebu. Nakon usitnjavanja staklo levka se potapa u 5% rastvor azotne kiseline (HNO_3) u trajanju od 180 minuta kako bi se izdvojilo olovo sa površine ovog stakla. Tom prilikom dolazi do hemijske reakcije između olovo oksida (PbO) i azotne kiseline [19]:



Nakon sprovedenog potapanja, staklo se ispira čistom vodom kako bi se uklonili ostaci kiseline. Korišćena voda nakon ispiranja sadrži visok procenat olova Pb i smatra se opasnim otpadom. Ovu otpadnu vodu je neophodno sakupiti i dalje tretirati kako nebi zagadila životnu sredinu [19].



Slika 2.6. - Šematski prikaz procesa reciklaže CRT stakla kompjuterskih i tv ekrana [19]

Jedna od najčešće primenjivanih tehnologija za rasklapanje CRT ekrana i monitora je takozvana tehnologija vrele žice. Suština ove metode jeste da se žicom zagreva spoj između panelnog stakla i stakla levka, usled čega dolazi do kontrolisanog razdvajanja ova dva sastavna dela ekrana. Na slici 2.7. je prikazan izgled automatskog separatora CRT koje koristi preduzeće Jugo – Impex E.E.R. u svom pogonu. Separator se sastoji od uređaja za iscertavanje (Slika 2.7., *levo*), usijane žice za razdvajanje sastavnih delova (Slika 2.7., *desno*) i sistema za prikupljanje fluorescentnih materijala i prašine negativnog pritiska [20]. Ovim separatorom moguće je rastaviti od 80 do 120 ekrana za 60 minuta pri čemu dijagonala ekrana može da varira od 14 do 32 inča.



Slika 2.7. - Sistem za iscertavanje i sistem za razdvajanje panelnog stakla i stakla levka vrelom žicom u preduzeću Jugo – Impex E.E.R.

Tehnologija razdvajanja CRT-a dijamantskom testerom (*Diamond Saw Method*) zasniva se na rotiranju CRT ekrana oko svoje ose dok dijamantske testere seku ekran na

označenom mestu. Pritom se površina testera hladi pomoću odgovarajuće rashladne tečnosti kako bi se kontrolisala temperatura sečiva i sprečilo eventualno deformisanje testere. Ovom metodom moguće je postići čisto razdvajanje delova ekrana, dokle god je CRT ekran u ravni sa sečivom. Ova metoda je pogodna za reciklažu velike količine CRT otpada, ali treba uzeti u obzir da su početna ulaganja u ovakvu tehnologiju jako velika [21, 22]. Na slici 2.8. prikazan je izgled linije za sečenje ekrana sa katodnim cevima pomoću dijamantske testere.



Slika 2.8. - Linija za dijamantsko sečenje CRT ekrana u preduzeću "Božić i sinovi"

Proces rasklapanja katodnih ekrana laserom (*Laser Cutting System*) je sličan metodi pomoću usijane žice. Laserski zrak zagreva spoj između panelnog i levčanog stakla (*slika 2.9.*). Odmah nakon zagrevanja spoj se naglo hladi što izaziva pucanje ekrana na mestu linije spoja. Ova metoda je efikasnija od metode usijane žice, međutim ima i svojih nedostataka. Naime, javljaju se problemi ukoliko je staklo deblje, laser zahteva značajnu količinu energije i sam uređaj je skup.



Slika 2.9. - Proces laserskog razdvajanja panelnog stakla i stakla levka CRT monitora [23]

3. PRIMENA OTPADNOG STAKLA ZA IZRADU NOVIH PROIZVODA

Koncept upotrebe različitih otpadnih materijala za izradu novih industrijskih proizvoda ima dugu i uspešnu istoriju. Do sada su već izvršena opsežna istraživanja upotrebe letećeg pepela, zgure iz visokih peći i silikatne prašine kao mineralnih dodataka pri izradi betona i betonskih prefabrikata. Ovi dodaci, nekada nagomilani na otpadima širom sveta, danas imaju jako uspešnu i rasprostranjenu primenu. Mogućnost primene otpadnog stakla, gde se ubraja i CRT staklo, za izradu novih proizvoda ili kao dodatak postojećim i dalje se intenzivno istražuje.

S obzirom na ranije pomenut hemijski sastav i komplikovan proces reciklaže čini da ponovna upotreba ovog stakla nije jednostavna. U nastavku će biti dat pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti primene različitih vrsta otpadnih stakala za izradu novih proizvoda. Svakako, poseban akcentat je stavljen na upotrebu stakla u građevinskoj industriji, pre svega za izradu maltera i betona [24].

Upotreba otpadnog stakla ima brojne benefite, koji se mogu u najopštijem smislu podeliti u tri grupe: ekološki, ekonomski i inženjerski. Upotrebom otpadnog stakla, na primer kao zamene za deo cementa u malterima i betonima, smanjuje se nagomilavanje stakla na otpadima i smanjuju se negativni ekološki efekti prilikom proizvodnje portland cementa. Da bi se odredila eventualna ekonomska dobit neophodno je izvršiti tehno - ekonomsku analizu koja će obuhvatiti više parametara: cenu koštanja odlaganja otpadnog stakla, transport, reciklažu i proizvodnju novog proizvoda [25].

3.1. Katodno staklo kao sirovina u industriji keramike

M. Dondi [26] i saradnici su ispitivali mogućnost primene katodnog stakla za proizvodnju opeke i crepa. Korišćeno katodno staklo imalo je finoću mliva manju od 1 mm kako bi se time zadovoljio ustaljeni proces proizvodnje opekarskih proizvoda. U eksperimentu je za svaki proizvod napravljeno pet različitih mešavina gline i panelnog stakla i još pet mešavina gline i stakla levka CRT-a. Pritom je variran procenat dodatka stakla od 2% do 5%. Za etalon je uzet reprezentativan uzorak opeke i crepa iz lokalne fabrike. Glina, staklo i voda su ručno mešani. Uzorci su negovani na vazduhu 48 sati, zatim sušeni u peći na temperaturi od 100 °C, posle čega je sledilo pečenje uzoraka na temperaturi od 900 °C, 950 °C i 1000 °C.

Eksperimentalni rezultati ukazuju na to da oba tipa CRT stakla bitno utiču na smanjenje plastičnosti nepečenih proizvoda kao i na povećanje skupljanja prilikom sušenja. Dodavanje 2% katodnog stakla daje zadovoljavajuće rezultate kako kod nepečenih, tako i kod pečenih proizvoda. Dodavanje 5% stakla dovodi do značajnog pada fizičkih i mehaničkih karakteristika. M. Dondi zaključuje da se obe vrste stakla mogu koristiti kao dodaci prilikom proizvodnje opeke i crepa u granicama od 2% do 4%.

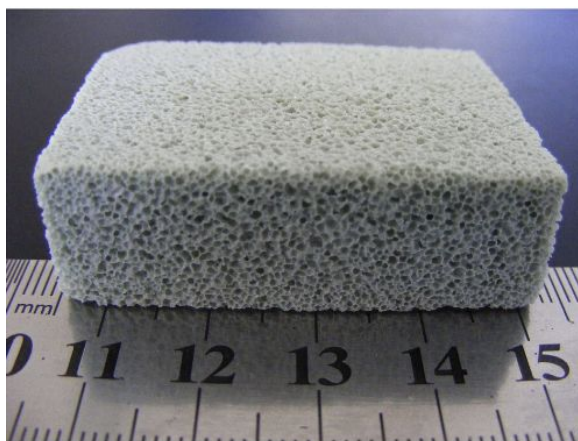
Procena je da se u Italiji godišnje prikupi oko 50 hiljada tona CRT stakla. Ako se u obzir uzme da jedna fabrika opekarskih proizvoda na godišnjem nivou proizvede oko 100 hiljada tona opeke, to znači da bi ta fabrika godišnje mogla da utroši 2000 – 3000 tona CRT stakla (*dodatak stakla 2 – 3%*) [26].

Fernanda Andreola i saradnici su ispitivali mogućnost upotrebe CRT stakla u proizvodnji keramičkih glazura. Glazura u obliku suspenzije sadrži više različitih materijala koji se mogu podeliti u tri grupe: neplastični materijali, plastični materijali i aditivi. Neplastični materijali obuhvataju: oskide, pigmente, feldspate i druge komponente gde spada i staklasti materijal (*ceramic frit*). Staklasti materijal se sastoji od mešavine silikata i karbonata koji se tope i zatim naglo hlade u vodi. Plastični materijali su glina, uglavnom kaolin i bentonit. Katodno staklo se može posmatrati kao zamena za neplastične materijale, naročito kao zamena za staklasti materijal u okviru glazure. Štaviše, CRT sadrži barijum, stroncijum, cirkonijum i okside olova, koji predstavljaju komponente koje često ulaze u sastav keramičke glazure kako bi se dobio odgovarajući sjaj, hemijska otpornost, itd. Andreola je u eksperimentu koristila tri kategorije CRT stakla: panelno staklo od TV i PC u boji, staklo levka takođe od TV-a u boji i mešavinu panelnog i konusnog stakla. Nakon izvršenih prethodnih proba i detaljne hemijske analize spravljenih keramičkih glazura zaključeno je da najbolje karakteristike ima glazura sa dodatkom panelnog stakla.

U nastavku rada pomenutih naučnika samo panelno CRT staklo je korišćeno za izradu glazure. Glazura je sadržala oko 35% staklastih materija, od čega je CRT panelno staklo učestvovalo sa oko 80%. Na osnovu ispitivanja pojave negativnih osobina kod glazure kao što su bubrenje, pojava prslina, vitoperenje, promena koeficijenta linearnog širenja, utvrđeno je maksimalno dozvoljeno učešće CRT stakla. Ispitivanjem hemijske otpornosti glazure utvrđeno je da nema značajnih razlika između obične glazure i glazure sa dodatkom CRT stakla u navedenim procentima. Takođe, ustanovljeno je da se dodatkom CRT-a poboljšava abraziona otpornost glazure. Paralelno sa sprovedenim ispitivanjem izvršena je i procena životnog ciklusa (*LCA – Life cycle assessment*) glazure pomoću programa SimaPRO 5.0 i Eco – indicator [27]. LCA uzima u obzir potencijalni uticaj nekog proizvoda na životnu sredinu,

pri čemu se u obzir uzima niz faktora kao što su: upotrebljene sirovine, proces proizvodnje, transport i distribucija proizvoda, mogućnost ponovne upotrebe i recikliranje. Rezultati analize LCA su pokazali da glazura sa CRT staklom smanjuje potencijanu ugroženost životne sredine za 36% u odnosu na običnu glazuru [27].

Keramička pena (*ceramic foam*) se najčešće koristi za termo i zvučnu izolaciju kao i za apsorpciju štetnih čestica iz vazduha. Istraživanja kineskih naučnika su pokazala da se ova pena uspešno može napraviti sa dodatkom CRT stakla. Eksperimentalna pena se sastoji od: 56,6% CRT staklenog praha, 40% otpada koji nastaje pri preradi rude germanijuma i 1% silicijum - karbida (SiC). Dodavanjem katodnog stakla snižena je temperatura pečenja pene i poboljšane su mehaničke osobine iste. Pena pomenutog sastava ima specifičnu masu od $2,26 \text{ g/cm}^3$, čvrstoću pri savijanju od $3,32 \text{ MPa}$ i nisku termičku provodljivost od $0,68 \text{ W/mK}$ [28]. Izgled pene sa dodatkom stakla prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. - Izgled keramičke pene sa dodatkom CRT stakla [28]

3.2. Katodno staklo kao sirovina za proizvodnju kristalnog stakla

Sadržaj olova kod kristalnog stakla je približno sličan kao i sadržaj olova kod stakla levka CRT ekrana ($PbO \geq 24\%$). Iz tog razloga se može razmatrati i upotreba ovog dela ekrana kao sirovine za proizvodnju predmeta od tzv. kristalnog stakla (slika 3.2.). Prilikom proizvodnje kristalnog stakla, dodaje se olovo – oksid kako bi se poboljšale neke osobine proizvoda kao što su sjaj i izgled teškog metala. Nakon čišćenja, staklo levka može se koristiti i za proizvodnju fluorescentnih lampi sa niskim sadržajem olova. Kompanija "Tiajin Renxin glass materials" Co. Ltd iz Kine uspešno proizvodi ovakve lampe koristeći pritom CRT staklo [29].



Slika 3.2. - Kristalno staklo spravljeno sa CRT staklom [29]

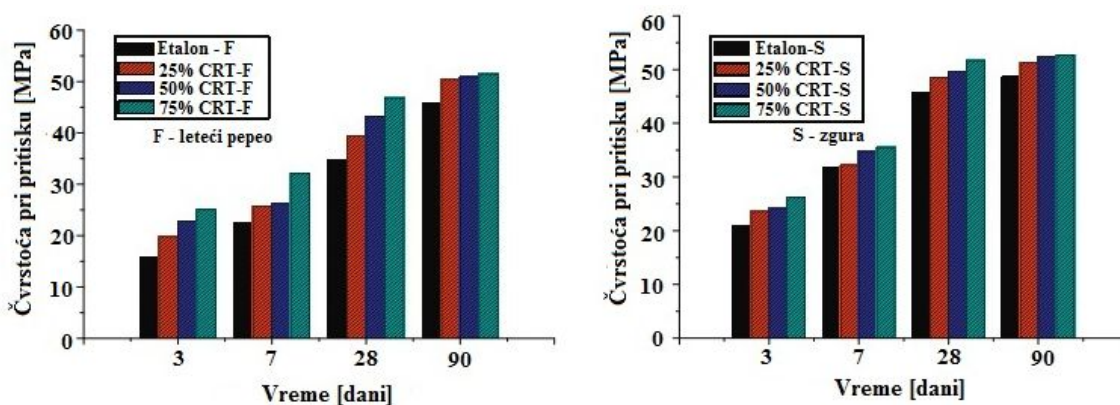
3.3. Primena otpadnog stakla za izradu maltera

Održiva gradnja (*sustainable building*) je jedan od ključnih zahteva u savremenom građevinarstvu kako bi se umanjio štetan uticaj na životnu sredinu i kako bi se značajnije upotreбили obnovljivi izvori energije [30]. Od početka dvadeset prvog veka u građevinarstvu se sve više insistira na upotrebi recikliranih materijala koji makar jednim delom mogu zameniti tradicionalne građevinske materijale, čime bi se u velikoj meri ispoštovala osnovna načela održive gradnje. Staklo je često korišćen materijal u industriji zbog svojih odličnih svojstava. S obzirom na veliku upotrebu, vremenom se stvorila i problematično velika količina otpadnog stakla. Jedan deo tog stakla se uspešno reciklira, kao što je to slučaj sa staklenom ambalažom iz prehrambene industrije. Međutim, već više puta je rečeno da postoje i one vrste otpadnog stakla, koje se zbog svog hemijskog sastava i visoke cene recikliranja, ne mogu lako upotrebiti za izradu novih proizvoda. Tako se u svetu na deponijama generišu velike količine različitog staklenog otpada bez pravog rešenja za ponovnu upotrebu istog. Upravo ovo je navelo brojne istraživače da istraže i ispituju mogućnosti upotrebe otpadnog stakla u građevinskoj industriji za izradu cementnih proizvoda.

Postoje bar dve mogućnosti za primenu otpadnog stakla za izradu cementnih maltera. Prva mogućnost je da preuzme ulogu punioca kako bi se zamenila određena količina prirodnog agregata [19, 31-32]. Druga mogućnost je primena fino samlevenog otpadnog stakla kao zamene za deo cementa pri izradi maltera [34-41]. Istraživači su u radovima ispitivali različite vrste otpadnog stakla: panelno i staklo levka CRT ekrana, dekorativno kristalno staklo, staklo fluorescentnih lampi, staklenu ambalažu, fasadno staklo, staklo očišćeno od štetnih hemijskih supstanci (*glass cullet*), otpadni stakleni mulj koji je nusprodukt procesa poliranja i obrade stakla (*glass sludge*) i u novije vreme staklo od TFT – LCD ekrana. U narednim potpoglavljima 3.3.1 i 3.3.2 biće predstavljeni najvažniji rezultati istraživanja primene navedenih vrsta otpadnih stakala za izradu maltera.

3.3.1. Otpadno staklo kao zamena za deo agregata u malteru

Hui Zhao i saradnici [31] su ispitivali svojstva maltera kod koga je jedan deo prirodnog rečnog agregata zamenjen CRT staklom levka. Staklo nije tretirano azotnom kiselinom kako bi se otklonilo prisustvo štetnog olova već je korišćeno u izvornom obliku. Zamena sitnog rečnog agregata CRT staklom vršena je u količini od 0%, 25%, 50% i 75% po masi. Pritom je i 25% običnog portland cementa zamenjeno mineralnim dodacima - letećim pepelom (*4 malterske mešavine*) i granulisanom zgurom (*4 malterske mešavine*), tako da je ukupno napravljeno osam malterskih mešavina. Ispitivanjem konzistencije maltera na potresnom stolu (*Slum flow test*), utvrđeno je da sa povećam udela CRT agregata u mešavini dolazi do povećanja prečnika rasprostiranja. Ovakav trend se može objasniti time da zrno staklenog agregata ima glatkiju površinu u odnosu na prirodni rečni agregat, kao i da praktično ne upija vodu. Vrednost zapreminske mase svežeg maltera se povećava sa povećanjem učešća katodnog stakla u odnosu na kontrolnu mešavinu (bez CRT-a). Staklo ima veću zapreminisku masu (*u radu* 3042 kg/m^3) od agregata (*u radu* 2620 kg/m^3) čime se ovaj rezultat može objasniti.



Slika 3.3. - Uticaj zamene dela prirodnog agregata CRT staklom na čvrstoću pri pritisku maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku sprovedeno je pri starosti maltera od 3, 7, 28 i 90 dana. Rezultati ispitivanja Hui Zhao i saradnika [31] prikazani su na slici 3.3. Može se zaključiti da su malteri sa dodatkom stakla imali veću čvrstoću pri pritisku od etalona pri svim starostima. Autori su dali dva moguća objašnjenja za ovakav trend. Jedno objašnjenje bi bilo da je zamenom agregata recikliranim staklom poboljšano pakovanje zrna agregata, a drugo objašnjenje je da prisustvo CRT agregata u malteru ubrzava hidrataciju cementa. Takođe, sa slike 3.3. se može videti da za istu vrednost zamene agregata staklom i pri starosti od 7 i 28 dana, malterske mešavine koje sadrže 25% granulisanu zguru imaju veće čvrstoće u odnosu na

mešavine sa 25% letećeg pepela. Sa druge strane, pri starosti maltera od 90 dana, dolazi praktično do izjednačavanja čvrstoća pri pritisku maltera sa različitim mineralnim dodacima.

Čvrstoća pri zatezanju savijanjem ispitana je pri istim starostima maltera kao i čvrstoća pri pritisku. Zaključak je da sa povećanjem udela recikliranog stakla u malterskoj mešavini dolazi do povećanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem pri istoj starosti maltera. Takođe, i u slučaju savojne čvrstoće, malteri sa granulisanom zgurom su imali veće čvrstoće u odnosu na maltere sa letećim pepelom pri istom udelu stakla i pri istoj starosti [31].

Poseban akcenat u radu [31] je stavljen na ispitivanje trajnosti maltera. U tom smislu izvršena su ispitivanja skupljanja maltera, alkalno – silikatne reaktivnosti i izluživanja olova (*lead leaching test*). Skupljanje maltera rađeno je prema australijskom standardu AS 3600. Dozvoljena vrednost skupljanja prema navedenom standardu je 0,075% pri starosti od 56 dana. Rezultati su pokazali da su eksperimentalni malteri sa elektrofilterskim pepelom i sa zamenom CRT agregata 25%, 50% i 75% prekoračili dozvoljenu granicu (0,0823%, 0,0833% i 0,0857% *respektivno*), dok je samo etalon malter sa granulisanom zgurom i bez CRT stakla ostao ispod dozvoljene granice. Autori ovaj rezultat objašnjavaju time da je skupljanje maltera direktno povezano sa njegovom poroznošću. Naime, prisustvo recikliranog stakla u malteru ubrzalo je proces hidratacije cementa i smanjilo poroznost maltera.

Provera alkalno – silikatne reakcije izvršena je u svemu prema američkom standardu ASTM C1260. Utvrđeno je da sa povećanjem zamene CRT stakla u mešavini dolazi do alkalno – silikatne ekspanzije, ali ona ostaje ipak u dozvoljenim granicama ispod 0,1% za većinu malterskih serija. Jedino je malterska mešavina sa granulisanom zgurom i 75% CRT agregata imala ekspanziju od 0,1128% pri starosti od 14 dana.

Provera toksičnog izluživanja olova iz maltera sprovedena je prema metodi američke Agenciji za zaštitu životne sredine (*USEPA*). Pre eksperimenta na malteru utvrđeno je da je izluživanje samog CRT-a 373,5 mg/l [31]. Nakon sprovedenog ispitivanja na malterskim serijama utvrđeno je da se izluživanje olova raste sa povećanjem učešća CRT-a u malteru i da je ono najveće u slučaju prisustva 75% katodnog stakla – oko 33 mg/l bez obzira na vrstu mineralnog dodatka. Ova vrednost višestruko premašuje dozvoljenu granicu od 5 mg/l koju je propisala američka agencija.

Hui Zhao i saradnici [32] su ispitivali uticaj zamene celokupnog prirodnog agregata dvema vrstama CRT stakla na svojstva cementnog maltera. Prvu vrstu je činilo katodno staklo levka koje je sadržalo određenu količinu olova (*oznaka u radu MG*), dok je druga vrsta stakla prošla kroz tretman odvajanja olova (*oznaka u radu G*). I u ovom radu je 25% standardnog portland cementa zamenjeno mineralnim dodacima - letećim pepelom (3 malterske mešavine)

i granulisanom zgurom (3 malterske mešavine). Rezultati ispitivanja konzistencije maltera se poklapaju sa rezultatima prikazanim u radu [32]. Zaključak je da prilikom zamene celekopskog rečnog agregata recikliranim staklom dolazi do povećanja prečnika rasprostiranja maltera na potresnom stolu.

Tabela 3.1. - Čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju i statički modul elastičnosti maltera sa različitim agregatom i mineralnim dodacima pri starosti od 28 i 90 dana [32]

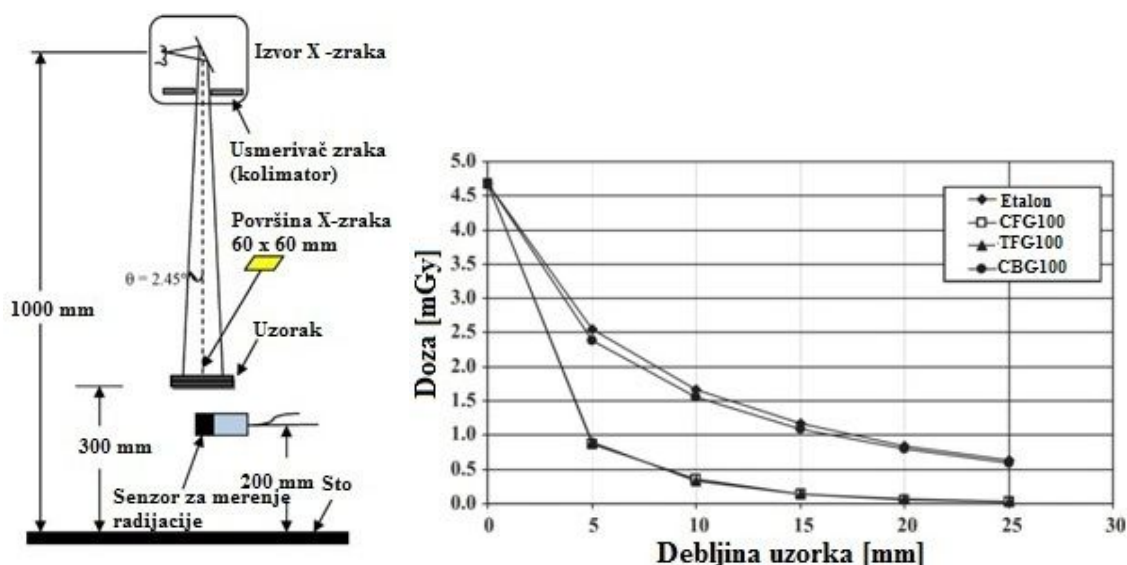
Malterska serija:	Čvrstoća pri pritisku [MPa]		Čvrstoća pri savijanju [MPa]		Statički modul elastičnosti [GPa]	
	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana
R-F	28,42	44,23	5,23	6,38	7,89	11,61
MG-F	40,21	49,25	5,63	6,72	12,47	13,75
G-F	38,75	47,29	5,56	6,68	10,26	13,64
R-S	29,04	42,92	5,46	6,10	8,23	10,48
MG-S	44,91	45,95	5,86	6,64	13,25	13,37
G-S	39,93	44,86	5,58	6,58	10,32	11,68

* R – rečni agregat; F- leteći pepeo; S – granulirana zguza

U tabeli 3.1. prikazani su rezultati čvrstoće pri pritisku maltera sa različitim agregatima i mineralnim dodacima pri starosti od 28 i 90 dana. Prvo, može se zaključiti da malterske serije sa granulisanom zgurom imaju veće vrednosti čvrstoća i veće vrednosti statičkog modula elastičnosti u odnosu na malterske serije sa letećim pepelom za istu vrstu agregata. Takođe, malterski spravljeni sa CRT staklom koje sadrži olovo imaju veće vrednosti mehaničkih čvrstoća od svih ostalih maltera pri istoj starosti. U radu se navodi da prisustvo katodnog stakla uslovljava veće skupljanje maltera u odnosu na maltere sa prirodnim rečnim agregatom. Takođe se navodi da CRT staklo pospešuje alkalno – silikatnu reakciju u malteru. Malterske serije kod kojih je 25% klasičnog PC zamenjeno letećim pepelom nisu prešle dozvoljenu granicu ASR ekspanzije od 0,1% nakon 14 dana nezavisno za vrstu agregata. Sa druge strane, vrednosti ekspanzije maltera sa granulisanom zgurom bile su iznad dozvoljene granice i iznosile su 0,122% za malter sa staklom levka koje sadrži olovo (MG), odnosno 0,147% za seriju maltera koja sadrži očišćeno staklo levka.

Thung-Chai Ling i saradnici [33] su ispitivali mogućnost primene maltera sa dodatkom stakla u radiologiji kao apsorbera štetnih X - zraka. Korišćene su tri vrste stakla: staklena ambalaža (CBG), CRT staklo bez olova (TFG) i CRT staklo koje sadrži visok procenat olova (CFG). Zamena prirodnog agregata staklom vršena je u količini od 0% do 100% po masi, sa inkrementom od 25%. Ispitivanje sposobnosti maltera da umanjí prodor X -

zraka sprovedeno je na uzorcima pločastog oblika površine 100 x 100 mm i promenljive debljine. Za svaku maltersku seriju napravljeno je po pet pločica kako bi se pratio i uticaj promene debljine maltera na intenzitet prodora X - zraka. Šematski prikaz ispitivanja sposobnosti maltera da apsorbira X - zrake dat je na slici 3.4., levo. Rastojanje između izvora X - zraka i malterske pločice iznosilo je 700 mm, dok je ozračena površina X - zracima na pločici iznosila 60 x 60 mm. Merenje doze X - zraka rađeno je odmah ispod maltera. Uticaj debljine maltera i vrste agregata na izmerenu dozu X - zraka pri celokupnoj zameni prirodnog agregata staklom prikazan je na slici 3.4., desno.



Slika 3.4. - Šematski prikaz ispitivanja sposobnosti maltera da apsorbira X-zrake (levo); Uticaj debljine maltera i vrste upotrebljenog stakla na izmerenu dozu X - zraka (desno)

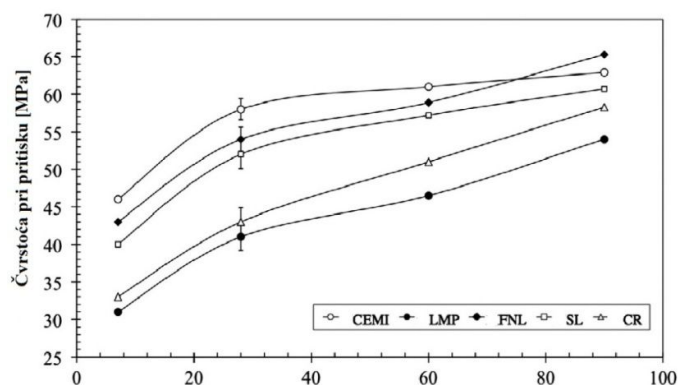
Različite debljine maltera i različite vrste stakla korišćenog kao agregat uticale su na različitu apsorpciju X - zraka. Sa povećanjem debljine uzorka od 5 do 25 mm i sa povećanjem udela CRT stakla u malteru, dolazi do značajnog smanjenja izmerene doze X - zraka. Jedan od zaključaka je da malter sa agregatom od staklene ambalaže ne utiče na smanjene prodora X - zraka. Najbolju apsorpciju X - zraka imala je malterska serija kod koje je celokupna količina agregata zamenjena CRT staklom sa visokim sadržajem olova. U slučaju uzorka debljine 5 mm izmereno je 56,2% manje zračenje nego u slučaju etalona iste debljine. Ovakav rezultat je moguće objasniti time da CRT staklo koje sadrži olovo ima veću zapreminsku masu od prirodnog agregata i da je njegova atomska struktura takva da deluje na X - zrake čime se smanjuje njihova energija i dubina prodora [33].

3.3.2. Otpadno staklo kao zamena za deo cementa u malteru

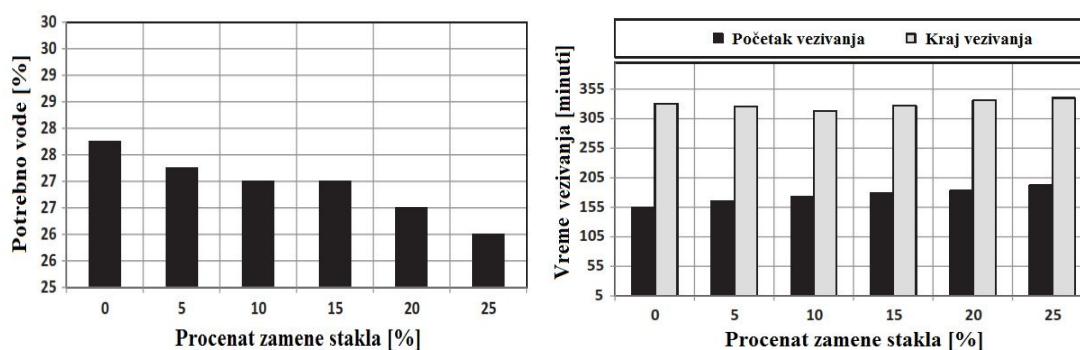
Veliki broj naučnih radova se bavi proučavanjem fizičko – mehaničkih svojstava maltera kod kojih je deo cementa zamenjen usitnjenim otpadnim staklom. Pritom, najviše se kao sirovina za zamenu cementa koristi staklo iskorišćene staklene ambalaže različite boje, polomljenog prozorskog stakla i automobilskih vetrobrana, dok se katodno staklo za ovakvu namenu proučava u manjem broju radova.

Maria Bignozzi sa svojim saradnicima sa Univerziteta u Bolonji [34] je istraživala uticaj hemijskog sastava različitih vrsta usitnjenih otpadnih stakala na svojstva maltera u kojima je staklom zamenjeno 25% cementa. Eksperiment je sproveden u cilju istraživanja mogućnosti upotrebe recikliranog stakla koje sadrži različit procenat olova kao potencijalnog mineralnog dodatka u procesu proizvodnje cementa. Korišćene su četiri vrste stakla: staklo iskorišćenih flaša (*SL*, *sadrži 0% Pb*), staklo fluorescentnih lampi (*LMP*, *sadrži 0,8% Pb*), staklo levka katodne cevi (*FNL*, *sadrži 18% Pb*) i kristalno staklo (*CR*, *sadrži 27% Pb*). Staklo je mleveno pomoću laboratorijskog kugličnog mlina do prosečne finoće mliva 10 – 20 μm . Granulometrijske krive samlevenih otpadnih stakala su bile veoma slične granulometrijskoj krivi cementa. U radu je korišćen čist porland cement CEM I 52,5. Malterske prizme standardnih dimenzija spravljene su prema standardu EN 196-1.

Ispitivanje čvrstoća pri pritisku maltera izvršeno je pri starosti od 7, 28, 60 i 90 dana (*slika 3.5.*). Pri starosti od 60 dana, najveću čvrstoću pri pritisku je imala malterska serija bez dodataka stakla. Međutim pri većoj starosti, malterske serije sa CRT staklom i staklom od reciklirane ambalaže su dostigle čvrstoću etalon serije sa čistim PC. Prema standardu EN 197-1, serije sa CRT staklom i recikliranom staklenom ambalažom se mogu okarakterisati kao veziva klase 52,5, s obzirom da pri starosti od 28 dana postižu čvrstoće veće od 52,5 MPa. Jedino malterska serija sa 25% stakla od fluorescentnih lampi nije dostigla ciljanu čvrstoću pri starosti od 90 dana.



Slika 3.5. - Čvrstoća pri pritisku malterskih serija sa različitim vrstama stakla pri starosti od 7, 28, 60 i 90 dana [34]



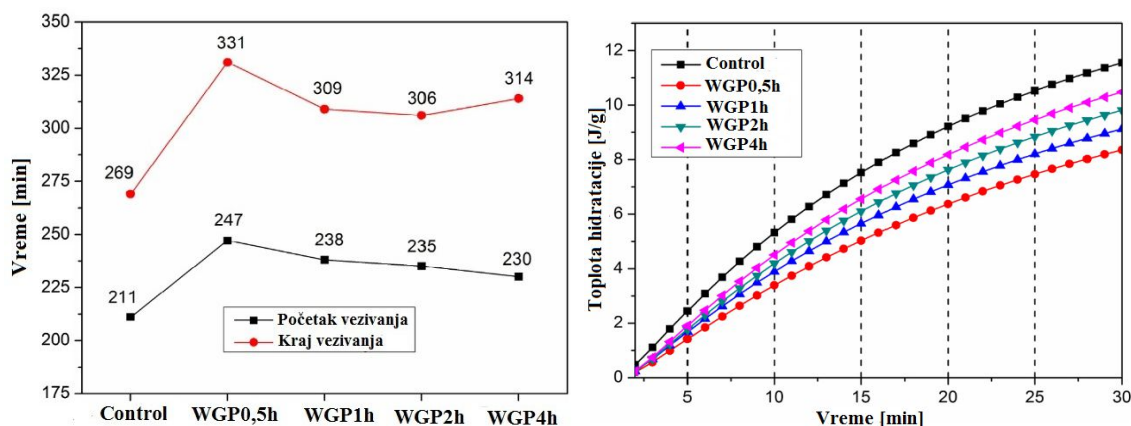
Slika 3.6. - Uticaj povećanja udela otpadnog stakla na potrebnu količinu vode za pastu standardne konzistencije (levo); Vreme vezivanja cementne paste za različite procenat zamene cementa staklom (desno) [35]

Ali Aliabdo i saradnici [35] su vršili zamenu dela cementa recikliranim staklom od ambalaže i fasadnim staklom i pratili promenu svojstava tako spravljene cementne paste i maltera. Procenat zamene cementa staklom vršen je po masi u rasponu od 0% do 25% sa inkrementom od 5%. Staklo je mleveno tako da bude finije od $75 \mu\text{m}$ i imalo je specifičnu masu $2,62 \text{ g/cm}^3$. Prvi deo ispitivanja odnosio se na praćenje promena svojstava cementne paste u svežem stanju u funkciji povećanja udela stakla. Utvrđeno je da sa povećanjem zamene cementa staklom dolazi do smanjenja potrebne količine vode za spravljanje paste standardne konzistencije. Pritom, ovo smanjenje je blisko linearnom tako da sa svakim povećanjem udela stakla za 5% dolazi do smanjenja potrebne količine vode za 0,4% (slika 3.6., levo). Autori ovaj trend u smanjenju vodo – praškastog faktora objašnjavaju time da su čestice staklenog praha manje finoće mliva od čestica cementa. Povećanje udela stakla u cementnoj pasti nije imalo značajniji uticaj na početak i kraj vezivanja cementne paste (slika 3.6., desno), kao ni na promenu stalnosti zapremine.

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku malterskih serija rađeno je samo pri ranoj starosti od 3 i 7 dana. Pri ovako malim starostima, utvrđeno je da zamenom cementa staklom do 10% dolazi do manjeg povećanja čvrstoća malera u odnosu na etalon, dok sa većim udelom stakla dolazi do blagog smanjenja pritisne čvrstoće. Na primer, za malter sa 5% i 10% dodatka stakla pri starosti od 7 dana, čvrstoća pri pritisku je 6,1% i 9% veća u odnosu na etalon. Sa druge strane pri udelu stakla od 15%, 20% i 25% čvrstoća pri pritisku je 9,7%, 16,% i 23,2% manja u odnosu na etalon, respektivno. Jedan od glavnih zaključaka autora je da cement sa 25% stakla na osnovu ispitanih fizičko – mehaničkih osobina zadovoljava uslove kvaliteta propisane egipatskim standardom za cement CEM I 42,5N.

Jian Lu i saradnici sa Univerziteta u Hong Kongu [36] ispitivali su svojstva cementne paste i dekorativnog maltera u svežem stanju pri čemu je 20% cementa bilo zamenjeno otpadnim ambalažnim staklom različite finoće mliva. U eksperimentu je i celokupna količina sitnog agregata zamenjena otpadnim staklenim agregatom odgovarajućeg granulometrijskog sastava. Malter je spravljen od belog portland cementa sa vodo – cemetnim faktorom 0,4, masenim odnosom veziva i agregata 1:2 i dodatak superplastifikatora u količini od 0,6%. Staklo je mleveno pomoću laboratorijskog kugličnog mlina u različitom trajanju: 30 minuta (*serija WGP-0,5h*), 60 minuta (*serija WGP-1 h*), 120 minuta (*serija WGP-2 h*) i 240 minuta (*serija WGP -4 h*). Sa povećanjem dužine trajanja mlevenja smanjivala se i prosečna veličina čestica samlevenog stakla: 204 μm , 88,5 μm , 47,9 μm i 29,3 μm respektivno. Prosečna veličina čestica korišćenog portland cementa iznosila je 18,8 μm .

Na slici 3.7., levo prikazan je uticaj finoće mliva stakla na početak i kraj vezivanja cementne paste. Najveći uticaj na vreme vezivanja imala je pasta sa najkrupnijim česticama stakla kod koje je početak vezivanja odložen za 36 minuta, dok je kraj vezivanja odložen za čak 62 minuta u odnosu na kontrolnu cementnu pastu bez dodatka stakla [36]. Generalno posmatrano prisustvo staklenog praha od 20% u cementnoj pasti utiče na produženje vremena vezivanja. Autori rada [36] objašnjavaju da se ovakav uticaj stakla na vreme vezivanja može potražiti u tome da je staklo imalo manju finoću mliva u odnosu na cement, kao i da je površina stakla glatka, što je imalo za posledicu da više vode ostane slobodno za proces hidratacije.



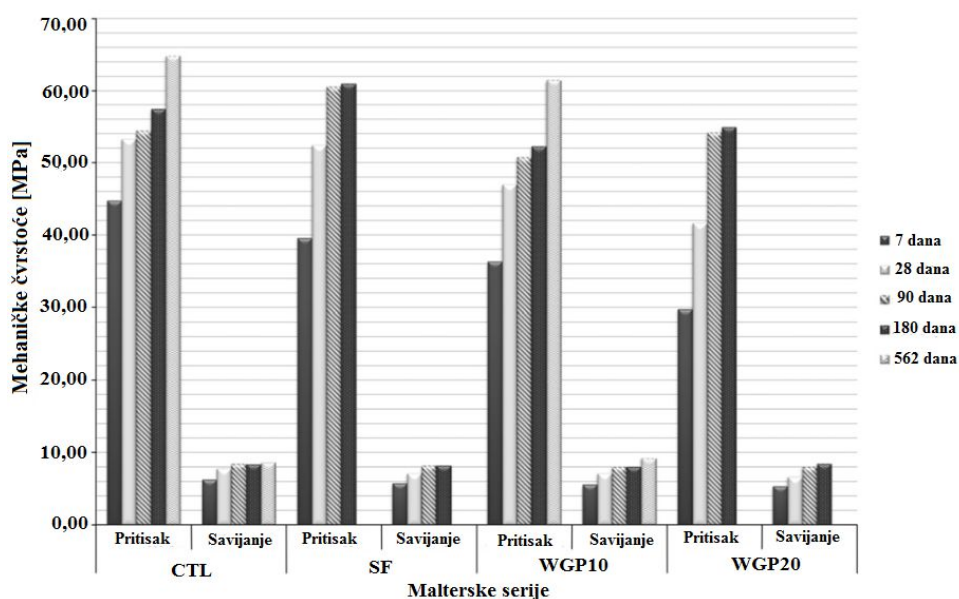
Slika 3.7. - Vreme vezivanja cementne paste sa različitom finoćom WGP-a (levo); Toplota hidratacije cementne paste sa WGP-om u prvih 30 minuta (desno) [36]

Proces hidratacije referentne paste i cementnih paste sa dodatkom stakla prikazan je na slici 3.7., desno. Nedvosmisleno se može zaključiti da paste modifikovane samlevenim otpadnim staklom imaju manju toplotu hidratacije u odnosu na etalon pastu nevezano od finoće mliva stakla. Cementna pasta sa najkrupnijim česticama stakla (*WGP-0,5h*) imala je najmanje izmerenu toplotu hidratacije. Međutim, cementne paste *WGP-2 h* i *WGP – 4h* imale su neznatno veću toplotu hidratacije u odnosu na pastu *WGP-1 h*. Ovo ukazuje na to da smanjenje finoće mliva stakla ispod $88\ \mu\text{m}$ nema preveliki uticaj na hidratacionu toplotu, odnosno proces rane hidratacije cementa.

Ispitivanjem rasprostiranja cementnog maltera na potresnom stolu zaključeno je da najmanju vrednost rasprostiranja ima malterska serija sa najkrupnijim česticama stakla – *WGP0,5h*. Najveće rasprostiranje od 250 mm izmereno je kod etalon serija, dok su ostale tri malterske serije sa finijim staklom imale međusobno sličnu vrednost rasprostiranja od oko 240 mm, što je blizak rezultat u poređenju sa kontrolnom serijom [36].

Ana Mafalda Matos i Joana Sousa – Coutinho [37] su ispitivale trajnost maltera kod kojeg je deo cementa zamenjen usitnjenim staklom automobilskih vetrobrana i komercijalne ambalaže. Otpadno staklo je usitnjeno pomoću laboratorijskog kugličnog mlina u trajanju od 48 h čime je postignuto da preko 97% stakla bude finije od $0,063\ \text{mm}$. Portland cement CEM I 42,5R delimično je zamenjen fino samlevenim staklom u procentu od 0% (*etalon serija CTL*), 10% (*WGP10*) i 20% (*WGP20*) po masi. Pored kontrolne malterske mešavine i dve mešavine sa recikliranim staklom napravljena je i četvrta, dodatna mešavina, kod koje je 10% cementa zamenjeno silikatnom prašinom (*serija SF*). Ispitivanjem je utvrđeno da se zamenom dela cementa recikliranim staklom poboljšava trajnost maltera. Sa povećanjem udela stakla u mešavini dolazi do neznatnog povećanja linearnih deformacija usled pojave alkalno –

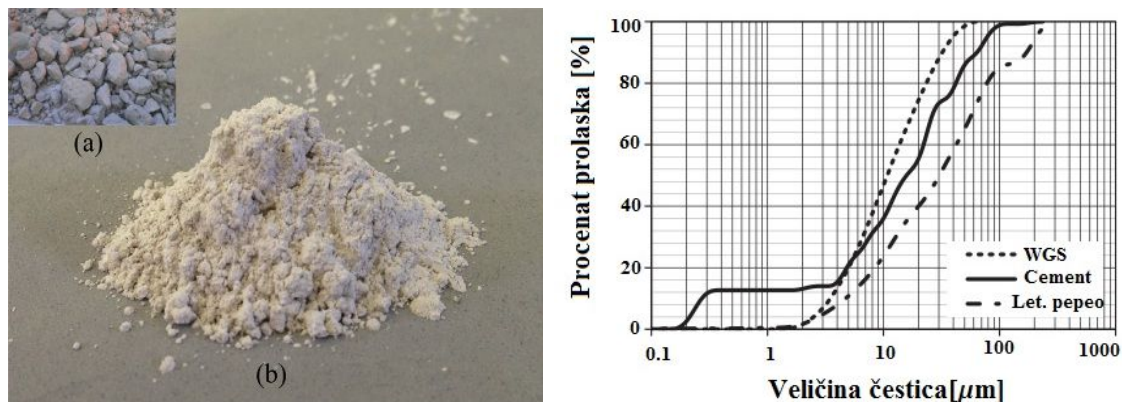
silikatne reakcije. Najmanju ekspanziju od 0,0344% je imala serija sa 10% silikatne prašine, dok je ekspanzija serije sa 20% stakla bila neznatno veća i iznosila je 0,0410% što u svakom slučaju ne prelazi dozvoljenu granicu od 0,10% prema ASTM 1567. Takođe, dobijeni su i bolji rezultati prilikom ispitivanja prodora hlorida kao i sulfatne otpornosti kod malterskih serija sa staklom u odnosu na etalon. Na slici 3.8. su prikazani rezultati čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju malterskih serija pri starosti od 2, 7, 28, 90, 180 i 562 dana. Rezultati ispitivanja pri starosti od 7 i 28 dana ukazuju da staklo smanjuje mehaničke čvrstoće maltera i da je to smanjenje značajnije sa povećanjem udela stakla. Međutim, pri starosti od 90 dana čvrstoće malterskih serija sa staklom su se u velikoj meri približile čvrstoćama etalona. Malterska serija sa 20% stakla je imala značajno povećanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju između 28 i 90 dana, što ukazuje da je pucolanska reakcija stakla i cementa upravo u tom periodu bila najintenzivnija.



Slika 3.8. - Čvrstoće pri pritisku i pri savijanju maltera pri različitim starostima [37]

Do sličnih rezultata vezanih za prirast čvrstoća maltera sa dodatkom otpadnog stakla došli su i istraživači iz Južne Koreje [38]. Eksperimentalno istraživanje je sprovedeno na ukupno sedam serija maltera: etalon malter, malter sa 5% fino usitnjenog stakla (*WGS5*), malter sa 10% stakla (*WGS10*), malter sa 20% zamene stakla (*WGS20*), malterske serije sa 10% i 20% letećeg pepela (*FA10* i *FA20*, *respektivno*) i kombinovana malterska serija sa po 10% oba dodatka (*WGS10+FA10*). Otpadni stakleni mulj koji je korišćen u radu za zamenu dela cementa predstavlja nusproizvod industrije koja se bavi obradom i poliranjem staklenih

ploča. Otpadni stakleni mulj sadrži oko 60% vode nakon izdvajanja u industriji. Stoga je bilo neophodno da se mulj osuši tako da njegova vlažnost bude ispod 20%, nakon čega je izvršeno njegovo mlevenje pomoću tzv. Rajmondovog mlina. Na slici 3.9. prikazan je izgled staklenog mulja pre i nakon mlevenja kao i granulometrijski sastav korišćenih pucolana i portland cementa CEM I.



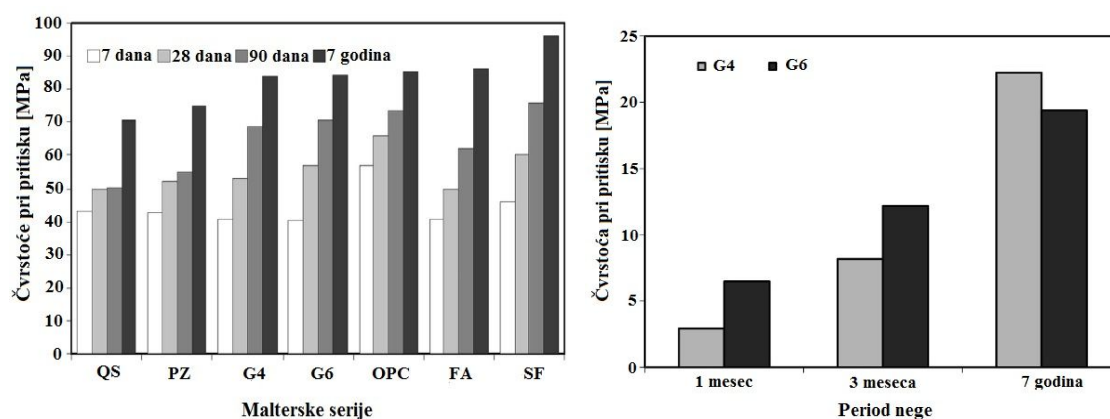
Slika 3.9. - Stakleni mulj pre (a) i nakon mlevenja (b) (levo); Granulometrijski sastav staklenog praha, letećeg pepela i portland cementa CEM I (desno) [38]

Specifična površina zrna usitnjenog stakla po Blenu iznosila je $414 \text{ m}^2/\text{kg}$ što je za 23% više u odnosu na portland cement i leteći pepeo. Prosečna veličina čestica stakla iznosila je svega 10 μm , dok je kod cementa bila $14,65 \text{ μm}$. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku vršeno je pri starosti od 3, 7, 14 i 28 dana. Kao i u radovima [34] i [37], pri ranim starostima od 3, 7 i 14 dana malterske serije sa dodatkom otpadnog stakla imaju manje čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon malter sa 100% portland cementa. Međutim, pri starosti od 28 dana malterske serije sa recikliranim staklom imaju slične čvrstoće, dok u slučaju istraživanja u Koreji [38] čak i veće, u odnosu na etalon seriju. Pri starosti od 28 dana čvrstoće maltera sa 10% i 20% letećeg pepela imaju najmanje čvrstoće pri pritisku, što je istraživače u radu [38] navelo na zaključak da stakleni mulj ima veća pucolanska svojstva od letećeg pepela.

Maddalena Carsana i saradnici [39] upoređivali su svojstva maltera sa recikliranim staklom i drugim dodacima u vremenskom intervalu od čak sedam godina. Višegodišnji period ispitivanja imao je za cilj praćenje trajnosti maltera mnogo duže nego što to nalažu standardi. Kao zamena za 30% cementa po masi korišćeni su: prirodni pucolan (*serija sa oznakom PZ*), leteći pepeo (*serija FA*) i reciklirano staklo specifične površine zrna $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ i $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ (*serije G4 i G6*, respektivno). Jedna malterska serija spravljena je i sa zamenom 30% cementa usitnjenim kvarcnim peskom, kako bi se sagledao i eventualni uticaj inertnog dodatka (*serija sa oznakom QS*). Jedino je u slučaju malterske serije sa silikatnom prašinom

izvršena zamena cementa od 10% (*SF*). Etalon malter spravljen je sa 100% portland cementa tipa CEM I 52,5R (*serija OPC*).

Na slici 3.10. levo, prikazane su čvrstoće pri pritisku malterskih serija pri starosti od 7, 28, 90 dana i 7 godina. Etalon malter je imao čvrstoću pri pritisku oko 66 MPa pri starosti od 28 dana, dok su malterske serije sa stakom G4 i G6 imale pri istoj starosti čvrstoću pri pritisku 53 MPa, odnosno 57 MPa. Jedino je malterska serija SF dostigla 90% čvrstoće etalona nakon 28 dana, što autori pripisuju velikoj reaktivnosti silikatne prašine kao i mogućem efektu filera usled daleko najveće finoće u odnosu na ostale dodatke. Pri starosti od 7 godina malterksa serije G4 i G6 imala su čvrstoću pri pri pritisku 83,9 MPa i 84,2 MPa, čime su se praktično izjednačile sa etalom – 85,3 MPa. U cilju praćenja uticaja različite finoće mliva recikliranog stakla na prirast čvrstoća pri pritisku u toku vremena napravljene su i dve malterske serije sa 70% hidratisanog kreča i 30% stakla G4 i G6. Nakon postignute čvrstoće pri pritisku od oko 20 MPa uticaj veće finoće mliva nema više tako vidljivog uticaja (*slika 3.10., desno*).



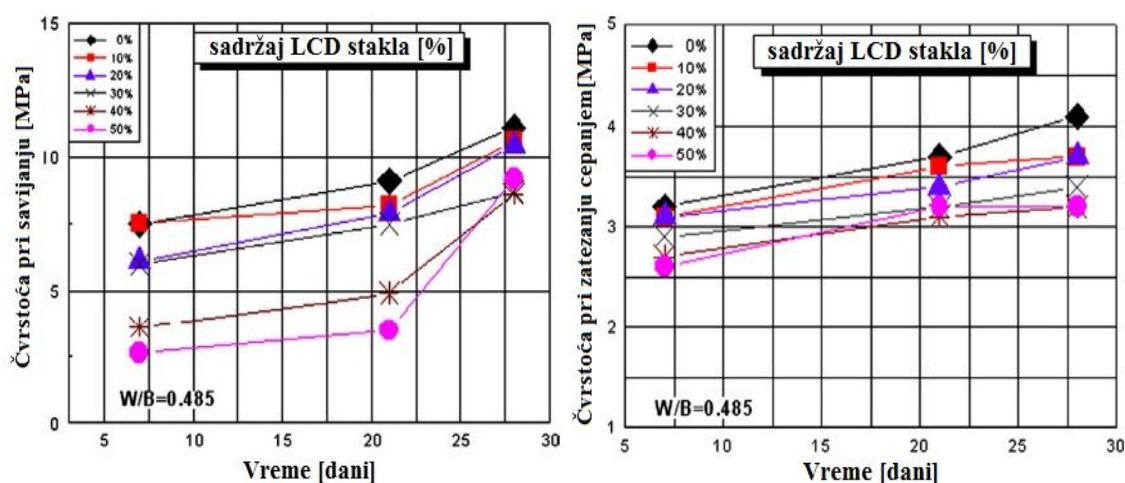
Slika 3.10. - Čvrstoće pri pritisku cementnih malterskih serija pri starosti od 7, 28, 90 dana i 7 godina (levo); Uticaj finoće mliva recikliranog stakla na prirast čvrstoća pri pritisku kod krečnog maltera (desno) [39]

Tajvan je najveći proizvođač TFT-LCD ekrana sa učešćem od gotovo 43% u ukupnoj svetskoj proizvodnji. Rezultat ovako ogromne proizvodnje je i srazmerno velika količina otpada koja premašuje količinu od milion tona godišnje [40]. Her – Yung Wang, istraživač sa Nacionalnog Univerziteta za primenjenu nauku iz Tajvana, ispitivao je uticaj TFT – LCD stakla kao substituenta dela cementa pri spravljanju cementnog maltera. Procenat zamene usitnjenog stakla u malteru kretao se u rasponu od 0 do 50% po masi sa inkrementnom od 10%. Staklo je samleveno pomoću planetarnog mlina – Pulversette 4, tako da je njegova

specifična masa nakon mlevenja iznosila $2,65 \text{ g/cm}^3$ dok je finoća mliva iznosila $3850 \text{ cm}^2/\text{g}$ (slika 3.11.).



Slika 3.11. - Izgled TFT-LCD staklenog agregata (levo); stakleni prah nakon mlevenja (desno) [40]



Slika 3.12. - Čvrstoća pri zatezanju savijanjem maltera sa LCD staklom u funkciji promene dodatka stakla (levo); Čvrstoća pri zatezanju cepanjem maltera sa LCD staklom u funkciji promene dodatka stakla (desno) [40]

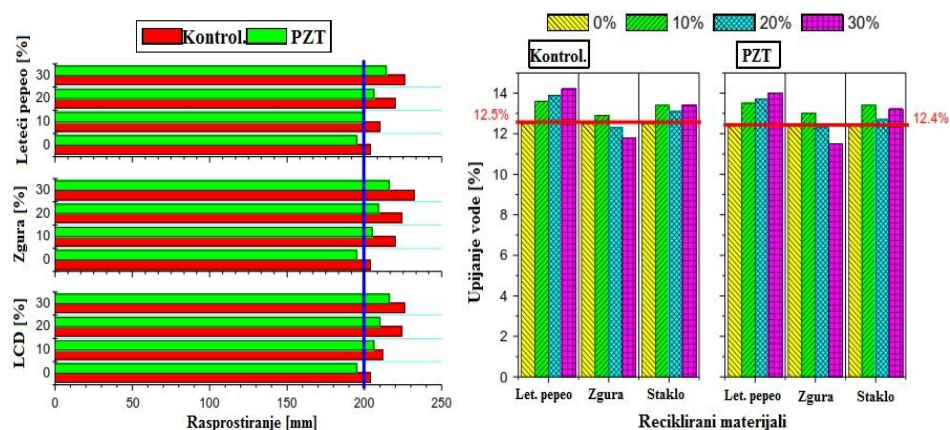
Ispitivanje fizičko – mehaničkih karakteristika maltera sprovedeno je na uzorcima oblika kocke ivice 5 cm što je u skladu sa američkim standardima. Odnos cementa i peska u malterskim mešavinama iznosio je 1:2,75, dok je vodo – praškasti faktor bio konstantan i iznosio je 0,485. Mehaničke čvrstoće su ispitivane pri starosti od 7, 21 i 28 dana. Ispitivanjem je utvrđeno da sa povećanjem zamene stakla dolazi do skraćivanja početka i kraja vezivanja. Utvrđeno je da se čvrstoća pri pritisku smanjuje ravnomerno sa povećanjem zamene stakla. U slučaju 10% zamene LCD, čvrstoća pri pritisku je iznosila oko 95% čvrstoće etalona. Pri ispitivanju maltera na 28 dana malterske serije do 20% zamene stakla nisu imale značajno

manje čvrstoće pri savijanju i cepanju u odnosu na kontrolnu seriju (*slika 3.12.*). U radu [40] je sprovedena i tehno - ekonomska analiza kako bi se utvrdila rentabilnost upotrebe TFT – LCD stakla kao zamene za jedan deo cementa u proizvodnji maltera. Autori su zaključili da bi se na godišnjem nivou moglo reciklirati i ponovo upotrebiti 1000 tona otpadnog LCD stakla u Tajvanu ako bi se ono koristilo kao zamena za 10% cementa u cementnom malteru. Na taj način bi proizvođači ove vrste stakla izbegli troškove skladištenja stakla na deponijama koji u proseku iznose oko 65 USD po toni stakla. Ukoliko bi pre skladištenja staklo moralo da prođe i kroz termičke procese obrade onda bi ušteda bila još veća – 80 USD po toni. U isto vreme, došlo bi i do smanjenja cene koštanja proizvodnje tone cementa kao i smanjenja emisije ugljen – dioksida. Ovo sve ukazuje na to da ponovna upotreba LCD stakla u građevinskoj industriji ima višestruke prednosti [40].

Mnoge zemlje, poput Tajvana i Japana, nalaze se u veoma trusnom području, na rubovima tektonskih ploča. Ove zemlje su pogođene čestim zemljotresima ali i drugim, pre svega, vremenskim nepogodama. Stoga se u novije vreme u ovim zemljama ubrzano radi na pronalaženju novih tehnologija koje bi poslužile kao prevencija i zaštita od stohastičkih dejstava. Razvoj tehnologije u tom pravcu, za rezultat je imao pronalaženje novih materijala kao što su piezoelektrični kompozitni materijali PZT (*piezoelectric ceramic powder - Lead Zirconate Titanate*). Ova vrsta materijala se prvobitno koristila u mašinstvu i elektronici da bi na kraju svoju primenu našla i u građevinarstvu. Dodavanjem PZT-a betonu poboljšavaju se postojeća svojstva betona ali se takođe stvaraju i neke nove funkcije betona kao što su: samonadgledanje (*self – monitoring*), samozaceljivanje (*self – healing*) i elektro - mehaničko samonadgledanje (*electro - mechanical self - sensing*). Her – Yung Wang i saradnici [41] su istraživali svojstva cementnog maltera kod koga je deo cementa zamenjen različitim recikliranim materijalima: leteći pepeo, granulirana zgura i LCD staklo. Procenat zamene cementa recikliranim materijalom vršen je u rasponu od 0%, 10%, 20% i 30%. U isto vreme, spravljena je i grupa maltera kod koje je, pored navedene izmene sastava cementa, izvršena i zamena 5% sitnog agregata piezoelektričnim prahom, kako bi se pronašla korelacija između fizičko – mehaničkih (*inženjerskih*) i električnih osobina materijala. Kod obe grupe maltera sprovedena su sledeća ispitivanja: rasprostiranje, čvrstoća pri pritisku, upijanje vode i brzina prolaska ultrazvučnih talasa. U radu su korišćeni materijali sa sledećim karakteristikama: portland cement tip I, leteći pepeo klase F, granulirana zgura specifične površine zrna 4500 cm²/g, TFT – LCD staklo specifične površine zrna 6000 cm²/g kao i PZT prah proizvođača Sunnytec Electronics Co. Ltd. čija je specifična masa 7,7 g/cm³. Vodocementni faktor je bio konstantan za sve malterske serije i iznosio je 0,64. Zapreminski odnos cementa i peska

iznosio je 1:2,75 i takođe je bio konstantan za sve eksperimentalne maltere. Za ispitivanje napred navedenih osobina maltera u očvrsлом stanju spravljeni su uzorci oblika kocke ivice 5 cm dok su ispitivanja vršena na 1, 7, 28 i 56 dana.

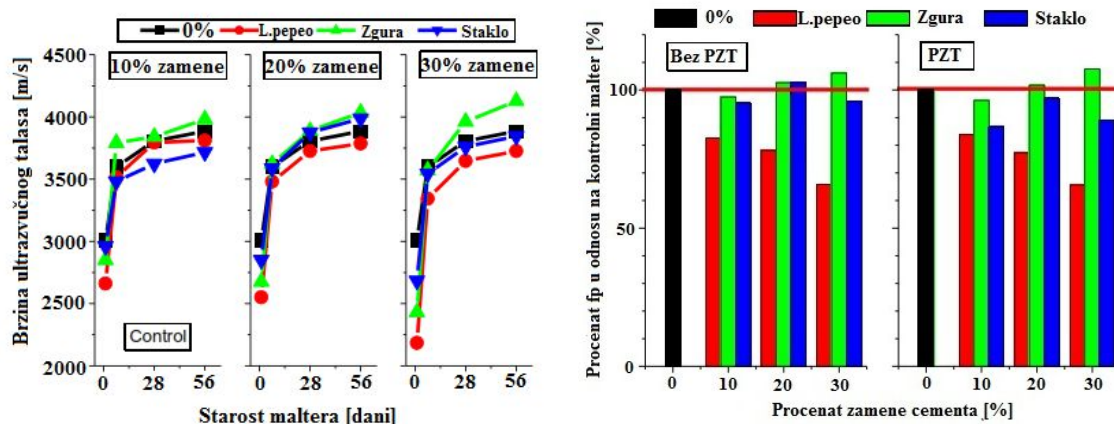
Rasprostiranje kontrolne serije maltera (*0% dodatka*) iznosilo je 200 mm što je u skladu sa standardom ASTM C109. Jedino je PZT malterska serija sa 0% dodatka recikliranih materijala imala rasprostiranje 195 mm, što je malo niže od kontrolne serije (*slika 3.13., levo*). Pri istom nivou zamene cementa recikliranim materijalima PZT malterske grupe su imale manje rasprostiranje od malterskih serija bez piezoelektričnog praha. Takođe, jasno se može uočiti da sa povećanjem zamene cementa recikliranim materijalima dolazi do povećanja rasprostiranja. Malterske serije sa granulisanom zgurom imale su najveće rasprostiranje, dok zatim slede serije sa LCD staklom i na kraju letećim pepelom. Na slici 3.13., desno prikazano je upijanje vode malterskih serija pri starosti od 28 dana. Jedino je malterska serija sa granulisanom zgurom imala manje upijanje u odnosu na malter bez dodatka reciklata što ukazuje da se dodavanjem zgure poboljšava kompaktnost maltera. Malterske serije sa LCD staklom imale su manje upijanje vode od serija sa letećim pepelom. Utvrđeno je takođe i da serije sa 5% PZT imaju nešto manje upijanje vode od odgovarajućih serija bez PZT sa istim procentom dodatka nekog od recikliranih materijala [41].



Slika 3.13. - Rasprostiranje malterskih serija sa različitim recikliranim dodacima i PZT maltera (*levo*) i upijanje vode obe grupe maltera pri starosti od 28 dana (*desno*) [41]

Brzina prolaska ultrazvučnih talasa kroz malter bez PZT materijala prikazana je na slici 3.14., levo. U slučaju zamene 20% cementa recikliranim staklom brzina prolaska talasa je veća od kontrolne serije (*0% dodatka*). Pri starosti od 28 i 56 dana brzina prolaska ultrazvučnih talasa kroz malter sa dodatkom 20% stakla iznosi 3800 m/s i 3950 m/s, respektivno. Zanimljivo je primetiti da je brzina ultrazvuka kroz malter sa 10% i 30% dodatka

stakla manja u odnosu na malter sa 20% dodatka. Generalno posmatrano, najveća brzina talasa izmerena je kod maltera sa 30% granulisanе zguře i ona iznosi oko 4125 m/s. U radu su dobijene vrednosti čvrstoće pri pritisku analogne sa vrednostima izmerene brzine ultrazvuka. Malter sa 20% zamene stakla imao je čvrstoću pri pritisku od 31,8 MPa pri starosti od 28 dana, što je veća vrednost u odnosu na druge dve serije sa dodatkom stakla (10 i 30%) i što je još važnije u odnosu na kontrolnu seriju bez dodataka. Analogno dobijenim vrednostima brzine ultrazvuka, serija sa 30% dodatka granulisanе zguře imala je najveću čvrstoću pri pritisku u odnosu na sve ostale vrste maltera (slika 3.14., desno).



Slika 3.14. - Brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz malter pri različitim procentima zamene (levo); Procenat dostignute vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na kontrolnu seriju pri različitim procentima zamene (desno) [41]

3.4. Primena otpadnog stakla za izradu betona

Sa podizanjem ekološke svesti ljudi i njihove brige o očuvanju životne sredine, "održiva gradnja" je postala veoma važna. Prema definiciji svetske Komisije za životnu sredinu "održivo" znači zadovoljiti sadašnje potrebe čovečanstva bez ugrožavanja potreba narednih generacija u budućnosti [42]. Kao i kod maltera, uloga stakla u betonu može biti dvojaka - zamena za deo agregata ili zamena za deo cementa.

Ukoliko se staklo koristi kao zamena za deo agregata u betonskoj mešavini, glavni problem o kome se mora voditi računa jeste mogućnost pojave alkalno – silikatne reakcije (ASR). Reciklirano staklo sadrži visok procenat amornog silicijuma (na primer staklene flaše oko 70%) koji potencijalno može da reaguje sa alkalijama iz cementa i da se tom prilikom stvori ASR gel. ASR gel u prisustvu vlage u toku vremena ekspandira što u početku dovodi do pojave prslina a kasnije i do potpune destrukcije očvrslog betona. Krupnoća zrna stakla značajno utiče na njegovu ASR reaktivnost.

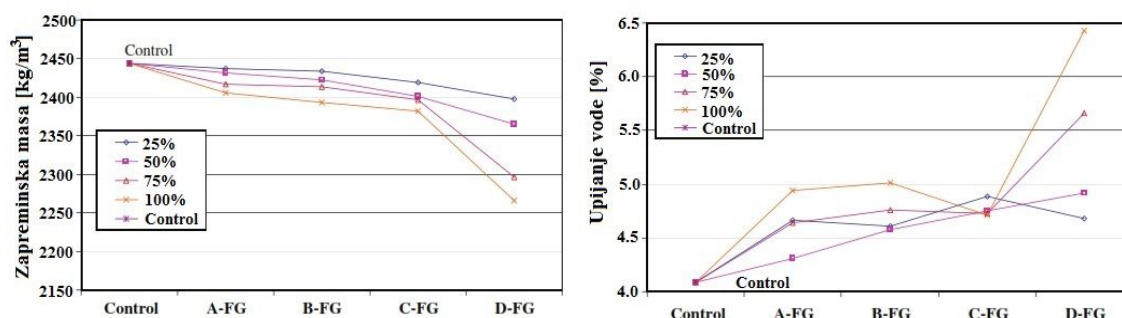
Pre upotrebe stakla kao zamene, odnosno dodatka cementu, neophodno je prethodno utvrditi njegovu pucolansku aktivnost. Istraživači su u radovima ispitivali različite vrste otpadnog stakla: panelno i staklo levka CRT ekrana, dekorativno kristalno staklo, staklo fluorescentnih lampi, staklenu ambalažu, fasadno staklo, staklo očišćeno od štetnih hemijskih supstanci (*glass cullet*), otpadni stakleni mulj koji je nusprodukt procesa poliranja i obrade stakla (*glass sludge*) i u novije vreme staklo od TFT – LCD ekrana. U narednim potpoglavljima 3.4.1. i 3.4.2. biće predstavljeni najvažniji rezultati istraživanja primene navedenih otpadnih stakala za izradu betona na oba pomenuta načina.

3.4.1. Otpadno staklo kao zamena za deo agregata u betonu

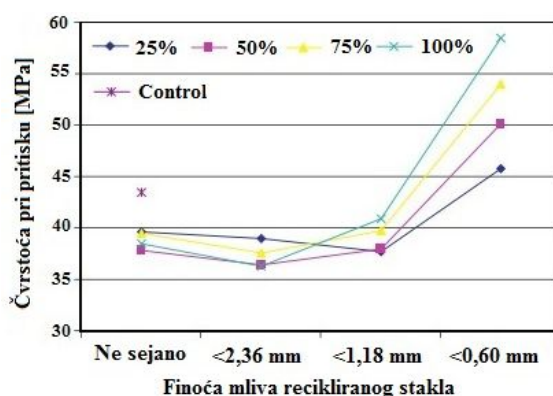
Upravljanje otpadnim staklom i njegova ponovna upotreba predstavljaju jedan od glavnih problema u višemilionskim gradovima širom sveta. Samo u Hong Kongu se prikupi oko 300 tona otpadnog stakla dnevno, a prema podacima nadležnog ministarstva samo 1-2% se ponovo koristi za izradu novog proizvoda. Gerry Lee i saradnici [43] su istraživali mogućnost upotrebe recikliranog stakla od staklene ambalaže za izradu betonskih blokova krute konzistencije. Reciklirano staklo je upotrebljeno kao zamena za deo sitnog prirodnog agregata. Odnos krupnog i sitnog agregata u betonskoj mešavini iznosio je 1:1. Napravljeno je ukupno sedamnaest betonskih mešavina pri čemu je varirana finoća mliva stakla i procenat zamene agregata staklom. Korišćene su četiri finoće mliva stakla: neprosejano staklo (*serija sa oznakom A-FG*), staklo sitnije od 2,36 mm (*B-FG*), staklo sitnije od 1,18 mm (*C-FG*) i staklo finoće ispod 0,60 mm (*D-FG*). Procenat zamene agregata staklom po masi iznosio je 25%, 50%, 75% i 100%. Optimalni vodo – cementni faktor za svaku mešavinu određen je na osnovu pokretljivosti i obradljivosti betona tako da on bude dovoljno kohezivan za ugradnju u betonske kalupe, ali da njegovo sleganje bude oko 0 cm (*kruta konzistencija*). Na uzorcima oblika kocke ivice 70 mm ispitana su sledeća svojstva betona: zapreminska masa, upijanje vode i čvrstoća pri pritisku.

Ispitivanjem betonskih serija ustanovljeno je da sa povećanjem zamene recikliranog stakla, nezvezano od finoće mliva istog, dolazi do smanjenja zapreminske mase betona. Objašnjenje za ovakav trend se može naći u manjoj specifičnoj masi stakla u odnosu na prirodan sitan agregat [43]. Takođe, utvrđeno je da dolazi do smanjenja zapreminske mase sa povećanjem finoće mliva stakla za isti procenat zamene agregata staklom (*slika 3.15., levo*). Betonski blokovi sa recikliranim staklom imali su veće upijanje vode nego kontrolna serija betona bez stakla. U slučaju betonskih serija sa najsitnijim staklom izmereno je i najveće

upijanje vode koje se kretalo od 4,68% za 25% zamene agregata do 6,43% za 100% zamene agregata staklom (*slika 3.15, desno*). Dijagram zavisnosti čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka i finoće mliva eksperimentalnog stakla, pri starosti od 28 dana, prikazan je na slici 3.16.



Slika 3.15. - Zapreminska masa betonskih serija u funkciji promjene finoće mliva stakla (levo); Upijanje vode betonskih serija u funkciji promjene finoće mliva stakla (desno) [43]



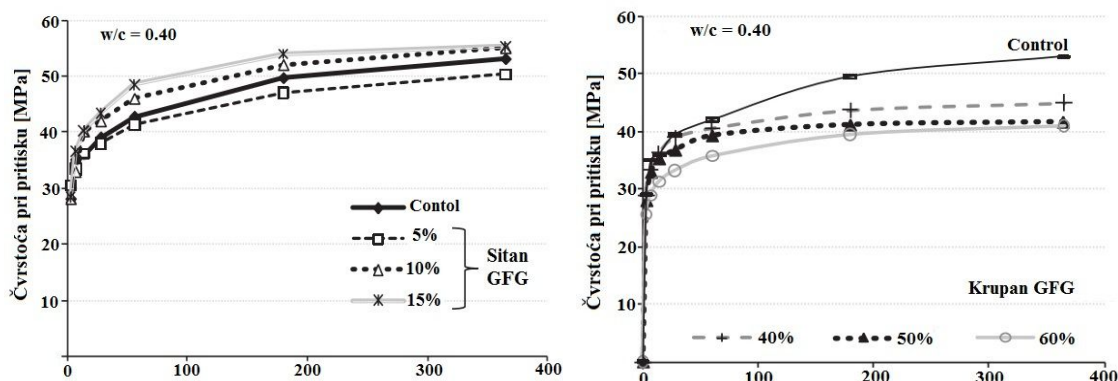
Slika 3.16. - Čvrstoća pri pritisku betonskih serija pri starosti od 28 dana u funkciji promjene finoće mliva recikliranog stakla [43]

Sa dijagrama se jasno može videti da zamena dela agregata recikliranim staklom ima za posledicu smanjenje čvrstoće pri pritisku, osim u slučaju serija sa najsitnijim staklom. Takođe se može primetiti da za serije sa krupnijim staklom promena procenta dodatka recikliranog stakla nema tako veliki uticaj na čvrstoću u poređenju sa serijom sa najsitnijim staklom. Na primer, u slučaju serije sa najkrupnijim staklom i procentom zamene od 25% izmereni pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon seriju je iznosio 8,8%, dok je sa maskimalnim dodatkom smanjenje pritisne čvrstoće iznosilo samo par procenata više – 11,5%. Autori ovakve rezultate čvrstoće pri pritisku u funkciji finoće mliva stakla objašnjavaju smanjenjem čvrstoće prionjivosti (*bond strength*) između cementne paste i krupnijih komada stakla čija je površina glatka i vodonepropusna. Sa druge strane, serija sa

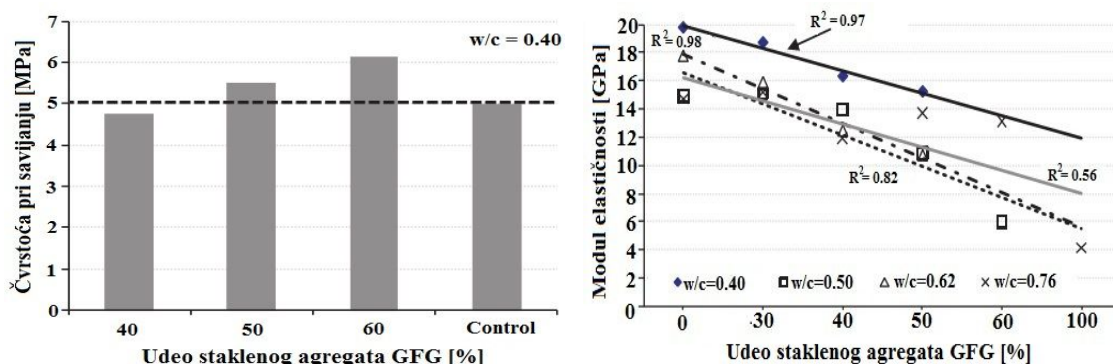
najfinijim staklom imala je veće vrednosti čvrstoća u odnosu na etalon seriju. Objašnjenje za ovakav rezultat se može naći u izvesnoj pucolanskoj aktivnosti koje reciklirano staklo ima kada se fino usitni ($< 600 \mu\text{m}$).

Staklena pena (*foam glass*) se proizvodi i primenjuje u građevinarstvu još od tridesetih godina prošlog veka. Osnovni princip proizvodnje staklene pene zasniva se na ubacivanju gasa u staklo pri temperaturama između 700°C i 900°C . Gas se na tim temperaturama širi u staklu i stvara poroznu, ćelijastu strukturu. U novije vreme se staklena pena dobija mešanjem usitnjenog otpadnog stakla i gasnog agensa na pomenutim temperaturama. S obzirom da se količine otpadne staklene pene uvećavaju na deponijama, istraživači Mukesh Limbachiya i saradnici [44] sa Kingston Univerziteta iz Londona su istraživali mogućnost primene samlevene staklene pene kao zamene za deo agregata u betonu. Eksperimentalni agregat od staklene pene (*oznaka u radu GFG*) potiče od mešane obojene staklene ambalaže. U radu je vršena zamena krupnog i sitnog prirodnog agregata staklenom penom po zapremini i to u procentu od 30%, 40%, 50%, 60% i 100% za krupni, odnosno 5%, 10% i 15% za sitni agregat. Napravljeno je više eksperimentalnih betonskih serija sa različitim vodo – cementnim faktorom: 0,40, 0,55, 0,62 i 0,76.

Kada je reč o svežem betonu, generalni zaključak je da nevezano od nivoa zamene i krupnoće recikliranog staklenog agregata ne dolazi do značajnije promene u konzistenciji u odnosu na kontrolnu seriju. Čvrstoća pri pritisku je ispitana na uzorcima oblika kocke ivice 100 mm pri starosti od 3, 7, 14, 28, 60, 180 i 365 dana. Na slici 3.17., levo prikazan je prirast čvrstoća pri pritisku serija sa zamenom od 5 do 15% sitnog prirodnog agregata staklenom penom za vodo – cementni faktor 0,40. Može se videti da su serije sa 10 i 15% zamene imale veće rane čvrstoće u odnosu na kontrolnu seriju i da se taj trend nastavio i pri većim starostima. Jedino je serija sa 5% staklene pene imala nešto manje čvrstoće u odnosu na etalon. Sa druge strane, zamena krupnog agregata staklenim agregatom utiče na smanjenje čvrstoće pri pritisku. Na slici 3.17., desno, prikazane su pritisne čvrstoće betonskih serija sa 40 do 60% zamene krupnog agregata staklom. I u slučaju upotrebe krupnijeg stakla primetne su povećane rane čvrstoće, što autori rada pripisuju visokoj alkalnosti stakla, čijim se prisustvom u betonu cement dodatno aktivira i formira C-S-H molekule u ranoj fazi. Generalno posmatrano autori zaključuju da osim betonskih serija sa visokim vodo – cementnim faktorom od 0,76 i zamenom 30% i 40 % krupnog agregata staklom, sve ostale serije imaju smanjenje čvrstoće pri pritisku u odnosu na kontrolnu - etalon seriju bez stakla. Međutim, i pored evidentnog smanjenja pritisne čvrstoće, sve betonske serije osim sa 100% zamene agregata staklom dostižu projektovane čvrstoće na 28 dana [44].



Slika 3.17. - Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene sitnog agregata staklenom penom (GFG), levo; Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene krupnog agregata staklenom penom, desno [44]



Slika 3.18. - Čvrstoća pri savijanju betona sa različitim procentom učešća GFG, levo; Modul elastičnosti betonskih serija u funkciji promene učešća GFG, desno [44]

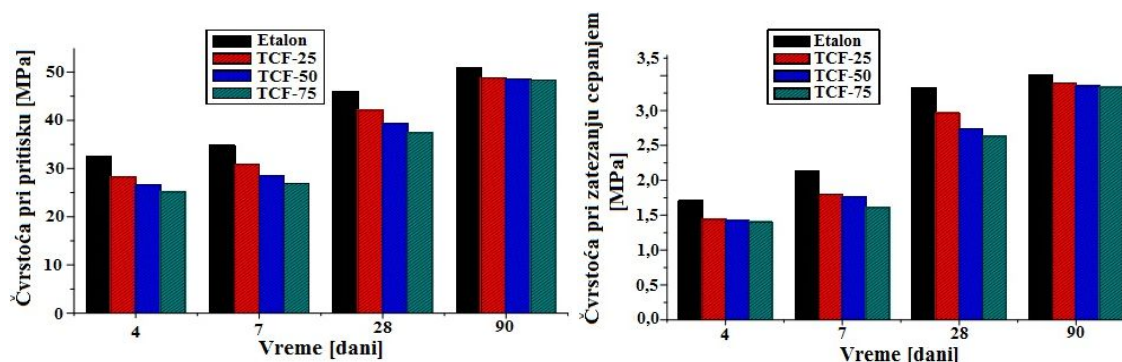
Delimična zamena krupnog agregata staklenom penom nije imala veći uticaj na čvrstoće pri zatezanju savijanjem betonskih serija. Na slici 3.18. levo se može primetiti da zamena 50% i 60% agregata staklom dovodi do povećanja savojne čvrstoće pri starosti od 28 dana. Na slici 3.18. desno, prikazana je zavisnost između statičkog modula elastičnosti pri starosti 28 dana i procenta zamene krupnog staklenog agregata (GFG). Za posmatranu vrednost vodo – cementnog faktora, povećanje učešća stakla dovelo je do značajnog smanjenja statičkog modula elastičnosti. Autori rada su zaključili da se 30% zamene agregata može smatrati gornjom granicom do koje neće doći do većeg smanjenja modula elastičnosti. Objašnjenje za negativan uticaj veće zamene agregata GFG - om na modul elastičnosti betona autori su potražili u činjenici da agregat od staklene pene ima daleko veće deformacije pri delovanju napona pritiska u odnosu na prirodni agregat [44].

U zadnjih nekoliko godina u Hong Kongu je razvijen novi način raspolaganja i upravljanja CRT otpadnim staklom. Nakon rasklapanja panelnog stakla i stakla levka

metodom usijane žice, staklo levka se usitnjava na komade sitnije od 5 mm. S obzirom na visok sadržaj olova u staklu levka, usitnjeni komadi se dalje potapaju u 5% rastvor azotne kiseline (HNO_3) u trajanju od 3h. Konačno, tako tretirano staklo se ispira vodom kako bi se uklonili ostaci kiseline. Hemijskom analizom tako tretiranog stakla levka utvrđeno je da ono ima manje od 5 mg/L olova, čime ono više ne spada u grupu opasnog otpada. Ovako tretirano staklo levka korišćeno je u rada Hui Zhao i saradnika [45] kao zamena za 0%, 25%, 50% i 75% sitne frakcije prirodnog rečnog agregata. Zamena sitnog agregata staklom urađena je po zapremini materijala. Krupan agregat su činile dve frakcije 5-10 mm i 10-20 mm, dobijene drobljenjem granita velike zapreminske mase. Zapreminska masa sitnog prirodnog agregata je bila 2620 kg/m^3 , dok je kod stakla iznosila 2992 kg/m^3 . Pomenute frakcije granita imale su zapreminsku masu 4054 kg/m^3 i 3998 kg/m^3 , respektivno. U radu je takođe korišćen i leteći pepeo, čija je uloga bila da spreči pojavu alkalno – silikatne reakcije. Letećim pepelom je zamenjeno 15% portland cementa, tako da je ukupna količina veziva u 1 m^3 betona iznosila 413 kg. Vodo – vezivni faktor je bio 0,48. Ispitivanjem osobina betona u svežem stanju utvrđeno je da se sa povećanjem udela recikliranog stakla poboljšavala homogenost i menjala konzistencija betona. Mera sleganja betona se povećavala sa povećanjem zamene agregata i kretala se u opsegu od 40 mm za 0% zamene do 135 mm za 75% zamene. Povećanje zapreminske mase svežeg betona bilo je neznatno i iznosilo je 2,68% za najveći procenat zamene agregata staklom. Objašnjenje za ovakav uticaj stakla na svojstva svežeg betona leži u činjenici da staklo ne upija vodu, kao i da korišćeno staklo ima nešto veću zapreminsku masu u odnosu na zamenjeni sitan prirodni agregat.

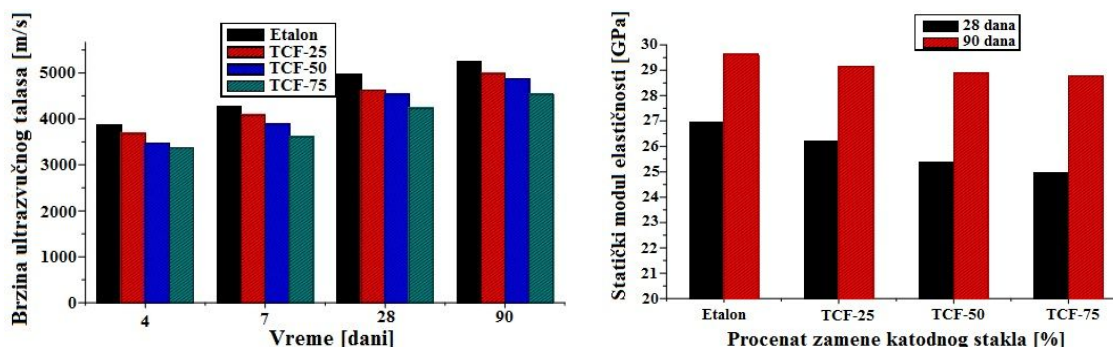
Čvrstoća pri pritisku ispitivana je na uzorcima oblika kocke ivice 100 mm, dok je čvrstoća pri zatezanju cepenjam utvrđena na uzorcima oblika cilindra prečnika 100 mm i visine 200 mm, prema standardu BS EN 12390. Rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće pri starosti betona od 4, 7, 28 i 90 dana prikazani su na slici 3.19, levo. Može se zaključiti da pri istoj starosti betona, sa povećanjem procenta udela katodnog stakla, dolazi do smanjenja pritisne čvrstoće. Pri starosti od 7 dana, betonske serije sa 25%, 50% i 75% zamene su imale smanjenje čvrstoće od 11,38%, 18,19% i 22,65% respektivno u odnosu na etalon seriju. Sa povećanjem perioda nege, pri starosti od 90 dana, ovaj pad čvrstoća je mnogo manji i iznosi svega 4,05%, 4,49% i 4,84% [45]. Do sličnih rezultata vezanih za prirast čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa staklenim agregatom došli su i autori radova [43] i [44]. Na osnovu prikazanih rezultata čvrstoće pri zatezanju cepanjem utvrđeno je da sa povećanjem zamene sitnog agregata katodnim staklom dolazi do značajnijeg smanjenja zatezne čvrstoće naročito u prvih 28 dana. Međutim, sa produžetkom perioda nege, utvrđeno je da su pri starosti od 90

dana betonske serije skoro u potpunosti nadomestile razliku u čvrstoći u odnosu na kontrolnu seriju (slika 3.19, desno).

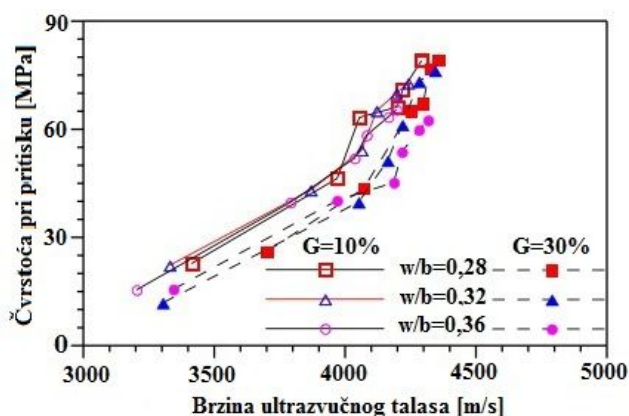


Slika 3.19. - Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim sadržajem katodnog stakla pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (levo); Čvrstoća pri zatezanju cepanjem betonskih serija sa različitim sadržajem katodnog stakla pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (desno) [45]

Brzina ultrazvučnog talasa kroz betonske uzorke pri svim starostima prikazana je na slici 3.20., levo. Utvrđeno je da se sa povećanjem starosti betonskih serija povećava brzina ultrazvučnog talasa, što je očekivan trend. Takođe, povećavanje udela stakla u betonu utiče na smanjenje brzine ultrazvučnog talasa. Tako na primer, pri starosti od 4 dana, za betonske serije sa 25%, 50% i 75% stakla brzine ultrazvučnog talasa redom iznose: 3678 m/s, 3469 m/s i 3371 m/s. Tendencija da se brzina ultrazvučnog talasa smanjuje sa povećanjem zamene agregata nije promenjena ni pri starosti od 7, 28 i 90 dana. Autori rada [45] su ovu korelaciju između brzine ultrazvučnog talasa i sadržaja katodnog stakla objasnili mogućim prisustvom zaostalog olova u staklu (< 5 mg/L) čije je prisustvo verovatno uticalo na usporavanje procesa hidratacije i na smanjene formiranja odgovarajućih hidratacionih produkata. Na slici 3.20. desno, predstavljeni su rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti eksperimentalnih betonskih serija pri starosti od 28 i 90 dana [45]. Pri starosti od 28 dana za betonske serije sa 25%, 50% i 75% stakla statički modul elastičnosti je iznosio redom: 26,20 GPa, 25,35 GPa i 24,97 GPa. Sa povećanjem udela stakla smanjuje se i statički modul elastičnosti, tako da je najveće smanjenje u odnosu na elaton seriju od 7,35% konstantovano za najveći procenat zamene agregata. Pri starosti od 90 dana smanjenja statičkog modula elastičnosti iznose: 1,65%, 2,50% i 2,90% respektivno.



Slika 3.20. - Brzina ultrazvučnog talasa kroz beton za različiti nivo zamene agregata katodnim staklom pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (levo); Statički modul elastičnosti betonskih serija sa TCF staklom pri starosti od 28 i 90 dana (desno) [45]



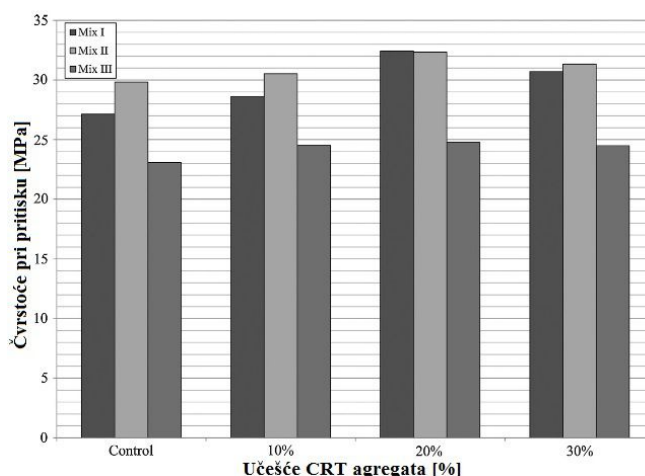
Slika 3.21. - Odnos između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog talasa kroz beton [46]

Chien – Chih Wang i saradnici [46] su vršili "procenu" čvrstoće pri pritisku samougrađujućeg betona sa ugrađenim sitnim agregatom od LCD stakla (oznaka u radu SCGC) na osnovu brzine prostiranja ultrazvučnih talasa. Kao vezivni materijali u eksperimentu su korišćeni: cement, leteći pepeo i zgura u masenom odnosu 7:2:1. Deo sitnog agregata zamenjen je LCD staklom, po zapremini, u procentu: 0%, 10%, 20% i 30%. Napravljeno je više eksperimentalnih betonskih serija sa različitim vodo – vezivnim faktorom: 0,28, 0,32, i 0,36. Čvrstoća pri pritisku i brzina ultrazvučnih talasa ispitivana je na uzorcima oblika cilindra prečnika 10 cm i visine 20 cm. Rezultati ispitivanja su pokazali da je sa povećanjem vodo – vezivnog faktora došlo do povećanja poroznosti betona nakon isparavanja viška vode (što je očekivano) i što je za posledicu imalo smanjenje brzine ultrazvučnih talasa [46]. Na slici 3.21. prikazan je dijagram zavisnosti između brzine ultrazvučnog talasa i čvrstoće pri pritisku betona sa 10% i 30% zamene agregata LCD staklom. Na osnovu dobijenih rezultata je zaključeno da sa povećanjem učešća stakla dolazi do smanjenja čvrstoće pri pritisku i, u isto vreme, povećanja brzine ultrazvučnih talasa. Ovakav uticaj LCD stakla na

beton autori objašnjavaju time da je finije ustinjeno staklo u odnosu na zamenjeni agregat popunilo pore u betonu čime se brzina talasa povećala.

Diego Romero i saradnici [47] su ispitivali uticaj CRT stakla na svojstva betona kod koga je deo sitne frakcije drobljenog agregata zamenjen ovom vrstom otpadnog stakla. Istraživanje je sprovedeno na betonskim mešavinama čiji je sastav unapred definisan važećim propisima i standardima u američkoj saveznoj državi Florida. Mešavinu 1 (*u radu Mix 1*) čini klasičan, nekonstruktivni beton. Mešavina 3 (*Mix 3*) je klasičan, konstruktivni beton, dok je dodatna mešavina 2 (*Mix 2*) istog sastava kao i mešavina 1 sa tom razlikom što je deo vode zamenjen biopolimernim rastvorom. Prema istraživanjima autora, ovaj biopolimerni rastvor vezuje jone olova iz CRT-a i tako sprečava štetno izluživanje olova iz betona. Nažalost, autori nisu prikazali sastav betonskih mešavina. Od svake vrste betona napravljene su po četiri serije pri čemu je variran procenat zamene agregata CRT staklom između 0% i 30%, sa inkrementom od 10%. Specifična masa eksperimentalnog CRT iznosila je $3,009 \text{ g/cm}^3$, dok je specifična masa zamenjenog peska iznosila $2,436 \text{ g/cm}^3$.

U slučaju sve tri vrste betona konstantovano je smanjenje rasprostiranja sa povećanjem učešća CRT stakla. Takođe, utvrđeno je da povećanje zamene agregata staklom utiče na povećanje zapreminske mase svežeg betona. Na primer, za betonsku mešavinu 2, ovo povećanje iznosi 1,9%, 2,6% i 2,8% za 10%, 20%, odnosno 30% zamene. S obzirom da CRT staklo ima 19,1% veću specifičnu masu u odnosu na sitan drobljeni agregat, ovakav rezultat je očekivan [47]. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku na cilindrima prečnika 100 mm i visine 200 mm, pri starosti od 28 dana, prikazani su na slici 3.22. Najveće povećanje čvrstoće u odnosu na kontrolnu seriju izmereno je pri zameni 20% agregata CRT-om. Za mešavine od 1 do 3 pri 20% zamene ovo povećanje iznosi 19,5%, 8,5% i 7,3%, respektivno [47].



Slika 3.22. - Čvrstoće pri pritisku betonskih mešavina sa različitim procentom učešća CRT stakla [47]

U cilju provjere trajnosti betona sa dodatkom katodnog stakla Diego Romero i saradnici su ispitivali mogućnost pojave alkano – silikatne reakcije na malterskim prizmama prema standardu ASTM C1260. Ispitivanje je pokazalo da bi dodatak CRT u procentu većem od 10% izazvao preveliku ekspanziju maltera. Sa druge strane na eksperimentalnim betonima izvršena je i provera izluživanja olova s obzirom na njegovo prisustvo u hemijskom sastavu katodnog stakla. Zaključak je da kod serija sa dodatkom 20% i 30% CRT-a dolazi do prekoračenja dozvoljene granice izluživanja olova, što je posebno opasno ako ono dospe u vodu za piće. Takođe, mešavina sa dodatkom biopolimernog rastvora pokazala se kao bolja u tom pogledu u poređenju sa druge dve mešavine. Utvrđeno je da je u kombinaciji sa upotrebljenim biopolimernim rastvorom moguće zameniti do 20% sitnog agregata CRT-om.

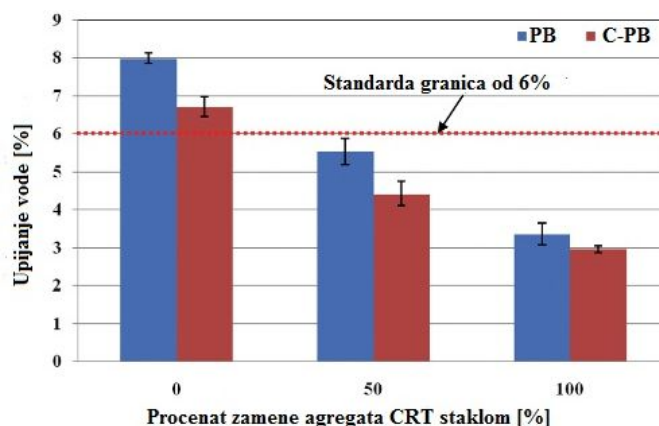
Tung – Chai Ling sa saradnicima [48] istraživao je mogućnost primene stakla levka CRT ekrana kao zamene dela sitnog agregata u betonu za spravljanje betonskih ivičnjaka. Kao što je već ranije napomenuto staklo levka sadrži olovo u svom hemijskom sastavu. Sastav eksperimentalnih betonskih serija dat je u tabeli 3.2. Korišćen je čist portland cement tip I, dok je kao dodatak korišćen i leteći pepeo klase F. U eksperimentu je korišćen agregat od recikliranog betona koji potiče iz lokalnog centra za reciklažu u Hong Kongu. Veličina čestica sitnog recikliranog agregata (*oznaka RFA*) bila je 0 – 5 mm, dok je veličina zrna recikliranog krupnog agregata (*u radu RCA*) iznosila 5 – 10 mm. Tri betonske serije su spravljene samo sa sitnim agregatom (*oznake serija PB*), dok je u sledeće tri uključen i krupan agregat (*C-PB*). Veličina zamene sitnog agregata CRT staklom levka izvršena je u procentu od: 0%, 50% (*na primer oznaka PB50*) i 100% (*na primer C-PB100*).

Tabela 3.2. - Sastav betonskih mešavina sa zamenom dela agregata CRT staklom [48]

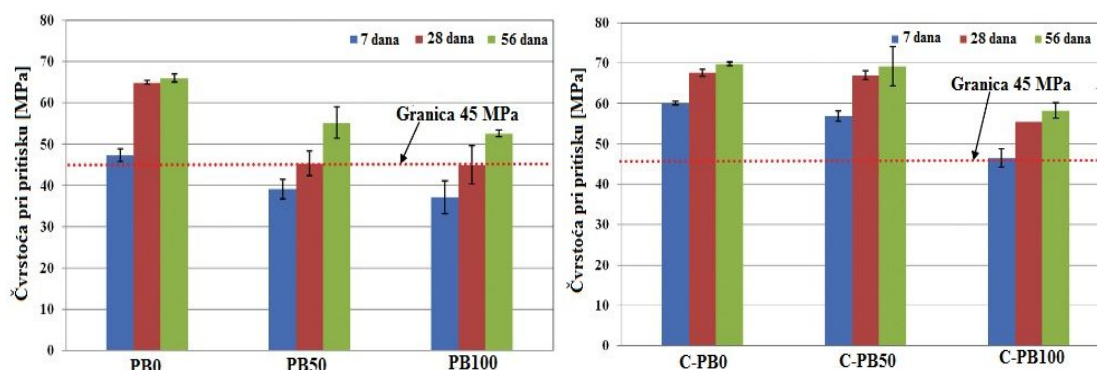
Betonske serije:	Količine materijala u kg za 1m ³ betona						
	Cement	PFA	RCA	RFA	CRT	Voda	w/c
PB0	340	113	0	1811	0	136	0,3
PB50	340	113	0	906	1074	136	0,3
PB100	340	113	0	0	2148	136	0,3
C-PB0	340	113	453	1358	0	136	0,3
C-PB50	340	113	453	679	805	136	0,3
C-PB100	340	113	453	0	1611	136	0,3

Ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava betona urađeno je na uzorcima oblika kocke ivice 70 mm. Utvrđen je prirast zapreminske mase očvrslog betona sa povećanjem zamene agregata katodnim staklom levka. Vrednost zapreminske mase je bila u rasponu od

2294 kg/m³ za PB0 do 2595 kg/m³ za PB100. Kod serija sa prisutnim krupnim recikliranim agregatom C-PB staklo je takođe imalo isti uticaj na zapreminsku masu - od 2319 kg/m³ za C-PB0 do 2585 kg/m³ za seriju C-PB100. Najveće upijanje vode ustanovljeno je kod etalon serija bez CRT – 8% kod PB0 i 6,7% kod C-PB0. Utvrđeno je da sa povećanjem udela katodnog stakla dolazi do smanjenja upijanja vode za obe vrste betona (*slika 3.23.*).



Slika 3.23. - Upijanje vode u funkciji zamene agregata CRT staklom – serija sa sitnim CRT agregatom (PB) i serija sa sitnim i krupnim CRT agregatom (C-PB) [48]



Slika 3.24. - Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 7, 28 i 90 dana serija PB (levo); serija C-PB (desno) [48]

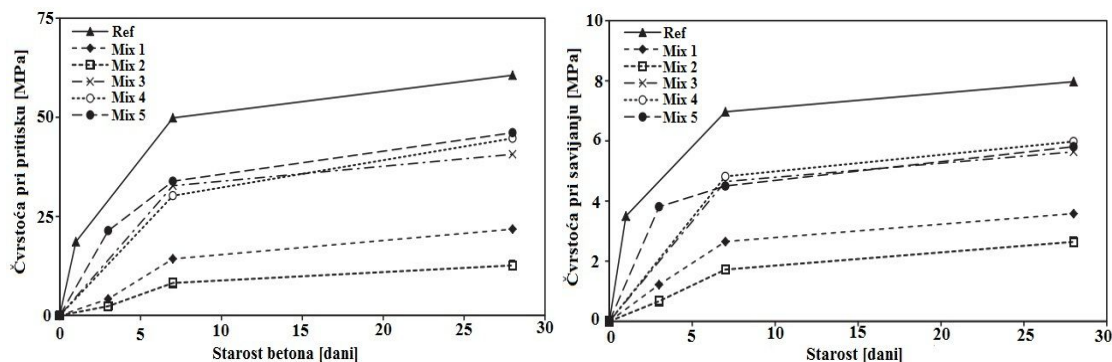
Rezultati čvrstoće pri pritisku serija sa sitnim CRT agregatom, pri starosti od 7, 28 i 56 dana, prikazani su na slici 3.24., levo. Na slici 3.24., desno prikazani su rezultati čvrstoće pri pritisku betona sa sitnim i krupnim CRT agregatom pri istim starostima. Najpre se može zaključiti da su pri svim starostima čvrstoće pri pritisku serije C-PB nešto veće u odnosu na čvrstoće serije PB. Pri starosti uzoraka od 28 dana pritisna čvrstoća PB serije je u opsegu od 45,0 MPa do 64,9 MPa, dok je u slučaju serije C-PB vrednost pritisne čvrstoće u granicama između 55,6 MPa do 68,6 MPa. Takođe, prirast čvrstoća između 28-og i 56-og dana je veći kod serija sa CRT-om. Ovakav trend autori rada [48] objašnjavaju mogućom pucolanskom

reakcijom finih čestica CRT agregata. Generalno posmatrano, sa povećanjem udela stakla dolazi do smanjenja čvrstoće pri pritisku, što autori objašnjavaju slabijim vezama između zrna staklenog agregata i cementne paste.

Providni beton ili transparentni beton (*translucent concrete*) je beton koji najčešće sadrži optička vlakna koja omogućavaju svetlosti prolaz kroz betonski element. Providni beton ima dekorativnu ulogu, tako da je njegova najčešća primena za oblaganje fasada i zidova enterijera. Prvi ovakav beton napravljen je u Kanadi još daleke 1935. godine, dok značajnija primena počinje u poslednje dve decenije [49]. Spiesz i saradnici [50] sa Tehnološkog univerziteta iz Holandije istraživali su mogućnost upotrebe otpadnog stakla kao zamene dela agregata za izradu transparentnog betona. Otpadno staklo korišćeno u radu ustupio im je centar za reciklažu stakla Maltha Glasrecycling Nederland. Veličina zrna staklenog agregata iznosila je od 20 μm do 14 mm. Staklo je podeljeno u pet frakcija: stakleni prah, frakcija 0 – 1 mm, frakcija 0 – 3 mm, frakcija 0 – 8 mm i frakcija 0 – 14 mm. Za spravljanje betona korišćene su dve frakcije rečnog agregata: 0 – 2 mm i 2 – 8 mm. S obzirom da je pravljen SCC beton korišćen je i krečnjački filer. U radu je korišćen beli cement niske alkalnosti ($< 0,60\%$) CEM I 52,5 N. U cilju ublažavanja alkalno – silikatne reakcije korišćena su dva pucolanska materijala – granulovana zgura i leteći pepeo. Pored referentnog betona, ukupno je napravljeno devet eksperimentalnih betonskih mešavina. U mešavini 1 korišćeno je neoprano staklo i ono je služilo kao zamena za filer i celokupnu količinu prirodnog agregata, dok je u mešavini 2, pored navedene zamene, staklo zamenilo i kompletnu količinu letećeg pepela. U mešavini 3 frakcija prirodnog agregata 0 – 2 mm zamenjena je recikliranim staklom. U mešavini 4 staklom je zamenjen filer, dok je u mešavini 5 prirodni pesak 0 - 2 mm zamenjen predmetnim staklom. U mešavinama od 6 do 9 korišćeno je oprano staklo kako bi se poboljšalo rasprostiranje SCC betona i regulisalo vreme vezivanja. S obzirom na problematično čišćenje staklenog praha, u serijama 6 do 9 korišćeno je samo staklo za zamenu sitnog i krupnog prirodnog agregata, ne i filera [50].

Mehaničke čvrstoće betona ispitane su na prizmama 40 x 40 x 160 mm. Uticaj zamene agregata recikliranim staklom najbolje se može videti kod serija od 1 do 5. Dobijene vrednosti čvrstoća pri pritisku i pri savijanju prikazane na slici 3.25. Najpre se može zaključiti da zamena agregata staklom dovodi do smanjenja mehaničkih čvrstoća. U slučaju mešavine broj 1, pri starosti od 28 dana, čvrstoća pri pritisku iznosila je svega 22 MPa, što je skoro tri puta manje u odnosu na referentni beton pri istoj starosti (60 MPa). Još veći pad pritisne čvrstoće zabeležen je kod serije 2 gde je pri istoj starosti čvrstoća bila svega 13 MPa. Kod mešavine 3,

gde je vršena zamene frakcije prirodnog agregata 2 – 8 mm, pad čvrstoće pri pritisku i pri savijanju je iznosilo oko 30% u odnosu na referentnu seriju, odnosu oko 25% kod serija 4 i 5.



Slika 3.25. - Dijagram čvrstoća pri pritisku betonskih serija 1-5 (levo); Dijagram čvrstoća pri savijanju betonskih serija 1-5 (desno) [50]

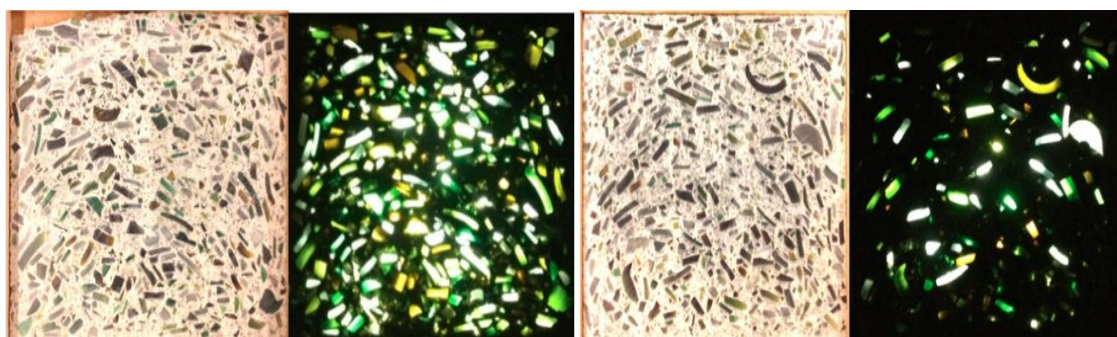
U cilju ispitivanja nivoa svetlosne provodljivosti kroz beton napravljene su epruvete dimenzija 150 x 150 x 400 mm. Nakon 24h od trenutka spravljanja betona, betonske epruvete su negovane u vodi temperature 20°C u trajanju od 28 dana. Potom su epruvete sečene dijamantskom testerom na ploče dimenzija 150 x 150 mm promenljive debljine. Izgled aparature za ispitivanje prozirnosti betona prikazan je na slici 3.26. Pre početka ispitivanja, u drvenu kutiju je postavljen senzor kako bi se izmerila početna osvetljenost u luksima (lx) kada na otvor kutije nije postavljena betonska epruveta.



Slika 3.26. - Izgled aparature za ispitivanje transparentnosti betona [50]

Betonske mešavine na kojima je ispitivana svetlosna provodljivost izabrane su na osnovu vrednosti mehaničkih čvrstoća i ispitivanja alkalno – silikatne reakcije. Mešavine 8 i 9 su izabrane za ovo ispitivanje jer su pokazale dobra fizičko – mehanička svojstva, trajnost u

pogledu ASR reakcije, a sa druge strane, sadržale su i dovoljnu količinu stakla potrebnu za postizanje efekta transparentnosti [50]. Zapreminski udeo stakla u ovim mešavinama iznosio je oko 56%. Svetlosna provodljivost betona se povećavala sa smanjenjem debljine betonskih pločica. Ovo proizilazi iz činjenice da vidljiva svetlost može da prođe samo kroz zrna stakla koja se prostiru duž cele debljine uzorka. Odnosno, sa povećanjem debljine uzoraka dolazi do smanjenja broja staklenih zrna koja se vide sa obe strane uzorka. S obzirom da je najveće zrno recikliranog stakla u radu 14 mm, ovo se i može smatrati graničnom vrednošću debljine uzorka da bi se uopšte mogla meriti transparentnost betona. Iz svega navedenog je zaključeno da prozirnost betona tj. intenzitet prolaska svetlosti kroz isti direktno zavisi od debljine betona, najveće dimenzije zrna stakla kao i od količine prisutnog stakla u betonu. Na slici 3.27. prikazan je izgled površine betonske pločice serije 9 kada svetlost prolazi kroz nju. Na levoj slici debljina pločice je 4 mm, dok je na desnoj debljina pločice 8 mm.



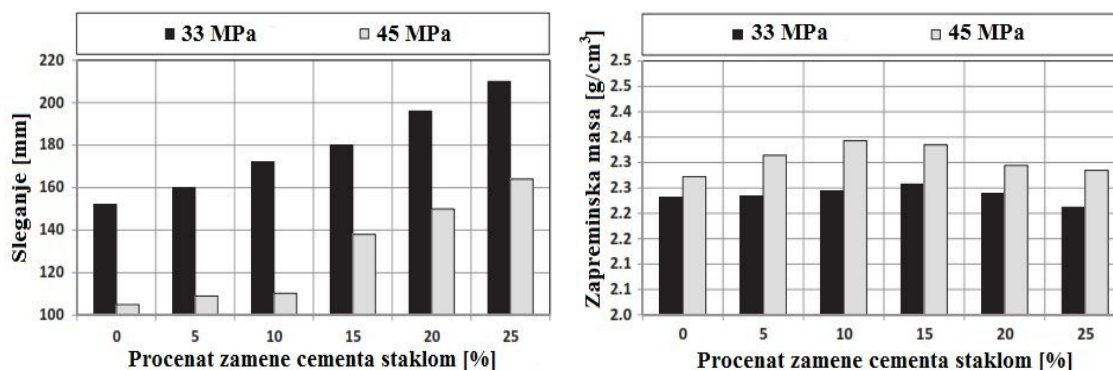
Slika 3.27. - Transparentnost betonske pločice sa staklenim agregatom, debljina pločice 4 mm (levo); debljina pločice 8 mm (desno) [50]

3.4.2. Otpadno staklo kao zamena za deo cementa u betonu

Ali Aliabdo i saradnici [35] sa Aleksandrijskog Univerziteta u Egiptu ispitivali su mogućnost upotrebe fino samlevenog recikliranog stakla za spravljanje betona. Prvo su ispitivali svojstva svežeg i očvrstlog betona kog koga je reciklirano staklo poslužilo kao substitucija za deo cementa. Nakon toga autori su istražili i uticaj dodatka određene količine otpadnog stakla cementu i pratili osobine tako spravljenog betona. Nivo zamene, odnosno dodatka stakla cementu vršen je po masi u procentu od 0% do 25% sa inkrementom od 5%. Eksperimentalno staklo od ambalaže i stakleni otpad iz industrije mlevljeni su tako da budu finiji od 75 μm . Specifična masa stakla je iznosila 2,62 g/cm^3 . Projektovana su dva tipa betona – prvi koji na 28 dana treba da ima čvrstoću 33 MPa (*oznaka u radu "33 MPa"*) i drugi tip sa čvrstoćom od 45 MPa pri istoj starosti (*oznaka "45 MPa"*). Korišćeno je 350 kg/m^3 i vodocementni faktor 0,50 za prvi tip, odnosno 450 kg/m^3 i vodocementni faktor 0,35

za drugi tip betona. Procenat korišćenog superplastifikatora za sve betonske serije bio je konstantan.

Prvo će biti predstavljeni rezultati ispitivanja svežeg i očvrslog betona kod kojih je deo cementa zamenjen samlevenim staklom. Rezultati sleganja betona prikazani su na slici 3.28., levo. Autori su utvrdili da sa povećanjem procenta zamene cementa staklom dolazi do povećanja sleganja svežeg betona. Ovaj uticaj usitnjenog stakla na promenu konzistencije betona je isti kod obe vrste mešavina. Objašnjenje za ovakav trend se može potražiti u činjenici da staklo ne upija vodu, kao i da je staklo imalo nešto manju finoću mliva od zamenjenog cementa [35]. Zapreminska masa betona u očvrslom stanju prikazana je na slici 3.28., desno. Sa grafika se može videti da pristustvo stakla u betonu dovodi do povećanja zapreminske mase očvrslog betona, naročito u slučaju betona sa većom projektovanom čvrstoćom, što se u radu pripisuje smanjivanju poroznosti.



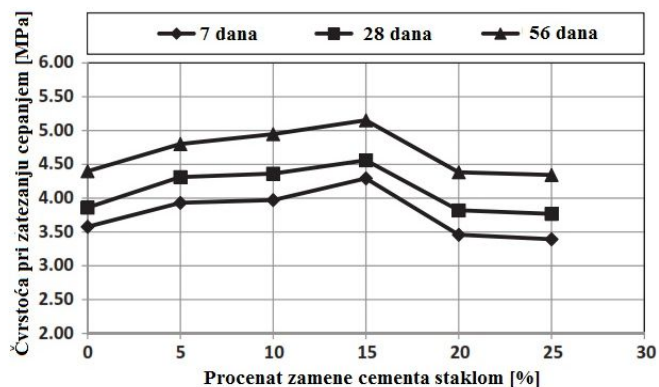
Slika 3.28. - Sleganje betonskih serija sa različitim procentom zamene cementa staklom (levo); Zapreminska masa očvrslog betona sa različitim procentom zamene stakla (desno) [35]

Čvrstoća pri pritisku betona ispitivana je pri starosti od 7, 28 i 56 dana. U tabeli 3.3. prikazane su dobijene vrednosti pritisne čvrstoće [35]. Iz tabele se može videti da kod serija “33 MPa” u slučaju 5% zamene cementa staklom dolazi do manjeg povećanja čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon seriju i to pri svim starostima. Ovakav trend povećanja čvrstoće pri pritisku se može zapaziti i kod betonskih serija “45 MPa” pri zameni cementa staklom 5% i 10%. Sa daljim povećanjem nivoa zamene cementa samlevenim staklom dolazi do smanjenja pritisnih čvrstoća za obe vrste betona. U slučaju serije “45 MPa”, pri starosti od 28 dana, čvrstoća pri pritisku se smanjuje za 9,4%, 11,1% i 12,5% za procenat zamene od 15%, 20% i 25%, respektivno.

Tabela 3.3. - Srednje vrednosti pritisne čvrstoće betona sa različitim procentom zamene cementa staklom pri starosti od 7, 28 i 56 dana [35]

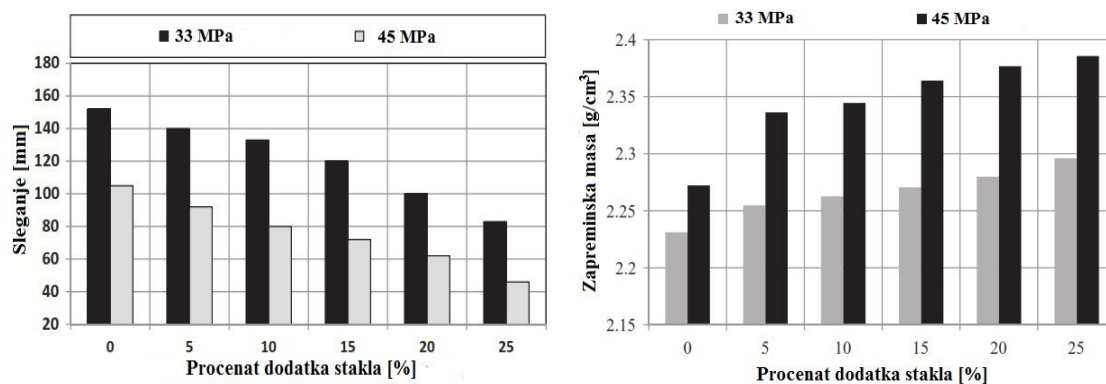
Procentat zamene cem. staklom [%]	Beton „33 MPa”			Beton „45 MPa”		
	f_p [MPa]			f_p [MPa]		
	7 dana	28 dana	56 dana	7 dana	28 dana	56 dana
0	28,70	32,20	34,50	36,49	44,32	45,51
5	30,10	33,84	36,09	36,42	45,42	48,08
10	27,38	30,75	32,04	38,51	46,45	49,18
15	26,89	29,18	31,15	36,23	40,14	43,15
20	26,09	28,10	30,58	34,09	39,39	41,12
25	25,38	27,24	29,29	32,60	38,08	39,73

Vrednost čvrstoće pri zatezanju cepanjem se značajno povećava do nivoa zamene stakla do 15% za obe projektovane betonske mešavine. Najveće povećanje zatezne čvrstoće, pri starosti od 28 dana, iznosi 19,5% za beton “33 MPa”, odnosno 18,1% za beton “45 MPa”. Na slici 3.29. prikazan je dijagram čvrstoća pri zatezanju cepanjem mešavine “45 MPa” u funkciji promene procenta zamene cementa staklom pri starosti od 7, 28 i 56 dana [35].



Slika 3.29. - Čvrstoća pri zatezanju cepanjem betonskih serija sa različitim učešćem stakla [35]

Uticaj dodatka recikliranog stakla na konzistenciju betona prikazan je na slici 3.30., levo. U proseku, svakih 5% dodatka stakla utiče na smanjenje vrednosti sleganja za otprilike 10 mm. Autori rada [35] ovaj uticaj objašnjavaju povećanjem količine sitnih čestica u betonu. Dodavanje stakla je uticalo i na smanjenje upijanja vode betona, poroznosti i mogućnost boljeg kompaktiranja betona, što je na kraju rezultovalo povećanjem zapreminske mase očvrslog betona (slika 3.30., desno).



Slika 3.30. - Uticaj dodatka stakla na promenu konzistencije betona (levo); Zapreminska masa očvrslog betona sa različitim dodatkom stakla (desno) [35]

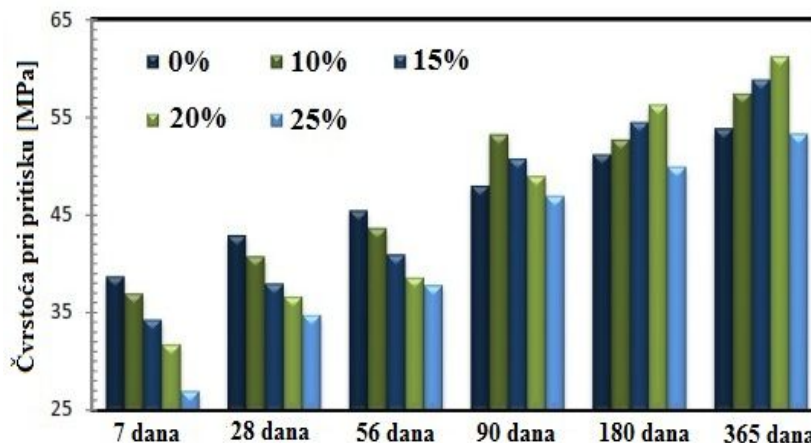
Tabela 3.4. - Srednje vrednosti čvrstoća pri zatezanju cepanjem betona sa različitim procentom dodatka stakla pri starosti od 7, 28 i 56 dana [35]

Procentat dodatka stakla [%]	Beton „33 MPa”			Beton „45 MPa”		
	f_{zc} [MPa]			f_{zc} [MPa]		
	7 dana	28 dana	56 dana	7 dana	28 dana	56 dana
0	2,68	3,20	3,70	3,78	3,86	4,40
5	3,04	3,52	4,25	3,95	4,16	4,79
10	3,23	3,91	4,44	4,05	4,33	4,93
15	3,26	3,66	4,21	4,17	4,53	5,14
20	2,89	3,26	3,62	4,22	4,66	5,16
25	2,76	3,19	3,68	4,02	4,54	5,07

Kod betona “33 MPa” dodavanje stakla do vrednosti od 15% utiče na povećavanje čvrstoće pri pritisku. Autori rada [35] su zaključili da je poboljšanje pritisne čvrstoće usled dodavanja stakla rezultat boljeg pakovanja betona, pucolanske aktivnosti stakla, kao i hidrauličkog efekta staklenog praha. Na primer, pri starosti od 28 dana, beton “33 MPa” ima povećanje čvrstoće od 4,7%, 14,6% i 16,8% za dodatak stakla od 5%, 10% i 15%, respektivno. Sa dodatkom stakla većim od 15% čvrstoća pri pritisku se smanjuje. Autori smatraju da je ovo posledica anglomeracije fino samlevenih čestica stakla pri većjoj koncentraciji stakla u betonu. Sličan uticaj dodatka stakla se može uočiti i kod rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem (tabela 3.4.). Na primer, kod betona “45 MPa” pri starosti od 56 dana najveće povećanje zatezne čvrstoće od 17,27% u odnosu na etalon beton izmereno je kod serije sa 20% dodatka staklenog praha. Pri istoj starosti, serija “33 MPa” ima

najveće povećanje čvrstoće pri zatezanju za dodatak stakla od 15% i ono iznosi oko 20,1% u odnosu na etalon.

Sadiqul i saradnici [51] su ispitivali svojstva betona kod koga je izvršena zamena dela cementa samlevenom staklenom ambalažom. Procenat zamene cementa staklom se kretao u opsegu od 10% do 25% sa inkrementom od 5%. Vodocementni faktor je bio konstantan i iznosio je 0,485. U radu je korišćen cement CEM I 42,5N. Staklo je mleveno kugličnim mlinom i njegova specifična masa je iznosila $3,02 \text{ g/cm}^3$. Betonske mešavine su projektovane tako da ciljana čvrstoća pri starosti betona na 28 dana bude oko 35 MPa, dok je sleganje trebalo da bude u granicama od 100 mm do 125 mm. Pri izradi betonskih serija nisu korišćeni hemijski dodaci. Na slici 3.31. prikazan je grafik dobijenih čvrstoća pri pritisku betonskih serija za različite vrednosti zamene stakla pri starosti od 7, 28, 56, 90, 180 i 365 dana. Ciljana čvrstoća pri pritisku od 35 MPa, pri starosti od 28 dana, dobijena je kod betonskih serija sa zamenom cementa staklom do vrednosti od 20%. U slučaju serije sa 25% zamene čvrstoća pri pritisku je nešto niža od etalon serije. Ovakav uticaj recikliranog stakla na pritisnu čvrstoću je bio sličan za sva ispitivanja koja su sprovedena do 56 - og dana. Međutim, pri starosti betona od 90 dana, betonske serije sa 10%, 15% i 20% zamenjenog cementa su imale veće vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon seriju, dok je serija sa 25% stakla imala praktično istu vrednost pritisne čvrstoće kao i etalon serija. Autori rada [51] su zaključili na osnovu dobijenih rezultata da je optimalan procenat zamene cementa staklom 20%. Naime, pri ispitivanjima na 180 i 365 dana, betonska serija sa 20% zamenjenog cementa imala je 10% i 14% veće pritisne čvrstoće, respektivno.



Slika 3.31. - Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene cementa fino samlevenim recikliranim ambalažnim staklom [51]

Na kraju ispitivanja [51] sprovedena je ekološka i finansijska kalkulacija zamene dela cementa recikliranim staklom pri izradi betona. U Bangladešu, 1 kg otpadnog stakla košta oko 2 USD centa, dok je cena 1 kg cementa oko 10 USD centa. Ako se uzme u obzir proces reciklaže i mlevenja cena koštanja usitnjenog stakla bi u Bangladešu iznosila, prema autorima, oko 3 USD centa za 1 kg. Na osnovu izloženog, autori su zaključili da bi zamena 10 i 20% cementa staklom dovela do uštede u ceni koštanja od 7%, odnosno 14% po džaku cementa u zavisnosti od nivoa zamene cementa staklom. Paralelno bi se smanjio i utrošak ugljen – dioksida CO₂ pri proizvodnji cementa za 18%.

Ablam Zidol i saradnici [52] su takođe ispitivali svojstva betona u svežem i očvrslom stanju kod koga je izvršena zamena dela cementa fino usitnjenom staklenom ambalažom (*oznaka GP*). Procenat zamene cementa recikliranim staklom iznosio je: 0%, 20% i 30%. Isto tako, napravljene su i dve betonske mešavine sa zamenom 30% cementa letećim pepelom (*oznaka FFA*) i granulisanom zgurom (*oznaka GGBS*) kako bi se međusobno uporedila svojstva betonskih serija sa različitim recikliranim materijalima. Napravljeno je više serija sa promenljivim vodovezivnim faktorom koji se kretao u opsegu od 0,35 do 0,65. Prosečan prečnik zrna cementa iznosio je 14,9 µm, dok su staklo, leteći pepeo i zgura imali prosečan prečnik zrna: 10,9 µm, 9,2 µm i 8,4 µm.

U tabeli 3.5. prikazani su rezultati ispitivanja sleganja betona za različite procenat dodatka reciklata i različite vodovezivne faktore. Kod serija sa vodovezivnim faktorom 0,55 i 0,65 nije korišćen superplastifikator ili reduktor vode tako da je sleganje betona iznosilo u proseku 195 mm bez obzira na procenat zamene i vrstu korišćenog materijala za zamenu. Kod serija sa nižim vodovezivnim faktorima korišćeni su hemijski dodaci tipa superplastifikatora tako da je sleganje u proseku iznosilo 220 - 230 mm. U tabeli 3.6. prikazani su rezultati ispitivanja sadržaja uvučenog vazduha u betonu. Za sve eksperimentalne serije, nezvano od vrednosti vodovezivnog faktora, sadržaj uvučenog vazduha se kretao od 5% do 8% [52].

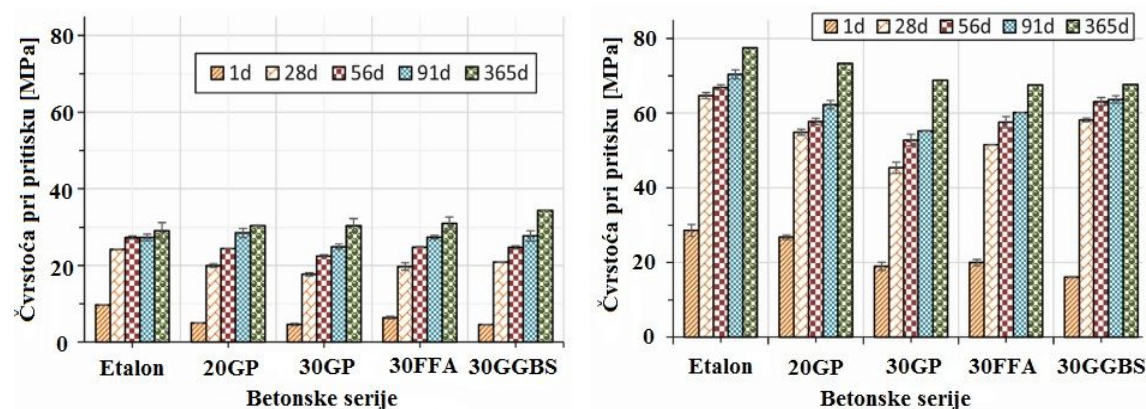
Tabela 3.5. - Sleganje betona sa različitim dodacima i w/b faktorom [52]

w/b	Sleganje [mm]				
	Etalon	20 GP	30 GP	30 FFA	30 GGBS
0,65	170	195	190	190	195
0,55	200	195	195	200	170
0,40	220	230	230	240	240
0,35	230	230	220	195	230

Tabela 3.6. - Sadržaj uvučenog vazduha u betonu sa različitim dodacima i w/b faktorom [52]

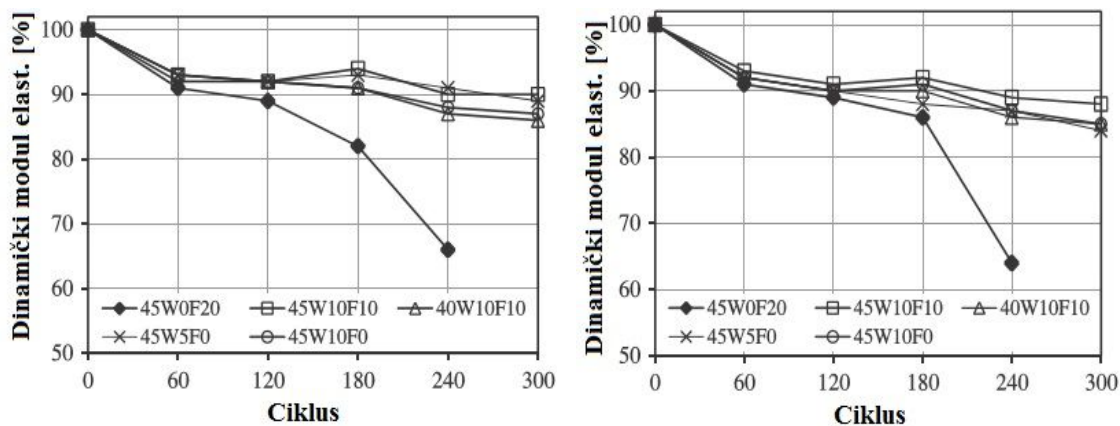
w/b	Sleganje [mm]				
	Etalon	20 GP	30 GP	30 FFA	30 GGBS
0,65	170	195	190	190	195
0,55	200	195	195	200	170
0,40	220	230	230	240	240
0,35	230	230	220	195	230

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku izvršeno je pri starosti betona od 1, 28, 56, 91 i 365 dana. Na slici 3.32. prikazana je promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena za betonske serije sa najvećim (*slika 3.32., levo*) i najmanjim (*slika 3.32., desno*) vodovezivnim faktorom. U slučaju betona sa vodovezivnim faktorom 0,65, etalon serija ima veće pritisne čvrstoće od serija sa staklom do starosti od 56 dana, odnosno pri svim starostima u slučaju betona sa vodovezivnim faktorom 0,35. Beton sa višim vodovezivnim faktorom i sa zamenom cementa staklom dostigao je vrednost čvrstoća etalona nakon 56-og dana [52]. Autori rada objašnjavaju ovu pojavu time da se pucolanksa reakcija stakla odigrava kasnije u odnosu na proces hidratacije cementa, tako da je za nju neophodna odgovarajuća količina slobodne vode koju pružaju betoni sa visokim vodovezivnim faktorom. Sa druge strane, sa slike 40, može se jasno uočiti da je za isti procenat zamene stakla neuporedivo veća pritisna čvrstoća betona sa nižim vodovezivnim faktorom, i to pri svim starostima, što je svakako i očekivano. Takođe, mehaničke čvrstoće betona sa zamenom 20 i 30% cementa staklom su podjednako zadovoljavajuće kao i kod betonskih serija sa drugim mineralnim dodacima [52].

Slika 3.32. - Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim mineralnim dodacima i vodovezivnim faktorom 0,65 (*levo*), odnosno vodovezivnim faktorom 0,35 (*desno*) [52]

Jihwan Kim i saradnici [53] su ispitivali trajnost betona u pogledu otpornosti na dejstvo mraza i jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje kod koga je deo cementa zamenjen letećim pepelom i otpadnim staklenim muljem (*glass sludge*) koji predstavlja nusprodukt procesa poliranja i obrade stakla. U radu je korišćen čist portland cement CEM I, leteći pepeo klase F i stakleni mulj koji je prethodno samleven i prosejan kroz sito otvora 0,75 μm . Napravljeno je ukupno pet betonskih mešavina: kontrolna sa 20% zamene cementa letećim pepelom (oznaka u radu 45W0F20 - vodovezivni faktor 0,45, staklo W 0% i leteći pepeo F 20%), serija sa učešćem 10% oba mineralna dodatka (45W10F10), serija sa učešćem 10% oba mineralna dodatka i vodovezivnim faktorom 0,40 (40W10F10), serija sa 5% zamene cementa staklenim muljem (45W5F0) i sa 10% zamene cementa staklom (45W10F0).

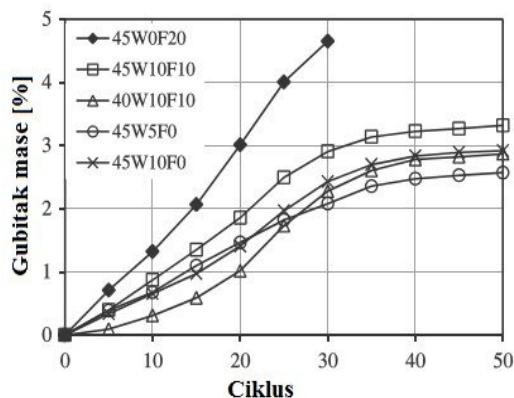
Otpornost na dejstvo mraza ispitana je po ubrzanoj metodi prema standardu ASTM C666. Uzorci su negovani na dva načina - u običnoj vodi i u 4% vodenom rastvoru natrijum - hlorida i kalcijum - hlorida ($\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$, 7 : 3). Uzorci oblika prizme su imali dimenzije 100 x 100 x 400 mm. Nakon vađenja iz kalupa, uzorci su negovani u vodi 14 dana nakon čega je otpočeto sa naizmeničnim smrzavanjem i odmrzavanjem. Svaki ciklus je trajao 4h i sastojao se od smrzavanja uzorka od početne temperature 4 °C do temperature -18 °C i odmrzavanja uzorka od temperature -18 °C do 4 °C. Autori rada su dužinu trajanja ispitivanja usloveli merenjem dinamičkog modula elastičnosti pomoću ultrazvuka. Ispitivanje je trajalo dok se dimački modul elastičnosti nije smanjio do 60% od početne vrednosti ili do ukupno 300 ciklusa ispitivanja. Na slici 3.33. prikazana je promena dinamičkog modula elastičnosti u funkciji broja ciklusa i to pri negovanju uzorka u običnoj vodi (slika 3.33., *levo*) i u rastvoru natrijum i kalcijum hlorida (slika 3.33., *desno*).



Slika 3.33. - Dinamički modul elastičnosti betonskih serija sa različitim procentom dodatka stakla negovanih u običnoj vodi (*levo*) i u rastvoru soli (*desno*) [53]

Dinamički modul elastičnosti je veći kod svih serija sa dodatkom stakla u odnosu na etalon seriju spravljenju samo sa letećim pepelom. Relativni dinamički modul elastičnosti kontrolne serije značajno se smanjuje posle 120 ciklusa i prelazi kritičnu tačku posle 240 ciklusa čime je ispitivanje za ovu seriju u tom trenutku i prekinuto. S druge strane, modul elastičnosti kod serije sa recikliranim staklenim muljem ne opada ispod 80% nakon 300 sprovedenih ciklusa. Autori rada [53] su ovakve rezultate eksperimentalnih serija objasnili na sledeći način: kontrolna serija sa 20% letećeg pepela pri starosti od 14 dana ima relativno male čvrstoće u poređenju sa serijama sa staklom. Međutim, u slučaju betonske serije 45W10G10 koja ima svega 10% veće čvrstoće pri pritisku od kontrolne, izmerena je najbolja otpornost na dejstvo mraza. Na taj način, može se konstatovati da se zamenom dela cementa staklom poboljšava otpornost betona prema delovanju mraza. Autori su takođe utvrdili da, osim u slučaju kontrolne serije, različit režim nege betonskih uzoraka nema veći uticaj (*voda ili rastvor soli*) na promenu dinamičkog modula elastičnosti u ovom eksperimentalnom ispitivanju [53].

Ispitivanje otpornost površine betona na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje sprovedeno je prema američkom standardu ASTM C672. Za ispitivanje su korišćeni uzorci dimenzija 300 x 300 x 100 mm na čiju površinu je pomoću silikona zalepljen plastični okvir debljine 3 mm. Na kraju, okvir je premazan slojem epoksida i maltera tako da je njegova konačna debljina bila 20 mm, a visina 20 mm. Pre početka ispitivanja u okvir je sipan 4% rastvor NaCl + CaCl₂ (7 : 3). Jedan ciklus ispitivanja se sastoji od smrzavanja uzorka na temperaturi - 18 °C u trajanju od 16 - 18 h, a zatim otkravljanja na vazduhu temperature 23 °C i relativne vlažnosti 45 -55% u trajanju od 6 - 8 h. Uzorci su pregledani i mereni na svakih 5 ciklusa ispitivanja do ukupno 50 ciklusa. Gubitak mase tokom 50 ciklusa ispitivanja prikazan je na slici 3.34.



Slika 3.34. - Gubitak mase prilikom ispitivanja otpornosti na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje [53]

Rezultati ispitivanja su pokazali da su uzorci sa staklom u svim situacijama pokazali bolju otpornost od etalon betona. Ispitivanje etalon betona je zaustavljeno kod 35 - og ciklusa zbog velikog gubitka mase, dok je u tom trenutku bilo jedva primetno ljuaskanje površine betona kod uzoraka sa dodatkom stakla. Autori rada [53] objašnjavaju ovakve rezultate time da je etalon beton sa dodatkom letećeg pepela imao relativno male čvrstoće na početku ispitivanja u odnosu na serije sa staklom, kao i da je kod betona sa zamenom dela cementa staklom došlo do formiranja hidrata usled pucolanske reakcije stakla.

Roz - Ud - Din Nassar i saradnici [54] sa Univerziteta u Mičigenu istraživali su čvrstoće i trajnost betona spravljenog sa agregatom od recikliranog betona i cementom čiji je deo zamenjen samlevenim otpadnim staklom. Krupan agregat od recikliranog betona je preuzet iz lokalnog centra za reciklažu. Starost betona koji je upotrebljen za recikliranje iznosila je 30 godina, projektovana čvrstoća pri pritisku je bila oko 28 MPa i tokom eksploatacije je pokazao dobru otpornost na dejstvo mraza, sulfata i hlorida. Kao sitan agregat je korišćen uobičajen, rečni agregat. Otpadno staklo korišćeno u eksperimentu potiče od sakupljene staklene ambalaže različite boje i samleveno je do prosečne finoće mliva od 19 μm . Napravljeno je pet betonskih mešavina sa vodovezivnim faktorom 0,38: M1 - kontrolna mešavina, bez recikliranog agregata i otpadnog stakla, M2 - mešavina sa 50% zamene krupnog agregata agregatom od recikliranog betona, M3 - mešavina sa 50% krupnog recikliranog agregata i 20% zamene cementa staklom po masi, M4 - mešavina sa 100% recikliranog agregata i M5 - mešavina sa 100% recikliranog agregata i 20% stakla. Sastav betonskih mešavina i svojstva svežeg betona prikazani su u tabeli 3.7.

Tabela 3.7. - Sastav betonskih mešavina i svojstva betona u svežem stanju [54]

Sastav betona i osobine:	M1	M2	M3	M4	M5
Krupan agregat [kg/m^3]	952	476	476	-	-
Reciklirani agregat [kg/m^3]	-	399	399	797	797
Sitan agregat [kg/m^3]	651	651	651	651	651
Cement [kg/m^3]	468	468	375	468	375
Voda [kg/m^3]	178	178	178	178	178
Reciklirano staklo [kg/m^3]	-	-	94	-	94
Sleganje [mm]	70	83	92	95	97
Zapreminska masa [kg/m^3]	2299	2219	2209	2213	2193
Sadržaj uvuč. vazduha [%]	4,5	5	5	6	6

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja betona u svežem stanju u tabeli 3.7. može se zaključiti da se mera sleganja betona u manjoj meri povećala sa zamenom cementa staklom. Takođe, serije sa recikliranim agregatom imaju veću vrednost sleganja u odnosu na kontrolnu seriju M1. Manja zapreminska masa recikliranog agregata u poređenju sa običnim krupnim agregatom, kao i neznatno veći sadržaj uvučenog vazduha, mogu biti uzrok nešto većeg sleganja betona [54]. Najveće smanjenje zapreminske mase betona od 4,6% izmereno je kod serije M5. Uzrok pomenutog smanjenja zapreminske mase se može potražiti u činjenici da je specifična masa recikliranog stakla ($2,46 \text{ g/cm}^3$) manja od specifične mase cementa. Nije utvrđen veći uticaj prisustva stakla na sadržaj uvučenog vazduha u betonu.

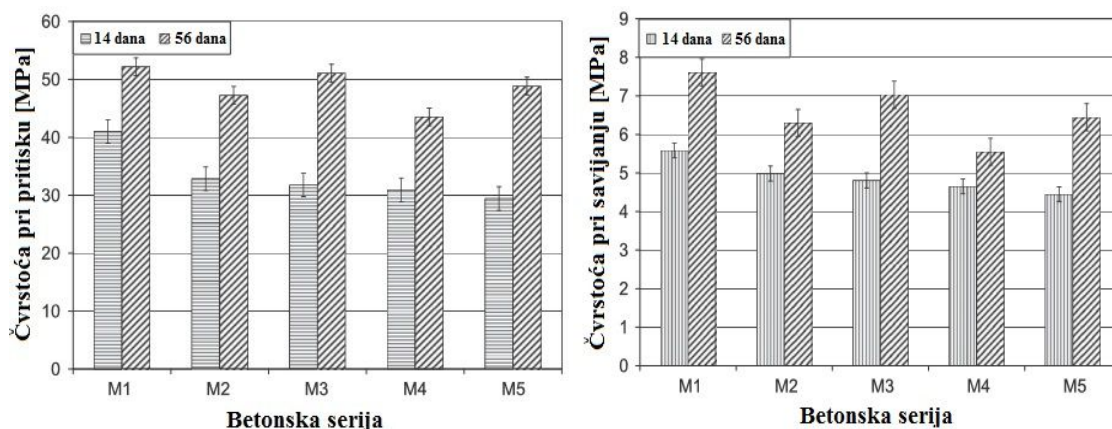
Upijanje vode i poroznost su važni indikatori trajnosti očvrslog betona. Redukcijom upijanja vode i poroznosti moguće je značajno uticati na poboljšanje kvaliteta betona u pogledu trajnosti i postojanosti u agresivnim sredinama. Smanjenjem poroznosti se takođe poboljšavaju čvrstoće betona. U tabeli 3.8. su prikazane sledeće osobine očvrslog betona: zapreminska masa u suvom stanju, zapreminska masa u vodozasićenom stanju i upijanje vode. Zamena dela cementa staklom utiče na povećanje obe nabrojane zapreminske mase očvrslog betona. Objašnjenje se može potražiti u tome da su fine čestice stakla omogućile bolje kompaktiranje betona. Takođe, može se uočiti da je prisustvo stakla u betonu značajno smanjilo upijanje vode.

Tabela 3.8. - Zapreminska masa i upijanje vode očvrslog betona [54]

Betonske serije	Zapreminska masa u suvom stanju [g/cm^3]	Zapreminska masa vodozasićenog betona [g/cm^3]	Upijanje vode [%]
M1	2,22	2,36	5,93
M2	2,19	2,32	6,26
M3	2,12	2,33	5,15
M4	2,07	2,22	7,50
M5	2,10	2,26	5,85

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona, pri starosti od 14 i 56 dana, prikazani su na slici 3.35., levo. Pri starosti od 14 dana pritisna čvrstoća serija sa 20% stakla (M3 i M5) je niža u odnosu na ostale serije bez stakla. Međutim, pri starosti od 56 dana, betonske serije sa dodatkom stakla su imale veće vrednosti čvrstoće pri pritisku za isti procenat učešća recikliranog agregata. Pri ispitivanju na 56 dana je utvrđeno da serija M3 (serija sa 50% recikliranog agregata i 20% zamene cementa staklom) ima 8% veću pritisnu čvrstoću u

odnosu na seriju M2 (*serija sa 50% recikliranog agregata bez stakla*). Slično poređenje se može napraviti i kod serija sa 100% recikliranim agregatom - serija M5 ima 12% veću pritisnu čvrstoću u odnosu na seriju M4. Značajan prirast čvrstoća pri pritisku između 14 - og i 56 - og dana posledica je pucolanske aktivnosti stakla i boljeg kompaktiranja betona, tj. povećanja njegove zapreminske mase usled prisustva stakla. Takođe, pri starosti od 56 dana, razlika između čvrstoća etalon serije M1 i serija sa staklom M3 i M5 je minimalna. Na slici 3.35., desno prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem pri starosti od 14 i 56 dana. Može se reći da trend prirasta čvrstoća pri zatezanju savijanjem betonskih serija sa dodatkom stakla odgovara trendu prirasta čvrstoća pri pritisku. Pri starosti od 56 dana, usled prisustva stakla, dolazi do povećanja čvrstoće pri savijanju za isti procenat zamene običnog agregata recikliranim agregatom. Serija M3 ima 11% veću savojnu čvrstoću u poređenju sa serijom M2, odnosno serija M5 ima 14% veću čvrstoću u poređenju sa serijom M4.



Slika 3.35. - Čvrstoće pri pritisku (levo) i čvrstoće pri zatezanju savijanjem (desno) betonskih serija sa agregatom od recikliranog betona i zamenom dela cementa staklom [54]

Ahmed Omran i saradnici [55] istraživali su dugoročan uticaj dodatka recikliranog stakla kao zamene dela cementa na svojstva betona ugrađenog u različite konstruktivne elemente u Kanadi. Procenat zamene dela cementa staklom kretao se u rasponu od 10% do 30%, po masi. Reč je o staklu koje je dobijeno mlevenjem raznobojne staklene ambalaže. Od ovako modifikovanog betona u periodu od 2006. do 2011. godine napravljeni su elementni prikazani u tabeli 3.9. Prilikom ugradnje in situ jedan element je bio spravljen sa betonom sa dodatkom stakla, dok bi drugi element bio spravljen sa običnim betonom. Takođe, u isto vreme, spravljene su i dve betonske mešavine u laboratoriji kako bi se ispitala svojstva betona pri starosti od 28 i 91 dana, na modifikovanom betonu i na referentom betonu bez stakla. U

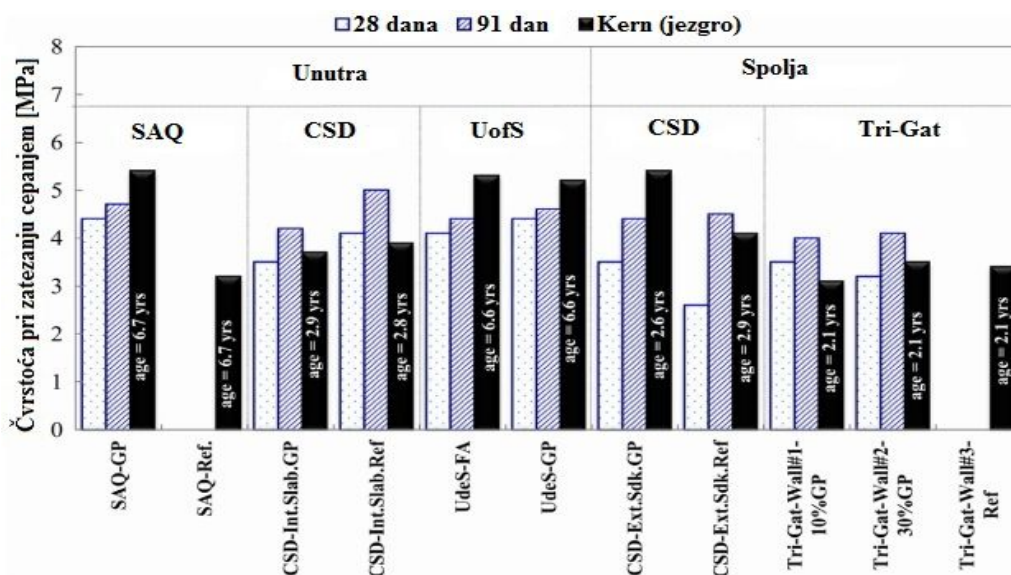
periodu od 2013. do 2016. godine, tj. od 2,1 do 6,7 godina od momenta ugrađivanja betona vađeni su cilindri - tzv. "kernovi" i izvršena ispitivanja. Zatim je urađeno poređenje dobijenih rezultata ispitivanja betona iz realnih eksploatacionih uslova i laboratorijskih rezultata.

Tabela 3.9. - Pozicije ugradnje betona sa zamenom dela cementa staklom u Kvebeku, Kanada [55]

Objekat:	Pozicija:	Datum ugradnje:	Procenat mineralnih dodatka:	Datum kernovanja:
Societe des alcools du Quebec (SAQ)	Dve unutrašnje ploče	20.12.2006.	20% staklo 5% silikatna prašina	20.12.2013. (6,7 godina)
The Center for Sustainable Development (CSD - Int.Slab)	Dve unutrašnje AB ploče	26.10.2010. i 3.12.2010.	20% staklo	05.09.2013. (2,8 - 2,9 godina)
Research Laboratory of University of Sherbrooke, Quebec (UofS)	Dve unutrašnje ploče	20.12.2007.	20% staklo 20% leteći pepeo	09.07.2014. (6,6 godina)
Saint Catherine Street (oznaka serije CSD-Ext.Sdk.)	Dve spoljašnje pešačke staze	26.10.2010. i 15.02.2011.	20% staklo	April 2012 (2,6 godina) Januar 2014 (2,9 godina)
Tricentris recycling plant. Gatineau (Tri- Gat - Wall)	Dva spoljašnja noseća zida	23.09.2011.	1 zid: 10% staklo; 2 zid: 30% staklo	23.10.2013. (2,1 godina) 24.02.2016. (4,4 godine)

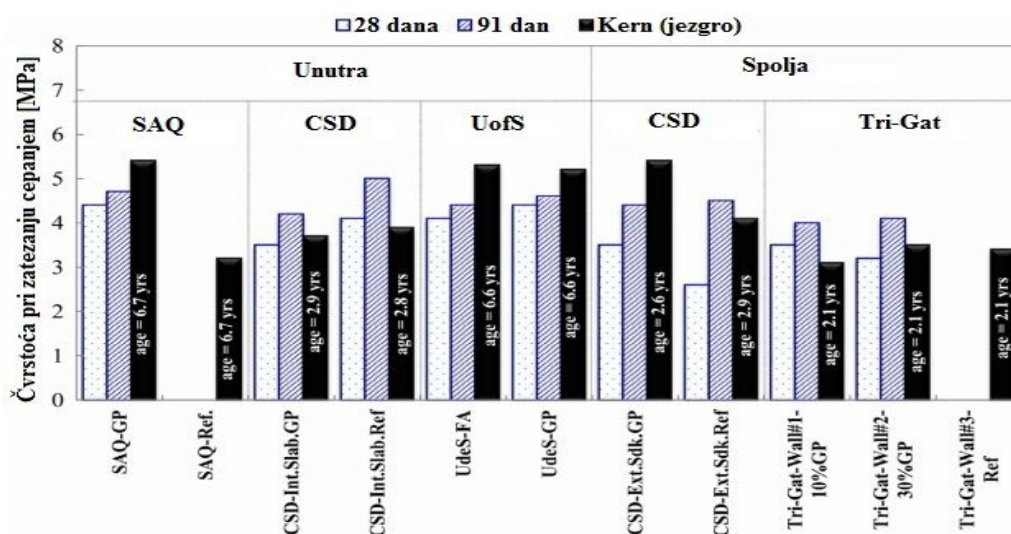
Pre same diskusije dobijenih rezultata treba naglasiti da su autori za različite pozicije spravljali betone sa različitim sastavom i hemijskim dodacima. U tom smislu treba svaku poziciju razmatrati kao zaseban slučaj. Na slici 3.36. prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku za eksperimentalne serije pri starosti od 28 i 91 dan u laboratoriji, kao i na betonskim jezgrima nakon vađenja iz konstrukcije. Pored navedenih skraćenica serija iz tabele 3.9., korišćene su oznake GP za reciklirano staklo i Ref. za referenti beton. Na primer, u slučaju unutrašnje ploče - serija SAQ-GP pri starostima od 28 i 91 dan dobijene su čvrstoće pri pritisku od 46 MPa i 52 MPa dok je na cilindrima, pri starosti betona od 6,7 godina, zabeležena pritisna čvrstoća 55 MPa. Sa druge strane, kernovi SAQ-Ref imaju veliki podbačaj kada je reč o pritisnoj čvrstoći u odnosu na laboratorijske rezultate. S obzirom da je beton ugrađivalo lokalno građevinsko preduzeće, brojni su faktori mogli da utiču na ovu razliku, počev od načina same ugradnje, nege betona ili dodavanja vode prilikom ugradnje itd. Ugradnja betona CSD-Int.Slab.GP i CSD-Int.Slab.Ref sprovedena je pri niskoj temperaturi od - 10 °C. Naravno da su se ovako eksterni uslovi odrazili na rezultate pritisne čvrstoće betona

u poređenju sa standardnim uslovima u laboratoriji. Pritisna čvrstoća cilindara UofS je veća za 18% u odnosu na čvrstoću pri starosti od 91 dana. Ove ploče su nakon ugradnje polivane vodom još sedam dana. Kernovi serije CSD Ext.Sdk.GP su imali odlične rezultate u poređenju sa referentnom serijom CSD Ext.Sdk.Ref i pored toga što su spravljene sa višim vodovezivnim faktorom (0,42 *naspram* 0,38) i što je ispitivanje sprovedeno 3 meseca ranije u odnosu na referentni beton (2,6 *godina naspram* 2,9).



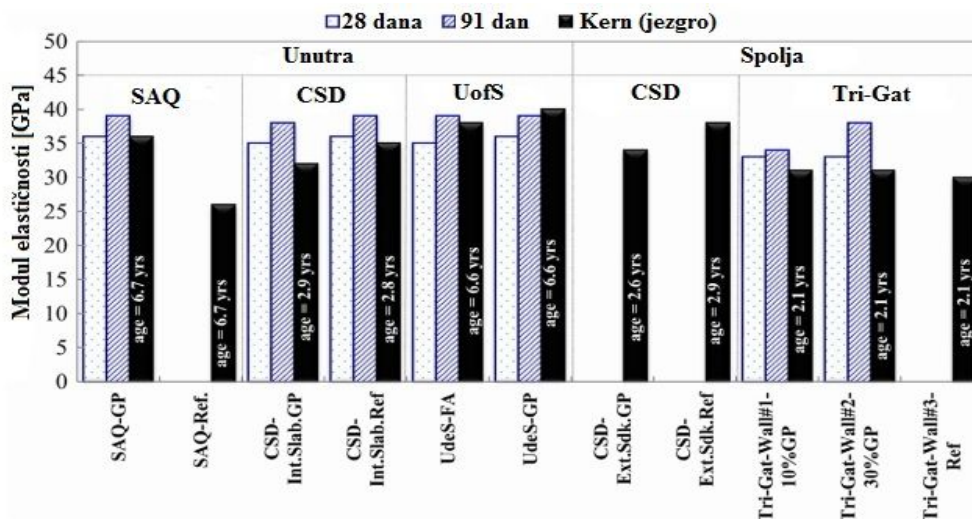
Slika 3.36. - Čvrstoća pri pritisku cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom [55]

Na slici 3.37. prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem za eksperimentalne serije pri starosti od 28 i 91 dan u laboratoriji, kao i na betonskim jezgrima - nakon vađenja iz konstrukcije. Prethodno navedeni uslovi ugradnje uticali su podjednako i na rezultate čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Kod pozicija gde je beton ugrađen na valjan način i pri zadovoljavajućim vremenskim uslovima (*na primer* SAQ-GP, UofS-GP, CSD-Ext.Sdk.-GP) rezultati ispitivanja na cilindrima pokazali su odlične zatezne čvrstoće. Serija sa staklom SAQ-GP pri starosti od 28 i 91 dan, imala je čvrstoću pri zatezanju 4,4 MPa i 4,7 MPa, dok su cilindri pri starosti od 6,7 godina imali zateznu čvrstoću 5,4 MPa. Kernovi koji pripadaju spoljašnjem nosećem zidu sa 30% stakla (Tri.Gat.Wall.2-30%GP), pri starosti od 2,1 godine, imaju oko 85% vrednosti zatezne čvrstoće dobijene u laboratoriji na 91 dan.



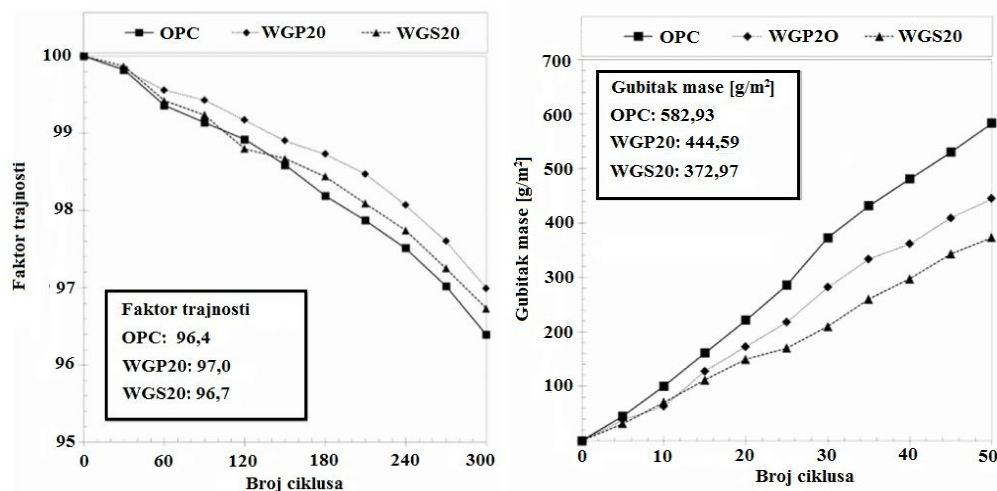
Slika 3.37. - Čvrstoća pri zatezanju cepanjem cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom [55]

Modul elastičnosti betona, ispitivan na cilindrima pri starosti od 6,7 godina, za seriju SAQ-GP je iznosio oko 36 GPa (slika 3.38.). Vrednost modula elastičnosti betona UofS-FA dostigla je i nadmašila laboratorijske rezultate. Cilindri isečeni iz spoljašnje pešačke staze CSD-Ext.Sdk.GP imali su modul elastičnosti 34 GPa, dok je referentni beton CSD-Ext.Sdk.Ref. imao 38 GPa. Kod spoljašnjih nosećih zidova se može zapaziti sličan trend kao kod prethodno navednih rezultata. Prvo se može uočiti prirast modula elastičnosti između 28. i 91. dana, a zatim smanjenje vrednosti usled nedovoljno dobre ugradnje in situ. Tako na primer, vrednost modula elastičnosti Tri.Gat.Wall.1-10GP i Tri.Gat.Wall.1-30GP, odnosno betona sa 10% i 30% stakla pri starosti od 2,1 godine, iznosi oko 31 GPa.



Slika 3.38. - Modul elastičnosti cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom [55]

Hyeonggi Lee i saradnici [42] su ispitivali mehanička svojstva i trajnost betona kod koga je 20% mase cementa zamenjeno dvema vrstama otpadnog stakla - usitnjenom staklenom ambalažom (*serija WGP20*) i otpadnim staklenim muljem (*WGS20*). Vodocementni faktor je bio konstantan i iznosio je 0,35. Specifična masa predmetnih stakala iznosila je $2,6 \text{ g/cm}^3$. Sve tri betonske serije dostigle su ciljanu čvrstoću pri pritisku od 38,5 MPa pri starosti od 28 dana. Pri starosti od 7 i 28 dana kontrolna serija (OPC) imala je najveće čvrstoće, međutim pri starosti od 90 dana serija WGS20 je dostigla i nadmašila vrednost pritisne čvrstoće kontrolne serije. Objašnjenje za ovakav trend prirasta čvrstoća pri pritisku se poklapa sa objašnjenjima autora Ablam Zidol i saradnika [52] i Roz - Ud - Din Nassar i saradnika [54]. Sprovedeno je 300 ciklusa naizmeničnog smrzavanja (-18°C) i odmrzavanja ($+4^\circ\text{C}$) pri čemu je izračunavan faktor trajnosti (*durability factor*) u skladu sa standardom ASTM C666 (*slika 3.39., levo*). Najveći faktor trajnosti 97,0 ima serija WGP20. Nakon 50 ciklusa jednovremenog delovanja mraza i soli za odmrzavanje serije WGP20 i WGS20 imale su 24%, odnosno 36% manji gubitak mase od etalon serije (*slika 3.39., desno*). Glavni zaključak je da se reciklirano staklo korišćeno u eksperimentu može uspešno iskoristiti kao zamena za deo cementa, kao i da stakleni mulj ima povoljniji uticaj na mehaničke osobine i trajnost betona od otpadne staklene ambalaže [42].

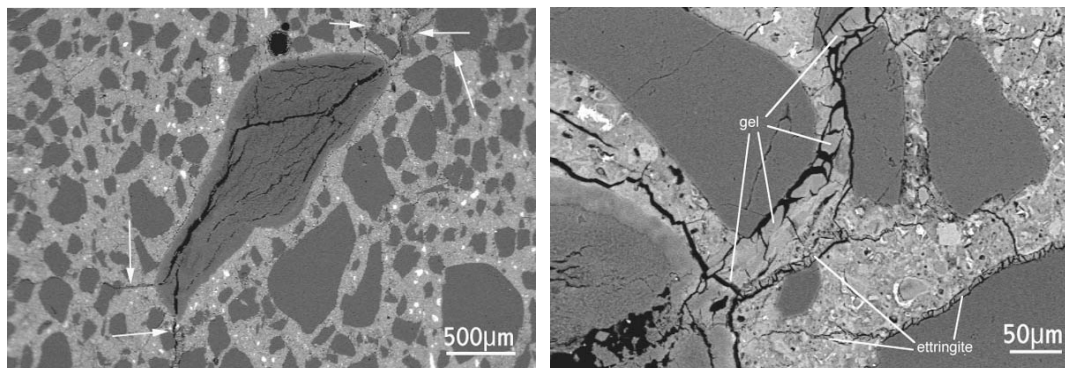


Slika 3.39. - Faktor trajnosti betona utvrđen ispitivanjem otpornosti prema delovanju mraza (levo); Gubitak mase betona prilikom ispitivanja delovanja mraza i soli (desno) [42]

4. ALKALNO - SILIKATNA REAKTIVNOST U MALTERIMA I BETONIMA SA DODATKOM OTPADNOG STAKLA

4.1. Mehanizam nastanka alkalno - silikatne reakcije

Alkalno - silikatna reakcija (ASR) u malterima i betonima započinje delovanjem alkalija iz cementa (Na_2O i K_2O) i silikatnih minerala u agregatu. Produkt ove reakcije je alkalno - silikatni gel (slika 4.1.). ASR gel privlači vodu apsorbcijom ili osmotskim procesom i na taj način povećava svoju zapreminu. S obzirom da je ASR gel zarobljen u cementnom kamenu, usled njegove težnje da poveća zapreminu, on počinje da vrši konstantan pritisak na svoje okruženje. U dužem vremenskom periodu, visoki unutrašnji naponi dovode do pojave prslina i pukotina u cementnom kamenu, a u konačnom i do destrukcije maltera i betona. Smatra se da postoje dva razloga koja dovode do štetne ekspanzije cementnog kamena. Prvi razlog je pojava hidrauličkog pritiska ASR gela izazvanog procesom osmoze i apsorbcije vode. Drugi razlog je pritisak usled bubrenja (*swelling pressure*) čvrstih produkata alkalno - silikatne reakcije. Upravo se ovaj drugi razlog smatra najštetnijim po malter i beton. Brzina odvijanja ASR direktno zavisi od veličine zrna agregata. Zrna prečnika 20 - 30 μm dovode do relativno brze reakcije koja se odvija u periodu od četiri do osam nedelja. Kod krupnog agregata vreme trajanja reakcije je znatno duže i često se meri u godinama. Važno je napomenuti da je ova produžena reakcija, u trajanju od više godina, i razlog za brigu jer je njen intenzitet daleko veći. Postoje i drugi faktori koji mogu da utiču na mehanizam razvoja ASR. Poroznost agregata, količina alkalija u cementu, prisustvo slobodne vode u pasti i vodopropusnost cementnog kamena su prepoznati kao dodatni faktori koji u znatnoj meri mogu da presude da li će doći do ove štetne reakcije [56].



Slika 4.1. - Ekspandiranje zrna agregata usled ASR i pojava prslina u cementnom kamenu [57]

Reaktivni oblici silicijum - dioksida (SiO_2) se mogu naći u sledećim mineralima: opalu, kalcedonu i tridamitu. Ovi minerali se mogu naći u različitim tipovima stena: opalu i kalcedonu, rožnacu, silikatnom krečnjaku, dacitu, riolitu, riolitskom tufu itd. Opal, amorfan i porozan mineral, smatra se najreaktivnijim oblikom prirodnog silicijum - dioksida. Vremenom je utvrđeno da različiti oblici stena odnosno agregata izazivaju ASR različitog intenziteta. Prva zvanična oštećenja nastala usled ove reakcije zabeležena su na objektima u Sjedinjenim Državama između 1920. i 1940. godine [58]. Na površini betona se pogubno dejstvo ASR-a može prepoznati kao niz mrežastih pukotina (*slika 4.2.*).



Slika 4.2. - Mreža pukotina na površini stuba usled ASR, levo; Oštećenje stubova i temelja mosta, desno [59-60]

4.2. Prevencija pojave alkalno - silikatne reakcije

Postoji više pristupa u cilju prevencije pojave ASR-a:

- kontrola pH vrednosti pornog rastvora (rastvor u porama);
- kontrola količine alkalija u cementu;
- kontrola količine reaktivnog silicijum - dioksida (SiO_2) u agregatu;
- kontrola vlažnosti;
- izmena hemijskog sastava alkalno - silikatnog gela.

Mineralni dodaci cementa poput letećeg pepela, granulirane zguće i silikatne prašine mogu da ublaže ili spreče pojavu ASR-a. Prisustvo pomenutih mineralnih dodataka u cementu utiče na smanjenje pH vrednosti, poboljšanje rastvorljivosti kalcijuma i stvaranje drugačije

vrste ASR gela koji nema sklonost ka ekspanziji [58]. Utvrđeno je da se zamenom 15% - 20% cementa letećim pepelom klase F uspešno suzbija pojava ASR-a. Leteći pepeo klase C, sa visokim sadržajem kreča, se takođe može upotrebiti za prevenciju, ali bi procenat učešća ovog mineralnog dodatka morao biti znatno veći - 35% do 40%. Razlog manje efikasnosti letećeg pepela klase C leži u povišenom sadržaju SiO_2 koji je vezan za krečnjak tako da nema dovoljno slobodnog SiO_2 za kontrolisanu alkalno - silikatnu reakciju. S obzirom na ovu činjenicu mnogi autori smatraju da se leteći pepeo klase C i ne treba koristiti u svrhu prevencije ASR. Silikatna prašina je veoma efikasna u sprečavanju ASR zbog visokog sadržaja SiO_2 , kao i velike specifične površine zrna koja obezbeđuje ubranu ASR reakciju i stvaranje gela koji ne ekspandira. Uobičajena zamena cementa silikatnom prašinom je od 10% do 15% po masi. Kada je u pitanju granulisana zgura, uobičajena zamena cementa zgurom je 50% ili više po masi.

Nivo alkalija u betonu se može smanjiti upotrebom nisko - alkalnih cementa kod kojih je procenat sadržaja Na_2O manji ili jednak 0,6%. Međutim, tokom godina, tehnološki proces proizvodnje cementa se menjao tako da je to uticalo na povećanje alkalija u cementu. Iz ovog razloga upotreba cementa CEM III i CEM IV se smatra neophodnom kako bi se sprečila ASR. Pojava ASR se može javiti čak i kod betona za čije spravljanje su korišćeni nisko - alkalni cementi. Alkalije ne moraju nužno da potiču iz cementa, već je moguće da izvor njihovog prisustva u betonu bude agregat. Na primer, bazalt sa Novog Zelanda je izuzetno bogat alkalijama. Istraživanje [61] je pokazalo da upravo alkalno - silikatnu reakciju pokreću alkalije iz ovog kamena i pored upotrebe nisko - alkalnog cementa za spravljanje betona. Iz tog razloga, se može postaviti gornja granica sadržaja alkalija od 3 kg/m^3 betona kako bi se izbegla ASR [58].

Najbolje rešenje za suzbijanje ASR, kada je to i praktično moguće, jeste izbegavanje upotrebe agregata čija je mineraloško - petrografska analiza pokazala tendenciju da agregat izazove ovu štetnu reakciju. Spravljanje beton sa niskim vodo - cementnim faktorom takođe može biti jedan od načina suzbijanja ASR time što se neće omogućiti dovoljno vode za bubrenje ASR gela.

4.3. Uticaj finoće mliva recikliranog stakla na pojavu ASR-a

Glavna tehnološka prepreka za primenu recikliranog stakla kao zamene za deo cementa ili zamene za deo agregata za spravljanje betona jeste mogućnost nastanka ASR. Katodno staklo je bogato amorfnim silicijum - dioksidom (SiO_2) čije rastvaranje u alkalnom

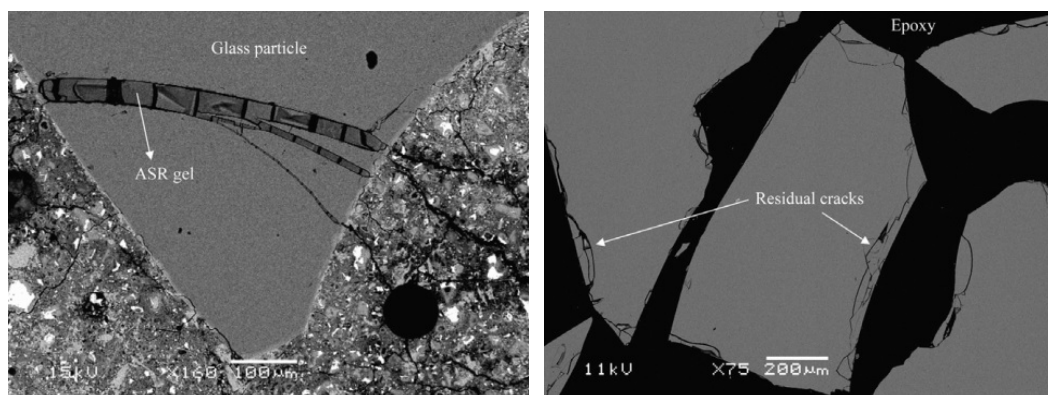
pornom rastvoru u betonu dovodi do formiranja ASR gela. Brojna istraživanja su pokazala da intenzitet ASR zavisi od vrste stakla, njegovog hemijskog sastava, kao i od finoće mliva [31-34, 43-48]. Ukoliko se staklo koristi kao zamena za prirodni agregat onda se proverava ASR-a vrši po odredbama standarda ASTM C1260 [62]. Sa druge strane, ukoliko staklo treba da posluži za zamenu dela cementa onda je pogodnije koristiti standard ASTM C227 [63].

Zavisnost između alkalno - silikatne reaktivnosti i veličine zrna nije isključivo ustanovljena samo za staklo. Istraživanja prirodnog, reaktivnog agregata, koja je Stanton [64] sproveo još četrdesetih godina XX veka, dokazuju da se intenzitet ASR smanjuje sa povećanjem krupnoće zrna agregata. Stanton je svoje istraživanje sproveo na silikatno - magnezitnom krečnjaku i utvrdio da su zrna ovog agregata veličine 0,6 - 2,0 mm daleko ASR reaktivnija u poređenju sa zrnima veličine 2,0 - 5,6 mm. Pritom, najaču ASR izazvala su zrna veličine 0,18 - 0,6 mm. Desetak godina kasnije, Vivian [65] je potvrdio ove rezultate na istom agregatu i još zaključio da manja zrna, veličine 50 - 75 μm , bubre tj. reaguju posle 6 meseci, dok najfinije čestice ($<50 \mu\text{m}$) ne reaguju uopšte.

Ovaj trend je u potpunoj suprotnosti sa rezultatima sprovedenim na agregatu koji vodi poreklo od recikliranog stakla [66-68]. Postavljene su brojne hipoteze u cilju objašnjenja ovako neuobičajenog ponašanja stakla u odnosu na prirodni agregat. Bažant i saradnici [69] su predložili matematički model za pojavu ASR. Ovaj model ukazuje da se najveći pritisak usled bubrenja ASR gela javlja kod prosečne veličine zrna agregata unetog u model. Bažant je takođe utvrđeno da se hemijska reakcija ASR može ubrzati smanjenjem veličine zrna agregata, tj. povećanjem specifične površine zrna. Suwito i saradnici [70] su postavili hipotezu da manje čestice staklenog agregata u betonu imaju veću tranzitnu zonu koja obezbeđuje dovoljno međuprostora za stvaranje ASR gela koji ima tendenciju ekspandiranja. S obzirom da ima dovoljno prostora, ne dolazi do pojave velikih pritisaka u betonu usled pojave ASR gela. Ovde treba istaći da su obe prethodno iznete hipoteze zasnovane na fundamentalnoj pretpostavci da se ASR odvija na kontaktu zrno stakla - cement. Još jedno objašnjenje drugačijeg ponašanja agregata od recikliranog stakla, kada je reč o ASR, jeste da fino mleveno staklo ima pucolanska svojstva što može ublažiti pojavu ASR većih komada stakla [71]. Međutim, istraživanju su pokazala da samo staklo finije od 70 μm ima značajniju pucolansku aktivnost, a ovako fine čestice nisu obuhvaćene postupkom ispitivanja prema standardu ASTM C1260 [62].

Najnovijim istraživanjima na ovom polju utvrđeno je da su sve prethodno iznete hipoteze, kao i njihova polazna osnova, pogrešne. Hamed Maraghechi i saradnici [72] su ispitivali ASR malterskih prizmi spravljenih sa agregatom od staklene ambalaže. Na osnovu

SEM analize utvrđeno je da se alkalno - silikatna reakcija odvija u mikroprrslinama zrna stakla, a ne na kontaktu staklo - cementni kamen (*tranzitna zona*). Na slici 4.3. levo, prikazano je formiranje ASR gela u unutrašnjosti zrna stakla, dok je tranzitna zona ostala nepromenjena. Takođe, utvrđeno je da su neke od ovih mikroprrslina nastale usled procesa usitnjavanja stakla. Na slici 4.3. desno, prikazano je zrno stakla impregnirano epoksidom odmah nakon mlevenja. I pored toga što nije bilo u kontaktu sa cementom ili alkalijama, mikroprrsline postoje unutar komada stakla što ukazuje da su posledica procesa mlevenja [72].



Slika 4.3. - Formiranje ASR gela unutar pukotina zrna stakla, levo; Izgled pukotina nastalih usled procesa mlevenja stakla, desno [72]

4.4. Uticaj hemijskog sastava recikliranog stakla na pojavu ASR-a

Tokom poslednjih par decenija brojna naučna istraživanja su sprovedena u cilju provere podobnosti upotrebe različitih vrsta otpadnih stakala za spravljanje cementnih kompozita. U najvećem broju istraživanja se razmatra primena sledećih vrsta stakala: panelno i staklo levka CRT ekrana, dekorativno kristalno staklo, staklo fluorescentnih lampi, staklena ambalaža, fasadno staklo, staklo očišćeno od štetnih hemijskih supstanci (*glass cullet*), otpadni stakleni mulj koji je nusprodukt procesa poliranja i obrade stakla (*glass sludge*) i u novije vreme staklo od TFT – LCD ekrana. Međutim, nabrojane vrste otpadnog stakla imaju različiti hemijski sastav što može imati veliki uticaj na fizičko - mehaničke osobine maltera i betona, a pogotovu se može odraziti na trajnost cementnih kompozita.

Maria Bignozzi sa svojim saradnicima sa Univerziteta u Bolonji [34] je istraživala uticaj hemijskog sastava različitih vrsta fino samlevenog otpadnog stakala, pri zameni 25% cementa, na svojstva maltera. Cilj rada je bio da se utvrdi uticaj različitog hemijskog sastava upotrebljenih stakala na trajnost maltera, pre svega u pogledu pojave alkalno - silikatne reakcije. Korišćene su četiri vrste stakla: staklena ambalaža iz prehrambene industrije (*oznaka u radu SL*), staklo od fluorescentnih lampi (*LMP*), staklo levka katodne cevi (*FNL*) i kristalno

staklo (CR). Staklo je usitnjeno pomoću laboratorijskog kugličnog mlina do prosečne finoće mliva 10 – 20 μm . Granulometrijske krive usitljenih otpadnih stakala su bile veoma slične granulometrijskoj krivi cementa CEM I 52,5 R čiji je deo zamenjen predmetnim staklom.

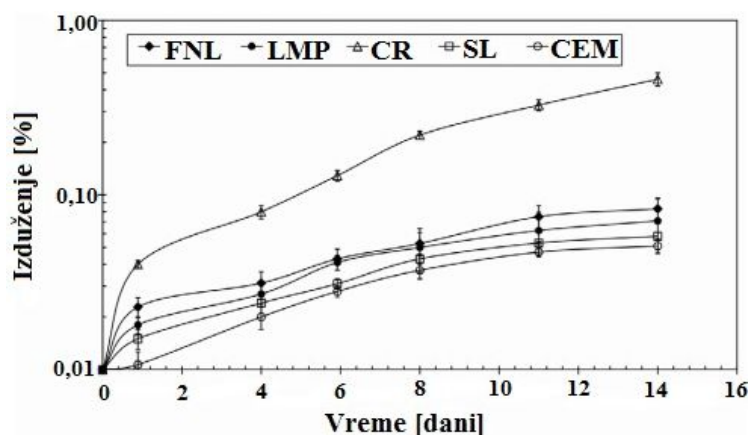
Tabela 4.1. - Hemijski sastav četiri vrste otpadnog stakla (% mase) [34]

Oksidi:	Staklena ambalaža (SL)	Staklo fluor. lampi (LMP)	Staklo levka CRT-a (FNL)	Kristalno staklo (CR)
SiO ₂	70,40	68,47	56,11	58,64
Al ₂ O ₃	2,06	2,26	3,02	0,02
TiO ₂	<0,01	<0,01	0,08	<0,01
Fe ₂ O ₃	<0,01	0,08	0,09	0,21
CaO	11,30	5,13	2,56	0,12
MgO	1,47	2,98	1,86	0,29
Sb ₂ O ₃	<0,01	0,08	0,17	0,22
ZnO	<0,01	<0,01	0,14	1,18
BaO	0,12	0,95	2,20	<0,01
K ₂ O	1,21	1,61	10,01	7,21
Na ₂ O	13,4	17,65	5,46	4,67
PbO	<0,01	0,79	18,34	27,43

Hemijski sastav eksperimentalnog stakla prikazan je u tabeli 4.1. Na osnovu prikazanog hemijskog sastava može se videti da je dominantan sadržaj silicijum - dioksida. Staklena ambalaža sadrži najviše SiO₂ - gotovo 71%, dok staklo levka CRT ekrana ima oko 56% SiO₂, što je najmanja vrednost u odnosu na druge vrste stakla. Sa druge strane, olovo - oksid je najviše prisutan kod kristalnog, dekorativnog stakla (~27%) i CRT stakla (~18%), dok staklena ambalaža praktično ne sadrži PbO. Osnovni oksidi od kojih se formira staklo (*glass formers*) su SiO₂ i Al₂O₃. Oksidi CaO i MgO predstavljaju stabilizatore stakla (*glass stabilizers*), dok Na₂O i PbO čine modifikatore stakla (*glass modifiers*).

Maria Bignozzi i saradnici [34] su proveru ASR izvršili prema standardu ASTM C1260 [62]. Prema ovom standardu, uzorci maltera dimenzija 160 x 40 x 40 mm, prva 24h od trenutka spravljanja se neguju u na temperaturi 20°C i relativnoj vlažnosti 100%, a zatim se potapaju u rastvor NaOH koncentracije 1 mol/dm³ (1M) i neguju na temperaturi od 80°C u trajanju od 14 dana. Rezultati lineranih deformacija (*izduženja*) malterskih prizmi, sa 25% cementa zamenjenog recikliranim staklom, u funkciji vremena prikazani su na slici 4.4. Takođe, na slici 4.4. je prikazano izduženje malterske serije spravljene samo sa čistim

cementom, bez dodatka stakla (*oznaka CEM*). Može se uočiti da su prizme sa kristalnim staklom imale najveću vrednost ekspanzije, koja nadmašuje kritičnu granicu ekspanzije od 0,10% (*ASTM C 33* [72]) već petog dana ispitivanja. Referentni malter i ostale tri malterske serije su nakon 14 dana ispitivanja imale ekspanziju ispod kritične vrednost, pri čemu je gledano od najveće ka najmanjoj vrednosti ekspanzije redosled bio sledeći: katodno staklo levka > staklo fluorescentnih lampi > staklena ambalaža > referentni malter.



Slika 4.4. - Izduženje malterskih prizmi usled pojave ASR tokom perioda od 14 dana [34]

Prilikom korišćenja nekog mineralnog dodatka, u ovom slučaju stakla, kao zamene za deo cementa nivo alkalija u vezivu se može povećati u odnosu na čist PC. Postoje tri mogućnosti kako alkalije mogu da reaguju prilikom spravljanja maltera i betona [34]:

1. Rastvaranje alkalija u pornom rastvoru;
2. Vezivanje alkalija tokom hidratacionog procesa;
3. Učestvovanje alkalija u stvaranju ASR gela.

S obzirom na činjenicu da je staklo bogato amorfnim silicijumom i alkalijama u isto vreme, prilikom rastvaranja stakla dolazi do stvaranja ili pucolanske reakcije ili ekspanzivnih produkata alkalno - silikatne reakcije. Prema istraživanjima, pucolanska reakcija i ASR su veoma slične, a ono što ih najviše razlikuje jeste vreme odigravanja reakcije [34]. Alkalno - silikatni gel nastaje u međusobnoj reakciji alkalija, silicijum - dioksida, kalcijum - hidroksida (CH), i C-S-H, gde kao akceleratori ove reakcije služe kalijum (*K*) i natrijum (*Na*). Kristalno staklo sadrži visok procenat oksida kalcijuma i natrijuma, tj. ubrzivača ASR, čime se može dati objašnjenje za najveću ekspanziju maltera izrađenih sa ovom vrstom stakla [34].

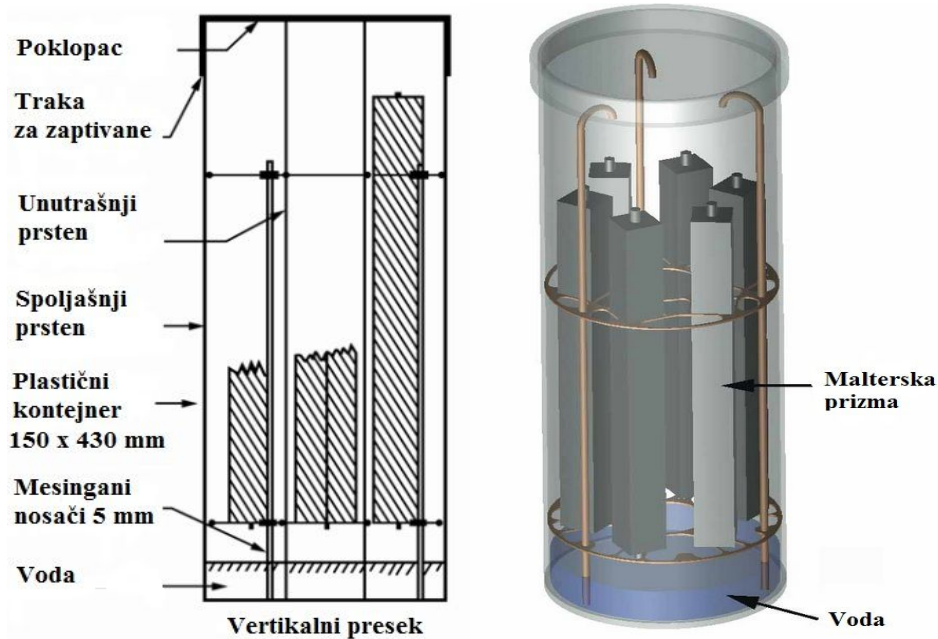
Sa druge strane, CRT staklo levka ima visok sadržaj kalijum - oksida, ali je nivo ASR daleko manji od serija sa kristalnim staklom (*slika 4.4.*). Objašnjenje za ovakvu pojavu se može dati u sledećem: CRT staklo levka sadrži visok procenat stabilizatora stakla CaO i MgO što za posledicu ima da CRT staklo ima niži nivo rastvorljivog SiO₂ za učestvovanje u ASR. Takođe, staklo levka i staklo fluorescentnih cevi sadrže visok procenat stabilizatora stakla i kiselih oksida koji omogućavaju staklu da zadrži amorfnu strukturu (*glass formers*) što smanjuje nivo rastvorljivog SiO₂ i u konačnom odlaže pojavu ASR [34].

4.5. Ispitivanje potencijalne ASR kombinacije cement agregat (ASTM C227-10)

Jedan od načina za proveru potencijalne alkalno - silikatne reaktivnosti cementa i agregata jeste primena standarda ASTM C227-10 [63]. Ovim standardom se definiše postupak za proveru ASR pomoću malterskih prizmi. Spravljaju se malterske prizme dimenzija 25 x 25 x 285 mm pri čemu je maseni odnos cement : agregat = 1 : 2,25. Granulometrijski sastav sitnog agregata definisan je predmetnim standardom. Takođe, standardom je definisano da se doda onolika količina vode koliko je potrebno da mera rasprostiranja maltera na potresnom stočiću bude u granicama između 105 mm i 120 mm. Potrebno je napraviti četiri malterske prizme za svaku kombinaciju agregata i cementa koji su predmet ispitivanja. Nakon 24 h od spravljanja, prizme se vade iz kalupa gde su prvobitno ugrađene i tom prilikom se meri početna dužina uzoraka sa tačnošću od 0,002 mm. Prizme se nakon merenja postave u specijalan kontejner (*slika 4.5.*). Na dnu kontejnera se nalazi voda, dok se uzorci postavljaju na nosače iznad vode tako da ne dođu u direktan kontakt sa vodom. Nakon postavljanja uzoraka, kontejner se zatvori tako da ne dođe do gubitka vlage. Uzorci u kontejneru se neguju 12 dana u prostoru temperature $38,0 \pm 2$ °C. Ostatak vremena, a najmanje 16 h pre prvog sledećeg merenja, kontejner sa uzorcima se drži na temperaturi $23,0 \pm 2$ °C. Pri starosti uzoraka od 14 dana vrši se ponovno merenje dužine uzoraka. Ispitivanje se može produžiti tako da se sledeća merenja rade pri starostima od 1, 2, 3, 4, 6, 9 i 12 meseci. Uzorci, tokom trajanja ispitivanja se neguju kao i prethodno, tj. u kontejneru na temperaturi $38,0 \pm 2$ °C. Nakon svakog merenja se promeni voda na dnu kontejnera. Promena dužine, tj. bubrenje uzoraka, treba računati sa tačnošću od 0,001 %, dok se srednja vrednost izražava sa tačnošću od 0,01%.

U prilogu standarda ASTM C33/C33M-13 [72] kojim se propisuju uslovi kvaliteta agregata za proizvodnju betona definisana je granična vrednost ekspanzije uzoraka na kojima

je sprovedeno ispitivanje ASR-a u skladu sa standardom ASTM C227-10. Dozvoljena vrednost ekspanzije je do nivoa od 0,05% nakon 3 meseca ispitivanja, odnosno 0,10% nakon 6 meseci ispitivanja. Takođe, dozvoljeno je da prizme imaju i veću vrednost ekspanzije od 0,05% pri starosti od 3 meseca, ako je nakon toga vrednost ekspanzije pri starosti od 6 meseci ispod pomenute vrednosti od 0,10%.



Slika 4.5. - Izgled kontejnera za čuvanje i negovanje uzorka tokom ispitivanja ASR-a [63]

5. PRETHODNA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

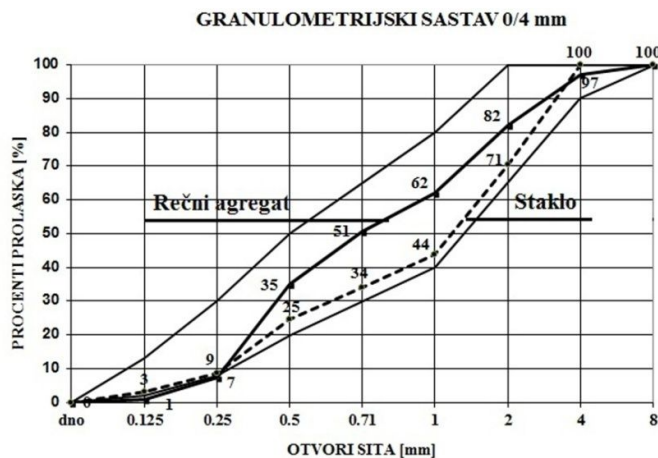
Prethodnim eksperimentalnim istraživanjima sprovedenim u Laboratoriji za Građevinske materijale u Nišu obuhvaćena je i primena predmetnog CRT stakla kao zamene za deo prirodnog agregata prilikom spravljanja maltera i betona. U nastavku će biti prikazani najvažniji rezultati ovih istraživanja koja su publikovana i na koja će se autor pozivati u narednim poglavljima.

5.1. Uticaj zamene prirodnog agregata recikliranim staklom od katodnih cevi na promenu svojstva cementnog maltera

Eksperimentalno istraživanje je urađeno na uzorcima spravljenim od cementnog maltera. Za spravljanje maltera korišćen je cement Holcim CEM I 52,5R koji ispunjava sve uslove kvaliteta prema standardu SRPS EN 197-1:2013 [73]. Za spravljanje referentnog maltera korišćen je sitan agregat (0/4 mm) iz reke Južne Morave sa separacije „Vodogradnja“ Pukovac koji ispunjava sve uslove kvaliteta prema standardu SRPS B.B2.010:1986 [74].



Slika 5.1. - Grubo usitnjeno staklo (levo); usitnjeno staklo 0/4 mm (desno)



Slika 5.2. - Granulometrijski sastavi rečnog agregata i agregata od recikliranog stakla [75]

Grubo usitnjeno staklo (*slika 5.1., levo*) je dodatno zdrobljeno do granulacije 0/4 mm (*slika 5.1., desno*) iz koje su u daljem postupku odstranjene gotovo sve čestice sitnije od 0,125 mm kako bi se granulometrijski sastav što više približio korišćenom prirodnom rečnom agregatu. Granulometrijski sastavi rečnog agregata i agregata od recikliranog stakla prikazani su na slici 5.2. [75].

5.1.1. Sastav malterskih mešavina i rezultati ispitivanja

U cilju ispitivanja uticaja zamene rečnog sitnog agregata odgovarajućim agregatom od recikliranog stakla napravljeno je pet različitih malterskih mešavina. Razmera mešanja cementa (m_c) i peska (m_p) je bila stalna i iznosila je $m_c : m_p = 1 : 3$. Vodocementni faktor je takođe bio konstantan i iznosio je 0,5. Etalon malter (E) je spravljen samo sa rečnim sitnim agregatom, a kod ostala četiri maltera vršena je zamena agregatom od recikliranog stakla u količini od 25%, 50%, 75% i 100%. Zamena rečnog agregata recikliranim staklom rađena je u zapreminskim delovima. U skladu sa količinom zamene dodeljene su i oznake malterskim mešavinama: WG25, WG50, WG75 i WG100.

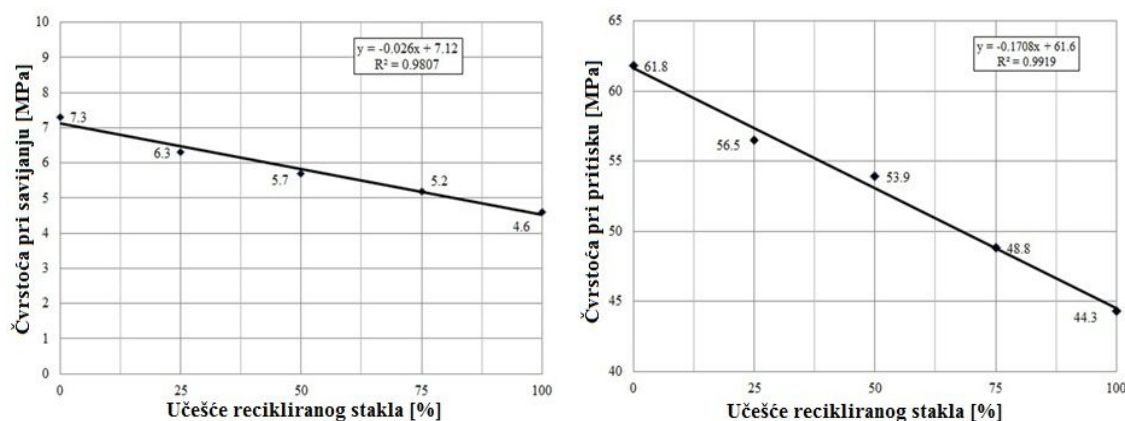
Tabela 5.1. - Sastav malterskih mešavina i rezultati ispitivanja svežeg maltera [75]

Sveži malter	Oznaka maltera				
	E	WG25	WG50	WG75	WG100
Masa cementa [g]	450	450	450	450	450
Masa rečnog agregata [g]	1350	1012	675	338	-
Masa recikliranog stakla [g]	-	351	701	1052	1402
Masa vode [g]	225	225	225	225	225
Konzistencija [mm]	130	145	160	170	175
Uvučeni vazduh [%]	5	5,4	4,8	4,6	5,0
Zapreminska masa [kg/m^3]	2265	2305	2345	2383	2396

Tabela 5.2. - Čvrstoće pri savijanju i pri pritisku maltera starosti 2, 7, 28 i 90 dana [75]

Vrste maltera	Starost [dani]							
	2		7		28		90	
	f_s [N/mm ²]	f_p [N/mm ²]	f_s [N/mm ²]	f_p [N/mm ²]	f_s [N/mm ²]	f_p [N/mm ²]	f_s [N/mm ²]	f_p [N/mm ²]
E	5,6	27,5	7,9	46,3	8,4	55,3	9,3	62,8
WG25	6,0	29,8	7,3	43,6	8,1	57,2	8,1	62,5
WG50	5,9	30,6	7,5	44,9	7,6	57,1	6,8	64,7
WG75	5,8	29,6	6,4	45,7	7,0	51,8	6,0	62,8
WG100	5,9	29,6	5,9	41,6	6,0	49,2	5,9	59,3

Sastavi svih malterskih mešavina dati su u tabeli 5.1. U istoj tabeli dati su i rezultati ispitivanja konzistencije (*rasprostiranje na potresnom stolu prema SRPS B.C8.042:1971 [76]*), sadržaja uvučenog vazduha (*prema SRPS B.C8.050:1981 [77]*) i zapreminske mase svežeg zbijenog maltera (*prema SRPS ISO 6276:1997 [78]*). Čvrstoća pri pritisku je ispitana pri starostima od 2, 7, 28 i 90 dana prema SRPS EN 196-1:2008 [87]. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 5.2. Ispitivanje otpornosti maltera na delovanje mraza urađeno je na opšte poznati način (*SRPS U.M8.002:1997, tačka 14 [79]*), smrzavanjem zasićenih uzoraka na temperaturi od -20°C u trajanju od 4 sata i odmrzavanju u vodi temperature 20°C , ukupno 25 puta (*jedan ciklus dnevno*). Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju i pri pritisku posle 25 ciklusa delovanja mraza prikazani su grafički na slici 5.3.



Slika 5.3. - Promena čvrstoće pri savijanju (levo) i pri pritisku (desno) posle 25 ciklusa delovanja mraza u funkciji učešća recikliranog stakla u malteru [75]

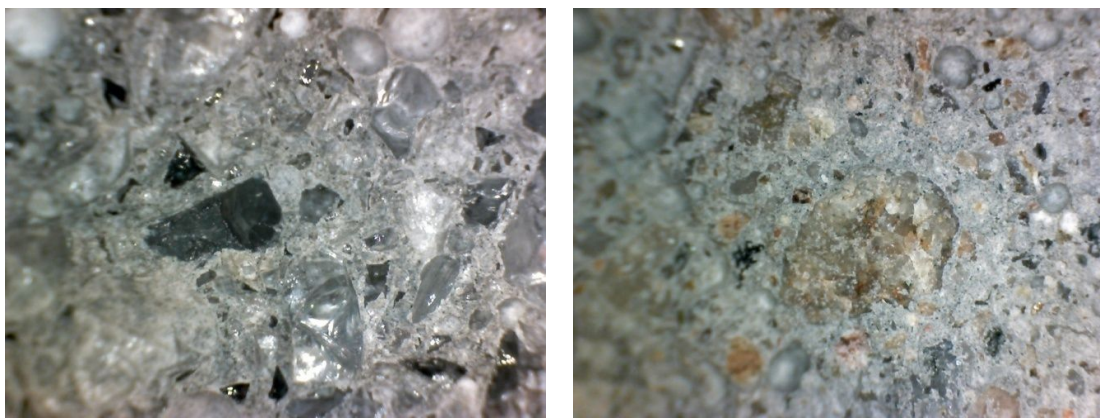
5.1.2. Diskusija rezultata

Na osnovu rezultata ispitivanja konzistencije merenjem rasprostiranja na potresnom stolu (*tabela 5.1.*) nedvosmisleno je utvrđeno da se sa povećanjem učešća staklenog agregata rasprostiranje povećava. Na prvi pogled, imajući u vidu oblik znaka, može se očekivati suprotno ponašanje maltera u pogledu promene konzistencije. Međutim, poznato je da staklo ne upija vodu za razliku od prirodnog agregata tako da se sa povećanjem udela stakla u malteru javlja sve veća količina vode u cementnoj pasti. Takva, pokretljivija pasta, doprinosi smanjenju trenja unutar maltera što rezultuje većim rasprostiranjem. Ovakvi rezultati ispitivanja su u saglasnosti sa rezultatima drugih istraživača, kao što je na primer navedeno u literaturi [31]. U predmetnom ispitivanju, količina uvučenog vazduha se kod svih maltera kreće oko 5% (*tabela 5.1.*). Postoje male razlike u izmerenim vrednostima, ali one se ne mogu smatrati relevantnim i delom se mogu pripisati i mernoj nesigurnosti aparata porozimetra.

Zapreminska masa svežeg zbijenog maltera (*tabela 5.1.*) raste sa povećanjem zamene prirodnog agregata recikliranim staklom. Ovi rezultati su u saglasnosti sa podacima koji se u literaturi navode, na primer [19, 31-32]. Povećanje zapreminske mase se kreće od cca. 2% za malter sa 25% recikliranog stakla do cca. 6% za malter sa 100% zamene prirodnog agregata.

Vrednosti čvrstoće pri pritisku očekivano rastu tokom vremena pri čemu su prilično ujednačene za odgovarajuću starost, tabela 2. Pri starosti od 2 dana čvrstoća pri pritisku se kreće od 27,5 N/mm² do 30,6 N/mm², pri starosti od 7 dana od 41,6 N/mm² do 46,3 N/mm², pri starosti od 28 dana od 49,2 N/mm² do 57,1 N/mm² i pri starosti od 90 dana od 59,3 N/mm² do 64,7 N/mm². Relativne razlike najmanje i najveće vrednosti čvrstoće pri pritisku za istu starost su prilično ujednačene i iznose oko 11%.

Za razliku od čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju, izuzev pri starosti od 2 dana, se smanjuju sa povećanjem učešća stakla u malteru, tabela 5.2. Objašnjenje za ovakav trend treba tražiti u mikrostrukturi maltera, tačnije u kvalitetu ostvarene veze zrnaca agregata i očvrslе cementne paste – tranzitna zona. Analizom mikroskopskih snimaka preloma malterskih prizmi posle ispitivanja savijanjem utvrđeno je da je površina zrnaca stakla potpuno čista, slika 5.4., levo. To ukazuje da je veza sa očvrslom cementnom pastom znatno slabija nego u slučaju zrnaca rečnog agregata, slika 5.4., desno. Takođe, uočava se da linija loma kod maltera sa recikliranim staklom uglavnom zaobilazi zrnca stakla, dok je u slučaju maltera sa rečnim agregatom linija loma prolazila i kroz izvestan broj zrna.



Slika 5.4. - Izgled preloma maltera sa 100% recikliranog stakla - levo i etalona - desno [75]

Čvrstoće pri savijanju i pri pritisku maltera sa recikliranim staklom posle delovanja mraza se smanjuju u odnosu na etalon. Ovo smanjenje je utoliko veće ukoliko je procentualno učešće stakla veće, slika 5.4. Smanjenje čvrstoće pri pritisku kod maltera WG25 iznosi 8,6%, kod maltera WG50 to je 12,8%, kod WG75 smanjenje je 21,0% i kod maltera WG100 ono

iznosi čak 28,3%. Verovatni razlog za ovakvo ponašanje maltera sa recikliranim staklom opet treba tražiti u kvalitetu tranzitne zone. Rezultati mehaničkih čvrstoća maltera su u saglasnosti sa rezultatima ispitivanja prikazanim u radu [19].

5.2. Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka u betonu

Tehnolozi betona su zainteresovani za istraživanje svojstava betona nedestruktivnim metodama već decenijama. Od početka XX veka do danas razvijen je veliki broj nedestruktivnih (*indirektnih*) metoda i odgovarajućih mernih instrumenata. Metoda ultrazvuka se uspešno koristi za procenu kvaliteta betona više od 60 godina. Razvoj ultrazvučne metode je počeo najpre u Kanadi i u Engleskoj skoro u isto vreme posmatrano sa današnje vremenske distance. U cilju ispitivanja uticaja dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka u betonu napravljene su ukupno četiri betonske mešavine [80]. Sastav betonskih mešavina i dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku.

5.2.1. Sastav betonskih mešavina sa CRT agregatom

Za spravljanje betonskih mešavina korišćen je čist portland cement Holcim CEM I 42,5 R i agregat iz reke J. Morave podeljen u tri frakcije 0/4 mm (*učešće u mešavini 45%*), 4/8 mm (25%) i 8/16 mm (30%). Konzistencija betonskih mešavina je održavana konstantnom u okviru klase sleganja S3 uz pomoć superplastifikatora Sika Viscocrete 3070. Takođe, za spravljanje betona korišćeno je i reciklirano staklo krupnoće 0 do 4 mm. Dobijeno je usitnjavanjem katodnih cevi sa čije unutrašnje površine je prethodno uklonjen fluorescentni sloj u preduzeću „Jugo-impex“ E.E.R. Niš.

Tabela 5.3. - Sastav betonskih mešavina korišćenih u eksperimentu za 1m³ betona [80]

Beton	Agregat						Staklo	Cement	Voda	Aditiv
	0/4 mm		4/8 mm		8/16 mm		0/4 mm			
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
E	45	801	25	445	30	534	-	400	168	3,20
G25	45	601	25	445	30	534	200	400	170	3,40
G50	45	401	25	445	30	534	400	400	170	3,80
G75	45	200	25	445	30	534	601	400	170	4,20

Ukupno su napravljene četiri serije betonskih mešavina, tabela 5.3. Etalon beton (oznaka E) je spravljen sa 400 kg cementa, 1780 kg trofrakcijskog agregata i vodocementnim faktorom 0,42. U cilju postizanja sleganja klase S3 dodato je 0,8% superplastifikatora. Reciklirano CRT staklo je korišćeno za zamenu dela sitnog agregata i to težinski u iznosu od 25%, 50% i 75%. Ovi betoni su obeleženi sa G25, G50 i G75 [80].

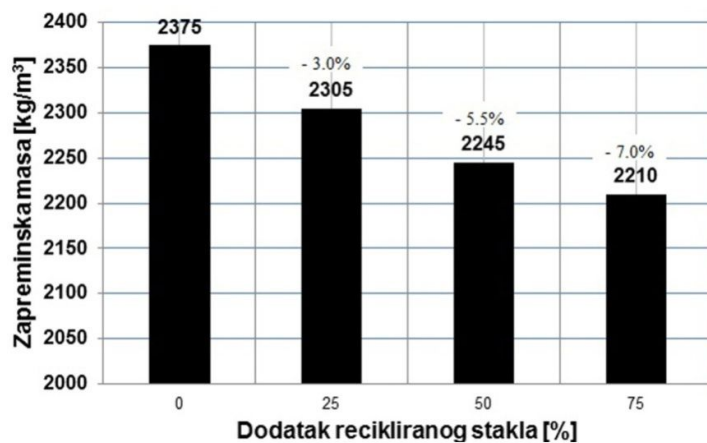
5.2.2. Rezultati ispitivanja i diskusija

Na svežem betonu su urađena ispitivanja: konzistencije merenjem sleganja prema standardu SRPS ISO 4109:1997 [81], sadržaja uvučenog vazduha prema standardu SRPS ISO 4848:1999 [82] i zapreminske mase u zbijenom stanju prema standardu SRPS ISO 6276:1997 [78]. Rezultati pobrojanih ispitivanja su prikazani u tabeli 5.4. Rezultati ispitivanja pokazuju da se sa povećanjem udela drobljenog stakla konzistencija betona menja u smislu smanjenja sleganja. Kako je jedan od uslova prilikom ispitivanja bio spravljanje betona jednake klase konzistencije to je postizano dodavanjem superplastifikatora. Kako se iz tabele 5.3. može videti procenat dodatka aditiva se povećava sa povećanjem dodatka staklenog agregata i to od 0,8% za etalon beton do 1,05% za beton G75.

Tabela 5.4. - Rezultati ispitivanja svežeg betona sa dodatkom staklenog agregata [80]

Beton	Prosečna vrednost zapreminske mase [kg/m ³]	Klasa sleganja	Sadržaj uvučenog vazduha [%]
E	2375	S3 (110 mm)	3,1
G25	2305	S3 (120 mm)	3,0
G50	2245	S3 (120 mm)	4,1
G75	2210	S3 (120 mm)	5,2

Zapreminska masa svežeg betona se u manjoj meri smanjuje sa povećanjem količine recikliranog stakla i ono se kreće od 3% za seriju G25 do 7% za seriju G75, slika 5.5. Sadržaj vazduha u svežem betonu raste sa povećanjem dodatka CRT stakla. Međutim, može se zapaziti iz tabele 5.4. da je sadržaj uvučenog vazduha i u etalon betonu (3,1%) bio veći od uobičajenog koji se kreće 1 do 2%. Razlog tome je što upotrebljeni superplastifikator ima dodatni efekat da u maloj meri uvlači vazduh, što je laboratoriji iz ranijeg iskustva poznato. To znači da se samo može konstatovati da se sa dodavanjem predmetnog stakla povećava sadržaj vazduha, ali se precizniji podaci o tome ovom prilikom ne mogu izneti [80].

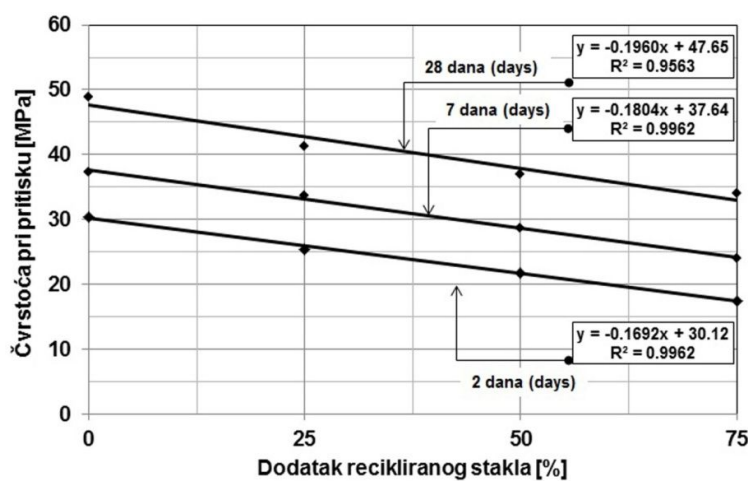


Slika 5.5 - Uticaj dela zamene prirodnog agregata CRT staklom na promenu zapreminske mase svežeg betona [80]

U tabeli 5.5. su prikazani rezultati ispitivanja: zapreminske mase (SRPS ISO 6275:1997 [83]), čvrstoće pri pritisku (SRPS EN 12390 - 3:2010 [84]) i brzine ultrazvuka pri starosti uzoraka od 28 dana.

Tabela 5.5. - Rezultati ispitivanja očvrsllog betona pri starosti od 28 dana [80]

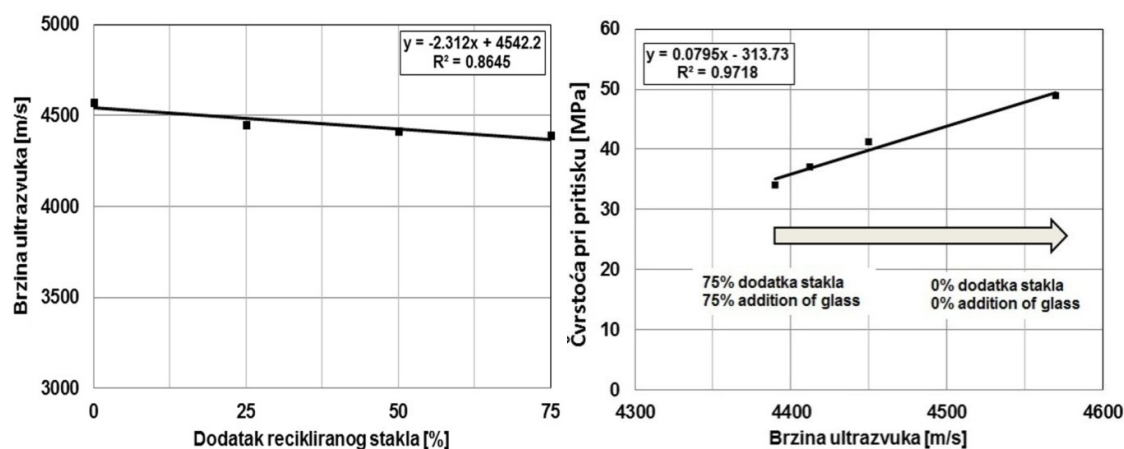
Beton	Zapreminska masa [kg/m³]	Čvrstoća pri pritisku [MPa]	Brzina ultrazvuka [m/s]
E	2370	46,9	4570
G25	2300	41,3	4450
G50	2240	37,0	4412
G75	2205	34,0	4390



Slika 5.6. - Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 2, 7 i 28 dana [80]

Dodavanje recikliranog stakla dovodi do smanjenja čvrstoće pri pritisku betona pri svim starostima. Tako zamena sitnog rečnog agregata sa 25% recikliranog stakla smanjuje čvrstoću pri pritisku betona za oko 15%, zamena od 50% smanjuje čvrstoću za oko 24%, a zamena od 75% dovodi do smanjenja čvrstoće od oko 30% (slika 5.6.).

Kada je reč o uticaju dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka određeno smanjenje brzine ultrazvuka je izmereno, ali se ne može govoriti o značajnoj promeni (slika 5.7., levo). Zamena sitnog agregata sa 75% recikliranog stakla dovodi do smanjenja brzine ultrazvuka od oko 4%. Manja zamena sitnog agregata recikliranim staklom utiče na smanjenje brzine ultrazvuka za svega 2,5 do 3,5% što se, svakako, ne može smatrati značajnim uticajem.



Slika 5.7. - Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka pri starosti betona od 28 dana (levo); Čvrstoća pri pritisku betona pri starosti od 28 dana i korespondirajuća brzina ultrazvuka pri promeni dodatka recikliranog stakla od 75% do nule (desno) [80]

Zavisnost između čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvuka u funkciji promene procenta dodatka stakla prikazana je na slici 5.7., desno. Može se zapaziti da veoma maloj promeni brzine ultrazvuka odgovara značajna promena čvrstoće. Promena brzine ultrazvuka od samo 12 m/s odgovara promeni čvrstoće od 1 MPa. Ili, promeni čvrstoće pri pritisku betona sa dodatkom recikliranog stakla od 1 MPa odgovara promena vremena potrebnog ultrazvučnom talasu da pređe rastojanje od 150 mm od samo $0,09 \mu s \approx 0,1 \mu s$ što je na samoj granici rezolucije ultrazvučnog aparata. Navedeno ukazuje da je metoda ultrazvuka, barem kada se radi o betonima sa dodatkom recikliranog stakla, veoma delikatna i zahteva mnogo pažnje prilikom rada kako se ne bi došlo do pogrešnih zaključaka [80].

5.3. Ispitivanje alkalno - silikatne reakcije maltera sa dodatkom stakla od katodnih cevi

Prilikom ispitivanja uticaja zamene sitnog prirodnog agregata recikliranim staklom od CRT-a na promenu svojstava cementnog maltera [85], kao i prilikom ispitivanja uticaja iste zamene kod betona [80] jedan od zaključaka je bio da buduća ispitivanja treba usmeriti u pravcu provere trajnosti takvih kompozita, pre svega provere alkalno - silikatne reaktivnosti. U nastavku su prikazani najvažniji rezultati ispitivanja alkalno - silikatne reaktivnosti maltera sa dodatkom CRT stakla, sprovedenog u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko - arhitektonskog fakluteta u Nišu.

5.3.1. Sastav malterskih mešavina i nega uzoraka

Za pripremu malterskih serija korišćen je cement CEM I 52,5R proizvođača CRH, kao i drobljeni, krečnjački agregat iz kamenoloma Dolac krupnoće zrna 0/4 mm. Katodno staklo iz reciklažnog centra "E - reciklaža" usitnjeno je pomoću laboratorijskog kugličnog mlina. Drobljeni agregat i staklo su podeljeni na frakcije 2/4 mm, 1/2 mm, 0,5/1 mm, 0,25/0,50 mm i 0,125/0,25 mm, dok je procentualno učešće svake od ovih frakcija definisano standardom ASTM C227 [63]. Maseni odnos mešanja cementa i agregata iznosio je 1:2,25. Vodo - cementni faktor bio je konstantan i iznosio je 0,47 po masi. Pored etalona (*E*) napravljene su još četiri malterske serije čiji je sastav prikazan u tabeli 5.6. Oznake malterskih serija sa CRT staklom formirane su na osnovu procenta zamene agregata katodnim staklom: 25% zamene (*oznaka 25G*), 50% (*oznaka 50G*), 75% (*75G*) i 100% zamene (*100G*) [68].

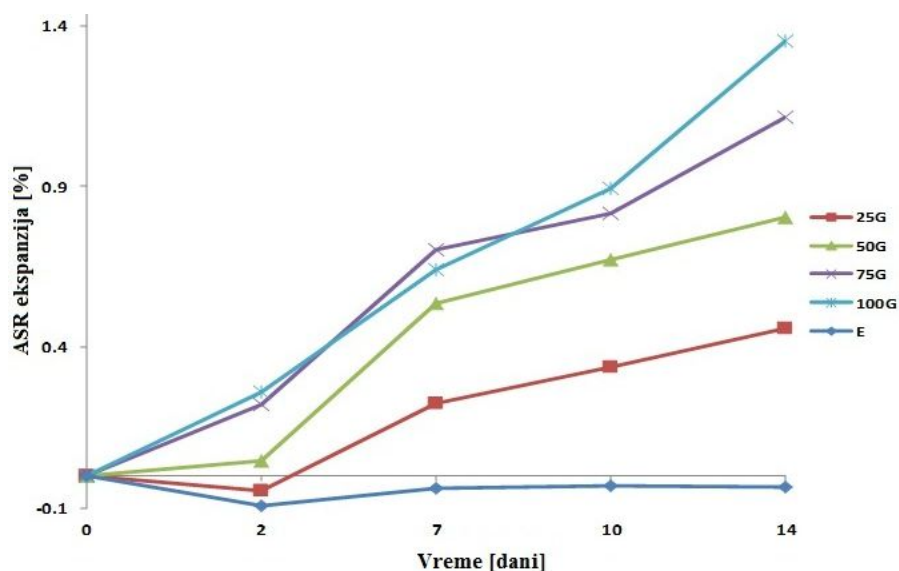
Nega malterskih prizmi i ispitivanje ASR sprovedeno je u skladu sa standardima ASTM C227-10 [63] i preporukama RILEM TC 106-2 (2000) [86]. Prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm se nakon 24h od momenta spravljanja vade iz kalupa i zatim potapaju u vodu u kojoj se neguju 24 h na temperaturi od 80°C. Nulto merenje dužine se vrši pri starosti maltera od 48h. Nakon toga prizme se potapaju u rastvor 1M NaOH i neguju na temperaturi 80°C. Merenje dimenzija malterskih prizmi se prati u periodu od 14 dana, kada se očekuje najveća ekspanzija uzoraka.

Tabela 5.6. - Sastav malterskih mešavina [68]

Oznaka maltera	Voda [g]	Cement [g]	Frakcija 0,125 - 0,25 mm		Frakcija 0,25 - 0,5 mm		Frakcija 0,5 - 1 mm		Frakcija 1 - 2 mm		Frakcija 2 - 4 mm	
			Agreg. [g]	CRT [g]	Agreg. [g]	CRT [g]	Agreg. [g]	CRT [g]	Agreg. [g]	CRT [g]	Agreg. [g]	CRT [g]
E	282	600	202,50	0	337,50	0	337,50	0	337,50	0	135,00	0
25G	282	600	151,87	50,63	253,12	84,38	253,12	84,38	253,12	84,38	101,25	33,75
50G	282	600	101,25	101,25	168,75	168,75	168,75	168,75	168,75	168,75	67,50	67,50
75G	282	600	50,63	151,87	84,38	253,12	84,38	253,12	84,38	253,12	33,75	101,25
100G	282	600	0	202,50	0	337,50	0	337,50	0	337,50	0	135,00

5.3.2. Rezultati ispitivanja i diskusija

Promena dimenzija malterskih prizmi u periodu od 14 dana prikazana je na slici 5.8. Kod etalon serije se javilo skupljanje tokom celokupnog trajanja ispitivanja, dok je kod serije 25G izmereno skupljanje samo pri nultom merenju, pri starosti od 2 dana, odnosno pre potapanja u rastvor NaOH. Kod svih serija sa zamenom drobljenog agregata CRT staklom izmereno je povećanje dimenzija. Pri starosti od 7 dana, malter 75G imao je najveću promenu dužine - 0,70%, dok je najmanje bubrenje izmereno kod serije 25G - 0,22%. Konačnom proverom dužine, pri starosti od 14 dana, utvrđeno je najveće bubrenje od 1,35% kod serije sa kompletnom zamenom agregata CRT staklom. Na osnovu svega navednog, može se uočiti da se sa povećanjem udela staklenog agregata povećava ekspanzija maltera usled pojave alkalno - silikatne reakcije [68].



Slika 5.8. - Ekspanzija malterskih serija sa dodatkom CRT agregata pri ispitivanju na 2, 7, 10 i 14 dana [68]

Tabela 5.7. - Mehaničke čvrstoće maltera nakon završetka ispitivanja ASR [68]

Oznaka maltera	Čvrstoća pri savijanju [N/mm ²]	Čvrstoća pri pritisku [N/mm ²]
E	9,98	60,04
25G	9,48	56,99
50G	9,08	55,53
75G	7,15	49,31
100G	6,88	42,23

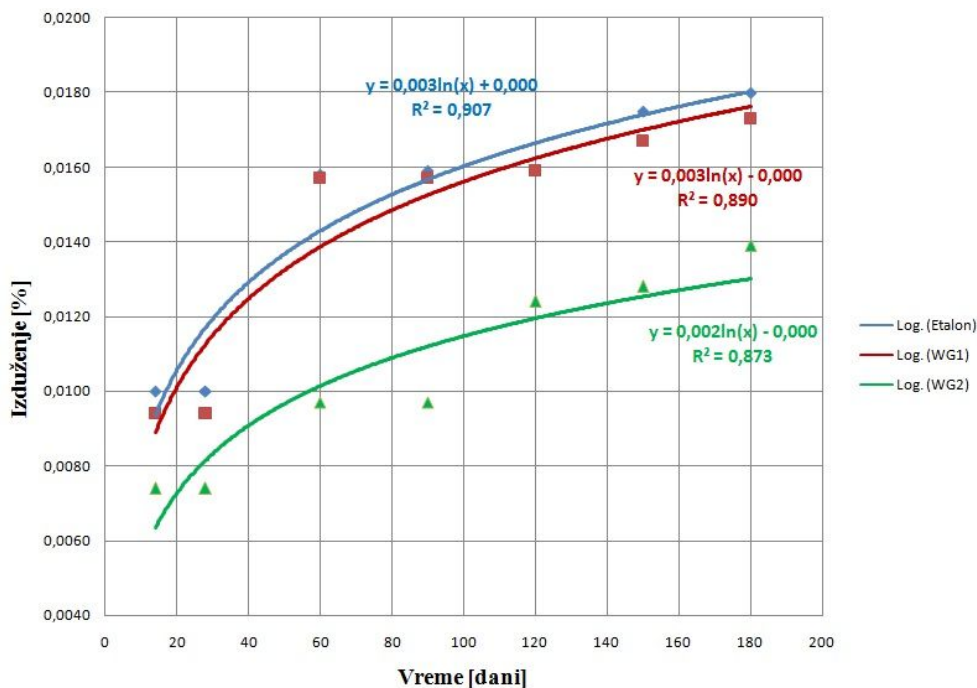
Nakon 14 dana ispitivanja ASR maltera u rastvoru NaOH ispitane su i mehaničke čvrstoće maltera (*tabela 5.7.*). Na osnovu rezultata se može zaključiti da se sa povećanjem dodatka staklenog agregata smanjuju mehaničke čvrstoće maltera. Kod serije 100G čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku su za 31,06%, odnosno 29,66% manje u odnosu na etalon seriju, respektivno. Svakako da je pored samog uticaja dodatka stakla, pojava ASR kod serija 75G i 100G u najvećoj meri doprinela ovako drastičnom smanjenju mehaničkih čvrstoća.

5.4. Ispitivanje alkalno - silikatne reaktivnosti prirodnog rečnog agregata i cementa čiji je deo zamenjen fino samlevenim katodnim staklom

Eksperimentalno ispitivanje alkalno - silikatne reaktivnosti prirodnog rečnog agregata i cementa čiji je deo zamenjen fino samlevenim katodnim staklom sprovedeno je u Laboratoriji za veziva, hemiju i maltere Instituta IMS u Beogradu. Ispitivanje je sprovedeno prema odredbama standarda ASTM C227-10 [63] i prethodilo je daljem eksperimentalnom istraživanju u okviru ove doktorske disertacije. Za spravljanje malterskih serija korišćen je agregat iz reke Južne Morave (*svojstva i granulometrijski sastav su dati u poglavlju 6.2.2.*), cement CEM I 52,5 R (*svojstva data u 6.2.1.*) i fino samleveno katodno staklo (*svojstva i hemijski sastav dati u 6.2.3.*). Napravljene su tri malterske serije: etalon, serija WG1 i serija WG2. Etalon serija je spravljena samo sa rečnim agregatom i čistim cementom, bez dodatka stakla. Serija WG1 spravljena je sa cementom kod koga je izvršeno 35% zamene katodnim staklom finoće mliva 0,063/0,090 mm, dok je serija WG2 spravljena sa cementom kod koga je izvršeno 35% zamene staklom finijim od 0,063 mm. Cilj istraživanja je bio da se pored provere alkalno - silikatne reaktivnosti CRT stakla u malteru proveriti i efekat finoće mliva stakla na intenzitet alkalno - silikatne reakcije. Granulometrijski sastav agregata prikazan je u tabeli 5.8. i u skladu je sa odredbama ASTM C227-10 [63]. Merenje izduženja - ekspanzija malterskih prizmi ispitano je pri starostima maltera od 14, 28, 60, 90, 120, 150 i 180 dana. Promena dužine malterskih prizmi u funkciji vremena prikazana je na slici 5.9. [66].

Tabela 5.8. - Granulometrijski sastav sitnog rečnog agregata [66]

Veličina čestica [mm]	Sadržaj [%]
2 - 4	10
1 - 2	25
0,50 - 1	25
0,25 - 0,50	25
0,125 - 0,25	15



Slika 5.9. - Izduženje malterskih prizmi sa dodatkom CRT stakla u funkciji vremena

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih na dijagramu (slika 5.9.) može se zaključiti da su serije WG1 i WG2 imale manju vrednost ekspanzije od etalon serije pri svim starostima. Pri starosti od 180 dana, vrednosti izduženja serija E, WG1 i WG2 bile su: +0,0180%, +0,0173% i +0,0139%, respektivno. U skladu sa odredbama ASTM C33-13 [72] vrednosti izduženja nakon 6 meseci ne prelaze graničnu vrednost od +0,10% za sve tri serije maltera. Takođe, može se zaključiti da je serija sa finije mlevenim staklom WG2 imala daleko manju vrednost ekspanzije u odnosu na druge dve serije. Na kraju ispitivanja serija WG2 imala je 22,8% manje skupljanje u odnosu na WG1 i etalon seriju. Dakle, veća finoća mliva stakla u slučaju serije WG2 doprinela je smanjenju izduženja. Pregledom literature, objašnjenje za ovakav uticaj stakla na pojavu ASR-a se može potražiti u istraživanju [37]. Slobodan silicijum u staklenom prahu, koji je inače amorfni materijal, će se utrošiti tokom pucolanske reakcije i reagovaće sa drugim jedinjenjima kako bi se formirala mineralna faza. Na taj način, rastvoreni silicijum - dioksid će biti ugrađen u kristalnu rešetku cementnog gela i neće biti dostupan za proces alklano - silikatne reakcije koja se inače, po pravilu, odigrava mnogo kasnije u odnosu na pucolansku reakciju.

5.5. Najvažniji zaključci prethodnih eksperimentalnih istraživanja

Na osnovu analize rezultata prethodnih eksperimentalnih istraživanja uticaja zamene dela agregata recikliranim katodnim staklenim agregatom na svojstva maltera i betona [68, 75, 80] mogu se izneti sledeći najvažniji zaključci:

1. Sa povećanjem zamene sitnog prirodnog agregata recikliranim staklom konzistencija maltera postaje plastičnija, odnosno mera rasprostiranja je veća [75];
2. Zapreminska masa svežeg zbijenog maltera se povećava sa povećanjem učešća recikliranog stakla i može iznositi i do 6% kod maltera sa potpunom zamenom prirodnog sitnog agregata staklom [75];
3. Čvrstoća pri savijanju maltera se smanjuje sa povećanjem učešća recikliranog stakla što se pripisuje lošim karakteristikama tranzitne zone na kontaktu zrnaca stakla i očvrsle cementne paste [75];
4. Čvrstoća pri pritisku nakon delovanja mraza se značajno smanjuje sa povećanjem učešća recikliranog stakla u malteru. Kod maltera sa zamenom 75% i 100% rečnog agregata recikliranim staklenim agregatom smanjenje čvrstoće pri pritisku iznosi 21%, odnosno 28%, respektivno [75];
5. Zamena dela sitnog rečnog agregata recikliranim staklom dovodi do promene konzistencije svežeg betona u smislu smanjenja sleganja. Kako bi se željena konzistencija održala neophodna je primena aditiva tipa reduktora vode. Da bi se konzistencija održala nepromenjenom na željenom nivou sa povećanjem količine recikliranog stakla količina dodatog aditiva takođe raste [80];
6. Reciklirano staklo u manjoj meri doprinosi smanjenju zapreminske mase svežeg betona i najveće je u slučaju zamene sitnog agregata sa 75% stakla i iznosi 7% [80];
7. Dodavanje recikliranog CRT agregata utiče na smanjenje čvrstoće pri pritisku betona. Tako zamena sitnog rečnog agregata sa 75% recikliranog stakla dovodi do smanjenja čvrstoće od oko 30% [80];
8. U slučaju zamene sitnog agregata recikliranim staklom promena brzine ultrazvuka od samo 12 m/s odgovara promeni čvrstoće od čak 1 MPa. Ovo ukazuje da je metoda ultrazvuka, kada se radi o betonima sa dodatkom recikliranog stakla, veoma osetljiva [80];
9. Prilikom ispitivanja ASR na malterima, pri starosti od 14 dana, utvrđeno je najveće bubrenje od 1,35% kod serije sa kompletnom zamenom agregata CRT staklom. Na

osnovu svega navednog, može se uočiti da se sa povećanjem udela staklenog agregata povećava ekspanzija maltera usled pojave alkalno - silikatne reakcije [68];

10. Sve malterske serije sa CRT agregatom imaju konačnu vrednost ekspanzije usled alkalno - silikatne reakcije iznad kritične granice + 0,10 % propisane standardom ASTM C33-13 [72], kao i veliko smanjenje mehaničkih čvrstoća, čime je trajnost ovako spravljenih maltera nezadovoljavajuća.
11. Malterske serije sa usitnjenim CRT staklom kao zamenom 35% cementa imaju manju ekspanziju od etalona sa čistim cementom prilikom ispitivanja alkalno - silikatne reakcije. Takođe, konačna vrednost ekspanzije je daleko manja od granične vrednosti +0,10 mm.
12. Malter u čijem sastavu je finije samleveno staklo ($<0,063 \text{ mm}$) ima manju vrednost ekspanzije, pri svim starostima, prilikom ispitivanja ASR u odnosu na seriju izrađenu sa krupnije mlevenim staklom 0,063/0,090 mm.

Analazom svih rezultata prikazanih u poglavlju 5, kao i na osnovu pregleda naučnih publikacija eminentnih stručnjaka u poglavljima 3.3.2. i 3.4.2., eksperimentalni deo ove doktorske disertacije je usmeren na ispitivanje uticaja dodatka fino samlevenog recikliranog stakla od katodnih cevi na svojstva cementnog maltera i betona. Usitnjeno staklo, finije od 0,063 mm, upotrebljeno je kao zamena za deo čistog portland cementa. Sa druge strane, u slučaju dve eksperimentalne mešavine maltera i betona, CRT staklo je poslužilo i kao dodatak na celokupnu količinu cementa.

6. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

6.1. Program eksperimentalnog istraživanja

Eksperimentalno istraživanje se može podeliti u tri faze. U prvoj fazi eksperimenta ispitana su: svojstva izabranih komponentnih materijala (*cement, agregat, mineralni dodatak - katodno staklo, hemijski dodatak*), pucolanska aktivnost stakla i uticaj zamene dela cementa fino samlevenim katodnim staklom na svojstva cemente paste. U ovoj fazi ispitivanja konstruisan je specijalan kuglični mlin kako bi se CRT staklo efikasno samlelo do željene finoće mliva sitnije od 0,063 mm. Nakon proverene pucolanske aktivnosti stakla, izrađeno je ukupno šest različitih serija cementnih pasti. Pored etalon serije (*bez CRT stakla*), napravljeno je pet serija kod kojih je procenat zamene cementa samlevenim CRT staklom iznosio: 5%, 10%, 15%, 20% i 35%. Procenat zamene, odnosno dodatka CRT stakla, vršen je u odnosu na masu cementa. Na cementnoj pasti izvršena su sledeća ispitivanja:

1. Standardna konzistencija - SRPS EN 196-1:2008 [87];
2. Vreme vezivanja - SRPS EN 196-3:2010 [88];
3. Stalnost zapremine - SRPS EN 196-3:2010 [88].

U drugoj fazi eksperimenta izvršeno je ispitivanje osam malterskih serija. Kod šest malterskih mešavina staklo je poslužilo kao zamena dela cementa pri čemu su procenti zamene bili isti kao i u slučaju cementne paste. Kod dve malterske mešavine izvršeno je dodavanje 5% i 10% CRT stakla na celokupnu masu cementa. Sastav malterskih serija je prikazan u poglavlju 6.5. Na malteru su sprovedena sledeća ispitivanja:

1. Konzistencija maltera na potresnom stolu - SRPS B.C8.042:1971 [76]
2. Sadržaj uvučenog vazduha SRPS B.C8.050:1981 [77]
3. Zapreminska masa očvrslog maltera SRPS ISO 6276:1997 [83]
4. Čvrstoća pri pritisku i pri savijanju maltera SRPS EN 196-1:2008 [87]
5. Otpornost maltera na dejstvo mraza SRPS U.M8.002:1997, t. 14 [79]
6. Skupljanje maltera - SRPS B.C8.029:1979 [89]

Treća faza ekperimentalnog istraživanja obuhvatila je ispitivanje svojstva svežeg i očvrslog betona sa različitim procentom zamene dela cementa katodnim staklom. Napravljeno

je ukupno osam betonskih serija. Procenat zamene, odnosno dodatka CRT stakla ekvivalentan je već navedenim procentima kod maltera. Detaljan sastav eksperimenetalnih betonskih serija prikazan je u poglavlju 6.9. Rezultati ispitivanja svežeg betona prikazani su u poglavlju 6.10. U tabeli 6.1. prikazana su ispitivanja sprovedena na betonu kao i broj spravljenih uzoraka po betonskoj mešavini.

Tabela 6.1. - Vrste ispitivanja očvrslog betona i broj uzoraka za jednu betonsku seriju

Vrsta ispitivanja	Ispitivanje pri starosti betona	Broj i dimenzije uzoraka za jednu betonsku seriju
Čvrstoća pri pritisku SRPS EN 12390-3: 2010 [84]	2, 7, 28, 90 i 180 dana	15 kocki 150 x 150 x 150 mm
Čvrstoća pri savijanju SRPS EN 12390-5:2014 [90]	28 i 90 dana	6 prizmi 100 x 100 x 400 mm
Čvrstoća pri cepanju zatezanjem SRPS EN 12390-6:2012 [91]	28 i 90 dana	6 cilindara Ø150 x 300 mm
Statički modul elastičnosti SRPS ISO 6784:2000 [92]	28 i 90 dana	6 cilindara Ø150 x 300 mm
Čvrstoća pri zatezanju "Pull - off" metodom SRPS EN 1542:2010 [93]	90 dana	3 prizme 200 x 200 x 150 mm
Ispitivanje skupljanja betona UNI 6555:1973 [94]	od 3 do 180 dana	3 prizme 100 x 100 x 500 mm
Ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem SRPS EN 1340:2012, prilog H [95]	12 meseci	3 kocke 71 x 71 x 71 mm
Udar na otpornost betona - "Drop - weight test"	90 dana	2 ploče 400 x 400 x 6 mm
Vodonepropustnost betona SRPS U.M1.015:1998 [96]	28 dana	3 kocke 150 x 150 x 150 mm
Otpornost prema dejstvu mraza SRPS U.M1.016:1992 [97]	28 dana	15 kocki 150 x 150 x 150 mm
Otpornost na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje SRPS U.M1.055:1984 [98]	28 dana	3 kocke 150 x 150 x 150 mm
Sulfatna otpornost betona	3, 6 i 12 meseci	18 cilindara Ø100 x 100 mm
Izluživanje SRPS EN 1744-3:2007 [99]	365 dana	delovi usitnjenog betona 16/31,5 mm

Pored ispitivanja navedenih u tabeli 6.1., na betonskim uzorcima je pre samog ispitivanja pritiskne čvrstoće, pri starosti od 2. do 90. dana, izmerena brzina ultrazvučnog

impulsa prema SRPS EN 12504-4:2008 [100] i odskok sklerometra prema SRPS EN 12504-2:2014 [101]. Na istim uzorcima je utvrđena i zapreminska masa očvrslog betona u skladu sa standardom SRPS ISO 6275:1997 [102]. Nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem, iz polovina betonskih prizmi, obradom su formirana po tri uzorka oblika kocke ivice 7,1 cm na kojima je ispitana otpornost prema habanju brušenjem u skladu sa standardom SRPS EN 1340:2012, prilog H [95]. Na istim uzorcima je, nakon ispitivanja habanja, određeno upijanje vode pod atmosferskim pritiskom SRPS B.B8.010:1981 [103]. Drobljenjem betonskih prizmi, nakon ispitivanja "pull - off", formirani su uzorci mase 1000 g na kojima je izvršeno ispitivanje izluživanja betona prema, za ove potrebe delimično modifikovanom standardu, SRPS EN 1744-3:2007 [99]. Obradom i sečenjem ispitanih uzoraka formirani su manji uzorci na kojima su sprovedene SEM i EDS analiza, a dodatnim usitnjavanjem formirani su uzorci za ispitivanje radioaktivnosti. U tabeli 6.2. prikazan je uopšten program celokupnog eksperimentalnog istraživanja i sve tri pomenute faze.

Tabela 6.2. - Uopšten program eksperimentalnog istraživanja

Uopšten program eksperimentalnog istraživanja	I FAZA	Cement	Hemijski sastav i fizičko - mehanička ispitivanja
		Agregat	Mineraloško - petrografski sastav i fizičko - mehanička ispitivanja
		Mineralni dodatak - katodno staklo	Konstruisanje specijalnog mlina za usitnjavanje katodnog stakla do finoće mliva < 0,063 mm
			Hemijski sastav i fizičke karakteristike stakla
		Hemijski dodatak	Svojstva prema uputstvima proizvođača
		Cementa pasta	Ispitivanje standardne konzistencije, vremena vezivanja i stalnosti zapremine
	II FAZA	Malteri	Ispitivanje maltera u svežem stanju
			Ispitivanje maltera u očvrslom stanju
	III FAZA	Betoni	Ispitivanje betona u svežem stanju
			Ispitivanje betona u očvrslom stanju
			Ispitivanje trajnosti betona
			Ispitivanje izluživanja betona
			Ispitivanje radioaktivnosti
			SEM i EDS analiza

6.2. Materijali korišćeni u eksperimentu

6.2.1. Cement

Za izradu eksperimentalnih serija maltera i betona korišćen je čist portland cement CEM I 52,5 R proizvođača "CRH" Novi Popovac. Ispitivanje hemijskog sastava predmetnog cementa izvršeno je od strane proizvođača prema standardu SRPS EN 196-2:2015 i rezultati su prikazani u tabeli 6.3. i tabeli 6.4. U tabeli 6.5. dati su rezultati ispitivanja fizičko - mehaničkih karakteristika cementa koji su takođe ustupljeni od strane proizvođača cementa. Sva ispitivanja cementa izvršena su prema odredbama sledećih standarda: SRPS EN 196-1:2008 [87], SRPS EN 196-3:2010 [88] i SRPS EN 196-6:2011[104] i SRPS EN 197-1:2013 [73].

Tabela 6.3. - Hemijski sastav cementa CEM I 52,5R proizvođača "CRH" Novi Popovac

Hemijsko jedinjenje	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Ner. ost.	Gubitak žarenjem [%]
Učešće [%]	19,3	4,28	2,87	62,8	2,2	3,05	0,91	0,21	0,06	0,09	2,26

Tabela 6.4. - Mineraloški sastav CEM I 52,5R

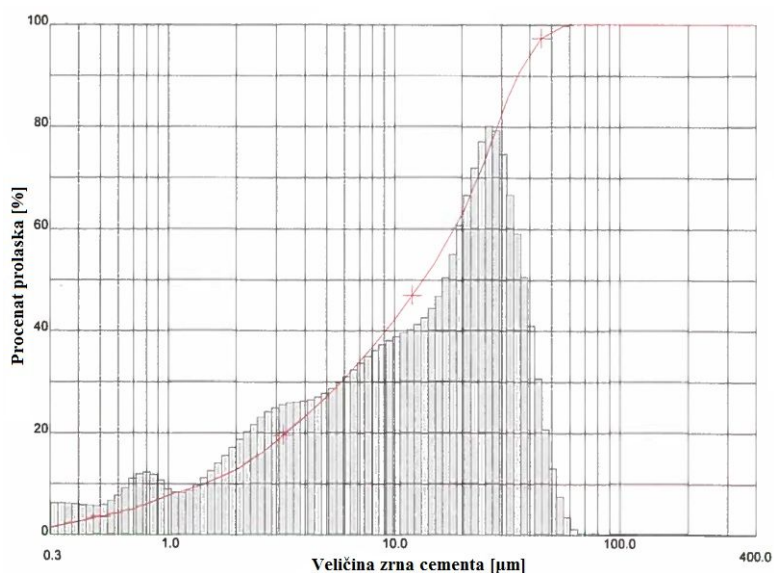
Mineraloški sastav	Alit	Belit	Aluminat	Ferit	Portlandit	Kalcit	Dolomit	Periklas	Gips CaSO ₄ x H ₂ O
Učešće [%]	62,63	8,00	7,02	8,79	1,17	3,62	0,50	1,13	5,29

Tabela 6.5. - Fizičko - mehaničke karakteristike cementa CEM I 52,5R

Karakteristika	Rezultat	Uslov kvaliteta SRPS EN 197-1	Ocena kvaliteta
Standardna konzistencija [%]	29,6	max. 31 - 32%	zadovoljava
Početak vezivanja [min]	161	≥ 45 min	zadovoljava
Kraj vezivanja [min]	236	nije propisano	/
Stalnost zapremine [mm]	0,0	max. 10 mm	zadovoljava
Finoća mliva, ostatak na situ 0,09 mm [%]	0,0	max. 10%	zadovoljava
Specifična masa [g/cm ³]	3,15	min. 3,0 g/cm ³	zadovoljava

Nastavak tabele 6.5. - Fizičko - mehaničke karakteristike cementa CEM I 52,5R, "CRH" Novi Popovac

Karakteristika	Rezultat	Uslov kvaliteta SRPS EN 197-1	Ocena kvaliteta
Specifična površina po Blenu [cm ² /g]	3940	min. 2400	zadovoljava
Čvrstoća pri savijanju [MPa]	5,7 (na 2 dana) 8,5 (na 28 dana)	nije propisano	/
Čvrstoća pri pritisku [MPa]	33,5 (na 2 dana) 59,5 (na 28 dana)	min. 30 MPa min. 52,5 MPa	zadovoljava



Slika 6.1. - Veličina zrna cementa CEM I 52,5R

Na slici 6.1. prikazana je veličina zrna cementa korišćenog u eksperimentu (*particle size distribution*). Više od 90% zrna cementa je finije od 36 μm, dok je 62% finije od 20 μm. Oko 42% čestica cementa je sitnije od 10 μm. Na osnovu sprovedenih ispitivanja mineraloško - petrografskog sastava i fizičko - mehaničkih karakteristika može se zaključiti da predmetni cement zadovoljava važeće standarde i podoban je za izradu maltera i betona.

6.2.2. Agregat

U eksperimentu je korišćen rečni agregat iz reke Južne Morave sa separacije preduzeća "Šilo - prom", Belotinac. Korišćene su tri frakcije agregata: 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm. Ispitivanje mineraloško - petrografskog sastava agregata sprovedeno je u Laboratoriji za kamen i agregat Instituta IMS. Rezultati su prikazani u tabeli 6.6. Za ispitivanje mineraloško - petrografskog sastava sitnog i krupnog agregata korišćena je binokularna lupa proizvođača

"Carl Zeiss" - STEMI 2000-C sa kamerom "AxioCam" i polarizovani mikroskop "Ernest Leitz". Agregat se sastoji iz čvrstih i jedrih mineralnih zrna sve tri genetske grupe stena. U krupnim frakcijama agregata dominantno su zastupljeni kvarciti i delimično škrljci. Sa smanjivanjem veličine zrna sitnog agregata povećava se udeo monominerala, među kojima dominira kvarc. Agregat ne sadrži mineralne sastojke koji mogu loše uticati na fizičko - mehanička svojstva betona. Takođe, ne sadrži sastojke koji mogu biti potencijalno reaktivni u betonu ili sprečiti hidrataciju cementa ili izazvati koroziju armature, tako da se sa aspekta mineraloško - petrografskog sastava agregat može smatrati podobnim za izradu maltera i betona [105].

Tabela 6.6. - Mineraloško - petrografski sastav sitnog i krupnog agregata proizvođača "Šilo - prom"

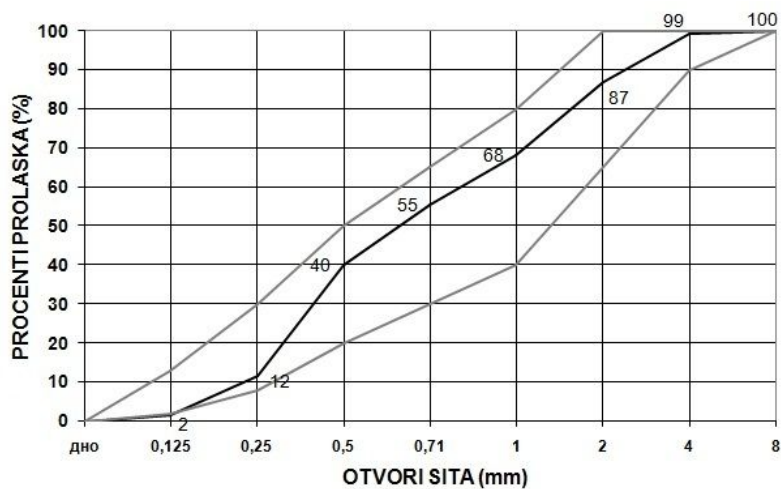
Naziv stene	U masenim %			Sadržaj stene i minerala u % kao broj zrna			
	8-16 mm	4-8 mm	2-4 mm	1-2 mm	0,5-1 mm	0,25-0,5 mm	0,125-0,25 mm
Magmatske stene							
Granitoidi	11,5	10,4	4,9	3	2	1	0
Sedimentne stene							
Peščar	9,6	8,3	3,9	2	1	0	0
Metamorfne stene							
Kvarcit	42,6	56,8	62,4	44	27	18	9
Škrljac	36,3	24,5	18,8	8	4	2	0
Minerali							
Kvarc	-	-	10	40	60	70	80
Feldspati	-	-	0	2	3	4	3
Amfiboli - pirokseni	-	-	0	1	2	2	3
Liskuni	-	-	0	0	1	3	5
Ukupno [%]	100	100	100	100	100	100	100

Ispitivanje određenih fizičkih svojstava rečnog agregata sa separacije "Šilo - prom" sprovedeno je u okviru Laboratorije za građevinske materijale u Nišu, tabela 6.7. Ispitivanje je sprovedeno u skladu sa odredbama sledećih standarda: SRPS ISO 6782:1999 [106], SRPS ISO 6783:1999 [107], SRPS B.B8.036:1982 [108], SRPS B.B8.038:1982 [109], SRPS B.B8.039: 1982 [110], SRPS B.B8.048:1984 [111], SRPS B.B8.049:1984 [112] i SRPS B.B2.010:1986 [113]. Na osnovu prikazanih rezultata u tabeli 6.7. može se zaključiti da je predmetni agregat podoban za spravljanje maltera i betona.

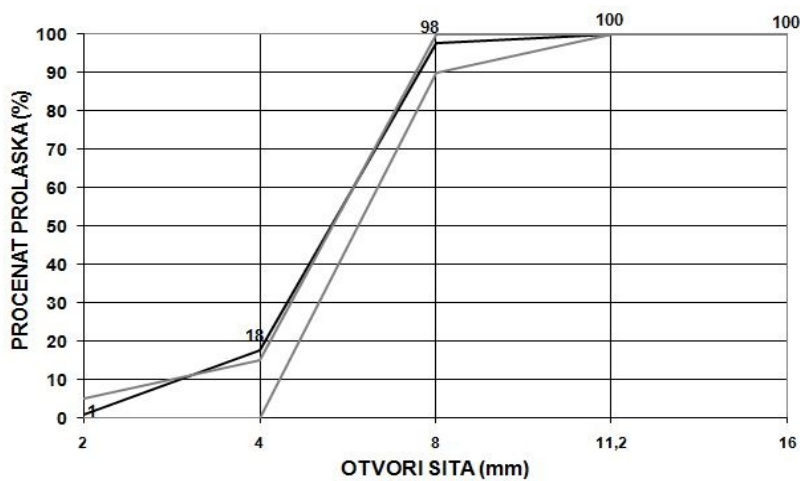
Tabela 6.7. - Ispitivanje određenih fizičkih svojstava agregata sa separacije "Šilo - prom", Belotinac

Vrsta ispitivanja	Frakcija			Uslov kvaliteta SRPS B.B2.010	Ocena kvaliteta
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm		
Stvarna zapreminska masa [kg/m ³]	2640	2660	2650	2000 - 3000	zadovoljava
Nasuta zapreminska masa u rastresitom stanju [kg/m ³]	1410	1490	1480	nije propisano	-
Nasuta zapreminska masa u zbijenom stanju [kg/m ³]	1600	1610	1620	nije propisano	-
Upijanje vode [%]	-	1,80	1,65	nije propisano	-
Obavijenost površine zrna glinom	ne ispituje se	Zrna nisu obavijena glinom		neobavijena	zadovoljava
Sadržaj grudvi gline [%]	ne sadrži grudve gline			$\leq 0,5$ $\leq 0,25$	zadovoljava
Sadržaj organskih materija	boja tečnosti iznad agregata svetlija od etalona		ne ispituje se	tečnost svetlija od etalona	zadovoljava
Oblik zrna (zapreminski koeficijent)	ne određuje se	0,22	0,27	$\geq 0,18$	zadovoljava
Oblik zrna (kljunasto merilo) [%]	ne određuje se	12	14	≤ 20	zadovoljava
Sadržaj sitnih čestica [%]	2,17	0,29	0,15	≤ 5 sitan ≤ 1 krupan	zadovoljava

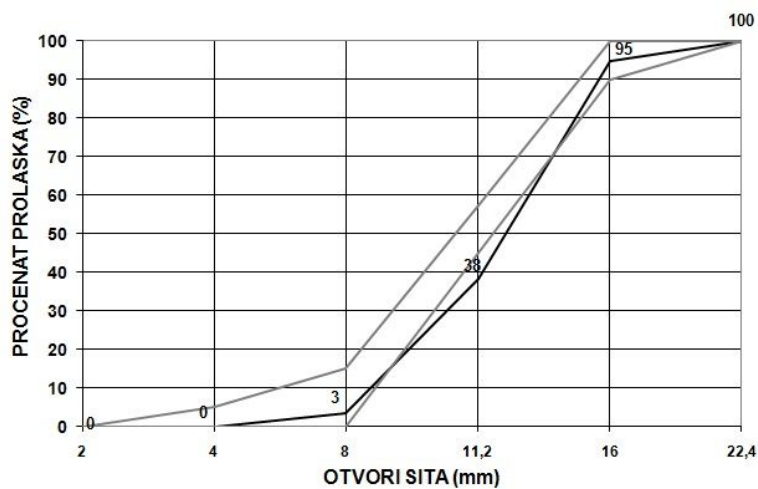
Granulometrijski sastav pojedinačnih frakcija agregata prikazan je na slikama 6.2. - 6.4. Kod frakcije agregata 4/8 mm javljaju se podmerna zrna na situ otvora 4 mm što se uspešno može korigovati prilikom sastavljanja i izračunavanja granulometrijskog sastava mešavine frakcija agregata za spravljanje cement - betona. Nadmerna zrna na situ 11,2 mm frakcije 8/16 mm nisu uslov kvaliteta prema standardu SRPS B.B3.100:1983 [113].



Slika 6.2. - Granulometrijski sastav frakcije 0/4 mm sa separacije "Šilo - prom"



Slika 6.3. - Granulometrijski sastav frakcije 4/8 mm sa separacije "Šilo - prom"



Slika 6.4. - Granulometrijski sastav frakcije 8/16 mm sa separacije "Šilo - prom"

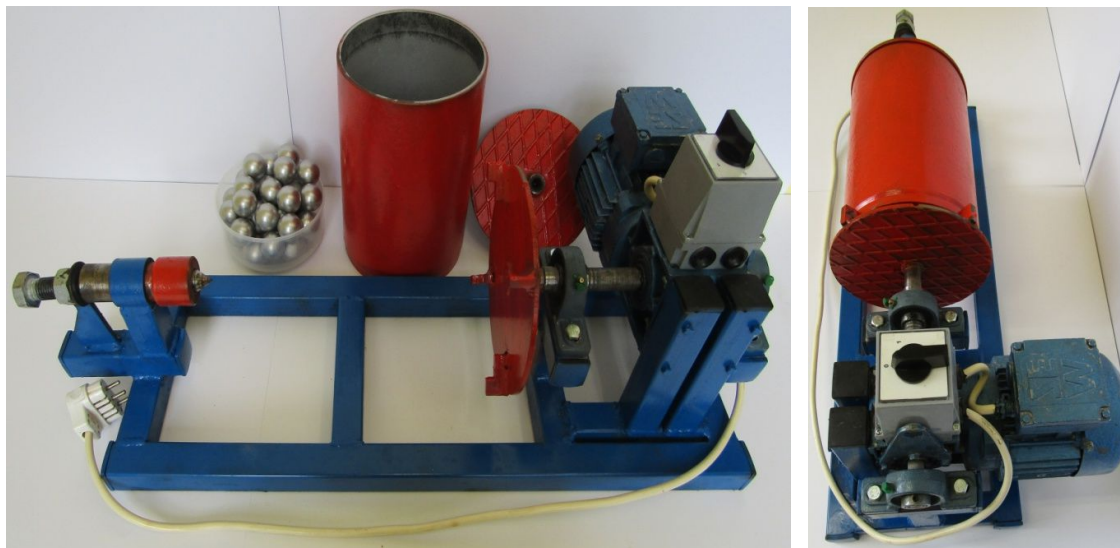
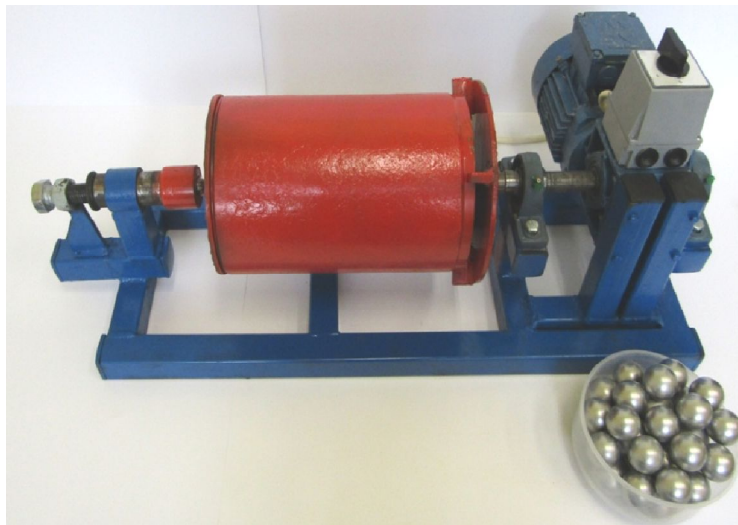
6.2.3. Katodno staklo (CRT)

Panelno staklo od recikliranih katodnih cevi starih televizora i kompjuterskih monitora, za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja, ustupio je lokalni reciklažni centar - "JUGO-IMPEX E.E.R. d.o.o.", Niš. Pomenuti reciklažni centar koristi najsavremeniji automatski separator CRT-a za razdvajanje osnovnih komponenti ekrana. Metodom "usijanje žice" (više o metodi u poglavlju 2.2.6.) panelni deo se precizno odvaja od levka ekrana, što je jako važno zbog različitog hemijskog sastava ove dve vrste CRT stakla. Izgled komada panelnog stakla nakon kompletnog procesa reciklaže prikazan je na slici 6.5., levo. Krupni komadi stakla su usitnjeni do frakcije 0 - 4 mm u asfaltnoj bazi preduzeća "Vodogradnja", Pukovac (slika 6.5., desno). Tom prilikom je zaustavljena kompletna proizvodnja agregata na separaciji kako bi se drobilišno postrojenje očistilo i pripremilo za mlevenje stakla.

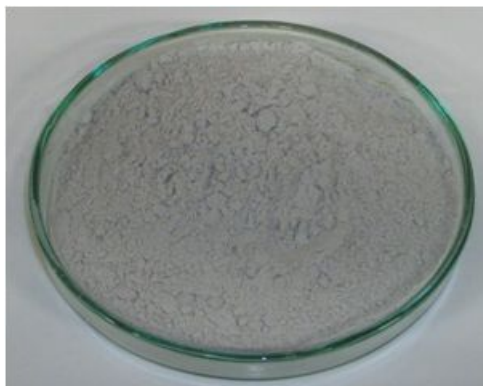


Slika 6.5. - Krupni komadi panelnog stakla nakon procesa reciklaže (levo); Asfaltna baza u kojoj je staklo samleveno do frakcije 0/4 mm (desno)

Dalje usitnjavanje CRT stakla nastavljeno je u Laboratoriji za građevinske materijale GAF Niš. Za potrebe usitnjavanja stakla do finoće mliva sitnije od 0,063 mm konstruisan je specijalan kuglični mlin (slika 6.6.). Mlin pokreće elektromotor snage 1,5 kW, pri čemu se posuda sa uzorkom i čeličnim kuglama okreće brzinom od 90 obrtaja/minut. Za mlevenje se koristi 30 čeličnih kugli. Kapacitet posude mlina je oko 3 kg stakla frakcije 0/4 mm, dok je za 1h moguće usitniti oko 500 g stakla finije od 0,063 mm. Konačan izgled fino samlevenog stakla prikazan je na slici 6.7.



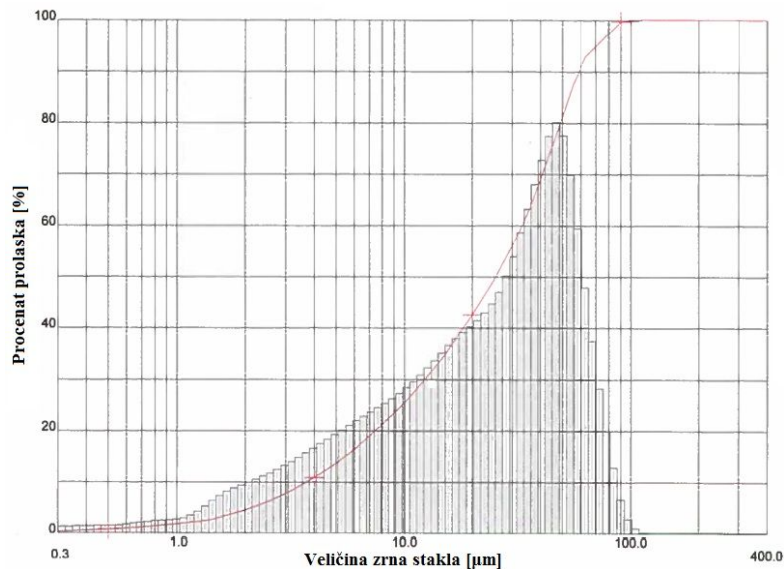
Slika 6.6. - Izgled specijalno konstruisanog kugličnog mlina za usitnjavanje CRT stakla



Slika 6.7. - Eksperimentalno CRT staklo finoće mliva ispod 0,063 mm

Na slici 6.8. prikazana je veličina zrna usitnjenog CRT-a (*particle size distribution*). Više od 63% zrna CRT-a je finije od 36 μm , dok je 42% finije od 20 μm . Oko 25% čestica katodnog stakla su sitnije od 10 μm . Na fino samlevenom staklu je izvršeno ispitivanje hemijskog sastava tabela 6.8.

Rezultati ispitivanje specifične mase, specifične površine po Blenu i finoće mliva katodnog stakla prikazani su u tabeli 6.9., dok je samo ispitivanje sprovedeno prema standardu za ispitivanje cementa SRPS EN 196-6:2011 [104]. S obzirom da nisu propisani uslovi kvaliteta katodnog stakla za upotrebu u građevinarstvu, dobijeni rezultati navedenih karakteristika stakla se ovom prilikom samo mogu uporediti sa karakteristikama cementa. Naime, katodno staklo ima za 0,31 g/cm^3 manju specifičnu masu od cementa, kao i 37% manju specifičnu površinu po Blenu.



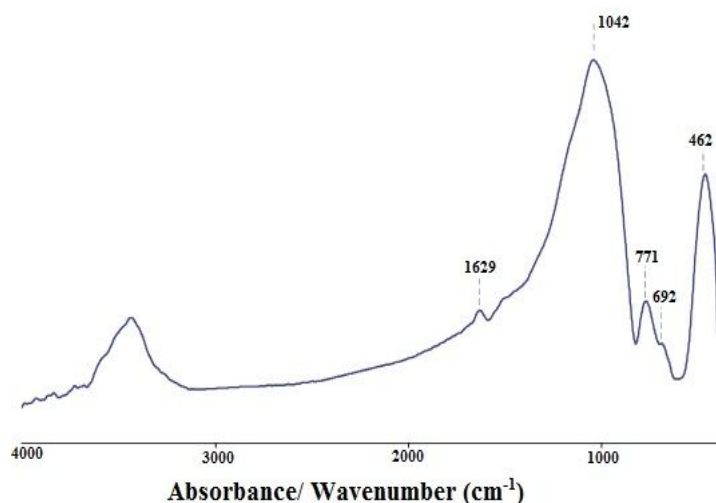
Slika 6.8. - Veličina zrna eksperimentalnog katodnog stakla

Tabela 6.8. - Hemijski sastav katodnog stakla

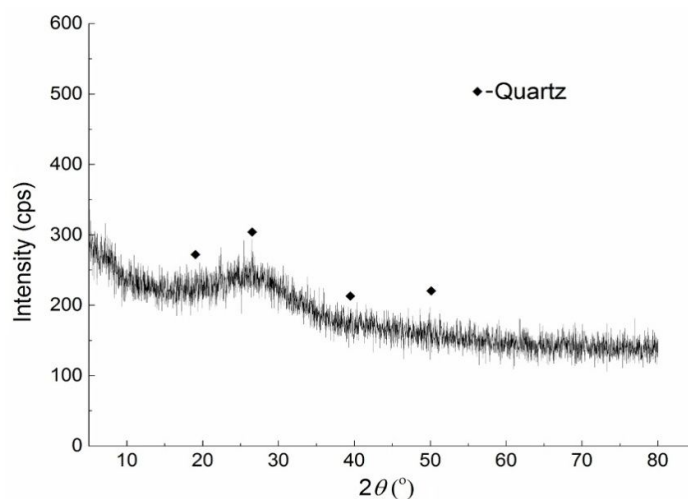
Hemijsko jedinjenje	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
Učešće [%]	60,61	2,88	0,58	1,31	0,53	6,45	7,61	0,30

Tabela 6.9. - Neke fizičke karakteristike fino samlevnog katodnog stakla

Karakteristika	Specifična masa [g/cm^3]	Specifična površina po Blenu [cm^2/g]	Finoća mliva, ostatak na situ 0,09 mm [%]
Rezultat	2,84	2450	0,0



Slika 6.9. - FTIR usitnjenog katodnog stakla



Slika 6.10. - XRD difraktogram katodnog stakla

FTIR (*Fourier - transform infrared spectroscopy*) spektar jednog od ispitivanih uzoraka CRT stakla je prikazan na slici 6.9. Spektar drugih uzoraka stakla je veoma sličan prikazanom spektru. Ispitivani uzorci su fino usitnjeni i ravnomerno dispergovani u KBr (1,5 mg/150 mg KBr). Smeša je zatim podvrgavana vakuumiranju i presovana pod pritiskom od 200 MPa, pri čemu je dobijena odgovarajuća pastila. Spektroskopski čist KBr, proizvodnje "Merck", prethodno je pretopljen na 700 °C, usitnjen i čuvan u električnom eksikatoru zagrejanom na 30 °C da bi se zaštitio od uticaja vlage. Pastila od čistog KBr je korišćena kao referentna. Snimanje FTIR spektara urađeno je na Tehnološkom fakultetu u Leskovcu u laboratoriji za spektroskopiju. FTIR analiza uzoraka je rađena u oblasti 4000 do 400 cm^{-1} , pri rezoluciji 2 cm^{-1} , na spektroskopu "BOMEM Michelson Hartman & Braun Series MB".

Difuzne trake na oko 3400 i 1650 cm^{-1} pripisane su vibracijama i deformacijama molekula fizički vezane vode (*O-H*) na površini, pojedinačno. Prisustvo vode nema znatan uticaj na strukturu stakla. Veze Si-OH su najjače veze u silikatnoj strukturi i mogu se lako prepoznati u infracrvenim spektrima takvih minerala. Pikovi u delu spektra od 1200 do 1000 cm^{-1} su usled istezanja Si-OH veze. Pik na 1042 cm^{-1} je asimetrično istezanje vibracija Si-OH veze. Pik blizu 450 cm^{-1} , kao i donji pik blizu 700 cm^{-1} vezuju se za prisustvo Si - O - Si.

XRD (*X-ray Diffraction*) difraktogram jednog od analiziranih uzoraka CRT stakla je prikazan na slici 6.10. Uzorci su samleveni pomoću tučka i avana pre same analize. XRD metoda je korišćena kako bi se utvrdio mineraloški sastav uzoraka. Korišćen je aparat "GMR Explorer", sa scintilacionim brojačem pri naponu od 40 kV i jačini struje od 30 mA. Intenzitete prelamanja $\text{CuK}\alpha$ zračenja $\lambda=1,540598$ je meren u sobnim uslovima u intervalu od $0.02^\circ 2\theta$ na svake dve sekunde u okviru opsega od $4^\circ - 70^\circ 2\theta$. Pikovi 2θ stepena na pozicijama 19.0496, 29.6040, 40.7237 i 50.178, sa najvećim intenzitetom na 29.6040 ukazuju na prisustvo SiO_2 (*kvarc*) u uzorku. Pikovi sa XRD difraktograma ukazuju na prisustvo amornog SiO_2 , pri čemu oštar pik na 40 ukazuje i na prisustvo SiO_2 u kristalnoj formi.

6.2.4. Hemijski dodatak

Kao hemijski dodatak pri izradi betonskih mešavina korišćen je superplastifikator kompanije Sika pod komercijalnim nazivom Sika[®] ViscoCrete[®] 4000 BP (*slika 6.11.*). Iz tehničkog lista proizvođača aditiva se može videti da je reč o superplastifikatoru treće generacije na bazi snažnih polikarboksilata koji obezbeđuju redukciju vode, kao i produženu ugradljivost. Sika[®] ViscoCrete[®] 4000 BP je pogodan za beton, koji se spravlja na licu mesta i na betonskim bazama, sa visokim zahtevima. Ovaj hemijski dodatak pruža veliko smanjenje vodocementnog faktora, a istovremeno omogućava i produženo održavanje konzistencije. Preporučuje se za:

- betone svih vrsta kod kojih se zahtevaju dobra svojstva tečenja smeše, kao i održavanje ugradljivosti smeše;
- betone visokih čvrstoća;
- za transportne betone;
- betone sa visokim zahtevima (*posebnim svojstvima*).



Slika 6.11. - Superplastifikator Sika® ViscoCrete® 4000 BP u ambalaži od 20 kg

Preporučeno doziranje od strane proizvođača je u rasponu od 0,4% do 1,6% u odnosu na masu cementa. Specifična masa aditiva je između 1,06 - 1,10 g/cm³, dok je pH vrednost u granicama 4,0 - 6,0. Sika® ViscoCrete® 4000 BP ne sadrži hloride [114].

6.2.5. Voda

Voda za izradu cementnih pasti, maltera i betona je iz gradskog vodovoda, tako da zadovoljava sve uslove kvaliteta vode za piće i ne treba se dodatno kontrolisati za primenu u ovom eksperimentalnom istraživanju.

6.3. Ispitivanje pucolanske aktivnosti CRT-a

Pucolanski materijali nemaju sposobnost da se rastvaraju ili reaguju u vodi ali podležu sporij hemijskoj transformaciji u prisustvu vode i kreča. Upotreba fino samlevenog katodnog stakla kao zamene za deo cementa opravdana je samo ako se utvrdi pucolanska reaktivnost stakla. Tokom procesa hidratacije samog cementa paralelno će se odvijati i pucolanka reakcija stakla koja će iskoristiti cementne hidrate (*portlandit ili kalcijum-hidroksid*) i ispuniti poru strukturu C-S-H gela (*Calcium Silicate Hydrate*), što će samu strukturu učiniti kompaktnijom i čvršćom. Pucolanska reakcija se odvija na relaciji silicijum-dioksid iz stakla i kalcijum-hidroksid koji nastaje iz procesa hidratacije samog cementa. Dakle, pucolanskom reakcijom se sa jedne strane stvara C-S-H gel, a sa druge strane troši kalcijum-hidroksid [115]. Pucolanska aktivnost stakla ispitana je prema standardu SRPS B.C1.018:2015 [116]. Standard klasifikuje pucolanski materijal na tri načina:

- prema sadržaju reaktivnog silicijum - dioksida (SiO_2),
- prema granulometrijskom sastavu,
- prema mehaničkim osobinama.

Provera pucolanske aktivnosti CRT stakla izvršena je ispitivanjem mehaničkih čvrstoća maltera. Staklo mora biti sitnije od 0,063 mm i osušeno na temperaturi od 98°C. Za pripremu maltera korišćeno je 1350 g standardnog trofrakcijskog peska, 300 g usitnjenog CRT stakla, 150 g standardnog hidratisanog kreča i 270 cm³ vode. Mehaničke čvrstoće se ispituju na epruvetama 40 mm x 40 mm x 160 mm. Nakon spravljanja, epruvete se hermetički zatvaraju u limenu kutiju (*slika 6.12.*) gde se nakon prvih 24h provedenih u laboratorijskim uslovima, neguju u sušnici na temperaturi od 55 °C još šest dana do trenutka ispitivanja. Rezultati mehaničkih čvrstoća maltera prikazani su u tabeli 6.10.

Tabela 6.10 - Mehaničke čvrstoće maltera prilikom provere pucolanske aktivnost CRT-a

Uzorak	Čvrstoća pri savijanju [MPa]	Čvrstoća pri pritisku [MPa]
1	2,36	5,76
		5,82
2	2,28	5,76
		5,82
3	2,43	5,95
		5,82



Slika 6.12. - Hermetičko zatvaranje maltera u limene kutije

6.4. Ispitivanje cementne paste sa različitim procentom dodatka CRT-a

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja uticaja zamene dela cementa usitnjenim CRT staklom napravljeno je ukupno šest serija cementnih pasti. Pored etalon serije (*bez prisustva CRT stakla*) napravljene su cementne paste sa sledećim procentom zamene cementa: 5% (*serija sa oznakom WG5*), 10% zamene (*serija WG10*), 15% zamene (*serija WG15*), 20% zamene (*serija WG20*) i 35% zamene (*serija WG35*). Na ovim serijama ispitana su sledeća svojstva: standardna konzistencija (SRPS EN 196-1:2008 [87]), vreme vezivanja (SRPS EN 196-3:2010 [88]) i stalnost zapremine (SRPS EN 196-3:2010 [88]). Rezultati su prikazani u tabeli 6.11., dok je sam postupak ispitivanja prikazan na slici 6.13.

Tabela 6.11. - Rezultati ispitivanja cementne paste sa različitim procentom zamene cementa CRT-om

Seriya	Standardna konzistencija [%]	Početak vezivanja [min]	Kraj vezivanja [min]	Stalnost zapremine [mm]
Etalon	29,5	175	210	0,5/1,0
WG5	29,0	165	195	1,0/0,5
WG10	28,5	170	210	1,0/0,5
WG15	28,0	185	210	1,0/0,0
WG20	27,5	185	210	0,5/1,5
WG35	27,0	190	215	1,0/0,5



Slika 6.13. - Ispitivanje standardne konzistencije cemente paste (levo); Ispitivanje početka i kraja vezivanja cementa (desno)

6.5. Sastav malterskih mešavina

U cilju ispitivanja uticaja zamene dela cementa recikliranim katodnim staklom na svojstva svežeg i očvrslog maltera napravljeno je osam malterskih mešavina (*tabela 6.12.*). Razmera mešanja cementa (m_c) i peska (m_p) je bila konstantna i iznosila je $m_c : m_p = 1 : 3$. Etalon serija (E) je spravljena samo sa čistim PC, dok je kod pet malterskih serija vršena zamena dela cementa CRT staklom u sledećim procentima: 5%, 10%, 15%, 20% i 35%. Takođe, napravljene su i dve malterske serije sa dodatkom CRT stakla na celokupnu količinu cementa - malter sa 5% dodatka, odnosno malter sa 10% dodatka CRT-a. Zamena i dodatak katodnog stakla vršena je po masi. Vodovezivni faktor je kod etalon maltera i maltera sa zamenom cementa staklom bio konstantan i iznosio je 0,50. Kod serija sa dodatkom stakla vodovezivni faktor se menjao u zavisnosti od procenta dodavanja i iznosio je 0,48 za malter sa 5% stakla, odnosno 0,45 za malter sa 10% dodatka stakla što je učinjeno da bi se očuvala jednaka konzistencija svih maltera. U skladu sa procentima zamene, odnosno procentima dodatka stakla, formirane su i oznake malterskih mešavina (*tabela 6.12.*), pri čemu je WG skraćenica za otpadno staklo - *waste glass*, dok slovo "D" sugeriše da je reč o dodatku stakla (*addition*).

Tabela 6.12. - Sastav eksperimentalnih malterskih mešavina sa različitim učešćem CRT-a

Sastav	Oznaka maltera							
	E	WG5	WG10	WG15	WG20	WG35	WGD5	WGD10
Masa cementa [g]	450	427,5	405,0	382,5	360,0	292,5	450	450
Masa stakla [g]	-	22,5	45,0	67,5	90,0	157,5	22,5	45,0
Masa agregata frakcija 0/4 mm [g]	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Masa vode [g]	225	225	225	225	225	225	225	225
Vodovezivni faktor w/c	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,48	0,45

Izrada malterskih mešavina vršena je u svemu prema standardu SRPS EN 196-1:2017. Cement i usitnjeno CRT staklo su, pre izrade svake serije, homogenizovani mešanjem u posudi sa poklopcem pomoću modifikovanog miksera na čijem kraju je stavljen nastavak sa propelerom. Miksiranje je vršeno u trajanju od 5 minuta, kako bi postigla dobra homogenost smeše cementa i CRT stakla (*slika 6.14.*). Za izradu maltera korišćen je laboratorijski mikser "Hobart N-50". Nakon ugradnje maltera u kalupe, uzorci su negovani u vodenom kupatilu

(temperatura 22 °C i relativna vlažnost vazduha 95%) u trajanju od 24h, a potom su oslobođeni uzorci držani u vodi u laboratorijskim uslovima do trenutka ispitivanja.



Slika 6.14. - Homogenizovana smeša cementa i 20% stakla (levo); Laboratorijski mikser Hobart (desno)

6.6. Rezultati ispitivanja maltera u svežem stanju

Na svežem malteru izvršeno je ispitivanje konzistencije na potresnom stolu (SRPS B.C8.042:1971 [76]) i sadržaj uvučenog vazduha (SRPS B.C8.050:1981 [77]) (slika 6.15.). Rezultati navedenih ispitivanja svežih malterskih mešavina prikazani su u tabeli 6.13.

Tabela 6.13. - Rezultati ispitivanja konzistencije i sadržaja uvučenog vazduha

Ispitivanje	E	WG5	WG10	WG15	WG20	WG35	WGD5	WGD10
Rasprostiranje na potresnom stolu [mm]	120/125	120/125	120/120	120/120	125/125	130/130	125/125	125/125
Sadržaj uvučenog vazduha [%]	8,0	8,5	8,0	8,0	8,5	8,0	8,1	8,2



Slika 6.15. - Merenje rasprostiranja na potresnom stočiću (levo); Merenje sadržaja uvučenog vazduha u malteru pomoću porozimetra (desno)

6.7. Rezultati ispitivanja očvrslog maltera

6.7.1. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju

Čvrstoća pri pritisku i pri savijanju ispitana je na malterskim prizmama dimenzija 160 x 40 x 40 mm, pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana, prema standardu SRPS EN 196-1:2008 [87]. Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku ($f_{p,sr}$) prikazane su u tabeli 6.14., dok su srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri savijanju ($f_{s,sr}$) prikazane u tabeli 6.15. Pojedinačni rezultati ispitivanja pritisne i savojne čvrstoće maltera dati su u Prilogu 2. Ispitivanje je sprovedeno na hidrauličkoj presi UTEST UTCM - 6710 mernog opsega 0 do 250 kN za silu pritiska i 0 do 10 kN za silu savijanja i klase tačnosti 0,5%, slika 6.16.



Slika 6.16. - Ispitivanje čvrstoće pri savijanju maltera (levo); ispitivanje čvrstoće pri pritisku maltera (desno)

Čvrstoća pri savijanju maltera sračunata je prema obrascu:

$$f_{s,i} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_s \cdot l_o}{b \cdot h^2} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (2)$$

gde je:

F_s - sila savijanja koja je dovela do loma prizme u N ;

l_o - osovinsko rastojanje između oslonaca u mm (100 mm);

b, h - širina i visina poprečnog preseka prizme u mm ;

$f_{s,i}$ - čvrstoća pri savijanju u MPa .

Pritisna čvrstoća maltera sračunata je prema obrascu:

$$f_{p,i} = \frac{F_p}{A} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (3)$$

gde je:

F_p - sila pritiska koja je dovela do loma polovine prizme u N ;

A - površina na koju deluje sila ($40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$);

$f_{p,i}$ - čvrstoća pri pritisku u MPa .

Tabela 6.14. - Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Malterska serija	Starost maltera [dani]			
	2	7	28	90
	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]
E	32,75	51,73	57,35	68,34
WG5	32,50	44,64	54,72	65,30
WG10	31,73	41,08	52,76	60,85
WG15	28,54	40,62	51,48	57,17
WG20	27,08	41,46	50,20	56,31
WG35	20,77	31,55	42,66	48,41
WGD5	36,66	54,16	63,28	71,79
WGD10	42,08	54,93	66,93	72,81

Tabela 6.15. - Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri savijanju maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Malterska serija	Starost maltera [dani]			
	2	7	28	90
	$f_{s,sr}$ [MPa]	$f_{s,sr}$ [MPa]	$f_{s,sr}$ [MPa]	$f_{s,sr}$ [MPa]
E	5,87	7,39	8,55	8,88
WG5	5,74	7,25	8,41	8,76
WG10	5,61	6,73	8,37	8,68
WG15	5,22	6,67	7,84	8,42
WG20	5,19	6,60	7,77	8,27
WG35	4,38	6,05	7,18	8,13
WGD5	6,16	7,92	8,92	9,36
WGD10	6,83	8,38	9,02	9,70

6.7.2. Ispitivanje otpornosti maltera na dejstvo mraza

Ispitivanje otpornost maltera na dejstvo mraza sprovedeno je prema standardu SRPS U.M8.002:1997, t. 14 [79]. Za svaku maltersku seriju napravljeno je po šest prizmi standardnih dimenzija. Tri prizme se neguju u vodi 28 dana, nakon čega se izlažu naizmeničnim ciklusima u trajanju od po 4h, smrzavanju na temperaturi -20 ± 2 °C i odmrzavanju u vodi na temperaturi $+20 \pm 3$ °C. Nakon sprovedenih 25 ciklusa vrši se ispitivanje čvrstoće pri pritisku maltera. Preostala tri opitna tela služe za upoređivanje (etaloni) i njihova čvrstoća pri pritisku se određuje posle 33 dana negovanja u vodi temperature $+20 \pm 2$ °C. U oznakama malterskih serija je za ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza dodato slovo "M". Smrzavanje maltera vršeno je u klima komori "Controls X26". Malterske prizmice nakon 25 ciklusa smrzavanja prikazane su na slici 6.17. Zapreminska masa očvrstlog maltera ispitana je na prizmama za upoređenje čvrstoće prema SRPS ISO 6276:1997 [83]. Rezultati ispitivanja zapreminske mase, čvrstoće pri pritisku etalon prizmi na 33 dana i čvrstoća pri pritisku nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, kao i pad čvrstoće nakon sprovedenog ispitivanja prikazani su u tabeli 6.16.



Slika 6.17. - Malterske prizme nakon 25 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja

Pad čvrstoće pri pritisku usled delovanja mraza sračunava se prema sledećoj jednačini:

$$\Delta f_p = \frac{f_{p,m}}{f_{p,33}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

gde je:

$f_{p,m}$ - čvrstoća pri pritisku malterskih prizmi nakon 25 ciklusa smrzavanja u MPa;

$f_{p,33}$ - čvrstoća pri pritisku etalon prizmi posle 33 dana negovanja u vodi u MPa;

Δf_p - Smanjenje čvrstoće pri pritisku izražen u procentima.

Tabela 6.16. - Rezultati ispitivanja otpornosti maltera na dejstvo mraza

Malterska serija	Zapreminska masa $\gamma_{m,oc}$ [kg/m ³]	Čvrstoća pri pritisku etalon prizmi na 33 dana $f_{p,33}$ [MPa]	Čvrstoća pri pritisku nakon 25 ciklusa smrzavanja $f_{p,m}$ [MPa]	Pad čvrstoće pri pritisku Δf_p [%]
EM	2217	60,23	58,89	2,22
WGM5	2209	56,72	53,58	5,54
WGM10	2180	53,40	49,46	7,38
WGM15	2174	53,10	48,62	8,43
WGM20	2171	51,39	46,17	10,16
WGM35	2158	43,70	38,54	11,82
WGDM5	2192	64,83	62,73	3,23
WGDM10	2200	68,32	66,29	2,97

6.7.3. Ispitivanje skupljanja maltera

Ispitivanje skupljanja maltera izvršeno je prema standardu SRPS B.C8.029:1979 [89]. Promena dužine malterskih prizmi standardnih dimenzija praćena je pri starosti maltera od 3, 4, 7, 21 i 28 dana u skladu sa navedenim standardom. Ispitivanje je produženo, tako da je mereno skupljanje i pri starosti maltera od 90, 180 i 360 dana. U oznakama malterskih serija je za ispitivanje skupljanja dodato je slovo "S" kao skraćenica za skupljanje - "*shrinkage*". Srednje vrednosti rezultata ispitivanja skupljanja $\varepsilon_{sm,sr}$ tri malterske epruvete prikazane su u tabeli 6.17., dok je sama aparatura za merenje promene dužine prikazana na slici 6.18. Pojedinačni rezultati ispitivanja skupljanja maltera dati su u Prilogu 3. Promena dužine epruvete $\Delta l_{sm}(t)$, nastala usled skupljanja maltera na vazduhu, računa se u odnosu na prvo merenje izvršeno posle $72 \pm 0,5$ h. Skupljanja maltera ε_{sm} izračunava se prema sledećoj jednačini:

$$\varepsilon_{sm,i} = \frac{\Delta l_{sm}(t)}{l_{sm}} \quad [mm/m] \quad (5)$$

gde je:

$\Delta l_{sm}(t)$ - promena dužine epruvete između merenja u trenutku t i nultog čitanja t_{72h} u mm;

l_{sm} - dužina malterske epruvete izražena u m;

ε_{sm} - skupljanja malterske epruvete izraženo u mm/m.

Tabela 6.17. - Rezultati ispitivanja skupljanja maltera na vazduhu

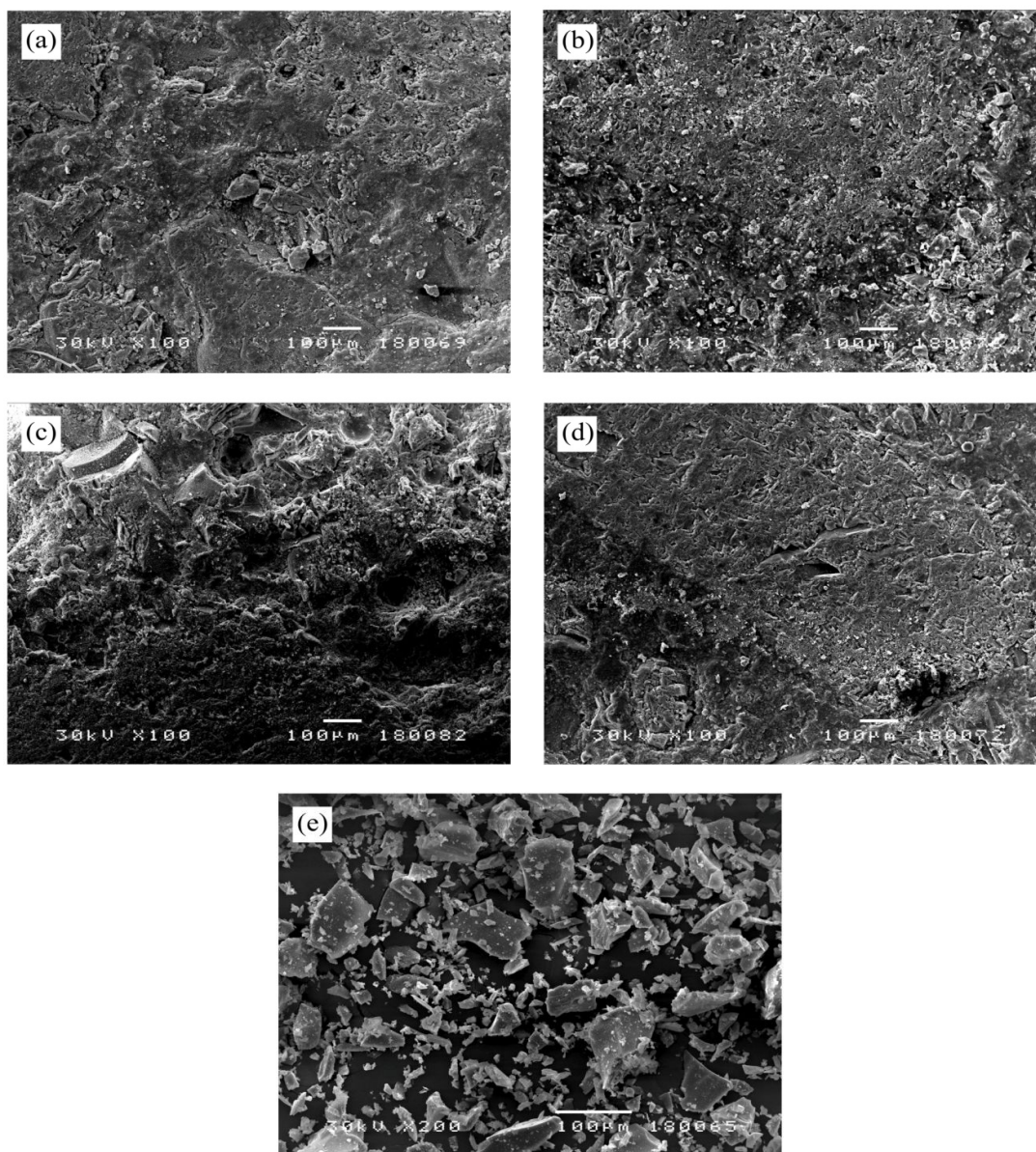
Malterska serija	E	WGS5	WGS10	WGS15	WGS20	WGS35	WGDS5	WGDS10
Starost maltera [dani]	$\varepsilon_{sm,sr}$ [mm/m]							
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,06	0,09	0,10	0,12	0,08	0,05	0,03	0,06
7	0,22	0,25	0,23	0,25	0,19	0,12	0,03	0,12
14	0,37	0,40	0,31	0,37	0,27	0,19	0,16	0,31
21	0,53	0,51	0,48	0,56	0,47	0,31	0,31	0,37
28	0,62	0,65	0,66	0,62	0,52	0,37	0,33	0,43
90	0,72	0,70	0,73	0,75	0,63	0,52	0,59	0,62
180	0,84	0,79	0,83	0,84	0,74	0,63	0,68	0,71
360	0,93	0,93	0,91	0,84	0,76	0,67	0,73	0,74



Slika 6.18. - Kontrolno merenje na "etalon" prizmi (levo); Merenje skupljanja na malteru (desno)

6.7.4. SEM analiza maltera

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) analiza uzoraka maltera sprovedena je u Laboratoriji za elektronsku mikroskopiju u okviru Medicinskog fakulteta u Nišu. Korišćen je elektronski mikroskop "JEOL JSM 5300" Japan. Na slici 6.19.e prikazan je izgled zrna sprašenog CRT stakla sa uvećanjem od 200 puta. SEM analiza maltera je sprovedena samo na karakterističnim serijama: etalon (*slika 6.19.a*), WG20 (*slika 6.19.b*), WG35 (*slika 6.19.c*) i WGD10 (*slika 6.19.d*). U cilju utvrđivanja uticaja prisustva katodnog stakla na teksturu maltera snimano je sa uvećanjem 100 puta.

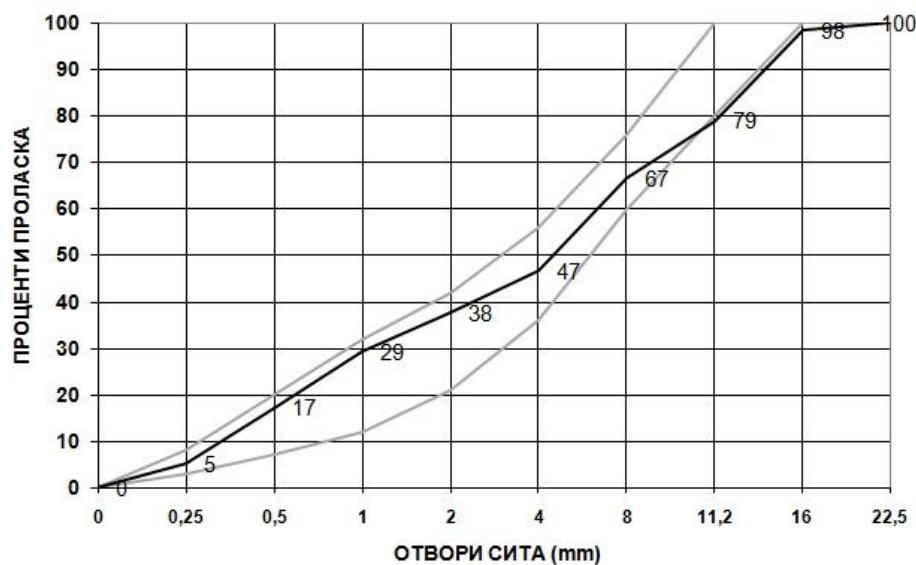


Slika 6.19. - SEM analiza maltera - (a) Etalon; (b) WG20; (c) WG35; (d) WGD10; (e) CRT staklo

6.8. Sastav betonskih mešavina

Na osnovu predstavljenog programa eksperimentalnog istraživanja u poglavlju 6.1., a u cilju ispitivanja uticaja zamene dela cementa recikliranim katodnim staklom na svojstva svežeg i očvrslog betona, napravljeno je osam betonskih mešavina. Cilj je bio da se napravi beton koji će pri starosti od 28 dana imati čvrstoću pri pritsku oko 45 MPa (*beton oznake MB 45 prema važećem Pravilniku za beton i armirani beton*). S obzirom da se izrada betona odvija u kontrolisanim, laboratorijskim uslovima to znači da je potrebna čvrstoća ovog betona 53 MPa pri navedenoj starosti. Ciljana je plastična konzistencija betona merenjem sleganja betona pomoću Abramskovog konusa (*sleganje 100 - 130 mm*). Kako bi se postigla željena konzistencija korišćen je hemijski dodatak iz grupe superplastifikatora - Sika® ViscoCrete® 4000 BP. Kao što je u poglavlju 6.2.2. već rečeno korišćen je rečni agregat iz reke Južne Morave sa separacije preduzeća "Šilo - prom", Belotinac. Korišćene su tri frakcije ovog agregata: 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm. Granulometrijska kriva mešavine agregata prikazana je na slici 6.20. Učešće pojedinačnih frakcija u mešavini iznosilo je: 43% (*frakcija 0/4 mm*), 23% (*frakcija 4/8 mm*) i 34% (*frakcija 8/16 mm*). Granulometrijska kriva mešavine agregata nalazi se između standardnih krivih "A" i "B" definisanih standardom SRPS U.M1.057:1984 [117]. Jedino se u slučaju sita 16 mm javlja malo nadmernih zrna što nije imalo većeg uticaja na svojstva betona.

Korišćen je portland cement CEM I 52,5 R proizvođača "CRH" Novi Popovac. Etalon beton je izrađen sa 400 kg čistog PC i 1800 kg trofrakcijskog agregata. Vodopraškasti faktor je bio konstantan kod etalon serije i kod pet serija gde je vršena zamena cementa staklom i iznosio je 0,438. Procenat zamene cementa CRT staklom iznosio je: 5%, 10%, 15%, 20% i 35%, u odnosu na masu cementa. Dve betonske serije su spravljene tako što je celokupnoj količini cementa (400 kg) dodato još 5%, odnosno 10% CRT stakla. U skladu sa procentima zamene cementa, odnosno procentima dodatka stakla, formirane su i oznake betonskih mešavina (*tabela 6.18.*), pri čemu je WG skraćenica za otpadno staklo - *waste glass*. Na primer, u slučaju 20% zamene cementa CRT-om oznaka serije je WG20, dok je u slučaju 10% dodatka CRT-a na celokupnu količinu cementa oznaka serije WGD10. U slučaju serije WGD5 vodovezivni faktor je iznosio 0,417, odnosno 0,398 za seriju WGD10. Kompletan sastav betonskih mešavina prikazan je u tabeli 6.18.



Slika 6.20. - Granulometriski sastav mešavine rečnog agregata

Tabela 6.18. - Sastav eksperimentalnih betonskih mešavina

Beton	Agregat			Cement	Staklo	Voda	ω_p	Aditiv
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm	CEM I 52,5 R	< 0,063 mm	grad. vodovod	$m_v / (m_c + m_s)$	Sika Viscocrete 4000 BP
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	-	kg/m ³
E	774	414	612	400	-	175,3	0,438	2,40
WG5	774	414	612	380	20	175,3	0,438	2,40
WG10	774	414	612	360	40	175,3	0,438	2,40
WG15	774	414	612	340	60	175,3	0,438	2,40
WG20	774	414	612	320	80	175,3	0,438	2,40
WG35	774	414	612	260	140	175,3	0,438	2,40
WGD5	774	414	612	400	20	175,3	0,417	2,80
WGD10	774	414	612	400	40	175,3	0,398	3,20

6.9. Izrada betonskih mešavina

Posebna pažnja, pre izrade svake betonske serije, posvećena je sjedinjavanju cementa i odgovarajuće količine usitnjenog katodnog stakla. U tu svrhu korišćena je posuda pogodne zapremine sa poklopcem, mešalica i specijalani nastavak (*slika 6.21., levo*). Mešanje je vršeno u trajanju od 5 minuta pri čemu je broj obrtaja specijalnog nastavka iznosio 850 obrtaja/min (*slika 6.21., desno*).



Slika 6.21. - Posuda i nastavak za mešanje cementa i stakla (levo); Proces mešanja (desno)

Izrada betonskih mešavina sprovedena je u laboratorijskoj mešalici "Metalika" Sopot. Reč je o protivstrujnoj mešalici sa vertikalnom osovinom i bubnjem korisne zapremine 50 litara (*slika 6.22.*). U okvašen bubanj su prvo sipane precizno odmerene tri frakcije osušenog agregata pri čemu je redosled sipanja bio od frakcije sa najkrupnijim zrnom ka najsitnijoj frakciji. Nakon toga u mešalicu je dodavana polovina predviđene količine vode i sprovedeno je mešanje u trajanju od 30 sekundi kako bi se izvršilo ravnomerno kvašenje zrna agregata. U mešalicu je potom sipan cement pomešan sa usitnjenim CRT staklom i preostala količina vode. Od tog trenutka etaloniranom štopericom mereno je vreme mešanja komponentalnih materijala. Nakon 60 sekundi od početka mešanja dodavan je superplastifikator, dok je ukupno vreme mešanja iznosilo 5 minuta. Prilikom izrade svake mešavine praćena je temperatura vazduha, vode i svežeg betona pomoću digitalnog termometra "Testo 108" sa eksternom sondom.



Slika 6.22. - Laboratorijska mešalica "Metalika" Sopot

Odmah nakon spravljanja svake mešavine sprovedeno je ispitivanje osobina betona u svežem stanju. Pregled dobijenih rezultata ispitivanja betona u svežem stanju prikazan je u poglavlju 6.10. Ugrađivanje betona u odgovarajuće kalupe vršeno je pomoću igle pervibratora čija je frekvencija vibriranja 14.000 Hz. Na slici 6.23. prikazan je jedan deo betonske serije WG5 neposredno pre samog rasklapanja kalupa, pri starosti od 24 h. Beton je do trenutka ispitivanja negovan u bazenu sa zasićenom krečnom vodom i u laboratorijskim uslovima u pogledu temperature i vlažnosti vazduha.



Slika 6.23. - Deo uzorka betonske serije WG5 neposredno pre rasklapanja kalupa

Za svaku betonsku mešavinu bilo je potrebno napraviti 10 mešunga i 84 uzorka, tako da su ukupno spravljena 672 betonska uzorka. Precizne dimenzije i broj uzoraka za sva predviđena ispitivanja prikazani su u tabeli 6.1. poglavlja 6.1. - Plan eksperimentalnog istraživanja.

6.10. Rezultati ispitivanja svežeg betona

Na svežem betonu ispitana su sledeća svojstva: merenje konzistencije sleganjem pomoću Abramsovog konusa (*SRPS ISO 4109:1997* [81]), određivanje sadržaja uvučenog vazduha (*SRPS ISO 4848:1999* [82]) i određivanje zapreminske mase svežeg betona (*SRPS ISO 6276:1997* [78]). Srednje vrednosti rezultata pobrojanih ispitivanja prikazane su u tabeli 6.19. Izgled slegle betonske kupe i postupak merenja sleganja prikazan je na slici 6.24. Merenje sadržaja uvučenog vazduha vršeno je pomoću porozimetra zapremine 8 dm³

proizvođača "Testing Bluhm & Feuerherdt GmbH" (slika 6.25.), dok je sud uređaja poslužio i za merenje zapreminske mase svežeg betona (slika 6.26.).

Tabela 6.19. - Rezultati ispitivanja svežeg betona

Betonska serija	Zapreminska masa $\gamma_{b,sv.,sr}$	Sleganje Δh_{sr}	Sadržaj uvučenog vazduh Δp
	kg/m ³	mm	%
E	2363	120	3,0
WG5	2362	130	3,2
WG10	2345	120	3,4
WG15	2334	130	3,8
WG20	2351	130	3,2
WG35	2341	110	3,4
WGD5	2348	120	3,7
WGD10	2348	110	3,6



Slika 6.24. - Merenje konzistencije svežeg betona pomoću Abramsovog konusa



Slika 6.25. - Određivanje sadržaja uvučenog vazduha



Slika 6.26. - Određivanje zapreminske mase svežeg betona

6.11. Rezultati ispitivanja očvrslog betona

6.11.1. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju

Ispitivanje zapreminske mase betonskih uzoraka oblika kocke ivice 15 cm u vodozasićenom stanju sprovedeno je prema standardu SRPS EN 12390-7:2010 [102]. Za merenje mase uzoraka korišćena je elektronska vaga KERN klase tačnosti 0,1 g. Merenje je vršeno pri starosti uzoraka od 2, 7, 28 i 90 dana prema formuli 6. Srednje vrednosti tri rezultata ispitivanja zapreminske mase prikazane su u tabeli 6.20., dok su pojedinačni rezultati dati u u Prilogu 5.

Tabela 6.20. - Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Betonska serija	Starost betona			
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
	$\gamma_{b, o\check{c}, sr} [kg/m^3]$	$\gamma_{b, o\check{c}, sr} [kg/m^3]$	$\gamma_{b, o\check{c}, sr} [kg/m^3]$	$\gamma_{b, o\check{c}, sr} [kg/m^3]$
E	2338	2342	2342	2347
WG5	2341	2345	2345	2340
WG10	2331	2347	2342	2344
WG15	2334	2328	2328	2338
WG20	2331	2321	2337	2336
WG35	2332	2327	2317	2324
WGD5	2327	2335	2311	2344
WGD10	2319	2328	2320	2360

$$\gamma_{b.oč,sr} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{m_{b,v}}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (6)$$

gde je:

$m_{b,v}$ - masa uzorka očvrslog betona zasićenog vodom u kg ;

V - zapremina uzorka u m^3 ;

$\gamma_{b.oč,sr}$ - srednja vrednost zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju u kg/m^3 .

6.11.2. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku sprovedeno je na uzorcima oblika kocke ivice 150 mm prema odredbama standarda SRPS EN 12390 - 3:2010 [84]. Za ispitivanje je korišćena digitalna, hidraulička presa "UTEST UTC - 5740" opsega merenja 0 - 3000 kN i klase tačnosti 0,5% (slika 6.27.). Presu pokreće servo kontrolisani hidraulički upravljač "UTC - 4860" i odgovarajući kompjuterski softver. Ispitivanje je sprovedeno pri starosti betona od 2, 7, 28, 90 i 180 dana. Srednje vrednosti rezultata tri ispitana uzorka, pri svim navedenim starostima, prikazani su u tabeli 6.21., dok su pojedinačni rezultati dati u Prilogu 6. Čvrstoća pri pritisku sračunata je prema formuli 7.



Slika 6.27. - Digitalna hidraulička presa za ispitivanje pritisne čvrstoće

Tabela 6.21. - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana

Betonska serija	Starost betona				
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana	180 dana
	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]
E	34,30	45,04	55,63	59,78	60,11
WG5	32,89	40,07	50,22	54,00	57,56
WG10	30,45	37,93	45,56	56,67	61,33
WG15	28,67	36,17	56,52	61,93	65,78
WG20	27,04	34,04	46,89	57,70	60,29
WG35	21,63	28,11	35,04	41,56	45,22
WGD5	39,63	46,37	58,21	62,15	68,21
WGD10	44,41	47,85	60,01	64,22	72,67

$$f_{p,i} = \frac{F_p}{A} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (7)$$

gde je:

F_p - sila pritiska koja je dovela do loma uzorka u N ;

A - površina stranice kocke ivice 150 mm;

$f_{p,i}$ - čvrstoća pri pritisku betona u MPa .

6.11.3. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem sprovedeno je prema standardu SRPS EN 12390-6:2012 [91] na uzorcima oblika cilindra prečnika baze 150 mm i visine 300 mm. Za ispitivanje je korišćena digitalna hidraulička presa "UTEST UTC - 5600" klase tačnosti 0,5%. Presu pokreće servo kontrolisani hidraulički upravljač "UTC - 4860" i odgovarajući kompjuterski softver. Na slici 6.28. prikazan je izgled opreme i uzorak WG35 nakon sprovednog ispitivanja. Za samo ispitivanje se koristi specijalan alat koji omogućava da se uzorak optereti postavljen u horizontalni položaj duž izvodnice cilindra. U tabeli 6.22. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja tri uzorka svake eksperimentale betonske serije dok su pojedinačni rezultati dati u Prilogu 7. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem sračunata je prema formuli:

$$f_{zc,i} = \frac{2 \cdot F_{zc}}{\pi \cdot d \cdot l} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (8)$$

gde je:

F_{zc} - sila koja je dovela do loma uzorka u N ;

d - prečnik cilindra u mm ;

l - dužina (visina) cilindra u mm ;

$f_{zc,i}$ - čvrstoća pri zatezanju cepanjem u MPa .



Slika 6.28. - Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem na cilindrima prečnika 150 mm i visine 300 mm

Tabela 6.22. - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana

Betonska serija	Starost betona	
	28 dana	90 dana
	$f_{zc,sr}$ [MPa]	$f_{zc,sr}$ [MPa]
E	4,11	4,23
WG5	3,82	3,90
WG10	3,89	4,02
WG15	3,85	4,13
WG20	3,89	4,17
WG35	3,42	3,61
WGD5	4,09	4,90
WGD10	4,53	5,07

6.11.4. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem sprovedeno je prema standardu SRPS EN 12390-5:2014 [90] na prizmama dužine 400 mm i kvadratnog poprečnog preseka ivice 100 mm. Kao i u slučaju čvrstoća pri zatezanju cepanjem korišćena je digitalna hidraulička presa "UTEST UTC - 5600". Za samo ispitivanje se koristi specijalan alat koji omogućava da se uzorak optereti silom savijanja u trećinama raspona. Na slici 6.29. prikazan je izgled opreme i uzorak WG5 nakon sprovednog ispitivanja. U tabeli 6.23. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja tri uzorka svake eksperimentalne betonske serije, pri starosti od 28 i 90 dana. Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem prikazani su u Prilogu 8. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sračunata je prema formuli:

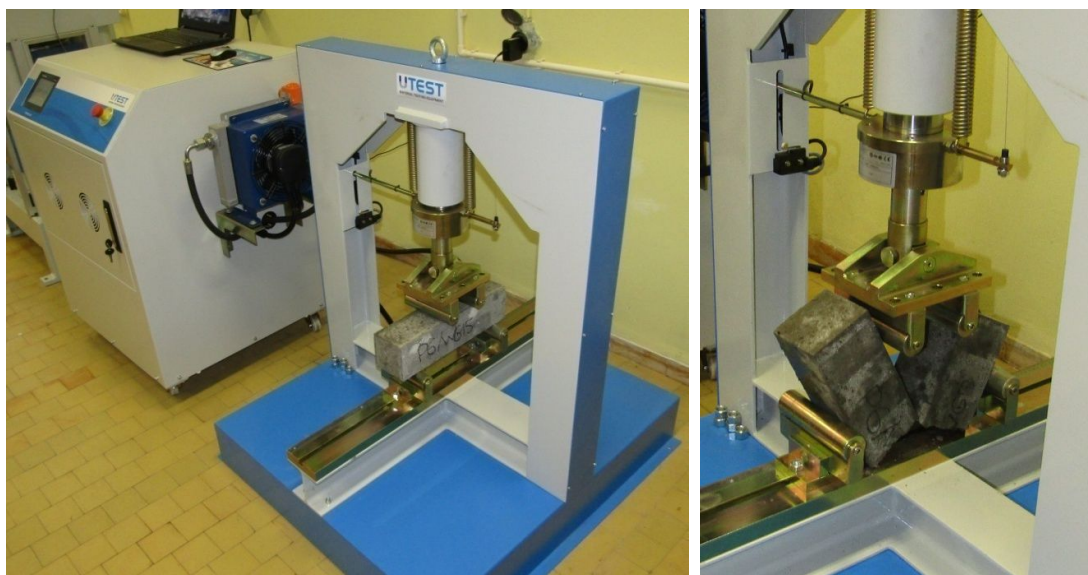
$$f_{zs,i} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (9)$$

gde je:

M - maksimalni moment savijanja u kNm ;

b, h - širina i visina poprečnog preseka uzorka u m ;

$f_{zs,i}$ - čvrstoća pri zatezanju savijanjem u MPa.



Slika 6.29. - Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem na prizmama 400 x 10 x 10 mm

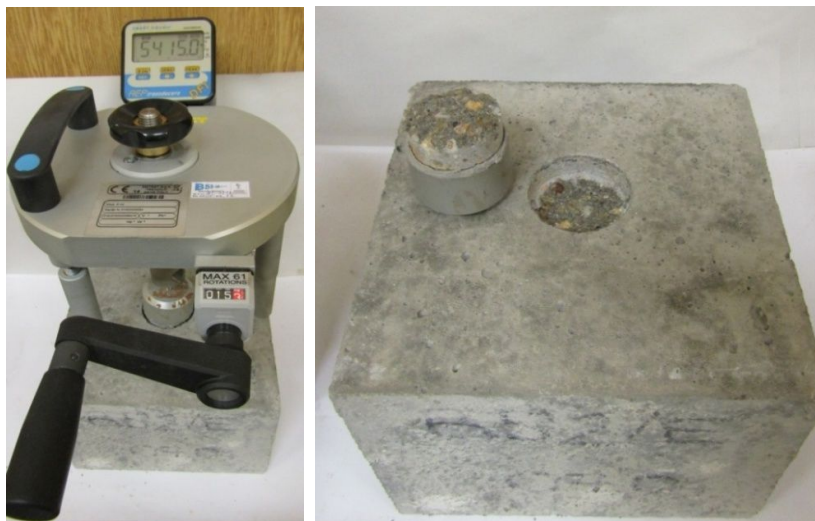
Tabela 6.23. - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana

Betonska serija	Starost betona	
	28 dana	90 dana
	$f_{z,sr}$ [MPa]	$f_{z,sr}$ [MPa]
E	6,27	6,50
WG5	4,72	6,16
WG10	5,43	6,25
WG15	5,17	6,27
WG20	4,54	5,79
WG35	4,56	5,38
WGD5	7,02	7,16
WGD10	7,03	7,25

6.11.5. Čvrstoća prionjivosti - "Pull - off" test

"Pull - off" testom se ispituje čvrstoća prionjivosti materijala za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija. Najčešće ispitivani materijali su: injekcione mase, različite vrste reparaturnih maltera, karbonske trake, betonske hidroizolacije itd. U cilju ispitivanja uticaja dodatka usitnjenog stakla na promenu čvrstoće prionjivosti betona primenjen je standard SRPS EN 1542:2010 [93]. Ispitivanje je sprovedeno na betonskim uzorcima oblika prizme dimenzija 200 x 200 x 150 mm pri starosti od 90 dana. Na odgovarajućim mestima izvršeno je zasecanje površine betona do dubine od 5 mm pomoću odgovarajuće dijamantske burgije prečnika 50 mm. Zatim je izvršeno lepljenje aluminijumskih pečatnika prečnika 50 mm sa zasečenom površinom betona pomoću specijalnog dvokomponentnog lepka "Sikadur - 31 CF Normal". Reč je o lepku na bazi epoksidnih smola i specijalnog filera sa mogućnošću primene pri temperaturi podloge od +10°C do +30°C. Zasecanje je izvršeno kako bi se obezbedilo da do loma ne dođe po površinskom sloju betona koji, kako je dobro poznato, može imati drugačije karakteristike od dubljih betonskih slojeva. U ovom konkretnom slučaju ideja nije bila da se proverí prionjivost lepka za betonsku podlogu, već da se utvrdi čvrstoća pri zatezanju samog betona s obzirom na pretpostavku da će do loma doći po betonskom delu uzorka. Veza između pull - off aparata "Matest Dyna Z-16" kapaciteta 16 kN (*slika 6.30.*) i zalepljenog pečatnika je ostvarena pomoću metalnog dela sa zglobovom na vrhu kako bi se omogućilo delovanje isključivo jednoaksijane sile zatezanja bez mogućnosti pojave momenta savijanja (*prost štap u statičkom smislu*). U tabeli 6.24. prikazane su srednje vrednosti

rezultata ispitivanja svake betonske serije. U Prilogu 9 su dati pojedinačni rezultati ispitivanja, fotografije i opis loma za svaki uzorak. Kod tri uzorka kod kojih je došlo do mešovitog loma po betonu i po lepku rezultati sile zatezanja nisu uzeti u obzir. Čvrstoća pri zatezanju betona određena je na osnovu formule 10.



Slika 6.30. - Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju pull - off aparatom na etalon betonu

Tabela 6.24. - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju "Pull - off" metodom

Betonska serija	Čvrstoća pri zatezanju $f_{zč,sr}$ [MPa]
E	3,41
WG5	3,59
WG10	3,19
WG15	3,56
WG20	3,19
WG35	2,69
WGD5	3,27
WGD10	3,40

$$f_{zč,i} = \frac{4 \cdot F_{zč}}{D^2 \cdot \pi} \left[\frac{N}{mm^2}, MPa \right] \quad (10)$$

gde je:

$F_{zč}$ - aksijalna sila čupanja (zatezanja) u N ;

D - prečnik pečatnika u mm ;

$f_{zč,i}$ - čvrstoća prionjivosti (zatezanja) u MPa .

6.11.6. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra

Jedna od često primenjivanih nedestruktivnih metoda za procenu kvaliteta ugrađenog betona u građevinskoj praksi je metoda određivanja odskočnog broja upotrebom odskočnog čekića - sklerometra, SRPS EN 12504-2:2014 [101]. Cilj ove metode je da se merenjem površinske tvrdoće zapravo utvrdi unutrašnja čvrstoća betona, što očekivano, dovodi do odgovarajuće greške. Greške su posledica disperzije rezultata koja se javlja usled varijacije površinske tvrdoće betona između epruveta [118]. U želji da se utvrdi što preciznija korelacija između odskočnog broja (*indeksa sklerometra*) i stvarne čvrstoće pri pritisku betona, ispitivanje je sprovedeno na betonskim epruvetama oblika kocke ivice 15 cm, neposredno pre samog utvrđivanja pritisne čvrstoće epruveta. Za ispitivanje je korišćen aparat sklerometar "N-34 Proceq SA" Switzerland. Svaka kocka je pre ispitivanja opterećena konstantnom silom od 50 kN pomoću hidrauličke prese. Na dvema naspramnim stranama epruvete, upravno na pravac ugradnje betona, izmeren je indeks sklerometra R_i pod uglom od 0° na ukupno osamnaest mesta. Srednje vrednosti rezultata ispitivanja indeksa sklerometra R_{sr} na epruvetama starosti 2, 7, 28 i 90 dana prikazane su u tabeli 6.25., dok su pojedinačni rezultati dati u Prilogu 10. Postupak ispitivanja odskočnog broja upotrebom sklerometra na jednom betonskom uzorku prikazan je na slici 6.31.



Slika 6.31. - Ispitivanje odskočnog broja sklerometra (levo); Izgled aparata sklerometra N-34 Proceq

Tabela 6.25. - Rezultati ispitivanja odskočnog broja upotrebom sklerometra na betonskim epruvetama starosti 2, 7, 28 i 90 dana

Betonska serija	Starost betona			
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
	R_{sr}	R_{sr}	R_{sr}	R_{sr}
E	40	45	48	50
WG5	38	43	46	48
WG10	37	42	45	49
WG15	36	41	49	51
WG20	35	39	46	49
WG35	28	36	40	43
WGD5	43	45	50	52
WGD10	44	46	50	53

6.11.7. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

Merenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa izvršeno je prema odredbama standarda SRPS EN 12504-4:2008 [98]. Prilikom merenja veoma je važno da se ostvari pravilan kontakt između sonde ultrazvučnog aparata i ispitne površine betona. Površina betona na mestu postavljanja sonde mora biti premazana tankim slojem masti u koju se sonde utiskuju tako da ne bude zaostalih mehurića vazduha. Ukoliko je površina betona hrapava onda je neophodno da se ona poravna. Sastav betona, odnosno komponentni materijali od kojih se on spravlja, utiču na brzinu ultrazvuka. To je potpuno logično jer od svojstava komponenti i njihovog udela zavise svojstva betona. Navedeno se svakako odnosi i na čvrstoću pri pritisku sa kojom se brzina ultrazvuka često dovodi u korelaciju. S druge strane uticaj svih komponenti od kojih se beton spravlja nije jednako značajan [80, 118, 119]. U cilju utvrđivanja što preciznije korelacije između ultrazvučnog impulsa i stvarne čvrstoće pri pritisku betona, ispitivanje je sprovedeno na betonskim epruvetama oblika kocke ivice 150 mm, neposredno pre samog utvrđivanja pritiskne čvrstoće epruveta. Svaki betonski uzorak ispitan je na pet mesta, četiri u uglovima i jedno u sredini stranice. Za ispitivanje je korišćen ultrazvučni aparat "PUNDIT CNS Electronics LTD" frekvencije 54 kHz. Na ekranu uređaja se očitava vreme u μs potrebno da ultrazvučni impuls prođe kroz očvrslu betonsku masu od sonde predajnika do sonde prijemnika. U tabeli 6.26. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa $V_{u,sr}$ na betonskim epruvetama starosti 2, 7, 28 i 90 dana, dok je na slici 6.32. prikazan sam postupak ispitivanja. Pojedinačni rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa kroz betona prikazani su u Prilogu 11. S obzirom da je dužina

putanje impulsa poznata, brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton određena je na osnovu sledeće formule:

$$V_u = \frac{S}{t} \quad \left[\frac{m}{s}, \frac{km}{s} \right] \quad (11)$$

gde je:

S - put ultrazvučnog impulsa od sonde predajnika do sonde prijemnika u *m*;

t - vreme potrebno da impuls pređe odgovarajući put u *s*;

V_u - brzina ultrazvučnog impulsa u *m/s*.

Tabela 6.26. - Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Betonska serija	Starost betona			
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
	$V_{u,sr}$ [m/s]	$V_{u,sr}$ [m/s]	$V_{u,sr}$ [m/s]	$V_{u,sr}$ [m/s]
E	4447	4627	4746	4778
WG5	4419	4551	4692	4732
WG10	4369	4514	4634	4755
WG15	4330	4483	4754	4790
WG20	4293	4442	4652	4763
WG35	4160	4317	4461	4575
WGD5	4544	4645	4767	4792
WGD10	4618	4664	4779	4809



Slika 6.32. - Merenje brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton

6.11.8. Statički modul elastičnosti

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti sprovedeno je na uzorcima oblika cilindra prečnika 150 mm i visine 300 mm u skladu sa odredbama standarda SRPS ISO 6784:2000 [92]. Svaka eksperimentalna betonska serija ispitana je pri starosti od 28 i 90 dana. Za ispitivanje je korišćena hidraulička presa "UTEST UTC - 5740" opsega merenja 0 - 3000 kN i tri digitalna ekstenzometra "CONTROLS 55-C0222/F" [120]. Pre samog ispitivanja odredi se čvrstoća pri pritisku betona f_p i na taj način se definiše i gornja vrednost napona σ_g koja prema standardu treba da bude približno jednaka $\sigma_g = \frac{1}{3} \cdot f_p$, dok je vrednost donjeg napona ista za sve vrste betona i iznosi $\sigma_d = 0,5 \text{ MPa}$. Nakon definisanja napona vrši se ciklično opterećenje uzorka do vrednosti σ_g i rasterećenje σ_d i to tri puta kako bi se eliminisala plastična deformacija betona. Ekstenzometri mere deformaciju betona Δl , dok se beleženje izmerenih podataka vrši automatski u odgovarajućem softveru. S obzirom na poznati izgled $\sigma - \varepsilon$ dijagrama jasno je da će se prilikom ovog cikličnog ispitivanja tj. takozvanog "treniranja" uzorka, beton nalaziti u zoni elastičnosti gde važi Hukov zakon, tako da se na kraju može sračunati modul elastičnosti betona prema sledećoj formuli:

$$E_s = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{\varepsilon_g - \varepsilon_d} \quad [GPa] \quad (12)$$

gde je:

σ_g - gornji napon u *MPa*;

σ_d - donji napon u *MPa*;

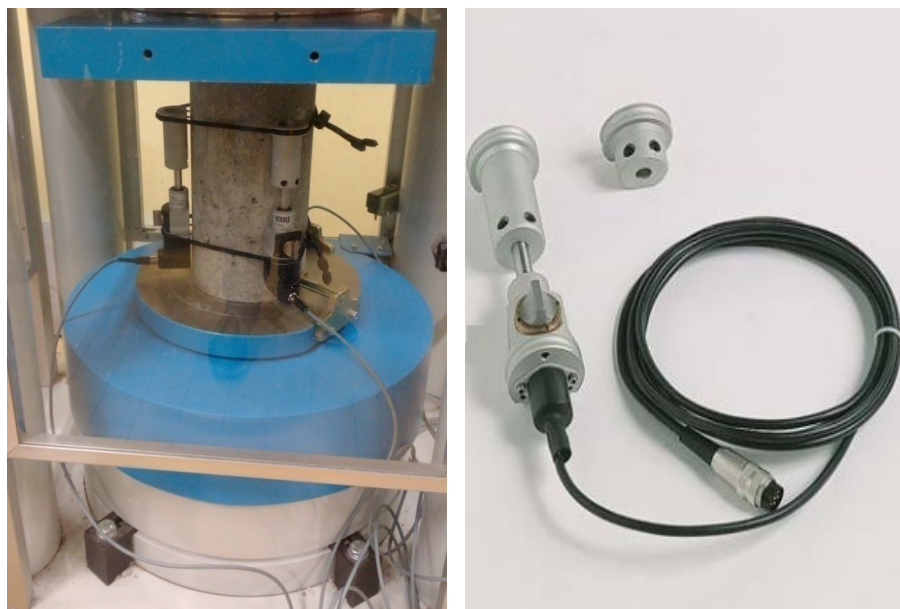
ε_g - dilatacija betona pri delovanju gornjeg napona u *mm/m*;

ε_d - dilatacija betona pri delovanju donjeg napona u *mm/m*;

E_s - statički modul elastičnosti u *GPa*;

Proces ispitivanja modula elastičnosti kao i izled elektronskog ekstenzometra prikazani su na slici 6.33. Posle određivanja modula elastičnosti za svaki uzorak sprovedeno je ispitivanje uzorka do loma i analogno tome praćene su deformacije kako bi se definisao $\sigma - \varepsilon$ dijagram za svaku eksperimentalnu seriju. Dijagram napona i deformacija za etalon seriju E i seriju sa najvećim procentom zamene cementa staklo WG35 prikazani su na slikama 6.34. i 6.35., respektivno. U tabeli 6.27. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja modula elastičnosti za eksperimentalne betone. Dijagrami napona i deformacija za preostale betonske serije, kao i pojedinačni rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti prikazani su u Prilogu 12. Pored ovih vrednosti, date su i računске vrednosti modula elastičnosti

dobijene na bazi empirijskih formula iz domaćeg Pravilnika za beton i armirani beton (*PBAB*), Evrokoda 2 (*EC2*), Američkog Instituta za beton (*American Concrete Institute - ACI*) i Kanadskog Udruženja za standardizaciju (*Canadian Standards Association - CSA*). U nastavku su date i empirijske formule na osnovu kojih je sračunat modul elastičnosti.



Slika 6.33. - Betonski uzorak oblika cilindra sa tri povezana ekstenzometra u procesu ispitivanja (levo); Izgled ekstenzometra CONTROLS 55-C0222/F (desno)

Empirijske formule za računanje statičkog modula elastičnosti prema različitim pravilnicima i udruženjima za standardizaciju:

$$E_s = 9,25 \cdot \sqrt[3]{(f_{bk} + 10)} \quad (PBAB) \quad (13)$$

$$E_{cm} = 22 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}/10} \quad (EC2) \quad (14)$$

$$E_c = 0,043 \cdot \gamma^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (ACI) \quad (15)$$

$$E_c = (3300\sqrt{f_c} + 6900) \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2300}\right)^{1,5} \quad (CAS) \quad (16)$$

gde su:

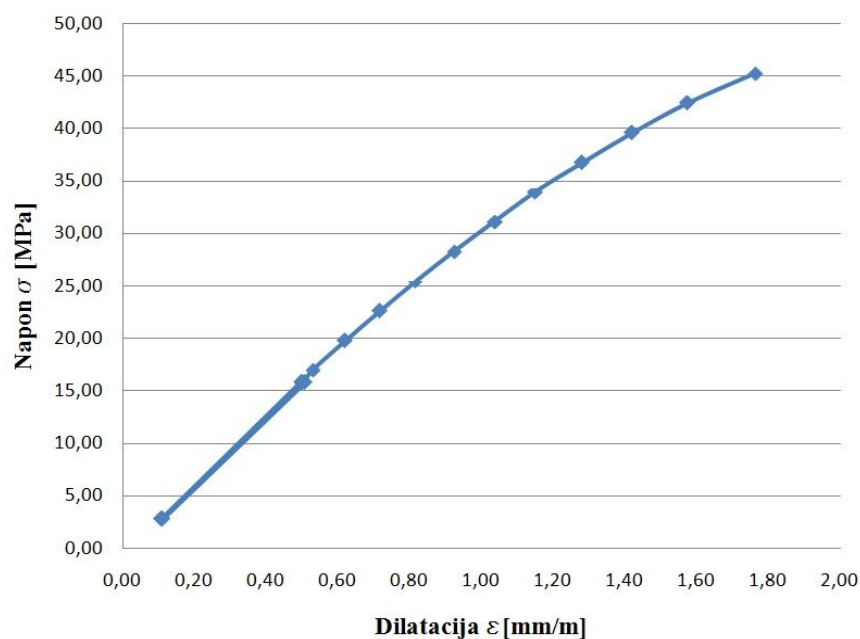
f_{bk} - karakteristična čvrstoća pri pritisku betona pri starosti od 28 dana - marka betona u MPa

f_{cm} i f_c - čvrstoća pri pritisku betonskih cilindara 150 x 300 mm u MPa.

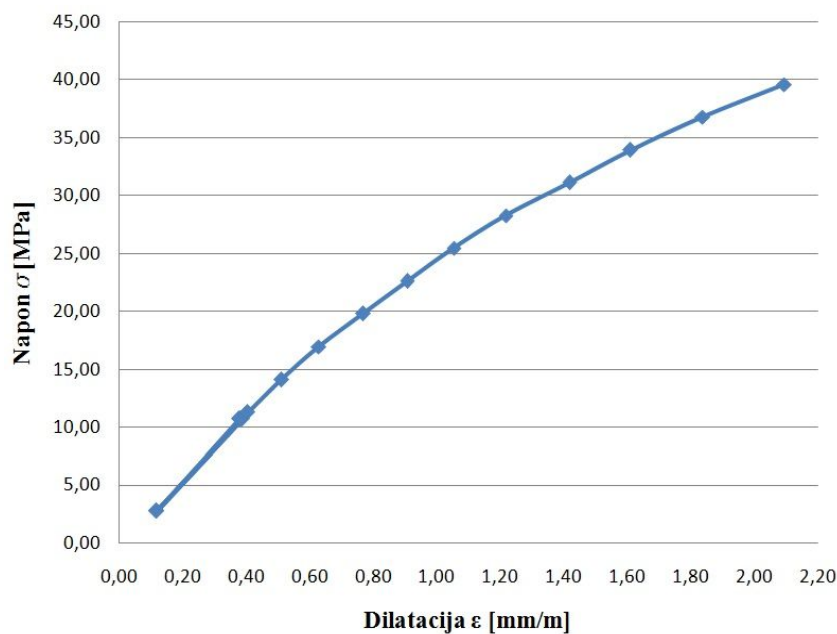
γ_c - zapreminska masa očvrslog betona u kg/m^3 .

Tabela 6.27. - Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana i računske vrednosti prema empirijskim izrazima različitih pravilnika i udruženja za standardizaciju

Statički modul elast.	Eksperimentalni rezultati		PBAB		EC2		ACI		CSA	
	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana	28 dana	90 dana
Betonska serija	$E_{s,sr}$ [GPa]	$E_{s,sr}$ [GPa]	$E_{s,sr}$ [GPa]	$E_{s,sr}$ [GPa]	E_s [GPa]	E_s [GPa]	E_s [GPa]	E_s [GPa]	E_s [GPa]	E_s [GPa]
E	35,67	36,89	37,31	38,08	36,09	36,97	32,38	33,68	29,62	30,54
WG5	34,38	36,50	36,26	37,00	34,88	35,74	30,83	31,86	28,55	29,52
WG10	35,52	37,81	35,30	37,51	33,77	36,31	29,68	33,19	27,83	30,29
WG15	34,75	37,01	37,48	38,47	36,28	37,41	32,35	34,08	29,53	30,78
WG20	33,12	36,62	35,58	37,70	34,09	36,53	29,64	32,85	27,69	29,92
WG35	31,28	33,30	32,91	34,43	30,94	32,75	25,29	27,67	24,57	26,26
WGD5	35,21	36,41	37,79	38,51	36,64	37,45	32,47	34,27	29,54	30,94
WGD10	36,18	37,55	38,12	38,87	37,01	37,86	33,16	35,20	30,06	31,66



Slika 6.34 - $\sigma - \varepsilon$ dijagram etalon betona pri starosti od 90 dana



Slika 6.35. - $\sigma - \varepsilon$ dijagram betona WG35 pri starosti od 90 dana

6.11.9. Ispitivanje udarne otpornosti betona - "Drop weight test"

Ispitivanje udarne otpornosti betona tj. duktilnosti betonskih serija sa različitim procentom dodatka CRT stakla sprovedena je putem "Drop weight test" metode, a prema preporukama profesora Ukrainczyka [121]. Na slici 6.36. prikazana je aparatura za ispitivanje udarne otpornosti betona koju je koristio docent Nenad Ristić za odgovarajuća ispitivanja u

okviru njegove doktorske disertacije [119]. Najvažniji elementi aparature prikazane na slici 6.36. su:

1. Plastična cev dužine 0,5 m koja služi kao vođica kroz koju teg slobodno pada;
2. Kruti čelični ram sa četiri oslonca koji se kruto vezuju za podlogu (*ankerima*) u koji se fiksira betonski uzorak;
3. Udarne masa - teg od kaljenog čelika mase 3 kg sa zaobljenim vrhom;
4. Betonski uzorci oblika ploče dimezije 40 x 40 x 6 cm koji se fiksiraju za ram pomoću čeličnog prstena.



Slika 6.36. - Aparatura za ispitivanje udarne otpornosti betona

Postupak ispitivanja je sledeći: teg mase 3 kg slobodno pada sa visine od 30 cm i udara u centar betonske ploče koja je čeličnim prstenom uklještena po celom obimu za kruti čelični ram. Meri se potreban broj udaraca do nastanka prve prsline ($N1$), kao i broj udaraca do loma uzorka ($N2$). S obzirom da je poznata visina i masa tega može se sračunati ukupna utrošena energija do pojave prve prsline i loma uzorka prema formuli:

$$E_N = N \cdot \frac{m_t \cdot v_t^2}{2} = N \cdot m_t \cdot g \cdot h_t \quad [J] \quad (17)$$

gde je:

N - broj udaraca tega do pojave prve prsline ili loma nosača;

m_t - udarna masa u kg ;

v_t - brzina udarne mase u m/s ;

g - ubrzanje Zemljine teže u m/s^2 ;

h_t - visina sa koje pada teg u m ;

E_N - ukupna utrošena energija nakon N udaraca tega u J .

Potencijalna energija udarne mase je iznosila $E=8,83$ J dok je brzina tega u trenutku udara iznosila $v_t = 2,43$ m/s. Betonski uzorak je uklješten po celom obimu tako da se može smatrati da se radi o tvrdom udaru klase 2. Osnovna karakteristika tvrdog udara 2 jeste da prilikom udara tega o betonsku površinu dolazi do određenog odskoka istog od površine betona, pri čemu se jedan deo kinetičke energije prenosi na betonsku podlogu. U početku, pri prvim udarima tega, javljaju se uglavnom elastične deformacije betona, tako da se u prvim udarima ne mogu detektovati oštećenja. Usled većeg broja ponovljenih, identičnih udara ukupna apsorbovana energija postaje dovoljno velika i dolazi do pojave lokalnih oštećenja. Ova oštećenja nastaju kada naponi zatezanja prouzrokovani maksimalnim vibracijama uzorka usled udara prekorače čvrstoću pri zatezanju ispitivanog betona [122]. "Drop weight test" metodu koristio je i profesor Dimitrije Zakić za ispitivanje dinamičke duktilnosti sitnozrnih betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima [122], pri čemu je mereno i ubrzanje udarne mase pomoću akceleratora. U tabeli 6.28. date su srednje vrednosti rezultata ispitivanja betonskih serija sa različitom količinom dodatka CRT stakla betonu. U tabeli je prikazan broj udaraca N_1 do pojave prve prsline na uzorku, odnosno broj udara N_2 do pojave loma. Na osnovu formule 17 sračunate su i odgovarajuće utrošene količine energije E_1 i E_2 , respektivno. U Prilogu 13 date su fotografije slomljenih uzoraka. Za svaku betonsku seriju spravljen su po dva uzorka dimezije $400 \times 400 \times 60$ mm, dok je samo ispitivanje sprovedeno pri starosti betona od 90 dana.

Tabela 6.28. - Rezultati ispitivanja udarne otpornosti betona pri starosti od 90 dana

Betonska serija	N1	N2	E1	E2
	br. udaraca tega	br. udaraca tega	[J]	[J]
E	14	16	123,61	141,26
WG5	13	14	114,78	123,61
WG10	12	14	105,95	123,61
WG15	12	15	105,95	132,44
WG20	9	12	79,46	105,95
WG35	7	9	61,80	79,46
WGD5	15	18	132,44	158,92
WGD10	16	19	141,26	167,75

6.11.10. Ispitivanje skupljanja betona

Ispitivanje skupljanja betona vršeno je prema standardu UNI 6555:1973 [94] na betonskim prizmama dimenzija 100 x 100 x 500 mm. U odgovarajuće čelične kalupe sa prethodno postavljenim reperima na čeonim stranama ugrađen je beton. Nakon 24 sata, uzorci su izvađeni iz kalupa i negovani u vodi temperature $20 \pm 4^\circ\text{C}$ u trajanju od 48 sati. Posle ukupno 72 sata od momenta izrade, uzorci se izvađeni iz vode, obrisani vlažnom flanelskom tkaninom i izvršeno je inicijalno merenje pomoću komparatera. Naredno merenje uzoraka vršeno je pri starosti betona od 4, 7, 14, 21, 28, 60 i 90 dana. U predmetnom ispitivanju korišćen je digitalni komparater "Insize" koji ima tačnost merenja od 0,001 mm. Promena dužine epruvete $\Delta l_{sb}(t)$, nastala usled skupljanja betona na vazduhu, računa se u odnosu na prvo - inicijalno merenje posle $72 \pm 0,5$ h. Srednje vrednosti rezultata ispitivanja skupljanja tri betonske epruvete prikazane su u tabeli 6.29., dok su pojedinačni rezultati dati u Prilogu 14. Izgled opreme za merenje skupljanja prikazan je na slici 6.37., dok je sam postupak merenja promene dužine prikazan na slici 6.38. Skupljanje betona ε_{sb} izračunava se prema sledećoj jednačini:

$$\varepsilon_{sb,i} = \frac{\Delta l_{sb}(t)}{l_{sb}} \quad [\text{mm}/\text{m}] \quad (18)$$

gde je:

$\Delta l_{sb}(t)$ - promena dužine epruvete između merenja u trenutku t i nultog čitanja t_{72h} u mm ;

l_{sb} - dužina betonske epruvete izražena u m ;

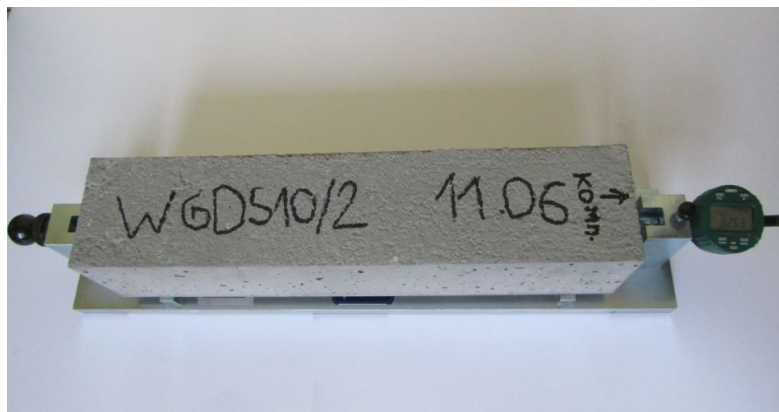
ε_{sb} - skupljanje betonske epruvete izraženo u mm/m .

Tabela 6.29: Rezultati ispitivanja skupljanja betona na vazduhu

Malterska serija	E	WGS5	WGS10	WGS15	WGS20	WGS35	WGDS5	WGDS10
Starost maltera [dani]	$\varepsilon_{sb,sr}$ [mm/m]							
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,031	0,030	0,011	0,019	0,025	0,027	0,095	0,009
7	0,148	0,098	0,071	0,058	0,121	0,096	0,171	0,092
14	0,237	0,224	0,207	0,199	0,251	0,248	0,260	0,209
21	0,308	0,291	0,269	0,282	0,313	0,290	0,283	0,291
28	0,343	0,345	0,327	0,331	0,387	0,367	0,355	0,310
90	0,504	0,481	0,479	0,482	0,473	0,469	0,466	0,411
180	0,554	0,564	0,553	0,549	0,537	0,531	0,521	0,465



Slika 6.37. - Izgled opreme za merenje skupljanja betona



Slika 6.38. - Postupak merenja skupljanja na betonskom uzorku

6.11.11. Ispitivanje upijanja vode pod atmosferskim pritiskom

Nakon završenog ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem, na istim uzorcima oblika kocke dužine ivice $\approx 7,1\text{cm}$ osušenim do konstantne mase m_s na temperaturi $105 \pm 5^\circ\text{C}$, sprovedeno je ispitivanje upijanja vode pod atmosferskim pritiskom prema standardu SRPS B.B8.010:1981 [103]. Uzorci su postavljeni u sudove odgovarajuće zapremine nakon čega je sipana voda do 1/4 visine uzorka. Posle 1 sata nivo vode je povećan do 1/2 visine uzorka i uzorci tako delimično potopljani ostaju još 1 sat. Zatim je dolivena voda do 3/4 visine i uzorci su tako negovani 20 sati. Na kraju, uzorci su potpuno potopljeni u vodu u trajanju od 2 sata. Masa vodom zasićenih uzoraka m_{sv} merena je prvi put nakon 24 sata od početka ispitivanja, a zatim na svaka naredna 24 sata sve dok razlika između dva uzastopna merenja nije bila manja od 0,01 g. Nakon ispunjenja prethodnog uslova izmerena je konačna vrednost mase vodom zasićenih uzoraka. U tabeli 6.30. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja upijanja vode $U_{p,sr}$ sprovednog na tri uzorka svake betonske serije, dok su pojedinačne vrednosti date u Prilogu 15. Upijanje vode izračunava se prema sledećoj jednačini:

$$U_{p,i} = \frac{m_{sv} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (19)$$

gde je:

m_s - masa uzorka osušenog do konstantne mase sa tačnošću merenja od 0,01 g;

m_{sv} - masa vodom zasićenog uzorka do konstantne mase sa tačnošću merenja od 0,01 g;

$U_{p,i}$ - upijanje vode po masi u %;

Tabela 6.30. - Rezultati ispitivanja upijanja vode betona pod atmosferskim pritiskom

Betonska serija	E	WG5	WG10	WG15	WG20	WG35	WGD5	WGD10
$U_{p,sr} [\%]$	4,91	4,68	4,56	4,41	4,35	4,79	4,45	4,05

6.12. Rezultati ispitivanja trajnosti betona sa dodatkom CRT stakla

6.12.1. Ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza

Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza sprovedeno je prema odredbama standarda SRPS U.M1.016:1992 [97] na kockama ivice 150 mm koje su izložene delovanju 200 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja. Kao što je to dobro poznato, jedan ciklus se sastoji od smrzavanja uzoraka na temperaturi od -20 ± 2 °C u trajanju od 4 sata i odmrzavanja u vodi temperature $+20 \pm 3$ °C u trajanju od 4 sata. Smrzavanje je vršeno u klima komori "Controls X26", dok su epruvete odmrzavane i negovane u bazenima odgovarajuće zapremine (*slika 6.39.*). Ekvivalentna starost betonskih epruveta koje su negovane samo u vodi izračunavana je za jedan ciklus smrzavanja kocke ivice 150 mm u toku 24h. Rezultati su prikazani u tabeli 6.31. Ispitivanje je započeto pri starosti betona od 28 dana. Čvrstoća pri pritisku smrzvanih epruveta ispitana je nakon završenih 150 i 200 ciklusa, nakon čega je definisano i smanjenje čvrstoće pri pritisku betona u odnosu na etalon epruvete negovane u vodi do ekvivalentne starosti prema formulama:

$$\Delta f_{p,150} = \frac{f_{E1} - f_{S1}}{f_{E1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (20)$$

$$\Delta f_{p,200} = \frac{f_{E2} - f_{S2}}{f_{E2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (21)$$

gde je:

f_{E1} - čvrstoća pri pritisku etalon epruveta negovanih u vodi do ekvivalentne starosti E1 u MPa;

f_{E2} - čvrstoća pri pritisku etalon epruveta negovanih u vodi do ekvivalentne starosti E2 u MPa;

f_{S1} - čvrstoća pri pritisku epruveta nakon 150 ciklusa smrzavanja u MPa;

f_{S2} - čvrstoća pri pritisku epruveta nakon 200 ciklusa smrzavanja u MPa;

$\Delta f_{p,150}$ - smanjenje čvrstoće pri pritisku betona nakon 150 ciklusa smrzavanja u %;

$\Delta f_{p,200}$ - smanjenje čvrstoće pri pritisku betona nakon 200 ciklusa smrzavanja u %;

Tabela 6.31 - Rezultati ispitivanja otpornosti betona na delovanje mraza

Betonska serija	Etaloni negovani u vodi		Smrzavane epruvete		$\Delta f_{p,150}$ [%]	$\Delta f_{p,200}$ [%]
	f_{E1} [MPa]	f_{E2} [MPa]	f_{S1} [MPa]	f_{S2} [MPa]		
E	58,00	61,28	54,21	52,89	6,53	13,69
WG5	56,28	58,26	52,09	49,67	7,44	14,74
WG10	57,56	59,58	53,97	51,18	6,24	14,10
WG15	60,56	64,15	56,21	54,44	7,18	15,14
WG20	52,38	58,64	47,01	46,58	10,25	20,57
WG35	48,08	50,99	41,06	37,28	14,60	26,89
WGD5	63,14	66,28	60,01	58,55	4,96	11,66
WGD10	65,22	71,52	61,73	64,28	5,35	10,12



Slika 6.39. - Klima komora "Controls X26" i bazeni za negu uzoraka

6.12.2. Ispitivanje otpornosti na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje

Ispitivanje otpornosti eksperimentalnih betonskih serija na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje izvršeno je prema standardu SRPS U.M1.055:1984 [98]. Svaku betonsku seriju činile su po tri betonske epruvete oblika kocke ivice 150 mm. Na osušenim kockama je pomoću metalnog okvira formirana ispitna površina 100 x 100 mm. Visina okvira je 10 mm, dok je spoj između kocke i okvira vodonepropustljiv. U okvir je naliven 3% - ni rastvor natrijum hlorida NaCl (*kuhinjska so*). U narednih 7 dana održavan je nivo rastvora od

minimum 3 mm u okviru. Nakon toga sprovedeno je 25 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja uzoraka. Jedan ciklus se sastojao od smrzavanja epruveta na temperaturi od $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 16 sati i odmrzavanja na vazduhu, u laboratorijskim uslovima, u trajanju od 8 sati. Na svakih pet ciklusa vršen je vizuelni pregled ispitnih površina u cilju utvrđivanja eventualnih promena usled dejstva mraza i soli. U slučajevima pojave oštećenja betona, urađeno je mokro sejanje izluskanog materijala kroz otvor sita 0,09 mm i gubitak mase je izražen u mg/mm^2 . U tabeli 6.32. prikazani su rezultati ispitivanja betonskih serija nakon 25 ciklusa jednovremenog delovanja mraza i soli za odmrzavanje sa opisom nastalog oštećenja (*ukoliko je do oštećenja došlo*), kao i gubitkom mase. U Prilogu 16 date su fotografije ispitanih uzoraka.

Tabela 6.32. - Rezultati ispitivanja otpornosti betona na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje

Betonska serija	Gubitak mase [mg/mm^2]	Opis oštećenja	Stepen oštećenja prema SRPS U.M1.055:1984	Otpornost na M+S
E	-	nema	MS "0"	otporan
WG5	-	nema	MS "0"	otporan
WG10	-	nema	MS "0"	otporan
WG15	0,12	nema promena na površini	MS "0"	otporan
WG20	0,02; 0,01; 0,09	oštećenje finog maltera	MS "1"	otporan
WG35	0,34; 0,33; 0,17	oštećenje površine, vidljiva pojedina zrna agregata	MS "2"	neotporan
WGD5	-	nema	MS "0"	otporan
WGD10	-	nema	MS "0"	otporan

6.12.3. Ispitivanje otpornosti betona prema delovanju vode pod pritiskom - vodonepropustljivost

Ispitivanje vodonepropustljivosti betona urađeno je prema odredbama standarda SRPS U.M1.015:1998 [96]. Posle vađenja iz kalupa epruvete su do starosti od 28 dana negovane na vazduhu relativne vlažnosti $\geq 95\%$. Nakon toga, uzorci su sušeni 7 dana na vazduhu u laboratorijskim uslovima. Potom su epruvete izložene dejstvu vode pod pritiskom od 1 bara u trajanju od 24 h, zatim 48 h pod pritiskom od 3 bara i na kraju dejstvu vode pod pritiskom od 7 bara u trajanju od 24 h. Smer delovanja vode je bio odozdo naviše. Posle

završetka ovog postupka, uzorci su pomoću hidrauličke prese prepolovljeni cepanjem i izmerena je dubina prodora vode. U tabeli 6.33. prikazane su najveće pojedinačne vrednosti prodora vode, kao i srednja vrednost tri rezultata ispitivanja, zaokružena na 5 mm. U Prilogu 17 dat je šematski prikaz linije prodora vode za svaki pojedinačni uzorak. Za ispitivanje vodonepropustljivosti korišćen je uređaj "UTEST UTC - 1090.92" (slika 6.40.).

Tabela 6.33. - Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti betona

Betonska serija	VDP1	VDP2	VDP3	Srednja vrednost prodora vode [mm]
	Dubina prodora vode [mm]			
E	5	10	0	5
WG5	20	15	5	15
WG10	15	10	5	10
WG15	5	10	5	5
WG20	20	25	15	20
WG35	5	10	15	10
WGD5	10	5	10	10
WGD10	5	0	5	5



Slika 6.40. - Ispitivanje vodonepropustljivosti betona

6.12.4. Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata

Ideja u ovom delu istraživanja trajnosti betona je bila ispitivanje uticaja zamene dela cementa CRT staklom, odnosno u slučaju dve eksperimentalne serije dodatka CRT stakla cementu, na sulfatnu otpornost tako spravljenog betona. U našoj zemlji za sada ne postoji standard kojim je definisan postupak ispitivanja otpornosti betona na ovo dejstvo. Veoma temeljno i sveobuhvatno ispitivanje sulfatne otpornosti betona na bazi recikliranog agregata sprovela je dr Vesna Bulatović u okviru svoje doktorske disertacije [123]. U nastavku će biti opisan postupak pripreme, negovanje i ispitivanje uzorka, pri čemu se vodilo računa da sam postupak bude sličan sa pomenutim ispitivanjem [123].

Svaku betonsku seriju činilo je 18 uzoraka oblika cilindra prečnika 100 mm i visine 100 mm (*ukupno 144 uzorka*). Beton je izliven u metalne konzerve, dok je ugradnja vršena pomoću vibro stola. Polovinu svih uzoraka činili su etaloni koji su do trenutka ispitivanja negovani u zasićenoj krečnoj vodi. Druga polovina uzoraka je nakon neophodnih priprema, pri starosti od 28 dana, potapana i držana u 5% rastvoru Na_2SO_4 do momenta ispitivanja. Postupak pripreme i nege eksperimentalnih uzoraka izgledao je ovako:

1. Spravljanje betona i čuvanje u hermetički zatvorenim konzervama 7 dana na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$;
2. Vađenje iz konzerve, dovođenje baza cilindara u plan - paralelnost (*sečenjem*) i negovanje 14 dana u zasićenoj krečnoj vodi (*rastvor 1,8 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na 1 dm³ vode*). Etalon uzorci svih serija (*polovina uzoraka*) negovani su u krečnoj vodi do trenutka ispitivanja;
3. Posle 21 dan od momenta spravljanja, vađenje iz krečne vode polovine uzoraka koja je namenjena izlaganju natrijum sulfatu. S obzirom na očekivanu degradaciju uzoraka nakon dugoročnog delovanja sulfatnog rastvora baze izvađenih uzoraka su premazane epoksidom Sikadur - 31 CF kako bi se kasnije sprečila pojava koncentracije napona prilikom ispitivanja pritisne čvrstoće (*slika 6.43., levo*);
4. Polovina izvađenih uzoraka, nakon premazivanja baza epoksidom, negovana je na vazduhu u laboratoriji 7 dana (*slika 6.42.*);
5. Pri starosti od 28 dana, epoksidom premazani uzorci su potapani u 5% rastvor Na_2SO_4 (*rastvor 5 kg natrijum sulfata na 100 dm³ vode*);
6. Zamena celokupnog 5% rastvora Na_2SO_4 u bazenima za negu uzoraka nakon 3, 6 i 12 meseci kako bi se održala pH vrednost;

7. Uporedno ispitivanje pritiskne čvrstoće uzoraka negovanih u rastvoru $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i uzoraka negovanih u rastvoru Na_2SO_4 nakon 3, 6 i 12 meseci.



Slika 6.41. - Provera pH vrednosti zasićene krečne vode pomoću pH metra "PH-220"



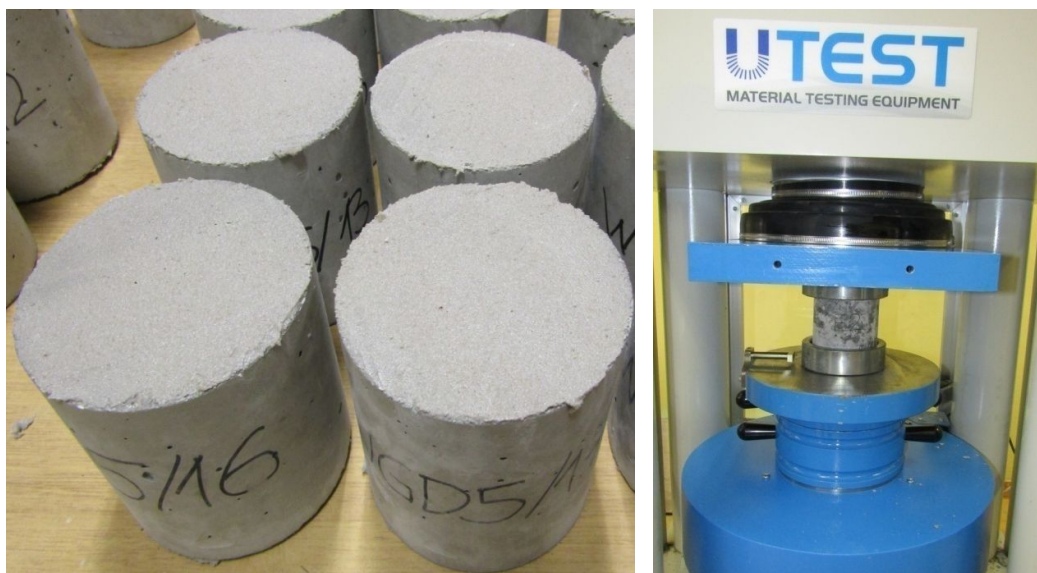
Slika 6.42. - Negovanje uzoraka na vazduhu u laboratoriji

Korišćen je anhidrovani natrijum sulfat distributera DOO "Top Star" Zrenjanin. Rastvaranje kalcijum hidroksida i natrijum sulfata vršeno je u toploj vodi temperature 28 - 32°C. Tek nakon hlađenja rastvora uzorci su potapani i držani u pogodnim kontejnerima. U tabeli 6.34. prikazane su neke fizičke i hemijske karakteristike ovog hemijskog proizvoda koje je dostavio proizvođač. Provera pH vrednosti rastvora sulfata i zasićene krečne vode u

kontejnerima vršena je pomoću pH metra "PH-220" mernog opsega od 0 do 14 pH i rezolucije merenja 0,01 pH (*slika 6.41.*). Vrednost pH rastvora Na_2SO_4 iznosila je $\sim 7,5$, odnosno $\sim 12,5$ u slučaju zasićene krečne vode.

Tabela 6.34. - Fizičke i hemijske karakteristike eksperimentalnog natrijum sulfata [124]

Karakteristika	Specifična vrednost	Metod ispitivanja
Izgled	fini beli kristali bez mirisa	-
Na_2SO_4 [%]	min. 99,6	Kalkulacija
ph 5% rastvora	$> 7,5$	Potenciometrijski
Hloridi [%]	max. 0,006	Fotometrijski
Karbonati [%]	max. 0,02	Titrimetrijski
Nerastv. materija [%]	max. 0,2	Gravimetrijski
Metali Pb+Sb+As+Cd+Ni [ppm]	max. 5	ICP-OES
Gvožđe [ppm]	max. 5	ICP-OES
Čestica $> 0,355$ mm [%]	max. 2	Analiza prosejavanjem
Čestica $< 0,06$ mm [%]	~ 5	Analiza prosejavanjem



Slika 6.43. - Izgled uzoraka premazanih epoksidom pre potapanja u rastvor Na_2SO_4 (levo); Ispitivanje čvrstoće pri pritisku uzoraka korišćenjem neoprenskih "kapa" (desno)

Nivo sulfatne otpornosti betonskih serija sa dodatkom CRT stakla utvrđen je upoređivanjem čvrstoće pri pritisku etalon uzoraka za svaku seriju i uzoraka izloženih delovanju sulfata, tabela 6.35. Pojedinačni rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće nakon

sprovedenog postupka ispitivanja prikazani su u Prilogu 18. Uporedno ispitivanje mehaničkih čvrstoća sprovedeno je nakon izlaganja betona sulfatnom rastvoru u trajanju od 3, 6 i 12 meseci. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je sprovedeno prema standardu ASTM C1231-14 [125], koji predviđa upotrebu specijalnih čeličnih kapa sa neoprenskom gumom (*slika 6.43., desno*). Pored ispitivanja promene čvrstoće, izvršena je i vizuelna provera eventualnih oštećenja uzoraka koji su držani u sulfatnom rastvoru.

Tabela 6.35. - Rezultati ispitivanja sulfatne otpornosti betona merenjem promene pritiskne čvrstoće uzoraka

Betonska serija	Etaloni negovani u rastvoru Ca(OH)_2			Epruvete negovane u 5% rastvoru Na_2SO_4			Promena čvrstoće $\Delta f_{p,n}$ [%]		
	f_{E3} [MPa]	f_{E6} [MPa]	f_{E12} [MPa]	f_{NS3} [MPa]	f_{NS6} [MPa]	f_{NS12} [MPa]	$\Delta f_{p,3}$ [%]	$\Delta f_{p,6}$ [%]	$\Delta f_{p,12}$ [%]
E	67,76	71,14	72,71	66,33	69,07	71,27	2,16	2,92	1,98
WG5	63,83	67,02	71,54	58,95	62,64	67,22	7,64	6,54	6,04
WG10	62,30	69,27	73,51	61,57	63,72	66,15	1,17	8,01	10,01
WG15	65,08	71,83	74,70	60,71	64,96	68,59	6,72	9,56	8,18
WG20	58,37	62,96	68,26	57,54	60,33	64,38	1,42	4,18	5,69
WG35	46,81	52,98	58,58	44,75	50,02	56,60	4,39	5,59	3,39
WGD5	69,01	72,24	76,74	67,64	70,76	74,80	1,99	2,05	2,53
WGD10	71,53	73,66	78,53	69,42	72,82	77,34	2,95	1,15	1,52

Promena čvrstoće sračunavana je prema sledećoj formuli:

$$\Delta f_{p,i} = \frac{f_{E,i} - f_{NS,i}}{f_{E,i}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (22)$$

gde je:

f_{Ei} - čvrstoća pri pritisku etalon epruveta posle 3, 6 i 12 meseci negovanja u rastvoru Ca(OH)_2 u MPa;

f_{NSi} - čvrstoća pri pritisku epruveta negovanih u 5% rastvoru Na_2SO_4 posle 3, 6 i 12 meseci u MPa;

$\Delta f_{p,i}$ - promena čvrstoće pri pritisku betona u %;

6.12.5. Otpornost prema habanju brušenjem

Nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem, iz polovina betonskih prizmi, sečenjem su formirana po tri uzorka oblika kocke ivice 7,1 cm na kojima je ispitana otpornost prema habanju brušenjem u skladu sa standardom SRPS EN 1340:2012, prilog H [95]. Ispitivanje je sprovedeno na Bemeovoj mašini "Controls 48-D5272" (slika 6.44.) pri starosti betona od godinu dana. Prema poznatom postupku uzorak se stavi u aparat i optereti silom od 300 N. Po putanji uzorka se pospe 20 g brusnog praha - elektrokorunda. Na svaka 22 okretaja brusni prah se zameni novim. Na svakih 110 okretaja uzorak se rotira oko svoje vertikalne ose za 90° i tako se haba ravnomerno u svim pravcima, ukupno 440 okretaja. U tabeli 6.36. prikazane su srednje vrednosti habanja brušenjem za svaku eksperimentalnu seriju, dok su pojedinačni rezultati dati u Prilogu 19. Habanje brušenjem je izračunavano prema sledećoj formuli:

$$H_{B,i} = \frac{\Delta m_{440}}{\gamma} \cdot \frac{P}{50} \quad [cm^3/50cm^2] \quad (23)$$

gde je:

Δm_{440} - ukupan gubitak mase uzorka posle 440 okretaja brusne ploče u g;

γ - zapreminska masa uzorka u g/cm³;

P - stvarna površina uzorka izložena habanju u cm²;

$H_{B,i}$ - habanje brušenjem po Bemeu u cm³/50cm²

Tabela 6.36. - Rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem

Betonska serija	Srednja vrednost ukupnog gubitka mase Δm_{440} [g]	Srednja vrednost habanja brušenjem $H_{B,sr}$ [cm ³ /50cm ²]
E	16,56	7,45
WG5	16,90	7,45
WG10	16,08	7,30
WG15	16,24	7,37
WG20	16,56	7,46
WG35	17,60	8,01
WGD5	17,04	7,67
WGD10	17,26	7,80

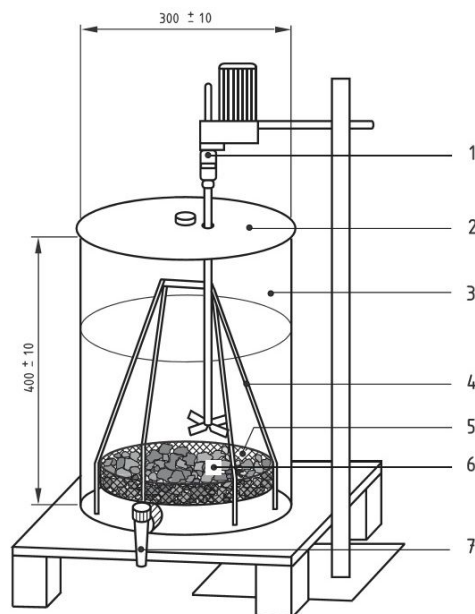


Slika 6.44. - Bemeova mašina za ispitivanje habanja brušenjem

6.12.6. Ispitivanje izluživanja betona - "Leaching test"

U cilju utvrđivanja uticaja betona sa dodatkom CRT stakla na životnu sredinu sproveden je test izluživanja (*Leaching test*). Ovim testom se ispituje uticaj potencijalno štetnih hemijskih jedinjenja prisutnih u betonu na kvalitet podzemnih voda i utvrđuje da li postoji potencijalna opasnost po čovekovo zdravlje. U uvodnim poglavljima je već bilo reči o tome da glavne komponente CRT ekrana u izvesnoj meri imaju problematičan hemijski sastav i stoga, može postojati opasnost da beton koji u sastavu ima ovakvo staklo, može biti opasan po životnu sredinu. Eluat se definiše kao rastvor, u ovom slučaju rastvor betona, dobijen posle procesa izluživanja. Eluati za svaku eksperimentalnu betonsku seriju su dobijeni prema standardu SRPS EN 1744-3:2007 [99]. Šematski prikaz aparature za ovo ispitivanje prikazan je na slici 6.45. Aparaturu čine sledeći elementi:

1. Motor koji pokreće propeler;
2. Poklopac;
3. Stakleni sud odgovarajuće zapremine;
4. Ram koji omogućava da unutrašnji sud sa uzorkom bude izdignut od dna staklenog suda;
5. Unutrašnji sud rešetkastog tipa sa otvorom okaca 2 mm;
6. Uzorak betona;
7. Slavina za izvlačenje eluata;



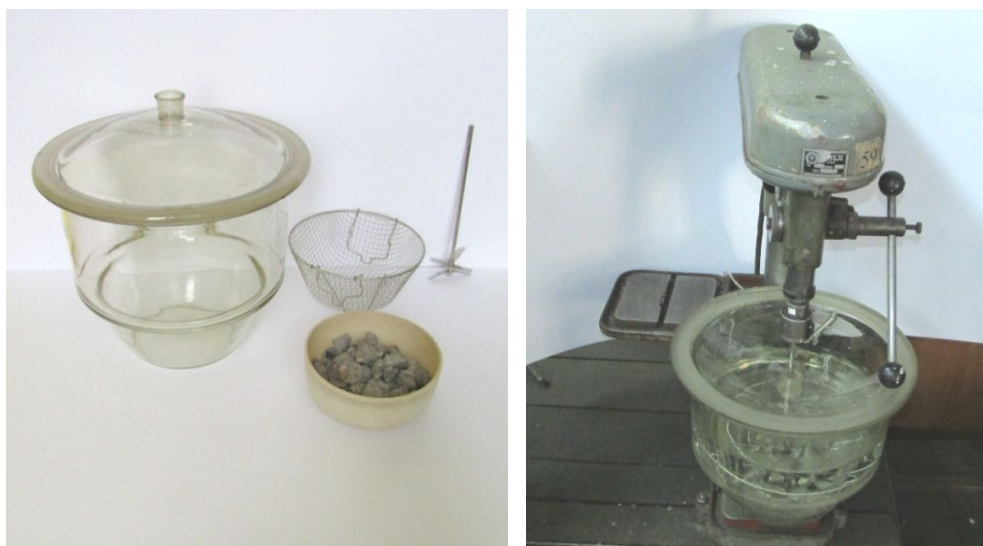
Slika 6.45. - Šematski prikaz aparature za ekstrahovanje eluata [99]

Tabela 6.37. - Vrednosti elektroprovodljivosti i pH vrednosti eksperimentalnih eluata

Eluat	Elektroprovodljivost [μS]	pH vrednost
Dejonizovana voda	0	7,00
E	2048	11,81
WG5	1910	11,95
WG10	1815	12,05
WG15	1840	12,00
WG20	1786	11,99
WG35	1497	11,59
WGD5	1836	11,89
WGD10	1790	12,01

Betonski uzorci oblika kocke, na kojima je prethodno sprovedeno ispitivanje pull - off metodom, su drobljeni do veličine zrna 16/31,5 mm. Od zrna te krupnoće formiran je uzorak mase 1000 g koji je korišćen u daljem ispitivanju. Uzorak je zatim postavljen u rešetkasti unutrašnji sud, nakon čega je sipana dejonizovana voda čija je pH vrednost 7. Odnos mase uzorka i dejonizovane vode je, u skladu sa standardom, iznosio 1:10. Motor treba da pokreće propeler brzinom od 500 ± 20 okretaja u minuti. Na slici 6.46. prikazana je aparatura za ispitivanje (*posuda se malo razlikuje po dimenzijama od standardne*), uzorak i sam proces stvaranja eluata. Provera broja okretaja osovine motora izvršena je digitalnim tahometrom "DT-2234C+". Opstrujavanje vode oko uzorka betona je trajalo $24h \pm 10$ min.

Odmah po završetku ovog postupka izmerena je pH vrednost pH metrom "Lutron PH-220S" i elektroprovodljivost dobijenog eluata pomoću "Hanna Instruments HI98303 DiST 3", tabela 6.37. Koncentracija metala u eluatu određena je ICP optičkim emisionim spektrometrom serije "iCAP 6000". Hemijski sastav koncentrovanog CRT stakla i hemijski sastav eluata utvrđeni su u Laboratoriji za Opštu i neorgansku hemiju Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu. Rezultati su prikazani u tabelama 6.38. i 6.39.



Slika 6.46. - Izgled posude i uzorka za ispitivanje izluživanja (levo); Proces dobijanja eluata (desno)

Tabela 6.38. - Sadržaj metala u koncentrovanom CRT staklu

Metal	Sadržaj [mg/kg]	Maksimalna dozvoljena koncentracija	Metal	Sadržaj [mg/kg]	Maksimalna dozvoljena koncentracija
Al	222,8	200 ²	Li	5,663	50 ^{*2}
As	1,232	25 ^{*1}	Mg	1,923	- ^{*3}
B	346,1	500 ^{*2}	Mn	0,3595	400 ^{*2}
Ba	4,555	160 ^{*2}	Mo	1,743	50 ^{*2}
Be	17,00	10 ^{*2}	Na	245,5	- ^{*3}
Ca	33,20	- ^{*3}	Ni	6,790	50 ^{*1}
Cd	0,0161	3 ^{*1}	P	1,161	- ^{*3}
Co	0,1604	9 ^{*2}	Pb	26,89	100 ^{*1}
Cr	0,0942	100 ^{*1}	Sb	512,9	150 ^{*2}
Cu	0,1624	100 ^{*1}	Si	3278	- ^{*3}
Fe	22,26	1000 ^{*2}	Sn	0,1836	900 ^{*2}
Hg	Nema	2 ^{*1}	Sr	48,15	- ^{*3}
K	82,30	- ^{*3}	Zn	14,85	300 ^{*1}

*1 - Pravilnik o dozv. količ. opasnih i štetnih materija [145]; *2 USEPA pravilnik; *3*Nije propisana MDK

Tabela 6.39. - Sadržaj potencijalno štetnih metala u betonskim eluatima

Betonski eluat/ metalni oksidi	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ba	Pb	Hg
	[mg/kg]									
E	<0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	<0,01	0,33	0,02	n.d.*
WG5	0,06	0,05	0,01	0,02	0,02	0,10	<0,01	0,09	0,04	n.d.*
WG10	0,08	0,01	0,02	0,02	0,04	0,13	0,01	0,10	0,06	n.d.*
WG15	0,01	0,02	0,04	0,01	0,05	0,15	0,01	0,10	0,08	n.d.*
WG20	0,01	0,02	0,03	0,06	0,06	0,18	0,02	0,13	0,11	n.d.*
WG35	0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,01	0,01	<0,01	0,13	0,12	n.d.*
WGD5	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,23	0,02	n.d.*
WGD10	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,09	<0,01	0,12	0,02	n.d.*

*) nije detektovano

6.12.7. Ispitivanje radioaktivnosti

U cilju potvrde mogućnosti upotrebe nekog "novog" materijala u građevinarstvu jedno od važnih ispitivanje jeste i provera radioaktivnost samog materijala. Referentni nivo za spoljašnje ozračavanje u zatvorenom prostoru koje potiče od prirodnih gama emitera iz građevinskih materijala, ne uključujući spoljašnje ozračavanje na otvorenom prostoru, je $E = 1 \text{ mSv}$ godišnje, gde je E efektivna doza. Sivert je naziv jedinice za efektivnu dozu, pri čemu važi sledeća relacija: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$. Referentni nivo definisan je od strane Evropske komisije u publikaciji [126]. Referentni nivo za našu zemlju propisala je Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije u Pravilniku o granicama sadržaja radionuklida za vodu za piće, različite prehrambene namirnice, građevinske materijale i drugu robu [127]. Pre dobijanja dozvole za upotrebu u građevinarstvu za predmetni materijal treba odrediti sadržaj radionuklida na osnovu priloga II pomenutog Pravilnika. U građevinskim materijalima određuje se sadržaj sledećih prirodnih radionuklida: Ra - 226, Th - 232 (ili Ra - 228) i K - 40. Na osnovu dobijenih vrednosti izračunava se gama indeks I prema jednačini:

$$I = \frac{C_{Ra226}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th232}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{K40}}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (24)$$

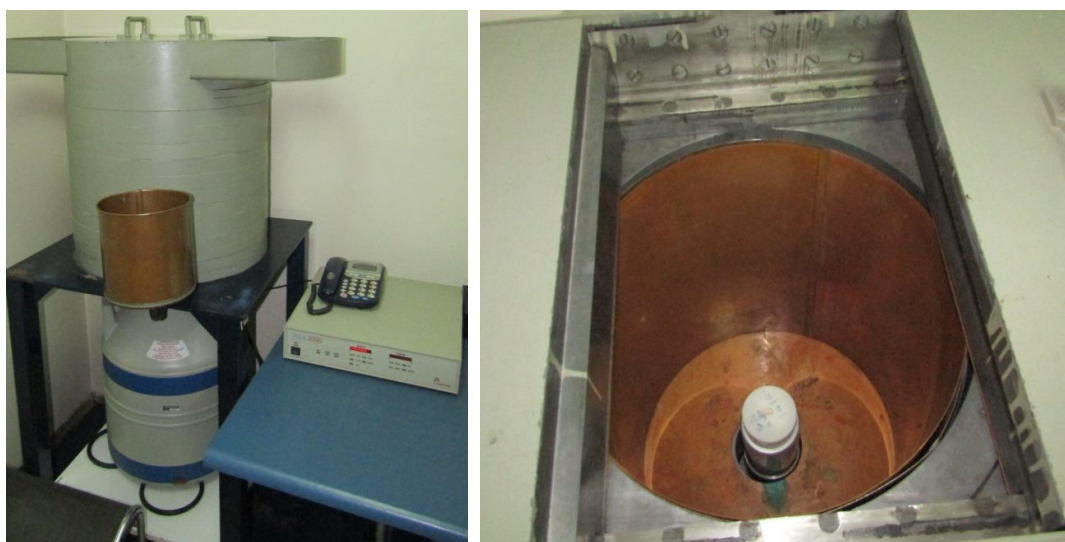
gde je:

C_{Ra226} - koncentracija radijuma (^{226}Ra) u Bq/kg ;

C_{Th232} - koncentracija torijuma (^{232}Th) u Bq/kg ;

C_{K40} - koncentracija kalijuma (^{40}K) u Bq/kg .

Gama indeks izveden je na osnovu kriterijuma za efektivnu dozu, $E < 1 \text{ mSv}$, i koncentracije aktivnosti u različitim materijalima [126]. Za primenu u građevinarstvu, gama indeks treba da bude < 1 . Ispitivanje radioaktivnosti sprovedeno je na sledećim uzorcima: čisto CRT staklo, etalon beton i beton sa najvećim udelom katodnog stakla u mešavini - WG35. Uzorci su samleveni tako da bez ostatka prođu kroz sito otvora 1 mm i kao takvi su korišćeni u predmetnom ispitivanju. Samo ispitivanje radioaktivnosti sprovedeno je u Odeljenju za zaštitu od zračenja Zavoda za zdravstvenu zaštitu radnika "Niš". Gamaspektrometrijska analiza izvršena je pomoću "HPGe gamaspektrometra Canberra DSA - 2000" (slika 6.47.). Uzorak se postavlja u posudu zapemine 100 ml. Veoma je važno precizno izmeriti masu uzorka pre ispitivanja kako bi nakon merenja bilo moguće preračunati prisustvo radionuklida u Bq po 1 kg. Bekerel se definiše kao aktivnost količine radioaktivnog materijala, pri čemu važi relacija da jedan Bekerel odgovara jednom raspadu u sekundi: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Takođe, s obzirom da je potrebno različito vreme za poluraspad različitih atomskih jezgara poželjno je da se ispitivanje radi više sati kako bi se svi poluraspadi detektovali. Korišćeni spektrometar sadrži hiper čisti germanijumski poluprovodnički detektor i u potpunosti je digitalizovan tako da se izmerene vrednosti gama zračenja generišu i prikazuju pomoću softvera "Genie 2000" na računaru [128]. Kompletan postupak ispitivanja propisala je Međunarodna agencija za atomsku enegiju (*International Atomic Energy Agency*) standardom IAEA TRS 295:1989 [129]. Rezultat je spektar gama zračenja kao i kompletan izveštaj sa koncentracijama prisutnih izotopa u posmatranom materijalu. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.40.



Slika 6.47. - Izgled aparature gamaspektrometra spolja (levo) i unutra (desno)

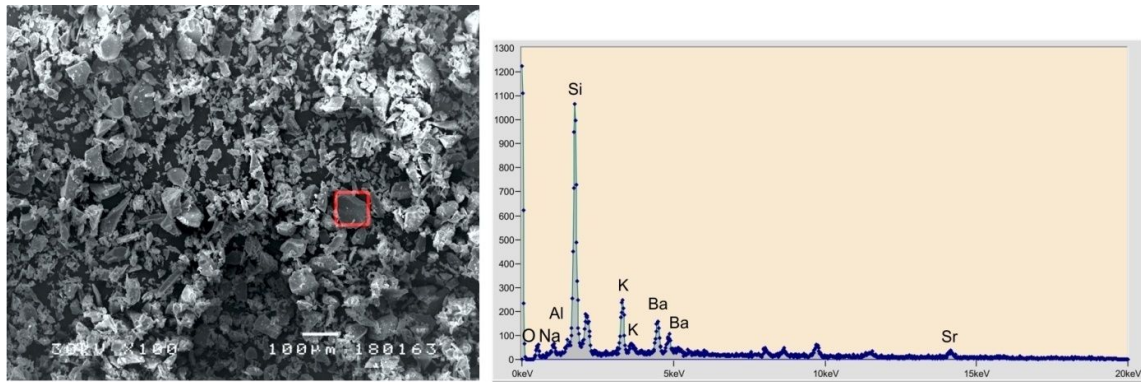
Tabela 6.40. - Koncentracije aktivnosti radionuklida

Materijal	Koncentracije aktivnosti radionuklida			Gama indeks
	C_{Ra226}	C_{Th232}	C_{K40}	I
	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	-
CRT staklo (čisto)	54 ± 3	29 ± 3	1652 ± 86	0,876
Etalon beton (bez CRT-a)	21 ± 2	19 ± 2	389 ± 33	0,295
Beton WG35	25 ± 2	21 ± 2	512 ± 43	0,359

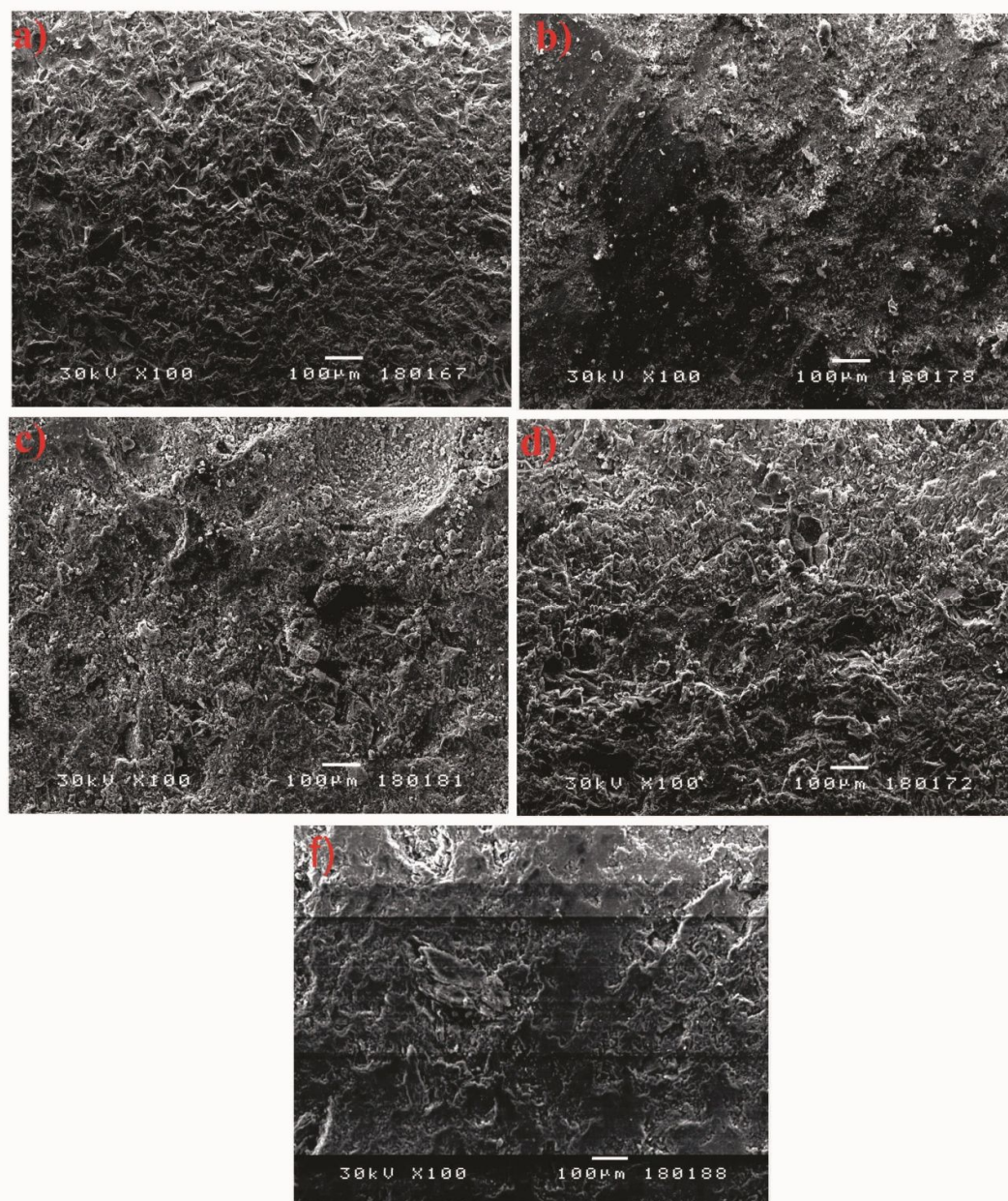
6.13. SEM i EDS analiza betona

U cilju dobijanja uvida u mikrostrukturu betona urađena je SEM (*Scanning Electron Microscopy*) i EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) analiza. Pomenute analize su urađene u Laboratoriji za elektronsku mikroskopiju u okviru Medicinskog fakulteta u Nišu. Posmatrani su i analizirani uzorci koji su reprezentovali betonske serije: etalon, WG15, WG20, WG35 i WGD10. Starost uzoraka prilikom analize mikrostrukture je iznosila 90 dana. U nastavku su prikazani karakteristični snimci dobijeni SEM mikroskopom, kao i karakteristični EDS spektri. SEM i EDS analize su urađene i na samom staklenom prahu koji je korišćen u eksperimentu. U nastavku su prikazane samo odabrane slike SEM analize i EDS spektri, dok su u Prilogu 20 predstavljeni i svi ostali rezultati SEM analize.

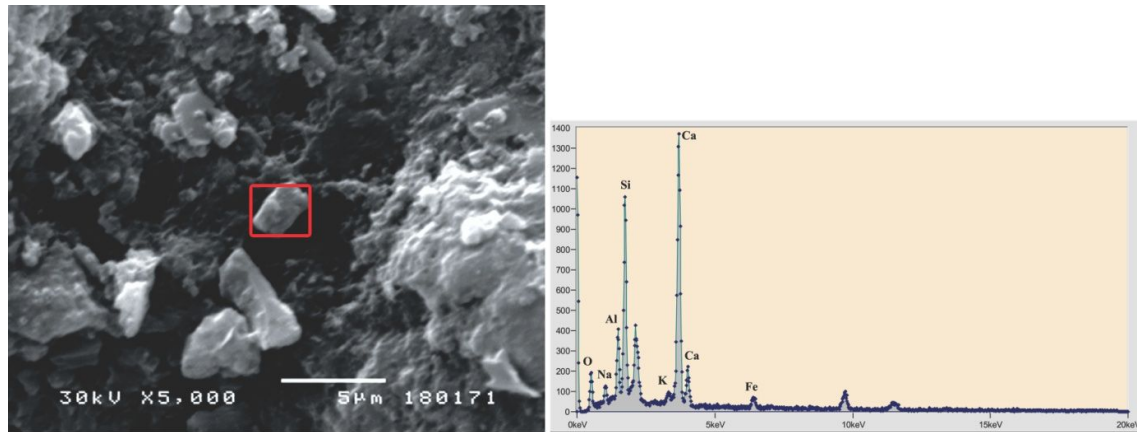
Na slici 6.48., levo prikazan je izgled zrna sprasenog CRT stakla sa uvećanjem od 200 puta, dok je na slici 6.48., desno prikazan EDS spektar stakla. Izgled površine svih vrsta betonskih uzoraka sa uvećanjem 100 puta prikazan je na slici 6.49. Na slici 6.50. prikazan je mikroskopski snimak etalon betona uvećan 5000 puta (*slika levo*), kao i EDS spektar (*slika desno*). U nastavku, na slici 6.51., levo prikazana je slika uzorka betona WG15 uvećana 500 puta i na tom uzorku urađena su i tri EDS spektra (*slika desno*). Na slikama 6.52. i 6.53. prikazani su mikroskopski snimci uzorka betona WG20 i po dva EDS spektra za svaku sliku. Mikroskopska uvećanja su iznosila 500 puta, odnosno 1500 puta, respektivno. Na slici 6.54., levo prikazan je mikroskopski snimak uzorka betona WG35 sa uvećanjem 2000 puta i odgovarajući EDS spektar. Mikroskopski snimak uzorka WGD10 prikazan je na slici 6.55., levo dok su dva EDS spektra prikazana na slici 6.55., desno.



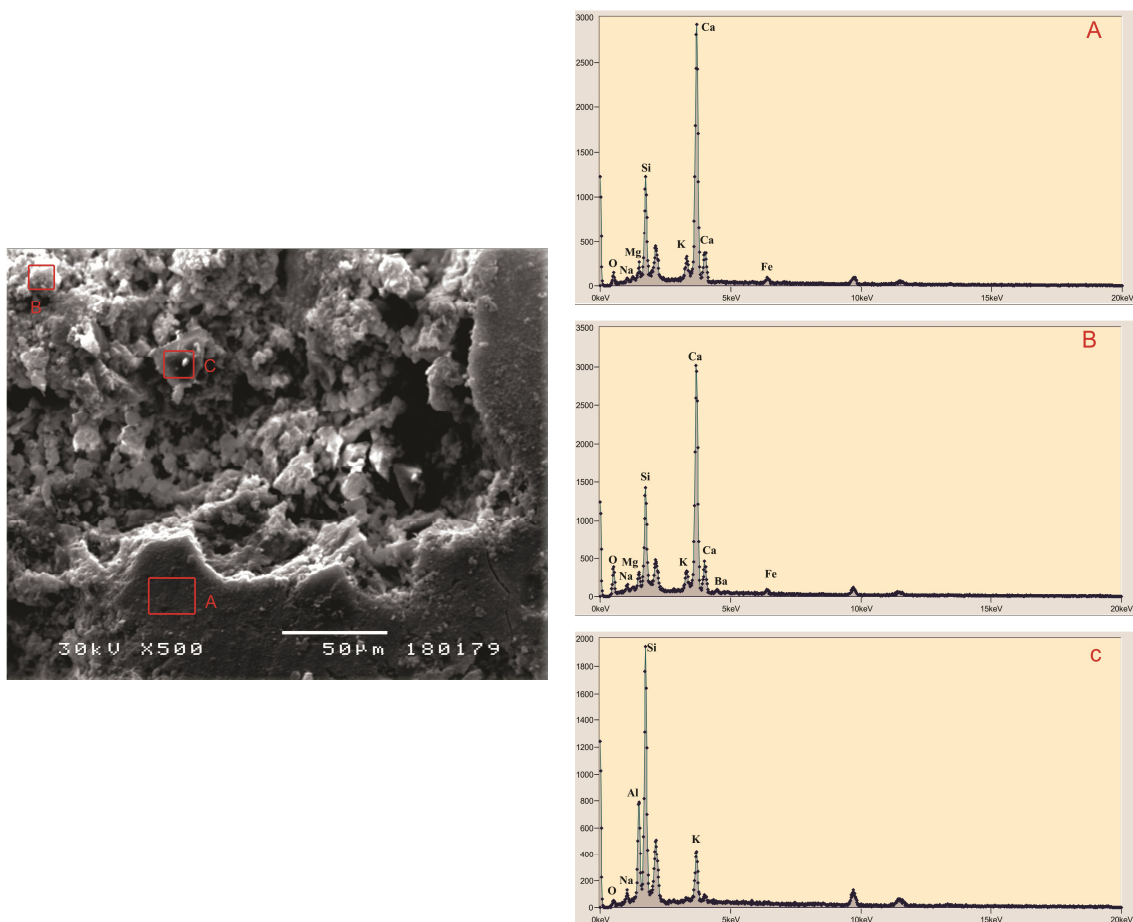
Slika 6.48. - SEM analiza (levo) i EDS spektroskopija katodnog stakla (desno)



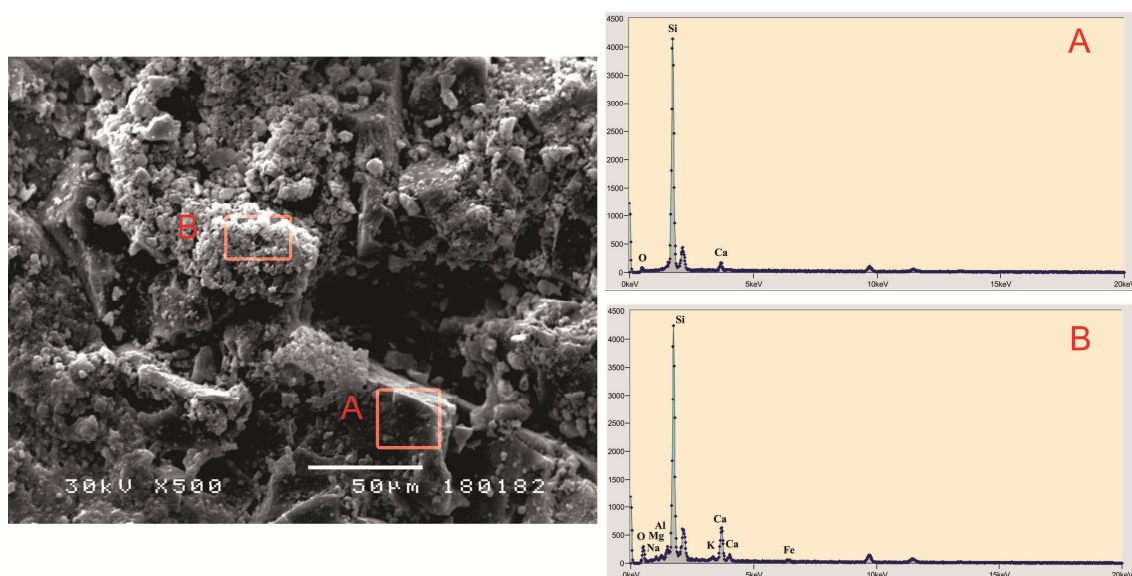
Slika 6.49. - SEM analiza betona -(a) Etalon; (b) WG15; (c) WG20; (d) WG35; (e) WGD10



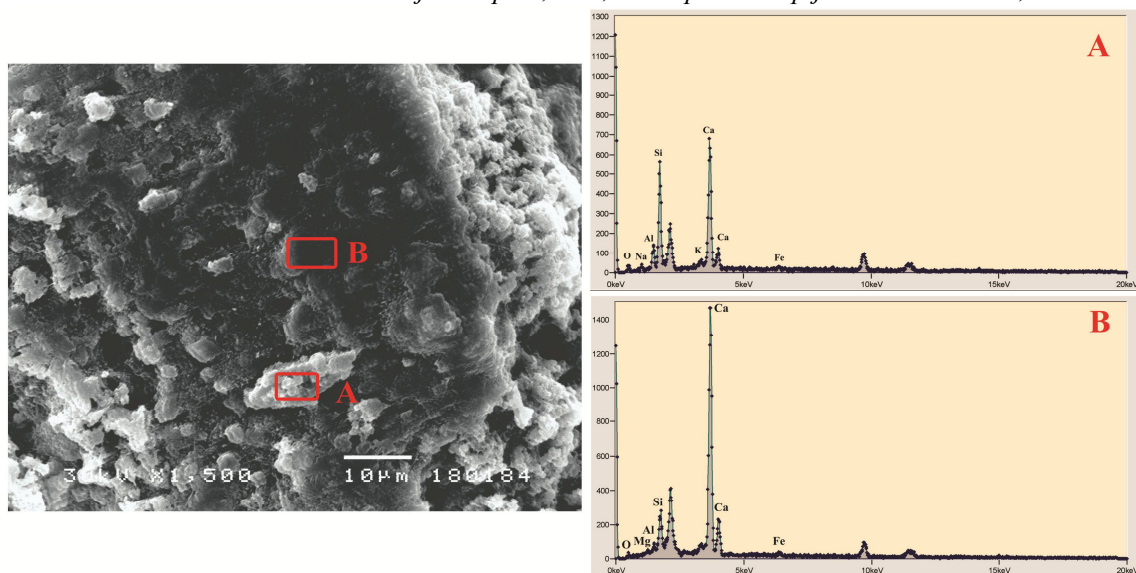
Slika 6.50. - Etalon beton uvećanje 5000 puta (levo); EDS spektroskopija (desno)



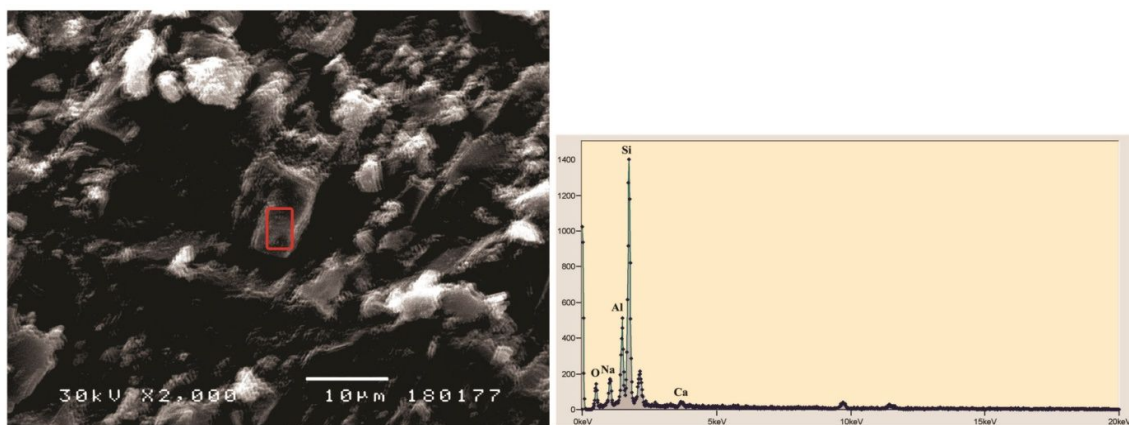
Slika 6.51. - Beton WG15 uvećanje 500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A, B i C



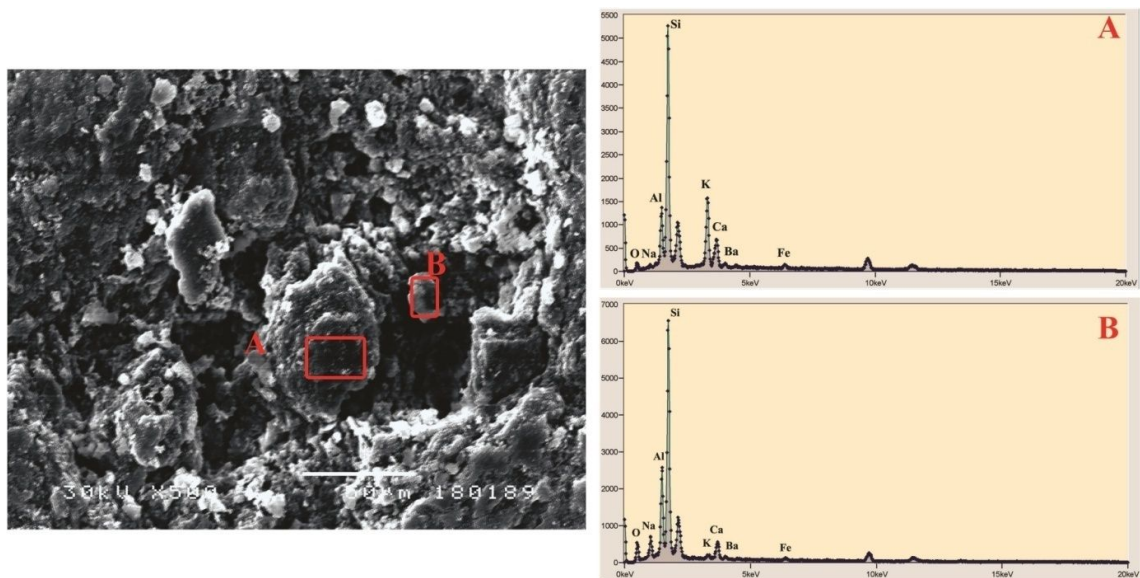
Slika 6.52. - Beton WG20 uvećanje 500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno



Slika 6.53. - Beton WG20 uvećanje 1500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno



Slika 6.54. - Beton WG35 uvećanje 2000 puta (levo); EDS spektroskopija (desno)



Slika 6.55. - Beton WGD10 uvećanje 500 puta (levo); EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno

7. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

7.1. Pucolanska aktivnost stakla

Jedan od limitirajućih faktora prilikom upotrebe alternativnih recikliranih materijala koji imaju pucolanska svojstva, u proizvodnji maltera i betona, jeste niža reaktivnost ovih materijala u odnosu na cement. Mnogi autori koriste različite metode kako bi povećali reaktivnost recikliranog materijala. Na primer, Shi i saradnici [130] koriste različite soli kako bi izazvali hemijsku aktivaciju prirodnih pucolana. U radu [131] autori upoređuju različite metode za aktiviranje pucolana, među kojima su i mehaničke i termičke metode, kako bi pospešili pucolansku aktivnost prirodnih pucolana. Oni zaključuju da je kod prirodnih pucolana najefikasnija hemijska aktivacija. U tabeli 7.1. dat je uporedni hemijski sastav katodnog stakla i cementa korišćenih u ovoj doktorskoj disertaciji, kao i hemijski sastav nekih drugih pucolana koji su bili predmet istraživanja više autora.

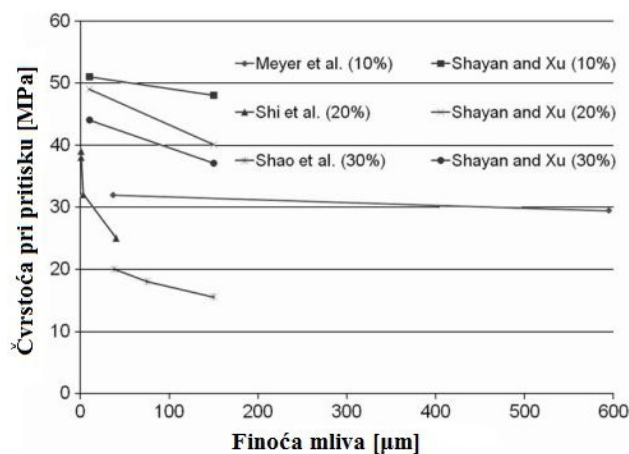
Tabela 7.1. - Uporedni hemijski sastav eksperimentalnog CRT stakla, cementa i drugih pucolana

Oksidi- učešće	CRT staklo	Vulkanski pepeo [130]	Vulkanski plovuće [130]	Zgura [132]	Slikatna prašina [133]	Leteći pepeo [119]	Cement CEM I 52,5R
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
SiO ₂	60,61	73,68	65,74	35	90,9	50	19,3
Al ₂ O ₃	2,88	12,25	16,72	12	1,12	28	4,28
Fe ₂ O ₃	0,58	2,2	3,58	1	1,46	10,4	2,87
CaO	1,31	1,13	3,33	40	0,69	3,0	62,8
MgO	0,53	0,23	0,95	-	0,77	2,0	2,20
K ₂ O	6,45	3,95	3,05	-	-	1,6	0,91
Na ₂ O	7,61	3,60	4,48	0,3	-	1,6	0,21
SO ₃	0,09	0,32	0,65	9	0,38	4,3	3,05

Opravdano je očekivati da će se primenom sličnih postupaka, kao i kod ostalih pucolana, poboljšati pucolanska aktivnost stakla. Svojstva koja najviše utiču da se otpadno staklo ponaša kao pucolanski materijal, kao i slučaju drugih recikliranih materijala, jesu: finoća mliva, hemijski sastav i rastvor u porama dostupan za reakciju [25]. Najveći broj autora se u slučaju upotrebe neke vrste recikliranog otpadnog stakla odlučuje za mehaničku

aktivaciju stakla. S tim u vezi Meyer i saradnici [134] zaključuju da staklo finije od 45 μm već postaje pucolanski aktivno. Prva pucolanska aktivnost stakla se može uočiti ako je staklo finije od 300 μm . Shi i saradnici [115] i Schwarz i saradnici [71] u svojim istraživanjima iznose zaključak da staklo može da ima i veću pucolansku aktivnost od letećeg pepela pri nižim procentima zamene cementa i posle nege uzorka od 90 dana.

Pucolanska aktivnost fino samlevenog stakla se ogleda u povećanju čvrstoće pri pritisku cementnog kompozita, što se može videti na slici 7.1. [25]. Čvrstoće su najveće kod uzoraka za čije je spravljanje upotrebljeno staklo finije od 100 μm , a uočeno je i to da se sa povećanjem finoće mliva stakla povećavaju čvrstoće. Rezultati istraživanja su takođe pokazali da zamena cementa fino samlevenim recikliranim staklom do nivoa od 20% doprinosi povećanju mehaničkih čvrstoća [71, 115, 130-131]. Na slici 7.1. se takođe može uočiti da upotreba otpadnog stakla kao zamene/dodatka cementu u konačnom ishodu daje veoma različite rezultate. Još jedna mogućnost provere pucolanske aktivnosti stakla jeste prema odredbama američkog standarda ASTM C 618-15 [135]. Ovaj standard, istina u slučaju prirodnih pucolana, propisuje neophodni minimum od 70% zbirnog učešća $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, kao i maksimalno učešće SO_3 do 4%. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 7.1. može se zaključiti da je staklo veoma blizu minimalnoj zahtevanoj koncentraciji pomenutih oksida, kao i da gotovo ne sadrži SO_3 .



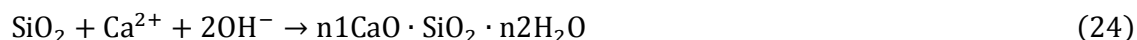
Slika 7.1. - Čvrstoće pri pritisku betona spravljenih sa staklom različite finoće mliva [58, 115, 134, 136]

Prema SRPS B.C1.018:2015 [116] materijal se smatra pucolanski aktivnim i ima najmanju klasu 5 ukoliko je pri starosti od sedam dana minimalna čvrstoća pri zatezanju savijanjem na krečno - pucolanskim prizmicama 2 MPa i čvrstoća pri pritisku 5 MPa. Na osnovu rezultata ispitivanja pucolanske aktivnosti CRT stakla finoće ispod 63 μm na krečnom

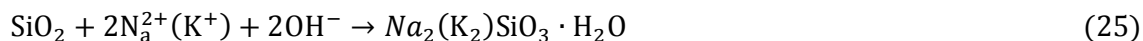
malteru (*tabela 6.10., poglavlje 6.3.*) utvrđeno je da staklo zadovoljava postavljene zahteve iz standarda i da ima klasu 5.

7.1.1. Mehanizam delovanja finog staklenog praha u cementnoj matrici

Upotreba bilo kog recikliranog materijala, čija će uloga u cementnom kompozitu biti da zameni deo cementa, pre svega zavisi od čvrstoće, trajnosti i zapreminske stabilnosti samog reciklata [25]. Buchwald i saradnici [137] zaključuju da u zavisnosti od više faktora, a pre svega od sadržaja $\text{Ca}(\text{OH})_2$, finoće mliva i alkalnosti, rastvoreni SiO_2 reaguje i može stvoriti ekspanzivni ASR gel, hidratizani kalcijumsilikat C-S-H ili kombinaciju oba proizvoda. Kada staklo reaguje kao pucolan, produkt te reakcije će biti veoma sličan hidratisanom kalcijumsilikatu:



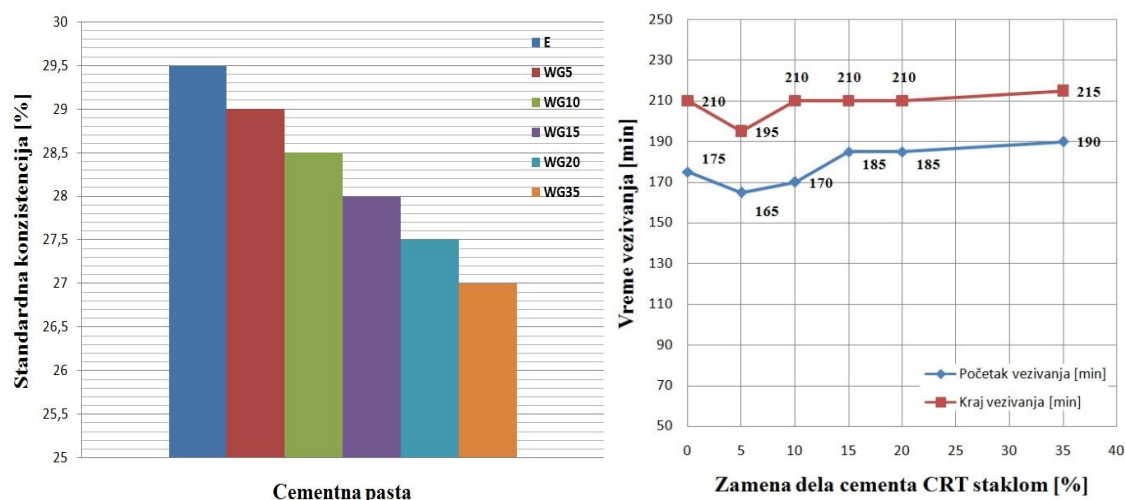
S druge strane, ako je produkt reakcije stakla u cementnoj matrici ASR gel, hemijska jednačina će biti slična, međutim u njoj mogu da sudeluju natrijum i kalijum kao zamena za kalcijum:



Krupnoća zrna stakla značajno utiče na alkalno - silikatnu reaktivnost stakla [67, 136 138-139]. Neka od najnovijih istraživanja ukazuju na to da veličina prslina unutar zrna stakla, nastalih usled procesa drobljenja, određuju ASR reaktivnost [67,138]. Kod većih unutrašnjih prslina lakše dolazi do pojave ASR. S druge strane, veoma sitno samleven stakleni prah ne izaziva alkalno – silikatnu reakciju s obzirom na prisustvo daleko manjeg broja mikroprrslina [67]. U prethodnim istraživanjima prikazanim u poglavlju 5.4. izvršena je provera alkalno - silikatne reaktivnosti CRT stakla samleveno finije od 0,063 mm prema standardu ASTM C227 [63]. Ovim ispitivanjem je utvrđeno da malterska serija sa 35% zamene cementa staklom ima 22,8% manju ekspanziju od etalona. Time je dokazano da veoma fino samleveno katodno staklo ne dovodi do pojave ASR. Imajući upravo u vidu sve napred navedeno, eksperimentalno istraživanje ove doktorske disertacije je usmereno ka upotrebi fino samlevenog stakla kao zamene/dodatka porland cementa. Usitnjavanje katodnog stakla ima dakle dvojaku ulogu - sa jedne strane se mehanički aktivira pucolanska aktivnost samog stakla, dok se sa druge strane sprečava pojava štetne alkalno - silikatne reakcije.

7.2. Cementna pasta sa različitim procentom dodatka CRT-a

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja uticaja zamene dela cementa usitnjenim CRT staklom napravljeno je ukupno šest serija cementnih pasti: E, WG5, WG10, WG15, WG20 i WG35. Rezultati ispitivanja standardne konzistencije, vremena vezivanja i stalnosti zapremine prikazani su u tabeli 6.11. Uticaj zamene cementa CRT staklom na standardnu konzistenciju cementne paste prikazan je na slici 7.2., levo. Nedvosmisleno se može zaključiti da sa povećanjem dodatka stakla u pasti dolazi do smanjenja potrebne količine vode za postizanje standardne konzistencije. Samleveno staklo koristi vodu za kvašenje svoje površine, ali je ne upija, čime se može objasniti ovakav trend. Sa druge strane, nije utvrđen veći uticaj zamene stakla na početak i kraj vezivanja cementne paste (*slika 7.2., desno*).



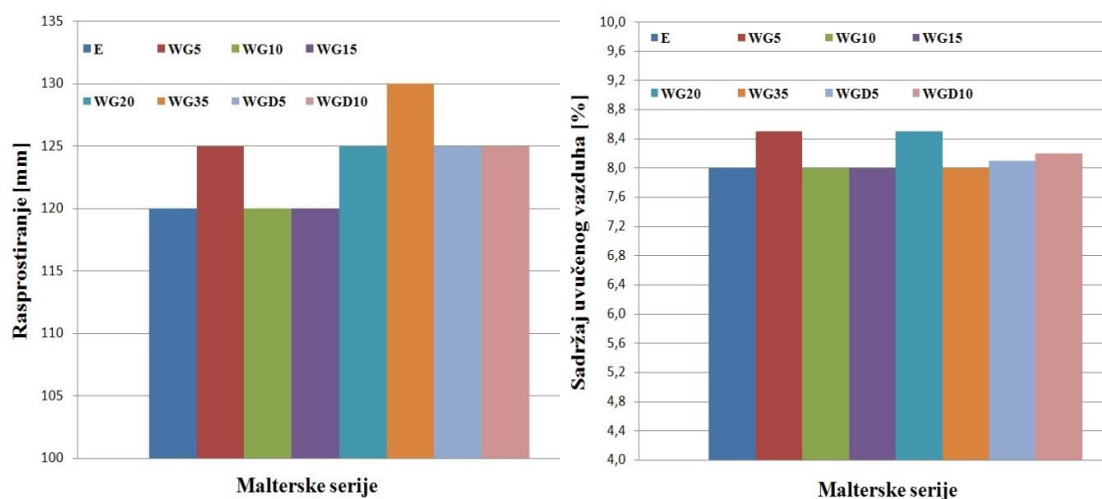
Slika 7.2. - Uticaj zamene dela cementa CRT staklom na standardnu konzistenciju cimente paste (levo); Vreme vezivanja cementne paste u zavisnosti od procenta zamene cementa samlevenim CRT staklom (desno)

Kod svih cementnih pasti početak vezivanja nastupa u proseku nakon 180 minuta, dok kraj vezivanja u proseku nastupa nakon 210 minuta. Sve cementne paste imaju stalnu zapreminu. Her - Yung Wang u radu [40] vršio je zamenu cementa LCD staklom do 50% po masi cementa i sa inkrementom od 10%. Rezultati ispitivanja standardne konzistencije cementne paste iznete u pomenutom radom pokazuju značajno podudaranje sa rezultatima dobijenim u predmetnom eksperimentalnom ispitivanju. U radu [40] izneti su podaci da dolazi do smanjenja potrebne količine vode za postizanje standardne konzistencije, i to od 28,23% za etalon pastu do 25,92% za pastu za 50% zamene cementa. To u proseku iznosi oko 0,7% smanjenja na svakih 10% dodatka stakla. Sličan rezultat u pogledu vremena vezivanja

su dobili Mahsa Kamali i saradnici [140] koji su u eksperimentu koristili samlevenu recikliranu staklenu ambalažu, a najveći procenat zamene cementa iznosio je 20%.

7.3. Malter sa dodatkom CRT stakla u svežem stanju

U cilju ispitivanja uticaja zamene dela cementa recikliranim katodnim staklom na svojstva svežeg i očvrslog maltera napravljeno je osam malterskih mešavina. Procenat zamene, odnosno dodatka CRT stakla cementu, kao i kompletan sastav malterskih mešavina prikazan je u tabeli 6.12. Rezultati ispitivanja konzistencije i sadržaja uvučenog vazduha prikazani su u tabeli 6.13., dok je grafički prikaz rezultata dat na slici 7.3.



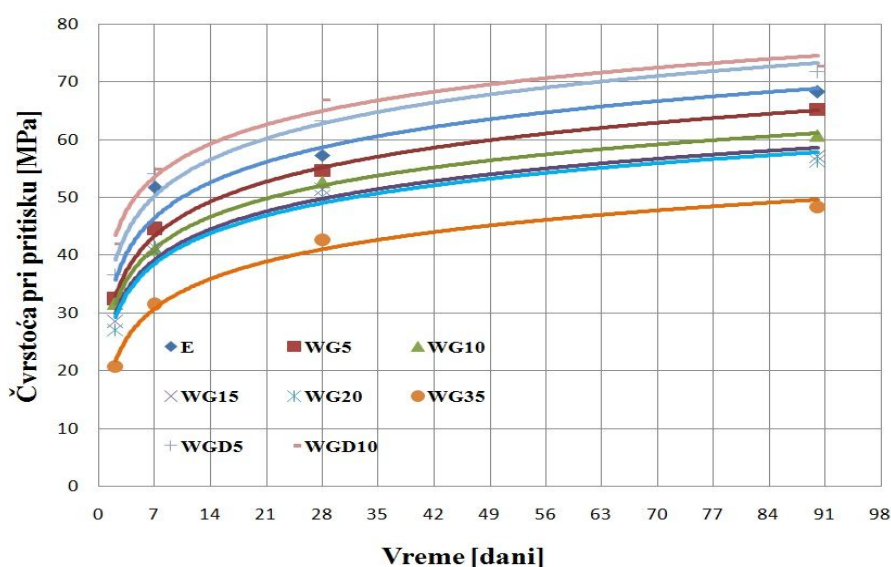
Slika 7.3. - Mera rasprostiranja na potresnom stolu (levo) i sadržaj uvučenog vazduha (desno)

Merenjem rasprostiranja maltera na potresnom stolu utvrđeno je da nema većeg uticaja zamene - dodatka stakla na promenu konzistencije maltera, tako da je prosečna vrednost rasprostiranja iznosila oko 125 mm. Količina uvučenog vazduha je kod svih malterskih serija iznosila oko 8%. Manja promena vrednosti uvučenog vazduha kod serija WG5 i WG20 se ne može smatrati relevantnom i delom se može pripisati i tehničkim karakteristikama aparata porozimetra. Generalno posmatrano, do nivoa zamene do 35% cementa staklom nema veće promene svojstava maltera u svežem stanju. Rezultati ispitivanja konzistencije maltera na potresnom stolu dobijeni u ovom eksperimentalnom ispitivanju u saglasnosti su sa rezultatima prikazanim u radu [37].

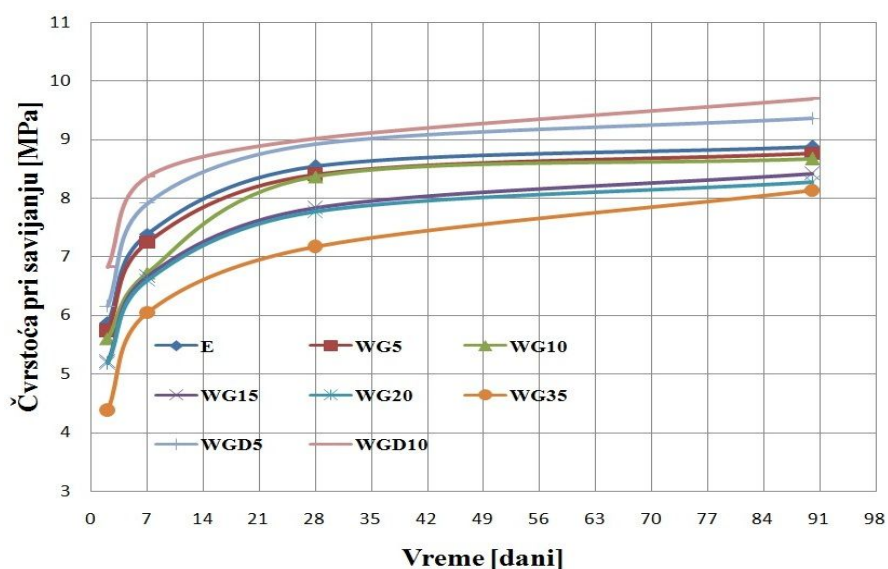
7.4. Malter sa dodatkom CRT stakla u očvrsлом stanju

7.4.1. Čvrstoća pri pritisku i pri savijanju

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju maltera sa različitim dodatkom katodnog stakla dati su poglavlju 6.7.1. Promena čvrstoće pri pritisku malterskih serija u funkciji vremena prikazana je na slici 7.4., dok je promena čvrstoće pri savijanju takođe u funkciji vremena prikazana na slici 7.5. U tabeli 7.2. date su odgovarajuće matematičke funkcije promene čvrstoće pri pritisku i pri savijanju sa odgovarajućim koeficijentima korelacije.



Slika 7.4. - Promena čvrstoće pri pritisku maltera u funkciji vremena



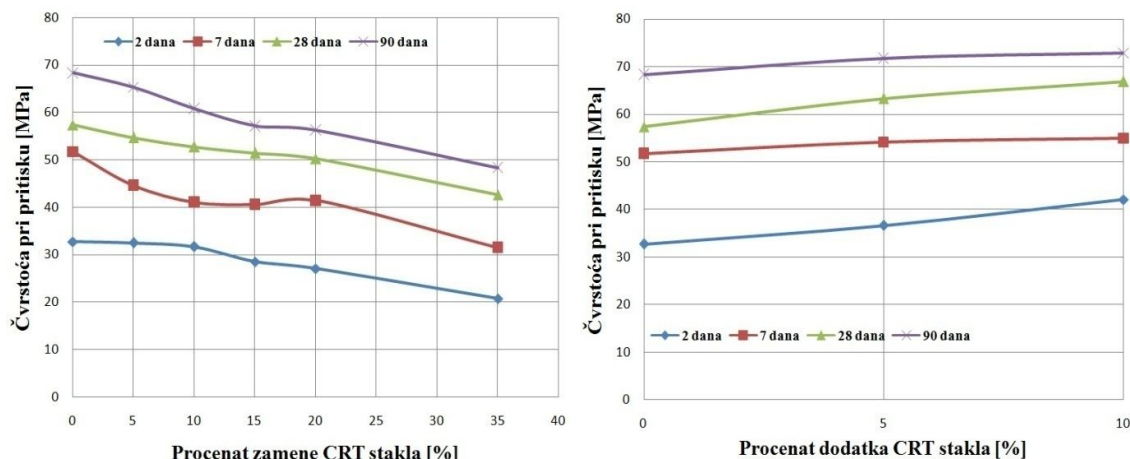
Slika 7.5. - Promena čvrstoće pri savijanju maltera u funkciji vremena

Tabela 7.2. - Matematičke funkcije promene mehaničkih čvrstoća i koeficijenti korelacije

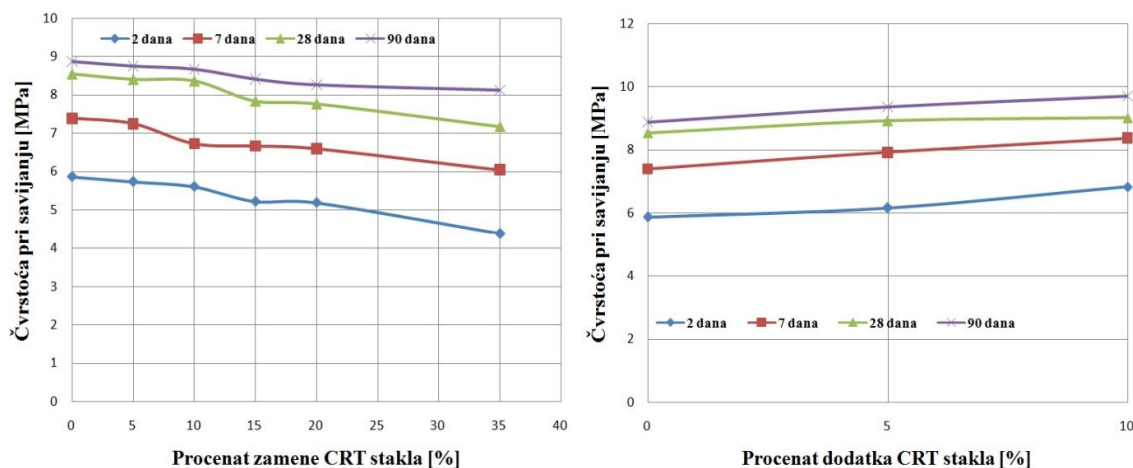
Betonska serija	Funkcija promene čvrstoće pri pritisku maltera i koeficijenti korelacije	Funkcija promene čvrstoće pri savijanju maltera i koeficijenti korelacije
E	$y = 8,748\ln(x) + 29,64$; $R^2 = 0,944$	$y = 0,799\ln(x) + 5,580$; $R^2 = 0,943$
WG5	$y = 8,461\ln(x) + 27,14$; $R^2 = 0,997$	$y = 0,801\ln(x) + 5,442$; $R^2 = 0,946$
WG10	$y = 7,742\ln(x) + 26,33$; $R^2 = 0,998$	$y = 0,852\ln(x) + 5,115$; $R^2 = 0,958$
WG15	$y = 7,572\ln(x) + 24,62$; $R^2 = 0,982$	$y = 0,843\ln(x) + 4,830$; $R^2 = 0,973$
WG20	$y = 7,539\ln(x) + 24,03$; $R^2 = 0,966$	$y = 0,815\ln(x) + 4,823$; $R^2 = 0,968$
WG35	$y = 7,360\ln(x) + 16,57$; $R^2 = 0,988$	$y = 0,966\ln(x) + 3,904$; $R^2 = 0,983$
WGD5	$y = 8,939\ln(x) + 33,07$; $R^2 = 0,966$	$y = 0,829\ln(x) + 5,917$; $R^2 = 0,933$
WGD10	$y = 8,157\ln(x) + 37,83$; $R^2 = 0,981$	$y = 0,721\ln(x) + 6,593$; $R^2 = 0,947$

Na osnovu prikazanih rezultata (slika 7.4.) može se zaključiti da sa povećanjem zamena dela cementa CRT staklom dolazi do smanjenja pritisnih čvrstoća maltera i to pri svim starostima. Statističkom obradom podataka zaključeno je da je smanjenje čvrstoće pri pritisku logaritamska funkcija sa visokim stepenom korelacije (preko 0,94 za sve serije, tabela 7.2.). Najveći pad čvrstoća je prisutan kod serija WG20 i WG35 i to pri ranim ispitivanjima čvrstoća. Na primer, kod serije WG35 čvrstoća pri pritisku je 36,58%, odnosno 39,01% manja u odnosu na etalon seriju pri starosti od 2 i 7 dana. Nakon tog perioda razlika u čvrstoćama etalona i serija sa zamenom cementa staklom nešto je manja. Tako na primer, za pomenutu seriju WG35, pri ispitivanju na 28 i 90 dana, smanjenje čvrstoća iznosi 25,61% i 29,16%, respektivno. U literaturi se ovakav trend zakasnelog povećanja prirasta čvrstoća maltera sa dodatkom stakla u odnosu na etalon malter sa čistim PC objašnjava prirodom procesa pucolanske aktivnosti stakla. Ali Aliabdo i saradnici [35] su proveru pucolanske aktivnosti stakla utvrdili prema standardu ASTM C618 na malteru sa 20% učešća recikliranog stakla. Autori rada zaključuju da staklo, prema propisima navedenog standarda, zadovoljava klacu F i klasu C veštačkih pucolanskih materijala, kao i da stakleni prah u malteru ima i hidraulički uticaj pored pucolanskog. Autori rada [52] dolaze do zaključka da se pucolanska reakcija stakla odigrava kasnije u odnosu na proces hidratacije cementa, tako da je za nju neophodna odgovorajuća količina slobodne vode koju mogu da pruže cementni kompoziti sa višim vodovezivnim faktorom. Serije WGD5 i WGD10 su imale veće pritisne čvrstoće od etalon maltera pri svim starostima. Pri najvećoj starosti, serije sa dodatkom 5% i 10% stakla na celokupnu količinu cementa imaju 5,04% i 6,54% veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na etalon, respektivno. Promena pritisne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT-a prikazana je na slici 7.6.

Fino samleveno katodno staklo u znatno manjoj meri utiče na smanjenje čvrstoće pri savijanju maltera. Promena savojne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT-a u malteru prikazana je na slici 7.7. Značajno je napomenuti da je do 15% zamene cementa staklom gotovo neznatan pad čvrstoće pri savijanju maltera pri svim starostima do 90 dana. Najveći pad čvrstoće zabeležen je kod serije WG35, ali i u ovom slučaju to nije značajno smanjenje - svega 8,45% u odnosu na referentni malter. Serije WGD5 i WGD10 imaju 5,41% i 9,23% veće savojne čvrstoće pri najvećoj starosti (90 dana) u odnosu na etalon. Generalno, može se zaključiti da se do nivoa dodatka stakla do 10% uvećavaju mehaničke čvrstoće maltera, dok se sa druge strane zamena PC staklom do 15% skoro ne utiče na smanjenje pritisnih i savojnih čvrstoća. Važno je istaći da su dobijeni rezultati ispitivanja mehaničkih čvrstoća maltera u saglasnosti sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja objavljenim u radovima [37] i [40].



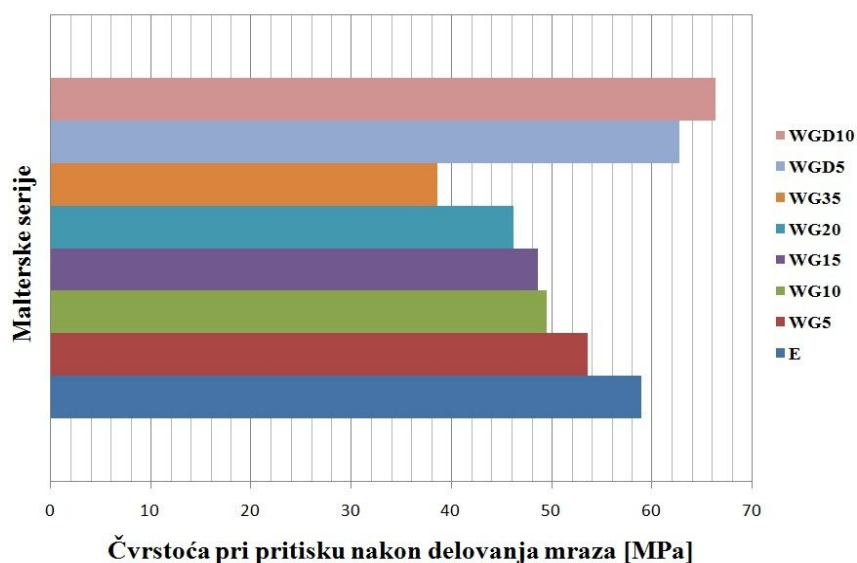
Slika 7.6. - Promena pritisne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT - a



Slika 7.7. - Promena savojne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT - a

7.4.2. Otpornost maltera na dejstvo mraza

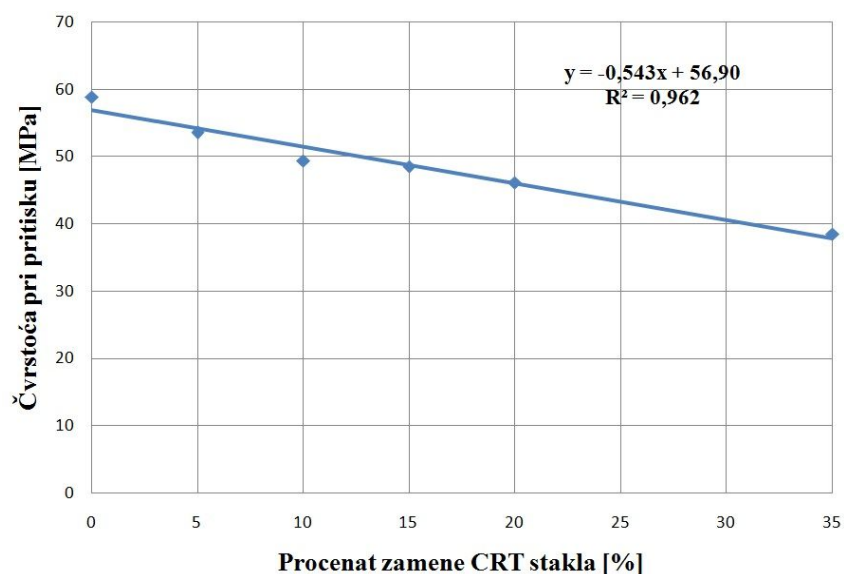
Rezultati ispitivanja otpornosti maltera na delovanje mraza prikazani su u poglavlju 6.7.2., tabela 6.16. Najveći pad čvrstoća pri pritisku posle 25 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja maltera izmeren je kod serija WG20 i WG35 i iznosio je 10,16% i 11,82%, respektivno. Ipak, sve malterske serije se mogu smatrati otpornim u pogledu ove vrste delovanja s obzirom da nije zabeleženo smanjenje pritisne čvrstoće veće od 25%. Kod malterskih serija sa zamenom dela cementa CRT staklom može se zaključiti da se sa povećanjem udela stakla pad čvrstoća u odnosu na etalon takođe povećava, ali kao što je već istaknuto to smanjenje je u dozvoljenim granicama. Serije WGD5 i WGD10 imaju, kao i serija E, neznatno smanjenje pritisne čvrstoće nakon sprovedenog ispitivanja. Na slici 7.8. grafički su prikazane čvrstoće pri pritisku malterskih serija nakon završetka ispitivanja. Promena čvrstoće posle 25 ciklusa delovanja mraza u funkciji procenta zamene PC recikliranim staklom u malteru prikazana je na slici 7.9., gde se vidi da je u pitanju linearna funkcija promene čvrstoće sa visokim stepenom korelacije.



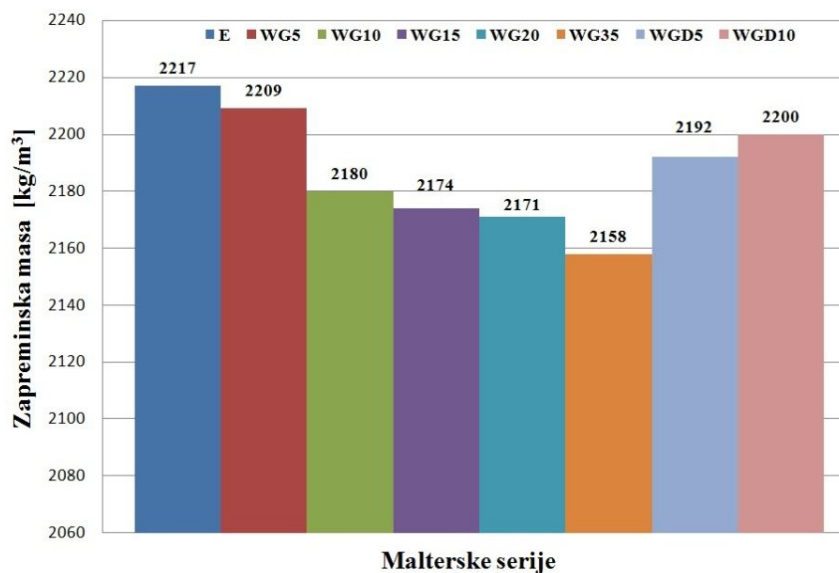
Slika 7.8. - Čvrstoće pri pritisku malterskih serija nakon delovanja mraza

Pre početka ispitivanja otpornosti maltera na delovanje mraza, utvrđena je zapreminska masa očvrslog maltera kod svake eksperimentalne serije (poglavlje 6.7.2., tabela 6.16.). Povećanje procenta zamene cementa CRT staklom uslovljava neznatno smanjenja zapreminske mase (slika 7.10.). Kod serije WG35 smanjenje zapreminske mase iznosi svega 2,66% u odnosu na referentni malter. Serije WGD5 i WGD10 imaju približno istu zapreminsku masu kao i etalon. Ovako mali uticaj dodatka stakla na zapreminsku masu

maltera može se objasniti na sledeći način: specifična masa cementa iznosi $3,15 \text{ g/cm}^3$, a u slučaju stakla je $2,84 \text{ g/cm}^3$. Dakle, s obzirom na količine materijala u 1 m^3 maltera i s obzirom na ne previše izraženu razliku u specifičnim masama cementa i stakla, neznatan uticaj dodatka stakla na promenu zapreminske mase očvrslog maltera je očekivan.



Slika 7.9. - Promena čvrstoće pri pritisku maltera posle 25 ciklusa delovanja mraza u funkciji procenta zamene cementa recikliranim staklom

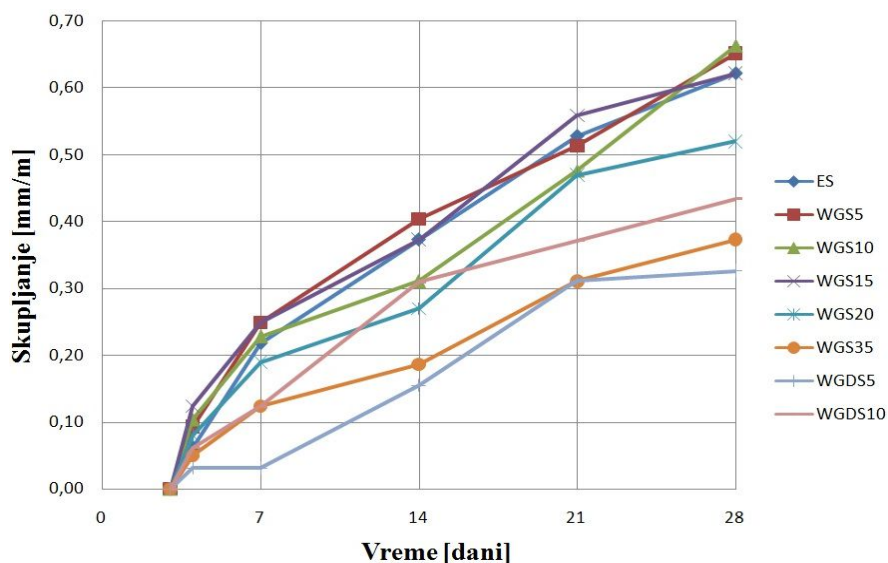


Slika 7.10. - Zapreminska masa maltera u očvrsлом stanju

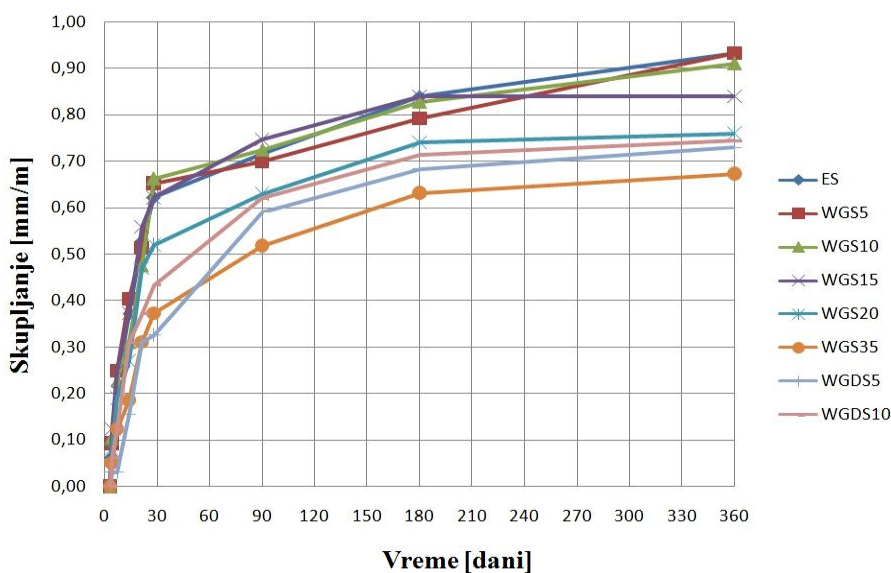
7.4.3. Skupljanje maltera

Rezultati ispitivanja skupljanja maltera usled sušenja na vazduhu prikazani su u poglavlju 6.7.3., tabela 6.17. Promena dužine malterskih prizmi u periodu do 28 dana

prikazana je na slici 7.11. Praćenje skupljanja je produženo do starosti od godinu dana, a rezultati skupljanja u celokupnom periodu ispitivanja prikazani su na slici 7.12.



Slika 7.11. - Skupljanje malterskih serija u periodu do 28 dana



Slika 7.12. - Skupljanje malterskih serija u periodu do 365 dana

U toku prvih 7 dana od momenta spravljanja maltera, kada je skupljanje najintenzivnije, etalon i malteri do 20% zamene cementa CRT staklom imaju veoma ujednačeno skupljanje. Kada govorimo o malterima sa zamenom cementa CRT-om, serija WGS35 u pomenutom periodu ima dva puta manje skupljanje od etalona. Ubedljivo najmanje skupljanje u prvih 7 dana je izmereno kod serije WGDS5 i može se okarakterisati kao jedva primetno, dok serija WGDS10 ima slične rezultate kao i serija WGS35. Pri starosti od 28

dana, serije kod kojih je zamena cementa CRT-om iznosila do 15% dostigle su nivo skupljanja gotovo identičan etalonu, dok serije WGS20 i WGS35 imaju 16,13%, odnosno čak 40,32% manje skupljanje od referentne serije, respektivno. Najmanje skupljanje je i pri ovoj starosti izmereno kod serije WGDS5, svega 0,33 mm/m. Sličan trend u pogledu uticaja stakla na skupljanje maltera se može konstatovati i pri ispitivanjima na 90, 180 i 360 dana. Pri ispitivanju na 360 dana, serije WGS20 i WGS35 imaju najmanje skupljanje, 18,28% i 27,96% manje skupljenje od serije E, respektivno. Serije sa dodatkom stakla imaju, međusobno upoređeno, ujednačeno skupljanje u periodu praćenja skupljanja od godinu dana i pritom je ono oko 20% manje skupljanje od etalona. Dobijeni rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima Her-Yung Wang prikazanim u radu [40]. Wang zaključuje da najmanje skupljanje ima malterska serija sa 20% zamene cementa TFT - LCD staklom, dok se pri zameni većoj od 30% skupljanje takvih maltera približava skupljanju etalona ili je čak i nešto veće od etalona.

Generalno se može zaključiti da sa povećanjem procenta zamene fino samlevenim CRT staklom dolazi do smanjenja skupljanja maltera. Najmanje skupljanje je izmereno kod serije WGS35. Dodatak CRT-a cementu od 5% i 10% smanjuje skupljanje maltera za oko 20%. Na kraju, može se zaključiti da prisustvo CRT stakla u malteru uslovljava manje skupljanje maltera usled sušenja na vazduhu.

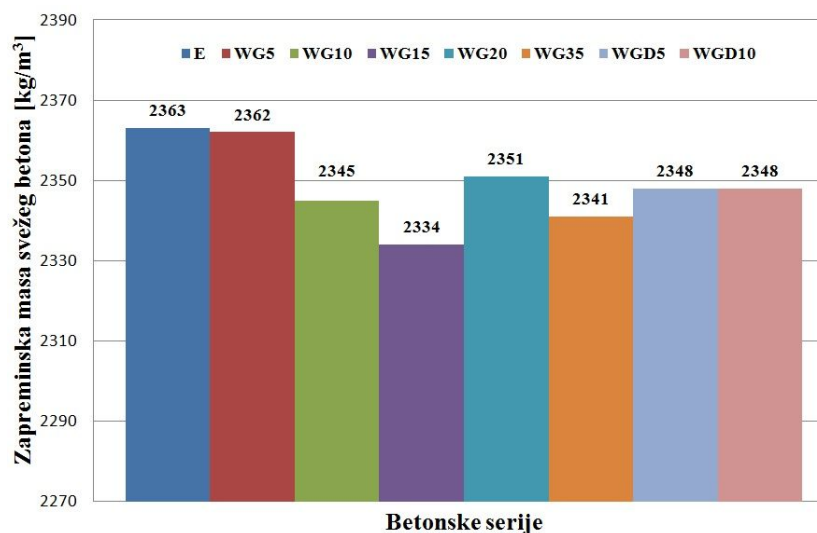
7.4.4. SEM analiza maltera

Za čestice otpadnog stakla je karakteristično da se u malterima ponašaju dvojako: imaju pucolansku reakciju prilikom čega se stvaraju C-S-H jedinjenja (*kod kojih je sadržaj kalcijuma visok a alkalija nizak*) ili nastaje ASR reakcija (*gde je sadržaj alkalija visok a kalcijuma nizak*) [141]. Jedan od načina izbegavanja štetne ASR reakcije je da čestice otpadnog stakla budu sitnije od 300 μm [12]. U poglavlju 6.7.4. prikazane su slike nakon sprovedene SEM analize uzoraka maltera i fino samlevenog stakla. Na slici 6.19.e prikazan je izgled zrna sprasenog CRT stakla sa uvećanjem od 200 puta. Može se primetiti da se veličina čestica stakla kreće u rasponu od nekoliko mikrometara do oko 100 μm . Ova veličina čestica će obezbediti da reakcija bude prvenstveno pucolanska što je povoljno za mehanička svojstva maltera. Tekstura etalon maltera je kompaktna, blago homogena i na pojedinim mestima gotovo ravna (*slika 6.19.a*). U slučaju serije WG20 gubi se kompaktnost texture, ista postaje poroznija i hrapavija sa jasno uočljivim zrcima samlevenog stakla (*slika 6.19.b*). Kod serije sa maksimalnim učešćem stakla WG35, tekstura postaje još hrapavija i dodatno porozna (*slika*

6.19.c). Dodatak samlevenog stakla u količini od 10% u odnosu na masu cementa (*WGD10*), tekstura dobijenog maltera se ne razlikuje mnogo od teksture etalona, pa se može konstatovati da se čestice samlevenog stakla dobro vezuju sa ostalim komponentama maltera pri datim uslovima spravljanja (*slika 6.19.d*).

7.5. Beton sa dodatkom CRT stakla u svežem stanju

Rezultati ispitivanja betona u svežem stanju prikazani su u tabeli 6.19., poglavlje 6.10. Zapreminska masa svežeg betona se praktično ne menja bez obzira na procenat zamene/dodatka CRT - a. Na primer, kod serije sa najvećim učešćem stakla u mešavini - WG35 smanjenje zapreminske mase iznosi nešto manje od 1%. Razlika vrednosti specifičnih masa cementa ($3,15 \text{ g/cm}^3$) i katodnog mlevenog stakla ($2,84 \text{ g/cm}^3$) nije velika tako da uzevši u obzir još i procentualno maseno učešće stakla u 1 m^3 betona, može se objasniti zašto nije došlo do većih promena vrednosti zapreminske mase (*slika 7.13.*).

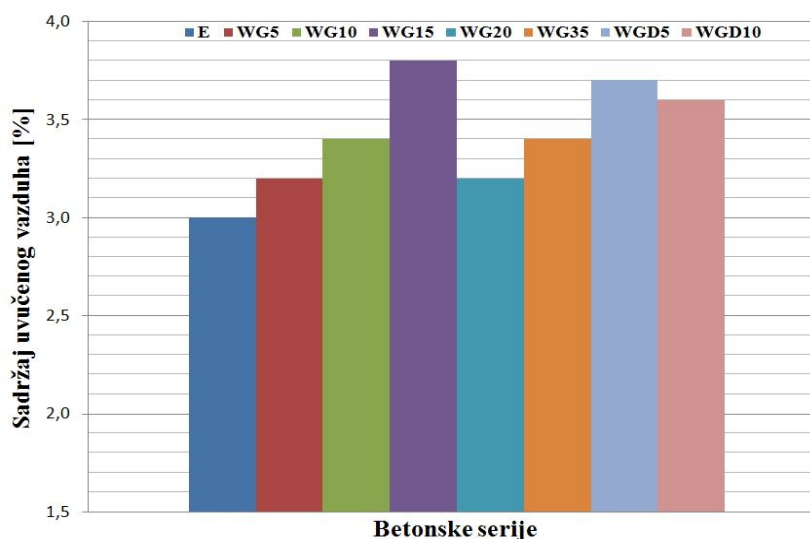


Slika 7.13. - Zapreminska masa svežeg betona

S obzirom da je prilikom projektovanja betonskih mešavina ciljana plastična konzistencija, rezultati ispitivanja sleganja betona nisu grafički prikazani. Sve betonske mešavine imaju meru sleganja od 110 mm do 130 mm što znači da je ostvarena željena konzistencija klase S3. Kod betona sa zamenom cementa CRT-om nije imalo potrebe korigovati količinu aditiva u cilju očuvanja mere sleganja. Međutim, u slučaju serija sa dodatkom katodnog stakla WGD5 i WGD10 bilo je potrebno povećati dozažu aditiva za 0,1%, odnosno 0,2% u odnosu na masu cementa. Serije sa dodatkom CRT-a sadrže više finih

čestica od referentne serije što je zahtevalo veću količinu vode za njihovo kvašenje, pa je korekcija potrebne količine aditiva, u cilju očuvanja konzistencije, bila neophodna.

Sadržaj uvučenog vazduha je bio najmanji kod etalon serije - oko 3% u proseku. S obzirom da je vrednost uvučenog vazduha već u slučaju referentne serije iznad uobičajene vrednosti od 2%, pritom uzimajući u obzir da aditivi tipa aeranta nisu korišćeni, može se pretpostaviti da i sam superplastifikator dovodi do povećanog uvlačenja vazduha u mešavinu. Eksperimentalne serije sa zamenom/dodatkom stakla imaju nešto veći procenat uvučenog vazduha od etalona (*slika 7.14.*). Najveća vrednost uvučenog vazduha od 3,8% izmerena je kod serije WG15. Međutim, sa daljim povećanjem zamene stakla dolazi do ponovnog smanjenja vrednosti uvučenog vazduha tako da je ovom prilikom teško utvrditi jasan uticaj prisustva fino samlevenog katodnog stakla na ovu osobinu svežeg betona.



Slika 7.14. - Sadržaj uvučenog vazduha u svežem betonu

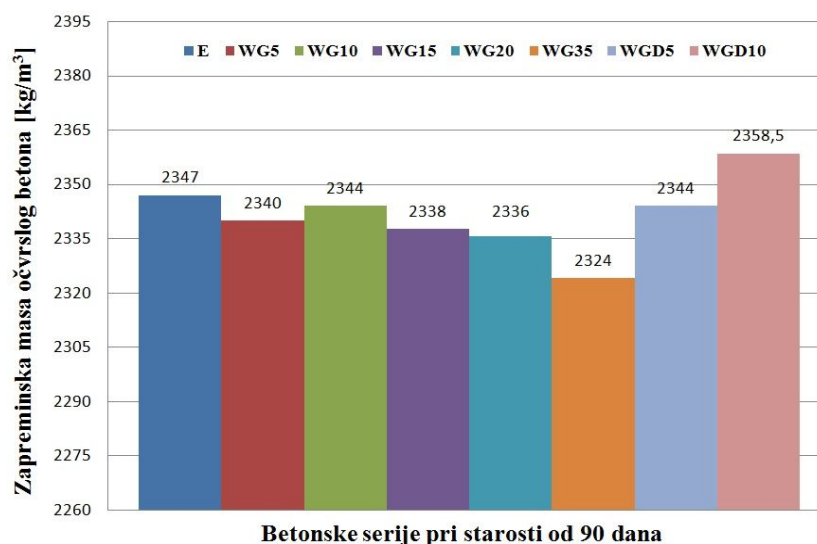
Veoma je teško u literaturi pronaći eksperimente slične sa istraživanjem prikazanim u ovoj disertaciji. Stoga je direktno upoređivanje rezultata ispitivanja svežeg betona sa dodatkom CRT-a sa ispitivanjima drugih autora gotovo nemoguće. Istraživanje koje se može okarakterisati kao nešto najbliže eksperimentu sprovedenom i prikazanom u ovoj disertaciji, objavili su Hyeongi Lee i saradnici [42]. Naime, oni su ispitivali mehanička svojstva i trajnost betona kod koga je 20% cementa zamenjeno dvema vrstama otpadnog stakla - usitnjenom staklenom ambalažom i otpadnim staklenim muljem. Betoni koje su oni spravljali imali su drugačiju konzistenciju (*sleganje 140 mm – 160 mm*) i koristili su aerant (*uvučeni vazduh 4,7% - 6,4%*). Upoređenjem predmetnih betona E i WG20 sa betonima u radu [42] može se zaključiti da su rezultati u delimičnoj saglasnosti. Na primer, eksperimentalni beton WG20 je

takođe imao oko 10 mm veće sleganje od etalona (*u saglasnosti sa radom Hyeongi Lee i saradnika*), dok se rezultati ispitivanja uvučenog vazduha ne mogu porediti. Može se generalno zaključiti da vrsta stakla, način njegovog usitnjavanja, prosečna finoća mliva i naravno vrsta hemijskog dodatka imaju značajan uticaj na svojstva betona u svežem stanju.

7.6. Beton sa dodatkom CRT stakla u očvrslom stanju

7.6.1. Zapreminska masa očvrsllog betona u vodozasićenom stanju

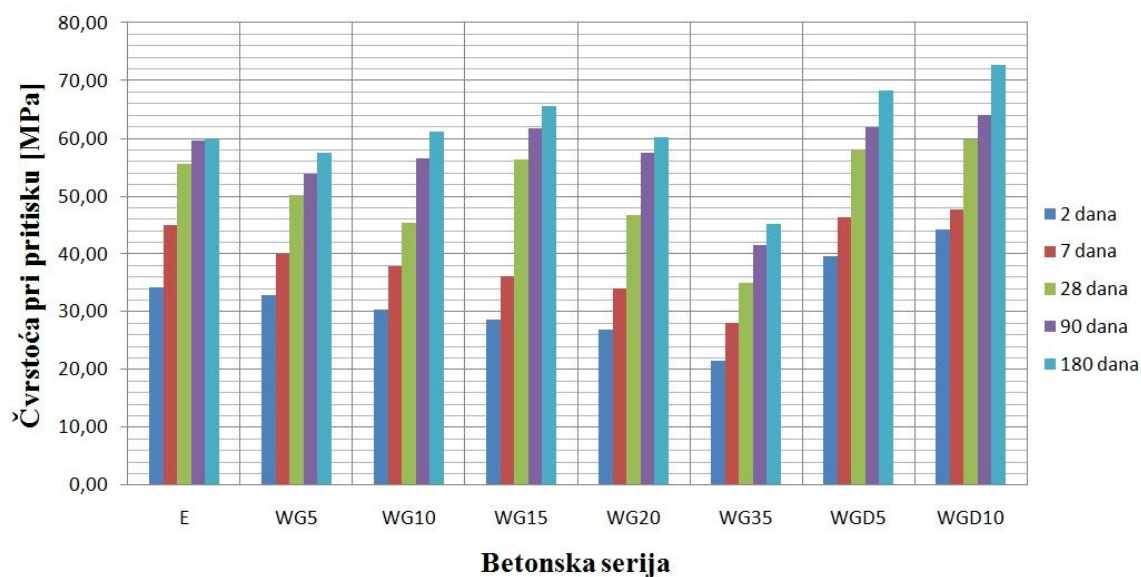
Rezultati ispitivanja zapreminske mase betona u vodozasićenom stanju prikazani su u tabeli 6.20., poglavlje 6.11.1. Zapreminska masa očvrsllog betona je u velikoj meri ujednačena za sve eksperimentalne serije. Sa povećanjem zamene cementa CRT-om dolazi do neznatnog smanjenja zapreminske mase, pri čemu ovo smanjenje u slučaju serije sa najvećim procentom udela stakla ne prelazi 1%. Specifična masa cementa i katodnog mlevenog stakla je, kao što je i ranije već rečeno, prilično slična, tako da se u konačnom može zaključiti da se do nivoa zamene cementa staklom do 35% po masi zapreminska masa očvrsllog betona ne menja više od $\pm 1\%$ (*slika 7.15.*).



Slika 7.15. - Zapreminska masa očvrsllog betona u vodozasićenom stanju pri starosti od 90 dana

7.6.2. Čvrstoća pri pritisku

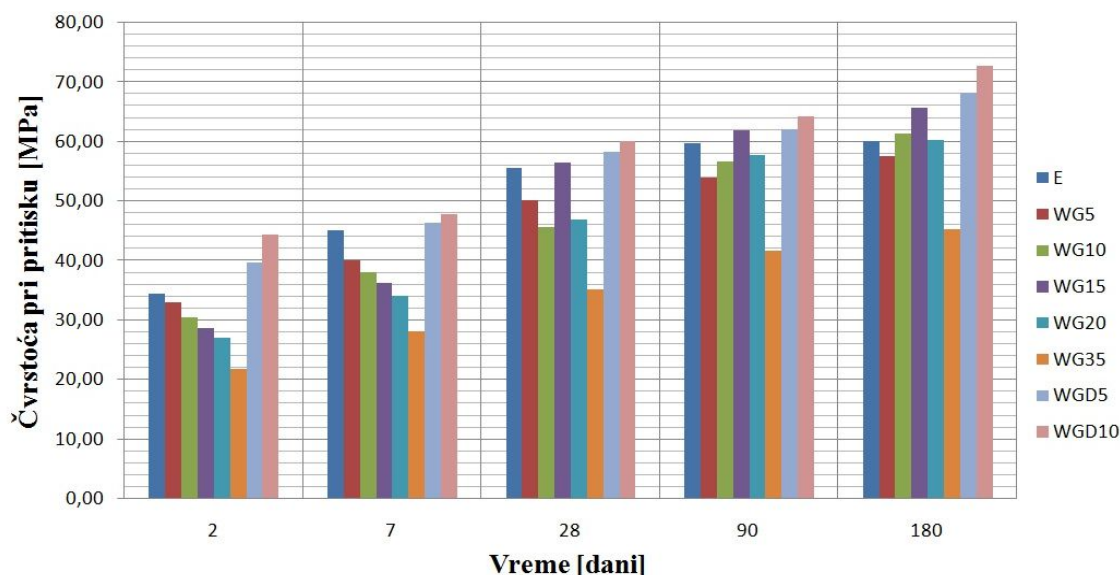
Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku betonskih serija pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana prikazane su u tabeli 6.21., poglavlja 6.11.2. Radi lakše analize rezultata prvo će se analizirati serije sa zamenom dela cementa CRT staklom. Očekivano, sa povećanjem starosti betona, kod ovih serija, dolazi do povećanja čvrstoće pri pritisku (*slika 7.16.*). Pri ranoj starosti betona na 2 i 7 dana, etalon serija ima najveće vrednosti pritisne čvrstoće. Za period ranih starosti (*mlad beton*) bi se preliminarno moglo zaključiti da se sa povećanjem zamene cementa CRT-om smanjuju pritisne čvrstoće betona i da je to smanjenje utoliko veće ukoliko je nivo zamene veći. Na primer, serije WG20 i WG35 pri starosti od 7 dana imaju čak 24,4% odnosno 37,6% manju čvrstoću od referentne serije. Međutim, ispitivanjem čvrstoće pri pritisku na 28 dana prethodno izneti zaključak se mora delimično korigovati. Pri pomenutoj starosti serija WG15 dostiže vrednost čvrstoće pri pritisku etalona dok ostale serije imaju i dalje manje čvrstoće. Pri starosti od 90 dana, serije WG15 ima 3,6% veću pritisnu čvrstoću od etalona, dok su serije WG10 i WG20 značajno smanjile zaostatak za referentnom serijom, tako da su kod ovih serija izmerene čvrstoće manje za svega 5,2% i 3,5%, respektivno. Finalno ispitivanje na 180 dana je pokazalo da najveću čvrstoću pri pritisku ima serija WG15 i to za oko 9,4% više od etalona. Takođe, serije WG10 i WG20 su u potpunosti dostigle pritisne čvrstoće etalona. Serija WG5 ima 4,2% manju čvrstoću od referentne serije, dok je kod serije WG35 zabeležen značajan pad čvrstoće - 24,8% (*slika 7.17.*).



Slika 7.16. - Prirast čvrstoće pri pritisku betonskih serija pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana

Ovakav uticaj zamene dela cementa staklom na promenu čvrstoće pri pritisku u korelaciji je sa rezultatima ispitivanja drugih autora [51-52, 52]. Sadiqul i saradnici [51] su utvrdili da se značajan deo pucolanske reakcije stakla odvija u periodu od 56. do 90. dana i da su u tom periodu betoni spravljani sa 10%, 15% i 20% zamene cementa staklom nadmašile vrednosti čvrstoće etalon serije, dok je serija sa 25% stakla u potpunosti nadomestila prvobitnu razliku. Konačan zaključak autora rada [51] je da je optimalan procenat zamene cementa staklom 20%. Ablam Zidol i saradnici [52] zaključuju da betoni sa višim vodovezivnim faktorom i sa zamenom dela cementa staklom imaju slične vrednosti pritisne čvrstoće sa etalonom nakon 56 i više dana. Takođe, zaključuju da su mehaničke čvrstoće betona sa zamenom 20 i 30% cementa staklom podjednako zadovoljavajuće kao i kod betonskih serija sa drugim mineralnim dodacima [52]. Roz - Ud - Din Nassar i saradnici [54] su konstatovali značajan prirast pritisnih čvrstoća betona sa recikliranim staklom od 14 - og do 56 dana.

Priroda pucolankse reakcije stakla je takva da se ona odigrava kasnije u odnosu na proces hidratacije cementa i da je najintenzivnija posle 28 dana. Time se može objasniti zašto se smanjuje razlika između postignutih vrednosti pritisnih čvrstoća etalon betona i betonskih serija sa zamenom do 20% cementa staklom u eksperimentalnom istraživanju ove doktorske disertacije.



Slika 7.17. - Grafički prikaz postignutih pritisnih čvrstoća betonskih serija u toku vremena

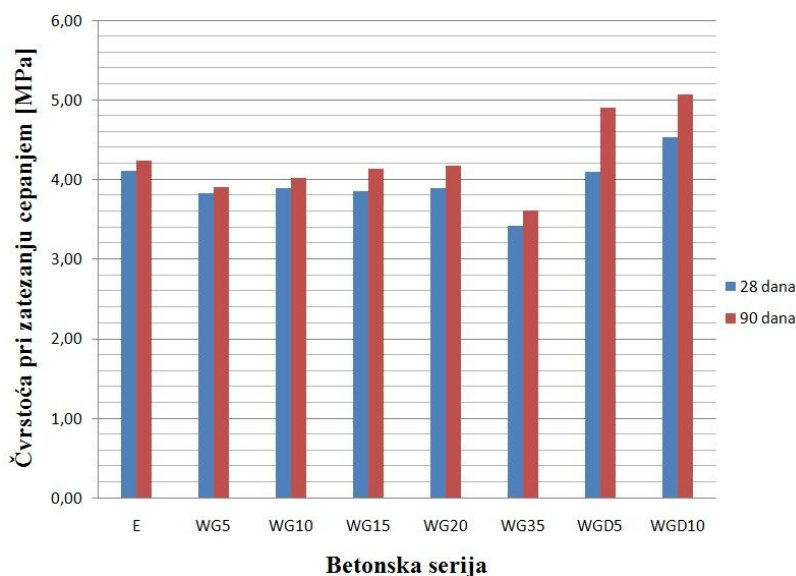
Serije sa dodatkom 5% i 10% CRT-a stakla na celokupnu količinu cementa imaju najveće pritisne čvrstoće pri svim starostima. Može se zaključiti da se sa povećanjem dodatka

stakla do 10% u odnosu na masu cementa povećavaju i pritisne čvrstoće betona. Pri starosti od 180 dana, serije WGD5 i WGD10 imaju 13,5% i 20,9% veće vrednosti pritisne čvrstoće od referentne serije, respektivno. Dobijeni rezultati su u korelaciji sa rezultatima Ali Aliabda i saradnika [35] koji su zaključili da dodavanje stakla celokupnoj količini cementa do 15% utiče na povećavanje čvrstoće pri pritisku betona. Autori rada [35] su zaključili da je poboljšanje pritisne čvrstoće usled dodavanja stakla rezultat boljeg pakovanja betona, pucolanske aktivnosti stakla, kao i hidrauličkog efekta staklenog praha. Istraživanja pokazuju da se kod betona sa dodatkom stakla cementu većim od 15% čvrstoća pri pritisku smanjuje. Ovaj efekat se tumači kao posledica nastanka aglomeracije (*grupisanja*) fino samlevenih čestica stakla pri njihovoj većoj koncentraciji u betonu [35].

7.6.3. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betonskih serija pri starosti od 28 i 90 dana prikazane su u tabeli 6.22., poglavlja 6.11.3. Na slici 7.18. prikazan je uticaj zamene cementa, odnosno dodatka CRT stakla na ovu mehaničku karakteristiku betona. Pri starosti od 28 dana, serije sa zamenom dela cementa recikliranim staklom do nivoa od 20% imaju međusobno ujednačene vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem, koja je pritom u proseku svega 6,3% manja od etalon serije. Isti odnos rezultata čvrstoća pri zatezanju betonskih serija može se konstatovati i pri starosti od 90 dana, pri čemu je sada razlika između serija sa zamenom cementa staklom i etalon serije nešto manja. U periodu između 28. i 90. dana došlo do neznatnog prirasta čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod svih betonskih serija. Prirast zatezne čvrstoće je u opsegu od 2% do 7% za etalon seriju i za sve serije sa zamenom cementa staklom, dok je kod betonskih serija sa dodatkom stakla prirast nešto veći i iznosi oko 11%. Serije sa dodatkom stakla su imale veću vrednost zatezne čvrstoće od etalona, što korespondira sa čvrstoćama pri pritisku. Vrednost čvrstoće pri zatezanju na 90 dana betonske serije WGD5 je bila 15,8%, a betona WGD10 čak 19,9% veća u odnosu na etalon. Generalno se može zaključiti da zamena cementa staklom do nivoa od 20% gotovo da ne utiče na promenu čvrstoće pri zatezanju cepanjem. S druge strane, dodavanjem 10% stakla na celokupnu količinu cementa poboljšava se ova vrsta zatezne čvrstoće betona. Prethodno izneti zaključci, vezani za uticaj dodatka stakla na čvrstoću pri zatezanju betona cepanjem, u korelaciji su sa podacima saopštenim u radu [31]. Autori su publikovali rezultate koji pokazuju da se dodatkom stakla do nivoa do 5% i 10% povećava čvrstoća pri zatezanju cepanjem u odnosu na referentnu seriju za 14,9% i 20%, respektivno.

Takođe, autori rada [35] zaključuju da je povećanje zatezne čvrstoće posledica poboljšanja tranzitne zone u betonu što je jako važan uticajni faktor u slučaju ovog ispitivanja.

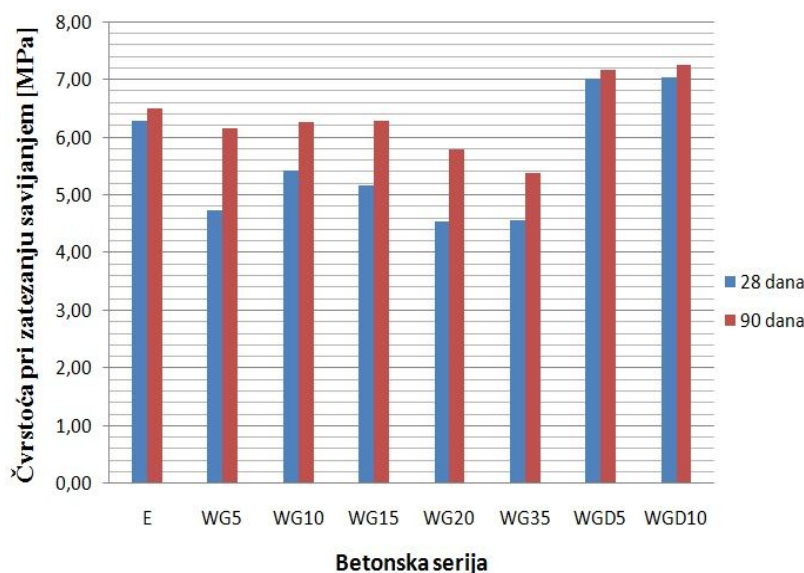


Slika 7.18. - Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona

7.6.4. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem betonskih serija pri starosti od 28 i 90 dana prikazane su u tabeli 6.23., poglavlja 6.11.4. Grafički prikaz uticaja zamene, odnosno dodatka CRT stakla na čvrstoću pri zatezanju savijanjem, dat je na slici 7.19. Pri starosti od 28 dana betonske serije sa zamenom cementa staklom imaju manje vrednosti savojne čvrstoće od etalona. Najmanje izmereno smanjenje čvrstoće pri zatezanju savijanjem kod serija sa zamenom dela cementa staklom, pri navedenoj starosti, iznosi 13,4% kod serije WG10, dok je kod serija WG20 i WG35 smanjenje najveće - 27,3%. Pri ispitivanju sprovedenom na 90 dana, serije do nivoa zamene stakla do 15% imaju neznatno manje savojne čvrstoće od etalona. Na primer, serija WG15 ima svega 3,5% manju savojnu čvrstoću od referentne serije. Između 28. i 90. dana došlo do veoma malog prirasta čvrstoće kod etalona (svega 3,7%), dok je kod serija sa zamenom dela cementa prirast savojne čvrstoće bio znatno više izražen. Na primer, kod betona WG15 to povećanje iznosi 21,3%, što se može okarakterisati kao značajno. Serije sa dodatkom stakla imale su veće savojne čvrstoće u odnosu na etalon seriju pri svim starostima. Serija sa 10% dodatka stakla, pri starosti od 90 dana, imala je veću savojnu čvrstoću od svih ostalih i iznosila je 7,25 MPa, što je za 11,5% više od referentne serije. Uopšteno govoreći, može se zaključiti da zamena cementa staklom do nivoa od 15% ne utiče negativno na čvrstoću pri zatezanju savijanjem pri većoj starosti

betona. Opet, kako je to konstatovano i kod čvrstoća komentarisanih u prethodnim poglavljima, dodavanjem 10% stakla na celokupnu količinu cementa povećava se čvrstoća pri zatezanju savijanjem. Dobijeni eksperimentalni rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima ispitivanja Nassara i saradnika [54]. Oni su betone za potrebe eksperimenta spravljali sa recikliranim agregatom i, u slučaju par betonskih serija, vršili su zamenu dela cementa samlevenim ambalažnim staklom. Rezultati dati u radu [54] pokazuju da se zamenom 20% cementa staklom poboljšava savojna čvrstoća betona za 8% do 14% u odnosu na referentne serije. Sa druge strane autori su konstatovali istovetan trend u pogledu prirasta savojne čvrstoće serija sa zamenom cementa staklom, veoma slično sa predmetnim eksperimentalnim istraživanjem. Naime, od 14. do 56. dana autori [54] su zabeležili značajan prirast savojne čvrstoće kod serija sa zamenom stakla naspram etalona kod koga je taj prirast u navedenom periodu bio znatno manji. Objašnjenje za intenzivan kasniji prirast savojne čvrstoće serija sa zamenom cementa staklom se možda može naći u poboljšanju kvaliteta tranzitne zone zbog pojave zakasnele pucolanske reakcije između čestica stakla i kalcijum hidroksida što je rezultiralo stvaranjem C-S-H.

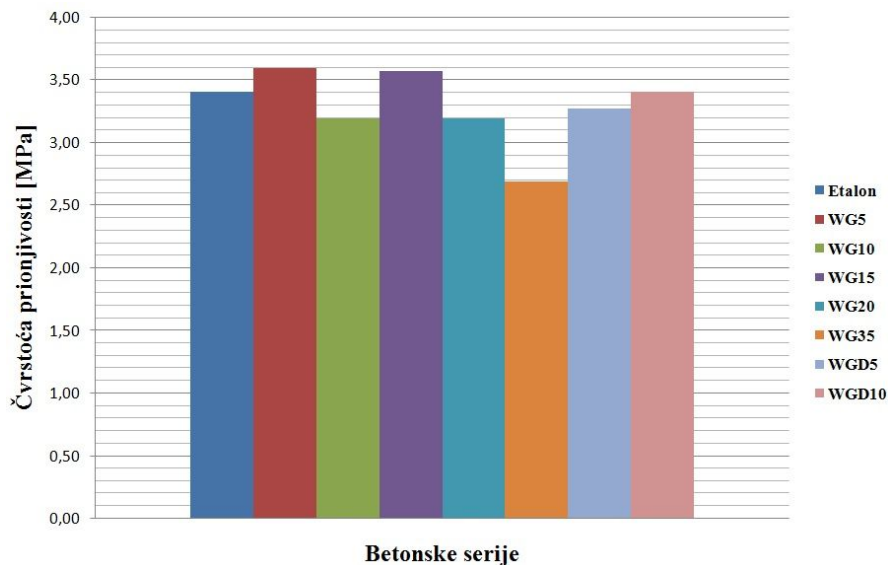


Slika 7.19. - Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona

7.6.5. Čvrstoća prionjivosti - "Pull - off" test

U tabeli 6.24., poglavlje 6.11.5. prikazane su srednje vrednosti rezultata ispitivanja prionjivosti betona (*bond strength*). Na osnovu opisa loma pojedinačnih ispitivanja datih u prilogu 4 može se videti da je kod gotovo svih uzoraka došlo do loma po betonu. Do loma

betona je dolazilo u površinskom sloju i to od 2-3 mm pa do najviše 15 mm. Kod tri uzorka kod kojih je došlo do loma po betonu i po lepku rezultati sile zatezanja nisu uzeti u obzir prilikom izračunavanja srednje vrednosti čvrstoće prionjivosti. Uticaj zamene dela cementa fino samlevenim staklom, odnosno dodatak stakla, na promenu čvrstoće prionjivosti betona grafički je prikazan na slici 7.20. Na osnovu rezultata ispitivanja može se konstatovati da nivo zamene cementa staklom do 20% praktično nema uticaja na promenu čvrstoće prionjivosti betona. Značajnije smanjenje se može primetiti kod betona sa 35% zamene cementa staklom i ono iznosi oko 21% u odnosu na etalon. Betoni sa dodatkom stakla na celokupnu količinu cementa imaju podjednako dobre rezultate prionjivosti kao i referentni beton. Pregledom literature nisu pronađeni publikovani rezultati ove vrste ispitivanja betona sa kojima bi se predmetni rezultati mogli uporediti.

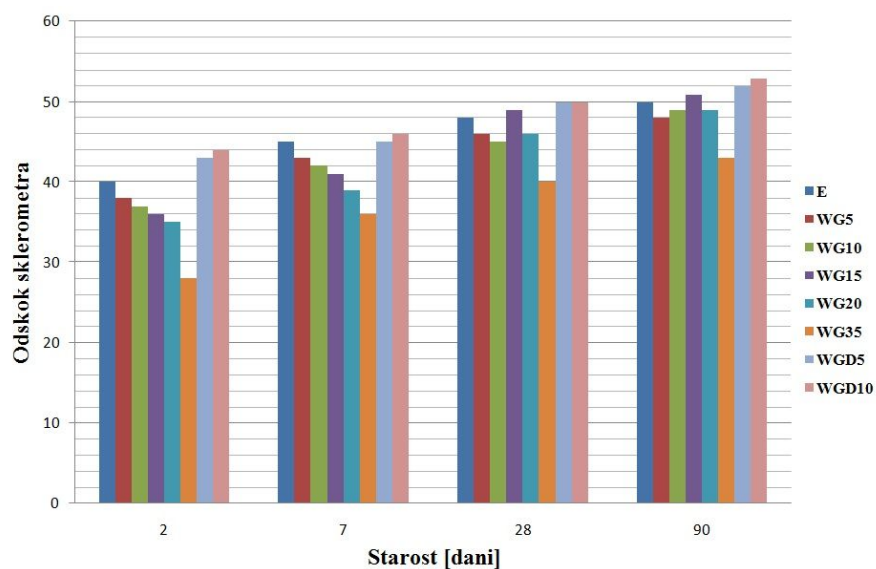


Slika 7.20. - Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće prionjivosti betona

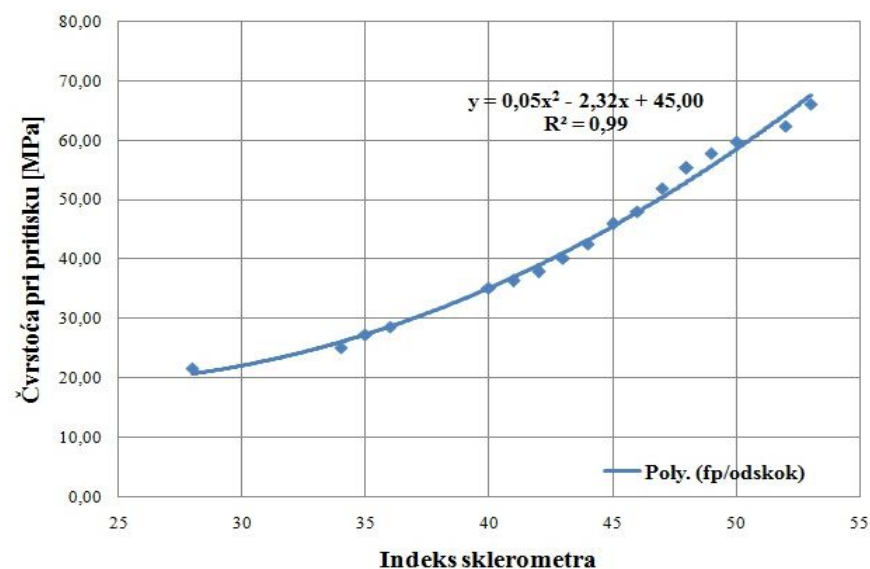
7.6.6. Indeks sklerometra

Neposredno pre samog ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona, na istim uzorcima je izmeren odskok sklerometra (*indeks sklerometra*). Srednje vrednosti rezultata odskoka sklerometra R_{sr} na epruvetama starosti 2, 7, 28 i 90 dana prikazane su u tabeli 6.25., poglavlje 6.11.6. Na slici 7.21. dat je grafički prikaz srednjih vrednosti odskoka za betonske serije pri različitim starostima. Očekivano, sa povećanjem starosti svake betonske serije dolazi do povećanja odskoka sklerometra. Kada je reč o serijama sa zamenom cementa staklom, pri ranim starostima betona na 2 i 7 dana, može se primetiti da sa povećanjem udela stakla u mešavini dolazi do smanjenja odskoka, za istu starost betona. Kod serija betona sa zamenom

cementa se pri ispitivanju na 28 dana zapaža ujednačenost vrednosti odskoka. Pri toj starosti kada serija WG15 ima skoro istu vrednost odskoka kao i etalon, što u potpunosti odgovara odnosima pritisknih čvrstoća ovih dveju serija. Do nivoa zamene cementa staklom do 20%, vrednosti odskoka sklerometra i etalona su ujednačene pri ispitivanju na 90 dana. Pri ovoj starosti serija WG35 ima najmanju čvrstoću od svih serija tako da je kod ove serije, logično, izmeren i najmanji odskok sklerometra - 43. Sa druge strane, serije sa dodatkom stakla na celokupnu količinu cementa imaju veće vrednosti odskoka od etalona pri svim starostima.



Slika 7.21. - Odkok sklerometra pri različitim starostima betona

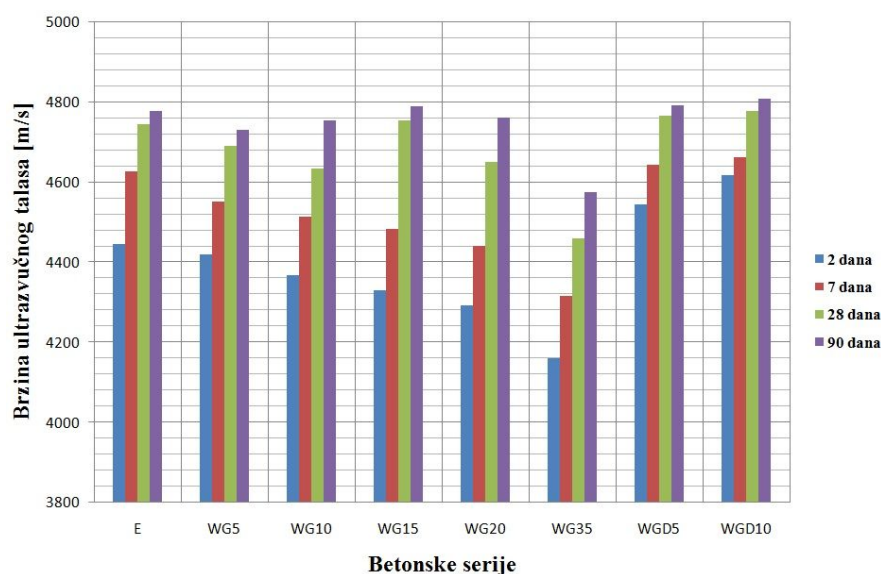


Slika 7.22. - Funkcija zavisnosti čvrstoće pri pritisku betona i indeksa sklerometra

S obzirom da je površinska tvrdoća betona u direktnoj vezi sa čvrstoćom pri pritisku, izmerene vrednosti odskoka prate prirast čvrstoća u toku vremena. Uzimajući u obzir srednje vrednosti odskoka i izmerene vrednosti pritisne čvrstoće formirana je funkcija zavisnosti između vrednosti odskoka sklerometra i čvrstoće pri pritisku betona (*slika 7.22.*). Statističkom obradom rezultata dobijena je polinomna funkcija drugog stepena sa koeficijentom korelacije bliskim jedinici. Pregledom literature, nije pronađeno ni jedno ispitivanje merenja odskoka sklerometra na betonu sa dodatkom usitnjenog stakla, tako da dobijene rezultate nije moguće ovom prilikom uporediti sa rezultatima istraživanja drugih autora.

7.6.7. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa

Vreme prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton, na osnovu kojeg je izračunata njegova brzina, mereno je na uzorcima oblika kocke dužine ivice 150 mm neposredno pre ispitivanja čvrstoće pri pritisku. Srednje vrednosti rezultata ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana prikazane su u tabeli 6.26., poglavlja 6.11.7. Na slici 7.23. dat je grafički prikaz srednjih vrednosti brzina ultrazvuka za betonske serije pri navedenim starostima.

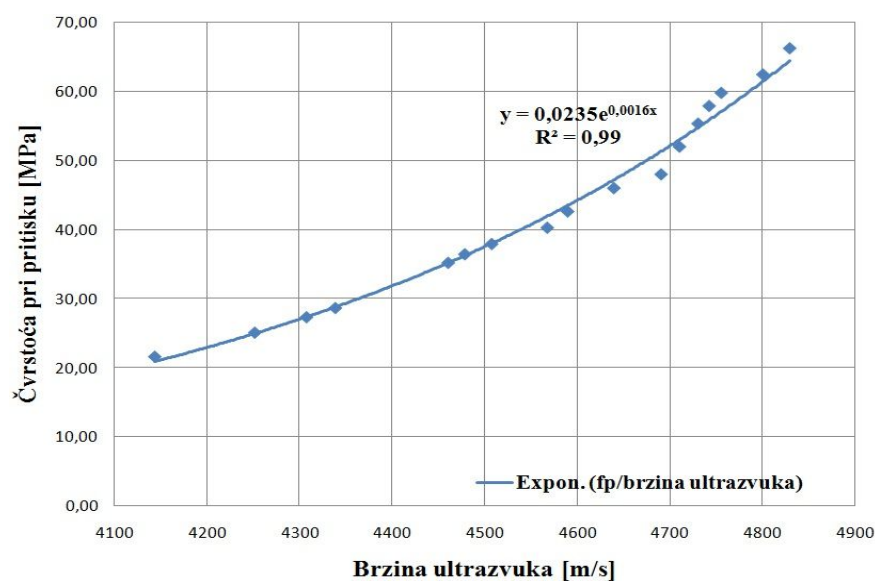


Slika 7.23. - Brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Sastav betona, odnosno materijali od kojih se on spravlja, utiču na brzinu ultrazvuka. To je potpuno logično jer od svojstava komponenti i njihovog udela zavise svojstva betona. Navedeno se svakako odnosi i na čvrstoću pri pritisku sa kojom se brzina ultrazvuka često dovodi u korelaciju. S druge strane, uticaj svih komponenti od kojih se beton spravlja nije

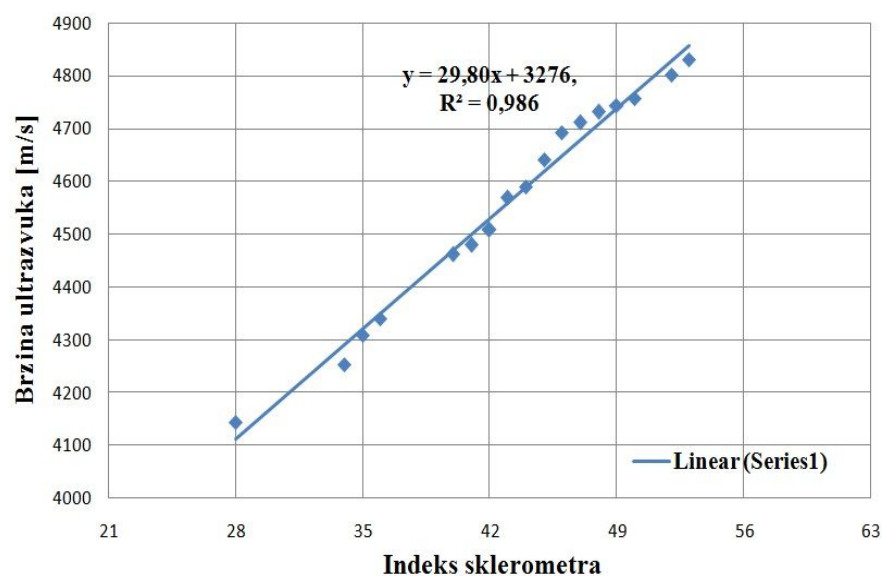
jednako značajan. Na primer, uticaj vrste cementa nema značajan efekat na brzinu ultrazvuka za isti dostignuti stepen hidratacije. Tačnije, mnogo veći uticaj ima dostignuti stepen hidratacije cementa pri čemu je korelacija jasna i očigledna – veći stepen hidratacije – veća brzina ultrazvuka. Dostignuti stepen hidratacije je u direktnoj korelaciji sa povećanjem starosti betona, a to dalje, logično, utiče na povećanje brzine prostiranja ultrazvuka [80]. U konkretnom slučaju na brzinu ultrazvuka utiče i dostignuti nivo razvoja produkata pucolanske aktivnosti stakla. Efekti pucolanske aktivnosti su najviše izraženi pri starostima većim od 28 dana, što se može videti na primeru serije WG15. Kod ove serije pri starosti betona od 2 i 7 dana brzina ultrazvuka je manja u odnosu na etalon. Međutim, pri starosti od 28 dana serija sa 15% zamene cementa staklom je dostigla brzinu ultrazvuka izmerenu na etalonu. Razlika u brzini ultrazvuka kod WG15 između 7 i 28 dana je 271 m/s, dok je kod etalona ta razlika svega 119 m/s što se može dovesti u direktnu vezu sa pucolanskom aktivnošću CRT-a. Pri ispitivanju na 90 dana, serija WG15 ima čak nešto veću brzinu ultrazvuka od etalona, što je u korelaciji sa vrednostima pritisnih čvrstoća.

Izmerene brzine ultrazvuka kod maltera sa 5% dodatka stakla su gotovo istovetene sa brzinama etalona pri ispitivanju na 7, 28 i 90 dana. Malter sa 10% dodatka fino samlevenog stakla imao je najveće izmerene brzine ultrazvuka u odnosu na sve ostale eksperimentalne mešavine, što je i očekivano s obzirom na sve ispred navedeno vezano za odnos stepena hidratacije - brzine ultrazvuka - pritisne čvrstoće betona.



Slika 7.24. - Funkcija zavisnosti čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvučnog impulsa

Uzimajući u obzir karakteristične vrednosti brzine ultrazvuka i izmerene vrednosti pritiskne čvrstoće formirana je funkcija zavisnosti između vrednosti ultrazvučne brzine i čvrstoće pri pritisku betona (*slika 7.24.*). Statističkom obradom rezultata dobijena je eksponencijalna funkcija sa koeficijentom korelacije bliskim jedinici. Na kraju, formirana je i linearna funkcija zavisnosti između brzine ultrazvuka i indeksa sklerometra (*slika 7.25.*). Pregledom literature, ni u ovom slučaju kao i kod merenja indeksa sklerometra, nije pronađeno ni jedno publikovano ispitivanje brzine ultrazvuka kroz beton spravljen sa fino samlevenim staklom kao zamenom/dodatkom cementu. Stoga dobijene rezultate nije moguće ovom prilikom uporediti sa rezultatima istraživanja drugih autora.



Slika 7.25. - Funkcija zavisnosti brzine ultrazvučnog impulsa i indeksa sklerometra

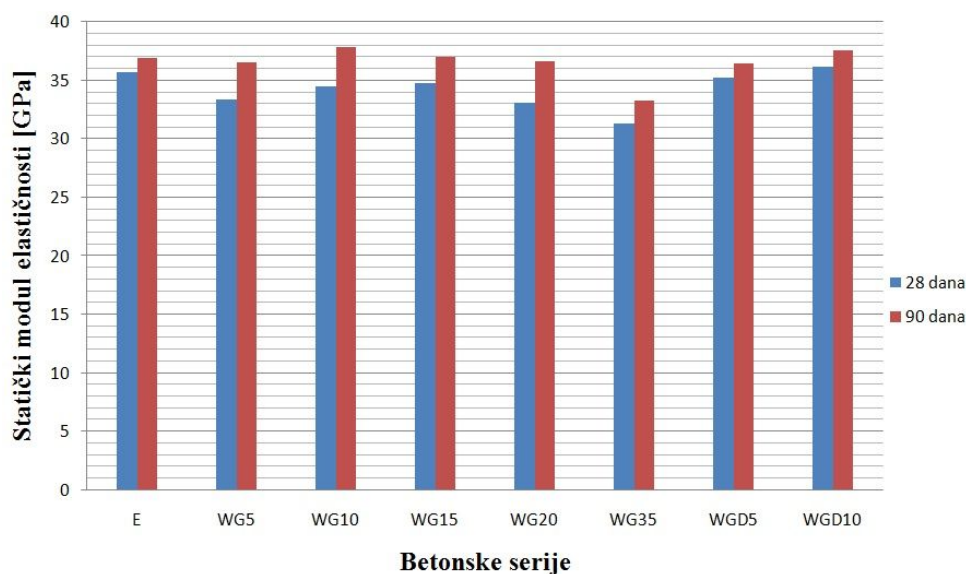
7.6.8. Statički modul elastičnosti

Na slici 7.26. dat je grafički prikaz uticaja zamene/dodatka fino samlevenog stakla na promenu modula elastičnosti betonskih mešavina. Ovaj grafički prikaz je baziran na srednjim vrednostima rezultata ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana koje su date su u tabeli 6.27., poglavlje 6.11.8. Na promenu modula elastičnosti betona utiču brojni parametri. Pre svega elastično ponašanje betona zavisi od procenta učešća, zapreminske mase i modula elastičnosti komponentnih materijala koji ulaze u njegov sastav. Kod betona postoji direktna veza između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti, što proizilazi iz činjenice da na oba svojstva utiče najviše poroznost agregata i cementne matrice. Kod agregata je uticaj dosta logičan - manja poroznost agregata znači veću zapreminsku masu zrna, te će shodno tome agregat imati i veći modul elastičnosti. Što je veće učešće krupnog

agregata sa većim modulom elastičnosti u betonskoj mešavini, sam modul elastičnosti betona će biti veći [142]. U predmetnom eksperimentalnom istraživanju sve betonske mešavine su imale isti procenat učešća sitnog i krupnog agregata tako da se za utvrđenu promenu modula elastičnosti ne može smatrati odgovornim sam agregat. Drugim rečima, agregat je zbog konstantnog procentualnog učešća u svim mešavinama eliminisan kao faktor koji utiče na promenu modula elastičnosti. Kod cementne paste modul elastičnosti takođe zavisi od poroznosti što se može kontrolisati vodocementnim faktorom, sadržajem uvučenog vazduha i mineralnim dodacima. Kod svih betonskih mešavina sa zamenom dela cementa CRT staklom, vodovezivni faktor je bio konstantan - 0,438. Na osnovu rezultata ispitivanja svežeg betona (*datih u tabeli 6.19., poglavlje 6.10.*) može se zapaziti da je sadržaj uvučenog vazduha nešto veći kod serija sa zamenom dela cementa fino samlevenim staklom u odnosu na referentnu seriju (*od 0,2% do najviše 0,8%*). Modul elastičnosti betona zavisi i od dostignutog stepena hidratacije cementa. U predmetnom slučaju beton je modifikovan pomoću mineralnog dodatka - CRT stakla, tako da i sama pucolanska reakcija stakla, čiji su produkti gotovo identični produktima hidratacije cementa, utiče na modul elastičnosti betona. Pri starosti od 28 dana, kod betona sa zamenom cementa staklom do 15%, nije utvrđeno značajno smanjenje modula elastičnosti u odnosu na etalon. Pri istoj starosti (28 dana) serije WG20 i WG35 imaju 7,14%, odnosno 12,30% manje vrednosti modula elastičnosti od etalona. Pri starosti od 90 dana, betonska serija sa 20% zamene cementa staklom ima gotovo isti modul elastičnosti kao referentna serija, dok je serija WG35 imala 9,73% niži modul elastičnosti. Uticaj pucolanske aktivnosti stakla na modul elastičnosti se može ogledati u tome da je između 28. i 90. dana modul elastičnosti etalon betona povećan za 1,22 GPa, dok je u istom periodu kod serija sa zamenom cementa staklom taj prirast iznosio od 2,02 GPa do 3,5 GPa. Betonske serije sa 5% i 10% dodatka stakla na celokupnu količinu cementa imaju približno isti modul elastičnosti kao i referentna serija.

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti betona sprovodi se naizmeničnim opterećenjem i rasterećenjem uzoraka pri čemu se uzorak opterećuje jednoosijalnom silom pritiska. Uzorak se opterećuje u području u kojem su naponi i deformacije direktno proporcionalni, odnosno u kojem važi Hukov zakon. S obzirom da $\sigma - \varepsilon$ kriva nije baš u potpunosti linearna, postoje različiti načini određivanja modula elastičnosti betona iz rezultata dobijenih ispitivanjem. Sekantni modul elastičnosti predstavlja nagib krive koja spaja koordinatni početak i tačku na $\sigma - \varepsilon$ krivoj kojoj odgovara 40% vrednosti napona [142]. Različiti pravilnici za beton i udruženja, koja se bave standardizacijom iz ove oblasti, dala su odgovarajuće preporuke i empirijske formule po kojima je moguće "proceniti" module

elastičnosti betona (*tabela 6.27.*). Ako se uporede eksperimentalni rezultati modula elastičnosti sa rezultatima dobijenim prema domaćem Pravilniku za beton i armirani beton i Evrokodu 2 za proračun betonskih konstrukcija može se primetiti zadovoljavajuće podudaranje. Rezultati prema empirijskoj formuli iz EC2 su približniji eksperimentalnim rezultatima prikazanim u ovom radu, dok su PBAB rezultati modula elastičnosti nešto veći za sve betonske serije.



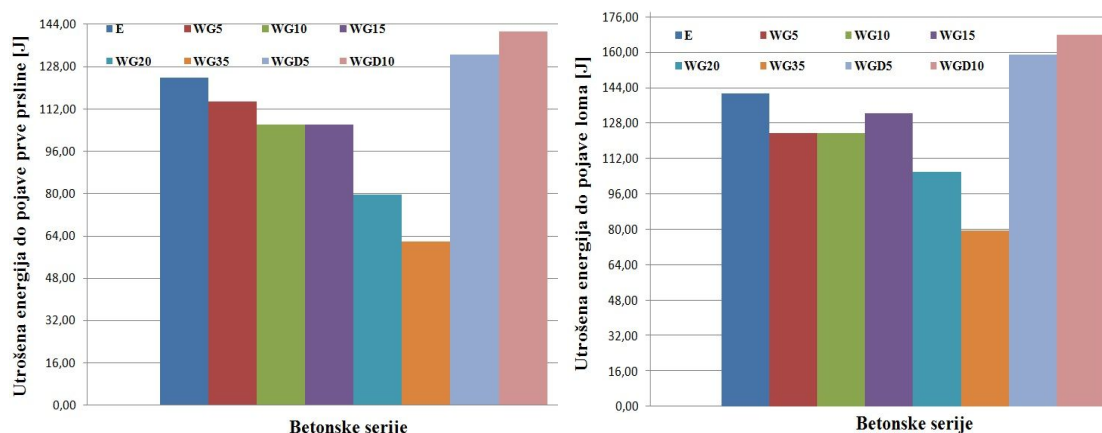
Slika 7.26. - Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana

Omran i saradnici [55] su istraživali dugoročan uticaj dodatka recikliranog stakla kao zamene dela cementa na svojstva betona. Procenat zamene dela cementa usitnjenim ambalažnim staklom iznosio je 10% i 30%. Ispitivanje modula elastičnosti sprovedeno je u laboratoriji na betonskim uzorcima starosti 28 i 91 dan. Autori [55] su doneli očekivan zaključak da se modul elastičnosti povećava između 28. i 90. dana kod svih betonskih serija. Takođe, pri ispitivanju na 28 dana betoni sa zamenom 10% i 30% cementa staklom imaju ujednačene vrednosti modula elastičnosti, dok je pri ispitivanju na 91 dan beton sa 30% stakla imao veći modul elastičnosti od serije sa 10% zamene. Ovi rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima predmetnog istraživanja.

Generalno, može se zaključiti da se do nivoa zamene cementa fino samlevenim CRT staklom do 20% ne smanjuje modul elastičnosti betona. Pucolanska reakcija stakla koja je intenzivna u periodu od 28. do 90. dana ima značajan uticaj na prirast modula elastičnosti betona u tom periodu. Dobijeni eksperimentalni rezultati modula elastičnosti se u velikoj meri poklapaju sa računskim podacima dobijenih prema preporukama PBAB i EC2.

7.6.9. Udarne otpornost betona - "Drop weight test"

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja udarne otpornosti eksperimentalnih betonskih mešavina prikazane su u tabeli 6.28., poglavlje 6.11.9. Na slici 7.27., levo prikazan je uticaj zamene/dodatka katodnog stakla na promenu energije utrošene do pojave prve vidljive prsline na površini betona, dok je na slici 7.27., desno prikazan uticaj na promenu ukupne energije utrošene za lom betonskih uzoraka. Može se primetiti da sa povećanjem procenta zamene cementa CRT staklom dolazi do smanjenja energije koja je potrebna za pojavu prve prsline i ukupne utrošene energije za lom uzoraka. Sa druge strane dodatak stakla na celokupnu količinu cementa uticao je na poboljšanje udarne otpornosti betona. Kod serija WGD5 i WGD10 trebalo je više energije da se utroši do pojave prve prsline, odnosno do loma uzoraka. Iako ne postoji direktna funkcija koja bi mogla da poveže udarnu otpornost i čvrstoću pri pritisku betona, u predmetnom ispitivanju koje je sprovedeno pri starosti uzoraka od 90 dana rezultati udarne otpornosti u velikoj meri odgovaraju i međusobnim odnosima pritisne čvrstoće betonskih mešavina.

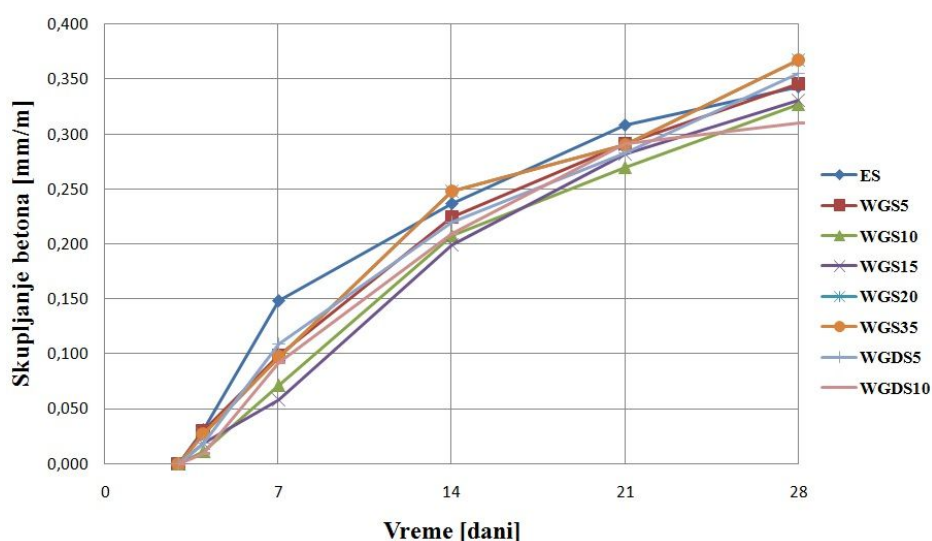


Slika 7.27. - Energija utrošena do pojave prve vidljive prsline na površini uzorka (levo); Energija utrošena do pojave loma betonskih uzoraka (desno)

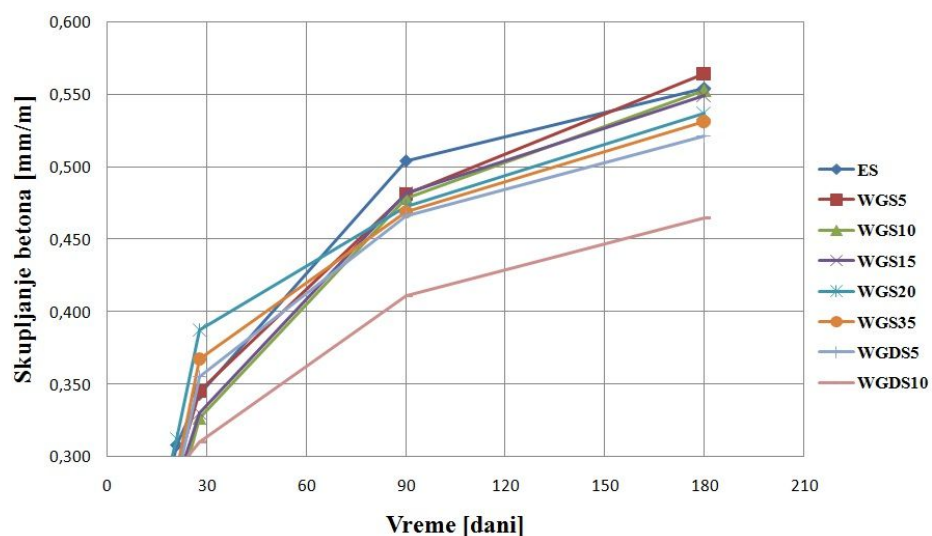
7.6.10. Skupljanje betona

Srednje vrednosti rezultata skupljanja betona na vazduhu prikazane su u tabeli 6.29., poglavlje 6.11.10. Na slici 7.28. prikazano je skupljanje betona izmereno u toku prvih 28 dana ispitivanja, dok je na slici 7.29. prikazano skupljanje koje je nastalo u periodu od 28. dana do 180. dana. Pri ispitivanju na 4, 7, 14 i 21 dan kod betonskih mešavina do nivoa zamene cementa staklom do 20%, vrednosti skupljanja su manja u odnosu na vrednosti skupljanja etalon betona. Ako se u tom periodu pogledaju čvrstoće pri pritisku betonskih mešavina do

navedenog nivoa zamene, može se konstatovati da te serije imaju manje čvrstoće od etalona. Od 21. dana pa do 180. dana kod ovih serija je prisutan veći prirast čvrstoće pri pritisku nego kod etalona, što kada je reč o skupljanju, odgovara periodu kada se skupljanje navedenih serija povećava i približava skupljanju referentne serije. Jedno od mogućih objašnjenja je da su produkti pucolanske reakcije stakla doprineli intenzivnijem skupljanju serija do 20% zamene cementa u navedenom periodu. Pri starosti od 90 dana serija WG20 ima svega 6,15% manje skupljanje od etalona, dok je kod serija sa manjim procentom zamene cementa ova razlika još manja. U skladu sa prethodno iznetim, može se konstatovati da u periodu od 90. do 180. dana serija WG35 najbrže sustiže etalon beton u pogledu skupljanja.



Slika 7.28. - Skupljanje betonskih serija na vazduhu u toku prvih 28 dana



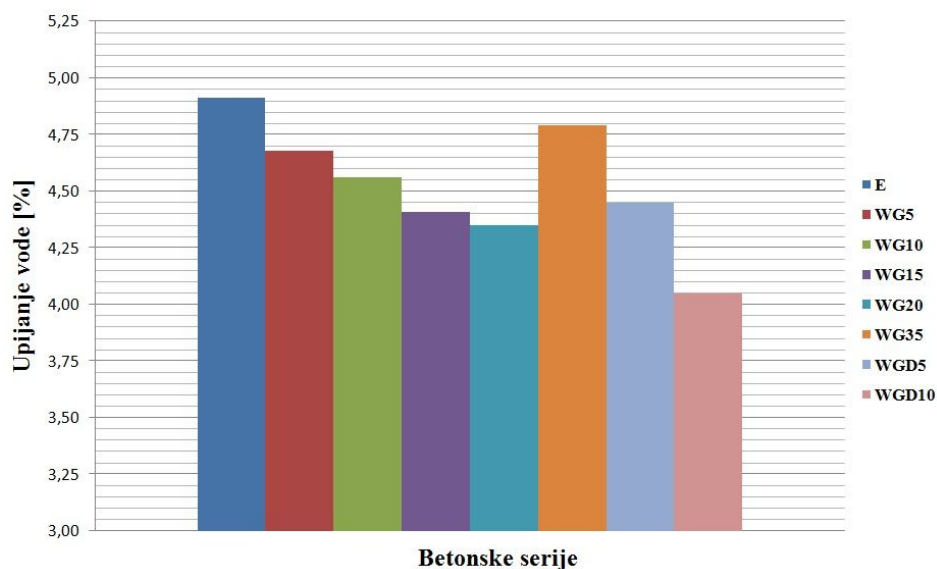
Slika 7.29. - Skupljanje betonskih serija na vazduhu u periodu od 28. dana do 180. dana

Serije sa dodatkom CRT stakla na celokupnu količinu cementa imaju manju vrednost skupljanja od etalona pri merenjima do 21. dana. Pri konačnom merenju na 180 dana, serija WGD5 ima sličnu vrednost skupljanja kao i referentna serija, dok serija WGD10 ima oko 16% manje skupljanje od referentne serije. Ovde još jednom treba naglasiti da su ovi betoni spravljani sa nižim vodovezivnim faktorom što direktno utiče na vrednosti skupljanja.

Generalno se može zaključiti da zamena dela cementa usitnjenim katodnim staklom do nivoa od 35% dovodi do smanjenja skupljanja betona u toku prvih 90 dana. U periodu od 90. dana pa do 180. dana, usled intenziviranja procesa pucolanske reakcije stakla, skupljanje pomenutih serija se približava vrednosti skupljanja etalona.

7.6.11. Upijanje vode pod atmosferskim pritiskom

Na osnovu srednjih vrednosti rezultata upijanja vode pod atmosferskim pritiskom može se zapaziti da se sa povećanjem procenta zamene cementa CRT staklom do 20% smanjuje upijanje vode betona u odnosu na etalon. Vrednosti upijanja vode su prikazane su u tabeli 6.30., poglavlje 6.11.11., dok je na slici 7.30. dat je grafički prikaz uticaja zamene/dodatka fino samlevenog CRT stakla betonu na upijanje vode. Betoni WG15 i WG20 imaju za 10,18% i 11,41% manje upijanje vode od referentne serije. Smanjenje upijanja vode može biti indikator koji ukazuje na potencijalno poboljšanje trajnosti betona (*o tome će više biti reči u poglavlju 7.7.*). Smanjenje upijanja vode može upravo biti jedno od objašnjenja povećanja pritiskih čvrstoća betona do nivoa zamene cementa do 15%. U slučaju betona gde CRT staklo dodavano na celokupnu količinu cementa takođe dolazi do smanjenja upijanja vode u odnosu na referentni beton. Najmanje upijanje vode izmereno je kod serije WGD10 i ono je za značajnih 17,52% manje u odnosu na etalon beton. Navedeni rezultati su u saglasnosti sa istraživanjima [35] i [55]. Istraživači u radu [35] zaključuju da se zamenom dela cementa usitnjenim staklom do 15%, kao i dodatkom stakla do čak 25% na početnu količinu cementa, smanjuje upijanje vode. Objašenje za ovakav uticaj zamene/dodatka stakla se može potražiti u stvaranju kompaktnije strukture betona čemu je doprinelo fino samleveno staklo. Omran i saradnici [55] su utvrdili smanjenje upijanja vode kod betona za čiju izradu je upotrebljeno usitnjeno ambalažno staklo kao zamena dela cementa. Eksperimentalna serija sa 20% zamene cementa staklom je imala 15,38% manje upijanje vode od referentne serije.

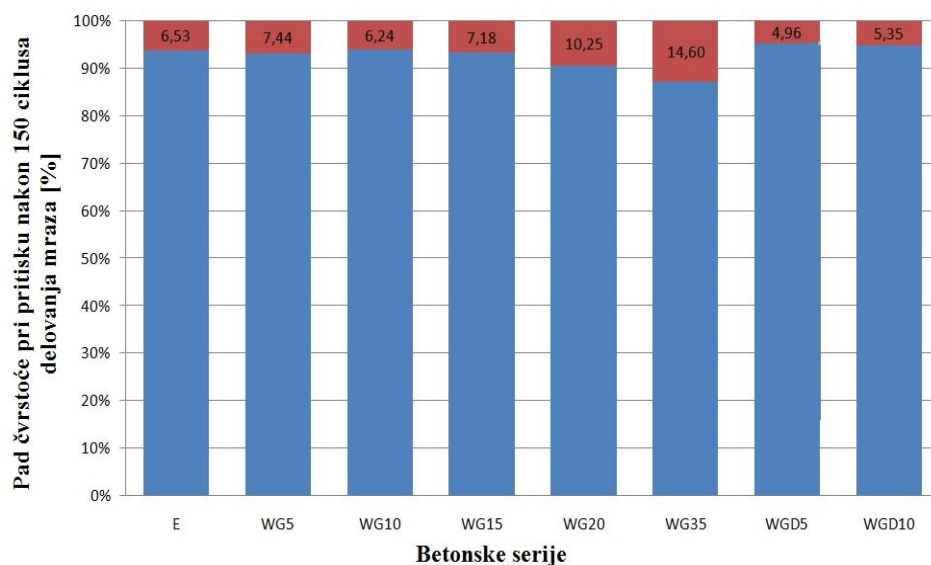


Slika 7.30. - Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na upijanje vode betona pod atmosferskim pritiskom

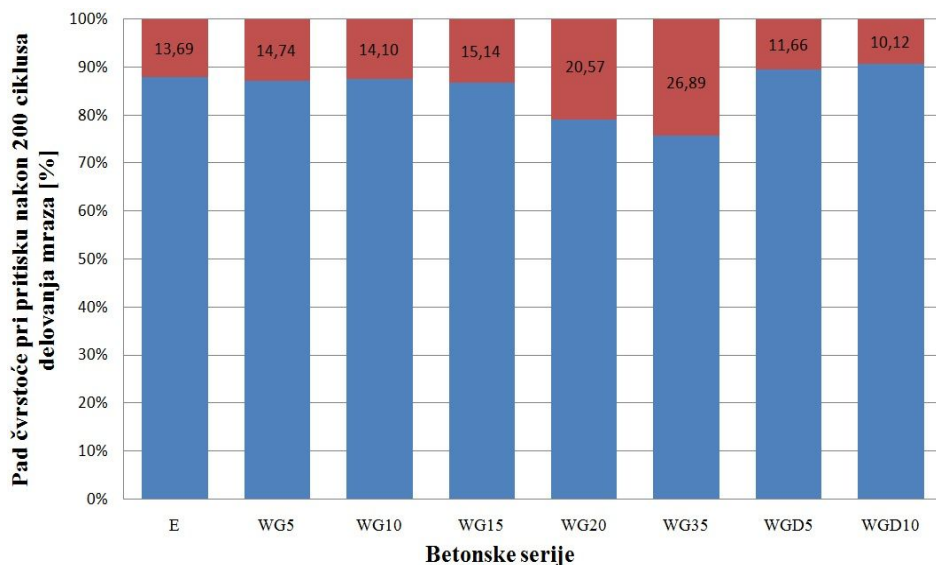
7.7. Trajnost betona sa dodatkom CRT stakla

7.7.1. Otpornost betona na delovanje mraza

Rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće etalon uzoraka svake betonske mešavine kao i uzoraka nakon 150 i 200 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja, prikazani su u tabeli 6.31., poglavlje 6.12.1. Smanjenje pritisne čvrstoće nakon 150, odnosno 200 ciklusa delovanja mraza, prikazan je na slikama 7.31. i 7.32. Na prikazanim dijagramima nivo od 100% predstavlja vrednost čvrstoće u procentima odgovarajućih etalona negovanih u vodi do ekvivalentne starosti za svaku eksperimentalnu mešavinu betona, dok je procentom u crvenom polju prikazan efektivan pad čvrstoće svake serije. Sve eksperimentalne serije su otporne na delovanje mraza do 150 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja. Serije sa zamenom cementa fino samlevenim katodnim staklom do 15%, nakon 150 ciklusa ispitivanja, imaju pad čvrstoća od 6 - 7%, dok je najveći pad izmeren kod serije WG35 - 14,60%. U tom periodu serije sa dodatkom stakla imaju pad čvrstoća oko 5% (slika 7.31.). Pri ispitivanju nakon 200 sprovedenih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja utvrđen je prosečan pad čvrstoće serija sa zamenom do 15% cementa staklom oko 14 - 15%, serija WG20 ima pad čvrstoće 20,57%, dok jedino serija WG35 ima veći pad čvrstoća od 25%, što znači da ova serija nema marku M - 200.



Slika 7.31. - Procentualno smanjenje pritisne čvrstoće betona nakon 150 ciklusa delovanja mraza



Slika 7.32. - Procentualno smanjenje pritisne čvrstoće betona nakon 200 ciklusa delovanja mraza

Može se konstatovati da se zamenom cementa fino samlevenim katodnim staklom do količine od 15% ne smanjuje trajnost betona u pogledu delovanja mraza. Pri ispitivanju otpornosti na delovanje 200 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja gornjom granicom nivoa zamene bi se mogla smatrati vrednost od 20% po masi cementa, a da pritom postojanost betona ne bude dovedena u pitanje. Pregledom literature nađeno je da su i drugi istraživači, prilikom ispitivanja delovanja mraza na beton spravljen sa dodatkom staklenog praha, takođe utvrdili da su takvi betoni otporni na ovu vrstu delovanja. Jihwan Kim i saradnici [53] su ispitivali postojanost betona u pogledu otpornosti na dejstvo mraza prema odredbama standarda ASTM C666. Detaljan opis ispitivanja prema ovom standardu dat je u poglavlju

3.4.2. Autori rada su dužinu trajanja ispitivanja uslovili merenjem dinamičkog modula elastičnosti pomoću ultrazvučnog talasa. Ispitivanje je trajalo dok se dimački modul elastičnosti nije smanjio do 60% od početne vrednosti ili do ukupno 300 ciklusa delovanja mraza. Autori su zaključili da se zamenom dela cementa usitnjenim recikliranim staklom iz procesa njegove obrade (*glass sludge*) do nivoa od 10% poboljšava otpornost betona prema delovanju mraza u odnosu na referentnu seriju bez prisustva stakla [53]. Do sličnih rezultata je došao i Nassar sa saradnicima [54] prilikom ispitivanja otpornosti na delovanje mraza betonskih mešavina spravljenih sa agregatom od recikliranog betona i sa delimičnom zamenom cementa usitnjenim ambalažnim staklom (*nivo zamene je iznosio 20%, po masi cementa*). Autori zaključuju da se primenom usitnjenog stakla kao zamene dela cementa u betonu sa recikliranim agregatom poboljšava trajnost u pogledu otpornosti na delovanje mraza, objašnjavajući da se dodavanjem usitnjenog stakla u cementnoj matrici poboljšavaju karakteristike sistema pora, ispoljava efekat zaptivača od strane čestica stakla i da dolazi do utroška Ca(OH)_2 u C-S-H gel usled pucolanske aktivnosti stakla.

7.7.2. Otpornost betona na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje

Rezultati ispitivanja betona sa dodatkom stakla nakon jednovremenog delovanja mraza i soli za odmrzavanje prikazani su u tabeli 6.32., poglavlje 6.12.2. Betoni sa zamenom cementa katodnim staklom do 15%, kao i betoni sa dodatkom stakla do 10% na celokuponu količinu cementa, mogu se smatrati postojanim prema jednovremenom delovanju mraza i soli za odmrzavanje. Slabo ljuštenje sva tri betonska uzorka nastalo je kod serije WG20, tako da je prema standardu SRPS U.M1.055 stepen oštećenja ove serije MS "1", čime se i ovaj beton može smatrati otpornim na ovu vrstu delovanja. Oštećenje površine betona i pojava pojedinih zrna agregata primećena je kod serije WG35, što odgovara stepenu oštećenja MS "2", čime se ova betonska serija smatra nepostojanom na jednovremeno delovanje mraza i soli.

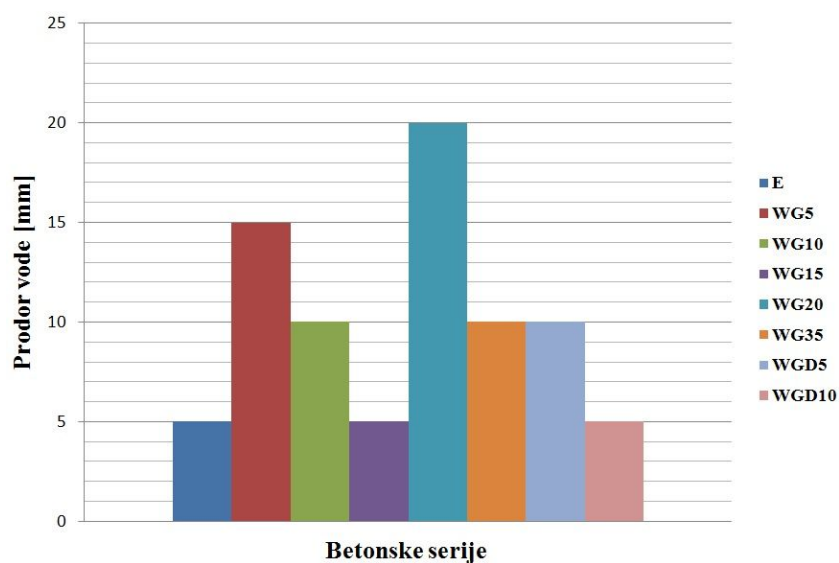
Jihwan Kim i saradnici [53] su ispitivali trajnost betona u pogledu otpornosti na jednovremeno delovanja mraza i soli za odmrzavanje prema odredbama standarda ASTM C672. Detaljan opis ispitivanja prema ovom standardu dat je u poglavlju 3.4.2. Serija sa 5% i 10% zamene cementa recikliranim staklom pokazala se otpornijom od referentne serije kada je reč o predmetnom ispitivanju. Jedno od objašnjenja za ovakav rezultat je posledica formiranja hidratnih faza prilikom pucolanske reakcije stakla, što je za posledicu imalo i smanjenje propustljivosti za fluide. Hyeongi Lee i saradnici [42] su zamenili 20% cementa dvema vrstama recikliranog stakla. Nakon sprovednog ispitivanja delovanja mraza i soli za

odmrzavanje dobili su u proseku oko 30% manji gubitak mase u odnosu na referentni beton spavljen sa čistim PC.

Literaturni podaci su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima ispitivanja jednovremenog delovanja mraza i soli za odmrzavanje do kojih se došlo u ovom eksperimentalnom istraživanju. Objašnjenje se može potražiti u sledećim činjenicama: ispitivanja u radovima [53] i [42] su sprovedena sa drugim vrstama stakla i u skladu sa američkim propisima, dok je u radu [53] referentni beton spravljen sa 20% zamene cementa letećim pepelom. Detaljnim pregledom literature nije pronađen istovetan slučaj ispitivanja otpornosti betona sa dodatkom katodnog stakla u pogledu jednovremenog delovanje mraza i soli za odmrzavanje.

7.7.3. Vodonepropustljivost betona

Grafički prikaz srednjih vrednosti prodora vode pod pritiskom za betonske serije sa različitim procentom zamene cementa staklom, odnosno dodatka stakla, dat je na slici 7.33. Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti betona prikazani su u tabeli 6.33., poglavlje 6.12.3. Najveći prodor vode izmeren je kod serije 20% i iznosio je svega 20 mm. Serija sa najvećim procentom zamene cementa staklom - WG35 ima veoma mali prodor vode pod pritiskom, što može da ukaže da su fino samlevena zrnca stakla imala ulogu zaptivača u betonu. Mnogi autori, među kojima i Nevil [56], gornjom granicom vodonepropustljivosti smatraju prodor vode od 30 mm. Opšti zaključak je da se sve betonske serije mogu okarakterisati kao vodonepropustljive, pri čemu se može konstatovati da je prodor vode bio svega 5 mm do 20 mm.

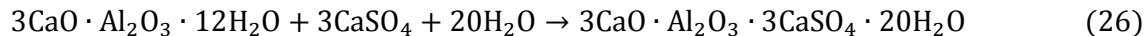


Slika 7.33. - Prodor vode kroz betone sa različitim procentom zamene/dodatka CRT stakla

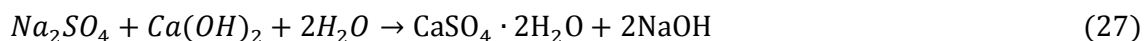
7.7.4. Otpornost betona na delovanje sulfata

Ukoliko beton dođe u kontakt sa vodom u kojoj su rastvoreni sulfati, postoji mogućnost nastanka štetnog delovanja sulfata. Najrasprostranjeniji su sulfati kalcijuma, magnezijuma, kalijuma i natrijuma. Sulfati mogu biti prisutni kako u zemljištu (*tlu*), tako i u podzemnim vodama. Takođe, kisele kiše i morska voda sadrže rastvorene sulfate što predstavlja agresivnu sredinu za betonske objekte izložene delovanju istih. Industrijski otpadi su označeni kao lokacije gde se može naći naročito velika koncentracija sulfata. Sulfatna korozija se najčešće može uočiti prvo na ivicama i obodima betonskih elemenata, a zatim kao posledica dugoročnog delovanja, dolazi do pojave prslina i gubitka čvrstoće. Ovaj vid korozije je u hemijskom smislu dosta složen proces.

Osnovni produkti reakcije sulfatnih jona i produkata hidratacije cementa su: etringit, gips i taumasit [56, 118, 123, 142]. Brojna istraživanja mehanizma razvoja sulfatne korozije su pokazala da postoji uzorčno - posledična veza između sadržaja minerala celita $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (*trikalcijum - aluminata*) u porland cementu i pojave sulfatne korozije. Cement, a samim tim i beton, sa visokim sadržajem celita dovešće do pojave sulfatne reakcije čiji će produkt biti etringit, što se može predstaviti hemijskom jednačinom:



Pojavom etringita povećava se zapremina čvrste mase i do 55%, što dovodi do pojave značajnih napona u cementnom kamenu koji prouzrokuje pojavu prslina. Etringit ima sposobnost da apsorbuje vodu kada se nalazi u mikrokristalastoj formi i tada može doći do mnogo ozbiljnijeg povećanja zapremine čvrste mase od čak 120%. Sulfati mogu takođe reagovati sa kalcijum - hidroksidom ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), pri čemu opet dolazi do povećanja zapremine i smanjenja čvrstoće pri pritisku betona. U slučaju dejstva natrijum - sulfata važi sledeća relacija:



Navedena reakcija se još naziva i gipsanom korozijom s obzirom da je produkt reakcije gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Kod betona koji je izložen dugoročnom dejstvu sulfata, u toku prvih desetak godina sulfatna korozija će se razvijati prema jednačini (26), dok će posle navedenog perioda primat u razaranju betona imati reakcija (27). Pojava prslina usled povećanja zapremine čvrste mase nije uvek jedini vid manifestacije sulfatne korozije. Zapravo, u velikom broju slučajeva dolazi do “omekšavanja” cementnog kamena i do njegove

dezintegracije. Takođe, dolazi i do dekalifikacije C-S-H gela, pri čemu se cementi kamen razmekšava i poprima svojstva poput kita [56, 118].

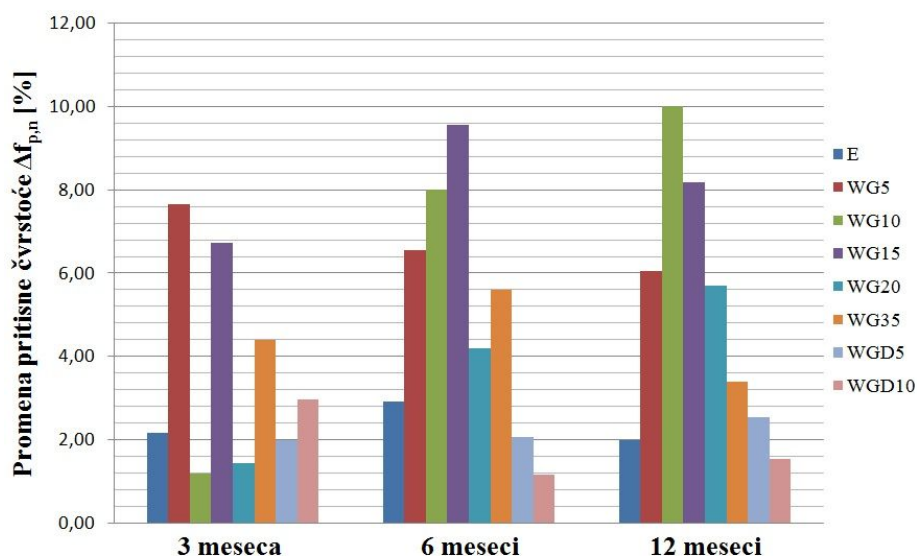
Taumasit je veoma redak mineral koji se u prirodi može javiti u nekim osnovnim tipovima stena, na primer u krečnjaku. Taumasit se sastoji od kalcijumovih silikata, karbonata i sulfata ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Neophodno je da bude ispunjeno više uslova kako bi došlo do pojave taumasita u betonu. Pogodna je vlažna sredina, temperature ispod 15°C , izvor jona sulfata (*najčešće iz podzemnih voda ili zemljišta*), prisustvo karbonata (*koga ima u agregatu za spravljanje betona*) i kalcijum silikata koji je prisutan u hidratizovanom PC. Kao i slučaju drugih produkata sulfatne korozije, i taumasit može dovesti do razaranja betona nakon dužeg vremena. Taumasit može nastati u postojećim pukotinama i šupljinama u betonu, međutim to ne mora nužno da dovede do degradacije betona. Razaranje sa javlja onda kada taumasit zameni deo ili celu očvrslu cementnu matricu [142].

Nivo sulfatne otpornosti betonskih serija sa dodatkom CRT stakla utvrđen je upoređivanjem čvrstoće pri pritisku etalon uzoraka svake serije betona i uzoraka izloženih delovanju sulfata. Srednje vrednosti rezultata ispitivanja pritisnih čvrstoća i utvrđena promena čvrstoća prikazani su u poglavlju 6.12.4., tabela 6.35. Pored ispitivanja promene čvrstoće, izvršena je i vizuelna provera eventualnih oštećenja uzoraka koji su držani u sulfatnom rastvoru.

Ukoliko se prvo posmatraju rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće etalon uzoraka negovanih u rastvoru kalcijum - hidroksida pri starosti od 3 meseca ($f_{E,3}$) može se zaključiti da se sa povećanjem učešća fino samlevenog CRT stakla čvrstoća pri pritisku smanjuje. Betonske mešavine WG20 i WG35 imaju 13,9% i 30,9% manju čvrstoću od referentne serije E, respektivno. Pri ispitivanju na 6 meseci ($f_{E,6}$), prvobitna razlika u pritisnim čvrstoćama referentne serije i uzoraka do nivoa zamene cementa staklom do 15% je smanjena, dok pri ispitivanju na 12 meseci ($f_{E,12}$) betonska mešavina WG15 ima 2,7% veću čvrstoću od betona E. Pri krajnjem ispitivanju uzoraka etalon betona mešavina na godinu dana, WG20 i WG35 i dalje imaju manje čvrstoće od referentne serije, ali je ta razlika sada manja i iznosi 6,1% i 19,7%. Objašnjenje za ovakav prirast čvrstoća betonskih mešavina sa zamenom dela cementa CRT staklom, kao što je i ranije rečeno u više navrata, može se potražiti u prirodi procesa pucolanske reakcije stakla. Serije sa dodatkom stakla imaju veću pritisnu čvrstoću pri svim starostima od etalon serije.

Nakon što je definisan sam uticaj prisustva CRT stakla na čvrstoću pri pritisku betona, može se posmatrati sulfatna otpornost eksperimentalnih betona. Na slici 7.34. prikazana je

promena pritisknih čvrstoća uzoraka negovanih u kalcijum-hidroksidu i uzoraka negovanih u rastvoru natrijum-sulfata nakon 3, 6 i 12 meseci, u procentima. Nakon negovanja uzoraka u 5% rastvoru Na_2SO_4 u trajanju od godinu dana, nije utvrđen veći pad pritisknih čvrstoća od 10% u odnosu na uzorke negovanje u kalcijum-hidorksidu . Ono što je još važnije, vizuelnim pregledom ovih uzoraka nije ustanovljena pojava bilo kakvih oštećenja u vidu prslina ili ljuskanja. Generalno posmatrano, može se zaključiti da su svi betoni prisutni u eksperimentu otporni na dejstvo natrijum-sulfata.



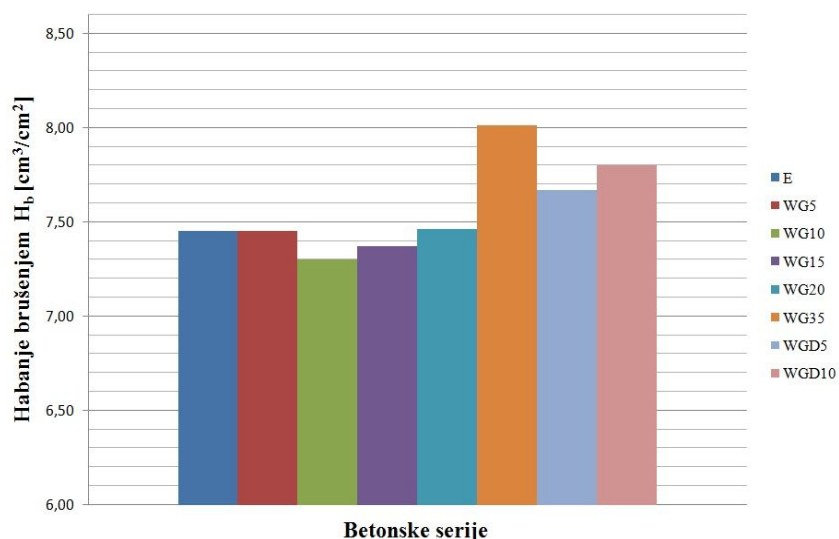
Slika 7.34. - Promena pritiskne čvrstoće uzoraka negovanih u rastvoru kalcijum - hidorksidu i uzoraka negovanih u rastvoru natrijum - sulfata nakon 3, 6 i 12 meseci u %

Pregledom literature utvrđen je veoma mali broj radova u kojima je prikazano ispitivanje sulfatne otpornosti maltera i betona sa dodatkom neke vrste recikliranog stakla. Chen i saradnici [143] su ispitivali betonske cilindre na dejstvo sulfata prema standardu ASTM C267, pri čemu je vršena zamena cementa E-staklom krupnoće od 38 do 380 mikrona. Praćena je promenu zapremine uzoraka. Zaključak istraživača [143] je da prisustvo stakla poboljšava otpornost betona na delovanja sulfata, kao i da je optimalan procenat zamene cementa E - staklom 40% - 50% po masi. Matos i saradnici [37] su ispitivali sulfatnu otpornost maltera sa dodatkom recikliranog stakla poreklom od ambalaže iz prehrambene industrije. Ispitivanje je izvršeno prema portugalskom standardu E - 462. Merena je ekspanzija uzoraka u periodu od 26 nedelja tokom koga su uzorci negovani u rastvoru natrijum-sulfata. Malter spravljen sa modifikovanim cemetnom (10% zamenjeno staklenim prahom) ima značajno poboljšanu otpornost na delovanje sulfata. Matos i saradnici zaključuju

da u procesu pucolankse reakcije staklo troši kalcijum-hidroksid, tako da on nije dostupan za reakciju sa sulfatima. Na ovaj način sprečava se pojava gipsa (*jednačina 27*). Do zaključaka da fino samleveno staklo u cementim kompozitima poboljšava otpornost istih na delovanja sulfata došli su i istraživači u radovima [39] i [144].

7.7.5. Otpornost betona prema habanju brušenjem

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja habanja brušenjem po Bemeu date su u tabeli 6.38., poglavlje 6.12.5. Uticaj prisustva usitnjenog katodnog stakla u betonskoj mešavini na otpornost prema habanju brušenjem prikazan je na slici 7.35. Može se primetiti da je u slučaju serija sa zamenom cementa staklom do 20% gubitak mase uzoraka usled habanja dosta ujednačen. U slučaju betona sa najvećim procentom zamene - WG35 dolazi do smanjenja otpornosti prema habanju za 7,5% u odnosu na referentnu seriju. Interesantno je uočiti da serije sa dodatkom stakla, i pored boljih mehaničkih čvrstoća u odnosu na etalon, imaju nešto manju otpornost prema habanju. Mikroskopskom analizom čistog usitnjenog stakla (*poglavlje 6.8.*) može se uočiti da su zrnca glatke površine i sa oštrim ivicama. Očigledno da u ovom slučaju kvalitet tranzitne zone između zrna usitnjenog stakla i cementne matrice, kao i mikro tekstura površine betona, uslovljavaju upravo ovakve rezultate otpornosti prema habanju.



Slika 7.35. - Uticaj prisustva katodnog stakla na otpornost betona prema habanju brušenjem

7.7.6. Izluživanje betona

Kao i što je u uvodnom delu rada već napomenuto, katodno staklo je svrstano u opasan otpad prema Evropskom katalogu za otpad iz 2002. godine. Na osnovu prikazaog sadržaja metala u staklu u tabeli 6.38. može se videti da su u određenoj meri premašene dozvoljene koncentracije berilijuma (*Be*) i antimona (*Sb*) u poređenju sa dozvoljenim granicama koje su propisali domaći Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje [145] i Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Država (*United States Environmental Protection Agency*). U slučaju nekih metala iz tabele 6.38., na primer kalcijuma, magnezijuma, natrijuma, silicijuma maksimalna dozvoljena koncentracija nije propisana, tako da njihovo prisustvo nije značajno razmatrati u smislu izluživanja. Ovde je važno naglasiti da su u tabeli 6.38. dati rezultati za koncentrovano staklo. Jedan od osnovnih ciljeva ispitivanja izluživanja betona jeste da se utvrdi da li prisustvo stakla u betonu u procentu koji je definisan eksperimentalnim ispitivanjem može imati štetne posledice na životnu sredinu. Drugim rečima, prisustvo "potencijano opasnog" materijala u betonu kao što je CRT staklo ne sme da dovede do izluživanja opasnih hemijskih jedinjenja u granicama iznad dozvoljenih. Ukoliko bi se iz betona izlužile ovakve materije, one bi iz zemljišta veoma brzo dospale u vodu, što bi dovelo do ugrožavanja životne sredine i zdravlja ljudi. U tom smislu, ispitivanje izluživanja je najbolja simulacija eventualnog štetnog uticaja betona sa dodatkom CRT-a na životnu sredinu.

Sadržaj metala u eluatima nakon sprovednog ispitivanja izluživanja betona prikazan je u tabeli 6.39. Za prikaz su izabrani metali koji se najčešće javljaju kao opasni, odnosno otrovni u različitim vrstama sedimenata ili materijala. Može se videti da su sve vrednosti koncentracije takvih metala daleko manje od 1 mg/kg, što je daleko ispod graničnih vrednosti propisanih Pravilnikom. Kadmijum, olovo i živa, kao najizrazitiji predstavnici opasnih materija, nalaze se takođe u dozvoljenim granicama. U 1 m³ betona sa najvećim procentom učešća stakla (*WG35*) ima oko 140 kg sprasenog stakla. Kod ove betonske mešavine katodno staklo ima maseno učešće od oko 6% i ovaj beton se s pravom smatrao potencijalno "najopasnijim". Međutim, dobijeni rezultati hemijske analize eluata ovog betona nedvosmisleno ukazuju da on ne predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi. U slučaju ostalih betonskih mešavina maseno učešće stakla u 1 m³ je manje od 6% tako da je koncentracija potencijalno opasnih materija u eluatu još manja.

Jedno od pratećih ispitivanja tokom procesa izluživanja je bila provera elektroprovodljivosti i pH vrednosti (*tabela 6.37.*). Mera aktivnosti vodonikovih jona u rastvoru - pH vrednost svih eluata kreće se oko 12 što odgovara baznoj sredini.

Tokom opstrujavanja vode oko uzoraka betona očekivano je da će doći do rastvaranja $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Njegova pojava je uobičajena i u praksi se može primetiti u vidu nagomilanog belog sloja na površini betona tokom negovanja uzoraka u vodi u laboratoriji. Sa druge strane, u procesu pucolanske reakcije, katodno staklo "troši" slobodan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za stvaranje produkata koji su slični C-S-H fazi. Na taj način smanjuje se njegovo prisustvo, što je u skladu sa prikazanim rezultatima.

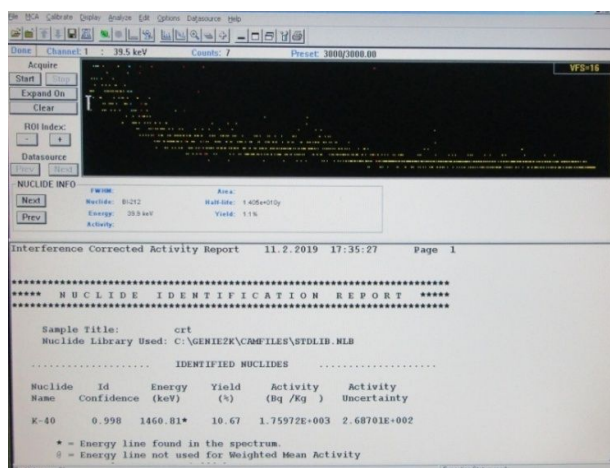
Prisustvo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u vodi utiče na povećanje elektroprovodljivosti rastvora. Ideja ispitivanja elektroprovodljivosti je upravo i bila da se ovim merenjem, posredno, dokaže pucolanska aktivnost stakla. Na osnovu rezultata elektroprovodljivosti izraženim u mikrosimensima (μS) u tabeli 6.37. može se primetiti da se sa povećanjem udela stakla u betonskim mešavinama elektroprovodljivost smanjuje, što je u korelaciji sa smanjenjem količine slobodnog $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Na ovaj način je prethodno izneta pretpostavka dokazana.

7.7.7. Radioaktivnost

Materijal za koji se utvrdi da ima vrednost gama indeksa I jednak ili veći od jedinice može uzrokovati prekorećenje propisanog referentnog nivoa gama zračenja. Pravilnikom [127] je definisana indikativna lista građevinskih materija koji se razmatraju u smislu emitovanja gama zračenja. Podeljeni su u dve grupe: prirodni materijali i materijali koji sadrže ostatke iz industrija koje obrađuju prirodni radioaktivni materijal. U okviru ove druge grupe navedeni su: leteći pepeo, fosforna šljaka, kalaj i bakarna šljaka, crveni mulj kao ostatak iz proizvodnje aluminijuma, ostaci iz procesa proizvodnje gvožđa. Važno je pomenuti da se katodno staklo ne nalazi na ovom spisku, što bi se u budućnosti moglo očekivati.

Izmerene vrednosti rezultata ispitivanja radioaktivnosti katodnog stakla, usitnjenog etalon betona i betona WG35 prikazane su u tabeli 6.40. Gama indeks (I) koncentrovanog stakla iznosi 0,876, što je manje od 1. prema Pravilniku [127] za materijal za koji se utvrdi da ima $I \geq 1$ neophodno je sračunati nivo efektivne doze. Ukoliko je premašena doza od 1 mSv onda Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Republike Srbije procenjuje da li se material i pod kojim uslovima može koristiti u građevinarstvu. Kod proračuna doze uzima se u obzir način korišćenja tog materijala i njegov udeo u ukupnoj građevinskoj masi.

U slučaju etalon betona i betona WG35 gama indeks je ujednačen i iznosi 0,295 i 0,359, respektivno. Svakako da su obe izmerene vrednosti daleko niže od granične. Na ovaj način se nedvosmisleno može zaključiti da i veliki procenat zamene cementa katodnim staklom neće negativno uticati na životnu sredinu i čovekovo zdravlje u smislu povećanja doze zračenja od radioaktivnosti koja potiče od CRT stakla. Izgled spektra gama zračenja u toku merenja za uzorak CRT stakla prikazan je na slici 7.36.



Slika 7.36. - Izgled spektra gama zračenja u toku merenja i deo izveštaja

7.8. SEM i EDS analiza betona

Mikroskopskim posmatranjem fino samlevenog CRT stakla (*slika 6.48., levo*) može se videti da su zrna glatkih površina sa oštrim ivicama. EDS spektroskopijom (*slika 6.48., desno*) utvrđeno je značajno prisustvo silicijuma. Takođe, prisutni su i kiseonik, natrijum, aluminijum i kalijum. S obzirom da je panelno staklo bilo premazano zaštitnim slojevima tokom upotrebnog perioda elektronskog uređaja, EDS spektroskopijom je utvrđeno prisustvo barijuma i stroncijuma u tragovima, koji upravo potiču iz pomenutih zaštitnih slojeva.

Tekstura etalon betona je kompaktna i homogena (*slika 6.49.a*). Tekstura betona WG15 (*6.49.b*) je takođe homogena, pri čemu je na većem delu uzorka površina potpuno ravna. U slučaju serije WG20 tekstura postaje hrapavija i poroznija (*slika 6.49.c*), dok kod serije sa maksimalnim učešćem stakla WG35, tekstura postaje još hrapavija i dodatno porozna (*slika 6.49.d*). Dodatak samlevenog stakla 10% u odnosu na masu cementa (*WGD10*), tekstura betona vizuelno deluje bolje nego kod etalon betona. Veći deo snimljene površine deluje potpuno kompaktno i glatko (*slika 6.49.f*), nešto slično kao i kod betona WG15. Ovako dobar izled teksture pomenutih betona WG15 i WGD10 je u saglasnosti sa izuzetno dobrim

fizičko - mehaničkim karakteristikama ovih betonskih mešavina koje nadmašuju karakteristike samog etalon betona.

Na slici etalon betona (6.50., *levo*) uokvirena je lokacija čiji EDS spektar odgovara C-S-H gelu. EDS spektroskopijom utvrđeno je značajno prisustvo silicijuma, kalcijuma i aluminijuma. Takođe, prisutni su natrijum, kalijum i gvožđe. Navedeni elementi su u odnosu koji je običajan za hidrate cementa.

Na osnovu EDS sprekttra betona WG15, koji je označen slovom "A" (*slika 6.51.*) može se zaključiti da ravna i relativno glatka površina pripada C-S-H fazi. I u slučaju ciljane lokacije "B" takođe je potvrđeno da se radi o C-S-H gelu. Spektar "C" je karakterističan jer predstavlja zrno CRT stakla okruženo hidratom. Zrno je čvrsto vezano za cementnu matricu. Utvrđeno je veće prisustvo natrijuma i naročito kalijuma, što se u velikoj meri poklapa sa EDS spektrom čistog stakla.

Na osnovu EDS sprekttra "A" betona WG20 (*slika 6.52., desno*) može se zaključiti da ciljane tačka uzorka pripada zrnu agregata, gde se jasno uočava tranzitna zona na kontaktu zrna agregata i C-S-H gela. Dominantno je prisustvo silicijuma, dok je kalcijum jedva uočljiv. U tački "B" dobija se veoma sličan spektar kao i u tački "A". EDS spektri ciljanih lokacija "A" i "B", *slika 6.53.*, ukazuju na C-S-H fazu u cemetnoj matrici.

Povećano prisustvo natrijuma može da ukaže da je EDS spektrom kod uzorka betona WG35 (*slika 6.54.*) obuhvaćeno zrno CRT stakla. Kao što je to prethodno utvrđeno EDS analizom, CRT staklo sadrži natrijum u izvesnoj meri. S obzirom na skoro zanemarljivo učešće kalcijuma nije reč o C-S-H fazi. Sa druge strane, ako se pogleda veličina pika silicijuma ona odgovara koncentraciji silicijuma u CRT staklu (*slika 102-1 desno*), dok je kod zrna agregata silicijum znatno prisutniji (*na primer EDS spektri na slici 102-4*). Posmatrano zrno CRT stakla deluje slobodno, bez dobre veze sa cementnom matricom. Ovo bi moglo da posluži kao objašnjenje za značajno manje mehaničke čvrstoće ove betonske serije u odnosu na ostale betone sa zamenom cementa CRT-om. S druge strane, fino samlevena zrna stakla mogu imati ulogu zaptivača što rezultuje smanjenim prodorom vode kroz takve betone.

Prisustvo natrijuma i barijuma kod EDS spektara "A" i "B" uzorka betona WGD10 nedvosmisleno ukazuje na prisustvo CRT stakla (*slika 6.48.*). Može se primetiti da su zrna stakla dobro povezana sa cementnom matricom što je rezultovalo i većim mehaničkim čvrstoćama u odnosu na etalon beton.

Na posmatranim uzorcima betona, SEM i EDS analize nisu ukazale na prisustvo nepoželjne alkalno - silikante reakcije, tačnije A-S-R gela, što je u saglasnosti sa prethodnim eksperimentalnim istraživanjima [66].

8. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

8.1. Završna razmatranja

Ubrzani razvoj tehnologije doveo je do toga da se pre desetak godina u jako kratkom vremenskom periodu proizvodnja televizijskih i kompjuterskih ekrana sa katodnim cevima obustavi i usmeri u pravcu izrade TFT - LCD ekrana. Do tog trenutka je problem nagomilanog katodnog stakla bio u manjoj meri izražen, ali upravo taj momenat je doprineo da danas na otpadima širom sveta ovaj problem postane aktuelniji nego ikada. Naučnici širom sveta aktivno tragaju za rešenjem upotrebe CRT stakla za izradu novih proizvoda. Njegov hemijski sastav je takav da proces reciklaže mora da zadovolji posebne uslove koji važe za otpad koji je označen "opasnim". Dosadašnja praksa naše zemlje je bila da se staklo izvozi u Zapadnu Evropu i to na taj način što država mora da plati za taj izvoz. Autoru je i pored opsežne pretrage naučne literature ostalo nepoznato da li je na prostoru Balkana rešenje za CRT staklo traženo u građevinarstvu, tačnije u oblasti tehnologije izrade maltera i betona. U tom smislu, jedina mogućnost za potvrdu sprovedenih rezultata ispitivanja maltera i betona modifikovanih dodatkom CRT stakla je bila u publikacijama istraživača iz Azije, pre svih profesora Chi Sun Poona i saradnika (*Univerzitet u Hong Kongu*) koji su vršili opsežna istraživanja upotrebe CRT stakla u ovoj oblasti. Ostali autori su se pretežno bavili ispitivanjem mogućnosti izrade maltera i betona sa nekim drugim vrstama staklenog otpada, kao na primer: dekorativnog kristalnog stakla, stakla fluorescentnih lampi, staklene ambalaže, fasadnog stakla, otpadnog staklenog mulja koji je nus produkt procesa poliranja stakla itd. Ovi radovi su takođe u određenoj meri pomogli pri analizi i verifikaciji dobijenih sopstvenih rezultata ispitivanja.

Na osnovu sprovedenog eksperimentalnog istraživanja može se izvesti niz zaključaka u pogledu uticaja zamene/dodatka fino samlevenog recikliranog stakla od katodnih cevi na svojstva cementne paste, maltera i betona.

Zaključci izvedeni na osnovu rezultata ispitivanja CRT stakla i cementne paste:

1. Eksperimentalno CRT staklo finoće ispod 0,063 mm je pucolanski aktivno i ima klasu 5 prema standardu SRPS B.C1.018:2015 [116]. Pucolanska aktivnost CRT stakla je naročito izražena u periodu od 28. dana do 90. dana, što je utvrđeno većim prirastom čvrstoća malterskih i betonskih serija sa zamenom/dodatkom stakla u navedenom periodu u odnosu na referentnu seriju bez prisustva stakla;

2. Iako CRT staklo ne spada u prirodne pucolane, na osnovu hemijskog sastava stakla može se zaključiti da je učešće oksida $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ malo manje od minimalno zahtevanih 70%, uz minorno prisustvo SO_3 , što gotovo da zadovoljava neophodne uslove za prirodne pucolane definisane standardom ASTM C 618-15 [135];
3. Pikovi sa XRD difraktograma uzorka CRT stakla ukazuju na prisustvo amornog SiO_2 , pri čemu oštar pik na 40 ukazuje i na prisustvo SiO_2 u kristalnoj formi. Dakle eksperimentano staklo sadrži dovoljno amornog SiO_2 potrebnog za odvijanje pucolanske reakcije u cementnoj matrici;
4. Prethodnim ispitivanjem alkalno - silikatne reakcije stakla (*poglavlje 5.4., standard ASTM C227*) utvrđeno je da serija sa najvećim procentom zamene cementa staklom WG35 ima manje izduženje od kritičnog +0,10% definisanom prema standardu ASTM C33 i čak 23% manju ekspanziju od samog etalona, čime je nedvosmisleno dokazano da CRT staklo finoće 0/0,063 mm ne dovodi do pojave ASR u eksperimentalnim malterima i betonima do navedenog nivoa zamene;
5. Sa povećanjem dodatka stakla u pasti dolazi do smanjenja potrebne količine vode za postizanje standardne konzistencije. Samleveno staklo koristi vodu za kvašenje svoje površine, ali je ne upija, čime se može objasniti ovakav trend. Ovaj rezultat je u saglasnosti sa rezultatima istraživanja [40];
6. Istraživanjem nije utvrđen veći uticaj stakla na vreme vezivanja i stalnost zapremine cementne paste;

Zaključci izvedeni na osnovu rezultata ispitivanja cementnog maltera:

1. Merenjem rasprostiranja maltera na potresnom stolu utvrđeno je da nema većeg uticaja zamene - dodatka stakla na promenu konzistencije maltera, tako da je prosečna vrednost rasprostiranja iznosila oko 125 mm. Ovaj rezultat je u saglasnosti sa ispitivanjem [37];
2. Sadržaj uvučenog vazduha u svim malterskim mešavinama je ujednačen i kreće se oko 8%;
3. Sa povećanjem količine zamene dela cementa CRT staklom dolazi do smanjenja pritiskih čvrstoća maltera i to pri svim starostima. Najveći pad čvrstoća je prisutan kod maltera sa najvećim udelom stakla WG20 i WG35 i to pri ranim ispitivanjima čvrstoća na 2 i 7 dana. Nakon tog perioda razlika u čvrstoćama etalona i serija sa zamenom cementa staklom nešto je manja. U literaturi se ovakav trend "zakasnelog" povećanja

- prirasta čvrstoća maltera sa dodatkom stakla objašnjava prirodom procesa pucolanske aktivnosti stakla;
4. Malteri sa dodatkom stakla WGD5 i WGD10 su imali veće pritisne čvrstoće od etalon maltera pri svim starostima, tako da je pri ispitivanju na 90 dana njihova pritisna čvrstoća bila veća za 5,04% i 6,54% u odnosu na etalon seriju, respektivno;
 5. Zamena cementa staklom do 15% uslovljava neznan pad savojne čvrstoće pri starosti od 90 dana. Najveći pad savojne čvrstoće zabeležen je kod maltera sa 35% zamene cementa staklom, ali i u ovom slučaju to nije značajno smanjenje - svega 8,45%;
 6. Malteri sa dodatkom stakla imaju bolje rezultate savojnih čvrstoća od etalona. Malteri WGD5 i WGD10 imaju 5,41% i 9,23% veće savojne čvrstoće od etalona pri starosti od 90 dana;
 7. Sve malterske serije se mogu smatrati postojanim u pogledu delovanja mraza s obzirom da nije zabeleženo smanjenje pritisne čvrstoće veće od 25%;
 8. Nije utvrđen veći uticaj zamene cementa CRT-om na promenu zapreminske mase očvrslog maltera u vodozasićenom stanju što se može smatrati očekivanim s obzirom na vrednosti specifične mase cementa i samlevenog katodnog stakla kao i procentualnog učešća ovih materijala u malterskoj mešavini;
 9. Utvrđeno je da sa povećanjem zamene cementa fino samlevenim staklom dolazi do smanjenja skupljanja maltera. Najmanje skupljanje je izmereno kod serije WG35. Dodatak CRT-a malteru od 5% i 10%, po masi cementa, smanjuje skupljanje maltera za oko 20%. Pri ispitivanju na 360 dana, malterske mešavine WGS20 i WGS35 imaju najpovoljnije rezultate skupljanja, 18,28% i 27,96% manje skupljanje od referentnog maltera, respektivno. Dobijeni rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima Her-Yung Wanga u radu [40];
 10. Na osnovu sprovedene SEM analize uzoraka maltera može se primetiti da je sa povećanjem nivoa zamene cementa staklom došlo do izvesnog gubitka kompaktnosti teksture, čime je ona postala poroznija i hrapavija. Sa druge strane, dodavanjem stakla do nivoa do 10% u odnosu na masu cementa tekstura maltera je ostala gotovo nepromenjena, iz čega se može zaključiti da se čestice stakla kod maltera sa dodatkom stakla dobro vezuju sa ostalim njegovim komponentama;

Zaključci izvedeni na osnovu rezultata ispitivanja betona:

1. Zapreminska masa svežeg betona se praktično ne menja bez obzira na procenat zamene/dodatka CRT-a. Kod serije sa najvećim učešćem stakla u mešavini - WG35 smanjenje zapreminske mase iznosi nešto manje od 1%. Razlika vrednosti specifičnih masa cementa ($3,15 \text{ g/cm}^3$) i katodnog mlevenog stakla ($2,84 \text{ g/cm}^3$) nije velika tako da uzevši u obzir još i procentualno maseno učešće stakla u 1 m^3 betona, može se objasniti zašto nije došlo do većih promena vrednosti zapreminske mase; Eksperimentalne serije betona sa zamenom/dodatkom stakla imaju nešto veći procenat uvučenog vazduha od etalona. Do nivoa zamene cementa staklom do 15% sadržaj uvučenog vazduha se povećava, dok sa daljim povećanjem zamene dolazi do smanjenja uvučenog vazduha. Ovom prilikom je teško utvrditi jasan uticaj prisustva fino samlevenog katodnog stakla na ovu osobinu svežeg betona. S obzirom da je vrednost uvučenog vazduha već u slučaju referentne serije iznad uobičajene vrednosti od 2%, pritom uzimajući u obzir da aditivi tipa aeranta nisu korišćeni, može se pretpostaviti da i sam superplastifikator dovodi do povećanog uvlačenja vazduha u mešavinu;
2. Ispitivanjem zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju utvrđeno je da prisustvo stakla nema većeg uticaja na ovu osobinu očvrslog betona. Do nivoa zamene cementa staklom do 35% po masi zapreminska masa očvrslog betona se ne menja više od $\pm 1\%$;
3. Pri ranoj starosti betona na 2 i 7 dana, etalon serija ima najveće vrednosti pritisne čvrstoće. Za period ranih starosti (*mlad beton*) bi se preliminarno moglo zaključiti da se sa povećanjem zamene cementa CRT-om smanjuju pritisne čvrstoće betona i da je to smanjenje utoliko veće ukoliko je nivo zamene veći. Međutim, ispitivanjem čvrstoće pri pritisku na 28 dana prethodno izneti zaključak se mora delimično korigovati. Pri pomenutoj starosti serija WG15 dostiže vrednost čvrstoće pri pritisku etalona dok ostale serije imaju i dalje manje čvrstoće. Pri starosti od 90 dana, serije WG15 ima 3,6% veću pritisnu čvrstoću od etalona, dok su serije WG10 i WG20 značajno smanjile zaostatak za referentnom serijom. Finalno ispitivanje na 180 dana je pokazalo da najveću čvrstoću pri pritisku ima serija WG15 i to za oko 9,4% više od etalona. Takođe, serije WG10 i WG20 su u potpunosti dostigle pritisne čvrstoće etalona. Pri ovoj starosti, kod serije WG35 zabeležen značajan pad čvrstoće - 24,8%;

4. Uticaj zemene dela cementa staklom na promenu čvrstoće pri pritisku u korelaciji je sa rezultatima ispitivanja autora [51-52, 54]. Objašnjenje se može naći u procesu pucolanske aktivnosti stakla. Priroda pucolanske reakcije stakla je takva da se ona odigrava kasnije u odnosu na proces hidratacije cementa i da je najintenzivnija posle 28 dana. Time se može objasniti zašto se smanjuje razlika između postignutih vrednosti pritisnih čvrstoća etalon betona i betonskih serija sa zamenom do 20% cementa staklom u eksperimentalnom istraživanju ove doktorske disertacije;
5. Betoni sa dodatkom 5% i 10% CRT-a stakla na celokupnu količinu cementa imaju najveće pritisne čvrstoće pri svim starostima. Pri starosti od 180 dana, serije WGD5 i WGD10 imaju 13,5% i 20,9% veće vrednosti pritisne čvrstoće od referentne serije, respektivno. Dobijeni rezultati su u korelaciji sa rezultatima Ali Aliabda i saradnika [35] koji su zaključili da dodavanje stakla celokupnoj količini cementa do 15% utiče na povećavanje čvrstoće pri pritisku betona;
6. Rezultati ispitivanja pri starosti od 28 i 90 dana pokazuju da betoni sa zamenom dela cementa recikliranim staklom do nivoa od 20% imaju međusobno ujednačene vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Do navedenog nivoa zamene najveće smanjenje zatezne čvrstoće iznosi oko 11% u odnosu na referentnu seriju;
7. Betoni sa dodatkom stakla su imali veću vrednost zatezne čvrstoće od etalona. Prilikom ispitivanja zatezne čvrstoće na 90 dana, serije WGD5 i WGD10 su imale 15,8% i 19,9% veće vrednosti čvrstoće u odnosu na referentnu seriju, respektivno. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem u korelaciji su sa rezultatima istraživanja [35];
8. Pri starosti od 28 dana, betoni sa zamenom dela cementa staklom imaju manje vrednosti savojne čvrstoće od etalona, pri čemu je najveće smanjenje savojne čvrstoće izmereno kod serije WG35 - 27,3%. Pri ispitivanju sprovedenom na 90 dana, serije do nivoa zamene stakla do 15% imaju neznatno manje savojne čvrstoće od etalona. Na primer, serija WG15 ima svega 3,5% manju savojnu čvrstoću od referentne serije. Između 28. i 90. dana došlo do veoma slabog prirasta savojne čvrstoće kod etalona (svega 3,7%), dok je kod serija sa zamenom dela cementa prirast savojne čvrstoće bio znatno više izražen. Na primer, kod betona WG15 to povećanje iznosi 21,3%, što se može okarakterisati kao značajno. Objašnjenje za intenzivan kasniji prirast savojne čvrstoće serija sa zamenom cementa staklom se može naći u poboljšanju kvaliteta tranzitne zone zbog pojave zakasnele pucolanske reakcije između čestica stakla i kalcijum hidroksida što je rezultiralo stvaranjem C-S-H;

9. Dodatkom usitnjenog CRT stakla do nivoa do 10% na celokupnu količinu cementa poboljšava se čvrstoća pri zatezanju savijanjem betona u odnosu na etalon. Serija sa 10% dodatka stakla, pri ispitivanju na 90 dana, imala je 11,5% veću savojnu čvrstoću od referentne serije;
10. Zamena cementa CRT staklom do 20% praktično nema uticaja na promenu čvrstoće prionjivosti betona (*"Pull - off" test*). Značajnije smanjenje se može primetiti kod betona sa 35% zamene cementa staklom i ono iznosi oko 21% u odnosu na etalon;
11. Do nivoa zamene cementa staklom do 20%, vrednosti odskoka sklerometra i etalona su ujednačene pri ispitivanju na 90 dana. Zamena cementa staklom od 35% uslovljava niže vrednosti odskoka sklerometra za oko 15%. Betoni sa dodatkom stakla na celokupnu količinu cementa imaju veće vrednosti odskoka od etalon betona pri svim starostima. Statističkom obradom rezultata ispitivanja je utvrđeno da je zavisnost između vrednosti odskoka sklerometra i čvrstoće pri pritisku betona polinomna funkcija drugog stepena sa koeficijentom korelacije bliskim jedinici.
12. Sastav betona, odnosno komponentni materijali od kojih se on spravlja, utiču na brzinu ultrazvuka. To je potpuno logično jer od svojstava komponenti i njihovog udela zavise svojstva betona. Navedeno se svakako odnosi i na čvrstoću pri pritisku sa kojom se brzina ultrazvuka često dovodi u korelaciju. U eksperimentalnom istraživanju na brzinu ultrazvuka uticao je i dostignuti nivo razvoja produkata pucolanske aktivnosti stakla, što se najbolje može primetiti kod serije WG15. Beton sa 10% dodatka fino samlevenog stakla imao je najveće izmerene brzine ultrazvuka u odnosu na sve ostale eksperimentalne betonske mešavine. Statističkom obradom rezultata ispitivanja je utvrđeno da je zavisnost između vrednosti brzine ultrazvučnog talasa i čvrstoće pri pritisku betona eksponencijalna funkcija sa koeficijentom korelacije bliskim jedinici.
13. Ispitivanjem statičkog modula elastičnosti pri starosti od 28 dana, utvrđeno je da do nivoa zamene cementa staklom do 15% nema značajnijeg smanjenja modula elastičnosti u odnosu na referentnu mešavinu. Betoni WG20 i WG35 imaju 7,14%, odnosno 12,30% manje vrednosti modula elastičnosti od etalona pri pomenutoj starosti. Pri starosti od 90 dana, kod svih betonskih serija do 20% zamene cementa staklom izmeren je gotovo isti modul elastičnosti kao i kod referentne serije, dok je serija WG35 imala 9,73% niži modul elastičnosti. Mogući uticaj prisustva stakla na modul elastičnosti betona može se ogledati kroz prirast njegove vrednosti u periodu od 28. do 90. dana. U navedenom vremenskom intervalu modul elastičnosti etalon betona

se povećao za 1,22 GPa, dok je kod serija sa zamenom cementa staklom povećanje modula elastičnosti iznosilo od 2,02 GPa do 3,5 GPa u proseku. Navedeni rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima rada Omrana i saradnika [55] gde je zaključeno da betoni sa 30% zamene cementa staklom ima veći modul elastičnosti od betona sa 10% zamene cementa staklom pri starosti od 90 dana.

14. Betoni sa dodatkom stakla na celokupnu količinu cementa imaju niži vodovezivni faktor od etalona što je imalo uticaja na smanjenje poroznosti cementne matrice. To je imalo povoljan efekat na statički modul elastičnosti ovih betona. Beton WGD10 ima veće vrednosti modula elastičnosti od etalona pri merenju na 28 i 90 dana.
15. Upoređivanjem eksperimentalnih rezultata modula elastičnosti sa vrednostima dobijenih iz empirijskih jednačina za modul elastičnosti iz domaćeg Pravilniku za beton i armirani beton i Evrokoda 2 za proračun betonskih konstrukcija može se primetiti zadovoljavajuća podudarnost. Rezultati prema empirijskoj formuli iz EC2 su bliži eksperimentalnim rezultatima, dok su rezultati prema PBAB-u nešto veći za sve betonske serije.
16. Sa povećanjem nivoa zamene cementa CRT - om dolazi do smanjenja potrebne energije potrebne za pojavu prve prsline pri udarnom opterećenju. Isti trend je prisutan i u slučaju utrošene ukupne energije, pri udarnom opterećenju, koja dovodi do loma betonskih uzoraka. Sa druge strane dodatak stakla na celokupnu količinu cementa uticao je na poboljšanje udarne otpornosti betona. Iako ne postoji direktna funkcija koja bi mogla da poveže udarnu otpornost i čvrstoću pri pritisku betona, u predmetnom ispitivanju rezultati udarne otpornosti u velikoj meri odgovaraju i međusobnim odnosima pritisnih čvrstoća betonskih mešavina.
17. Zamena dela cementa usitnjenim katodnim staklom do nivoa od 35% dovodi do smanjenja skupljanja betona u prvih 90 dana. U periodu od 90. dana pa do 180. dana, usled intenziviranja procesa pucolanske reakcije stakla, skupljanje pomenutih serija se približava vrednosti skupljanja etalona. Dodatak 5% stakla na celokupnu količinu cementa nema uticaja na promenu skupljanja betona, dok dodatak od 10% stakla smanjuje skupljanje betona za oko 16% u odnosu na referentnu seriju. Ovde još jednom treba naglasiti da su ovi betoni spravljani sa nižim vodovezivnim faktorom što direktno utiče na vrednosti skupljanja.
18. Može se primetiti da se sa povećanjem procenta zamene cementa CRT staklom do 20% smanjuje upijanje vode kod takvih betona u odnosu na etalon. Betoni WG15 i WG20 imaju 10,18% i 11,41% manje upijanje vode od referentne serije, respektivno.

Smanjenje upijanja vode može biti indikator poboljšanja trajnosti betona. U slučaju dodatka CRT stakla na celokupnu količinu cementa takođe dolazi do smanjenja upijanja vode u odnosu na referentni beton. Najmanje upijanje vode izmereno je kod serije WGD10 - 17,52% manje u odnosu na etalon beton. Navedeni rezultati su u saglasnosti sa istraživanjima [35] i [55].

19. Zamenom cementa finim katodnim staklom do nivoa do 15% ne smanjuje se trajnost betona u pogledu delovanja mraza. Pri delovanju 200 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja gornjom granicom nivoa zamene bi se mogla smatrati vrednost od 20% po masi cementa, a da pritom postojanost betona ne bude dovedena u pitanje. Pregledom literature utvrđeno je da su i drugi istraživači prilikom ispitivanja delovanja mraza na beton sa dodatkom recikliranog staklenog praha utvrdili da su oni otporni na ovu vrstu delovanja [53, 54].
20. Betoni sa zamenom cementa katodnim staklom do 15%, kao i betoni sa dodatkom stakla do 10% na celokupnu količinu cementa mogu se smatrati postojanim prema jednovremenom delovanju mraza i soli za odmrzavanje. Slabo ljuštenje sva tri betonska uzorka javilo se kod serije WG20, pa je prema standardu SRPS U.M1.055 stepen oštećenja ove serije MS "1", čime se i ovaj beton može smatrati otpornim na ovu vrstu delovanja. Srednji stepen oštećenja MS "2" primećen je kod serije WG35, što odgovara stepenu oštećenja MS "2" čime se ova serija smatra nepostojanom na ovo delovanje. Dobijeni rezultati su u delimičnoj saglasnosti sa rezultatima ispitivanja Kima i saradnika [53] i Lee - a i saradnika [42].
21. Sve eksperimentalne betonske mešavine se mogu smatrati otpornim prema delovanju vode pod pritiskom u skladu sa standardom SRPS U.M1.015:1998 [96]. Serija sa najvećim procentom zamene cementa staklom - WG35 ima veoma mali prodor vode pod pritiskom, što može da ukaže da su fino samlevena zrnca stakla imala ulogu zaptivača u betonu. Najveći prodor vode izmeren je kod serija sa 20% zamene cementa staklom i iznosi 20 mm.
22. Vizuelnim pregledom uzoraka eksperimentalnih betona nakon godinu dana čuvanja u 5% rastvoru Na_2SO_4 nije utvrđena pojava oštećenja, ljuskanja i osipanja uzoraka. Najveći pad čvrstoća uzoraka negovanih u natrijum - sulfatu nakon 3, 6, i 12 meseci iznosio je oko 10% kod serije WG10, dok je kod ostalih betona ovaj pad u odnosu na etalon uzorke negovane u zasićenom rastvoru kalcijum - hidroksida bio znatno manji. Uzimajući u obzir nepromenjen izgleda uzoraka kao i relativno malu promenu pritisnih čvrstoća uzoraka negovanih u sulfatnom rastvoru u odnosu na etalone, može

- se zaključiti da su svi eksperimentalni betoni otporni na delovanje sulfata pri izloženosti u periodu od godinu dana. U ovom trenutku, nakon godinu dana ispitivanja ne može se sa sigurnošću reći kakav je uticaj prisutnog CRT stakla na ovu vrstu otpornosti betona. Predmetno ispitivanje je u toku i nakon negovanja od 2 i 3 godine ponovo će se ocenjivati otpornost na dejstvo sulfata.
23. Betonske mešavine sa zamenom cementa staklom do 20% imaju ujednačene vrednosti habanja brušenjem prema Bemeu. U slučaju betona sa najvećim procentom zamene - WG35 može se primetiti smanjenje otpornosti prema habanju za 7,5% u odnosu na referentnu seriju. Betoni sa dodatkom stakla, i pored boljih mehaničkih čvrstoća u odnosu na etalon, imaju nešto manju otpornost prema habanju. Mikroskopskom analizom čistog usitnjenog stakla može se uočiti da su zrna glatke površine i sa ostrim ivicama. Očigledno da u ovom slučaju kvalitet tranzitne zone između zrna usitnjenog stakla i cementne matrice, kao i mikro tekstura površine betona, uslovljavaju upravo ovakve rezultate otpornosti prema habanju.
24. Sadržaj koncentracije metala u eluatima nakon ispitivanja izluživanja betona je takav da su sve vrednosti štetnih materija manje od 1 mg/kg, što je daleko ispod graničnih vrednosti koje propisuje naš Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje [145]. Kadmijum, olovo i živa, kao najizrazitiji predstavnici opasnih materija, nalaze se u dozvoljenim granicama. U 1 m³ betona sa najvećim procentom učešća stakla (WG35) ima oko 140 kg sprasenog stakla. Kod ove betonske mešavine katodno staklo ima maseno učešće od oko 6% i ovaj beton se s pravom smatrao potencijalno "najopasnijim". Međutim, dobijeni rezultati hemijske analize eluata ovog betona nedvosmisleno ukazuju da on ne predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi. U slučaju ostalih betonskih mešavina maseno učešće stakla u 1 m³ je manje od 6% tako da je koncentracija potencijalno opasnih materija u eluatu još manja. Generalno posmatrano, nakon sprovedenog ispitivanja izluživanja, može se zaključiti da betoni sa zamenom dela cementa panelinim katodnim staklom do 35%, odnosno dodatkom ovog stakla do 10% na celokupnu količinu cementa u mešavini, ne predstavljaju opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi.
25. Izmereni gama indeks za koncentrovano katodno staklo iznosi 0,876 (*dakle* ≤ 1), tako da se na osnovu našeg Pravilnika [127] samo staklo može koristiti kao građevinski materijal, bez opasnosti da dovede do prekoračenja referentnog nivoa spoljašnjeg zračenja u zatvorenom prostoru. Etalon beton i serija sa najvećim procentualnim

- učešćem katodnog stakla - WG35 imaju gama indekse 0,295 i 0,359, što je daleko manje od koncentrovanog stakla. Upoređenjem radioaktivnosti etalona i betona WG35 može se zaključiti da nema veće razlike u tom pogledu između ove dve vrste betona.
26. Mikroskopskim posmatranjem fino samlevenog CRT stakla može se videti da su zrna glatkih površina sa oštrim ivicama. EDS spektroskopijom utvrđeno je značajno prisustvo silicijuma. Takođe, prisutni su i kiseonik, natrijum, aluminijum i kalijum. S obzirom da je panelno staklo bilo premazano zaštitnim slojevima tokom upotrebnog perioda elektronskog uređaja, EDS spektroskopijom je utvrđeno prisustvo barijuma i stroncijuma u tragovima, koji upravo potiču iz pomenutih zaštitnih slojeva.
27. Na posmatranim uzorcima betona, SEM i EDS analize nisu ukazale na prisustvo nepoželjne alkalno - silikante reakcije, tačnije A-S-R gela, što je u saglasnosti sa prethodnim eksperimentalnim istraživanjima [66].
28. Prisustvo natrijuma i barijuma kod EDS spektara "A" i "B" uzorka betona sa 10% dodatka stakla na celokupnu količinu cementa (*WGD10*) nedvosmisleno ukazuje na prisustvo CRT stakla. Zrna stakla su dobro povezana sa cementnom matricom što je rezultovalo i većim mehaničkim čvrstoćama u odnosu na etalon beton.

Uzimajući u obzir sve navedene rezultate ispitivanja sprovedenih na malterima, fino samleveno katodno staklo može poslužiti kao adekvatna zamena za deo cementa. Eksperimentom je utvrđeno da do nivoa zamene cementa samlevenim CRT staklom u količini do 15% ne treba očekivati značajnije smanjenje mehaničkih čvrstoća uz očuvanje trajnosti maltera. Sa druge strane, dodatak CRT stakla do nivoa do 10% uticaće na poboljšanje kako mehaničkih svojstava tako i trajnosti maltera.

Zamena dela cementa fino samlevenim CRT staklom do količine od 15% povoljno utiče na mehaničke čvrstoće betona u smislu njihovog povećanja. Trajnost betona do navedene zamene cementa staklom takođe nije narušena. Gornjom granicom zamene dela cementa staklom kod betonskih mešavina može se smatrati vrednost do 20% po masi, pri čemu su tada mehaničke čvrstoće betona neznatno smanjuju dok je trajnost u pogledu delovanja mraza i soli za odmrzavanje diskutabilna. Dodavanjem stakla do 10% na celokupnu količinu cementa poboljšavaju se kako mehaničke čvrstoće tako i trajnost beton. Rezultati izluživanja betona sa CRT staklom potvrđuju da ovi betoni ne predstavljaju ekološki problem za životnu sredinu što je od izuzetnog značaja za njihovu praktičnu primenu. Iz svega prethodno navedenog može se konstatovati da su sve polazne hipoteze dokazane ovim eksperimentalnim istraživanjem.

8.2. Pravci daljeg istraživanja

Prema metodologiji koja je primenjena za CRT staklo treba proveriti mogućnost primene drugih vrsta otpadnih stakala: dekorativno kristalno staklo, staklo fluorescentnih lampi, staklena ambalaža, fasadno staklo, staklo očišćeno od štetnih hemijskih supstanci (*glass cullet*), otpadni stakleni mulj koji je nusprodukt procesa poliranja i obrade stakla (*glass sludge*) i u novije vreme staklo od TFT – LCD ekrana. Poslednje navedeno staklo je naročito interesantno jer će se njegove količine u budućnosti enormno uvećavati.

Veoma mali broj istraživanja bavio se upotrebom otpadnog stakla za izradu betonskih blokova i ploča za popločavanje. U literaturi nije pronađen primer upotrebe CRT stakla za izradu habajućeg sloja betonskih prefabrikata. S obzirom na veliku primenu betonskih blokova i ploča za popločavanje u građevinarstvu, jedno opsežno ispitivanje upotrebe CRT stakla u ovoj oblasti bi moglo da posluži kao pravac daljeg istraživačkog rada. Naravno, poseban akcenat bi se i u ovom slučaju morao dati trajnosti takvih proizvoda. Ukoliko bi se koristila krupnija zrna stakla od oko 1 mm, ispitivanje ASR bi bilo na prvom mestu, a s obzirom na izloženost ovakvih površina dejstvu atmosferilija, ispitivanje izluživanja bi takođe bilo neophodno.

Još jedan mogući pravac daljih istraživanja jeste upotreba CRT stakla za spravljanje samougrađujućeg betona (SCC). U tom slučaju bi bilo neophodno ispitati svojstva svežeg i očvrslog SCC betona kod koga bi katodno staklo imalo ulogu praškastog mineralnog dodatka. Tako modifikovan SCC beton mogao bi da posluži za izradu betonskih prefabrikata tipa ivičnjaka. S obzirom da bi staklo u ovom slučaju imalo ulogu filera, njegova finoća bi mogla da bude i nešto manja od one korišćene u ovoj doktorskoj disertaciji. Svakako da bi i u ovom slučaju provera trajnosti kako samog betona tako i gotovog proizvoda bila posebno važna.

Pregledom literature utvrđeno je da u jednom delu radova otpadno staklo različitih vrsta korišćeno kao punilac, odnosno kao zamena za deo prirodnog agregata pri izradi maltera i betona. U takvim slučajevima, veoma čest problem je bila pojava alkalno - silikatne reakcije. U cilju sprečavanja te pojave, autori su malterima i betonima dodavali različite mineralne dodatke: leteći pepeo, zguru, silikatnu prašinu, metakaolin, a u nekim slučajevima vršeno je dodavanje i litijum - karbonata (Li_2CO_3) i litijum - nitrata ($LiNO_3$). U cilju uštede energije i sredstava za fino mlevenje recikliranog stakla, jedan od pravaca daljih istraživanja bi mogao biti usmeren upravo na korišćenju predmetnog CRT stakla frakcije 0/4 mm sa kombinacijom nekih drugih mineralnih dodataka koji bi poslužili za sprečavanje neželjene alkalno - agregatne reakcije.

Nastavak predmetnog istraživanja bi se mogao ogledati u primeni nekog pogodnog kompjuterskog softvera kojim bi se izvršila ocena životnog ciklusa materijala - LCA (*Life - Cycle Assessment*). Na ovaj način bi se proučili aspekti zaštite životne sredine i mogući uticaji na životnu sredinu tokom celokupnog životnog veka proizvoda, počev od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje, upotrebe i postupanja na kraju životnog ciklusa, recikliranja i konačnog odlaganja.

Veoma važan pravac daljeg istraživanja bila bi izrada tehno - ekonomske analize opravdanosti upotrebe CRT stakla kao komponentnog materijala za spravljanje cementa, maltera i betona. U tu svrhu neophodno je transparentno prijavljivanje količina prikupljenog otpadnog stakla, učešće nadležnih Ministarstava, predstavnika cementne industrije i Udruženja proizvođača betona. Pri svemu tome uvek treba imati u vidu zaštitu životne sredine koja je od najvećeg značaja kao i iskustva drugih zemalja.

9. LITERATURA

- [1] Bakshi, U.A.; Godse, A.P. (2008): "*Electronic Devices And Circuits*", Book, Vishwakarma Institute of Technology, Pune, India, Pages 964.
- [2] Komponente monitora: <https://partsofpc.wordpress.com/monitori/crt> (preuzeto: 03.02.2017.)
- [3] F. Mear, P. Yot, M. Cambon, M. Ribes (2006): "*The characterization of waste cathode-ray tube glass*", Waste Management, Volume 26, Issue 12, Pages 1468-1476
- [4] Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J. (2015): "*The global e-waste monitor – 2014*", United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany
- [5] Maria Leet Socolof, Jonathan G. Overly, Jack R. Geibig (2005): "*Envinonmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays*", Journal of Cleaner Production, Volume 13, Issues 13–14, Pages 1281-1294
- [6] Recikliranje CRT uređaja u Americi: [https://www.recyclingtoday.com/An Analysis of the Demand for CRT Glass Processing in the U.S.](https://www.recyclingtoday.com/An%20Analysis%20of%20the%20Demand%20for%20CRT%20Glass%20Processing%20in%20the%20U.S.%20) (preuzeto: 22.03.2017.)
- [7] Wanhua Yang (2008): "*Regulating Electrical and Electronic Wastes in China*", Review of European Community & International Environmental Law, Volume 17, Issue 3, Pages 335-344
- [8] Qingbu Xu, Guangming Li, Wenzhi He, Juwen Huang, Xiang Shi (2012): "*Cathode ray tube (CRT) recycling: Current capabilities in China and research progress*", Waste Management, Volume 32, Issue 8, Pages 1566-1574
- [9] Narendra Singh, Jinhui Li, Xianlai Zeng (2016): „*Global responses for recycling waste CRTs in e- waste*“, Waste Management, Volume 57, Pages 187-197
- [10] Fernanda Andreola, Luisa Barbieri, Anna Corradi, Isabella Lancellotti (2007): "*CRT glass state of the art: A case study: Recycling in ceramic glazes*", Journal of the European Ceramic Society, Volume 27, Issues 2–3, Pages 1623-1629
- [11] Environmental Protection Agency: "European Waste Catalogue and Hazardous Waste List", P.O. Box 3000, Johnstown Castle Estate, Country Wexford, Ireland
- [12] Reciklažni centar Nulifeglass: <http://www.nulifeglass.com/glass-products/glass-products.htm> (preuzeto 19.06.2017.)
- [13] Reciklažni centar Sweep Kuusakoski <http://www.sweepkuusakoski.co.uk/glassrecycling> (preuzeto 19.06.2017.)

- [14] Yuliya Kalmykova, João Patrício, Leonardo Rosado, P. EO Berg (2015): "*Out with the old, out with the new – The effect of transitions in TVs and monitors technology on consumption and WEEE generation in Sweden 1996–2014*", Waste Management, Volume 46, December 2015, Pages 511-522
- [15] Wolfgang Walk (2009): "*Forecasting quantities of disused household CRT appliances – A regional case study approach and its application to Baden-Württemberg*", Waste Management, Volume 29, Issue 2, February 2009, Pages 945-951
- [16] ADEME (2011): "Equipements électriques et électroniques", Données, Paris: Editions ADEME (Agence Nationale de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). p. 20.
- [17] Dostignuća u recikliranju: <http://blog.simsrecycling.com/2015/02/23/has-a-solution-for-end-of-life-crt-glass-been-found> (preuzeto 25.06.2017.)
- [18] Dostignuća u recikliranju: <http://resource-recycling.com/node/5705> (preuzeto 25.06.2017.)
- [19] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon (2011): "*Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar*", Journal of Hazardous Materials, Volume 192, Issue 2, Pages 451-456
- [20] "Uputstvo za upotrebu automatskog separatora CRT-a visoke brzine - Loyalty Equipment – Making Co. Ltd., Sichuan, China", Jugo – Impex E.E.R. d.o.o.
- [21] Emmanouil Dimitrakakis, Evangelos Gidarakos: "*Closed – Loop CRT Glass Recycling Alternatives*", Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Greece
- [22] Sistemi za reciklažu CRT uređaja: <http://www.mrtsystem.com/products/crt-separators> (preuzeto: 15.07.2017.)
- [23] Sistemi za reciklažu CRT uređaja: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-20/issue-9/features/recycling-television-monitors.html> (preuzeto: 15.07.2017.)
- [24] Narendra Singh, Jinhui Li, Xianlai Zeng (2016): "*Solution and challenges in recycling waste cathode-ray tubes*", Journal of Cleaner Production, Volume 133, Pages 188-200
- [25] L.M. Federico, S.E. Chidiac (2009): "*Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods*", Cement and Concrete Composites, Volume 31, Issue 8, Pages 606-610
- [26] M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo, C. Zanelli (2009): "*Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles*", Waste Management, Volume 29, Issue 6, Pages 1945-1951

- [27] Fernanda Andreola, Luisa Barbieri, Anna Corradi, Isabella Lancellotti (2007): “*CRT glass state of the art, a case study: Recycling in ceramic glazes*”, Journal of the European Ceramic Society, Volume 27, Issues 2–3, Pages 1623-1629
- [28] Qiuping Zhang, Feng He, Hao Shu, Yechu Qiao, Shuxia Mei, Mingfang Jin, Junlin Xie (2016): “*Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings*”, Construction and Building Materials, Volume 111, Pages 105-110
- [29] Miao Yu, Lili Liu, Jinhui Li (2016): “*An overall solution to cathode-ray tube (CRT) glass recycling*”, Procedia Environmental Sciences, Volume 31, Pages 887-896.
- [30] Dušan Grdić, Nenad Ristić, Gordana Topličić-Ćurčić, Zoran Grdić (2014): “*Renewable Energy Sources and Environment Friendly Materials in the Function of Sustainable Development*”, Faculty of Civil Engineering Subotica, ISSN 0352 – 6852, eISSN 2334 – 9573, DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014, Pages 837-843
- [31] Hui Zhao, Chi Sun Poon, Tung Chai Ling (2013): “*Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture*”, Construction and Building Materials, Volume 40, Pages 951-960
- [32] Hui Zhao, Sun Wei (2011): “*Study of properties of mortar containing cathode ray tubes (CRT) glass as replacement for river sand fine aggregate*”, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 10, Pages 4059-4064
- [33] Thung-Chai Ling, Chi-Sun Poon, Wai-Shung Lam, Tai-Po Chan, Karl Ka-Lok Fung (2012): “*Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X - ray radiation – shielding applications*”, Journal of Hazardous Materials, Volumes 199–200, Pages 321-327
- [34] M.C. Bignozzi, A. Saccani, L. Barbieri, I. Lancellotti (2014): “*Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition*”, Cement and Concrete Composites, Volume 55, Pages 45-52
- [35] Ali A. Aliabdo, Abd Elmoaty, Ahmed Aboshama (2016): “*Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete*”, Construction and Building Materials, Volume 124, Pages 866-877
- [36] Jian – xin Lu, Zhen – hua Duan, Chi Sun Poon (2017): “*Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet*”, Construction and Building Materials, Volume 131, Pages 793-799

- [37] Ana Mafalda Matos, Joana Sousa-Coutinho (2012): “*Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement*”, Construction and Building Materials, Volume 36, Pages 205-215
- [38] Jihwan Kim, Chongku Yi, Goangseup Zi (2015): “*Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar*”, Construction and Building Materials, Volume 75, Pages 242-246
- [39] Maddalena Carsana, Massimiliano Frassoni, Luca Bertolini (2014): “*Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials*”, Cement and Concrete Composites, Volume 45, Pages 39-45
- [40] Her-Yung Wang (2011): “*The effect of the proportion of thin film transistor – liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute of cement in cement mortar*”, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 2, Pages 791-797
- [41] Her-Yung Wang, Chien-Chih Wang, Shu-Chang, Jhan-Cyue Lin (2016): “*A study of engineering and electricity properties of cement mortar added with recycled materials and piezoelectric powders*”, Construction and Building Materials, Volume 113, Pages 297-305
- [42] Hyeonggi Lee, Asad Hanif, Jongsung Sim, Hongseob Oh (2018): “*Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and sludge wastes as supplementary cementing material*”, Journal of Cleaner Production, Volume 170, Pages 683-693
- [43] Gerry Lee, Chi Sun Poon, Yuk Lung Wong, Tung Chai Ling (2013): “*Effect of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks*”, Construction and Building Materials, Volume 38, Pages 638-643
- [44] Mukesh Limbachiya, Mohammed Seddik Meddah, Soumela Fotiadou (2012): “*Performance of granulated foam glass concrete*”, Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, Pages 759-768
- [45] Hui Zhao, Chi Sun Poon, Tung Chai Ling (2013): “*Utilizing recycled cathode ray tube funnel glass sand as river sand replacement in the high – density concrete*”, Journal of Cleaner Production, Volume 51, Pages 184-190
- [46] Chien – Chih Wang, Her-Yung Wang (2017): “*Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity*” Construction and Building Materials, Volume 137, Pages 345-353

- [47] Diego Romero, Jacqueline James, Rodrigo Mora, Carol Hays (2013): "*Study on the mechanical and environmental properties of concrete containing cathode ray tube glass aggregate*", Waste Management, Volume 33, Issue 7, Pages 1659-1666
- [48] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon (2014): "*Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry – mixed concrete paving blocks*", Journal of Cleaner Production, Volume 68, Pages 209-215
- [49] Andreas Roye, Marijan Barlé, Thomas Gries, Steffen Janetzko (2009): "*Faser - und textilbasierte Lichtleitung in Betonbauteilen – Lichtleitender Beton*", Aachen, Germany: Schaker Verlag.
- [50] P. Spiesz, S. Rouvas, H.J.H. Brouwers (2016): "*Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete*", Construction and Building Materials, Volume 128, Pages 436-448
- [51] G. M. Sadiquul Islam, M. H. Rahman, Nayem Kazi (2017): "*Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice*", International Journal of Sustainable Built Environment, Volume 6, Issue 1, Pages 37-44
- [52] Ablam Zidol, Monique Tognonvi, Arezki Tagnit - Hamou (2017): "*Effect of glass powder on concrete sustainability*", New Journal of Glass and Ceramics, Volume 7, Pages 34-47
- [53] Jihwan Kim, Jae - Heum Moon, Jae Won Shim, Jongsung Sim, Hyeon - Gi Lee, Goangseup Zi (2014): "*Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze - and - thaw condition and de - icing salt*", Construction and Building Materials, Volume 66, Pages 398-402
- [54] Roz - Ud - Din Nassar, Parviz Soroushian (2012): "*Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*", Construction and Building Materials, Volume 29, Pages 368-377
- [55] Ahmed F. Omran, Etienne D. Morin, David Harbec, Arezki Tagnit - Hamou (2017): "*Long - term performance of glass - powder concrete in large - scale field application*", Construction and Building Materials, Volume 135, Pages 43-58
- [56] Neville A.M., Brooks J.J. (2001): "*Concrete Technology*", Book, Produced by Pearson Education Asia Pte Ltd, Printed in Singapore, Pages 431.
- [57] Alkalno - silikatna reakcija, razumevanje cementa: <http://www.understanding-cement.com/alkali-silica.html> (preuzeto 14.05.2018.)
- [58] Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin (2003): "*Concrete*", Book, Second Edition, Pearson Education, Inc., Pages 629.

- [59] Primeri štetnog delovanja alkalno - silikatne reakcije: http://www.sika.com/en/solutions_products/construction - markets/concrete - additives/ concrete - handbook - 2013/ concrete-types/ alkali-silica-reaction-resistant-concrete.html (preuzeto 20.06.2018.)
- [60] Primeri štetnog delovanja alkalno - silikatne reakcije: http://ridb.kanazawa-u.ac.jp/public/detail_en.php?id=3211 (preuzeto 20.06.2018.)
- [61] R. Goguel, N.B. Milestone (1997): "Auckland Basalts as a Source of Alkali in Concrete", Proceedings, Third CAN-MET/ACI Industrial Conference on Advances in Concrete Technology, ACI SP-171, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Pages 429 - 443.
- [62] ASTM C1260-14: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar - Bar Method), West Conshohocken (PA), ASTM International, 2014.
- [63] ASTM C227-10: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement - Aggregate Combination (Mortar - Bar Method), West Conshohocken (PA), ASTM International, 2010.
- [64] Stanton E. Thomas (1941): "*Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate*", American Society of Civil Engineers, Pages 31.
- [65] Vivan H. E. (1951): "*The effect on mortar expansion of particle size of the reactive component in aggregate*", Australian Journal of Applied Science, Vol. 2, pp. 488-494.
- [66] Institut IMS Srbija (2016): "*Izveštaj o ispitivanju br. VHM-59/16 - Alkalno - silikatna reaktivnost prirodnog rečnog agregata za beton sa različitim tipovima cementa, metoda malter štapa*", Institut za ispitivanje materijala a.d. Beograd, Laboratoriji za veziva, hemiju i maltere
- [67] Hamed Maraghechi, Seyed - Mohammad - Hadi Shafaatian, Gregor Fisher , Farshad Rajabipour (2012): "*The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates*", Cement and Concrete Composites, Volume 34, Issue 1, Pages 41-47
- [68] Jelena Bijeljić, Nenad Ristić, Zoran Grdić, Gordana T. Ćurčić (2017): "*Alkali - silica reaction testing of mortar with added waste CRT glass*", International Symposium on Researching and Application of Contemporary Achievements in Civil Engineering in the Field of Materials and Structures", Proceedings, 624/628(082), 69(082), 666.7/9(082), ISBN 978-86-87615-08-3, COBISS.SR-ID 247427852, DIMKS, Vrsac, Pages 185 - 192

- [69] Bažant P., Steffens A. (2000): "*Mathematical model for kinetics of alkali - silica reaction in concrete*", Cement Concrete Research, Volume 30, Pages 419-428
- [70] Suwito A., Jin W., Xi Y., Meyer C. (2002): "*A mathematical model for the pessimum size effect of ASR in concrete*", Concrete Science and Engineering, Volume 4, Pages 23 - 34
- [71] Nathan Schwarz, Hieu Cam, Narayanan Neithalath (2008): "*Influence of fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash*", Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 6, Pages 486-496
- [72] ASTM C33/C33M - 13: Standard Specification for Concrete Aggregates, West Conshohocken (PA), ASTM International, 2013.
- [73] SRPS EN 197-1:2013 - Cement - Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente, Institut za standardizaciju Srbije, 2013.
- [74] SRPS B.B2.010:1986 - Separisani agregat (granulat) za beton - Tehnički uslovi, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1986.
- [75] Dušan Grdić, Nenad Ristić, Gordana Topličić-Ćurčić, Milan Protić, Saša Marinković (2014): „*Impact of replacement of natural aggregate with the recycled glass obtained from cathode tubes on the change of cement mortar properties*“, International symposium on researching and application of modern contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures, DIMKS, XXVI Congress, Vrnjačka banja, CIP 624(082), 69(082), 666.7/9(082), ISBN 978-86-87615-05-2, COBISS.SR-ID 210812172, Pages 79 – 88
- [76] SRPS B.C8.042:1971 - Gradevinski kreč - Metode fizikalno-mehaničkih ispitivanja, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1971.
- [77] SRPS B.C8.050:1981 - Određivanje sadržaja vazduha u cementnom malteru, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1981.
- [78] SRPS ISO 6276:1997 - Beton - Zbijeni sveži beton - Određivanje zapreminske mase, Savezni zavod za standardizaciju, 1997.
- [79] SRPS U.M8.002:1997, tačka 14 - Malteri za zidanja i malterisanje - Metode ispitivanja, Savezni zavod za standardizaciju, 1997.
- [80] Dušan Grdić, Nenad Ristić, Gordana Topličić-Ćurčić (2013): „*Effects of addition of recycled rubber and recycled glass on the variations of ultrasonic velocity in concrete*“, Building materials and structures, Vol. LVI, No. 3, 2013. ISSN 0543-0798, UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1)=861, Pages 29-43

- [81] SRPS ISO 4109:1997 - Beton - Sveži beton - Određivanje konzistencije - Ispitivanje sleganja, Savezni zavod za standardizaciju, 1997.
- [82] SRPS ISO 4848:1999 - Beton - Određivanje sadržaja vazduha u svežem betonu - Metoda pomoću pritiska, Savezni zavod za standardizaciju, 1999.
- [83] SRPS ISO 6275:1997 - Beton - Očvršli beton - Određivanje zapreminske mase, Savezni zavod za standardizaciju, 1997.
- [84] SRPS EN 12390-3:2010/AC:2014 - Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje - Ispravka, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [85] Dušan Grdić, Nenad Ristić, Gordana Topličić-Ćurčić, Zoran Grdić (2014): *"Renewable Energy Sources and Environment Friendly Materials in the Function of Sustainable Development"*, Faculty of Civil Engineering Subotica, ISSN 0352 – 6852, eISSN 2334 – 9573, DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014, Pages 837-843
- [86] Rilem TC 106 - AAR (2000): *"Alkali - aggregate reaction"*, Materials and Structures, Volume 33, Pages 283 - 293.
- [87] SRPS EN 196-1:2008 - Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće, Institut za standardizaciju Srbije, 2008.
- [88] SRPS EN 196-3:2010 - Metode ispitivanja cementa - Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [89] SRPS B.C8.029:1979 - Cement - Skupljanje cementnog maltera usled sušenja, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1979.
- [90] SRPS EN 12390-5:2014 - Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [91] SRPS EN 12390-6:2012 - Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 6: Čvrstoća pri cepanju zatezanjem uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [92] SRPS ISO 6784:2000 - Određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku, Savezni zavod za standardizaciju, 2000.
- [93] SRPS EN 1542:2010 - Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Merenje prionljivosti "pull-off" metodom, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [94] UNI 6555:1973 - Concrete Made With Aggregate Maximum Size 30 mm - Hydraulic Shrinkage Determination
- [95] SRPS EN 1340:2012, prilog H - Ispitivanje habanja u skladu sa ispitivanjem prema Bemeu brušenjem, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [96] SRPS U.M1.015:1998 - Beton - određivanje prodiranja vode pod pritiskom, Savezni zavod za standardizaciju, 1998.

- [97] SRPS U.M1.016:1992 - Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza, Savezni zavod za standardizaciju, 1992.
- [98] SRPS U.M1.055:1984 - Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1984.
- [99] SRPS EN 1744-3:2007 - Ispitivanja hemijskih svojstava agregata - Deo 3: Priprema eluata luženjem agregata, Institut za standardizaciju Srbije, 2007.
- [100] SRPS EN 12504-4:2008 - Ispitivanje betonskih konstrukcija - Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa, Institut za standardizaciju Srbije, 2008.
- [101] SRPS EN 12504-2:2014 - Ispitivanje betonskih konstrukcija — Deo 2: Ispitivanje bez razaranja — Određivanje veličine odskoka, Institut za standardizaciju Srbije, 2014.
- [102] SRPS EN 12390-7:2010 - Ispitivanje očvrslog betona - Deo 7: Zapreminska masa očvrslog betona, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [103] SRPS B.B8.010:1981 - Ispitivanje prirodnog kamena - Određivanje upijanja vode Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1981.
- [104] SRPS EN 196-6:2011 - Metode ispitivanja cementa - Deo 6: Određivanje finoće mliva, Institut za standardizaciju Srbije, 2011.
- [105] Institut IMS Srbija (2014): *"Izveštaj o ispitivanju mineraloško petrografskog sastava frakcija prirodnog agregata"*, br. KIA 0070/14 PF od 02.04.2014. godine.
- [106] SRPS ISO 6782:1999 - Agregati za beton - Određivanje nasute zapreminske mase, Savezni zavod za standardizaciju, 1999.
- [107] SRPS ISO 6783:1999 - Krupni agregati za beton - Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanje vode - Metoda pomoću hidrostatičke vage, Savezni zavod za standardizaciju, 1999.
- [108] SRPS B.B8.036:1982 - Kameni agregat - Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1982.
- [109] SRPS B.B8.038:1982 - Prirodni i drobljeni kameni agregati - Određivanje sadržaja grudvi gline, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1982.
- [110] SRPS B.B8.039:1982 - Kameni agregat - Približno određivanje zagađenosti organskim materijama - Kolorimetrijska metoda, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1982.
- [111] SRPS B.B8.048:1984 - Kameni agregat - Određivanje oblika zrna metodom kljunastog merila, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1984.
- [112] SRPS B.B8.049:1984 Kameni agregat - Određivanje oblika zrna metodom zapreminskog koeficijenta, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1984.

- [113] SRPS B.B3.100:1983 - Kameni agregat - Frakcionisani kameni agregat za beton i asfalt - Osnovni uslovi kvaliteta, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1983.
- [114] Tehnički list br. 01.01.182 - Sika[®]ViscoCrete[®] 4000 BP, izdanje 06.07.2010
- [115] Caijun Shi, Yanzhong Wu, Chris Riefler, Hugh Wang (2005): "*Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powder*", Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 5, Pages 987-993
- [116] SRPS B.C1.018:2015 - Nemetalne mineralne sirovine - Pucolanski materijali - Sastojci za proizvodnju cementa - Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja, Institut za standardizaciju Srbije, 2015.
- [117] SRPS U.M1.057:1984 - Beton - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1984.
- [118] Grdić Zoran (2011): "*Tehnologija betona*", Udžbenik, Građevinsko - arhitektonski fakultet u Nišu
- [119] Ristić Nenad (2015): "*Hidro - abrazivna otpornost betona spravljenog sa recikliranim materijalima i ojačanog mikrovlaknima*", Doktorska disertacija, Građevinsko - arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu
- [120] Uputstvo za upotrebu (2012): "*Universal electronic Compressometer - Extensometer Mod. 55-C0222/F*", Controls Group
- [121] Štirmer Nina, Ukraiczuk Velimir (2005): "*Model nadsloja industrijskog poda pod udarnim opterećenjem*", Zbornik radova sa 12. Slovenskog kolokvija o betonima "Novosti pri gradnji tlakov", Institut IRMA, Ljubljana, str. 49-63
- [122] Zakić Dimitrije (2010): "*Istraživanje parametara duktilnosti i udarne otpornosti sitnozrnih betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima*", Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
- [123] Bulatović Vesna (2017): "*Sulfatna otpornost betona na bazi recikliranog agregata*", Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- [124] Top Star d.o.o.: "*Specifikacija proizvoda - natrijum sulfat, anhidrovani*", Obala Sonje Marinković 16, Zrenjanin
- [125] ASTM C1231-14: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders, West Conshohocken (PA), ASTM International, 2014.
- [126] European Commission (1999): "*Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials*", Radiation Protection 112. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

- [127] Upravni odbor Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije (2017): "*Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet*", Službeni glasnik RS, br. 36 od 10.05.2018.godine.
- [128] User's Manual: "*Model DSA-2000/A Digital Spectrum Analyzer*", Copyright 2000, Packard BioScience Company, Canberra Industries, 800 Research Parkway, Meriden.
- [129] IAEA TRS 295:1989 - "*Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*", a Guidebook, Technical Report Series No. 295, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1989.
- [130] Caijun Shi, Robert L Day (1993): "*Chemical activation of blended cements for made with lime and natural pozzolans*", Cement and Concrete Research, Volume 23, Issue 6, Pages 1389-1396
- [131] Caijun Shi, Robert L Day (2001): "*Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans*", Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 12, Pages 813-818
- [132] Kosmatka SH, Kerkhoff B., Panarese WC, MacLeod NF., McGrath RJ. (2002): "Design and control of concrete mixtures", 7th ed. Ottawa: Cement Association of Canada
- [133] Papadakis VG., Pedersen EJ., Lindgreen H. (1999): "*An AFM-SEM investigation of the effect of silica fume and fly ash on cement paste microstructure*", Journal of Material Science, Volume 34, Pages 683 - 690
- [134] Mayer C., Baxter S., Jin W. (1996): "*Potential of waste glass for concrete masonry blocks*", Proceedings of the fourth materials engineering conference. Washington, Pages 666-673
- [135] ASTM C 618-15: Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken (PA), ASTM International, 2015.
- [136] Ahmed Shayan, Aimin Xu (2006): "*Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs*", Cement and Concrete Research, Volume 36, Pages 457-468
- [137] Buchwald A., Kaps C., Hohmann M. (2003): "Alkali - activated binders and pozzolan cement binders - compete binder reaction or two sides of the same story?" In Proceedings of the 11th International congress of the chemistry of cement, Durban, Pages 1238-1246

- [138] Farshad Rajabipour, Hamed Maraghechi, Gregor Fisher (2010): "*Investigating the Alkali – Silica Reaction of Recycled Glass Aggregates in Concrete Materials*", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 22, Pages 1201-1208
- [139] Rachida Idir, Martin Cyr, Arezki Tagnit – Hamou (2011): "*Pozzolanic properties of fine and coarse color – mixed glass cullet*", Cement and Concrete Composites, volume 33, str. 19-29
- [140] Mahsa Kamali, Ali Ghahremaninezhad (2016): "*An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders*", Construction and Building Materials, Volue 112, Pages 915-924
- [141] Manullang, R. J., Samadhi, T. W., Purbasari, A.(2017): "*Formulation of portland composite cement using waste glass as a supplementary cementitious material*", AIP Conference Proceedings 1887, 020040, doi: 10.1063/1.5003523
- [142] Bjegović Dubravka, Štirmer Nina (2015): "*Teorija i tehnologija betona*", Udžbenik, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu
- [143] C.H. Chen, R. Huang , J.K. Wu, C.C. Yang (2006): "*Waste E-glass particles used in cementitious mixtures*", Cement and Concrete Research, Volume 36, Pages 449 - 456
- [144] Omer Ozkan , Isa Yuksel (2007): "*Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products*", Construction and Building materials, Volume 22, Pages 1288-1298.
- [145] Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja, Službeni glanik RS brok 23 od 18. marta 1994. godine.
- [146] Caijun Shi, Keren Zheng (2007): "*A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*", Resources, Conservation and Recycling, Volume 52, Issue 2, Pages 234-247

10. LISTA SLIKA I TABELA, PRILOZI

10.1. Lista slika

Slika 2.1.	Izgled katodne cevi i njeni osnovni delovi.....	7
Slika 2.2.	Količina CRT otpada u periodu 1980-2033. godina u SAD-u.....	9
Slika 2.3.	Procenjena količina otpadnih TV i PC monitora u Kini do 2020. godine.....	11
Slika 2.4.	Količina otpadnih CRT televizora po godinama u oblasti Baden – Wurttemberg.....	14
Slika 2.5.	Izgled otvorene i zatvorene reciklažne petlje.....	16
Slika 2.6.	Šematski prikaz procesa reciklaže CRT stakla kompjuterskih i tv ekrana.....	18
Slika 2.7.	Sistem za iscrtavanje i sistem za razdvajanje panelnog stakla i stakla levka vreloom žicom u preduzeću Jugo – Impex E.E.R.....	18
Slika 2.8.	Linija za dijamantsko sečenje CRT ekrana u preduzeću “Božić i sinovi”.....	19
Slika 2.9.	Proces laserskog razdvajanja panelnog stakla i stakla levka CRT monitora.....	19
Slika 3.1.	Izgled keramičke pene sa dodatkom CRT stakla.....	22
Slika 3.2.	Kristalno staklo spravljeno sa CRT staklom.....	23
Slika 3.3.	Uticaj zamene dela prirodnog agregata CRT staklom na čvrstoću pri pritisku maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana.....	24
Slika 3.4.	Šematski prikaz ispitivanja sposobnosti maltera da apsorbuje X -zrake (levo); Uticaj debljine maltera i vrste upotrebljenog stakla na izmerenu dozu X – zraka (desno).....	27
Slika 3.5.	Čvrstoća pri pritisku malterskih serija sa različitim vrstama stakla pri starosti od 7, 28, 60 i 90 dana.....	29
Slika 3.6.	Uticaj povećanja udela otpadnog stakla na potrebnu količinu vode za pastu standardne konzistencije (levo); Vreme vezivanja cementne paste za različite procenete zamene cementa staklom (desno).....	29
Slika 3.7.	Vreme vezivanja cementne paste sa različitom finoćom WGP-a (levo); Toplota hidratacije cementne paste sa WGP-om u prvih 30 minuta (desno).....	31
Slika 3.8.	Čvrstoće pri pritisku i pri savijanju maltera pri različitim starostima.....	32
Slika 3.9.	Stakleni mulj pre (a) i nakon mlevenja (b) (levo); Granulometrijski sastav staklenog praha, letećeg pepela i portland cemeneta CEM I (desno).....	33
Slika 3.10.	Čvrstoće pri pritisku cementnih malterskih serija pri starosti od 7, 28, 90 dana i 7 godina (levo);Uticaj finoće mliva recikliranog stakla na prirast čvrstoća pri pritisku kod krečnog maltera (desno).....	34
Slika 3.11.	Izgled TFT-LCD staklenog agregata (levo); stakleni prah nakon mlevenja (desno).....	35
Slika 3.12.	Čvrstoća pri zatezanju savijanjem maltera sa LCD staklom u funkciji promene dodatka stakla (levo); Čvrstoća pri zatezanju cepanjem maltera sa LCD staklom u funkciji promene dodatka stakla (desno).....	35
Slika 3.13.	Rasprostriranje malterskih serija sa različitim recikliranim dodacima i PZT maltera (levo) i upijanje vode obe grupe maltera pri starosti od 28 dana (desno).....	37

<i>Slika 3.14. Brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz malter pri različitim procentima zamene (levo); Procenat dostignute vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na kontrolnu seriju pri različitim procentima zamene (desno).....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 3.15. Zapreminska masa betonskih serija u funkciji promene finoće mliva stakla (levo); Upijanje vode betonskih serija u funkciji promene finoće mliva stakla (desno).....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.16. Čvrstoća pri pritisku betonskih serija pri starosti od 28 dana u funkciji promene finoće mliva recikliranog stakla.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.17. Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene sitnog agregata staklenom penom (GFG), levo; Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene krupnog agregata staklenom penom, desno.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 3.18. Čvrstoća pri savijanjem betonskih sa različitim procentom učešća GFG, levo; Modul elastičnosti betonskih serija u funkciji promene učešća GFG, desno.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 3.19. Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim sadržajem katodnog stakla pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (levo); Čvrstoća pri zatezanju cepanjem betonskih serija sa različitim sadržajem katodnog stakla pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (desno).....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 3.20. Brzina ultrazvučnog talasa kroz beton za različiti nivo zamene agregata katodnim staklom pri starosti od 4, 7, 28 i 90 dana (levo); Statički modul elastičnosti betonskih serija sa TCF staklom pri starosti od 28 i 90 dana (desno).....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 3.21. Odnos između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog talasa kroz beton.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 3.22. Čvrstoće pri pritisku betonskih mešavina sa različitim procentom učešća CRT stakla</i>	<i>46</i>
<i>Slika 3.23. Upijanje vode u funkciji zamene agregata CRT staklom – serija sa sitnim CRT agregatom (PB) i serija sa sitnim i krupnim CRT agregatom (C-PB).....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 3.24. Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 7, 28 i 90 dana serija PB (levo); serija C-PB (desno).....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 3.25. Dijagram čvrstoća pri pritisku betonskih serija 1-5 (levo); Dijagram čvrstoća pri savijanju betonskih serija 1-5 (desno).....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 3.26. Izgled aparature za ispitivanje transparentnosti betona.....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 3.27. Transparentnost betonske pločice sa staklenim agregatom, debljina pločice 4 mm (levo); debljina pločice 8 mm (desno).....</i>	<i>51</i>
<i>Slika 3.28. Sleganje betonskih serija sa različitim procentom zamene cementa staklom (levo); Zapreminska masa očvrslog betona sa različitim procentom zamene stakla (desno)....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 3.29. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem betonskih serija sa različitim učešćem stakla.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 3.30. Uticaj dodatka stakla na promenu konzistencije betona (levo); Zapreminska masa očvrslog betona sa različitim dodatkom stakla (desno).....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 3.31. Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim procentom zamene cementa recikliranim ambalažnim staklom.....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 3.32. Čvrstoća pri pritisku betonskih serija sa različitim mineralnim dodacima i vodovezivnim faktorom 0,65 (levo), odnosno vodovezivnim faktorom 0,35 (desno).....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 3.33. Dinamički modul elastičnosti betonskih serija sa različitim procentom dodatka stakla negovanih u običnoj vodi (levo) i u rastvoru soli (desno).....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 3.34. Gubitak mase prilikom ispitivanja otpornosti na jednovremeno delovanje mraza i soli za odmrzavanje.....</i>	<i>59</i>

Slika 3.35. Čvrstoće pri pritisku (levo) i čvrstoće pri zatezanju savijanjem (desno) betonskih serija sa agregatom od recikliranog betona i zamenom dela cementa staklom.....	62
Slika 3.36. Čvrstoća pri pritisku cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom.....	64
Slika 3.37. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom.....	65
Slika 3.38. Modul elastičnosti cilindara negovanih u laboratoriji i isečenih in situ sa različitim procentom zamene dela cementa recikliranim staklom.....	65
Slika 3.39. Faktor trajnosti betona utvrđen ispitivanjem otpornosti prema delovanju mraza (levo); Gubitak mase betona prilikom ispitivanja delovanja mraza i soli (desno).....	66
Slika 4.1. Ekspandiranje zrna agregata usled ASR i pojava prslina u cementnom kamenu.....	67
Slika 4.2. Mreža pukotina na površini stuba usled ASR, levo; Oštećenje stubova i temelja mosta, desno.....	68
Slika 4.3. Formiranje ASR gela unutar pukotina zrna stakla, levo; Izgled pukotina nastalih usled procesa mlevenja stakla, desno.....	71
Slika 4.4. Izduženje malterskih prizmi usled pojave ASR tokom perioda od 14 dana.....	73
Slika 4.5. Izgled kontejnera za čuvanje i negovanje uzorka tokom ispitivanja ASR-a.....	75
Slika 5.1. Grubo usitnjeno staklo (levo); usitnjeno staklo 0/4 mm (desno).....	76
Slika 5.2. Granulometrijski sastavi rečnog agregata i agregata od recikliranog stakla.....	76
Slika 5.3. Promena čvrstoće pri savijanju (levo) i pri pritisku (desno) posle 25 ciklusa delovanja mraza u funkciji učešća recikliranog stakla u malteru.....	78
Slika 5.4. Izgled preloma maltera sa 100% recikliranog stakla - levo i etalona - desno.....	79
Slika 5.5. Uticaj dela zamene prirodnog agregata CRT staklom na promenu zapremine mase svežeg betona.....	82
Slika 5.6. Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 2, 7 i 28 dana.....	82
Slika 5.7. Uticaj dodatka recikliranog stakla na promenu brzine ultrazvuka pri starosti betona od 28 dana (levo); Čvrstoća pri pritisku betona pri starosti od 28 dana i korespondirajuća brzina ultrazvuka pri promeni dodatka recikliranog stakla od 75% do nule (desno).....	83
Slika 5.8. Ekspanzija malterskih serija sa dodatkom CRT agregata pri ispitivanju na 2, 7, 10 i 14 dana.....	86
Slika 5.9. Izduženje malterskih prizmi sa dodatkom CRT stakla u funkciji vremena.....	88
Slika 6.1. Veličina zrna cementa CEM I 52,5R.....	95
Slika 6.2. Granulometrijski sastav frakcije 0/4 mm sa separacije "Šilo - prom".....	98
Slika 6.3. Granulometrijski sastav frakcije 4/8 mm sa separacije "Šilo - prom".....	98
Slika 6.4. Granulometrijski sastav frakcije 8/16 mm sa separacije "Šilo - prom".....	98
Slika 6.5. Krupni komadi panelnog stakla nakon procesa reciklaže (levo); Asfaltna baza u kojoj je staklo samleveno do frakcije 0/4 mm (desno).....	99
Slika 6.6. Izgled specijalno konstruisanog kugličnog mlina za usitnjavanje CRT stakla.....	100
Slika 6.7. Eksperimentalno CRT staklo finoće mliva ispod 0,063 mm.....	100
Slika 6.8. Veličina zrna eksperimentalnog katodnog stakla.....	101

Slika 6.9. FTIR usitnjenog katodnog stakla.....	102
Slika 6.10. XRD difraktogram katodnog stakla.....	102
Slika 6.11. Superplastifikator Sika® ViscoCrete® 4000 BP u ambalaži od 20 kg.....	104
Slika 6.12. Hermetičko zatvaranje maltera u limene kutije.....	105
Slika 6.13. Ispitivanje standardne konzistencije cemente paste (levo); Ispitivanje početka i kraja vezivanja cementa (desno).....	106
Slika 6.14. Homogenizovana smeša cementa i 20% stakla (levo); Laboratorijski mikser Hobart (desno).....	108
Slika 6.15. Merenje rasprostiranja na potresnom stočiću (levo); Merenje sadržaja uvučenog vazduha u malteru pomoću porozimetra (desno).....	108
Slika 6.16. Ispitivanje čvrstoće pri savijanju maltera (levo); ispitivanje čvrstoće pri pritisku maltera (desno).....	109
Slika 6.17. Malterske prizme nakon 25 ciklusa naizmeničnog smrzavanja i odmrzavanja.....	111
Slika 6.18. Kontrolno merenje na "etalon" prizmi (levo); Merenje skupljanja na malteru (desno)	112
Slika 6.19. SEM analiza maltera - (a) Etalon; (b) WG20; (c) WG35; (d) WGD10; (e) CRT staklo	114
Slika 6.20. Granulometriški sastav mešavine rečnog agregata.....	116
Slika 6.21. Posuda i nastavak za mešanje cementa i stakla (levo); Proces mešanja (desno)....	117
Slika 6.22. Laboratorijska mešalica "Metalika" Sopot.....	117
Slika 6.23. Deo uzorka betonske serije WG5 neposredno pre rasklapanja kalupa.....	118
Slika 6.24. Merenje konzistencije svežeg betona pomoću Abramsovog konusa.....	119
Slika 6.25. Određivanje sadržaja uvučenog vazduha.....	119
Slika 6.26. Određivanje zapreminske mase svežeg betona.....	120
Slika 6.27. Digitalna hidraulička presa za ispitivanje pritisne čvrstoće.....	121
Slika 6.28. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem na cilindrima prečnika 150 mm i visine 300 mm.....	123
Slika 6.29. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem na prizmama 400 x 10 x 10 mm.....	124
Slika 6.30. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju pull - off aparatom na etalon betonu.....	126
Slika 6.31. Ispitivanje odskočnog broja sklerometra (levo); Izgled aparata sklerometra N-34 Proceq.....	127
Slika 6.32. Merenje brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton.....	129
Slika 6.33. Betonski uzorak oblika cilindra sa tri povezana ekstenzometra u procesu ispitivanja (levo); Izgled ekstenzometra CONTROLS 55-C0222/F (desno).....	131
Slika 6.34. $\sigma - \varepsilon$ dijagram etalon betona pri starosti od 90 dana.....	133
Slika 6.35. Slika 6.35. - $\sigma - \varepsilon$ dijagram betona WG35 pri starosti od 90 dana.....	133
Slika 6.36. Aparatura za ispitivanje udarne otpornosti betona.....	134
Slika 6.37. Izglede opreme za merenje skupljanja betona.....	137
Slika 6.38. Postupak merenja skupljanja na betonskom uzorku.....	137
Slika 6.39. Klima komora Controls X26 i bazeni za negu uzoraka.....	140

<i>Slika 6.40. Ispitivanje vodonepropustljivosti betona.....</i>	142
<i>Slika 6.41. Provera pH vrednosti zasićene krečne vode pomoću pH metra "PH-220".....</i>	144
<i>Slika 6.42. Negovanje uzoraka na vazduhu u laboratoriji.....</i>	144
<i>Slika 6.43. Izgled uzoraka premazanih epoksidom pre potapanja u rastvor Na₂SO₄ (levo); Ispitivanje čvrstoće pri pritisku uzoraka korišćenjem neoprenskih "kapa" (desno).....</i>	145
<i>Slika 6.44. Bemeova mašina za ispitivanje habanja brušenjem.....</i>	148
<i>Slika 6.45. Šematski prikaz aparature za ekstrahovanje eluata.....</i>	149
<i>Slika 6.46. Izgled rešetkaste posude i uzorka za ispitivanje izluživanja (levo); Proces dobijanja eluata (desno).....</i>	150
<i>Slika 6.47. Izgled aparature gamaspektrometra spolja (levo) i unutra (desno).....</i>	152
<i>Slika 6.48. SEM analiza (levo) i EDS spektroskopija katodnog stakla (desno).....</i>	154
<i>Slika 6.49. SEM analiza betona -(a) Etalon; (b) WG15; (c) WG20; (d)WG35; (e) WGD10.....</i>	154
<i>Slika 6.50. Etalon beton uvećanje 5000 puta (levo); EDS spektroskopija (desno).....</i>	155
<i>Slika 6.51. Beton WG15 uvećanje 500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A, B i C.....</i>	155
<i>Slika 6.52. Beton WG20 uvećanje 500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno</i>	156
<i>Slika 6.53. Beton WG20 uvećanje 1500 puta, levo; EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno</i>	156
<i>Slika 6.54. Beton WG35 uvećanje 2000 puta (levo); EDS spektroskopija (desno)</i>	156
<i>Slika 6.55. Beton WGD10 uvećanje 500 puta (levo); EDS spektroskopija u tačkama A i B, desno</i>	157
<i>Slika 7.1. Čvrstoće pri pritisku betona spravljenih sa staklom različite finoće mliva.....</i>	159
<i>Slika 7.2. Uticaj zamene dela cementa CRT staklom na standardnu konzistenciju cemente paste (levo); Vreme vezivanja cementne paste u zavisnosti od procenta zamene cementa samlevenim CRT staklom (desno).....</i>	161
<i>Slika 7.3. Mera rasprostiranja na potresnom stolu (levo) i sadržaj uvučenog vazduha (desno)...</i>	162
<i>Slika 7.4. Promena čvrstoće pri pritisku maltera u funkciji vremena.....</i>	163
<i>Slika 7.5. Promena čvrstoće pri savijanju maltera u funkciji vremena.....</i>	163
<i>Slika 7.6. Promena pritisne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT - a.....</i>	165
<i>Slika 7.7. Promena savojne čvrstoće maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana u funkciji procenta zamene/dodatka CRT-a.....</i>	165
<i>Slika 7.8. Čvrstoće pri pritisku malterskih serija nakon delovanja mraza.....</i>	166
<i>Slika 7.9. Promena čvrstoće pri pritisku maltera posle 25 ciklusa delovanja mraza u funkciji procenta zamene cementa recikliranim staklom.....</i>	167
<i>Slika 7.10. Zapreminska masa maltera u očvrslog stanju.....</i>	167
<i>Slika 7.11. Skupljanje malterskih serija u periodu do 28 dana.....</i>	168
<i>Slika 7.12. Skupljanje malterskih serija u periodu do 365 dana.....</i>	168
<i>Slika 7.13. Zapreminska masa svežeg betona.....</i>	170
<i>Slika 7.14. Sadržaj uvučenog vazduha u svežem betonu.....</i>	171
<i>Slika 7.15. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju pri starosti od 90 dana</i>	172

<i>Slika 7.16. Prirast čvrstoće pri pritisku betonskih serija pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana.....</i>	173
<i>Slika 7.17. Grafički prikaz postignutih pritisnih čvrstoća betonskih serija u toku vremena.....</i>	174
<i>Slika 7.18. Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona.....</i>	176
<i>Slika 7.19. Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona.....</i>	177
<i>Slika 7.20. Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu čvrstoće prionjivosti betona.....</i>	178
<i>Slika 7.21. Odskok sklerometra pri različitim starostima betona.....</i>	179
<i>Slika 7.22. Funkcija zavisnosti čvrstoće pri pritisku betona i indeksa sklerometra.....</i>	179
<i>Slika 7.23. Brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana.....</i>	180
<i>Slika 7.24. Funkcija zavisnosti čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvučnog impulsa.....</i>	181
<i>Slika 7.25. Funkcija zavisnosti brzine ultrazvučnog impulsa i indeksa sklerometra.....</i>	182
<i>Slika 7.26. Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na promenu modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana.....</i>	184
<i>Slika 7.27. Energija utrošena do pojave prve vidljive prsline na površini uzorka (levo); Energija utrošena do pojave loma betonskih uzoraka (desno).....</i>	185
<i>Slika 7.28. Skupljanje betonskih serija na vazduhu u toku prvih 28 dana.....</i>	186
<i>Slika 7.29. Skupljanje betonskih serija na vazduhu u periodu od 28. dana do 180. dana.....</i>	186
<i>Slika 7.30. Uticaj zamene/dodatka CRT stakla na upijanje vode betona pod atmosferskim pritiskom.....</i>	188
<i>Slika 7.31. Procentualno smanjenje pritisne čvrstoće betona nakon 150 ciklusa delovanja mraza</i>	189
<i>Slika 7.32. Procentualno smanjenje pritisne čvrstoće betona nakon 200 ciklusa delovanja mraza</i>	189
<i>Slika 7.33. Prodor vode kroz betone sa različitim procentom zamene/dodatka CRT stakla.....</i>	191
<i>Slika 7.34. Promena pritisne čvrstoće uzoraka negovanih u rastvoru kalcijum - hidorksidu i uzoraka negovanih u rastvoru natrijum - sulfata nakon 3, 6 i 12 meseci u %.....</i>	194
<i>Slika 7.35. Uticaj prisustva katodnog stakla na otpornost betona prema habanju brušenjem.....</i>	195
<i>Slika 7.36. Izgled spektra gama zračenja u toku merenja i deo izveštaja.....</i>	198

10.2. Lista tabela

<i>Tabela 2.1.</i>	<i>Globalne količine generi E – otpada u svetu.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2.2.</i>	<i>Broj proizvedenih ekrana u svetu u milionima jedinica.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2.3.</i>	<i>Količina i vrednost recikliranih ekrana i monitora u 2016. godini u Švedskoj.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 2.4.</i>	<i>Količine prikupljenog stakla u Srbiji.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3.1.</i>	<i>Čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju i statički modul elastičnosti maltera sa različitim agregatom i mineralnim dodacima pri starosti od 28 i 90 dana.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3.2.</i>	<i>Sastav betonskih mešavina sa zamenom dela agregata CRT staklom.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 3.3.</i>	<i>Srednje vrednosti pritiska čvrstoće betona sa različitim procentom zamene cementa staklom pri starosti od 7, 28 i 56 dana.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 3.4.</i>	<i>Srednje vrednosti čvrstoća pri zatezanju cepanjem betona sa različitim procentom dodatka stakla pri starosti od 7, 28 i 56 dana.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 3.5.</i>	<i>Sleganje betona sa različitim dodacima i w/b faktorom.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 3.6.</i>	<i>Sadržaj uvučenog vazduha betonskih serija sa različitim dodacima i w/b faktorom</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3.7.</i>	<i>Sastav betonskih mešavina i svojstva betona u svežem stanju.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 3.8.</i>	<i>Zapreminska masa i upijanje vode očvrslog betona.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 3.9.</i>	<i>Pozicije ugradnje betona sa zamenom dela cementa staklom u Kvebeku, Kanada</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.1.</i>	<i>Hemijski sastav četiri vrste otpadnog stakla (% mase).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 5.1.</i>	<i>Sastav malterskih mešavina i rezultati ispitivanja svežeg maltera.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 5.2.</i>	<i>Čvrstoće pri savijanju i pri pritisku maltera starosti 2, 7, 28 i 90 dana.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 5.3.</i>	<i>Sastav betonskih mešavina korišćenih u eksperimentu za 1m³ betona.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5.4.</i>	<i>Rezultati ispitivanja svežeg betona sa dodatkom staklenog agregata.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 5.5.</i>	<i>Rezultati ispitivanja očvrslog betona pri starosti od 28 dana.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 5.6.</i>	<i>Sastav malterskih mešavina.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 5.7.</i>	<i>Mehaničke čvrstoće maltera nakon završetka ispitivanja ASR.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 5.8.</i>	<i>Granulometrijski sastav sitnog rečnog agregata.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 6.1.</i>	<i>Vrste ispitivanja očvrslog betona i broj uzoraka za jednu betonsku seriju.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 6.2.</i>	<i>Uopšten program eksperimentalnog istraživanja.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 6.3.</i>	<i>Hemijski sastav cementa CEM I 52,5R proizvođača "CRH" Novi Popovac.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 6.4.</i>	<i>Mineraloški sastav cementa CEM I 52,5R.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 6.5.</i>	<i>Fizičko - mehaničke karakteristike cementa CEM I 52,5R.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 6.6.</i>	<i>Mineraloško - petrografski sastav sitnog i krupnog agregata proizvođača "Šilo - prom".....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 6.7.</i>	<i>Ispitivanje određenih fizičkih svojstava agregata sa separacije "Šilo - prom", Belotinac.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 6.8.</i>	<i>Hemijski sastav katodnog stakla.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 6.9.</i>	<i>Neke fizičke karakteristike fino samlevnog katodnog stakla.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 6.10.</i>	<i>Mehaničke čvrstoće maltera prilikom provere pucolanske aktivnost CRT-a.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 6.11.</i>	<i>Rezultati ispitivanja cementne paste sa različitim procentom zamene cementa CRT-om.....</i>	<i>106</i>

Tabela 6.12.	Sastav eksperimentalnih malterskih mešavina sa različitim učešćem CRT-a.....	107
Tabela 6.13.	Rezultati ispitivanja konzistencije i sadržaja uvučenog vazduha.....	108
Tabela 6.14.	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana	110
Tabela 6.15.	Rezultati ispit. čvrstoće pri savijanju maltera pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana	110
Tabela 6.16.	Rezultati ispitivanja otpornosti maltera na dejstvo mraza.....	112
Tabela 6.17.	Rezultati ispitivanja skupljanja maltera na vazduhu.....	113
Tabela 6.18.	Sastav eksperimentalnih betonskih mešavina.....	116
Tabela 6.19.	Rezultati ispitivanja svežeg betona.....	119
Tabela 6.20.	Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana.....	120
Tabela 6.21.	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana.....	122
Tabela 6.22.	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana.....	123
Tabela 6.23.	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana.....	125
Tabela 6.24.	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju "Pull - off" metodom.....	126
Tabela 6.25.	Rezultati ispitivanja odskočnog broja upotrebom sklerometra na betonskim epruvetama starosti 2, 7, 28 i 90 dana.....	128
Tabela 6.26.	Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana.....	129
Tabela 6.27.	Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana i računске vrednosti prema empirijskim izrazima različitih pravilnika i udruženja za standardizaciju.....	132
Tabela 6.28.	Rezultati ispitivanja udarne otpornosti betona pri starosti od 90 dana.....	136
Tabela 6.29.	Rezultati ispitivanja skupljanja betona na vazduhu.....	137
Tabela 6.30.	Rezultati ispitivanja upijanja vode betona pod atmosferskim pritiskom.....	138
Tabela 6.31.	Rezultati ispitivanja otpornosti betona na delovanje mraza.....	140
Tabela 6.32.	Rezultati ispitivanja otpornosti betona na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje.....	141
Tabela 6.33.	Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti betona.....	142
Tabela 6.34.	Fizičke i hemijske karakteristike eksperimentalnog natrijum sulfata.....	145
Tabela 6.35.	Rezultati ispitivanja sulfatne otpornosti betona merenjem promene pritisne čvrstoće uzoraka.....	146
Tabela 6.36.	Rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem.....	147
Tabela 6.37.	Vrednosti elektroprovodljivosti i pH vrednosti eksperimentalnih eluata.....	149
Tabela 6.38.	Sadržaj metala u koncentrovanom CRT staklu.....	150
Tabela 6.39.	Sadržaj potencijalno štetnih metala u betonskim eluatima.....	151
Tabela 6.40.	Koncentracije aktivnosti radionuklida.....	152
Tabela 7.1.	Uporedni hemijski sastav eksperimentalnog CRT stakla, cementa i drugih pucolana.....	158
Tabela 7.2.	Matematičke funkcije promene mehaničkih čvrstoća i koeficijenti korelacije.....	164

10.3. PRILOZI

10.3.1. PRILOG 1. Korišćene oznake u doktorskoj disertaciji

Oznake	Jedinica mere	Značenje oznake
α	-	Koeficijent linearnog širenja
$w/b, \omega_p$	-	Vodovezivni faktor
$f_{zc,i}$	MPa	Čvrstoća pri zatezanju cepanjem
f_{zs}, f_s	MPa	Čvrstoća pri zatezanju savijanjem
f_p	MPa	Čvrstoća pri pritisku
S	mm	Klasa konzistencije prema sleganju
m_c	g	Masa cementa
m_p	g	Masa agregata (peska) frakcije 0/4 mm
F_s	N	Sila savijanja koja je dovela do loma epruvete
$f_{s,sr}$	MPa	Srednja vrednost čvrstoće pri savijanju
$f_{s,i}$	MPa	Čvrstoća pri savijanju
b	mm	Širina poprečnog preseka epruvete
h	mm	Visina poprečnog preseka epruvete
l_o	mm	Osovinsko rastojanje između oslonaca
F_p	N	Sila pritiska koja je dovela do loma epruvete
$f_{p,i}$	MPa	Čvrstoća pri pritisku
$f_{p,sr}$	MPa	Srednja vrednost čvrstoće pri pritisku
A	mm ²	Površina na koju deluje sila pritiska
$f_{p,m}$	MPa	Čvrstoća pri pritisku malterskih prizmi nakon 25 ciklusa smrzavanja
$f_{p,33}$	MPa	Čvrstoća pri pritisku etalon prizmi posle 33 dana negovanja u vodi
Δf_p	-	Smanjenje čvrstoće pri pritisku izražen u procentima
$\gamma_{m,oč}$	kg/m ³	Zapreminska masa očvrslog maltera
$\varepsilon_{sm,i}$	mm/m	Skupljanja malterske epruvete
$\varepsilon_{sm,sr}$	mm/m	Srednja vrednost skupljanja malterskih epruveta
$\Delta l_{sm}(t)$	mm	Promena dužine epruvete između merenja u trenutku t i nultog čitanja t_{72h}
l_{sm}	m	Dužina malterske epruvete
$m_{b,v}$	kg	Masa uzorka očvrslog betona zasićenog vodom
V	m ³	Zapremina uzorka
$\gamma_{b,oč,sr}$	kg/m ³	Srednja vred. zaprem. mase očvrslog bet. u vodozasić. stanju
$\gamma_{b,sv,sr}$	kg/m ³	Srednja vred. zapreminske mase betona u svežem stanju

Δh_{sr}	<i>mm</i>	Srednja vrednost sleganje betona
Oznake	Jedinica mere	Značenje oznake
Δp	%	Sadržaj vazduha u betonu
F_{zc}	<i>N</i>	Sila koja je dovela do loma uzorka pri zatezanju cepanjem
d	<i>mm</i>	Prečnik cilindra
l	<i>mm</i>	Dužina (visina) cilindra
$f_{zc,sr}$	<i>MPa</i>	Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju cepanjem
$f_{zs,sr}$	<i>MPa</i>	Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju savijanjem
M	<i>kNm</i>	Maksimalni moment savijanja
$F_{z\check{c}}$	<i>N</i>	Aksijalna sila čupanja (zatezanja)
D	<i>mm</i>	Prečnik pečatnika
$f_{z\check{c},i}$	<i>MPa</i>	Čvrstoća prionjivosti (zatezanja)
$f_{z\check{c},sr}$	<i>MPa</i>	Srednja vrednost čvrstoće prionjivosti
R_i	-	Indeks sklerometra
R_{sr}	-	Srednja vrednost indeksa sklerometra
S	<i>m</i>	Put ultrazvučnog impulsa od sonde predajnika do sonde prijemnika
t	<i>s</i>	Vreme potrebno da impuls pređe odgovarajući put
V_u	<i>m/s</i>	Brzina ultrazvučnog impulsa
$V_{u,sr}$	<i>m/s</i>	Srednja brzina ultrazvučnog impulsa
σ_g	<i>MPa</i>	Gornji napona
σ_d	<i>MPa</i>	Donji napona
ε_g	<i>$\mu m/m$</i>	Dilatacija betona pri delovanju gornjeg napona
ε_d	<i>$\mu m/m$</i>	Dilatacija betona pri delovanju donjeg napona
E_s, E_{cm}, E_c	<i>GPa</i>	Statički modul elastičnosti
$E_{s,sr}$	<i>GPa</i>	Srednja vrednost statičkog modula elastičnosti
f_{bk}	<i>MPa</i>	Marka betona
f_{cm}, f_c	<i>MPa</i>	Čvrstoća pri pritisku betonskih cilindara 150 x 300 mm
N_1	-	Broj udaraca do pojave prve prsline na uzorku
N_2	-	Broj udaraca do pojave loma uzorka
m_t	<i>kg</i>	Udarne masa
v_t	<i>m/s</i>	Brzina udarne mase
g	<i>m/s^2</i>	Ubrzanje Zemljine teže
h_t	<i>m</i>	Visina sa koje pada teg na uzorak
E_1	<i>J</i>	Utrošena energija do pojave prve prsline na uzorku
E_2	<i>J</i>	Utrošena energija do pojave loma uzorka
$\Delta l_{sb}(t)$	<i>mm</i>	Promena dužine betonske epruvete između merenja u trenutku t i nultog čitanja t_{72h}
l_{sb}	<i>m</i>	Dužina betonske epruvete

$\varepsilon_{sb,i}$	<i>mm/m</i>	Skupljanje betonske epruvete
Oznake	Jedinica mere	Značenje oznake
$\varepsilon_{sb,sr}$	<i>mm/m</i>	Srednja vrednost skupljanja betonskih epruveta
m_s	<i>g</i>	Masa uzorka osušenog do konstantne mase
m_{sv}	<i>g</i>	Masa vodom zasićenog uzorka do konstantne mase
$U_{p,i}$	<i>%</i>	Upijanje vode po masi metodom postupnog potapanja
$U_{p,sr}$	<i>%</i>	Srednja vrednost upijanja vode po masi metodom postup. potapanja
f_{E1}	<i>MPa</i>	Čvrstoća pri pritisku etalon epruveta negovanih u vodi do ekvivalentne starosti E1
f_{E2}	<i>MPa</i>	Čvrstoća pri pritisku etalon epruveta negovanih u vodi do ekvivalentne starosti E2
f_{S1}	<i>MPa</i>	čvrstoća pri pritisku epruveta nakon sprovedenih 150 ciklusa smrzavanja
f_{S2}	<i>MPa</i>	čvrstoća pri pritisku epruveta nakon sprovedenih 200 ciklusa smrzavanja
$\Delta f_{p,150}$	<i>%</i>	Smanjenje čvrstoće pri pritisku betona nakon 150 ciklusa smrzavanja
$\Delta f_{p,200}$	<i>%</i>	Smanjenje čvrstoće pri pritisku betona nakon 200 ciklusa smrzavanja
f_{Ei}	<i>MPa</i>	Čvrstoća pri pritisku etalon epruveta posle 3, 6 i 12 meseci negovanja u rastvoru $\text{Ca}(\text{OH})_2$
f_{NSi}	<i>MPa</i>	Čvrstoća pri pritisku epruveta negovanih u 5% rastvoru Na_2SO_4 posle 3, 6 i 12 meseci
Δm_{440}	<i>g</i>	Ukupan gubitak mase uzorka posle 440 okretaja brusne ploče
P	<i>cm²</i>	Stvarna površina uzorka izložena habanju u <i>cm²</i>
$H_{B,i}$	<i>cm³/50cm²</i>	Habanje brušenjem po Bemeu
$H_{B,sr}$	<i>cm³/50cm²</i>	Srednja vrednost habanja brušenjem po Bemeu
C_{Ra}	<i>Bq/kg</i>	Koncentracija radijuma (²²⁶ Ra)
C_{Th232}	<i>Bq/kg</i>	Koncentracija torijuma (²³² Th)
C_{K40}	<i>Bq/kg</i>	Koncentracija kalijuma (⁴⁰ K)
I	-	Gama indeks
R^2	-	Koeficijent korelacije
$f_{s,i}$	<i>MPa</i>	Pojedinačni rezultat ispitivanja čvrstoće pri savijanju
$f_{p,i}$	<i>MPa</i>	Pojedinačni rezultat ispitivanja čvrstoće pri pritisku
$\gamma_{b,oč,i}$	<i>kg/m³</i>	Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju

10.3.2. PRILOG 2. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju maltera*Tabela 1: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku i savijanju malterskih mešavina*

Malterske mešavine	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
E	5,84	31,88	7,36	52,12	8,86	57,48	9,00	70,51
		32,19		50,89		56,71		72,04
	6,18	32,50	7,31	50,58	8,34	55,95	8,81	68,98
		34,34		50,28		56,71		65,14
	5,59	32,65	7,50	52,88	8,46	59,78	8,83	65,91
		32,96		53,65		57,48		67,44
WG5	6,25	32,96	7,33	44,45	8,00	54,55	8,66	63,31
		32,96		45,03		55,10		65,91
	6,11	32,96	6,87	44,45	8,73	53,66	8,83	65,60
		31,27		45,03		52,04		66,67
	5,74	31,88	7,55	44,45	8,51	57,42	8,78	65,14
		32,96		44,45		55,54		65,14
WG10	5,52	31,88	7,04	40,47	8,76	53,65	8,68	60,39
		32,19		41,39		50,58		62,85
	5,57	31,73	6,57	41,39	7,85	53,65	8,76	59,78
		31,58		41,08		49,82		61,31
	5,74	31,42	6,57	42,31	8,51	53,65	8,61	60,39
		31,58		39,85		55,18		60,39
WG15	5,42	28,36	6,30	42,15	7,90	51,35	8,09	57,02
		29,89		40,62		52,88		58,25
	5,17	27,90	6,99	40,62	7,60	51,35	8,87	57,63
		29,12		40,62		51,35		57,02
	5,08	28,36	6,71	39,85	8,01	50,58	8,31	56,41
		27,59		39,85		51,35		56,71
WG20	5,44	26,67	6,38	42,15	7,55	50,58	8,31	55,18
		28,20		42,92		49,82		55,49
	5,00	26,98	6,62	44,15	7,65	49,82	8,04	56,41
		25,44		39,85		49,82		54,26
	5,13	27,28	6,79	39,85	8,12	51,35	8,47	58,25
		27,90		39,85		49,82		58,25

Nastavak tabele 1: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku i savijanju malterskih mešavina

Malterske mešavine	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{s,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
WG35	4,44	20,23	6,01	32,19	6,74	42,15	8,26	49,05
		21,00		32,96		43,23		49,05
	4,24	20,54	6,06	32,80	7,19	41,69	8,04	47,52
		20,54		29,43		42,31		49,05
	4,46	21,15	6,08	31,58	7,60	42,15	8,07	47,52
		21,15		30,35		44,45		48,28
WGD5	6,18	38,32	7,87	52,88	9,00	61,31	8,98	75,11
		36,79		52,12		62,08		69,74
	6,13	36,79	7,82	55,18	8,56	62,85	9,69	68,21
		36,02		56,71		64,38		72,81
	6,16	35,25	8,07	52,88	9,20	64,68	9,42	72,04
		36,79		55,18		64,38		72,81
WGD10	7,31	41,39	8,29	55,95	8,73	66,68	9,64	72,04
		42,92		53,65		67,44		75,11
	5,81	41,39	8,46	55,18	9,22	68,98	9,05	70,51
		42,31		55,18		65,14		73,58
	7,38	42,61	8,39	55,18	9,10	64,38	10,40	74,34
		41,85		54,41		68,98		71,28

10.3.3. PRILOG 3. Ispitivanje skupljanja maltera

Tabela 2: Pojedinačni rezultati ispitivanja skupljanja maltera na vazduhu

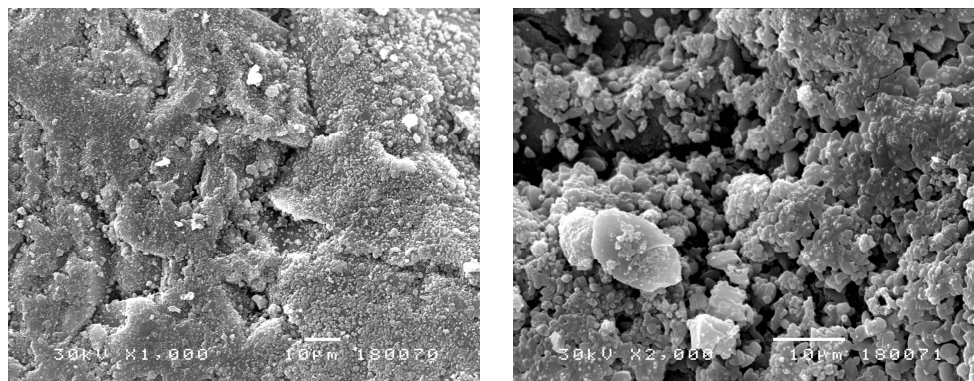
Malterske mešavine	ES	WGS5	WGS10	WGS15	WGS20	WGS35	WGDS5	WGDS10
Vreme	$\varepsilon_{sm,i}$ [mm/m]							
3 dana (<i>nulto merenje</i>)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4 dana	0,066	0,124	0,062	0,124	0,068	0,062	0,024	0,057
	0,060	0,067	0,186	0,124	0,098	0,041	0,040	0,077
	0,061	0,088	0,062	0,124	0,075	0,046	0,029	0,051
7 dana	0,186	0,244	0,186	0,201	0,218	0,062	0,024	0,110
	0,257	0,241	0,311	0,258	0,167	0,124	0,040	0,145
	0,218	0,261	0,186	0,289	0,185	0,186	0,029	0,118

Nastavak tabele 2: Pojedinačni rezultati ispitivanja skupljanja maltera na vazduhu

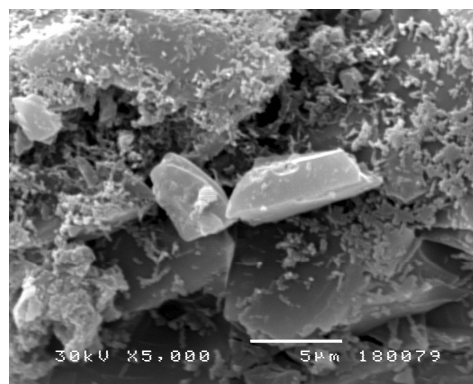
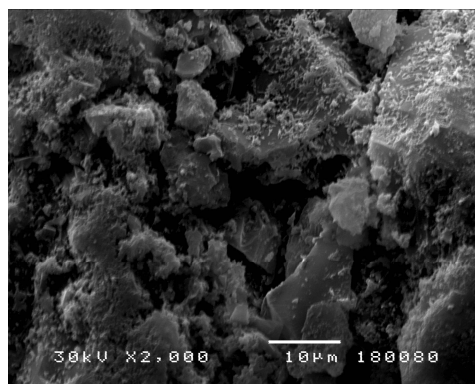
Malterske mešavine	ES	WGS5	WGS10	WGS15	WGS20	WGS35	WGDS5	WGDS10
Vreme	$\varepsilon_{sm,i}$ [mm/m]							
14 dana	0,365	0,373	0,345	0,362	0,294	0,124	0,134	0,267
	0,375	0,444	0,322	0,399	0,251	0,186	0,186	0,336
	0,378	0,395	0,266	0,358	0,265	0,249	0,146	0,328
21 dan	0,506	0,520	0,497	0,548	0,464	0,249	0,311	0,364
	0,559	0,460	0,497	0,534	0,493	0,311	0,311	0,394
	0,520	0,559	0,435	0,596	0,452	0,373	0,311	0,357
28 dana	0,631	0,629	0,621	0,663	0,508	0,311	0,351	0,448
	0,618	0,684	0,622	0,630	0,549	0,373	0,328	0,421
	0,618	0,642	0,745	0,572	0,503	0,435	0,347	0,432
90 dana	0,707	0,718	0,745	0,791	0,622	0,491	0,578	0,637
	0,746	0,684	0,684	0,710	0,641	0,497	0,606	0,618
	0,691	0,695	0,725	0,736	0,628	0,566	0,585	0,605
180 dana	0,844	0,817	0,807	0,851	0,736	0,559	0,691	0,708
	0,823	0,777	0,808	0,823	0,733	0,622	0,678	0,704
	0,851	0,782	0,870	0,844	0,752	0,715	0,681	0,728
360 dana	0,926	0,963	0,901	0,822	0,792	0,559	0,709	0,761
	0,941	0,905	0,870	0,864	0,746	0,622	0,738	0,733
	0,930	0,927	0,963	0,830	0,741	0,715	0,743	0,738

10.3.4. PRILOG 4. SEM analiza maltera

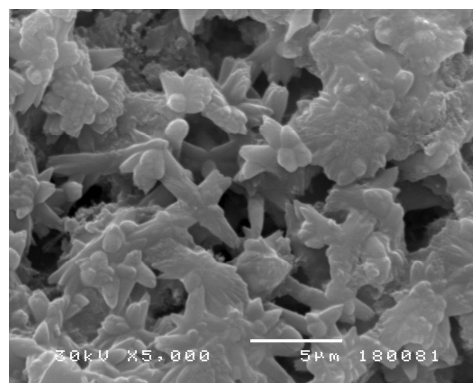
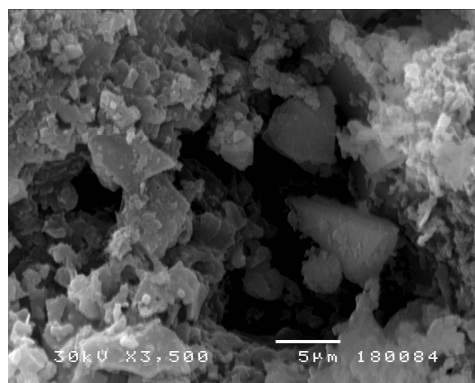
SEM analiza maltera je sprovedena samo na karakterističnim serijama: etalon, WG20, WG35 i WGD10. Takođe, SEM analiza je urađena i na čistom sprašenom staklu finoće 0/0,063 mm. Slikanje uzoraka vršeno je pri različitim uvećanjima.



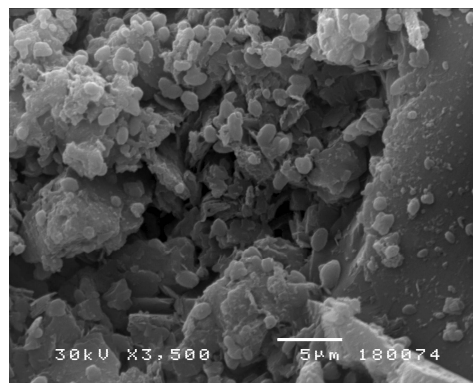
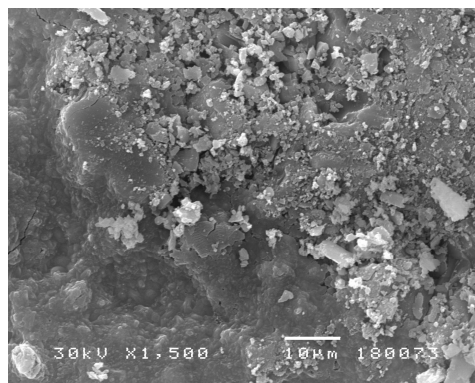
Slika 1: Uvećanje uzorka etalon maltera 1000 puta (levo) i 2000 puta (desno)



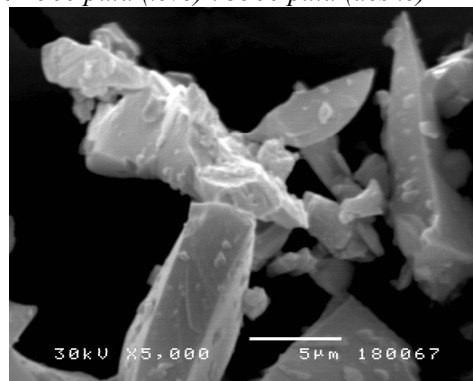
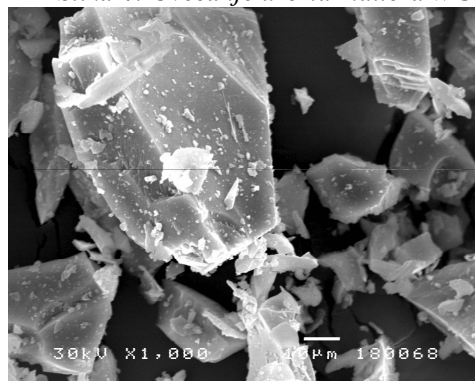
Slika 2: Uvećanje uzorla maltera WG20 2000 puta (levo) i 5000 puta (desno)



Slika 3: Uvećanje uzorla maltera WG35 3500 puta (levo) i 5000 puta (desno)



Slika 4: Uvećanje uzorla maltera WGD10 1500 puta (levo) i 3500 puta (desno)



Slika 5: Uvećanje uzorla čistog CRT stakla finoće 0/0,063 mm 1000 puta (levo) i 5000 puta (desno)

10.3.5.PRILOG 5. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju

Tabela 3: Pojedinačni rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju

Betonske mešavine	Starost betona			
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
	$\gamma_{b,o\check{c},i}$ [kg/m ³]	$\gamma_{b,o\check{c},i}$ [kg/m ³]	$\gamma_{b,o\check{c},i}$ [kg/m ³]	$\gamma_{b,o\check{c},i}$ [kg/m ³]
E	2332	2335	2353	2364
	2353	2350	2341	2344
	2329	2341	2347	2356
WG5	2341	2344	2332	2361
	2323	2356	2344	2364
	2335	2344	2341	2359
WG10	2335	2350	2345	2339
	2350	2379	2345	2329
	2344	2364	2338	2364
WG15	2335	2344	2335	2344
	2323	2317	2337	2329
	2344	2323	2341	2332
WG20	2326	2323	2329	2320
	2326	2335	2344	2314
	2329	2347	2338	2320
WG35	2302	2302	2314	2326
	2317	2311	2322	2323
	2314	2305	2314	2323
WGD5	2317	2329	2338	2347
	2326	2326	2338	2341
	2323	2317	2335	2345
WGD10	2344	2338	2323	2356
	2344	2335	2341	2361
	2341	2332	2323	2364

10.3.6. PRILOG 6. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku betona*Tabela 4: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 2, 7, 28, 90 i 180 dana*

Betonske mešavine	Starost betona				
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana	180 dana
	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]	$f_{p,i}$ [MPa]
E	36,44	46,22	54,89	61,33	62,46
	34,00	47,56	54,67	59,39	58,67
	32,44	41,33	57,33	58,61	59,21
WG5	31,16	37,11	46,56	51,89	59,87
	34,97	40,22	53,44	55,29	57,33
	32,55	42,89	50,67	54,81	55,47
WG10	31,20	38,89	46,00	55,11	60,64
	30,70	39,33	42,67	59,11	61,33
	29,45	35,56	48,00	55,78	62,01
WG15	29,63	34,62	58,00	61,56	66,01
	27,61	35,22	55,78	59,44	66,89
	28,77	38,67	55,78	64,78	64,44
WG20	25,11	33,89	44,69	55,33	60,08
	28,67	32,78	48,11	59,78	59,02
	27,33	35,44	47,86	58,00	61,78
WG35	22,44	29,01	35,78	41,44	43,89
	21,33	26,00	34,89	40,45	47,54
	21,11	29,31	34,44	42,79	44,23
WGD5	38,22	46,22	58,24	63,85	68,53
	40,89	45,78	59,56	61,14	65,32
	39,78	47,11	56,82	61,45	70,79
WGD10	46,28	49,34	61,02	65,71	74,27
	45,66	46,01	56,43	63,68	69,70
	41,28	48,21	62,57	63,27	74,05

10.3.7. PRILOG 7. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem*Tabela 5: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana*

Betonske mešavine	Starost betona			
	28 dana		90 dana	
	F_{zc} [kN]	$f_{zc,i}$ [MPa]	F_{zc} [kN]	$f_{zc,i}$ [MPa]
E	290	4,10	300	4,24
	296	4,19	310	4,39
	286	4,05	288	4,07
WG5	281	3,98	288	4,07
	266	3,76	273	3,86
	264	3,73	266	3,90
WG10	276	3,90	293	4,15
	268	3,79	285	4,03
	280	3,96	275	3,89
WG15	286	4,05	297	4,20
	270	3,82	283	4,00
	260	3,68	296	4,19
WG20	280	3,96	304	4,30
	278	3,93	293	4,15
	266	3,76	288	4,07
WG35	234	3,31	258	3,65
	245	3,47	249	3,52
	246	3,48	258	3,65
WGD5	300	4,24	348	4,92
	278	3,93	332	4,70
	290	4,10	360	5,09
WGD10	337	4,77	357	5,05
	308	4,36	342	4,84
	315	4,46	377	5,33

10.3.8. PRILOG 8. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem*Tabela 6: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona pri starosti od 28 i 90 dana*

Betonske mešavine	Starost betona			
	28 dana		90 dana	
	F_{zs} [kN]	$f_{zs,i}$ [MPa]	F_{zs} [kN]	$f_{zs,i}$ [MPa]
E	16,48	5,93	18,34	6,60
	18,34	6,60	17,56	6,32
	17,46	6,29	18,25	6,57
WG5	12,85	4,63	17,51	6,30
	13,15	4,73	17,17	6,18
	13,34	4,80	16,68	6,00
WG10	15,30	5,51	17,17	6,18
	15,40	5,54	17,02	6,13
	14,52	5,23	17,90	6,45
WG15	14,72	5,30	18,15	6,53
	14,57	5,24	16,87	6,07
	13,83	4,98	17,27	6,22
WG20	13,49	4,86	16,43	5,92
	12,56	4,52	16,33	5,88
	11,82	4,26	15,50	5,58
WG35	13,10	4,71	14,67	5,28
	12,26	4,41	15,99	5,76
	12,65	4,56	14,18	5,10
WGD5	18,64	6,71	20,01	7,20
	19,72	7,10	19,42	6,99
	20,11	7,24	20,21	7,28
WGD10	18,93	6,82	19,91	7,17
	19,87	7,15	20,70	7,45
	19,82	7,13	19,82	7,13

10.3.9. PRILOG 9. Ispitivanje čvrstoće prionjivosti - "Pull - off" test*Tabela 7: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće prionjivosti betona pri starosti od 90 dana i opis loma*

Betonska serija	Oznaka uzorka	$F_{zč}$ [N]	$f_{zč,i}$ [MPa]	Opis loma
E	BS1/E	5668	3,564	Lom po betonu, sloj na pečatniku 2-3 mm
	BS2/E	5521	3,471	Lom po betonu, sloj na pečatniku 10 mm
	BS3/E	5059	3,181	Lom po betonu, sloj na pečatniku 2-3 mm
WG5	BS1/WG5	5608	3,526	Lom po betonu, sloj na pečatniku 2-3 mm
	BS2/WG5	5841	3,673	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
	BS3/WG5	5682	3,574	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
WG10	BS1/WG10	5281	3,320	Lom po betonu, sloj na pečatniku 4-5 mm
	BS2/WG10	4904	3,083	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
	BS3/WG10	5035	3,166	Lom po betonu, sloj na pečatniku 8-10 mm
WG15	BS1/WG15	4634	2,914	Lom po betonu 50% i lepku 50% (odbačeno)
	BS2/WG15	5541	3,484	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
	BS3/WG15	5798	3,646	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
WG20	BS1/WG20	4804	3,021	Lom po betonu 80% i lepku 20% (odbačeno)
	BS2/WG20	5226	3,286	Lom po betonu, sloj na pečatniku 6-8 mm
	BS3/WG20	4924	3,096	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
WG35	BS1/WG35	3937	2,475	Lom po betonu 50% i lepku 50% (odbačeno)
	BS2/WG35	4484	2,819	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
	BS3/WG35	4073	2,561	Lom po betonu, sloj na pečatniku 8 mm

Nastavak tabele 7: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće prionjivosti betona pri starosti od 90 dana i opis loma

Betonska serija	Oznaka uzorka	$F_{zč}$ [N]	$f_{zč,i}$ [MPa]	Opis loma
WGD5	BS1/WGD5	5385	3,386	Lom po betonu, sloj na pečatniku 10-12 mm
	BS2/WGD5	4905	3,084	Lom po betonu, sloj na pečatniku 10-12 mm
	BS3/WGD5	5531	3,352	Lom po betonu, sloj na pečatniku 10-12 mm
WGD10	BS1/WGD10	5410	3,402	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm
	BS2/WGD10	5261	3,308	Lom po betonu, sloj na pečatniku 10-12 mm
	BS3/WGD10	5562	3,497	Lom po betonu, sloj na pečatniku 12-15 mm

FOTOGRAFIJE UZORAKA NAKON ISPITIVANJA ČVRSTOĆE PRIONJIVOSTI



Slika 6: Uzorci etalon betona, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/E, BS2/E i BS3/E



Slika 7: Uzorci betona WG5, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WG5, BS2/WG5 i BS3/WG5



Slika 8: Uzorci betona WG10, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WG10, BS2/WG10 i BS3/WG10



Slika 9: Uzorci betona WG15, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WG15, BS2/WG15 i BS3/WG15



Slika 10: Uzorci betona WG20, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WG20, BS2/WG20 i BS3/WG20



Slika 11: Uzorci betona WG35, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WG35, BS2/WG35 i BS3/WG35



Slika 12: Uzorci betona WGD5, prizme 20 x 20 x 15 cm-BS1/WGD5, BS2/WGD5 i BS3/WGD5



Slika 13: Uzorci betona WGD10, prizme 20 x 20 x 15 cm - BS1/WGD10, BS2/WGD10 i BS3/WGD10

10.3.10. PRILOG 10. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra

Tabela 8: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i indeska sklerometra pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	Etalon - E					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	36,44	40	34,00	40	32,44	39
7 dana	46,22	45	47,56	45	41,33	44
28 dana	54,89	48	54,67	48	57,33	49
90 dana	61,33	50	59,39	50	58,61	50
Beton/ starost	WG5					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	31,16	38	34,97	39	32,55	38
7 dana	37,11	42	40,22	43	42,89	43
28 dana	46,56	46	53,44	47	50,67	46
90 dana	51,89	47	55,29	48	54,81	48

Nastavak tabele 8: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i indeska sklerometra pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	WG10					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	31,20	37	30,70	37	29,45	36
7 dana	38,89	42	39,33	43	35,56	40
28 dana	46,00	46	42,67	43	48,00	46
90 dana	55,11	48	59,11	50	55,78	49
Beton/ starost	WG15					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	29,63	36	27,61	35	28,77	36
7 dana	34,62	40	35,22	41	38,67	42
28 dana	58,00	50	55,78	49	55,78	49
90 dana	61,56	51	59,44	50	64,78	52
Beton/ starost	WG20					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	25,11	34	28,67	35	27,33	35
7 dana	33,89	39	32,78	38	35,44	40
28 dana	44,69	45	48,11	46	47,86	46
90 dana	55,33	49	59,78	50	58,00	50
Beton/ starost	WG35					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	22,44	28	21,33	28	21,11	28
7 dana	29,01	36	26,00	35	29,31	36
28 dana	35,78	40	34,89	40	34,44	40
90 dana	41,44	43	40,45	43	42,79	43

Nastavak tabele 8: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i indeska sklerometra pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	WGD5					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	38,22	42	40,89	43	39,78	43
7 dana	46,22	46	45,78	45	47,11	46
28 dana	58,24	50	59,56	50	56,82	49
90 dana	63,85	53	61,14	52	61,45	52
Beton/ starost	WGD10					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i	$f_{p,i}$ [MPa]	R_i
2 dana	46,28	46	45,66	45	41,28	43
7 dana	49,34	46	46,01	46	48,21	46
28 dana	61,02	51	56,43	49	62,57	52
90 dana	65,71	53	63,68	53	63,27	53

10.3.11. PRILOG 11. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

Tabela 9: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvučnog impulsa pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	Etalon - E					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	36,44	4476	34,00	4449	32,44	4417
7 dana	46,22	4661	47,56	4635	41,33	4586
28 dana	54,89	4744	54,67	4718	57,33	4776
90 dana	61,33	4813	59,39	4797	58,61	4723
Beton/ starost	WG5					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	31,16	4345	34,97	4528	32,55	4382
7 dana	37,11	4492	40,22	4563	42,89	4597
28 dana	46,56	4634	53,44	4735	50,67	4706
90 dana	51,89	4695	55,29	4762	54,81	4741

Nastavak tabele 9: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvučnog impulsa pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	WG10					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	31,20	4374	30,70	4384	29,45	4348
7 dana	38,89	4543	39,33	4559	35,56	4439
28 dana	46,00	4653	42,67	4587	48,00	4661
90 dana	55,11	4733	59,11	4812	55,78	4719
Beton/ starost	WG15					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	29,63	4311	27,61	4313	28,77	4367
7 dana	34,62	4473	35,22	4437	38,67	4538
28 dana	58,00	4796	55,78	4701	55,78	4766
90 dana	61,56	4816	59,44	4724	64,78	4832
Beton/ starost	WG20					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	25,11	4239	28,67	4372	27,33	4268
7 dana	33,89	4425	32,78	4425	35,44	4460
28 dana	44,69	4589	48,11	4689	47,86	4677
90 dana	55,33	4723	59,78	4806	58,00	4760
Beton/ starost	WG35					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	22,44	4185	21,33	4154	21,11	4140
7 dana	29,01	4347	26,00	4254	29,31	4351
28 dana	35,78	4466	34,89	4432	34,44	4485
90 dana	41,44	4601	40,45	4556	42,79	4599
Beton/ starost	WGD5					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	38,22	4532	40,89	4579	39,78	4521
7 dana	46,22	4635	45,78	4628	47,11	4673
28 dana	58,24	4788	59,56	4789	56,82	4719
90 dana	63,85	4808	61,14	4796	61,45	4771

Nastavak tabele 9: Pojedinačni rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona i brzine ultrazvučnog impulsa pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana

Beton/ starost	WGD10					
	1. uzorak kocka ivice 15 cm		2. uzorak kocka ivice 15 cm		3. uzorak kocka ivice 15 cm	
	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]	$f_{p,i}$ [MPa]	V_u [m/s]
2 dana	46,28	4634	45,66	4649	41,28	4572
7 dana	49,34	4671	46,01	4641	48,21	4679
28 dana	61,02	4793	56,43	4735	62,57	4808
90 dana	65,71	4838	63,68	4786	63,27	4785

10.3.12. PRILOG 12. Statički modul elastičnosti

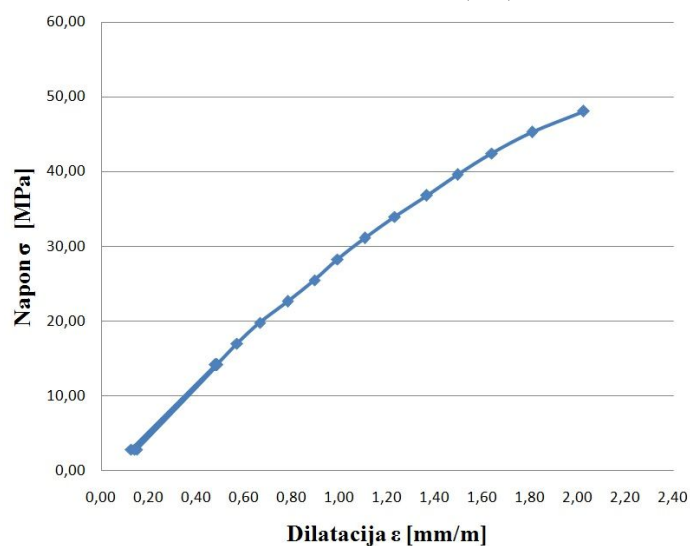
Tabela 10: Pojedinačni rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana

Betonske mešavine	Starost betona	
	28 dana	90 dana
	E_c [GPa]	E_c [GPa]
E	35,37	36,99
	36,24	36,55
	35,41	37,19
WG5	33,21	36,71
	33,02	36,54
	33,92	36,25
WG10	34,15	37,53
	34,81	38,20
	34,61	37,70
WG15	34,88	37,15
	34,40	36,56
	34,97	37,32
WG20	32,77	35,80
	33,35	36,85
	33,25	37,22
WG35	30,08	32,44
	32,55	33,85
	31,21	33,61

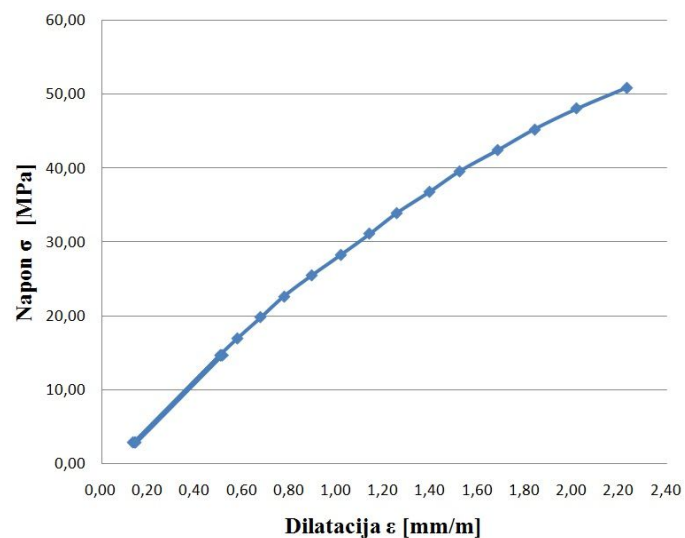
Nastavak tabele 10: Pojedinačni rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona pri starosti od 28 i 90 dana

Betonske mešavine	Starost betona	
	28 dana	90 dana
	E_c [GPa]	E_c [GPa]
WGD5	34,59	36,47
	35,62	35,85
	35,42	36,91
WGD10	36,75	37,30
	35,78	37,47
	36,01	37,88

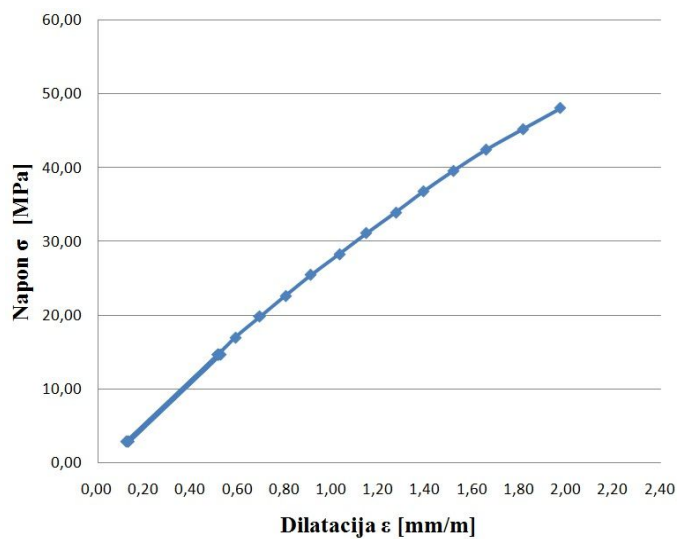
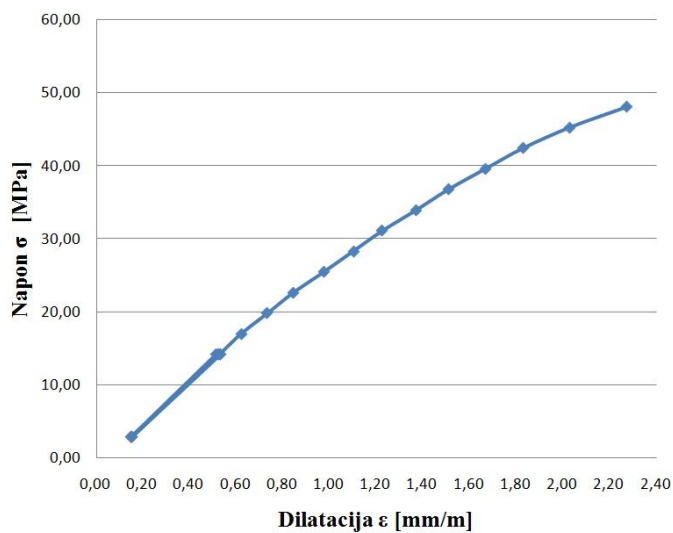
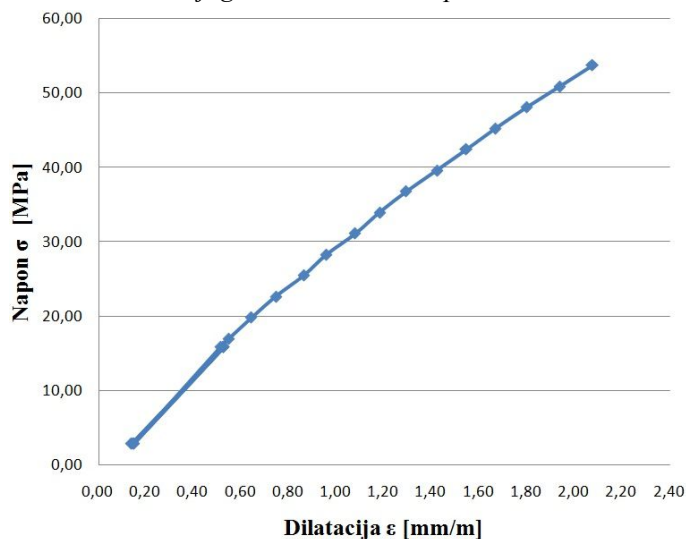
DIJAGRAMI NAPONA I DEFORMACIJA (σ - ϵ) BETONSKIH SERIJA

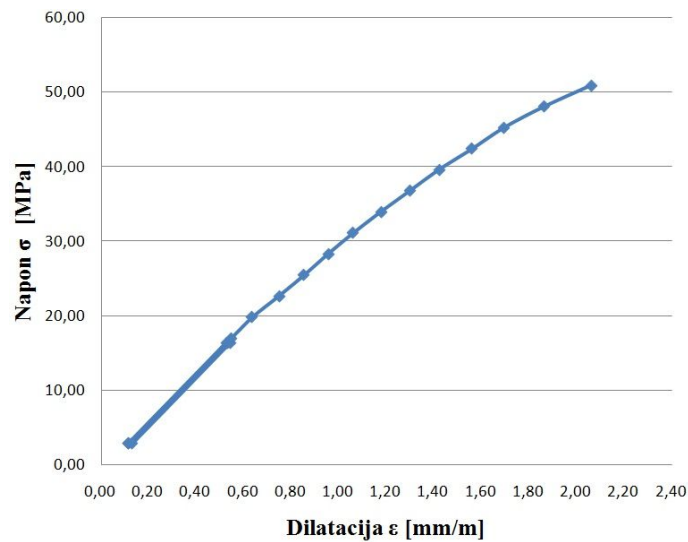


Slika 14: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WG5 pri starosti od 90 dana



Slika 15: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WG10 pri starosti od 90 dana

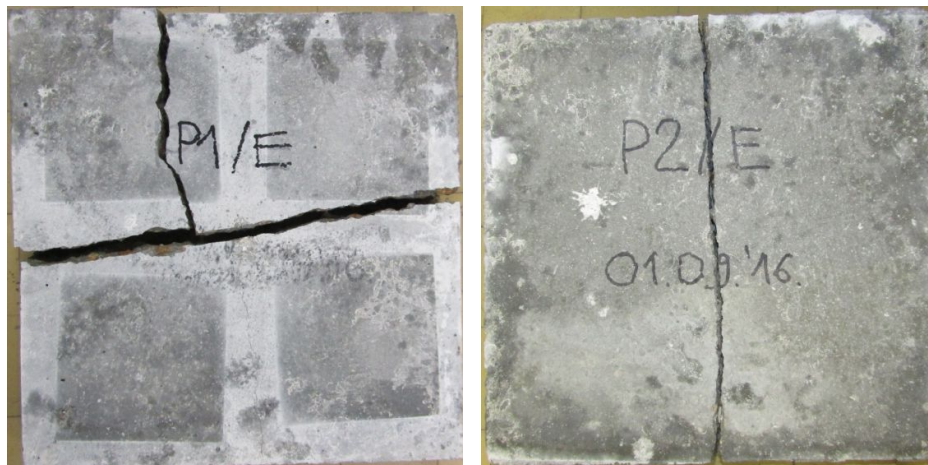
Slika 16: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WG15 pri starosti od 90 danaSlika 17: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WG20 pri starosti od 90 danaSlika 18: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WGD5 pri starosti od 90 dana



Slika 19: $\sigma - \epsilon$ dijagram betona WGD10 pri starosti od 90 dana

10.3.13. PRILOG 13. Ispitivanje udarne otpornosti betona - "Drop weight test"

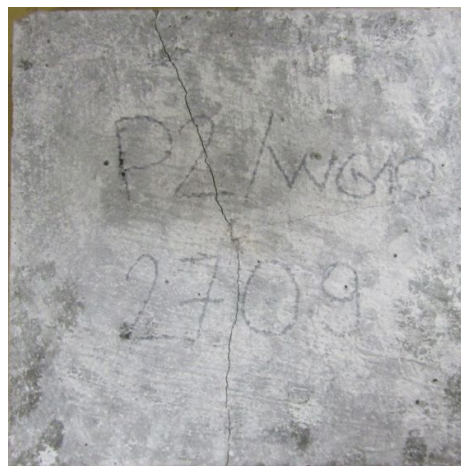
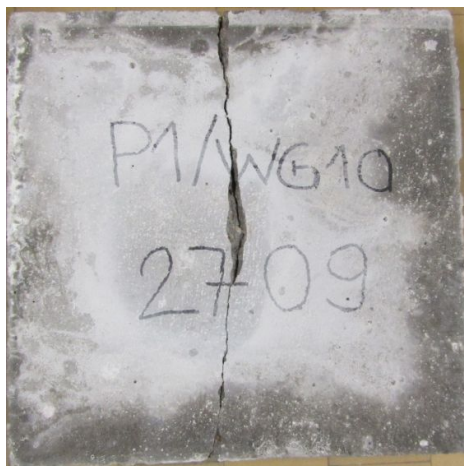
FOTOGRAFIJE UZORAKA NAKON LOMA - "DROP WEIGHT TEST"



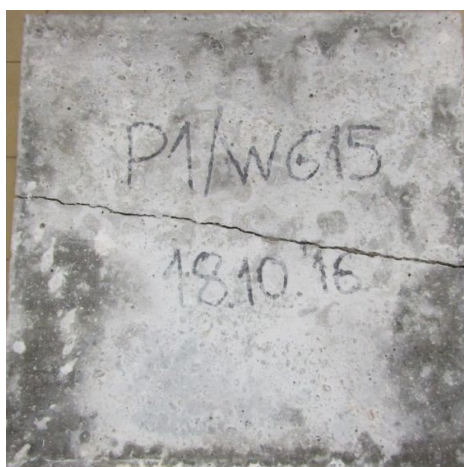
Slika 20: Uzorci etalon betona, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/E, P2/E



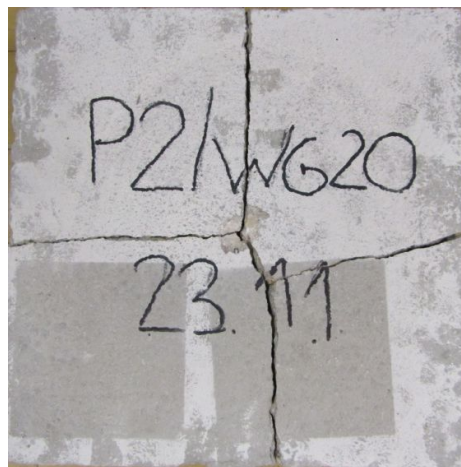
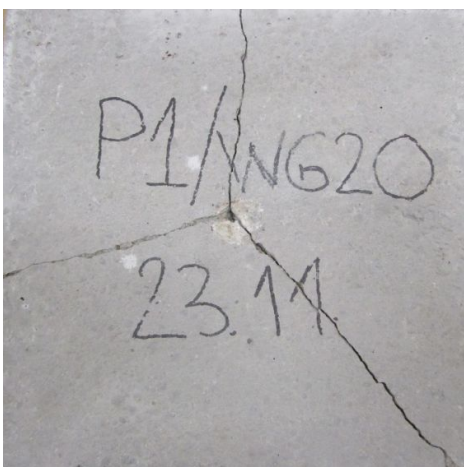
Slika 21: Uzorci betona WG5, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG5, P2/WG5



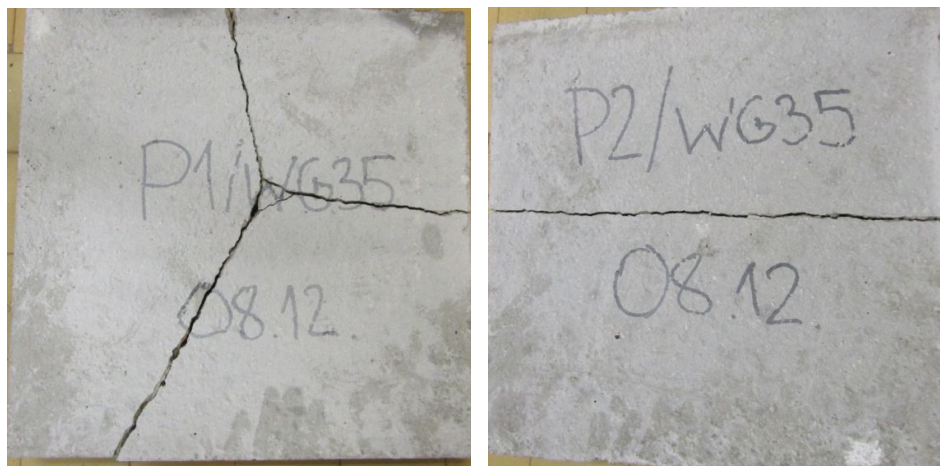
Slika 22: Uzorci betona WG10, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG10 ,P2/WG10



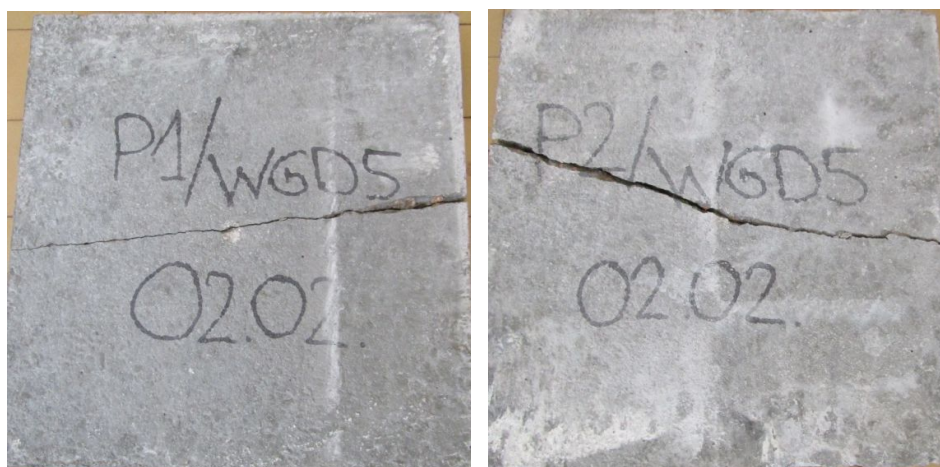
Slika 23: Uzorci betona WG15, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG15 ,P2/WG15



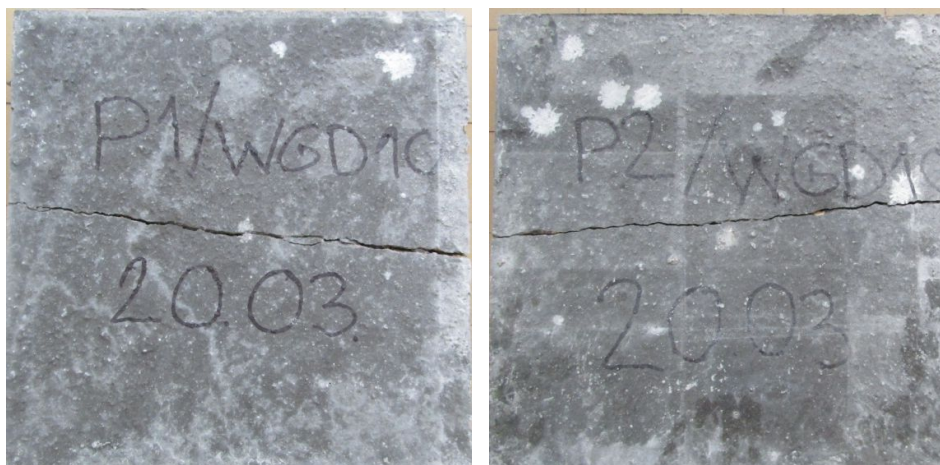
Slika 24: Uzorci betona WG20, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG20 ,P2/WG20



Slika 25: Uzorci betona WG35, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG35 ,P2/WG35



Slika 26: Uzorci betona WGD5, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG35 ,P2/WG35



Slika 27: Uzorci betona WGD10, ploče 40 x 40 x 6 cm - P1/WG35 ,P2/WG35

10.3.14. PRILOG 14. Ispitivanje skupljanja betona*Tabela 11: Pojedinačni rezultati ispitivanja skupljanja betona na vazduhu*

Betonske mešavine	ES	WGS5	WGS10	WGS15	WGS20	WGS35	WGDS5	WGDS10
Vreme	$\varepsilon_{sb,i}$ [mm/m]							
3 dana	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4 dan	0,042	0,037	0,014	0,014	0,020	0,028	0,014	0,011
	0,022	0,028	0,010	0,022	0,034	0,028	0,024	0,007
	0,028	0,026	0,010	0,020	0,020	0,026	0,015	0,012
7 dana	0,159	0,105	0,070	0,054	0,112	0,100	0,114	0,097
	0,143	0,100	0,074	0,060	0,124	0,094	0,122	0,084
	0,141	0,088	0,070	0,060	0,128	0,094	0,091	0,094
14 dana	0,249	0,238	0,206	0,174	0,234	0,226	0,215	0,210
	0,231	0,230	0,206	0,204	0,274	0,248	0,238	0,208
	0,232	0,204	0,210	0,218	0,244	0,270	0,207	0,210
21 dan	0,306	0,308	0,270	0,256	0,300	0,288	0,298	0,299
	0,312	0,290	0,266	0,292	0,330	0,290	0,268	0,286
	0,305	0,276	0,272	0,298	0,308	0,292	0,282	0,287
28 dana	0,342	0,356	0,326	0,312	0,370	0,370	0,372	0,301
	0,366	0,354	0,326	0,336	0,404	0,358	0,346	0,315
	0,320	0,326	0,328	0,344	0,388	0,374	0,348	0,312
90 dana	0,498	0,506	0,488	0,466	0,474	0,456	0,492	0,417
	0,515	0,482	0,468	0,474	0,456	0,474	0,444	0,412
	0,500	0,456	0,480	0,506	0,488	0,478	0,462	0,403
180 dana	0,548	0,574	0,549	0,526	0,532	0,534	0,534	0,462
	0,566	0,566	0,545	0,550	0,530	0,532	0,510	0,462
	0,548	0,552	0,565	0,572	0,550	0,528	0,520	0,471

10.3.15. PRILOG 15. Ispitivanje upijanja vode metodom postupnog potapanja

Tabela 12: Pojedinačni rezultati ispitivanja upijanja vode betonskih uzoraka oblika kocke ivice 7,1 cm

Betonska mešavina	Suv uzorak m_s [g]	Zasićen uzorak m_{sv} [g]	Upijanje vode $U_{p,i}$ [%]
E	816,90	856,76	4,88
	819,60	858,53	4,75
	817,86	859,57	5,10
WG5	805,72	842,70	4,59
	801,25	840,03	4,84
	808,00	845,25	4,61
WG10	803,36	840,64	4,64
	809,54	847,75	4,72
	815,61	850,84	4,32
WG15	805,80	840,69	4,33
	812,14	848,93	4,53
	815,01	850,62	4,37
WG20	806,53	842,74	4,49
	810,08	844,50	4,25
	814,18	849,16	4,30
WG35	811,47	850,83	4,85
	819,93	857,81	4,62
	809,06	848,70	4,90
WGD5	823,07	859,20	4,39
	820,11	856,19	4,40
	816,45	853,60	4,55
WGD10	856,83	891,45	4,04
	849,90	884,40	4,06
	876,36	911,91	4,06

10.3.16. PRILOG 16. Ispitivanje otpornosti na jednovremeno dejstvo mraza i soli za odmrzavanje

FOTOGRAFIJE UZORAKA NAKON 25 CIKLUSA DELOVANJA M+S



Slika 28: Izgled površine betonskih uzoraka etalon serije nakon 25 ciklusa M + S



Slika 29: Izgled površine betonskih uzoraka serije WG5 nakon 25 ciklusa M + S



Slika 30: Izgled površine betonskih uzoraka serije WG10 nakon 25 ciklusa M + S



Slika 31: Izgled površine betonskih uzoraka serije WG15 nakon 25 ciklusa M + S



Slika 32: Izgled površine betonskih uzoraka serije WG20 nakon 25 ciklusa M + S



Slika 33: Izgled površine betonskih uzoraka serije WG35 nakon 25 ciklusa M + S

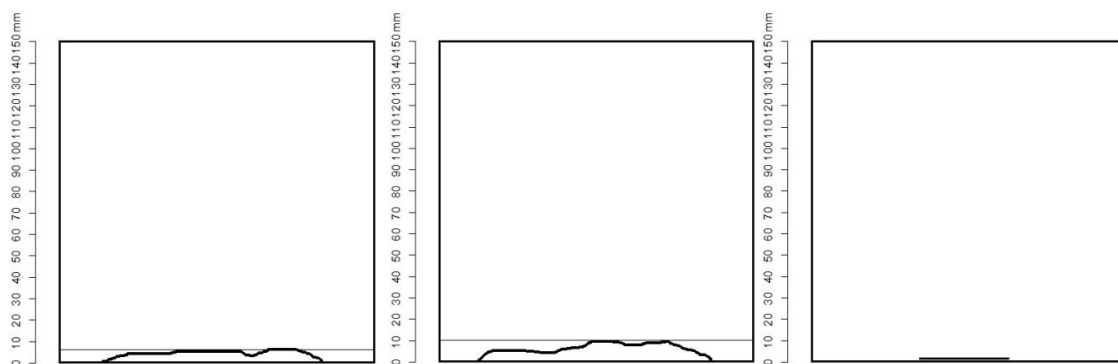


Slika 34: Izgled površine betonskih uzoraka serije WGD5 nakon 25 ciklusa M + S

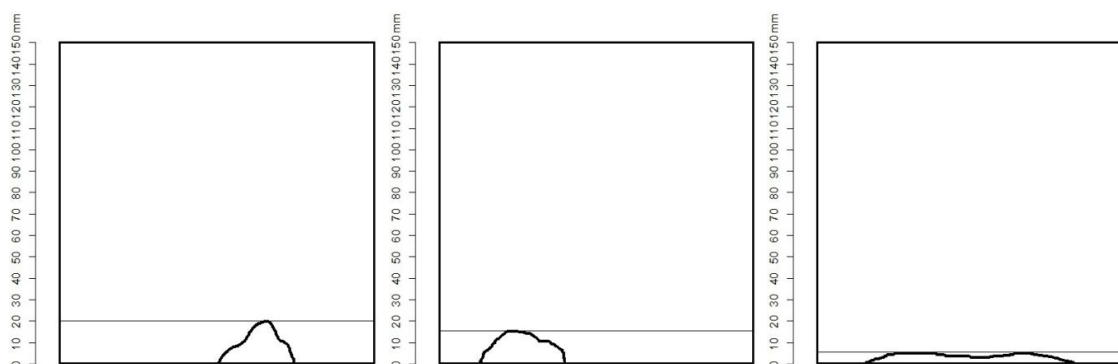


Slika 35: Izgled površine betonskih uzoraka serije WGD10 nakon 25 ciklusa M + S

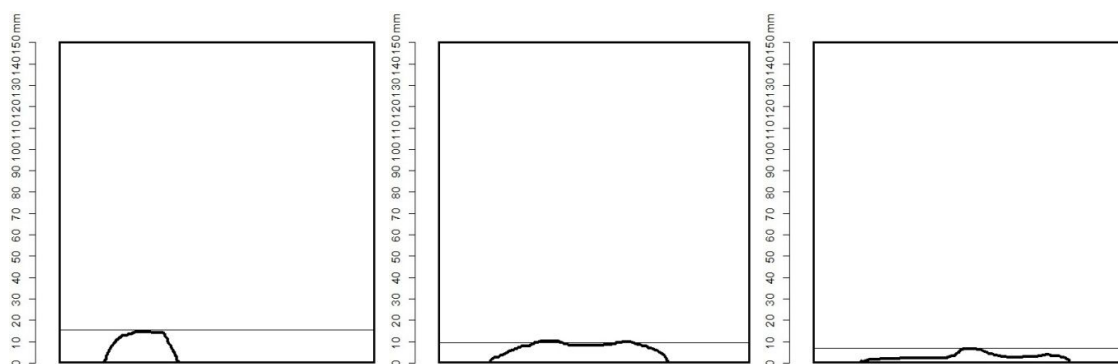
10.3.17. PRILOG 17. Ispitivanje vodonepropustljivosti betona



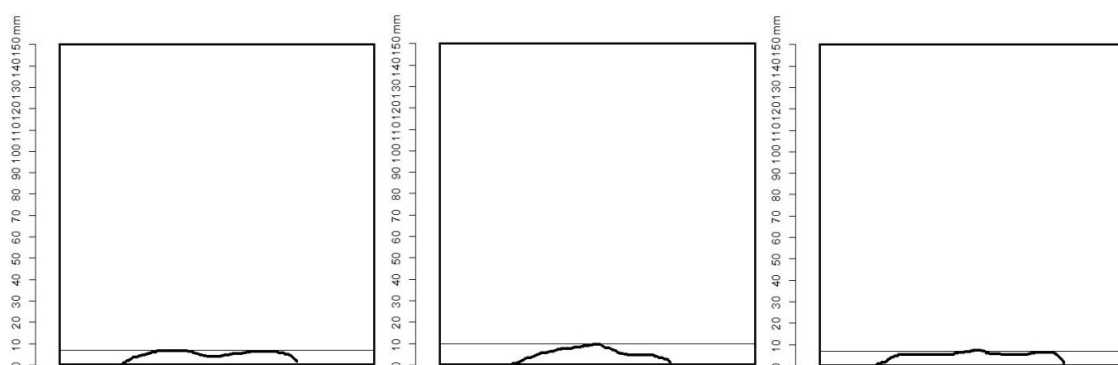
Slika 36: Šematski prikaza epruveta etalon betona posle prodiranja vode pod pritiskom



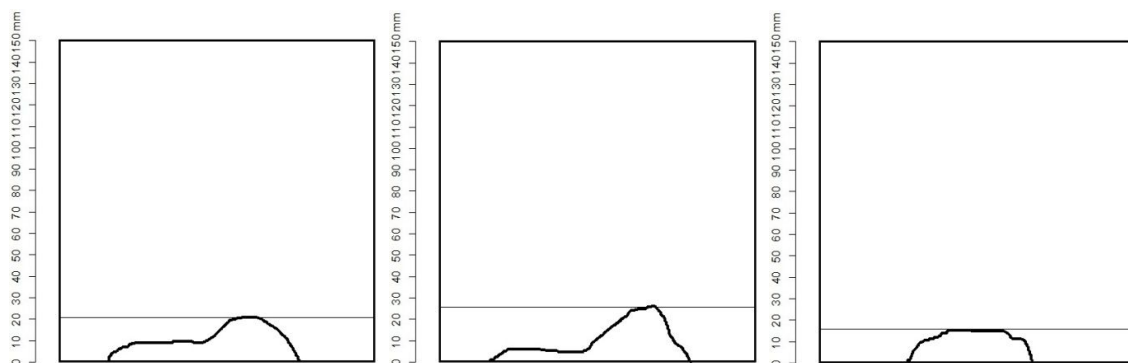
Slika 37: Šematski prikaza epruveta betona WG5 posle prodiranja vode pod pritiskom



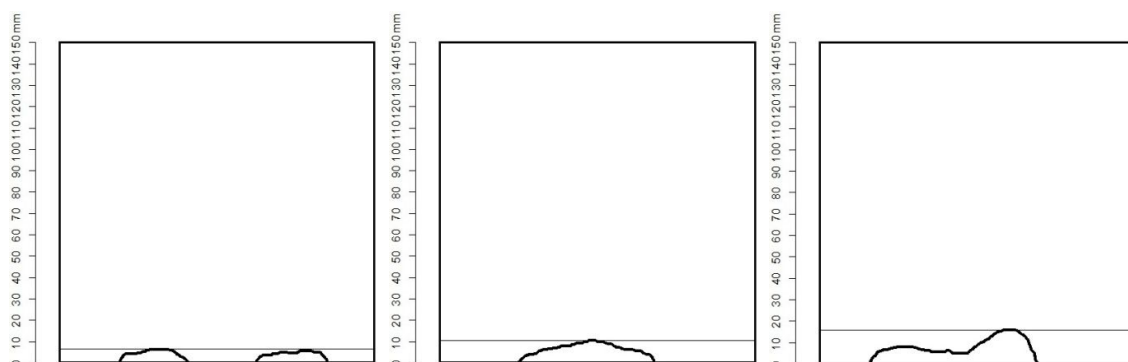
Slika 38: Šematski prikaza epruveta betona WG10 posle prodiranja vode pod pritiskom



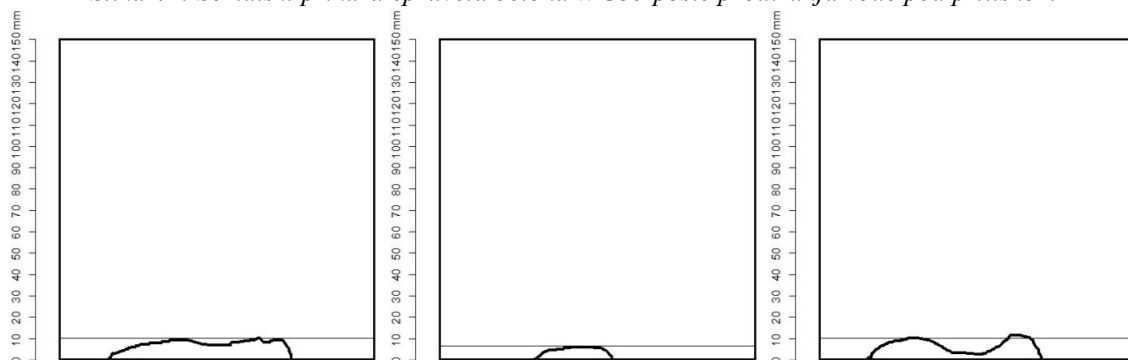
Slika 39: Šematski prikaza epruveta betona WG15 posle prodiranja vode pod pritiskom



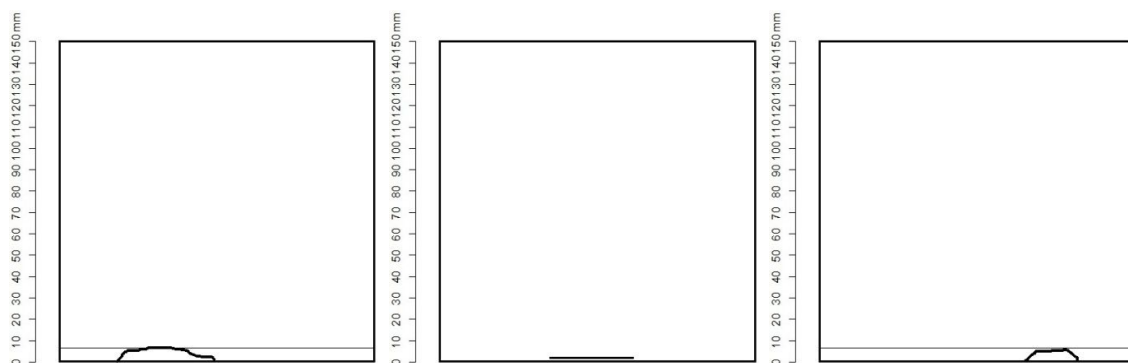
Slika 40: Šematski prikaza epruveta betona WG20 posle prodiranja vode pod pritiskom



Slika 41: Šematski prikaza epruveta betona WG35 posle prodiranja vode pod pritiskom



Slika 42: Šematski prikaza epruveta betona WGD5 posle prodiranja vode pod pritiskom



Slika 43: Šematski prikaza epruveta betona WGD10 posle prodiranja vode pod pritiskom

10.3.18. PRILOG 18. Ispitivanje otpornosti na dejstvo sulfata*Tabela 13: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće uzoraka betona serije E negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata*

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
Etalon	Ca(OH) ₂	521,52	67,75	67,76	524,83	68,18	71,14	561,29	72,92	72,71
		532,43	69,17		550,74	71,55		558,10	72,50	
		510,88	66,37		567,28	73,69		548,64	71,31	
	Na ₂ SO ₄	499,89	64,94	66,33	532,65	69,20	69,07	540,49	70,25	71,27
		520,69	67,64		522,85	67,92		556,92	72,35	
		511,17	66,41		539,46	70,08		547,80	71,20	
		Δf _p [%]		2,16	Δf _p [%]		2,92	Δf _p [%]		1,98

Tabela 14: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće uzoraka betona serije WG5 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WG5	Ca(OH) ₂	480,43	62,41	63,83	527,40	68,51	67,02	531,28	69,02	71,54
		488,19	63,42		498,55	64,77		569,72	74,01	
		505,34	65,65		521,77	67,78		551,01	71,58	
	Na ₂ SO ₄	446,56	58,01	58,95	493,84	64,15	62,64	527,33	68,50	67,22
		458,43	59,55		470,10	61,07		510,01	66,25	
		456,29	59,28		482,54	62,69		515,05	66,90	
		Δf _p [%]		7,64	Δf _p [%]		6,54	Δf _p [%]		6,04

Tabela 15: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće uzoraka betona WG10 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WG10	Ca(OH) ₂	492,70	64,01	62,30	545,68	70,89	69,27	575,71	74,79	73,51
		486,56	63,21		531,50	69,05		551,38	71,63	
		459,39	59,68		522,55	67,88		570,42	74,10	
	Na ₂ SO ₄	471,71	61,28	61,57	483,75	62,84	63,72	485,17	63,03	66,15
		450,31	58,50		509,24	66,15		513,94	66,77	
		497,57	64,64		478,58	62,17		528,61	68,67	
		Δf _p [%]		1,17	Δf _p [%]		8,01	Δf _p [%]		10,01

Tabela 16: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće uzoraka betona WG15 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WG15	Ca(OH) ₂	469,01	60,93	65,08	565,14	73,42	71,83	585,31	76,04	74,70
		531,34	69,03		535,25	69,53		559,63	72,70	
		502,64	65,30		558,27	72,52		580,05	75,35	
	Na ₂ SO ₄	441,91	57,41	60,71	513,63	66,73	64,96	536,70	69,72	68,59
		488,78	63,50		504,09	65,49		512,98	66,64	
		471,30	61,23		491,24	63,82		534,34	69,42	
		Δf _p [%]		6,72	Δf _p [%]		9,56	Δf _p [%]		8,18

Tabela 17: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće uzoraka betona WG20 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WG20	Ca(OH) ₂	426,95	55,46	58,37	498,65	64,78	62,96	528,74	68,69	68,26
		455,58	59,18		487,80	63,37		532,12	69,13	
		443,00	57,55		467,44	60,72		515,37	66,95	
	Na ₂ SO ₄	458,82	59,60	57,54	445,61	57,89	60,33	493,78	64,15	64,38
		458,54	59,57		471,86	61,30		504,75	65,57	
		427,29	55,51		475,66	61,79		488,22	63,42	
		Δf _p [%]		1,42	Δf _p [%]		4,18	Δf _p [%]		5,69

Tabela 18: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće uzoraka betona WG35 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WG35	Ca(OH) ₂	369,36	47,98	46,81	398,48	51,77	52,98	439,42	57,08	58,58
		385,85	50,13		421,08	54,70		451,89	58,70	
		334,74	43,49		403,88	52,47		461,38	59,94	
	Na ₂ SO ₄	361,28	46,93	44,75	381,57	49,57	50,02	437,28	56,81	56,60
		323,19	41,99		397,27	51,61		443,28	57,59	
		348,98	45,34		376,24	48,88		426,58	55,42	
		Δf _p [%]		4,39	Δf _p [%]		5,59	Δf _p [%]		3,39

Tabela 19: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće uzoraka betona WGD5 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WGD5	Ca(OH) ₂	535,21	69,53	69,01	548,24	71,22	72,24	593,45	77,09	76,74
		520,11	67,57		562,72	73,10		598,67	77,77	
		534,74	69,47		557,17	72,38		580,01	75,35	
	Na ₂ SO ₄	504,58	65,55	67,64	537,10	69,77	70,76	564,81	73,37	74,80
		532,05	69,12		556,74	72,33		583,48	75,80	
		525,28	68,24		540,12	70,17		579,01	75,22	
		Δf _p [%]	1,99		Δf _p [%]	2,05		Δf _p [%]	2,53	

Tabela 20: Pojedinačni rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće uzoraka betona WGD10 negovanih u rastvoru kalcijum - hidoksida i natrijum - sulfata

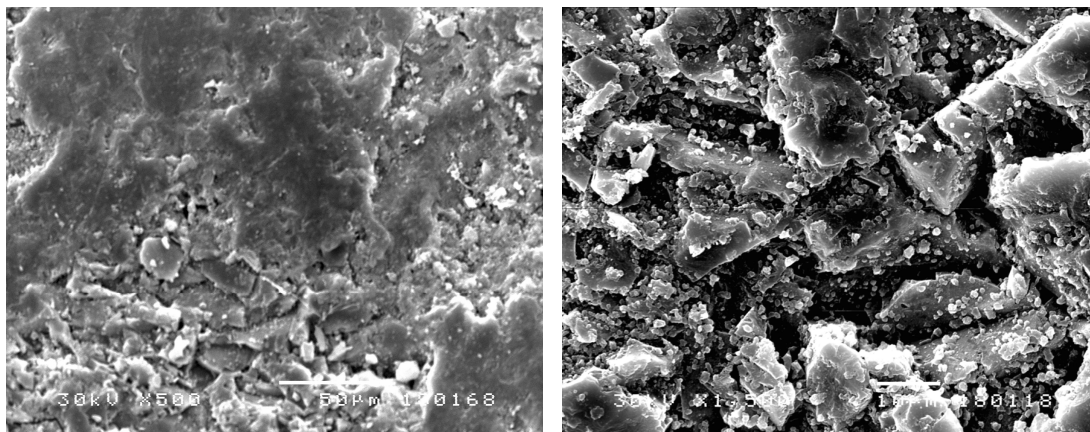
Nega u rastvoru		3 meseca			6 meseci			12 meseci		
		F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]	F _p [kN]	f _{p,i} [MPa]	f _{p,sr} [MPa]
WGD10	Ca(OH) ₂	566,80	73,63	71,53	559,11	72,63	73,66	622,78	80,90	78,53
		531,01	68,98		555,20	72,13		579,88	75,33	
		552,39	71,76		586,75	76,22		610,78	79,35	
	Na ₂ SO ₄	518,91	67,41	69,42	580,19	75,37	72,82	588,01	76,39	77,34
		565,64	73,48		535,28	69,54		607,89	78,97	
		518,58	67,37		566,07	73,54		590,19	76,67	
		Δf _p [%]	2,95		Δf _p [%]	1,15		Δf _p [%]	1,52	

10.3.19. PRILOG 19. Otpornost prema habanju brušenjem*Tabela 20: Pojedinačni rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem*

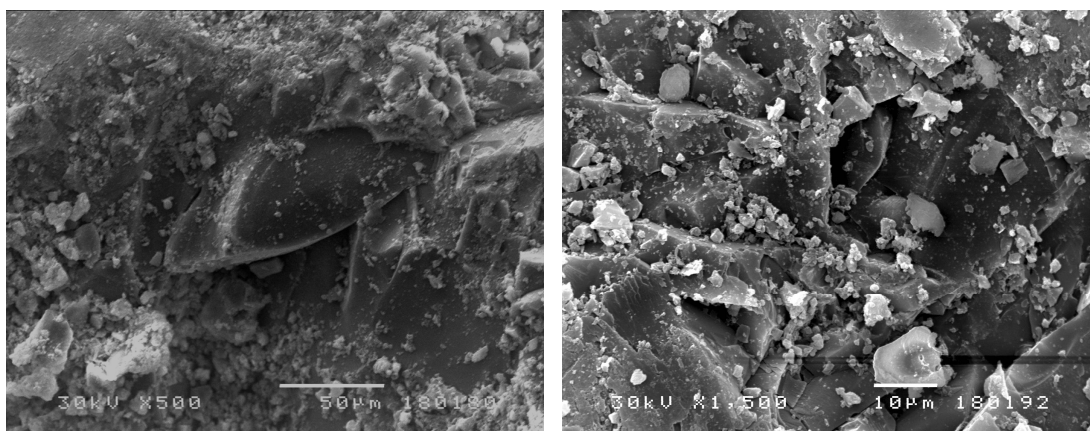
Betonska serija	Oznaka uzorka	Gubitak mase Δm_{440} [g]	Habanje brušenjem $H_{B,i}$ [cm ³ /50cm ²]	Smanjenje visine uzorak nakon habanja [mm]
E	E/1	15,61	6,99	1,28
	E/2	17,05	7,66	1,37
	E/3	17,03	7,69	1,50
WG5	WG5/1	17,67	7,81	1,47
	WG5/2	17,47	7,69	1,40
	WG5/3	15,56	6,84	1,45
WG10	WG10/1	16,54	7,21	1,32
	WG10/2	17,33	7,47	1,51
	WG10/3	16,68	7,22	1,35
WG15	WG15/1	16,36	7,41	1,68
	WG15/2	15,93	7,27	1,72
	WG15/3	16,42	7,83	1,63
WG20	WG20/1	16,12	7,27	1,66
	WG20/2	16,12	7,27	1,62
	WG20/3	17,45	7,83	1,55
WG35	WG35/1	16,96	7,73	1,33
	WG35/2	18,84	8,69	1,77
	WG35/3	17,00	7,62	1,24
WGD5	WGD5/1	18,12	7,92	1,63
	WGD5/2	17,51	7,71	1,55
	WGD5/3	16,91	7,36	1,42
WGD10	WGD10/1	17,32	7,77	1,36
	WGD10/2	17,28	7,68	1,55
	WGD10/3	17,19	7,95	1,41

10.3.20. PRILOG 20. SEM analiza betona

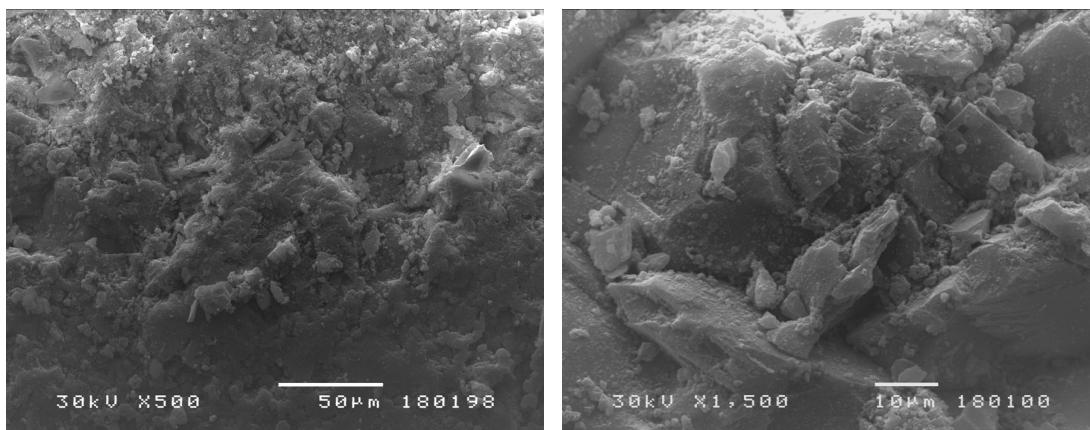
SEM analiza betona je sprovedena samo na karakterističnim serijama: etalon, WG15, WG20, WG35 i WGD10. Slikanje uzoraka vršeno je pri različitim uvećanjima.



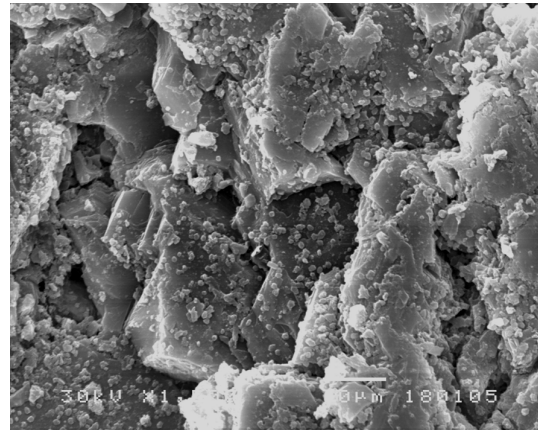
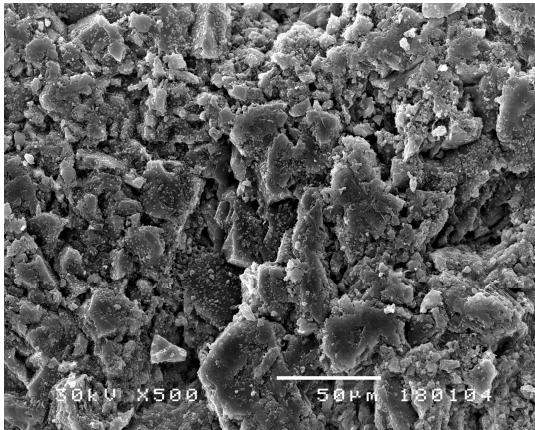
Slika 44: Uvećanje uzorka etalon betona 500 puta (levo) i 1500 puta (desno)



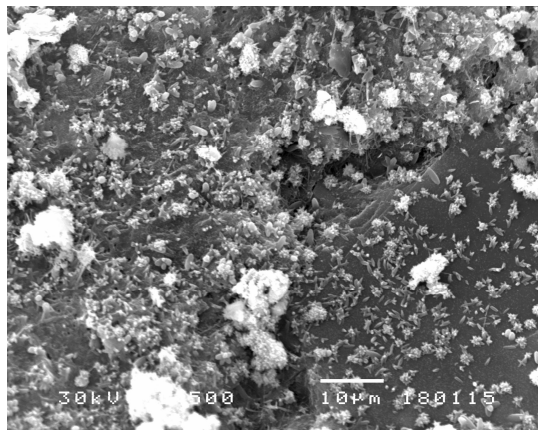
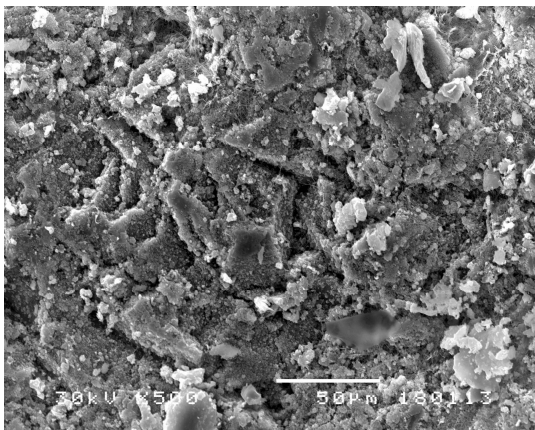
Slika 45: Uvećanje uzorka betona WG15 500 puta (levo) i 1500 puta (desno)



Slika 46: Uvećanje uzorka betona WG20 500 puta (levo) i 1500 puta (desno)

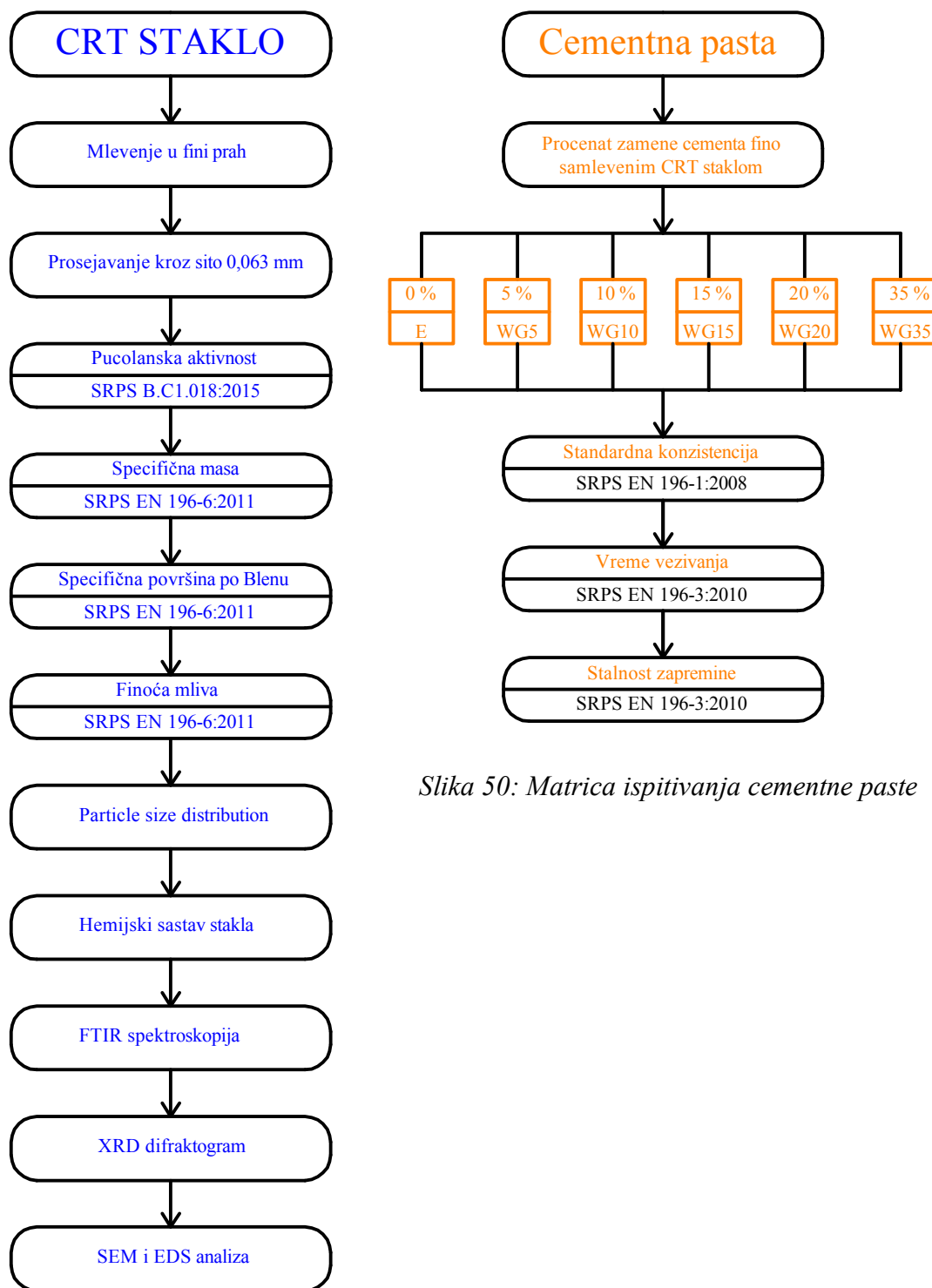


Slika 47: Uvećanje uzorka betona WG35 500 puta (levo) i 1500 puta (desno)



Slika 48: Uvećanje uzorka betona WGD10 500 puta (levo) i 1500 puta (desno)

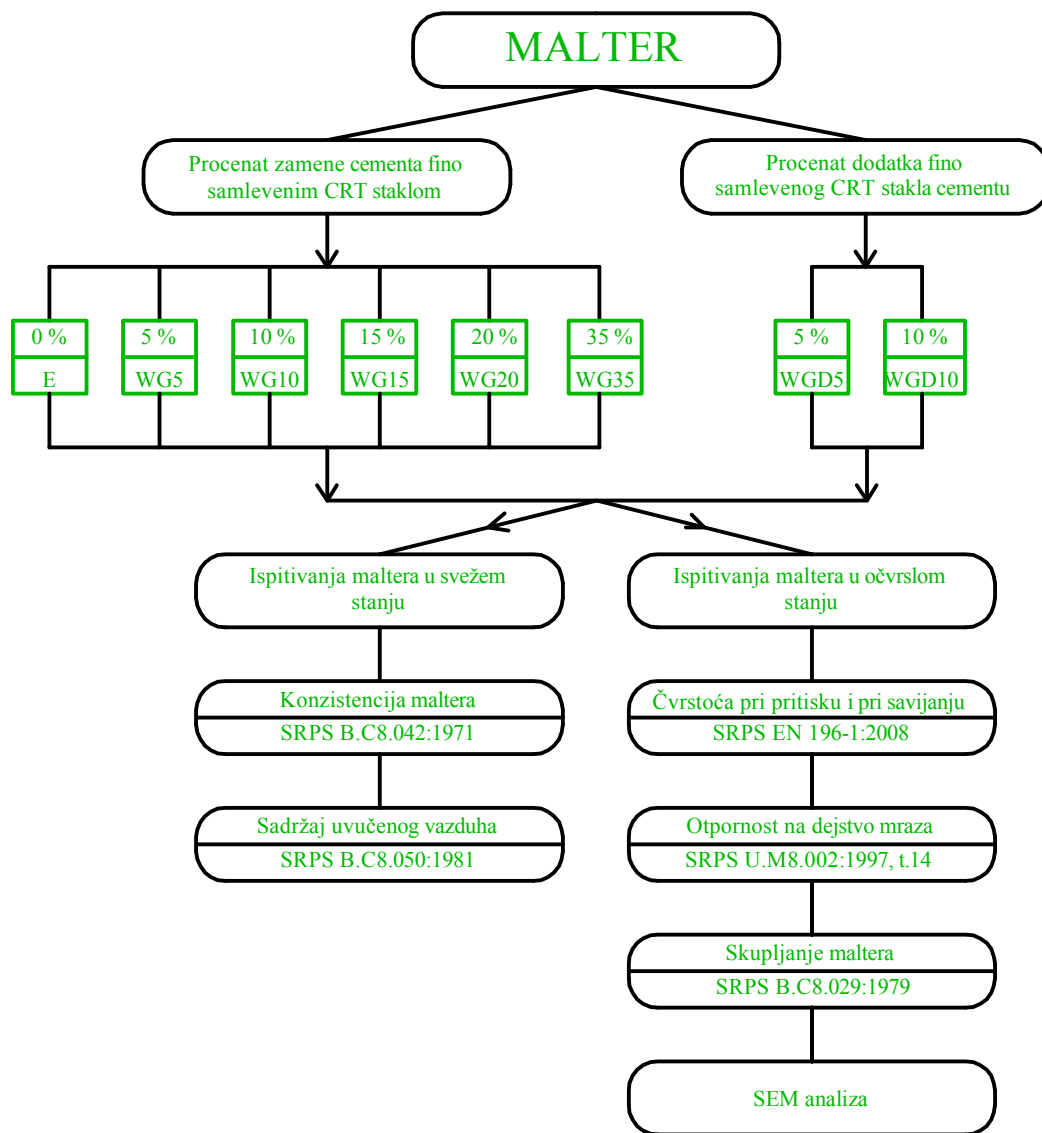
10.3.21 PRILOG 21. Matrica ispitivanja CRT stakla i cementne paste



Slika 50: Matrica ispitivanja cementne paste

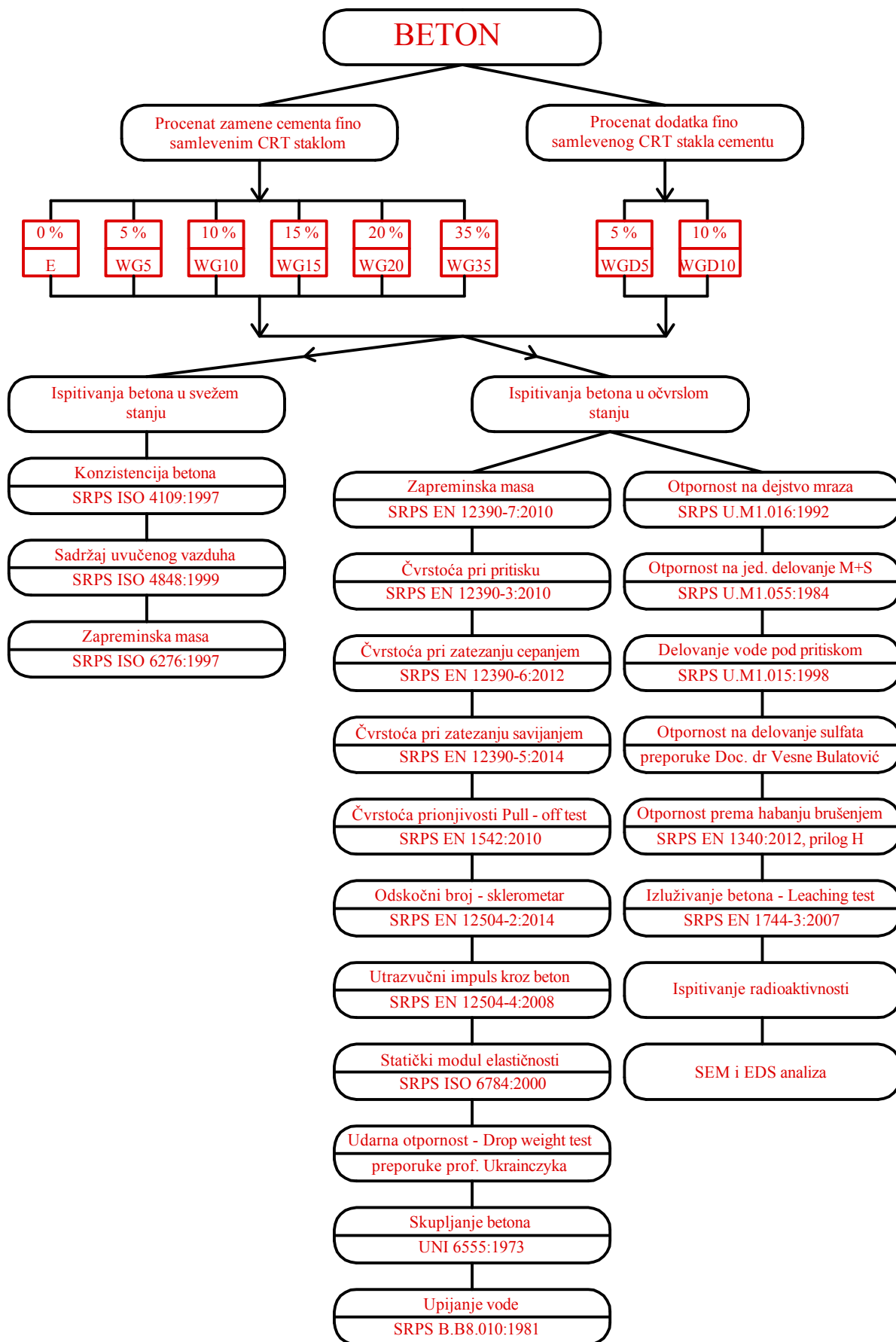
Slika 49: Matrica ispitivanja CRT stakla

10.3.22 PRILOG 22. Matrica ispitivanja maltera



Slika 51: Matrica ispitivanja maltera

10.3.23 PRILOG 23. Matrica ispitivanja betona



Slika 52: Matrica ispitivanja betona

Biografija autora



Dušan Grdić rođen je 28.12.1988. godine u Nišu. Završio je osnovnu školu "Učitelj Tasa" u Nišu sa odličnim uspehom. Gimnaziju „Svetozar Marković“ u Nišu, prirodno matematički smer, takođe je završio sa odličnim uspehom i nosilac je Vukove diplome. Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu upisao je školske 2007/08. godine. Osnovne akademske studije završio je sa prosečnom ocenom 9,37. Završni rad iz oblasti građevinske geotehnike - fundiranja odbranio je sa ocenom 10. Školske 2010/11. godine upisao je

master akademske studije – konstruktivni smer na istom fakultetu. Master akademske studije završio je sa prosečnom ocenom 9,52. Godine 2012. odbranio je master rad iz oblasti betonskih konstrukcija, fundiranja i tehnologije betona sa ocenom 10. Sve vreme studiranja bio je stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj R. Srbije. U školskoj 2010/11. godini nagrađen je od strane Građevinsko-arhitektonskog fakulteta za najbolji uspeh postignut u prethodnim školskim godinama osnovnih studija. U školskoj 2011/12. godinama nagrađen je od strane Građevinsko-arhitektonskog fakulteta za najbolji uspeh na drugoj godini master akademskih studija studijskog programa građevinarstvo.

Po završetku master studija upisao je doktorske studije (školska 2012/13. god.) na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu. Položio je sve ispite predviđene planom i programom na doktorskim studijama sa prosečnom ocenom 10 (deset). Od školske 2012/13. godini angažovan je na održavanju vežbanja iz predmeta: Materijali u arhitekturi, Građevinski materijali I, Građevinski materijali II i Ekološki materijali. U toku dosadašnjeg angažovanja na poslovima istraživanja u okviru naučno-istraživačkog projekta TR 36017, kao autor i koautor, publikovao je preko 50 radova u časopisima i na međunarodnim skupovima, među kojima i 6 radova sa impakt faktorom. Takođe, koautor je jednog pomoćnog udžbenika pod nazivom "Praktikum iz materijala u arhitekturi".

Dušan Grdić aktivno radi u Laboratoriji za građevinske materijale na stručnim poslovima i na supervizijskim poslovima na koridoru X. Govori, čita i piše engleski jezik, a služi se i francuskim jezikom. Oženjen je i otac je sina Vukana.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

Утицај додатка фино самлеведеног рециклираног стакла од катодних цеви на својства цементног малтера и бетона

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 10.09.2019.

Потпис аутора дисертације:

(Име, средње слово и презиме)

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: **Утицај додатка фино самлевоног рециклираног стакла од
катодних цеви на својства цементног малтера и бетона**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам
предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан
штампаном облику.

У Нишу, 10.09.2019.

Потпис аутора дисертације:

(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Утицај додатка фино самлевеног рециклираног стакла од катодних цеви на својства цементног малтера и бетона

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

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

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

У Нишу, 10.09.2019.

Потпис аутора дисертације:

(Име, средње слово и презиме)