

Svojstva samozbijajućeg betona armiranog hibridnim vlaknima

Pogačić, Toni

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:562774>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Toni Pogačić

**Svojstva samozbijajućeg betona armiranog hibridnim vlaknima
Properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid fibres**

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Urbano inženjersvo
Teorija i tehnologija betona**

**Toni Pogačić
JMBAG: 0114027893**

**Svojstva samozbijajućeg betona armiranog hibridnim vlaknima
Properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid fibres**

Diplomski rad

Rijeka, srpanj 2021.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**
Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti
Znanstvena grana: Materijali

Tema diplomskog rada

SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA ARMIRANOG HIBRIDNIM VLAKNIMA
PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE REINFORCED WITH HYBRID FIBRES

Kandidat: **TONI POGAČIĆ**

Kolegij: **TEORIJA I TEHNOLOGIJA BETONA**

Diplomski rad broj: **UI-2021-28**

Zadatak:

Teorijski dio:

- Detaljno napisati o samozbijajućem betonu i samozbijajućem betonu armiranom vlaknima
- Detaljno napisati o svojstvima primjenjenih čeličnih, sintetičkih i staklenih vlakna
- Opisati sastav, miješanje i ugradnju čeličnih, sintetičkih i staklenih vlakna u svježi beton
- Opisati osnovne metode ispitivanja samoslijegajućeg betona u svježem stanju (gustoća, rasprostiranje slijeganjem, V-lijevak, L-kutija, sadržaj pora)
- Opisati osnovna ispitivanja samoslijegajućeg betona u očvrslom stanju: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, vlačna čvrstoća savijanjem, žilavost, duktilnost

Eksperimentalni dio:

- Izraditi vlastite mješavine svježeg samozbijajućeg betona (referentna mješavinu bez vlakana, mješavinu s čeličnim vlaknima, mješavinu s čeličnim i sintetičkim vlaknima, mješavinu s čeličnim i staklenim vlaknima)
- Ispitati tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću cijepanjem na uzorcima oblika kocke brida 150 mm starosti 28 d
- Ispitati vlačnu čvrstoću savijanjem na uzorcima prizmi dimenzija 100×100×400 mm³ (opterećenje nanjeti kontrolom pomka) na 28 d starosti
- usporedba rezultata ispitivanja svježeg i očvrsllog betona s promjenom vrste i udjela vlakana

Zaključak

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

Mentorica:

doc. dr. sc. Natalija Bede,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Toni Pogačić

U Rijeci, 30. lipnja 2021.

IZJAVA

Završni rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 30. lipnja 2021.

Mentor:

doc. dr. sc. Natalija Bede

Zahvala

Posebno se zahvaljujem tvrtki Holcim (Hrvatska) d.o.o na doniranome materijalu za izradu eksperimentalnog djela diplomskog rada. Također bih se htio zahvaliti mentorici doc.dr.sc.

Nataliji Bede, elaborantima Dominiku Štroku i Dini Juriševiću na ukazanoj pomoći prilikom izrade rada. Zahvalio bi se i svojoj obitelji, rodbini, djevojci i prijateljima na potpori koju su mi pružali prilikom studiranja

Sažetak

U ovom radu proučava se utjecaj čeličnih, staklenih i sintetičkih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Projektirane su ukupno četiri mješavine, mješavina samozbijajućeg betona bez vlakana (referentna mješavina) te još tri mješavine s istim volumnim udjelom čeličnih i hibridnih vlakana ali različitim vrstama vlakana. Za sve četiri mješavine ispitana su svojstva u svježem i očvrslulome stanju. Rezultati ispitivanja u svježem stanju pokazuju da sve mješavine imaju svojstvo samozbijajućeg betona. Sve mješavine s vlaknima pokazale su poboljšana mehanička svojstva u očvrslom stanju u odnosu na referentnu mješavinu. Nadalje, mješavina koja sadrži kombinaciju čeličnih i sintetičkih vlakana pokazala je najveći porast mehaničkih svojstava. Tako srednja vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 74 N/mm^2 , savojne čvrstoće $10,06 \text{ N/mm}^2$ a vlačne čvrstoće cijepanjem $16,69 \text{ N/mm}^2$ što je povećanje od redom xx%, xx% i XX% u odnosu na referentnu mješavinu.

Ključne riječi: samozbijajući beton, čelična vlakna, sintetička vlakna, staklena vlakna, ispitivanje, hibridna vlakna, svojstva svježeg betona, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, vlačna čvrstoća savijanjem

Summary

In this study, the main focus is on the influence of steel, glass and synthetic fibres on the properties of self-compacting concrete in the fresh and hardened state. A total of four mixtures were designed, a mix of self-compacting concrete without fibres (reference mixture) and three more mixtures with the same volume fraction of steel and hybrid fibres but with different type of fibres. Fresh and hardened properties were tested for all four mixtures. The test results show that all mixtures have the property of self-compacting concrete. All mixtures with fibres showed improved mechanical properties in the hardened state compared to the reference mixture without fibres. Furthermore, a mixture containing steel and synthetic fibres showed the most significant increase in mechanical properties. Thus, the mean value of compressive strength is 74 N/mm^2 , flexural strength 10.06 N/mm^2 and tensile strength 16.69 N/mm^2 .

Keywords: self-compacting concrete, steel fibres, synthetic fibres, glass fibres, testing, hybrid fibres, properties of fresh concrete, compressive strength, split tensile strength, bending tensile strength

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O BETONU	2
3. SAMOZBIJAJUĆI BETON	3
3.1. Općenito o samozbijajućem betonu	3
3.2. Razvoj samozbijajućeg betona.....	3
3.3. Razlike između samozbijajućeg betona i običnog betona	4
3.4. Potrebna svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju	5
3.5. Potrebna svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju	5
4. METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA	6
4.1. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju	6
4.1.1. V-lijevak	6
4.1.2. Rasprostiranje slijeganjem.....	7
4.1.3. L-kutija	7
4.1.4. J-Prsten	8
4.1.5. Sadržaj pora	9
4.1.6. Gustoća betona	10
4.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju.....	10
4.2.1. Tlačna čvrstoća	10
4.2.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem.....	11
4.2.3. Savojna čvrstoća	11
4.2.4. Gustoća betona u očvrslom stanju	11
5. SASTAV SAMOZBIJAJUĆI BETONA	12
5.1. Agregat.....	12
5.2. Mineralni dodaci	12
5.2.1. Punilo.....	12
5.2.2. Silikatna prašina	13
5.2.3. Leteći pepeo.....	13
5.3. Cement	13
5.4. Superplastifikatori.....	14
5.5. Voda.....	14
5.6. Vlakna	14
5.6.1. Čelična vlakna	14
5.6.2. Sintetička vlakna	15
5.6.3. Staklena vlakna.....	15

6.	EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	17
6.1.	Probne mješavine.....	17
6.1.1.	Agregat	18
6.1.2.	Cement.....	19
6.1.3.	Superplastifikator	19
6.1.4.	Regulator viskoznosti	20
6.1.5.	Voda	20
6.2.	Mješavine s dodatkom vlakana.....	20
6.2.1.	Čelična vlakna	20
6.2.2.	Sintetička vlakna	21
6.2.3.	Staklena vlakna.....	22
6.3.	Izrada mješavina	23
6.3.1.	Mješavina 1 (SCC REF).....	23
6.3.2.	Mješavina 2 (SCC SF0,5).....	24
6.3.3.	Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	26
6.3.4.	Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	27
7.	ISPITIVANJE MJEŠAVINA U SVJEŽEM STANJU.....	29
7.1.	Gustoća u svježem stanju	29
7.2.	Rasprostiranje slijeganjem.....	30
7.3.	V-lijevak	31
7.4.	L-kutija	31
7.5.	Sadržaj pora	32
7.6.	Uzorkovanje i njega betona	33
8.	ISPITIVANJA U OČVRSLOM STANJU	34
8.1.	Gustoća uzorka u očvrslom stanju	34
8.2.	Tlačna čvrstoća	36
8.2.1.	Ispitivanje nerazornom metodom - sklerometrom.....	36
8.3.	Ispitivanje razornom metodom - preša	38
8.3.1.	Mješavina 1 (SCC REF).....	38
8.3.2.	Mješavina 2 (SCC SF0,5).....	40
8.3.3.	Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	41
8.3.4.	Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	42
8.3.5.	Zaključak ispitivanja tlačne čvrstoće.....	44
8.4.	Vlačna čvrstoća cijepanjem.....	45
8.4.1.	Mješavina 1 (SCC REF).....	45

8.4.2.	Mješavina 2 (SCC SF0,5).....	47
8.4.3.	Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1).....	48
8.4.4.	Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	50
8.4.5.	Zaključak ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem	52
8.5.	Svojna čvrstoća	52
8.5.1.	Mješavina 1 (SCC REF).....	54
8.5.2.	Mješavina 2 (SCC SF0,5).....	55
8.5.3.	Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	57
8.5.4.	Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	58
8.5.5.	Određivanje prve pukotine preko norme ASTM C1609	60
8.5.6.	Zaključak ispitivanja svojne čvrstoće	61
9.	ZAKLJUČAK.....	63
10.	LITERATURA	65

Popis slika

Slika 1 Šematski prikaz razlike sastava klasičnih i samozbijajućih betonskih mješavina [7]	5
Slika 2 V-ljevjak	6
Slika 3 L-kutija i skica L-kutije [9]	8
Slika 4 Oprema potrebna za ispitivanje J-prsten	9
Slika 5 Porometar	10
Slika 6 Sastav referentne mješavine	18
Slika 7 Čelična vlakna 4D	21
Slika 8 Sintetička vlakna Strux 90/40	22
Slika 9 Staklena vlakna Anti-crack HP 67/36	23
Slika 10 Mješavina 1 (SCC REF) nakon izrade	24
Slika 11 Sastav mješavine 2 SCC SF0,5	25
Slika 12 Izgled mješavine 2 (SCC SF0,5)	26
Slika 13 Sastav mješavine 3 SCC SF0,5+PP0,1	26
Slika 14 Dodavanje staklenih vlakana mješavini 4	27
Slika 15 Izgled mješavine 4 nakon izrade	28
Slika 16 Sastav mješavine 4 SCC SF0,5+GF0,1	28
Slika 17 Dijagram gustoće uzoraka u svježem stanju	30
Slika 18 Ispitivanje rasprostiranja mješavine 2	31
Slika 19 Zaglavljenje vlakana prilikom ispitivanja	32
Slika 20 Sadržaj pora	33
Slika 21 Gustoća uzoraka u očvrslom stanju	36
Slika 22 Sklerometar	36
Slika 23 Redoslijed izvođenja ispitivanja na uzorku	37
Slika 24 Srednja tlačna čvrstoća	38
Slika 25 Oblik sloma uzorka pod utjecajem tlačne sile mješavine 1 (REF)	39
Slika 26 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 1 (SCC REF)	39
Slika 27 Oblik sloma pod utjecajem tlačne sile na mješavini 2	40
Slika 28 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 2 (SCC SF0,5)	41
Slika 29 Oblik sloma uzorka pod djelovanjem tlačne sile na mješavinu 3	41
Slika 30 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	42
Slika 31 Slom uzorka pod utjecajem tlačne sile na mješavini 4	43
Slika 32 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+GF0,1)	44
Slika 33 Dijagram srednje tlačne čvrstoće svih mješavina	44
Slika 34 Preša s ugrađenim nastavkom za nanošenje vlačne čvrstoće cijepanjem	45
Slika 35 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 1	46
Slika 36 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 1 (SCC REF)	47
Slika 37 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 2	47
Slika 38 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 2 (SCC SF0,5)	48
Slika 39 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 3	49
Slika 40 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	50
Slika 41 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 4	51
Slika 42 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	51

Slika 43 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem.....	52
Slika 44 ispitivanje savijanjem u 4 točke	53
Slika 45 Ispitivanje savijanjem u 3 točke	53
Slika 46 Slom uzoraka mješavine 1.....	54
Slika 47 Dijagram sile-pomak mješavine 1 (REF).....	55
Slika 48 Slom uzoraka mješavine 2.....	56
Slika 49 Dijagram sila-pomak mješavine 2 (SCC SF0,5).....	57
Slika 50 Slom uzoraka mješavine 3.....	58
Slika 51 Dijagram sila-pomak mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)	58
Slika 52 Slom uzoraka mješavine 4.....	59
Slika 53 Graf sila-pomak mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1).....	59
Slika 54 Dijagram srednje vrijednosti naprezanja i st.devijacije.....	61
Slika 55 Rezultati naprezanja i standardne devijacije	62
Slika 56 Usporedba mješavine s referentnom mješavinom.....	62

Popis tablica

Tablica 1 Gustoća betona u svježem stanju.....	29
Tablica 2 Rezultati pokusa rasprostiranja slijeganjem	30
Tablica 3 Rezultati ispitivanja V-lijevkom.....	31
Tablica 4 Rezultati ispitivanja L-kutijom.....	32
Tablica 5 Rezultati ispitivanja sadržaja pora.....	33
Tablica 6 Rezultati mjerenja betona u očvrslulom stanju.....	35
Tablica 7 Rezultati ispitivanja sklerometrom.....	37
Tablica 8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine 1 (REF).....	39
Tablica 9 Rezultati ispitivanja mješavine 2 (SCC SF0,5).....	40
Tablica 10 Rezultati ispitivanja mješavine 3 (SCC0,5+PP0,1).....	42
Tablica 11 Rezultati ispitivanja mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1).....	43
Tablica 12 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 1(REF).....	46
Tablica 13 Tablica rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 2 (SCC SF0,5)	48
Tablica 14 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1).....	49
Tablica 15 Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)	51
Tablica 16 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 1 (REF)	55
Tablica 17 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 2 (SCC SF0,5).....	56
Tablica 18 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1).....	57
Tablica 19 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 4 (SCC SF0,5+PP0,1)	59
Tablica 20 Rezultati naprezanja prilikom pojave prve pukotine.....	60

1. UVOD

Prema navodima poznatog građevinskog magazina beton je drugi najviše konzumirani proizvod na svijetu [1]. Uzmemo li u obzir da je voda prvi najviše konzumirani proizvod dolazimo do zaključka kako je beton vrlo bitan materijal u životu čovjeka. Beton se može vidjeti u raznim konstrukcijama od blokova pa sve do velikih konstrukcija kao što su na primjer zgrade, mostovi, parkirališta i brojni drugi objekti. Modernim načinom građenja se nameću i novi zahtjevi koje klasični beton teško može pratiti. Tako se u posljednjih dvadesetak godina značajno razvila proizvodnja i tehnologija betona. Kako bi se poboljšala betonska konstrukcija a smanjila potreba za kvalificiranim ljudima razvila se ideju o korištenju samozbijajućeg betona čija osnovna karakteristika jest jednostavna ugradnja. Samozbijajućeg beton je relativno nova vrsta betona kojom se smanjuje vrijeme građenja, potreba za radom, buka i količina građevinske opreme. U prvom dijelu rada opisana su ispitivanja i sastav samozbijajućeg betona. Također, navedena je vrsta i način ugradnje pojedinih vlakana. U praktičnome dijelu rada izrađene su 4 mješavine samozbijajućeg betona s različitim vrstama vlakana. Cilj rada je istražiti na koji način pojedina vrsta vlakna utječe na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrnutom stanju.

2. OPĆENITO O BETONU

Beton se prvi puta spominje 300 godina prije nove ere. Stari Rimljani su među prvim narodima koji počinju koristiti beton u građevinarstvu. U beton iz toga doba dodavao se danas poznati pozzolanski cement koji je dopreman iz Pozzuolija, pokraj Vezuva [2]. Poznato je kako se beton koristio u izgradnji cesta, toplica, amfiteatra, Panteona i akvadukta. Nakon pada rimskog carstva beton je kao materijal u laganoj stagnaciji, ali se to sve mijenja 1824. godine kad Joseph Aspdin patentira portland cement te time modernizira beton. Prva veća uporaba „modernog“ betona dogodila se 1891. godine kad je betonirana ulica u Ohio u Americi. Nakon toga beton se počinje koristiti i u izgradnji objekata. Mnogi arhitekti su bili zalučeni novim materijalom koji im je omogućavao sprovođenje zamišljenih formi i oblika. Danas se u jednoj godini proizvede 4,4 milijarde tona betona, do 2050. godine smatra se da će ta brojka narasti do 5,5 milijarde tona godišnje [2]. Standardni obični beton se sastoji od vode, agregata, veziva i aditiva. Ubrzanim razvojem građevinarstva javljaju se potrebe za dužom trajnosti, većom čvrstoćom, lakšom ugradnjom i većoj ekonomičnosti konstruktivnih elemenata. Navedene zahtjeve obični beton teško može zadovoljiti, stoga su krenula istraživanja i otkrivanja novih vrsta betona koji će u budućnosti moći pratiti modernizaciju građevinarstva. U nastavku ovog rada detaljnije će se proučiti jedan takav beton a to je samozbijajući beton armiran hibridnim vlaknima.

3. SAMOZBIJAJUĆI BETON

3.1. Općenito o samozbijajućem betonu

Osnovni sastojci svakog betona su agregat, vezivo, voda i aditivi. Dodavanjem komponenti poput pucolanskih materijala, kloridnih silikata, letećeg pepela (PFA), mikrosilika i metakaolina osnovnim sastojcima betona poboljšavaju se svojstva poput tečnosti, čvrstoće, visoke obradivost, trajnost, otpornost na mehaničke i kemijske utjecaje, smanjenje propuštanja tekućina i plinova i otpornost ka segregaciji [3]. Beton takvih poboljšanih svojstava naziva se samozbijajući beton (eng. Self-compacting concrete). Osnovna karakteristika takvog betona jest da teče pod utjecajem vlastite težine prilagođavajući se oplati i obavijajući armaturu. Ispunjavanjem oplata samozbijajući beton sam održava ravnu horizontalnu površinu te mu stoga nisu potrebni vibracijski uređaji. Prilikom tečenja samozbijajući beton ne zarobljava mjehuriće zraka.

Prednosti samozbijajućeg betona su :

- brza i jednostavnija ugradnja
- osigurava kompaktnost strukture (npr. u složenim dijelovima gdje je potrebno vibrirati običan beton)
- može biti korišten u kompleksnim formama
- izbjegava probleme koji mogu nastati vibracijom betona (npr. izdvajanje vode i segregacija materijala) [4]

3.2. Razvoj samozbijajućeg betona

Potreba za razvojem samozbijajućeg betona krenula je u Japanu 80-tih godina 20. stoljeća. Najveći problemi tog doba bila je sama trajnost armirano betonskih konstrukcija i manjak kvalificirane radne snage koja na kvalitetan način može ugraditi beton. Rješenje navedenih problema dao je profesor Okamura sa sveučilišta u Tokiju 1988. godine razvojem samozbijajućeg betona. Prilikom razvoja tog betona definirana su osnovna svojstva koja mora zadovoljiti:

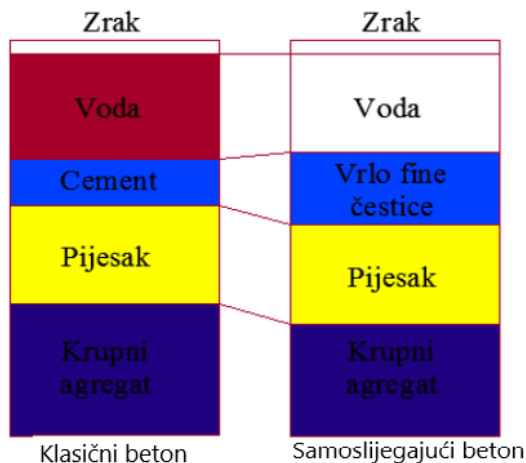
- u svježem stanju mora imati svojstva samozbijanja
- u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata
- u očvrnulom stanju mora biti otporan na vanjske utjecaje
- eliminirati buku vibriranja.

Jedan od prvih primjera je veliki zid LNG spremnika u Osaki, koji je izgrađen 1998. godine. Sveukupno je korišteno 12 000 m³ samozbijajući betona. Korištenjem samozbijajućeg betona smanjen je broj odljeva betonskih elemenata s 14 na 10 zbog mogućnosti veće visine odljeva, također broj radnika smanjen je s prvobitnih 150 radnika na 50 radnika, a samo vrijeme izgradnje smanjeno je s 22 mjeseca na 18 mjeseci. Korištenjem samozbijajućeg betona radnici nisu bili izloženi buci koja nastaje prilikom vibracije običnog betona, te je samo radno okruženje bilo ugodnije za rad. [5]

Krajem 90-ih godina japansko iskustvo izrade i ugradnje samozbijajućeg betona počinje se primjenjivati i u Europi. Razvojem nove generacije superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koji pojednostavljuju projektiranje potrebne viskoznosti i tečenja povećavaju korištenje samozbijajućeg betona. [6]

3.3. Razlike između samozbijajućeg betona i običnog betona

Glavna i vrlo bitna razlika između samozbijajućeg i običnog betona je u kohezivnosti svježe mješavine. Samozbijajući beton ima bolju tečnost te se sam zbija svojom vlastitom težinom prilikom tečenja dok je kod običnog betona tečnost manja te je prilikom ugradnje potrebno dodatno vibrirati kako bi se postigla određena zbijenost. Dakle, velika prednost upotrebe samozbijajućeg betona se očituje kod konstruktivnih elemenata koji imaju gusto postavljenu armaturu. Nadalje, obradljivost kod običnog betona se povećava dodavanjem vode. Obradljivost samozbijajućeg betona povećava se uz pomoć superplastifikatora i aditiva za povećanje viskoznosti. Prilikom dodavanja superplastifikatora povećava se povezanost između agregata i cementne paste. Uzmemo li u obzir da u obični beton ne dodajemo aditive sama povezanost između zrna agregata i cementa je manja (veća sklonost segregaciji). Zastupljenost finijih čestica i cementa je puno veća kod samozbijajućeg betona nego kod običnog betona. Na slici 1 prikazana su dva sastava betonske mješavine, s desne strane sastav mješavine običnog betona a s lijeve strane samozbijajućeg betona. Kao što se može vidjeti na samoj shemi količina krupnog agregata kod samozbijajućeg betona je manja nego kod običnog betona dok je količina pijeska ostala jednaka kod obje mješavine. U odnosu na običan beton povećala se količina cementa i dodataka koji imaju sitne čestice (aktivni ili inertni mineralni dodaci i fina zrna agregata). Također i količina vode se smanjila u odnosu na običan beton.



Slika 1 Šematski prikaz razlike sastava klasičnih i samozbijajućih betonskih mješavina [7]

3.4. Potrebna svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

Ključne svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- Fluidnost (pokretljivost) odnosno sposobnost tečenja i ispunjavanja prostora u oplati pod djelovanjem vlastite težine
- Viskoznost odnosno otpornost tečenja svježeg betona
- Sposobnost prolaska odnosno sposobnost da beton u svježem stanju teče kroz uske otvore, bez pojave segregacije ili zaustavljanjem zrna agregata
- Otpornost na segregaciju odnosno sposobnost svježeg betona da prije ili nakon ugradnje zadrži homogenost mješavine [8]

Samozbijajući beton mora zadovoljavati sva nabrojana svojstva jer samo s tim svojstvima omogućena mu je ugradljivost, samozbijanje, homogenost mješavine i popunjavanje oplata nepristupačnih mjesta uz armaturu. Zadovoljavanjem tih svojstava osiguravaju se projektirana svojstva betona u očvrslom stanju.

3.5. Potrebna svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Svojstva betona u očvrslom stanju definiraju se prilikom projektiranja betona. Obavezno se definira razred tlačne čvrstoće koja je ujedno i najbitniji faktor očvrslulog betona. Razred tlačne čvrstoće određuje se ispitivanjem uzoraka na tlak. Preostala standardna svojstva očvrslulog betona su:

- vodonepropusnost,
- otpornost prema djelovanju mraza,
- otpornost na kemijske utjecaje.

4. METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

Svojstva samozbijajućeg betona se ispituju u svježem stanju te u očvrslom stanju (nakon 28 dana), prema hrvatskim normama (HRN EN norme).

4.1. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju

Na mješavini svježeg samozbijajućeg betona moguće je provesti sljedeća ispitivanja:

- V- lijevak
- Rasprostiranje slijeganjem
- L-kutija
- J-prsten
- Gustoća
- Sadržaj pora

4.1.1. V-lijevak

Plastična viskoznost betona ispituje se pomoću V-lijevka (Slika 2). Pomoću njega mjeri se brzina tečenja betona. Kako bi se ispitivanje izvelo potrebna je sljedeća oprema:

- V-lijevak
- Postolje na koji će se pričvrstiti V-lijevak
- Komad tkanine (krpa)
- Ravnalo
- Štoperica
- Posuda u koju će se beton izliti



Slika 2 V-lijevak

V-lijevak čija je unutrašnjost navlažena vodom postavlja se na postolje koje se nalazi na ravnoj podlozi. Na dnu V-lijevka nalazi se poklopac koji se prije usipavanja betona zatvara.

Uzorak betona usipava se u lijevak, bez dodatnog utjecaja vanjske sile do krajnjeg ruba lijevka. Višak betona se odstrani, rub betona poravna s rubom V lijevka te se nakon toga poklopac na dnu lijevka otvara. Prilikom otvaranja poklopca pokreće se štoperica. Ispitivač u tome trenutku gleda vertikalno u unutrašnjost V-lijevka. Vrijeme na štoperici se zaustavlja u trenutku kad ispitivač uoči svjetlost na dnu lijevka. Dobiveno vrijeme je brzina tečenja betona. Za jedan uzorak betona ispitivanje je potrebno provesti sveukupno tri puta.

4.1.2. Rasprostiranje slijeganjem

Metoda rasprostiranja slijeganjem koristi se za procjenu tečenja i konzistencije svježe mješavine betona bez prepreke. Za ispitivanje potrebna je sljedeća oprema:

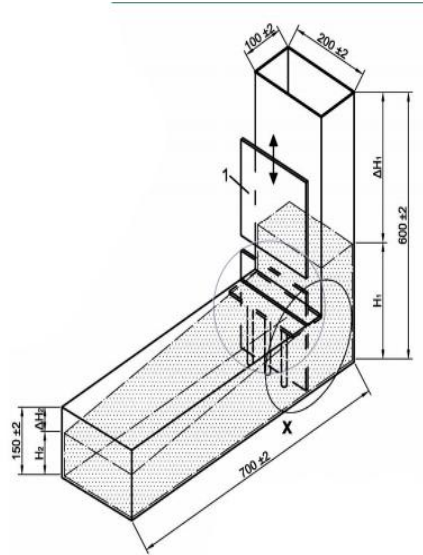
- Ploča
- Limeni kalup oblika krnjeg stošca
- Ravnalo
- Štoperica

Limeni kalup oblika krnjeg stošca postavlja se na sredinu ploče. Uzorkom betona se limeni kalup puni sve do vrha ali bez zbijanja. Mjeri se vrijeme (T_{500}) od podizanja kalupa do rasprostiranja betona do promjera 500 mm koji je označen na ploči. Završetkom ispitivanja mjeri se najveći promjer uzorka betona u dva okomita smjera. Srednja vrijednost promjera predstavlja maksimalni promjer odnosno D_{max} . Vizualni opažanjima mogu se dobiti dodatne informacije poput otpornosti na segregaciju.

4.1.3. L-kutija

Kako bi se ispitala sposobnost zaobilazanja prepreka kod samoslijegajućeg betona provodi se ispitivanje s L-kutijom (prikazano na slici 3). Ispitivanje se provodi tako što se L-kutija postavi na ravnu podlogu a na dnu vertikalnog dijela se zatvore vrata. Zatim se vertikalni dio puni ispitnim uzorkom betona. Beton se ostavi da miruje 1 minutu kako bi se utvrdilo je li betonska mješavina stabilna ili će se pojaviti segregacija. Ispitivanje započinje podizanjem vrata na dnu čime se dopušta betonu da slobodno teče između armaturnih šipki u horizontalni dio kutije. U trenutku kad beton prestane teći mjere se visine na dva kraja horizontalnog dijela (H_1 i H_2).

Smatra se da beton ima samozbijajuća svojstva ako je $H_2/H_1 \geq 0,8$.



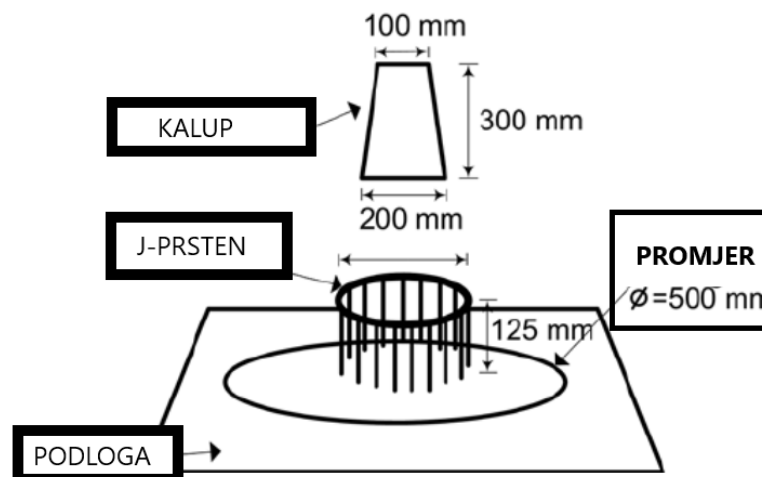
Slika 3 L-kutija i skica L-kutije [9]

4.1.4. J-Prsten

Kako bi se simuliralo tečenje betona kroz armaturne šipke koristi se ispitivanje J- prstenom. Blokiranje armature može se kvalificirati prema promjeru rasprostiranja betona i razlici visina unutar i izvan J-prstena. Vrijeme tečenja T50 također prikazuje brzinu deformacije unutar definirane udaljenosti tečenja i definirane prepreke.

Za provođenje ispitivanja potrebno je (slika 4):

- Ploča
- J-prsten
- Metalni kalup oblika krnjeg stošca
- Krpa za čišćenje
- Ravna šipka
- Vlažna krpa
- Štoperica
- Ravnalo



Slika 4 Oprema potrebna za ispitivanje J-prsten

Osnovna ploča postavlja se na ravnu podlogu, zatim se navlaži te se višak vode odstrani. Na sredinu ploče se postavlja J-prsten i prethodno navlaženi kalup oblika krnjeg stošca. Držeći kalup ispitni uzorak se sipa u njega. Prilikom punjenja konusa pažnju treba obratiti kako bi se izbjeglo izlijevanje betona okolo. Kalup se zatim podiže u jednom pokretu kako bi beton slobodno teкао. Vrijeme se mjeri od trenutka kad se konus podigne, a zaustavlja pri prvom kontaktu betona sa krugom od 500 mm. Dobiveno vrijeme je T_{50} . Ispitivanje završava kad beton prestane da teče. Zatim se postavlja šipka s ravnom stranom na J-prsten i mjeri se razlika visine između donjeg ruba šipke i betonske površine na tri mjesta u dva međusobno okomita kuta. Ukupno pet mjerenja jedan u centru prstena te četiri izvan njega. Na kraju se izmjere dva međusobno okomita najveća radijusa.

Kao rezultat mjerenja dobivaju se razlike visina unutar i izvan prstena, vrijeme potrebno da se beton rasprostire do promjera 500 mm (T_{50}) i prosječni promjer.

4.1.5. Sadržaj pora

Poroznost svježeg betona ispituje se uz pomoć porometra (slika 5). Porometar je uređaj koji se sastoji od spremnika poznatog volumena u koji se stavi uzorak betona. Uzorak se potom zatvori poklopcem te se prostor između uzorka i poklopcu puni vodom. U samom poklopcu se nalazi tlačna komora poznatog volumena u kojoj se pomoću pumpe postiže određeni pritisak. Kad se ventil otvori pritisak se raspodijeli na zrak u porama uzorka. Na manometru se očitava prosječni pritisak zraka u porama uzorka i tlačnoj komori. Pomoću određene skale očita se udio pora u uzorku betona.



Slika 5 Porometar

4.1.6. Gustoća betona

Kako bi se provelo ispitivanje gustoće betona u svježem stanju potrebno je normirani kalup poznate zapremnine i težine, napuniti svježim betonom. Zatim se kalup ispunjen betonom važe te se dobiva masa betona. Gustoća betona u svježem stanju izračuna se tako što se masa betona podjeli s volumenom koji beton zauzima u kalupu.

4.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrsлом stanju

Na samozbijajućem betonu u očvrsлом stanju najčešće se provode slijedeća ispitivanja:

- Tlačna čvrstoća
- Vlačna čvrstoća cijepanjem
- Savojan čvrstoća
- Gustoća betona u očvrsлом stanju

4.2.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona ispituje se na uzorcima kocke brida dimenzije 15cm. Uzorak je prije ispitivanja potrebno izvagati i izmjeriti. Zatim se uzorak stavlja u prešu pazeći da se opterećenje nanosi okomito na smjer lijevanja betona te da se u računalni program unesu svi potrebni podaci. Bitno je unesti brzinu opterećenja koja konstantno djeluje na uzorak. Nakon ispitivanja dobiva se sila sloma pomoću koje se izračuna tlačna čvrstoća betona.

4.2.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem se ispituje u preši korištenjem posebnog dodatka za cijepanje. Vlačna čvrstoća cijepanjem provodi se na uzorcima valjka ili kocke koje je prethodno potrebo izmjeriti i izvagati. Uzorak se položi u dodatak a zatim se u računalnom programu unesu svi parametri. Korištenjem dobivenih rezultata izračuna se vlačna čvrstoća cijepanjem.

4.2.3. Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća radi se uz pomoć preše za savijanje, a pritom razlikujemo ispitivanje savijanjem u 3 i 4 točke. Prilikom ispitivanja u 3 točke sila djeluje na sredini dužine uzorka, dok prilikom ispitivanja u 4 točke sila djeluje u dvije točke na trećinama raspona. Ispitivanje se vrši na uzorcima oblika prizme dimenzije 10cm x 10 cm x 40 cm. Nakon unosa podataka u računalni program provodi se ispitivanje te se dobivaju rezultati potrebni za izračun savojne čvrstoće.

4.2.4. Gustoća betona u očvrnulom stanju

Gustoća betona u očvrnulom stanju se izračuna tako što se uzorak izmjeri i izvaže te se preko omjera mase i volumena izračuna gustoća betona u očvrnulom stanju.

5. SASTAV SAMOZBIJAJUĆI BETONA

Samozbijajući beton sastoji se od: agregata, cementa, aditiva i vode a po potrebi u njega se mogu dodavati različite vrste vrsta vlakana.

5.1. Agregat

Agregat je vrsta materijala sastavljena od međusobno nevezanih zrna određene veličine. Agregat se koristi kod proizvodnje betona i žbuka. Agregat zauzima oko 75% volumena betona. Tolikom zapremninom ima veliki utjecaj na svojstva betona kako u svježem stanju tako i u očvrslom. Agregat čini kostur betona koji mu daje krutost i osigurava njegovu stabilnost. Agregat je svojom cijenom na tržištu dosta povoljan te samim time snižava cijenu proizvodnje betona. Agregat čija su zrna veća od 4 mm naziva se krupni agregat. Krupni agregat čini kostur betona. Agregat čija su zrna agregata manja od 4 mm naziva se sitno zrnati agregat, njegova uloga je povećanje kohezivnosti svježeg betona.

5.2. Mineralni dodaci

Kako bi se poboljšala svojstva, održala kohezija i otpornost na segregaciju, samozbijajućem betonu dodaju se mineralni dodaci. Mineralni dodaci mogu utjecati na potrebu za vodom stoga se koriste u izradi samozbijajućeg betona. Mineralni dodaci za beton smatraju se finodisperzni materijali, koji se mogu dodavati u beton u relativno velikim količinama (20-100% u odnosu na masu cementa). [7]

Najčešće korišteni mineralni dodaci koji se koriste prilikom izrade samozbijajućeg betona su:

- Punilo
- Silikatna prašina
- Leteći pepeo

5.2.1. Punilo

Punilo je vrsta inertnih, poluinertnih mineralnih dodataka (najčešće dolomita i vapnenca). Sve čestice koje prolaze kroz sito 0,063 mm smatraju se punilom. Dodavanjem punila poboljšava se obradljivost betona. Veličina i oblik čestica te upijanje vode korištenog punila može utjecati na potrebu za vodom kod izrade samozbijajućeg betona. Punila izrađena na bazi kalcijevog karbonata daju bolja reološka svojstva samozbijajućeg betona.

5.2.2. Silikatna prašina

Smatra se da je silikatna prašina jedan od najkvalitetnijih pucolana. Pucolan je vrsta materijala koji se sastoji od silikata i aluminata. Na mikro razini dodavanjem vode će reagirati s kalcijevim hidroksidom, time će se formirati spojevi koji posjeduju cementne karakteristike. Silikatna prašina sastoji se od finih čestica, nastalih kao nus produkt pri proizvodnji ferosilikatnih i silikatnih legura. Veličina zrna silicijske prašine kreće se od 0,01 do 0,3 μm . Učinak sitnih čestica i pucolanska reakcija su dva mehanizma kojima silicijska prašina utječe na svojstvo betona. Dodavanjem sitnih čestica strukturi betona poboljšava se kohezivnost i obradljivost. Zbog veličine čestica koje su manje od čestica cementa popunjavaju unutrašnjost strukture, odnosno prostor između čestica cementa. Dodavanjem silikatne prašine također može se spriječiti izdvajanje vode odnosno pojava segregacije. Cementna pasta može imati visoku kohezivnost ako se u nju doda silikatna prašina. Najveći udio koji se može dodati u cementnu pastu iznosi 10 % u odnosu na masu cementa.

5.2.3. Leteći pepeo

Leteći pepeo nastaje u modernim termoelektranama koje se pogone na ugljen zbog čega spada u industrijski mineralni dodatak. Prema svojstvima leteći pepeo spada u pucolane zbog toga što sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Po izgledu leteći pepeo je fini prah, njegove su čestice sferičnog oblika. Dodavanjem letećeg pepela u beton povećava se udio finih čestica te se poboljšava pucolanska i hidraulička reakcija. Stoga se smanjuje potreba za vodom i izdvajanjem vode, poboljšava obradljivost, usporava oslobađanje topline hidratacije i poboljšava nepropusnost. Ukoliko se u mješavinu doda previše letećeg pepela može se smanjiti njegovo tečenje.

5.3. Cement

Cement je vrsta građevnog vezivnog materijala. Spada pod hidraulično vezivo što znači da se prilikom miješanja s vodom događa kemijska reakcija. Služi kao veza između krupnih i sitnih čestica agregata. Prema kemijskom sastavu cement se dijeli na dvije osnovne skupine:

- Silikatne cemente
- Aluminatne cemente

Silikatni cementi dobivaju se pečenjem lapora i vapnenca. Najpoznatiji cement iz skupine silikatnih cementa je portland cement. Aluminatni cementi dobivaju se pečenjem boksita i vapnenca a koristi se prilikom betoniranja na niskim temperaturama i pri izradi vatrostalnih betona.

5.4. Superplastifikatori

Superplastifikatori su tvari koje se dodaju u betonsku mješavinu i prilikom mješanja smanjuju trenje među zrnima agregata. Na taj se način omogućuje lakša obrada i ugradnja betona. Superplastifikatori se dodaju pri proizvodnji betona visoke čvrstoće i prilikom proizvodnje samoslijegajućeg betona. Superplastifikator se također koristi prilikom izrade betona s vrlo malim vodo-cementnim omjerom. Takav beton je vrlo velike čvrstoće ako se zadrži ista količina cementa. Korištenjem superplastifikatora vodo-cementni omjer može se smanjiti čak i do 0,28. [9]

5.5. Voda

Voda čini 5-10% svake betonske mješavine, bez njenog prisustva nebi mogao započeti proces vezivanja i očvršćenja cementa. Voda koja se koristi za izradu betona ne smije sadržavati nečistoće koje mogu nepovoljno utjecati na proces hidratacije cementa, kao i koroziju armature. Voda iz vodo opskrbnog sustava najčešće se koristi u izradi betona, zbog toga što zadovoljava sve potrebne uvjete te stoga nije potrebno dokazivanje ispravnosti vode.

5.6. Vlakna

Vlakna su vrsta dodatka koja betonu povećava žilavost i duktilnost. Običan ne armirani beton pri djelovanju vlačne sile vrlo brzo doživljava destrukciju, odnosno dolazi do razdvajanja i pucanja. Kako bi se to spriječilo dodaju se vlakna koja održavaju strukturnu cjelovitost betona. Kako su vlakna raspoređena u svim smjerovima u betonu mogućnost da se razvije pukotina je vrlo mala. U usporedbi s ne armiranim betonom, beton ojačan vlaknima ima veću vlačnu čvrstoću, žilavost i duktilnost, smanjuje nastajanje i povećanje postojećih pukotina te povećava otpornost na udarnu čvrstoću. Otpornost na smrzavanje, odmrzavanje i zamor betona značajno je povećana upotrebom vlakana. Glavni nedostaci korištenja vlakana prilikom izrade betona je sama cijena vlakana koja može povećati cijenu betona od 10% do 15%. Također prilikom dodavanja vlakana u svježu betonsku mješavinu potrebno je paziti da se vlakna ne spoje i formiraju tako zvana „gnijezda“ u betonu. Najčešće korištena vlakna su: čelična vlakna, sintetička vlakna i staklena vlakna.

5.6.1. Čelična vlakna

Čelična vlakna sastoje se od nepovezanih traka malih dimenzija. Za proizvodnju vlakana koristi se posebna vrsta čelika koja zadovoljava posebne karakteristike. Armiranje betona sa čeličnim vlaknima značajno poboljšava njegove mehaničke osobine, stoga se čelična vlakna najviše koriste u konstruktivnom armiranju običnog betona. Dodavanjem čeličnih vlakana

povećava se otpornost na savijanje i smicanje, povećava se otpornost na deformacije nastale utjecajem topline i smanjenje deformacija od skupljanja nakon sušenja betona. Čelična vlakna mogu biti ravna, sa ili bez kukica na kraju i valovita. Kukice sprječavaju izvlačenje vlakana iz betona. Dužina čeličnih vlakana kreće se od 25 mm do 80 mm. Dužina vlakana u prosjeku je tri puta manja od debljine betonskog elementa. Promjer čeličnih vlakana je od 0,5 mm do 1,2 mm. Količina čeličnih vlakana koja se dodaju u beton je od 20 kg do 50 kg po m³ betona. [9]

5.6.2. Sintetička vlakna

Sintetička vlakna imaju vrlo široku primjenu u graditeljstvu. Dodavanjem sintetičkih vlakana u betonsku mješavinu postiže se:

- Pобољшanje kohezije smjese
- Pумpanje betona na veće udaljenosti
- Povećanje otpornost na smrzavanje i odmrzavanje
- Povećanje otpornost konstrukcije u slučaju požara
- Povećanje otpornosti na udarce i habanje
- Povećanje strukturne čvrstoće
- Smanjenje i kontrola širine pukotina

Sintetička vlakna se danas najviše koriste kod izrade estriha i betona. Dužina sintetičkih vlakana je od 3 mm do 20 mm a promjer sintetičkih vlakana je od 12 μm do 40 μm. Količina vlakana koja se dodaje u beton je od 0,6 kg do 2 kg po m³ betona. [9]

5.6.3. Staklena vlakna

Staklena vlakna su umjetna vlakna nastala iz rastaljenog stakla. Rastaljeno staklo se izvlači te se namotva na brzorotirajući valjak. Također može se raditi i s centrifugalnim postupkom uz puhanje stlačenim zrakom. Za proizvodnju vlakana koriste se razne vrste stakla. Prilikom izrade posebna se pažnja pridaje svojstvima stakla pa se svako svojstvo označava točno određenim slovima koja ukazuju na svojstva. Neke od najčešćih oznaka su:

- AR- staklo otporno na alkalije, pogodan za proizvodnju armiranog betona
- C-staklo otporno na kemikalije te se upotrebljava za proizvodnju mikro vlakana za primjenu u kemijskoj industriji
- D-staklo ima određeni udio borova oksida
- E- staklo ima velik električni otpor

- S- stakla i HS-stakla imaju vrlo veliku čvrstoću
- M- stakla imaju vrlo visoki modul elastičnosti [10]

Staklena vlakna su negoriva, čvrsta, većinom otporna na kemikalije i dobrih izolacijskih svojstava. Prednost staklenih vlakana su povećanje čvrstoće u svim smjerovima pri vrlo niskim troškovima i poboljšavanje izgleda betona zbog vlakana koja su vidljiva na gotovoj površini betona. Mana staklenih vlakana je njihova krutost i krtost. Njihova gustoća kreće se od $2,50 \text{ g/cm}^3$ do $2,70 \text{ g/cm}^3$.

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

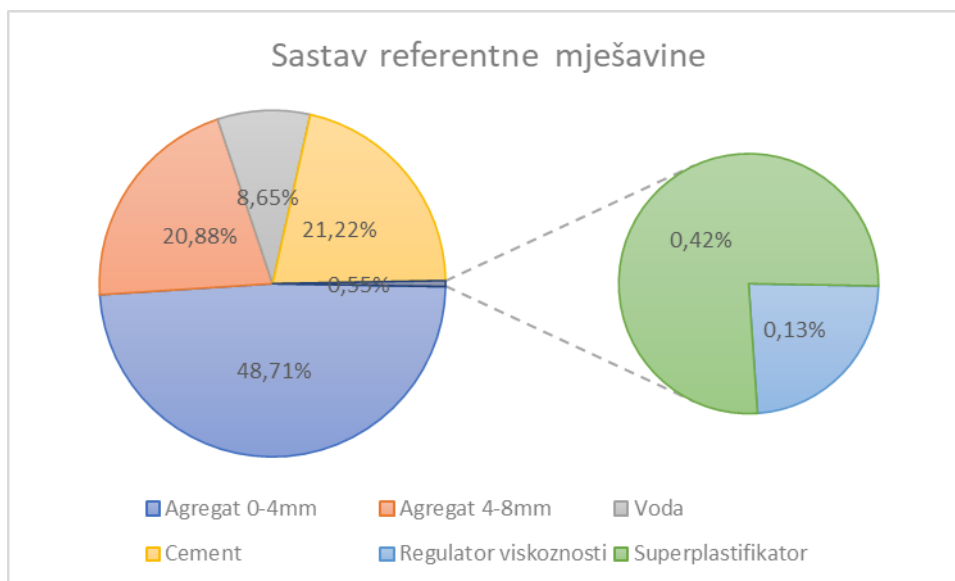
Eksperimentalni dio rada odvijao se je u Laboratoriju za materijala na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Eksperimentalni dio rada sastojao se je od projektiranja mješavine, izrade mješavine, ispitivanja mješavine u svježem stanju i ispitivanju mješavine u očvrslom stanju. Kako bi se dao odgovor na osnovni cilj rada zadatak je bio izraditi referentnu mješavinu koja pokazuje svojstva samozbijajućeg betona, a u koja su se onda dodavala čelična vlakna te kombinacija čeličnih i sintetičkih i čeličnih i staklena vlakana. Sve mješavine, osim referentne, sadržavale su isti volumni udio čeličnih vlakana. Sav potreban materijal za izradu uzoraka darovala je tvrka Holcim (Hrvatska) d.o.o.

Ukupno su izrađene 4 mješavine betona:

- Mješavina 1 oznake REF SCC odnosi se na referentnu mješavinu samozbijajućeg betona)
- Mješavina 2 oznake SF 0.5 - REF SCC odnosi se na mješavinu s dodatkom 0.5% čeličnih vlakana ($\sim 39 \text{ kg/m}$)
- Mješavina 3 oznake SF 0.5 + PP 0.1 - REF SCC odnosi se na mješavinu s dodatkom 0.5% čeličnih vlakana ($\sim 39 \text{ kg/m}^3$) i 0.1% polipropilenskih strukturnih vlakna ($\sim 0,91 \text{ kg/m}^3$)
- Mješavina 4 oznake SF 0.5 + GF 0.1 - REF SCC odnosi se na mješavinu s dodatkom 0.5% čeličnih vlakana ($\sim 39 \text{ kg/m}^3$) i 0.1% staklenih vlakna ($\sim 2,7 \text{ kg/m}^3$)

6.1. Probne mješavine

Probna referentna mješavina spravljena je od agregata frakcije 0 - 4 mm i 4 - 8 mm, cementa, vode, regulatora viskoznosti i superplastifikatora. Projektiranje mješavine odvijalo se u više faza kako bi dobivena mješavina postigla svojstva samozbijajućeg betona. Sve probne mješavine su se izrađivale u laboratoriju za materijale u mikseru kapaciteta 5 L. Prilikom izrade probnih mješavina u većini slučajeva glavni problem bilo je izdvajanje vode. Najbolja svojstva pokazala je mješavina s vodo-cementnim omjer 0,38 a čiji sastav je prikazan na slici 6. Dakle, postotak mase cementa u mješavini iznosio je 21,22%, agregata 69,59% (od čega 70 % frakcije 0 - 4 mm i 30% frakcije 4 - 8 mm), vode 8,65%, superplastifikatora 0,42% i regulatora viskoznosti 0,13% te je ona usvojena za referentnu mješavinu samozbijajućeg betona.



Slika 6 Sastav referentne mješavine

Vizualnim opažanjem je zaključeno da usvojena referentna mješavina ima u odnosu na druge mješavine najbolja svojstva jer se prilikom stajanja mješavine pojavilo neznatno izdvajanje vode. Prilikom izrade referentnih mješavina posebna pažnja se davala samom redosljedu dodavanja materijala, kako ne bi došlo do nepoželjnih kemijskih reakcija koji mogu nepovoljno djelovati na samu mješavinu te spriječiti proces hidratacije i očvršćivanja mješavine. Nakon usvajanja sastava referentne mješavine u isti takav sastav dodavala su se različita vlakana kako bi se mogao vidjeti njihov utjecaj na svojstva samozbijajućeg beton u sviježem i očvrslom stanju.

6.1.1. Agregat

Agregat korištene u izradi svih mješavina je Holcim majstor pijesak frakcije 0 - 4 mm i Holcim majstor drobljenac frakcije 4 - 8 mm. Prilikom spravljanja betonske mješavine posebnu pažnju treba obratiti na vlažnost agregata. Glavni utjecaj na vlažnost agregata ima mjesto skladištenja, uvjeti prilikom pakiranja i mogućnost oštećenja samog pakiranja. Holcim pijesak bio je pakiran u vreće od 25 kg zbog lakše upotrebe i doziranja na gradilištu a čija se vlažnost razlikovala od vreće do vreće. Najmanja vlažnost pijeska iznosila je 1,2% dok je najveća vlažnost iznosila 2,2%. Holcim majstor drobljenac pakiran je u vreće od 19 kg, također je svaka vreća bila drugačije vlažnosti. Najmanja vlažnost iznosila je 0,25% dok je najveća vlažnost iznosila 2,3%. Prilikom spravljanja svježe mješavine količina vode korigirana je prema vlažnostima agregata kako se ne bi narušio vodo cementni omjer i mogućnost kasnijeg izdvajanja viška vode.

6.1.2. Cement

Kao vezni materijal korišten je cement proizvođača Holcim oznake CEM II/A-LL 42,5 R. To je portlandski cement s dodatkom vapnenca čiji je sastav od 80% do 94% portlandskog cementnog klinkera i od 6% do 20% prirodnog vapnenca. Također u njemu se nalaze dodaci industrijskog gipsa dihidrata čija je funkcija reguliranje vezivanja. Ova vrsta cementa je posebno prilagođena za predgotovljene betonske elemente, dekorativne proizvode i prednapete betonske konstrukcije. Osnovna svojstva ovog cementa su:

- Mali zahtjevi za vodom
- Veća sposobnost zadržavanja vode
- Poboljšanje nepropusnosti zbog dodatka visokovrijednog vapnenca
- Ubrzan razvoj čvrstoće
- Povećan razvoj topline hidratacije
- Ujednačena boja

Ovaj cement se preporučuje koristiti kod strojne izrade predgotovljenih betonskih proizvoda, za izradu prednapregnutog betona, kod izrade inženjersko visoko nosivih betonskih konstrukcija te za izradu transportnih i pumpanih betona. Prema podacima s tehničkog lista proizvođača potrebno vrijeme da cement počne vezati iznosi 160 min, tlačna čvrstoća nakon 2 dana iznosi 27 MPa i tlačna čvrstoća nakon 28 dana iznosi 51 MPa. [12]

6.1.3. Superplastifikator

Superplastifikator se koristi prilikom izrade samozbijajućeg betona, betona koji su izloženi raznim uvjetima, prilikom izrade betona kod kojeg se očekuje maksimalna ušteda vode, kod betona visokih performansi i betona koji se ugrađuju pri visokim temperaturama. Prilikom izrade samozbijajućeg betona koristio se superplastifikator Dynamon SF 16S proizvođača Mapei. Dynamon SF 16S je univerzalni plastifikator baziran na polikarboksilatnog etera što osigurava odlično slijeganje i nisku ljepljivost svježe betonske mješavine. Najbolji utjecaj na mješavinu superplastifikator ima kad se dodaje nakon ostalih komponenti mješavine (cementa, agregata, mineralnih dodataka i minimalno 80% vode). Superplastifikator se dozira u preporučenim postocima koji se kreću od 0,2% do 2,0% mase cementa. Maksimalno doziranje superplastifikatora iznosi 2,5% od mase cementa. Gustoća superplastifikatora iznosi od 1,06 g/cm³ do 1,10 g/cm³, pH iznosi od 3,5 do 5,5.

Prilikom izrade referentne mješavine postotak superplastifikatora iznosio je 2% od mase cementa mješavine.

6.1.4. Regulator viskoznosti

Regulator viskoznosti koji se koristio prilikom izrade uzoraka bio je Master Matrix SDC 150. To je vodena otopina visoko inovativnih sintetičkih kopolimera. Dodavanjem regulatora viskoznosti mješavini postiže se ravnoteža između fluidnosti, prolaznosti i otporu segregacije koji treba postići. Korištenjem regulatora viskoznosti smanjuje se potreba za finim česticama ($<0,125$ mm). Također nije potrebno vibrirati mješavinu što dovodi do lakše i ugodnije ugradnje. Doziranje regulatora viskoznosti je od 0,10 do 0,79 litara za 100 kg cementa. Regulator viskoznosti se dodaje mješavini prethodno pomješšan s vodom. Koristi se prilikom izrade samozbijajućeg betona i kod pumpanih betona. Gustoća regulatora viskoznosti je oko $1,01 \text{ g/cm}^3$, a pH vrijednost iznosi oko 6,5.

Prilikom izrade referentne mješavine postotak regulatora viskoznosti iznosi je 0,6% mase cementa mješavine.

6.1.5. Voda

Voda koja je korištena za izradu referentne mješavine uzeta je iz javnog vodovoda, što znači da je tehnički ispravna za izradu betonske mješavine. Temperatura vode prilikom izrade mješavine bila je sobne temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

6.2. Mješavine s dodatkom vlakana

Nakon odabira referentne mješavine izradile su se još tri dodatne mješavine. Kao baza korištena je referentna mješavina u koju su se dodavala različita vrsta vlakana. Prilikom dodavanja vlakana bilo je bitno da se zadrže svojstva samozbijajućeg betona. Kod izrade mješavina korištene su dvije vrste čeličnih vlakana, sintetička vlakna i staklena vlakna.

6.2.1. Čelična vlakna

Za izradu mješavina s dodatkom vlakana koristila su se čelična vlakna proizvođača Dramix, tip 4D 65/60BG i 3D 45/50BL. Dramix 4D (Slika 7) su čelična vlakna duljine 60 mm, promjera 0,90mm. Ta vrsta vlakana dodaje se u beton koji se ugrađuje u podvodne građevine, autoceste i lučke kolnike. Dodavanjem 4D vlakana povećava se vlačna čvrstoća betona, također smanjuje se mogućnost stvaranja mikro pukotina. Snaga naprezanja koju vlakno može podnesti iznosi 1600 N/mm^2 a modul elastičnosti iznosi 200 GPa. Minimalna količina vlakana koja se dodaje u mješavinu iznosi 15 kg/m^3 . 3D vlakna su čelična vlakna izrađena od hladno vučene žice za strukturalnu primjenu. Duljina vlakana je 50 mm a promjer 1,05 mm. Naprezanje koju vlakno može podnesti iznosi 1115 N/mm^2 a modul elastičnosti iznosi 200 GPa.



Slika 7 Čelična vlakna 4D

6.2.2. Sintetička vlakna

Sintetička vlakna koja su korištena prilikom izrade mješavine su Strux 90/40 makro vlakna. Ona su posebna vrsta sintetičkih vlakana koja mješavini povećavaju čvrstoću i modul elastičnosti. Pravilnim rasporedom u betonskoj mješavini povećavaju žilavost, otpornost na udarce, zamor betona i trajnost konstrukcije. Korištenjem sintetičkih makro vlakana povećava se rezidualna čvrstoća na savijanje. Prednosti korištenja sintetičkih vlakana su:

- Mogućnost totalne zamjene klasične armature kod lagano armiranih konstrukcija
- Ekonomska ušteda
- Sigurnija i jednostavnija upotreba u odnosu na klasičnu armaturu
- Jednostavna ugradnja pomoću pumpe
- Sprječava nastajanje mikro pukotina

Sintetička vlakna dodaju se suhim sastojcima mješavine (agregatu i cementu) te se trebaju dobro promiješati kako bi se vlakna pravilno rasporedila po mješavini. Sintetička vlakna Strux 90/40 (Slika 8) duljine su 40 mm i promjera 0,43mm. Vlačna čvrstoća iznosi 620 N/mm² što je u odnosu na čelično vlakno 4D 39% manje. Modul elastičnosti sintetičkih vlakana iznosi 9,5 GPa. Količina vlakna u mješavini ovisi o samoj namjeni mješavine i kreće se od 1,8 kg/m³ do 4,8 kg/m³.



Slika 8 Sintetička vlakna Strux 90/40

6.2.3. Staklena vlakna

Anti-Crack HP 67/36 (slika 9) su staklena makro vlakna visokih performansi, konstruirana kako bi se beton ojačao od plastičnog pucanja, termičkog pucanja i pucanja nastalog sušenjem. Također staklena vlakna povećavaju čvrstoću na savijanje, duktilnost i žilavost te otpornost na udare i zamor betona. Staklena vlakna mogu se koristiti kao sekundarna a u ponekim konstrukcijama kao primarna armatura. Staklena vlakna se zbog svoje specifične težine koja je slična agregatu koji se koristi prilikom izrade te vrste betona lako rasporede po mješavini. Time je osigurano pravilno i jednolika raspodjela vlakana po mješavini. Prednosti korištenja staklenih vlakana u betonu su otpornost stakla na alkalije, sprječavanje pucanja betona u svježem i očvrslulom stanju, poboljšavanje mehaničkih svojstva očvrslulog betona, jednostavna i brza disperzija tijekom miješanja, ne utječe na pumpanje betona i jednostavnost rukovanja. Duljina korištenih staklenih vlakana je 36 mm, dok je promjer vlakna 19 μm . Vlačna čvrstoća vlakna iznosi 1700 N/mm a dok je modul elastičnosti 72 GPa.



Slika 9 Staklena vlakna Anti-crack HP 67/36

6.3. Izrada mješavina

Sve mješavine izrađene su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci.. Temperatura laboratorija tokom izrae mješavina bila je $20^{\circ}\text{C}\pm 2$. Sve betonske mješavine izrađivale su se uz prisilnoj miješalici kapaciteta 150 L. Materijali koji su korišteni bili su skladišteni na ispravan način u skladištu. Ukupno su izrađene četiri mješavine. U nastavku je dan kratki opis načina spravljanja pojedine mješavine.

6.3.1. Mješavina 1 (SCC REF)

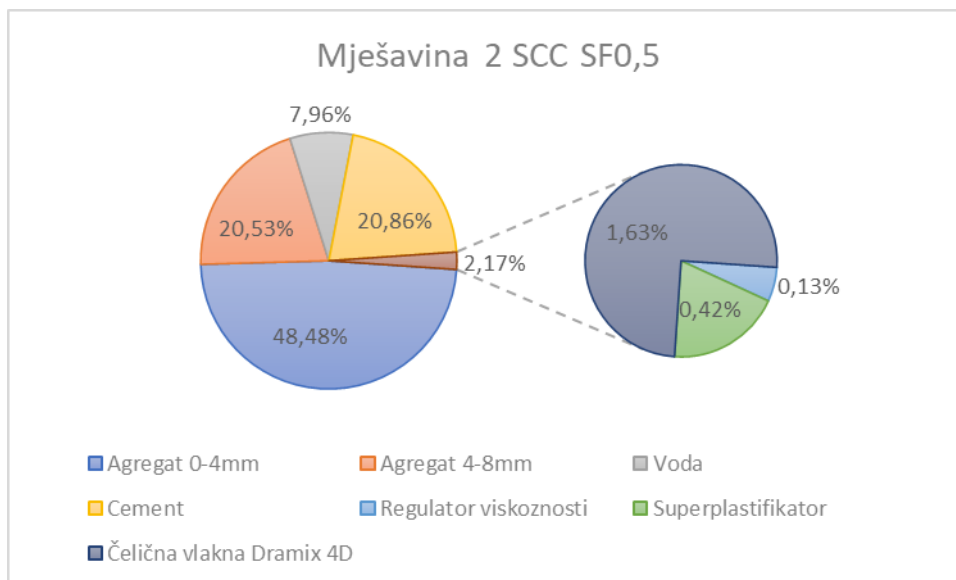
Mješavina 1 oznake SCC REF pripremala se tako što su se prethodno izvagali svi potrebni sastojci. Zatim su se u prisilnu miješalicu stavili svi suhi sastojci (agregat i cement) koji su se miješali 1 min. Nakon što se je agregat i cement dobro izmiješao dodano je 80% vode te se je nastavilo miješati dodatnih 2 min. Nakon proteklih 2 min miješanje se zaustavlja na 3 min. Zatim se u mješavinu dodaje 20% vode sa superplastifikatorom i regulatorom viskoznosti te se mješavina dodatno miješa 2 min.

Nakon izrade mješavine došlo je do neznatnog izdvajanja vode, kako je vidljivo na slici 9. Nakon 24 h od izrade mješavine beton nije očvrstnuo. Ustvrđeno je da je razlog tome miješanje superplastifikatora i regulatora viskoznosti. Kako bi spriječili da se to dogodi prilikom izrade ostalih mješavina promijenjen je postupak izrade betona, odnosno superplastifikator i regulator viskoznosti dodaju se odvojeno.



Slika 10 Mješavina 1 (SCC REF) nakon izrade

6.3.2. Mješavina 2 (SCC SF0,5)



Mješavina 2 oznake SCC SF0,5 se u odnosu na Mješavina 1 oznake SCC REF osim razlike u načinu doziranja aditiva mješavini razlikuje i po tome što su dodana čelična vlakana Dramix 4D u količini od 0,5% volumnog udjela ($\sim 39 \text{ kg/m}^3$). Čelična vlakna bila su zalijepljena u snopove, stoga je prije izrade mješavine bilo potrebno odvojiti svako čelično vlakno za sebe. Sastav mješavine prikazan je na slici 10, gdje se vidi da 48,48% mješavine čini agregat frakcije od 0 - 4mm, 20,53% čini agregat od 4- 8 mm, cement zauzima 20,86 %, voda 7,96%, superplastifikator i regulator viskoznosti zauzimaju 0,55% mješavine. Čelična vlakna zauzimaju 1,63% mješavine.

Slika 11 Sastav mješavine 2 SCC SF0,5

Nakon vaganja svih potrebnih sastojaka postupak mješanja sastojaka bio je kako slijedi:

- 1 minutu su se miješali suhi sastojci odnosno agregat i cement
- dodano je 80% vode te se je nastavilo s miješanjem 2 min
- kao i kod referentne mješavine (SCC REF) se stalo s miješanjem na 3 min.
- dodano je 10% vode sa superplastifikatorom i miješanje se je nastavilo 1 min
- preostalih 10% vode sa regulatorom viskoznosti je dodano i nastavilo se miješanje 1 min
- slijedeće 2 min mješanja se dodaju čelična vlakna
- nastavilo se s miješanjem još 4 min.

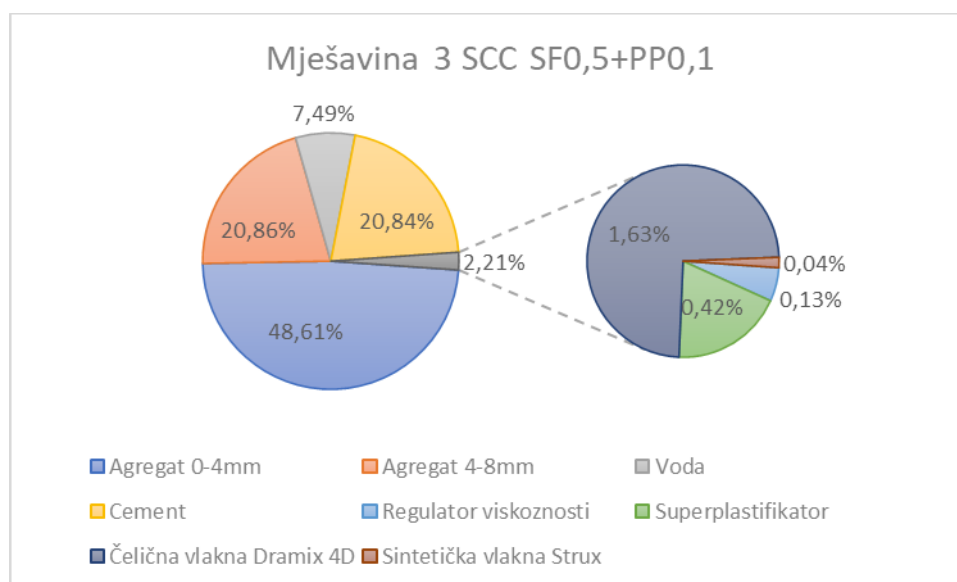
Nakon izrade mješavine došlo je do neznatnog izdvajanja vode (Slika 12). Uslijed odvojenog dodavanja superplastifikatora i regulatora viskoznosti u postupku mješanja beton je nakon 24h normalno očvrsnuo.



Slika 12 Izgled mješavine 2 (SCC SF0,5)

6.3.3. Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

Mješavina 3 oznake SCC SF0,5+PP0,1 sadrži 0.5% čeličnih vlakana ($\sim 39 \text{ kg/m}^3$) Dramix 4D čeličnih vlakana i 0.1% ($\sim 0,91 \text{ kg/m}^3$) sintetičkih makro vlakana Strux 90/40. Kao što je prikazano na slici 12, postoci su vrlo slični mješavini 2, sintetička vlakna Strux 90/40 zauzimaju 0,04% mješavine.



Slika 13 Sastav mješavine 3 SCC SF0,5+PP0,1

Izrada mješavine započela je miješanjem agregata, cementa i sintetičkih vlakana:

- Nakon 1 min miješanja suhих sastojaka

- dodaje se 80% vode i nastavlja se s miješanjem 2 min
- zaustavlja se miješanje na 3 min.
- Dodavanjem 10% s superplastifikatorom miješanje se nastavlja 1 min,
- se preostalih 10% vode sa regulatorom viskoznosti i miješa se dodatnih 1 min.
- Narednih 2 min postepeno se dodaju čelična vlakna
- te se nastavlja miješanje još 4 min.

Prilikom završetka izrade mješavine došlo je do neznatnog izdvajanja vode .

6.3.4. Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

Mješavina 4 oznake SCC SF0,5+GF0,1 je prema sastavu i izradi sličan mješavini 3, samo su umjesto sintetičkih vlakana dodana staklena vlakna. Mješavina sadrži 0.5% čeličnih vlakana ($\sim 39 \text{ kg/m}^3$) i 0.1% staklenih vlakna ($\sim 2,7 \text{ kg/m}^3$). Staklena vlakna dodala su se prilikom miješanja agregata i cementa (slika 14).



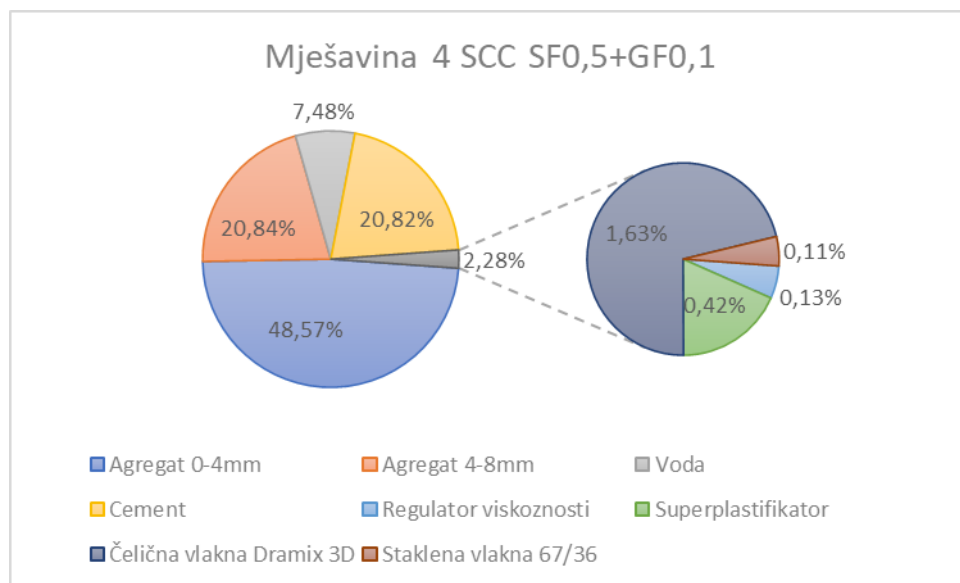
Slika 14 Dodavanje staklenih vlakana mješavini 4

Čelična vlakna koja su korištena prilikom izrade mješavine su Dramix 3D koja su u odnosu na 4D vlakna kraća za 1 cm dok su mehanička svojstva vrlo slična. Čelična vlakna dodala su se u posljednjem koraku unutar 2 minute kontinuiranog miješanja. Nakon dodavanja vlakana nastavilo se s miješanjem još 4 min. Nakon završetka izrade mješavine došlo je do neznatnog izdvajanja vode. (slika 15)



Slika 15 Izgled mješavine 4 nakon izrade

Kao što je prikazano na slici 16 čelična vlakna zauzimaju 1,63% mješavine dok staklena vlakna zauzimaju 0,11%.



Slika 16 Sastav mješavine 4 SCC SF0,5+GF0,1

7. ISPITIVANJE MJEŠAVINA U SVJEŽEM STANJU

Tijekom izrade prethodno navedenih mješavina za svaku od njih provedena su ispitivanja svojstava u svježem stanju. Ispitana je gustoća, rasprostiranje slijeganjem, V- lijevak, L- kutija i sadržaj pora.

7.1. Gustoća u svježem stanju

Gustoća u svježem stanju ispitala se prema normi HRN EN 12350-6 korištenjem kalupa poznate zapremine i vage. Gustoća je dobivena prema izrazu (1):

$$\rho = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

Gdje je ρ -gustoća betona u svježem stanju izražena u kilogramima po metru kubnom (kg/m^3), m -masa uzorka izražena u kilogramima (kg) i V -volumen uzorka izražen u metrima kubnim (m^3)

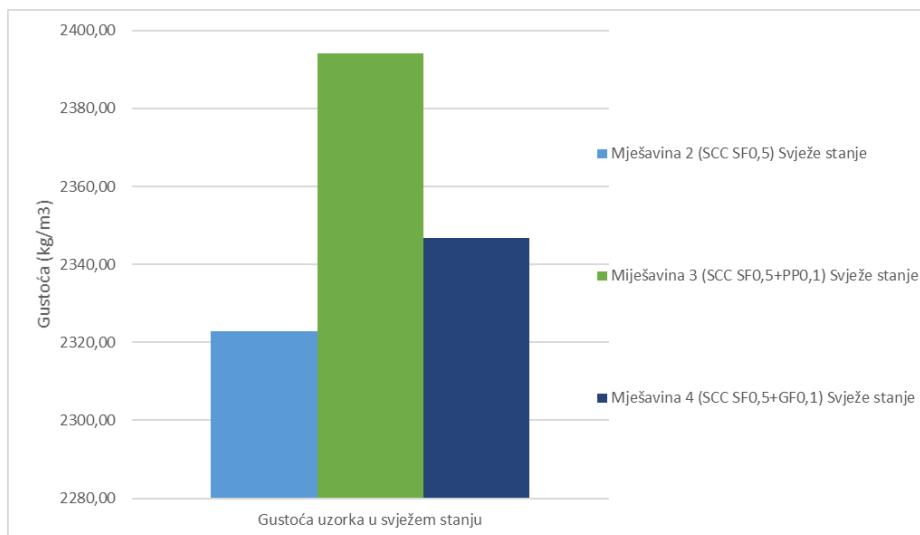
Dobiveni rezultati za pojedinu mješavinu prikazani su u tablici 1 (za mješavinu 1 nije provedeno ispitivanje gustoće svježeg betona)

Tablica 1 Gustoća betona u svježem stanju

GUSTOĆA U SVJEŽEM STANJU	
Broj mješavine	kg/m ³
1	-
2	2322,90
3	2394,07

4	2346,66
---	---------

Najveću gustoću u svježem stanju ima mješavina 3 (2394,07 kg/m³), odnosno mješavina s 4D čeličnim vlaknima i sintetičkim vlaknima. Najmanju gustoću od mješavina s dodatkom vlakana ima mješavina 2 (2322,90 kg/m³) s čeličnim 4D vlaknima (Slika 17)



Slika 17 Dijagram gustoće uzoraka u svježem stanju

7.2. Rasprostiranje slijeganjem

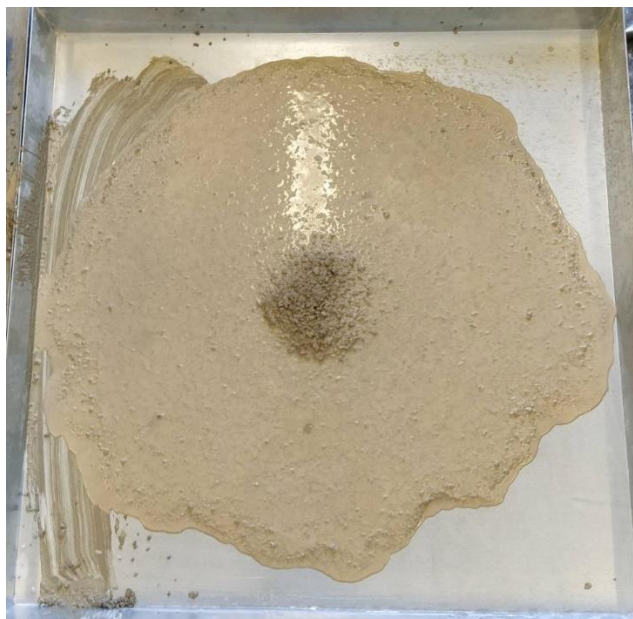
Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem provelo se sukladno normi HRN EN 12350-8. Za ispitivanje je potrebna glatka podloga s označenim promjerom 500 mm, kalup oblika krnjeg stošca i štoperica. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2 Rezultati pokusa rasprostiranja slijeganjem

RASPROSTIRANJE SLIJEGANJEM				
Broj mješavine	Razred rasprostiranja slijeganjem		Razred viskoznosti	
	D _{max} (mm)	Razred	T500 (s)	Razred
1	830	SF3	2,09	VS2
2	890	SF3	1,27	VS1
3	805	SF3	2,39	VS2
4	790	SF3	2,3	VS2

Po klasi rasprostiranja slijeganjem sve mješavine svrstane su u razred SF3 (primjenivo za elemente s gusto složenom armaturom, složenog oblika). Najveći promjer D_{max} imala je mješavina 2 (SCC SF0,5) čiji je maksimalni promjer iznosio 890 mm prikazano na slici 18.

Prema razredu viskoznosti jedino je mješavina 2 svrstana u razred VS1 (za gusto složenu armaturu) dok ostale mješavine pripadaju klasi VS2 (poboljšana otpornost segregaciji).



Slika 18 Ispitivanje rasprostiranja mješavine 2

7.3. V-lijevak

Ispitivanje V-lijevkom izvedeno je prema normi HRN EN 12350-9. Kako bi se provelo ispitivanje potreban je V-lijevak, posuda i štoperica. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.

Tablica 3 Rezultati ispitivanja V-lijevkom

V-LIJEVAK		
Broj mješavine	Vrijeme tečenja (s)	Razred
1	4,55	VF1
2	13	VF2
3	9	VF2
4	6	VF1

Kako je definirano normom rezultati ispod 8 sekundi pripadaju razredu betona VF1 a to su mješavine 1 (REF) i 4 (SCC SF0,5+ GF0,1) dok mješavine 2 i 3 pripadaju klasi betona VF2.

7.4. L-kutija

Ispitivanje pomoću L-kutije izvedeno je prema normi HRN EN 12350-10. Za potrebe ispitivanja koristila se L-kutija s 3 šipke. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4

Tablica 4 Rezultati ispitivanja L-kutijom

L-KUTIJA				
Broj mješavine	H1 (cm)	H2 (cm)	H1/H2	Klasa
1	6	6	1	PA2
2	1	13	0,08	-
3	1	13	0,08	-
4	8	8	1	PA2

Prilikom ispitivanja mješavina 2 i 3 došlo je do zaglavljenja vlakana na šipkama uređaja za ispitivanje (Slika 19). Kako su se kod mješavine 4 koristila kraća čelična vlakna nego kod mješavine 2 i 3 nije došlo do zaglavljenja prilikom prolaženja između šipki. Mješavine 1 i 4 pripadaju klasi betona PA2 što znači da se mogu koristiti kod armature koje su na razmaku od 60 mm do 80 mm. Dok se mješavine 2 i 3 ne preporučuju za ugradnju kod gusto postavljene armature.



Slika 19 Zaglavljenje vlakana prilikom ispitivanja

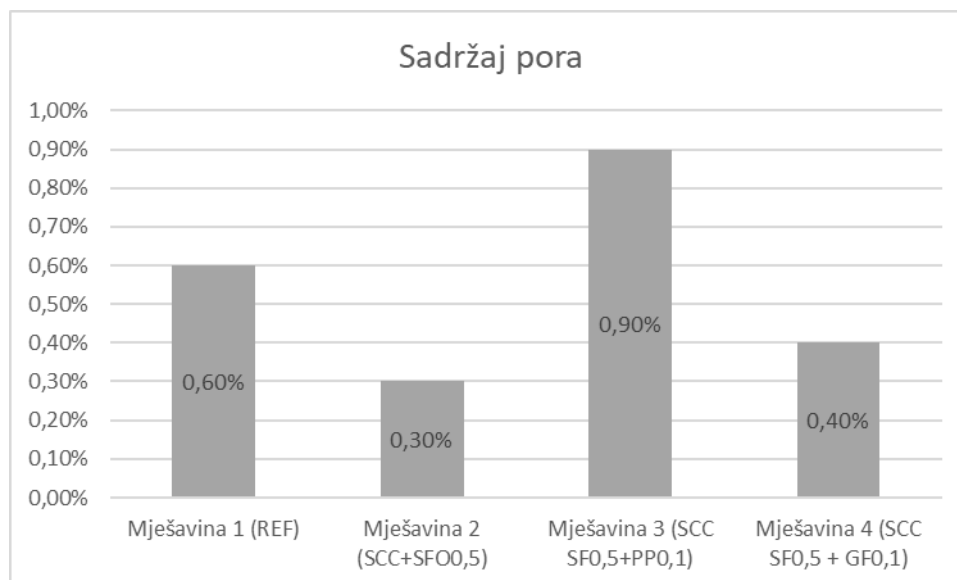
7.5. Sadržaj pora

Ispitivanje sadržaja pora izvedeno je prema normi HRN EN 12350-7. Kako bi se odredio postotak pora koristio se porometar. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5 i na slici 20.

Tablica 5 Rezultati ispitivanja sadržaja pora

Sadržaj pora	
Broj mješavine	Sadržaj pora (%)
1	0,6
2	0,3
3	0,9
4	0,4

Najveći postotak pora sadržavala je mješavina 3 i to 0,9%, mješavina 1 imala je 0,6% dok su mješavine 2 (0,3%) i 4 (0,4%) imale približno jednak sadržaj pora.



Slika 20 Sadržaj pora

7.6. Uzorkovanje i njega betona

Nakon ispitivanja betona u svježem stanju izrađeni su uzorci za ispitivanje očvrslulih svojstava prizmi dimenzija 10 cm x 10 cm x 40 cm i uzorci oblika kocki dimenzija 15 cm x 15 cm x 15 cm. Nakon 24h uzorci su se raskalupili te su se njegovani 28 dana u termostratiranom bazenu.

8. ISPITIVANJA U OČVRSLJOM STANJU

Nakon proteklih 28 dana na uzorcima su izvršena ispitivanja u očvrsljnom stanju. Ispitana je gustoća, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i savojne čvrstoća uzorka u očvrsljnom stanju.

8.1. Gustoća uzorka u očvrsljnom stanju

Gustoća uzorka izračunata je prema formuli:

$$\rho = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

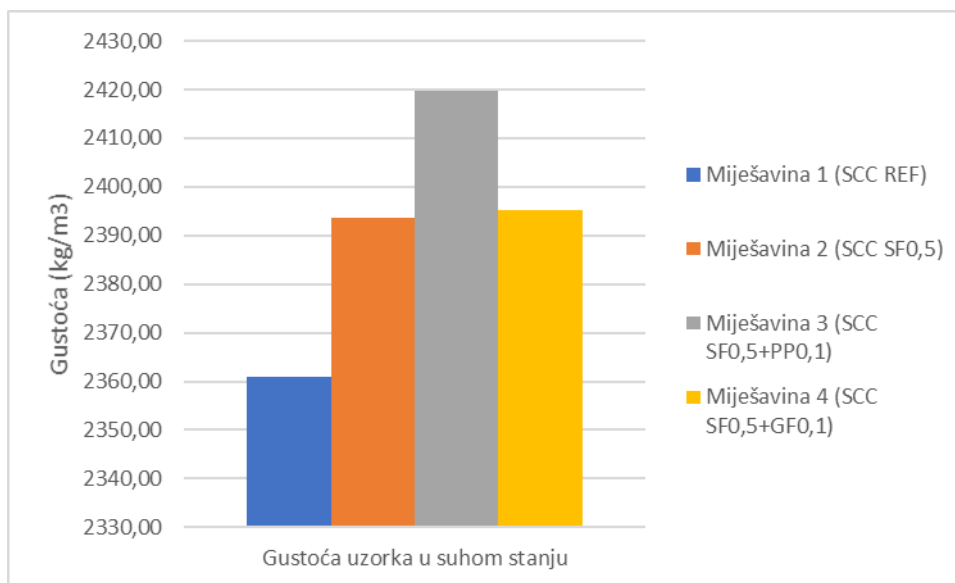
Gdje je ρ - gustoća uzorka u očvrsljnom stanju, m - masa uzorka , V -volumen uzorka.

Svi rezultati mjerenja prikazani su u tablici 6.

Tablica 6 Rezultati mjerenja betona u očvrslom stanju

Beton u očvrslom stanju									
Naziv mješavina	Oznaka uzorka	Oblik uzorka	Dimenzije			Volumen uzorka	Masa uzorka	Gustoća uzorka	
			a (mm)	b (mm)	c (mm)			V(m ³)	m(kg)
Mješavina 1 (SCC REF)	U1R	KOCKA	149,47	149,72	149,93	0,00336	7,863	2343,36	2361,03
	U2R		149,30	149,59	149,42	0,00334	7,958	2384,64	
	U3R		148,16	150,01	149,90	0,00333	7,771	2332,51	
	U4R		147,92	150,07	149,79	0,00333	7,915	2380,42	
	U5R		147,20	149,99	149,90	0,00331	7,802	2357,40	
	U6R		146,94	149,76	149,73	0,00329	7,761	2355,54	
	U1R	PRIZMA	400,00	97,64	100,76	0,00394	9,272	2356,07	
	U2R		397,50	97,95	100,55	0,00391	9,333	2383,82	
	U3R		400,00	97,52	100,84	0,00393	9,266	2355,55	
Mješavina 2 (SCC SFO,5)	U1Č	KOCKA	146,93	149,74	149,90	0,00330	7,814	2369,38	2393,65
	U2Č		149,57	149,81	149,71	0,00335	8,138	2426,07	
	U3Č		150,83	150,28	149,89	0,00340	8,122	2390,63	
	U4Č		149,49	150,09	150,06	0,00337	8,095	2404,36	
	U5Č		148,62	150,36	150,44	0,00336	7,975	2372,21	
	U6Č		147,69	150,08	149,79	0,00332	8,031	2418,72	
	U1Č	PRIZMA	400	99,8	100,5	0,00401	9,827	2449,53	
	U2Č		400	100,39	100,57	0,00404	9,585	2373,36	
	U3Č		400	99,47	100,69	0,00401	9,630	2403,74	
	U4Č		400	100,87	100,28	0,00405	9,865	2438,13	
U5Č	400	98,95	100,42	0,00397	9,078	2284,02			
Mješavina 3 (SCC SFO,5+PP0,1)	U1ČP	KOCKA	147,3	149,98	149,71	0,00331	8,026	2426,53	2419,76
	U2ČP		149,45	150,6	149,86	0,00337	8,137	2412,42	
	U3ČP		148,75	149,83	150,61	0,00336	8,047	2397,40	
	U4ČP		149,62	148,49	149,64	0,00332	8,028	2414,66	
	U5ČP		148,97	149,67	149,71	0,00334	8,026	2404,44	
	U6ČP		148,9	149,87	149,99	0,00335	8,062	2408,64	
	U1ČP	PRIZMA	400	101	99,83	0,00403	9,739	2414,75	
	U2ČP		400	97,31	99,55	0,00387	9,445	2437,49	
	U3ČP		400	98,68	101,54	0,00401	9,821	2450,36	
	U4ČP		400	98,8	99,8	0,00394	9,596	2433,00	
U5ČP	400	100,53	100,04	0,00402	9,726	2417,71			
Mješavina 4 (SCC SFO,5+GF0,1)	U1ČST	KOCKA	150,05	148,46	149,81	0,00334	8,019	2402,89	2395,32
	U2ČST		149,14	150,41	150,46	0,00338	8,024	2377,38	
	U3ČST		149,92	148,69	150,04	0,00334	8,048	2406,24	
	U4ČST		149,82	148,94	149,69	0,00334	8,044	2408,23	
	U5ČST		150,16	147,51	150,21	0,00333	7,887	2370,49	
	U6ČST		149,88	148,32	150,18	0,00334	7,967	2386,38	
	U1ČST	PRIZMA	400	99,25	100,4	0,00399	9,593	2406,75	
	U2ČST		400	100,92	100,19	0,00404	9,761	2413,42	
	U3ČST		400	96,86	100,36	0,00389	9,278	2386,10	

Najveću gustoću u očvrslom stanju ima mješavina 3 (SCC SFO,5+PP0,1) čija gustoća iznosi 2419,96 kg/m³, mješavine 2 i 4 imaju približno jednake gustoće od 2390 kg/m³, a referentna mješavina ima najmanju gustoću 2361,03 kg/m³. Usporedba rezultata prikazana je na dijagramu. (Slika 21)



Slika 21 Gustoća uzoraka u očvrslom stanju.

8.2. Tlačna čvrstoća

Prije ispitivanja tlačne čvrstoće razornom metodom ispitana je i tlačna čvrstoća nerazorom metodom ispitivanja (sklorometriranjem).

8.2.1. Ispitivanje nerazorom metodom - sklerometrom

Ispitivanje je provedeno na 3 uzorka kocke svake mješavine. Postupak izvedbe ispitivanja vršen je jednako za sve uzorke. Ispitivanje sklerometrom (slika 22) izvodilo se je na čvrstoj podlozi kako propisuje norma, kako bi se smanjila mogućnost pojave netočnih podataka.



Slika 22 Sklerometar

Prema normi potrebno je izvesti 9 udaraca koji međusobno moraju biti udaljeni minimalno 2,5 cm. Redosljed i položaj mjernih mjesta na uzorku kocke prikazan je na slici 23.



Slika 23 Redosljed izvođenja ispitivanja na uzorku

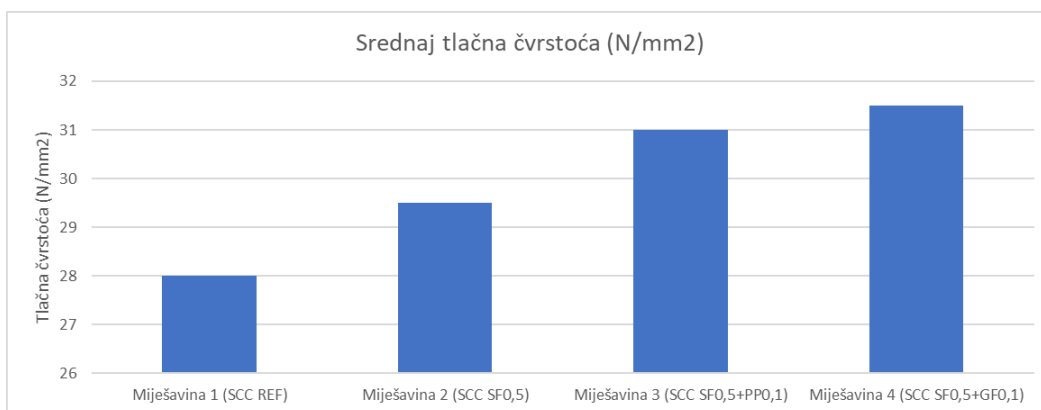
Prema rezultatima ispitivanja koja su prikazana u tablici 7, vidimo kako je vrijednost udarca kod svih mješavina na poziciji 5 najveća, dok su na rubovima rezultati u pravilu manji, što ukazuje na nehomogenost ugrađene betonske mješavine. Prema dobivenim rezultatima možemo vidjeti kako su mješavine 3 i 4 više homogene u odnosu na preostale mješavine, dok su kod mješavina 1 i 2 vidljive veće nehomogenosti u betonskoj mješavini.

Tablica 7 Rezultati ispitivanja sklerometrom

	Oznaka mjesta udarca	Oznaka uzroka			Srednja vrijednost	Srednja vrijednost svih	Rezultati koji se uzimaju u obzir	Srednja vrijednost točaka uzetih u	St. Devijacija	Srednja tlačna čvrstoća	
		U1R	U2R	U3R							
Očitana vrijednost na sklerometru	1	26	32	24	27,33	29,07	Uzima se u obzir	29,96	3,50	28	Miješavina 1 (SCC REF)
	2	29	35	34	32,67		Uzima se u obzir				
	3	26	24	24	24,67		Uzima se u obzir				
	4	26	32	31	29,67		Uzima se u obzir				
	5	36	36	38	36,67		Uzima se u obzir				
	6	30	32	32	31,33		Uzima se u obzir				
	7	24	29	24	25,67		Uzima se u obzir				
	8	31	32	32	31,67		Uzima se u obzir				
	9	22	20	24	22,00		Ne uzima se u obzir				
Očitana vrijednost na sklerometru	Oznaka mjesta udarca	Oznaka uzroka			Srednja vrijednost	Srednja vrijednost svih	Rezultati koji se uzimaju u obzir	Srednja vrijednost točaka uzetih u	St. Devijacija	Srednja tlačna čvrstoća	Miješavina 2 (SCC SF0,5)
	1	U1Č	U2Č	U3Č	29,67	31,56	Uzima se u obzir	31,56	2,35	29,5	
	2	30	36	36	34,00		Uzima se u obzir				
	3	32	36	27	31,67		Uzima se u obzir				
	4	31	27	32	30,00		Uzima se u obzir				
	5	36	39	33	36,00		Uzima se u obzir				
	6	34	30	38	34,00		Uzima se u obzir				
	7	28	30	30	29,33		Uzima se u obzir				
	8	31	32	31	31,33		Uzima se u obzir				
9	29	28	27	28,00	Uzima se u obzir						
Očitana vrijednost na sklerometru	Oznaka mjesta udarca	Oznaka uzroka			Srednja vrijednost	Srednja vrijednost svih	Rezultati koji se uzimaju u obzir	Srednja vrijednost točaka uzetih u	St. Devijacija	Srednja tlačna čvrstoća	Miješavina 3 (SCC SF0,5+PPO,1)
	1	U1ČP	U2ČP	U3ČP	33,33	33,33	Uzima se u obzir	33,33	3,39	31	
	2	39	33	37	36,33		Uzima se u obzir				
	3	32	33	32	32,33		Uzima se u obzir				
	4	36	35	32	34,33		Uzima se u obzir				
	5	41	42	40	41,00		Uzima se u obzir				
	6	28	35	36	33,00		Uzima se u obzir				
	7	30	30	30	30,00		Uzima se u obzir				
	8	32	31	33	32,00		Uzima se u obzir				
9	28	26	29	27,67	Uzima se u obzir						
Očitana vrijednost na sklerometru	Oznaka mjesta udarca	Oznaka uzroka			Srednja vrijednost	Srednja vrijednost svih	Rezultati koji se uzimaju u obzir	Srednja vrijednost točaka uzetih u	St. Devijacija	Srednja tlačna čvrstoća	Miješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)
	1	U1ČST	U2ČST	U3ČST	32,00	33,74	Uzima se u obzir	33,74	2,36	31,5	
	2	36	35	38	36,33		Uzima se u obzir				
	3	35	31	34	33,33		Uzima se u obzir				
	4	36	36	36	36,00		Uzima se u obzir				
	5	40	38	38	38,67		Uzima se u obzir				
	6	32	33	34	33,00		Uzima se u obzir				
	7	32	34	28	31,33		Uzima se u obzir				
	8	34	32	29	31,67		Uzima se u obzir				
9	32	30	32	31,33	Uzima se u obzir						

Iz izmjerenih rezultata izračunata je srednja vrijednost pri čemu se iz proračuna izbacuju one vrijednosti koje su 20% manje od srednje vrijednosti. Standardna devijacija za mješavina kreće se od 2,35 kod mješavine 2 (SCC SF0,5) do 3,50 kod mješavine 1 (SCC REF). Kao

što se može vidjeti na slici 24, ispitivanjem sklerometrom najveću tlačnu čvrstoću pokazuju mješavina 4 (31,5 N/mm²) i mješavina 3 (31,00 N/mm²) dok referentna mješavina ima najmanju tlačnu čvrstoću.



Slika 24 Srednja tlačna čvrstoća

8.3. Ispitivanje razornom metodom - preša

Ispitivanje tlačne čvrstoće razornom metodom provodi se prema normi HRN EN 12390-3. Za ispitivanje uzorka koristi se preša u koju se stavljaju uzorci kocke dimenzije 15cm x15 cm x 15 cm. Bitno je uzorak pravilno centrirati i postaviti tako da je smjer nanošenja opterećenja okomit na smjer ugradnje betona u uzorak. U softver je potrebno unijeti podatke o dimenzijama i masi uzorka koji se ispituje, te konstantnu brzinu opterećenja koja iznosi 0,6 MPa/s prema zahtjevi norme. Kao rezultat ispitivanja dobiva se sila sloma preko koje se izračuna tlačna čvrstoća.

Tlačna čvrstoća računa se prema formuli:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Gdje je F- maksimalna sila prilikom loma, a A_c površina uzorka na koju djeluje sila.

8.3.1. Mješavina 1 (SCC REF)

Maksimalna sila sloma referentne mješavina iznosila je 1362,50 kN, odnosno maksimalna tlačna čvrstoća iznosi 60,67 N/mm². Kao što je prikazano u tablici 8, srednja vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 58,07N/mm². Standardna devijacija iznosi 2,98. Pojava pukotina vidljiva je na rubovima uzorka te zadovoljava zahtjev oblika sloma prema korištenoj normi. Na uzorku UR3 došlo je do mrvljenja brida, dok su ostala dva uzorka u odnosu na spomenuti uzorak bili znatno manje oštećeni kao što se može vidjeti na slici 25.

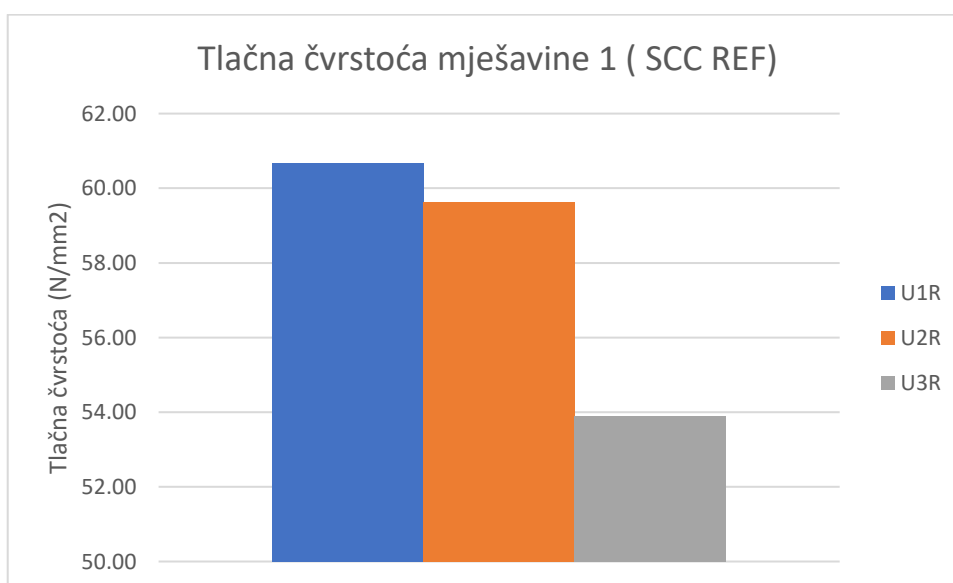


Slika 25 Oblik sloma uzorka pod utjecajem tlačne sile mješavine 1 (REF)

Na slici 26 prikazane su tlačne čvrstoće svih ispitanih uzoraka mješavine 1 (SCC REF).

Tablica 8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine 1 (REF)

TLAČNA ČVRSTOĆA UZORKA MJESHAVINE 1 (REF)					
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Površina uzorka A_c (mm ²)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (N/mm ²)	St. Devijacija
U1R	1362,50	22455,00	60,67	58,07	2,98
U2R	1332,00	22333,80	59,64		
U3R	1198,40	22225,50	53,91		



Slika 26 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 1 (SCC REF)

8.3.2.Mješavina 2 (SCC SF0,5)

U odnosu na referentnu mješavinu mješavina s 0,5% čeličnih vlakana je imala za 8% posto veću maksimalnu silu, dok je srednja vrijednost tlačne čvrstoće veća za 13%. Srednja vrijednost tlačne čvrstoće mješavine 2 iznosi 66,12 N/mm². Standardna devijacija iznosi 0,78. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 9. Prilikom ispitivanja na uzorcima 1 i 2 došlo je do oštećenja i mrvljenja bridova kao što se može vidjeti na slici 27.

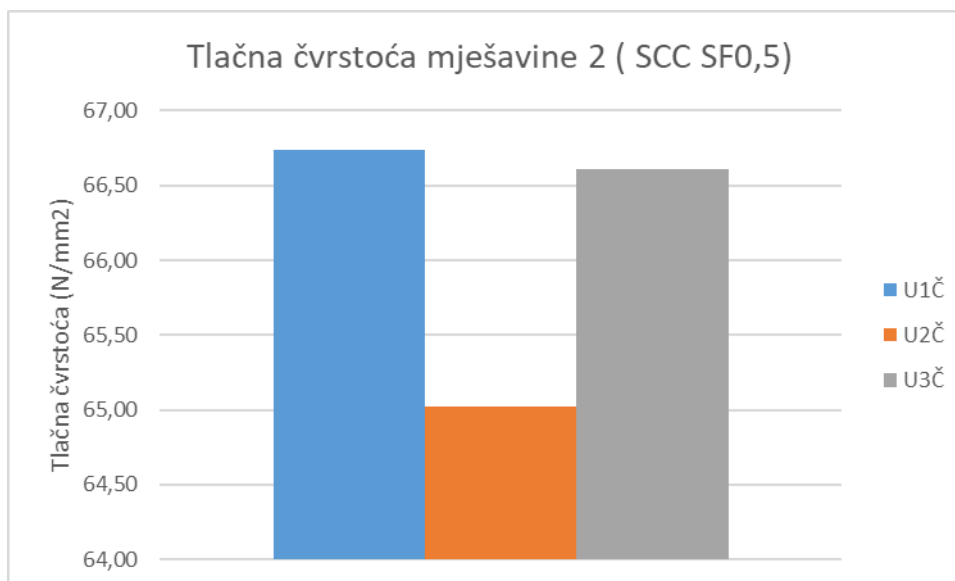


Slika 27 Oblik sloma pod utjecajem tlačne sile na mješavini 2

Na slici 28 prikazane su tlačne čvrstoće svih ispitanih uzoraka mješavine 2 (SCC SF0,5).

Tablica 9 Rezultati ispitivanja mješavine 2 (SCC SF0,5)

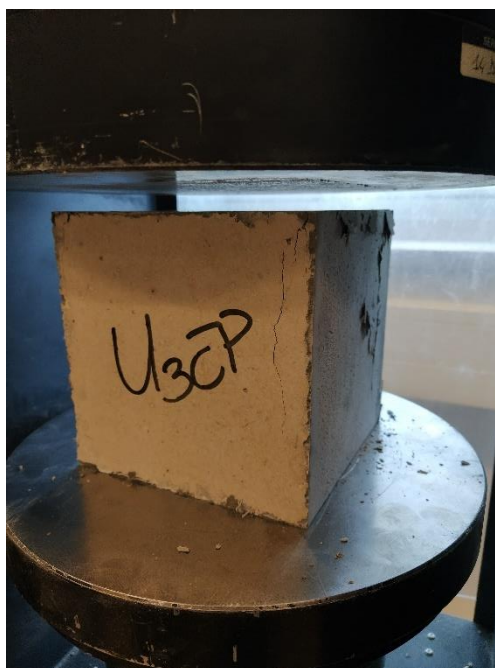
TLAČNA ČVRSTOĆA UZORKA MJEŠAVINE 2 (SCC SF0,5)					
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Površina uzorka Ac (mm ²)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (N/mm ²)	St. Devijacija
U1č	1468,30	22001,30	66,74	66,12	0,78
U2č	1463,40	22507,20	65,02		
U3č	1484,70	22287,20	66,61		



Slika 28 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 2 (SCC SF0,5)

8.3.3. Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

Srednja vrijednost tlačne čvrstoće mješavine 3 iznosi $74,84 \text{ N/mm}^2$ što je u odnosu na referentnu mješavinu 28% više, dok je u odnosu na mješavinu 2 tlačna čvrstoća veća za 13%. Standardna devijacija iznosi 2,17. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 10. Kao što se može vidjeti na slici 29 uzorci nakon ispitivanja zadržavaju strukturnu cjelovitost, te u odnosu na mješavine 1 i 2 nije došlo do velikog oštećenja bridova.

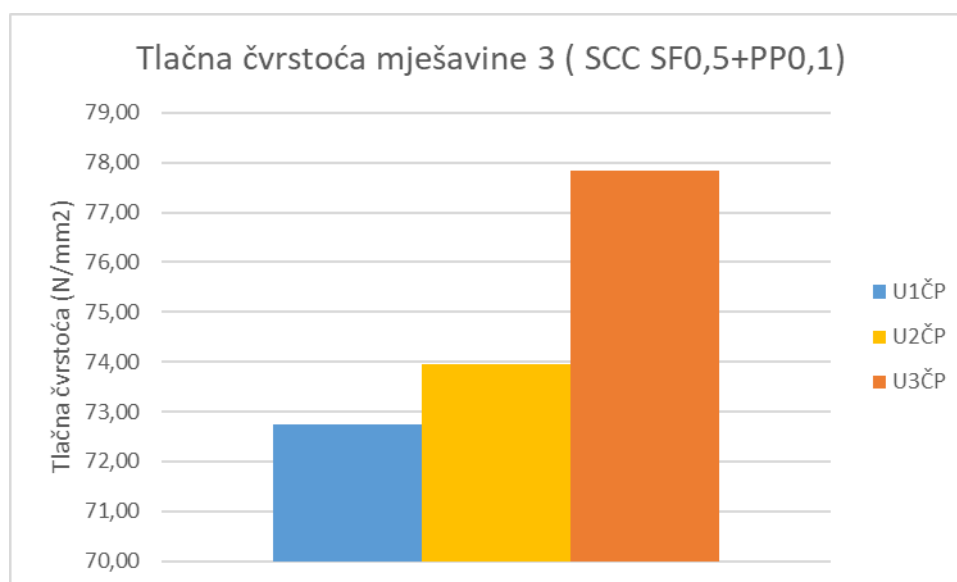


Slika 29 Oblik sloma uzorka pod djelovanjem tlačne sile na mješavinu 3

Na slici 30 prikazane su tlačne čvrstoće svih ispitanih uzoraka mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1).

Tablica 10 Rezultati ispitivanja mješavine 3 (SCC0,5+PP0,1)

TLAČNA ČVRSTOĆA UZORKA MJESAVINE 3 (SCC SF0,5+PP0,1)					
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Površina uzorka A_c (mm ²)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (N/mm ²)	St. Devijacija
U1ČP	1606,20	22080,30	72,74	74,84	2,17
U2ČP	1665,20	22507,20	73,96		
U3ČP	1736,60	22287,20	77,83		



Slika 30 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

8.3.4. Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

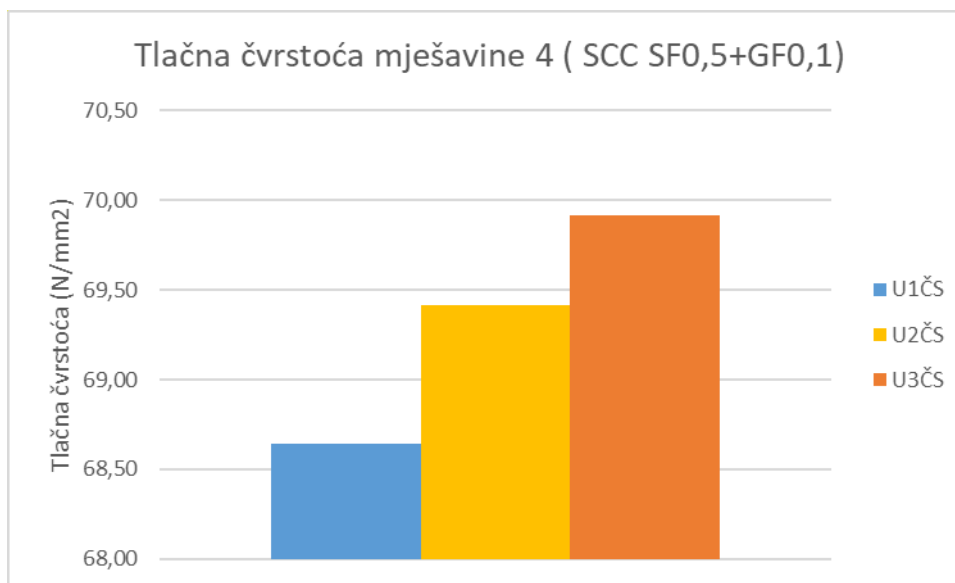
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće mješavine 4 iznosi 69,32 kN/mm², što je u odnosu na referentnu mješavinu više za 19%, u odnosu na mješavinu 2 tlačna čvrstoća mješavine 4 je 4% veća. U odnosu na mješavinu 3, mješavina 4 ima 8% manju tlačnu čvrstoću. Standardna devijacija iznosi 0.52. Na slici 31 prikazan je uzorak nakon ispitivanja. Kao i kod mješavine 1 i 2 ispitani uzorci pokazuju odlamanje i drobljenje betona na rubovima uzorka. Na slici 32 prikazane su tlačne čvrstoće svih ispitanih uzoraka mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1).



Slika 31 Slom uzorka pod utjecajem tlačne sile na mješavini 4

Tablica 11 Rezultati ispitivanja mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

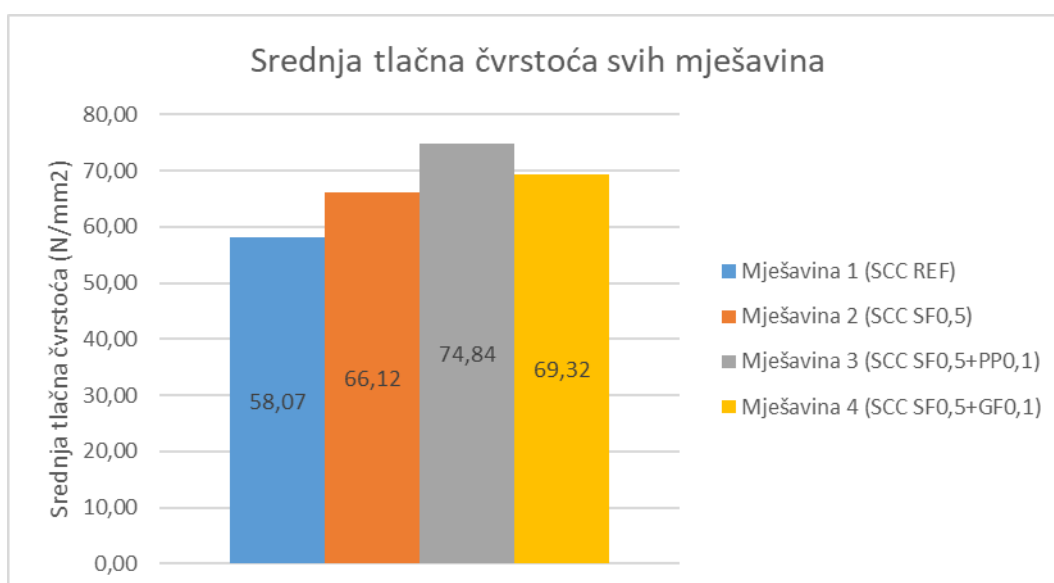
TLAČNA ČVRSTOĆA UZORKA					
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Površina uzorka A_c (mm ²)	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (N/mm ²)	St. Devijacija
U1ČS	1529,50	22282,40	68,64	69,32	0,52
U2ČS	1557,44	22432,10	69,41		
U3ČS	1558,70	22291,60	69,91		



Slika 32 Dijagram tlačne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+GF0,1)

8.3.5. Zaključak ispitivanja tlačne čvrstoće

Rezultati srednje vrijednosti tlačne čvrstoće pojedine mješavine prikazani su na dijagramu (Slika 33). Ispitivanjem tlačne čvrstoće utvrđeno je kako najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina 3 odnosno mješavina s dodatkom čeličnih vlakana i sintetičkih vlakana. Beton s dodatkom čeličnih i sintetičkih vlakana te čeličnih i staklenih vlakana ima bolja svojstva u odnosu na mješavinu bez vlakana i mješavinu 2 u kojoj se nalaze samo čelična vlakna. Dodavanjem vlakana u referentnu mješavinu može se postići veća tlačna čvrstoća i to od 13% do 28%.



Slika 33 Dijagram srednje tlačne čvrstoće svih mješavina

8.4. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provedeno je sukladno normi HRN EN 12390-6:2010. Uzorci se ispituju uz pomoć preše za tlak u koju se stavi čelični dodatak potreban za cijepanje uzorka (Slika 34).



Slika 34 Preša s ugrađenim nastavkom za nanošenje vlačne čvrstoće cijepanjem

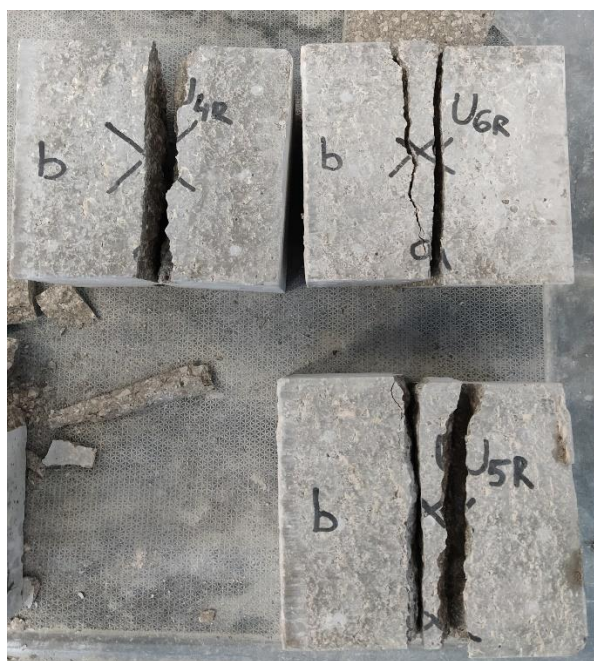
Čeličnim nastavkom osiguravamo linijsko tlačno opterećenje po dvije suprotne izvodnice. Nakon što se u softveru unesu dimenzije i masa uzorka, potrebno je podesiti konstantnu brzinu opterećenja sukladno navedenoj normi. Konstantna brzina opterećenja je za sve uzorke bila jednaka i iznosila je 0,06 MPa/s. Vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem izračunava se prema formuli

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{a^2} \quad (4)$$

Gdje je F- maksimalna sila (N), a-dužina stranice kocke.

8.4.1. Mješavina 1 (SCC REF)

Vlačna čvrstoća cijepanjem prvo je ispitana na referentnoj mješavini, gdje je maksimalna sila opterećenja iznosila 135,80 kN, a maksimalna vlačna čvrstoća cijepanjem iznosila 12,07 N/mm², dok je srednja vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem iznosila 11,22 N/mm². Standardna devijacija za referentnu mješavinu iznosi 0,35. Slom uzorka dogodio se na sredini kao što je prikazano na slici 35.

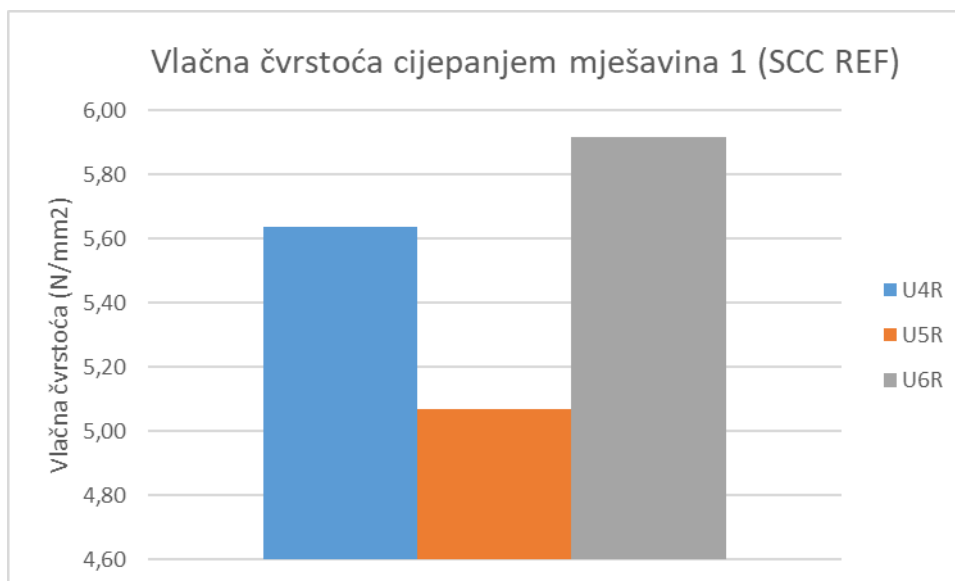


Slika 35 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 1

Tablica 12 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 1(REF)

VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM MIJEŠAVINA 1 (SCC REF)				
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Maksimalna vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vlačna čvrstoća (N/mm ²)	St. Devijacija
U4R	127,30	5,64	5,54	0,35
U5R	118,50	5,07		
U6R	135,80	5,92		

Na slici 36 prikazani su dijagrami vlačne čvrstoće za sve ispitane uzorke mješavine 1 (SCC REF).



Slika 36 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 1 (SCC REF)

8.4.2. Mješavina 2 (SCC SF0,5)

Za mješavinu 2 se očekuje da u odnosu na mješavinu 1 ima veću vlačnu čvrstoću. Dobivenim rezultatima maksimalna sila koja se dogodila prilikom sloma iznosila je 214,60 kN, što je u odnosu na maksimalnu silu referentne mješavine skoro 1,58 puta veća sila. Srednje vrijednost tlačne čvrstoće cijepanjem iznosila je 15,25 N/mm². U odnosu na referentnu mješavinu veća je za 26%. Slom uzorka je također bio na sredini uzorka međutim za razliku od referentne mješavine uzorci se nisu razdvojili na dva dijela. To je i bilo za očekivati s obzirom na čelična vlakna unutar mješavine (slika 37).



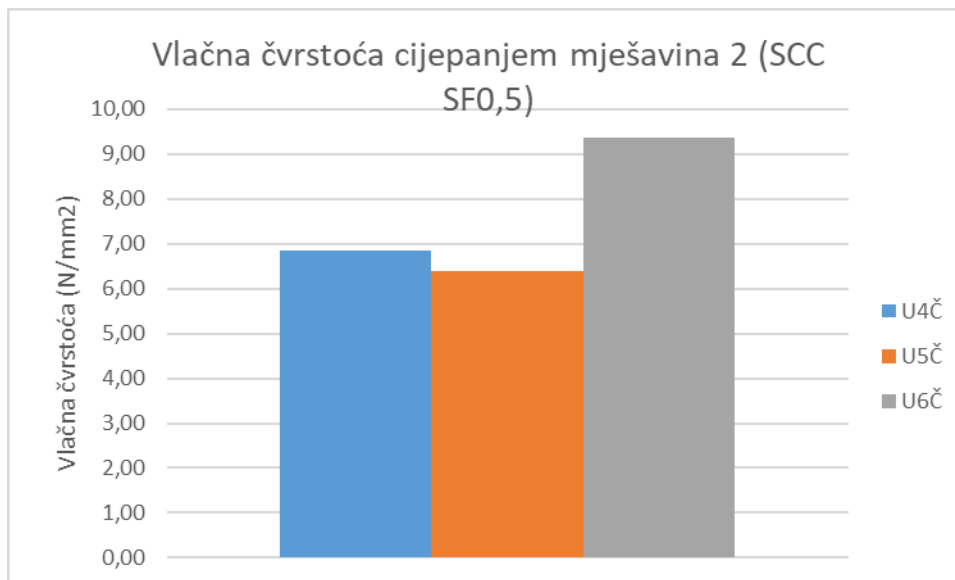
Slika 37 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 2

Na priloženom grafu (slika 38) mogu se vidjeti različite vrijednosti maksimalnih sila prilikom sloma. Vidljivo je veliko rasipanje rezultata (standardna devijacija iznosi 1,31) Glavni razlog tome mogla bi biti ugradnja uzorka odnosno nejednolika raspodjela vlakana u svaki uzorak tokom ugradnje betona.

Tablica 13 Tablica rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 2 (SCC SF0,5)

VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM MJEŠAVINA 2 (SCC SF0,5)				
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Maksimalna vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vlačna čvrstoća (N/mm ²)	St. Devijacija
U4Č	155,20	6,86	7,54	1,31
U5Č	146,30	6,39		
U6Č	214,60	9,37		

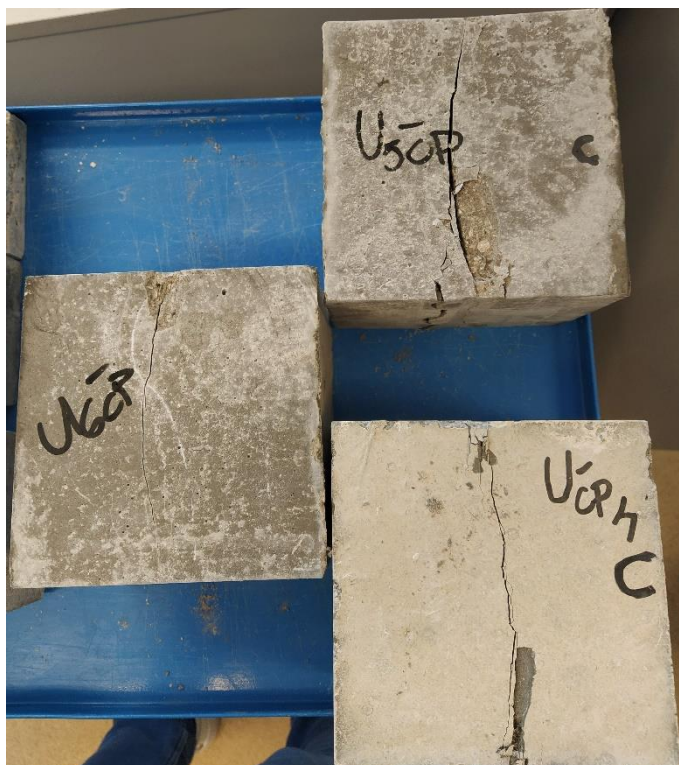
Na slici 38 prikazani su dijagrami vlačne čvrstoće za sve ispitane uzorke mješavine 2 (SCC SF0,5).



Slika 38 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 2 (SCC SF0,5)

8.4.3. Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

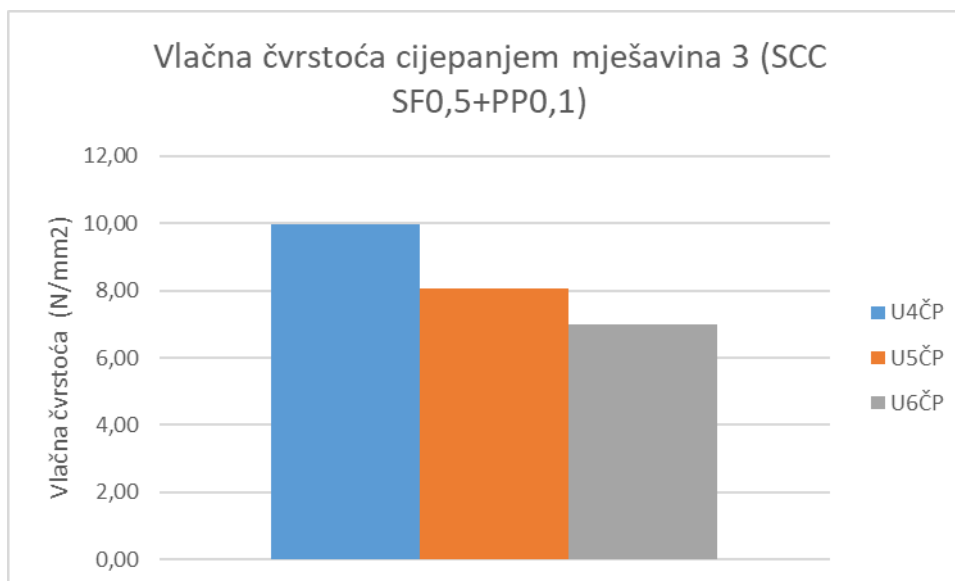
Maksimalna sila sloma mješavine 3 iznosila je 218,20 kN, što je u odnosu na mješavinu 2 1,65% više, dok je u odnosu na mješavinu 1 skoro 38% više. Srednja vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 16,69 N/mm². Dodavanjem sintetičkih vlakana povećala se vlačna čvrstoća za skoro 9% u odnosu na mješavinu 2, dok u odnosu na referentnu mješavinu taj postotak iznosi skoro 33%. Standardna devijacija iznosi 1,23. Kako i kod mješavine 2 nakon djelovanja maksimalne sile nije došlo do potpunog sloma uzorka na dva dijela već se samo pojavila pukotina te zadržala strukturna cjelovitost uzorka, (Slika 39). Na slici 40 prikazani su dijagrami vlačne čvrstoće za sve ispitane uzorke mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1).



Slika 39 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 3

Tablica 14 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM MJEŠAVINA 3 (SCC SF0,5+PP0,1)				
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Maksimalna vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vlačna čvrstoća (N/mm ²)	St. Devijacija
U4ČP	218,20	9,96	8,34	1,23
U5ČP	181,80	8,07		
U6ČP	158,50	6,99		



Slika 40 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

8.4.4. Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

Dodavanjem staklenih vlakana maksimalna sila sloma se umanjila u odnosu na mješavinu 3 i to za približno 3,43%, a u odnosu na mješavinu 2 za 1,82%. U mješavini 4 ugrađena su 3D vlakna koja su u odnosu na 4D vlakna koja su ugrađena u mješavine 2 i 3 kraća za 1 cm. Srednja maksimalna vlačna čvrstoća mješavine iznosi 16,58 N/mm². U odnosu na referentnu mješavinu vlačna čvrstoća je veća za 32.33%. U odnosu na mješavinu 2 ta vrijednost mješavine 4 je veća za oko 8%. Mješavina 3 ima za 0.66% veću vlačnu čvrstoću od mješavine 4.

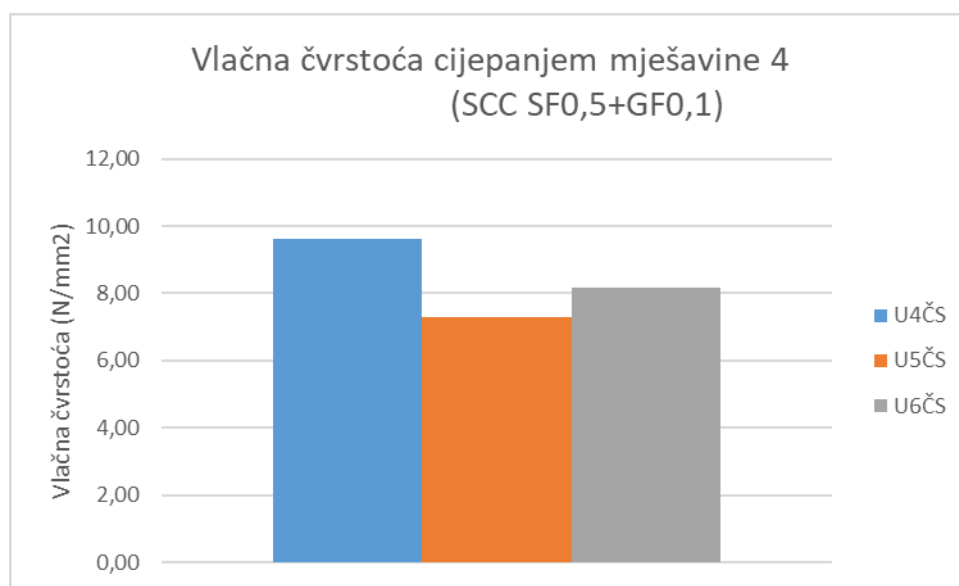
Kao i kod mješavina 2 i 3 nakon sloma vidljiva je pukotina ali nije došlo do potpunog sloma (slika 41). Na slici 42 prikazani su dijagrami vlačne čvrstoće za sve ispitane uzorke mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1). Kao posljedica različitih rezultata je kao i kod mješavina 2 i 3 nejednolika raspodjela vlakana prilikom ugradnje betona u uzorak.



Slika 41 Slom uzoraka prilikom nanošenja vlačne sile cijepanjem mješavine 4

Tablica 15 Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

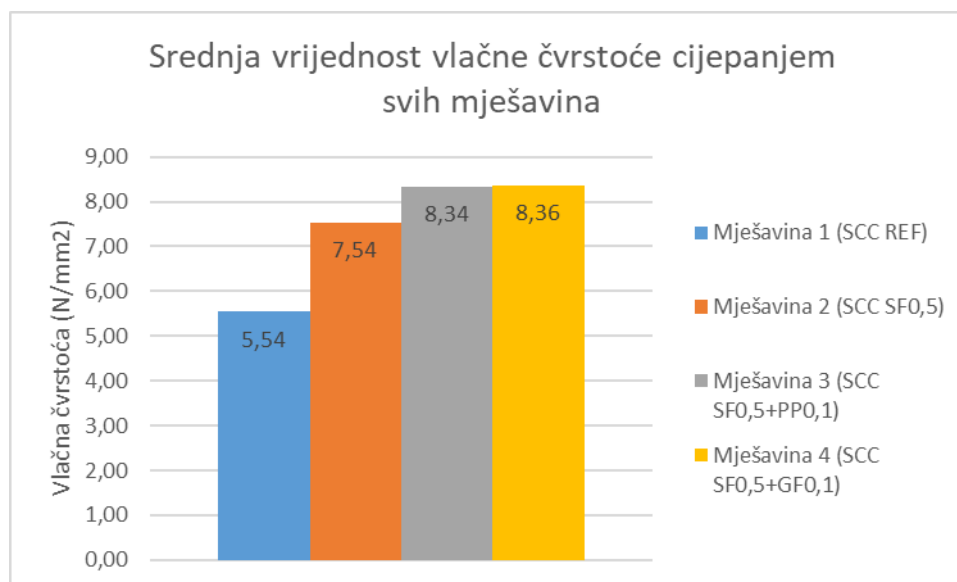
VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM MJEŠAVINA 4 (SCC SF0,5+GF0,1)				
Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Maksimalna vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Srednja vlačna čvrstoća (N/mm ²)	St. Devijacija
U4ČS	210,70	9,62	8,36	0,96
U5ČS	156,10	7,29		
U6ČS	183,50	8,17		



Slika 42 Graf vlačne čvrstoće uzoraka mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

8.4.5. Zaključak ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Ovim ispitivanjem se dokazalo kako dodavanjem jedne ili kombinacije dvije vrste vlakana možemo znatno povećati vlačnu čvrstoću cijepanjem. Beton s dodatkom čeličnih i sintetičkih vlakana te čeličnih i staklenih vlakana pokazuje približno iste vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem. U odnosu na mješavinu bez vlakana i mješavinu 2 u kojoj se nalaze samo čelična vlakna vidljiv je porast vlačne čvrstoće cijepanjem. Tako se vlačna čvrstoća može povećati od 26% pa do 38%. Rezultati srednje vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su na slici 43. Također dodavanjem vlakana ne dolazi do potpunog sloma uzorka već se sačuva strukturna cjelovitost čime se povećava sigurnost konstrukcije. Prilikom ispitivanja primijećeno je za sve mješavine osim referentne kako uzorci pokazuju velike varijacije maksimalne sile sloma. Ta pojava pripisana je nehomogenoj ugradnji betona u uzorke, odnosno nejednolikoj količini i raspodjeli vlakana u uzorcima.

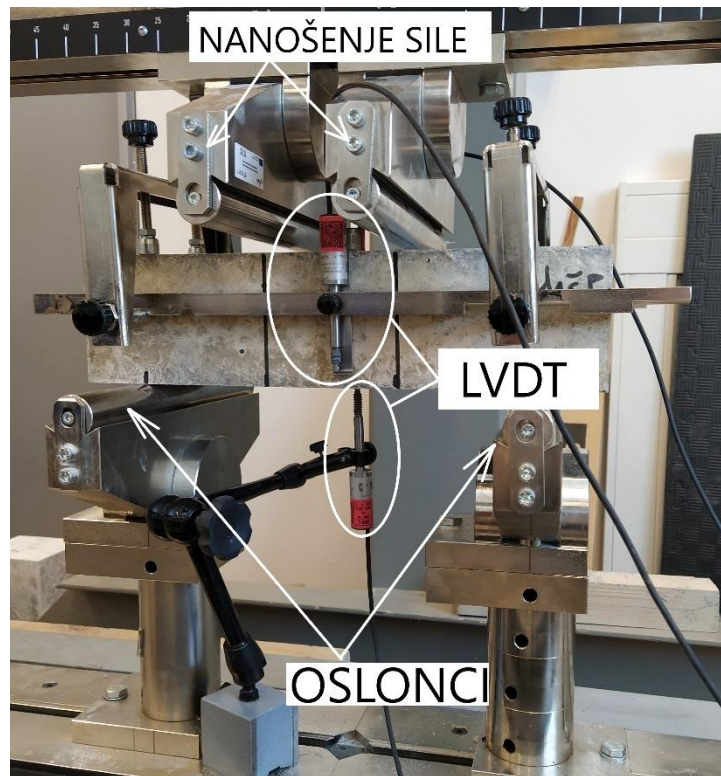


Slika 43 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

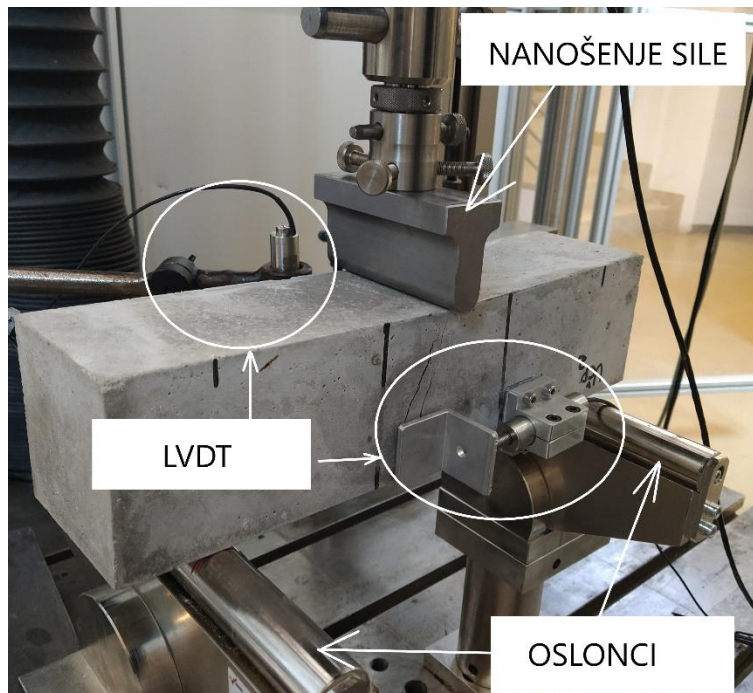
8.5. Savojna čvrstoća

Ispitivanje savojne čvrstoće provodilo se savijanjem u 3 i 4 točke kontrolom pomaka prema normi HRN EN 12390-5 i ASTM C 1609. Uzorci na kojima se ispitivanje provodilo su prizme dimenzije 10cm x 10 cm x 40 cm. Ispitivanja na referentnoj mješavini i jednom uzorku mješavine 2 provedena su savijanjem u 4 točke dok su ostali uzorci ispitani savijanjem u 3 točke. Prilikom ispitivanja savijanjem u 4 točke korištena su 3 LVDT uređaja (slika 44), dok su prilikom ispitivanja u 3 točke korištena 2 LVDT uređaja (slika 45). Brzina nanošenja pomaka prilikom ispitivanja savijanjem u 4 točke iznosila je 1,3 mm/s. Kod

ispitivanja savijanjem u 3 točke nanoseno je predopterećenje od 400N te nakon toga ista brzina od 1,3 mm/s, a nakon pojave prve pukotine brzina se povećala na 2,5 mm/s.



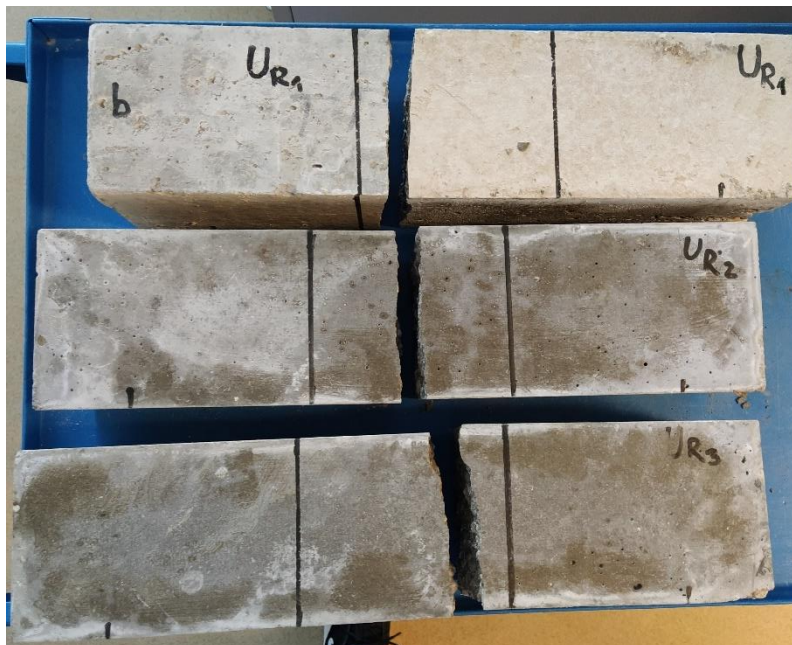
Slika 44 ispitivanje savijanjem u 4 točke



Slika 45 Ispitivanje savijanjem u 3 točke

8.5.1. Mješavina 1 (SCC REF)

Ispitivanje savojne čvrstoće na mješavini 1 izvedeno je na 3 uzorka. Uzorci su ispitani nanošenjem konstantne brzine pomaka od $0,1\mu\text{m/s}$ do trenutka sloma. Prilikom pojave pukotine dolazi do krtog sloma uzorka, kao što je prikazano na slici 46.

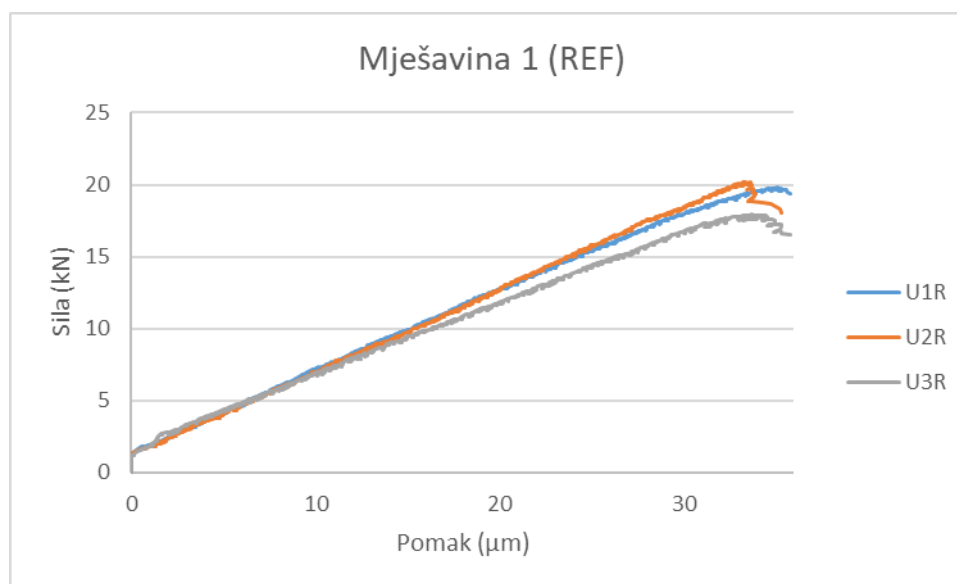


Slika 46 Slom uzoraka mješavine 1

Tablica 16 prikazuje dimenzije ispitanih prizmi, sile sloma, pomak pri maksimalnoj sili, vrijeme pojave pukotine od početka ispitivanja, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardne devijacije (odstupanja od srednje vrijednosti). Maksimalna sila na tri ispitana uzorka iznosi 20,19 kN, a savojna čvrstoća od $6,12 \text{ N/mm}^2$. Srednja vrijednost čvrstoće na savijanje referentne mješavine je $5,84 \text{ N/mm}^2$ sa standardnom devijacijom od $0,352 \text{ N/mm}^2$. Dijagram sila-pomaka za ispitane uzorke referentne mješavina prikazan je na slici 47.

Tablica 16 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 1 (REF)

REFERENTNA MJEŠAVINA							
Oznaka uzorka	Širina B (mm)	Visina H (mm)	Raspon L (mm)	Maksimalna vrijednost			
				Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μm)	Naprezanje σ (Mpa)	Vrijeme pojave prve pukotine (s)
U1R	97,64	100,76	300	19,78	35,10	5,99	345,80
U2R	97,95	100,55	300	20,19	33,35	6,12	356,40
U3R	97,52	100,84	300	17,91	33,75	5,42	362,90
Sr. Vrijednost	-	-	-	19,29	34,07	5,84	355,03
MAX	-	-	-	20,19	35,10	6,12	362,90
MIN	-	-	-	17,91	33,35	5,42	345,80
St.devijacija	-	-	-	1,149	0,880	0,352	8,559



Slika 47 Dijagram sile-pomak mješavine 1 (REF)

8.5.2.Mješavina 2 (SCC SF0,5)

Kod ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 2 u odnosu na referentnu mješavinu potrebno je uočiti silu pri nastanku prve pukotine i maksimalna silu. Pojava prve pukotine dogodila se pri maksimalnoj sili od 21,20 kN, Savojna čvrstoća u tome trenutku iznosila je 9,46 N/mm². Nakon pojave prve pukotine dolazi do ojačanja uzorka, u tome trenutku savojnu čvrstoću preuzimaju vlakna unutar uzorka. Maksimalna sila u tome trenutku iznosi 22,41 kN dok savojna čvrstoća iznosi 10 N/mm². Potrebno vrijeme da dođe do prve pukotine iznosi 687,12 s, dok je do maksimalne sile proteklo 894,19 s. Standardna devijacija Maksimalne sile prije pojave prve pukotine iznosi 3,17 kN. Standardna devijacija naprezanja iznosi 0,36 N/mm².

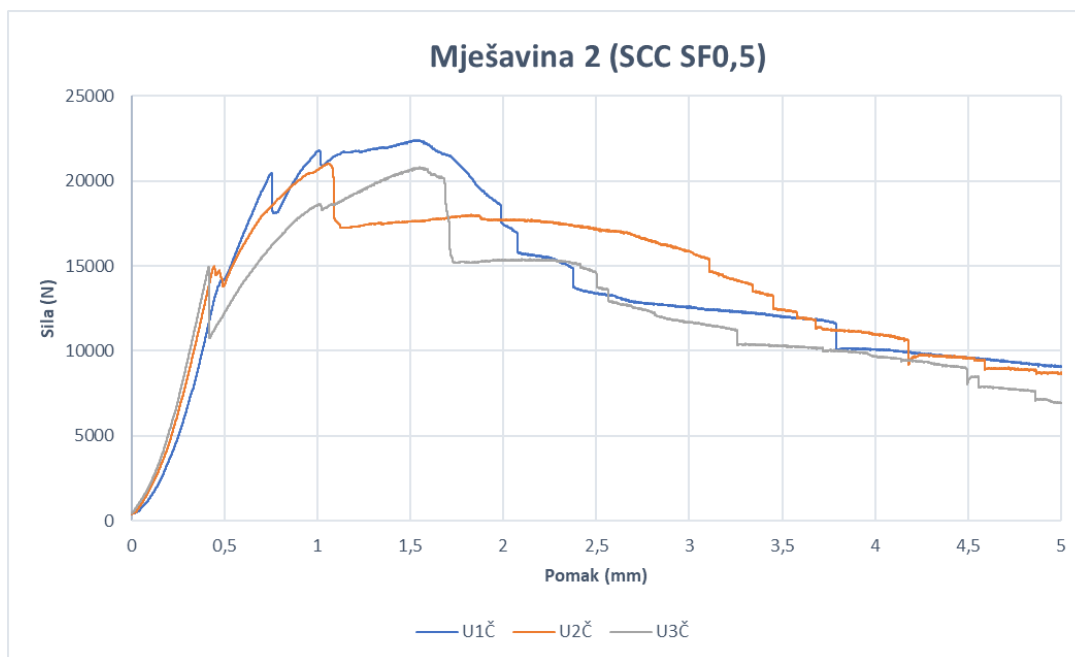
Pukotine na uzorcima nalaze se u predviđenoj zoni. Uzorci prilikom testiranja nisu doživjeli potpuni slom kao što je prikazano na slici 44. Na slici 45 prikazan je dijagram sila-pomak za uzorke mješavine 2.

Tablica 17 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 2 (SCC SF0,5)

Oznaka uzorka	Širina B (mm)	Visina H (mm)	Raspon L (mm)	Prva pukotina				Maksimalna vrijednost			
				Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μ m)	Naprezan je σ (Mpa)	Vrijeme pojave prve pukotine (s)	Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μ m)	Naprezan je σ (Mpa)	Vrijeme pojave prve pukotine (s)
U1Č	99,8	100,5	300	21,20	1017,00	9,46	687,12	22,41	1534,69	10,00	894,19
U2Č	100,39	100,57	300	14,98	444,75	6,64	342,83	21,00	1060,30	9,31	601,82
U3Č	99,47	100,69	300	14,96	415,51	6,68	320,28	20,82	1549,93	9,29	775,03
SR. VRIJEDNOST	-	-	-	17,05	625,75	7,59	450,08	21,41	1381,64	9,53	757,01
MAX	-	-	-	21,20	1017,00	9,46	687,12	22,41	1549,93	10,00	894,19
MIN	-	-	-	14,96	415,51	6,64	320,28	20,82	1060,30	9,29	601,82
ST.DEVIJACIJA	-	-	-	3,17478	305,2508	1,438051	186,0145	0,803762	248,7698	0,363033	146,2775



Slika 48 Slom uzoraka mješavine 2



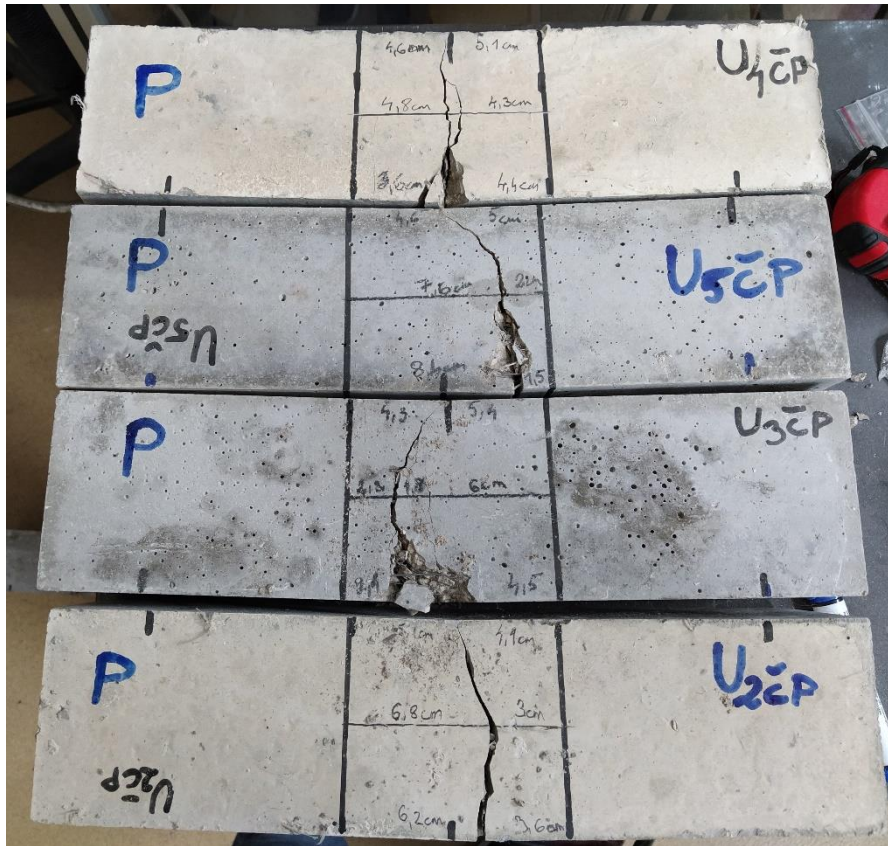
Slika 49 Dijagram sila-pomak mješavine 2 (SCC SF0,5)

8.5.3. Mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

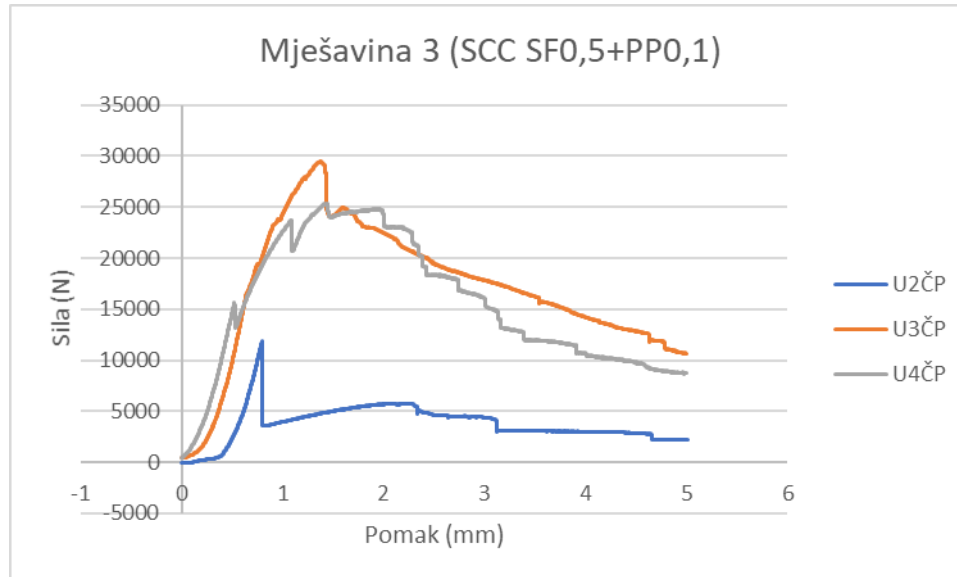
Prilikom ispitivanja mješavine 3 kod uzoraka U2ČP i U3ČP se nakon sloma betona (pojava prve pukotine) nije pojavilo ojačanje dok kod uzorka U4ČP je. Maksimalna sila izmjerena je na uzorku 3 te iznosi 29,47 kN, a standardna devijacija maksimalne sile iznosi 8,81 kN. Najveća vrijednost savojne čvrstoće iznosi $13,03 \text{ N/mm}^2$. Slom uzoraka dogodio se unutar predviđenog prostora kao što se može vidjeti na slici 46. Na slici 47 prikazan je dijagram sila-pomak za uzorke mješavine 3.

Tablica 18 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

Oznaka uzorka	Širina B (mm)	Visina H (mm)	Raspon L (mm)	Prva pukotina				Maksimalna vrijednost		
				Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μm)	Naprezanje σ (Mpa)	Vrijeme pojave prve pukotine (s)	Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μm)	Naprezanje σ (Mpa)
U2ČP	97,31	99,55	300	11,93	799,67	5,57	616,19	11,93	799,67	5,57
U3ČP	98,68	101,54	300	29,47	1378,60	13,04	1061,14	29,47	1378,60	13,03
U4ČP	98,8	99,8	300	15,62	525,08	7,14	404,50	25,34	1437,93	11,59
SR. VRIJEDNOST	-	-	-	19,01	901,12	8,58	693,94	22,25	1205,40	10,06
MAX	-	-	-	29,47	1378,60	13,04	1061,14	29,47	1437,93	13,03
MIN	-	-	-	11,93	525,08	5,57	404,50	11,93	799,67	5,57
ST.DEVIJACIJA	-	-	-	8,825911	427,7636	3,757448	329,0868	8,815383	323,0229	3,759602



Slika 50 Slom uzoraka mješavine 3



Slika 51 Dijagram sila-pomak mješavine 3 (SCC SF0,5+PP0,1)

8.5.4. Mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

Ispitivanjem mješavine 4 dobivena je maksimalna sila sloma u iznosu od 20,26 kN, što je ujedno i najveća sila sloma. Standardna devijacija maksimalne sile iznosi 3,25 kN. Prilikom pojave pukotine uzorak je pokazao malo ojačanje. Maksimalna vrijednost savojne čvrstoće

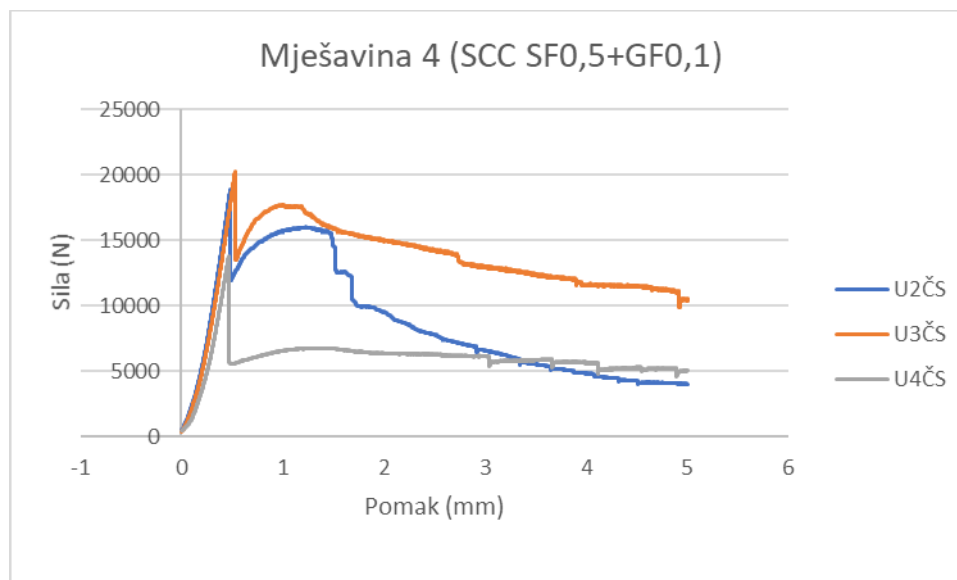
iznosi $9,0 \text{ N/mm}^2$. Kao i kod svih uzoraka slom se dogodio unutar dozvoljene zone što se može vidjeti na slici 48. Svi rezultati mogu se vidjeti u tablici 19 i na dijagramu sila-pomak (slika 49).

Tablica 19 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavine 4 (SCC SF0,5+PP0,1)

Oznaka uzorka	Širina B (mm)	Visina H (mm)	Raspon L (mm)	Prva pukotina				Maksimalna vrijednost		
				Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μm)	Naprezanje σ (Mpa)	Vrijeme pojave prve pukotine (s)	Sila Fmax (kN)	Pomak δ (μm)	Naprezanje σ (Mpa)
U2ČS	99,25	100,4	300	18,92	483,91	8,51	372,91	18,92	483,91	8,51
U3ČS	100,92	100,19	300	20,26	530,67	9,00	408,83	20,26	530,67	9,00
U4ČS	96,86	100,36	300	13,79	468,01	6,36	360,60	13,79	468,01	6,36
SR. VRIJEDNOST	-	-	-	17,66	494,20	7,96	380,78	17,66	494,20	7,96
MAX	-	-	-	20,26	530,67	9,00	408,83	20,26	530,67	9,00
MIN	-	-	-	13,79	468,01	6,36	360,60	13,79	468,01	6,36
ST.DEVIJACIJA	-	-	-	3,254984	31,47038	1,328839	24,22178	3,255492	31,47041	1,329065



Slika 52 Slom uzorka mješavine 4



Slika 53 Graf sila-pomak mješavine 4 (SCC SF0,5+GF0,1)

8.5.5. Određivanje prve pukotine preko norme ASTM C1609

Kako bi se izvršilo određivanje prve pukotine uz pomoć norme ASTM C1609, prethodno je potrebno je koristiti izraz:

$$\Delta = L/600 \quad (5)$$

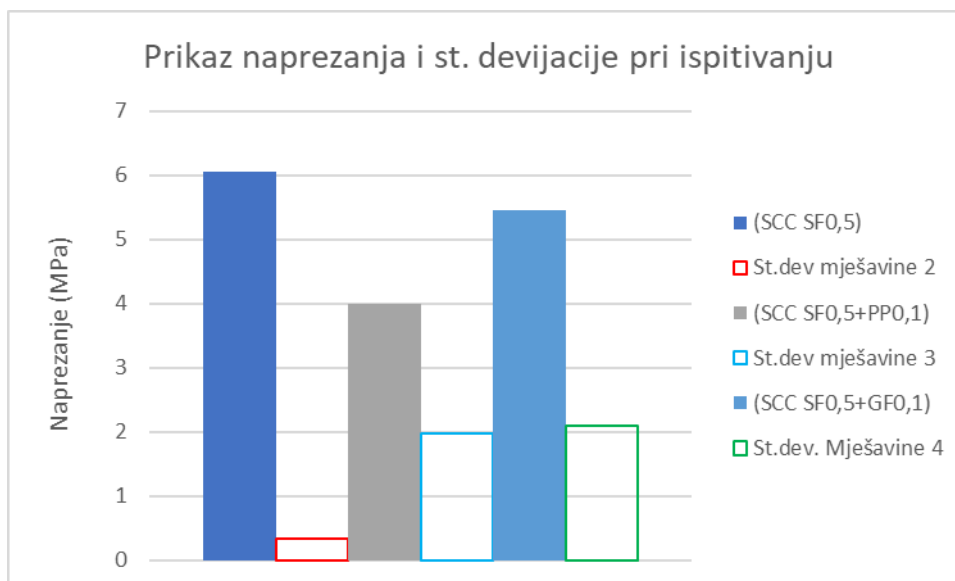
gdje je L- duljina raspona.

Δ određuje položaj nastanka prve pukotine. Za dobiveni pomak očita se vrijednost sile te se korištenjem izraza za izračun čvrstoće na savijanje u navedenim normama izračuna naprezanje kod prve pukotine. Rezultati su prikazani u tablici 20.

Tablica 20 Rezultati naprezanja prilikom pojave prve pukotine

METODA ASTM C1609						
OZNAKA UZORKA		L/600	SILA (kN)	NAPREZANJE (MPa)	SREDNJA VRIJEDNOST NAPREZANJA (MPa)	St. Devijacija
(SCC SF0,5)	UČ1	0,5	14,24	6,41	6,054	0,34
	UČ2		13,88	6,25		
	UČ3		12,24	5,51		
(SCC SF0,5+PP0,1)	UČP1	0,5	2,26	1,02	3,987	1,97
	UČP2		9,75	4,39		
	UČP3		14,57	6,56		
(SCC SF0,5+GF0,1)	UČS1	0,5	12,10	5,45	5,44425	2,09
	UČS2		18,66	8,40		
	UČS3		5,54	2,49		

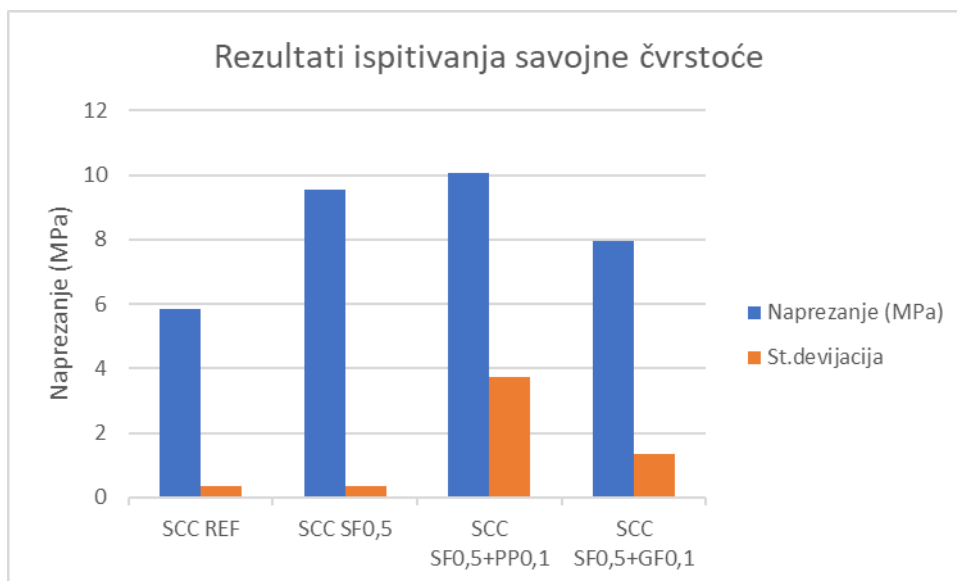
Na slici prikazan je dijagram srednje vrijednosti naprezanja mješavina i st. devijacije.



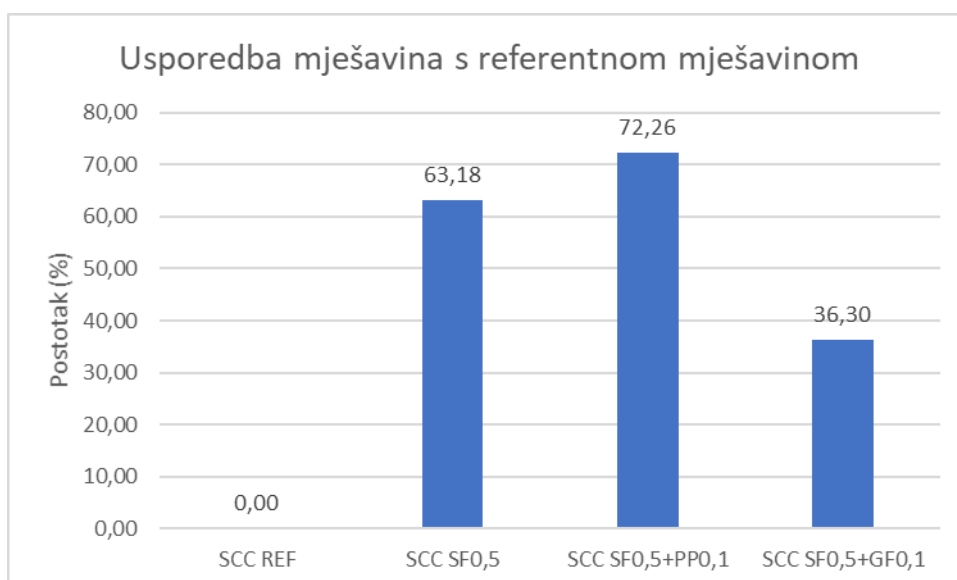
Slika 54 Dijagram srednje vrijednosti naprezanja i st.devijacije

8.5.6. Zaključak ispitivanja savojne čvrstoće

Ispitivanjem je utvrđeno kako srednja vrijednost savojne čvrstoće mješavine 1 iznosi 5,84 N/mm². Mješavina 2 s dodatkom čeličnih vlakana ima 1,64 puta veću savojnu čvrstoću. Mješavina 3 s dodatkom čeličnih i sintetičkih vlakana ima najveću srednju vrijednost savojne čvrstoće koja iznosi 10,06 kN/mm² (Slika 55) što je u odnosu na referentnu mješavinu skoro 1,72 puta veće, dok je u odnosu na mješavinu 2 čak 1,05 puta veće. Mješavina 4 s dodatkom čeličnih i staklenih vlakana u odnosu na referentnu mješavinu ima 1,36 puta veću savojnu čvrstoću dok u odnosu na mješavine 2 i 3 ima manju vrijednost srednje savojne čvrstoće. Kao što je prikazano na slici 56.



Slika 55 Rezultati naprezanja i standardne devijacije



Slika 56 Usporedba mješavine s referentnom mješavinom

9. ZAKLJUČAK

Korištenje samozbijajućeg betona u građevinarstvu trenutno je u usponu. Najveća prednost samozbijajućeg betona u odnosu na običan beton je njegova laka ugradnja, koja ne iziskuje postupak vibriranja betona koji je vrlo zahtjevan i bučan.

Tema ovog diplomskog rada bila je ispitati utjecaj različitih vrsta vlakana na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslulom stanju. U ispitivanjima su se koristila čelična, sintetička i staklena vlakna.

U praktičnome dijelu diplomskog rada izrađene su četiri mješavine samozbijajućeg betona. Referentna mješavina (mješavina 1) bila je osnova svih mješavina. Nakon izrađene referentne mješavine izrađena je mješavina 2 koja je jednaka referentnoj mješavini ali su dodana čelična vlakna. Izradom mješavine 3 su se u referentnu mješavinu dodala čelična i sintetička vlakna. Mješavina 4 sastojala se od sastojaka referentne mješavine i dodatka kraćih čeličnih vlakana u odnosu na mješavine 2 i 3, i staklenih vlakana. Sve navedene mješavine, osim referentne, sadržavale su isti volumni udio čeličnih vlakana.

Nakon izrade svake mješavine napravljena su ispitivanja u svježem stanju. Ispitivanjem gustoće u svježem stanju pokazalo se kako mješavina 3 ima najveću gustoću. Rezultati ispitivanja rasprostiranja slijeganjem pokazali su kako se sve četiri mješavine mogu svrstati u razred SF3 što znači da se mogu koristiti prilikom betoniranja gusto posložene armature. L-kutijom prikazano je kako se mješavine 1 i 4 mogu ugrađivati kod armatura na razmaku 60-80cm. dok su mješavine 2 i 3 zbog dužine vlakana zapele. Stoga se zbog lakše ugradnje ne preporučuju dugačka vlakna. Sadržaj pora mješavina kretao se u rasponu od 0,3% do 0,6%. Nakon izvršenih ispitivanja u svježem stanju betoni su ugrađeni u kalupe te su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa, te su njegovani 28 dana.

Nakon proteklih 28 dana izvedena su ispitivanja u očvrslulom stanju. Svi uzorci su prvo izmjereni i izvagani. Nakon tog izračunata je njihova gustoća u očvrslulom stanju. Najveću gustoću pokazuje mješavina 3 s čeličnim i sintetičkim vlaknima dok su gustoće mješavina 2 i 4 približno jednake. Nadalje, uz pomoć sklerometra određena je homogenost mješavine. Prilikom ispitivanja zamijećeno je kako je najveća vrijednost indeksa sklerometra izmjerena u samom centru uzorka dok su rubovi uzoraka uglavnom pokazivali približne, a u pojedinim slučajevima i puno manje vrijednosti.

Ispitivanjem tlačne čvrstoće pokazalo se kako mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1) ima najveću tlačnu čvrstoću dok su mješavine 2 (SCC SF0,5) i 4 (SCC SF0,5+GF0,1) pokazale od 8% do 13% manju tlačnu čvrstoću. Ispitivanjem vlačne čvrstoće cijepanjem maksimalnu čvrstoću postigla je mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1) ali i mješavina 4 (SCC SF0,5+GF0,1) čija je vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem približno jednaka. Zaključeno je kako se kombinacijom dvije vrste vlakana vlačna čvrstoća na cijepanje znatno povećava. Prilikom ispitivanja savojne čvrstoće ponovo je mješavina 3 (SCC SF0,5+PP0,1) pokazala najveće povećanje čvrstoće, dok je mješavina 2 (SCC SF0,5) pokazala nešto manju vrijednost čvrstoće na savijanje. Mješavina 4 s dodatkom čeličnih i staklenih vlakana ima manju vrijednost čvrstoće savijanjem od mješavine 2 i 3.

Ovim diplomskim radom pokazalo se kako dodavanjem dvije ili jedne vrste vlakana možemo povećati vlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona od 1,36 dodavanjem jedne vrste vlakana pa sve do 1,72 puta dodavanjem dvije vrste vlakana. Time možemo izraditi neke lako armirane elemente te uštedjeti na vremenu potrebnom za armiranje elementa i za vrijeme potrebno za ugradnju betona. Zbog jednostavnosti ugradnje i nepotrebnosti armiranja možemo u konačnici smanjiti i broj radnika.

Na kraju možemo zaključiti kako bi se poboljšala svojstva samoslijegajućeg betona u svježem i očvrslom stanju svaku vrstu vlakana potrebno je kvalitetno ugraditi prilikom izrade betona. Korištenjem samoslijegajućeg betona s dodatkom vlakana možemo izvesti kompliciranije elemente u kraćem vremenu.

10.LITERATURA

- [1] Building Products, »Building Products,« 31 01 2019. [Mrežno]. Available: <https://buildingproducts.co.uk/can-concrete-keep-popularity/>. [Pokušaj pristupa 19 04 2021].
- [2] J. Hilburg, »The Arhitect`s Newspaper,« 02 01 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions/>. [Pokušaj pristupa 19 04 2021].
- [3] S. Kordts i H. Grube, Controlling the workability properties of Self-compacting Concrete use as rady-mixed concreete, Dusseldorf: Germany, 2006.
- [4] N. Natsoulis, »NewYork Engineers,« What is self-compacted concrete?, 25 11 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.ny-engineers.com/blog/what-is-self-compacting-concrete>. [Pokušaj pristupa 20 04 2021].
- [5] K. Ozawa i M. Ouchi, »Proceedings of the International Workshop on Self-compacting concrete,« Kochi, 1999.
- [6] N. Štrimer i I. Banjad Pečur, »Projektiranje sastava samozbijajućeg betona,« *Građevinar 61*, pp. 321-329, 2009.
- [7] S. Živković, Samozbijajući beton-svojtva i tehnologija, Beograd, 2011.
- [8] D. Hinić, Osobine svežeg samougrađujućeg betona i metode ispitivanja, Novi Sad, 2005.
- [9] Građevinski Fakultet Osijek, »Samozbijajući beton (materijali s predavanja),« 2018. [Mrežno]. Available: <http://gfos.hr>. [Pokušaj pristupa 30 6 2021].
- [10] M. Alagušić i F. Lavriv, Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona, Zagreb: Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [11] G. In, »blog.ria.hr,« Beton s vlaknima, 20 12 2017. [Mrežno]. Available: <https://blog.ria.hr/gradnja/beton-s-vlaknima/>. [Pokušaj pristupa 25 5 2021].
- [12] Hrvatska enciklopedija, »Staklena vlakna,« Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2016. [Mrežno]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=57712>. [Pokušaj pristupa 25 5 2021].
- [13] Holcim Hrvatska, »Holcim,« Holcim Lumen cement, 09 05 2014. [Mrežno]. Available: https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/atoms/files/2014_05_08_tehnicka_uputa_holcim_lumen.pdf. [Pokušaj pristupa 28 05 2021].

