

Savojna čvrstoća hibridnog mikroarmiranog betona

Fatić, Edin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:157:285306>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



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**

Edin Fatić

Svojna čvrstoća hibridnog mikroarmiranog betona

Završni rad

Rijeka, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Preddiplomski sveučilišni studij
Građevinarstvo
Inženjerski materijali

Edin Fatić
JMBAG: 0114029739

Svojna čvrstoća hibridnog mikroarmiranog betona

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

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

Tema završnog rada

SAVOJNA ČVRSTOĆA HIBRIDNOG MIKROARMIRANOG BETONA
FLEXURAL STRENGTH OF HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE

Kandidat: **EDIN FATIĆ**

Kolegij: **INŽENJERSKI MATERIJALI**

Završni rad broj: **20-P-14**

Zadatak:

Teorijski dio:

- vlaknima ojačani beton (razvoj, klasifikacija, svojstva, primjena i osnovne značajke-pozitivne i negativne- u odnosu na normalni beton), vrste vlakana i njihova svojstva
- sastav, miješanje i ugradnja betonskih mješavina s vlaknima
- hibridni beton (najčešće korištene kombinacije vlakana)
- mehanička svojstva (tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem, žilavost) i nemehanička svojstva hibridnog betona.
- primjena vlaknima armiranog betona (pronaći primjere iz prakse i opisati)

Eksperimentalni dio

- vlastita eksperimentalna ispitivanja: ispitivanje savijanjem (na gotovim uzorcima betona armiranog hibridnim vlaknima: čelična i monofilamentna polipropilenska vlakna)
- obrada rezultata ispitivanja prema trenutno važećim normama: gustoća očvrslog betona, vlačna čvrstoća savijanjem (norme ASTM C-1018 I ASTM C 1609/C1609 M)

Zaključak

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

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

IZJAVA

Završni rad izradio sam 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.



Edin Fatić

U Rijeci, 14. rujana 2020.

IZJAVA

Završni rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

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

U Rijeci, rujan 2020

Mentor:

Doc. dr. sc. Natalija Bede

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Nataliji Bede na pomoći tijekom izrade i pisanja ovog završnog rada te laborantu Dini Juriševiću na pomoći prilikom provedbe ispitivanja u laboratoriju.

Zahvaljujem se mojoj obitelji, posebice roditeljima i sestri koji su uvijek bili tu, u dobru i zlu.

Posebna zahvala ide mojoj djevojci A.M. koja je uvijek bila uz mene, hvala joj na podršci i velikoj ljubavi koju mi je pružala tijekom cijelog studija.

 E.F.

SAŽETAK

Hibridni mikroarmirani beton (HMAB) je vrsta betona armirana s dvije ili više vrste vlakana različitih dimenzija, oblika i materijala. Cilj istraživanja HMAB je istražiti koja kombinacija dvaju ili više vrsta vlakana je najpogodnija, to znači koji omjer i koja vrsta vlakana daje najbolje rezultate po pitanju mehaničkih i nemehaničkih svojstava. U ovom radu je provedeno eksperimentalno ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem HMAB s 1,5% volumnog udjela čeličnih vlakana u kombinaciji s različitim udjelima monofilamentnih polipropilenskih vlakana (0%, 0,1%, 0,2% i 0,3%). Na temelju rezultata ispitivanja zaključeno je da najveću vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje ima hibridna mješavina s volumnim udjelom od 1,5% čeličnih vlakana i 0,1% polipropilenskih vlakana.

Ključne riječi: beton, vlakno, hibridni mikroarmirani beton (HMAB), čelična vlakna, polipropilenska vlakna, vlačna čvrstoća na savijanje

ABSTRACT

Hybrid fiber-reinforced concrete (HyFRC) is a type of concrete reinforced with two or more types of fibres of different sizes, shapes and materials. The aim of reasearch of HyFRC is to investigate which combination of two or more types of fiber is most convinient, that means which ratio and which type of fiber gives the best result in terms of mechanical and non-mechanical properties. In this work, experimental investigation on tensile flexure strength of HyFRC with 1,5% volume fraction of steel fibers and different volume fractions of monofilament polypropylene fibres (0%, 0,1%, 0,2% i 0,3%) is conducted. Based on the test results it is concluded that hybrid mixture with volume fraction of 1,5 % of steel fibers and 0,1% of polypropylene fibres shows the highest value of tensile flexure strength.

Key words: concete, fiber, hybrid fiber-reinforced concrete (HyFRC), steel fibers, polypropylene fibres, tensile flexural strength

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VLAKNIMA OJAČAN BETON	2
2.1. Općenito o mikroarmiranom betonu	2
2.2. Hibridni mikroarmirani beton (HMAB)	5
2.3. Primjena hibridnog mikroarmiranog betona	8
3. EKSPERIMENTALNI DIO	9
3.1. Uzorci i betonske mješavine	9
3.2. Gustoća očvrsljih betonskih mješavina	11
3.3. Vlačna čvrstoća savijanjem s kontrolom pomaka	14
4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	37
5. ZAKLJUČAK	40
6. LITERATURA	41

POPIS TABLICA

- [1] **Tablica 1:** *Oznaka vrste i udjel vlaknanaca u mješavini (izradio autor)*
- [2] **Tablica 2:** *Dimenzije, masa i gustoća REF mješavine (izradio autor)*
- [3] **Tablica 3:** *Dimenzije, masa i gustoća S1,5 mješavine (izradio autor)*
- [4] **Tablica 4:** *Dimenzije, masa i gustoća S1,5-MF0,1 mješavine (izradio autor)*
- [5] **Tablica 5:** *Dimenzije, masa i gustoća S1,5-MF0,2 mješavine (izradio autor)*
- [6] **Tablica 6:** *Dimenzije, masa i gustoća S1,5-MF0,3 mješavine (izradio autor)*
- [7] **Tablica 7:** *Vlačna čvrstoća na savijanje, pomak pri maksimalnom naprezanju i vrijeme pojave pukotine od početka ispitivanja za REF mješavinu (izradio autor)*
- [8] **Tablica 8:** *Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) (izradio autor)*
- [9] **Tablica 9:** *Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) (izradio autor)*
- [10] **Tablica 10:** *Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) (izradio autor)*
- [11] **Tablica 11:** *Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,1 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) (izradio autor)*
- [12] **Tablica 12:** *Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) (izradio autor)*
- [13] **Tablica 13:** *Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,2 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) (izradio autor)*
- [14] **Tablica 14:** *Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) (izradio autor)*
- [15] **Tablica 15:** *Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,3 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) (izradio autor)*
- [16] **Tablica 16:** *Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) (izradio autor)*
- [17] **Tablica 17:** *Rezultati ispitivanja (izradio autor)*

POPIS SLIKA

- [1] **Slika 1:** Vlakna za armiranje betona: a) čelična; b) polipropilenska; c) staklena (iz Kanagavel R., *Mehanička svojstva hibridnog mikroarmiranog betona s miješanim cementom*, Građevinar 69, 2017., i *Betoni posebnih namjena*, GFOS, 2017./2018.)
- [2] **Slika 2:** Opeka armirana slamom (iz Fugahumana, web) i mort s konjskom dlakom (iz Ned Dominick the Inspector, web)
- [3] **Slika 3:** a) poprečni presjeci; b) geometrija vlakana po duljini (iz Smolcic, Z., *Modeliranje betona armiranog čeličnim vlaknima: trodimenzionalni numerički mezo-model*, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.)
- [4] **Slika 4:** Čelična vlakna (foto autor)
- [5] **Slika 5:** Polipropilenska vlakna (foto autor)
- [6] **Slika 6:** Postupak dodavanja vlakana u mješavinu (iz Moghimi G., *Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete*, Master of Science in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Gazimagusa, North Cyprus, 2014.)
- [7] **Slika 7:** Ugradnja hibridne mikroarmirane betonske mješavine (lijevo) i završna obrada (desno) (iz Skazlić M., *Development and Application of Hybrid Fibre Reinforced Concrete*, Sustainable Construction Materials and Technologies / Zachar, John ; Claisse, Peter ; Naik, Tarun R. ; Ganjian, Eshmaiel - Ancona, Italy : UWM Center, 2010, 1843-1850)
- [8] **Slika 8:** Sastavne komponente hibridnog mikroarmiranog betona (iz Ušić, I., *Prodor klorida kroz mikroarmirani beton visoke čvrstoće*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.)
- [9] **Slika 9:** Čelična i polipropilenska vlakna korištena u ispitanim uzorcima (foto autor)
- [10] **Slika 10:** Gustoća uzoraka po pojedinoj mješavini (izradio autor)
- [11] **Slika 11:** Shema opterećenja s dimenzijama prizme za izračun vlačne čvrstoće na savijanje i položaj iscrtane mreže u sredini raspona (izradio autor)
- [12] **Slika 12:** Preša s uzorkom, LVDT uređajima, vodilicama i nosačima za vodilice (izradio autor)
- [13] **Slika 13:** Krti slom REF uzorka bez vlakana (foto autor)
- [14] **Slika 14:** Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke REF mješavine (foto autor)
- [15] **Slika 15:** Dijagram sila-pomak za 3 uzorka REF mješavine (izradio autor)

[16] **Slika 16:** Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima REF mješavine (odmak od središta) (izradio autor)

[17] **Slika 17:** Svojstvo žilavosti, deformacija bez krtog sloma (foto autor)

[18] **Slika 18:** Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5 mješavine (foto autor)

[19] **Slika 19:** Dijagram sila-pomak za 2 uzorka S1,5 mješavine (izradio autor)

[20] **Slika 20:** Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 mješavine (odmak od središta) (izradio autor)

[21] **Slika 21:** Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,1 (foto autor)

[22] **Slika 22:** Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,1 mješavine (foto autor)

[23] **Slika 23:** Dijagram sila-pomak za 3 uzorka S1,5 – MF0,1 mješavine (izradio autor)

[24] **Slika 24:** Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,1 mješavine (odmak od središta) (izradio autor)

[25] **Slika 25:** Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,2 (foto autor)

[26] **Slika 26:** Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,2 mješavine (foto autor)

[27] **Slika 27:** Dijagram sila-pomak za 4 uzorka S1,5 – MF0,2 mješavine (izradio autor)

[28] **Slika 28:** Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,2 mješavine (odmak od središta) (izradio autor)

[29] **Slika 29:** Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,3 (foto autor)

[30] **Slika 30:** Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,3 mješavine (foto autor)

[31] **Slika 31:** Dijagram sila-pomak za 3 uzorka S1,5 – MF0,3 mješavine (izradio autor)

[32] **Slika 32:** Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,3 mješavine (odmak od središta) (izradio autor)

[33] **Slika 33:** Ravnost površina normalnog betona (lijevo), nepravilan slom i popucala vlakna (desno) (foto autor)

[34] **Slika 34:** Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće na savijanje (izradio autor)

[35] **Slika 35:** Odnos vlačne čvrstoće savijanjem i gustoće (izradio autor)

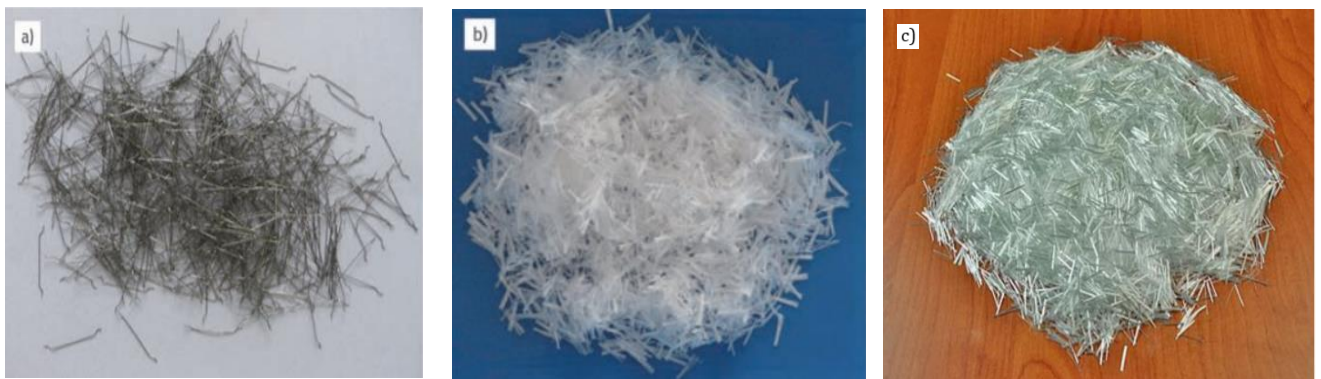
1. UVOD

Beton je najkorišteniji konstrukcijski materijal u današnje vrijeme. Beton je kompozit koji se sastoji od agregata, cementa, vode i raznih aditiva. Njegova osnovna svojstva su visoka tlačna čvrstoća kao primarno svojstvo, a kao negativno svojstvo ističe se niska vlačna čvrstoća i izuzetna krutost. Prema tome pokušava se pronaći način ojačanja koji bi zadovoljavao razne kriterije, kako mehaničke tako i nemehaničke, ali i ekonomske. Primarna svrha armiranja je poboljšati negativna svojstva običnog betona. Kroz prošlost beton se ojačavao na razne načine. Jedan od načina ojačavanja betona je armiranje betona vlaknima. Beton armiran vlaknima kompozit je betona i mikro vlakana velike čvrstoće koje su orijentirane nasumično u betonskoj matrici. Najčešće su u primjeni čelična, staklena i sintetička vlakna (polipropilenska), ali koriste se i mnogi drugi materijali. Svaka vrsta vlakana pridonosi poboljšanju određenih svojstava betona kao što su veća čvrstoća, duktilnost ili pak žilavost. Kombinacijom minimalno dviju ili više vrsta vlakana dobivamo hibridni mikroarmirani beton (HMAB) za koji se pokazalo da ima poboljšana svojstva u odnosu na beton armiran samo s jednom vrstom vlakana.

2. VLAKNIMA OJAČAN BETON

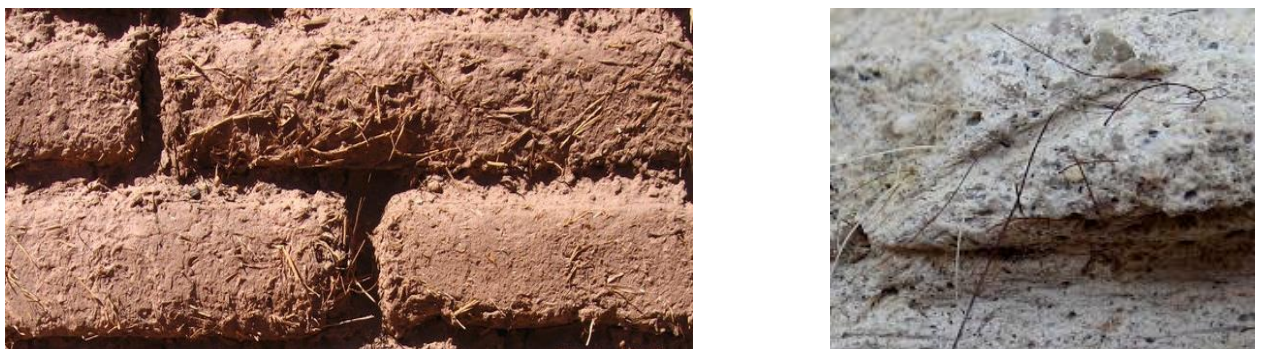
2.1. Općenito o mikroarmiranom betonu

Beton ojačan vlaknima ili mikroarmirani beton (MAB) kompozitni je materijal koji se sastoji od betona, koji je sam po sebi kompozit agregata, cementa, vode i raznih aditiva, i nasumično orijentiranih vlakana. Vlakna mogu biti od raznih materijala. Najčešće su u upotrebi čelična, staklena i polipropilenska vlakna. [5] Vlakna su prikazana na Slici 1.



Slika 1: Vlakna za armiranje betona: a) čelična; b) polipropilenska; c) staklena [1]

Još u davnoj prošlosti krti materijali su se armirali raznim vlaknima. U smjesu od gline za pravljenje opeke dodavala se slama za ojačanja. Isto tako, životinjske dlake su se dodavale u mortove za žbukanje.[9] Prikazano na Slici 2.



Slika 2: Opeka armirana slamom i mort s konjskom dlakom [2]

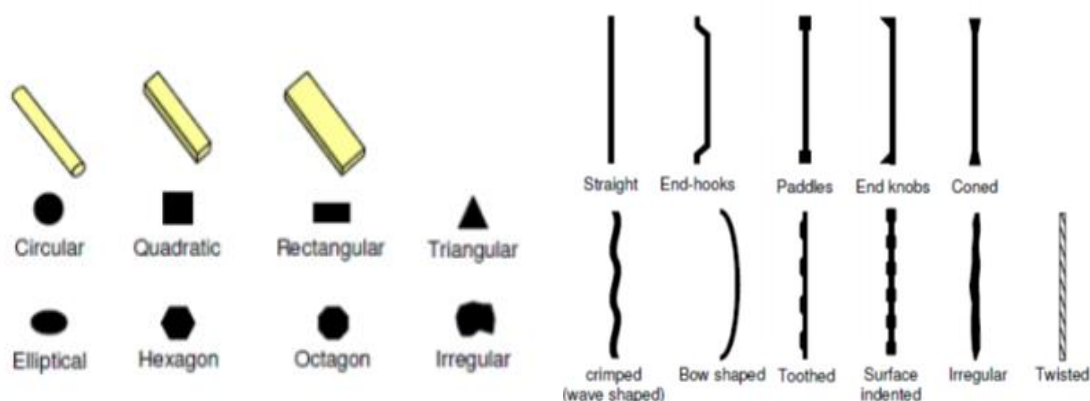
Početak 20. stoljeća koristila su se azbestna vlakna. Međutim, otkrilo se da azbest loše utječe na zdravlje, stoga se moralo pronaći bolje rješenje koje je bilo manje štetno za zdravlje.[3] 60-ih godina prošlog stoljeća započelo je korištenje čeličnih, staklenih i sintetičkih (najčešće polipropilenskih) vlakana u betonu i njihov razvoj kao materijala za armiranje se nastavlja i u današnje vrijeme. Naravno, dodavanje vlakana betonu ima svrhu poboljšati svojstva običnog betona.

Danas je u upotrebi veliki broj vlakana koji se dodaju betonu radi poboljšanja raznih svojstava, kako mehaničkih, tako i nemehaničkih. Svojstva betona armiranog vlaknima ovise o mnogo čimbenika. Neki od njih su vrsta i količina vlakana, njihova geometrija, poprečni presjek, orijentacija i raspodjela u kompozitu.

Poprečni presjek vlakana može biti raznih oblika. Presjek može biti kružni, pravokutni, trokutasti, poligonalni i raznih drugih pravilnih i nepravilnih oblika.

Što se tiče geometrije vlakana, da bi se poboljšala prionjivost vlakana s betonom, vlakna mogu po svojoj duljini biti hrapava ili na svojim krajevima mogu imati razna mehanička sidra. Stoga, po svojoj duljini vlakna mogu biti: glatka, hrapava, uvijena, deformirana, s raznim izbočinama te na krajevima mogu imati kuke i razna druga mehanička sidra.[6] []

Poprečni presjeci i geometrija vlakana prikazana je na Slici 3.



Slika 3: a) poprečni presjeci; b) geometrija vlakana po duljini

Vlakna se dodaju svježem betonu tijekom procesa miješanja te se tako osigurava jednolika raspodjela betona u kompozitu. Vlakna se dodaju polako i što ravnomjernije u toku miješanja kako bi se izbjeglo stvaranje nakupina vlakana

ČELIČNA VLAKNA

Čelična vlakna (prikazana su na Slici 4.) su najčešća korištena vlakna u betonu ojačanom vlaknima. U usporedbi s betonom bez vlakana, ona uvelike povećavaju duktilnost i vlačnu čvrstoću. Naravno, ona daju još puno prednosti MAB u odnosu na normalni beton, a to su: povećana otpornost na umor i udar, povećana tlačna čvrstoća, povećana duktilnost te sprječavanje širenja pukotina te sposobnost zadržavanja opterećenja nakon pojave pukotine. Nedostatak ove vrste vlakana je svakako stvaranje korozije koja vodi do malog gubitka u čvrstoći i žilavosti. [2]



Slika 4: Čelična vlakna [4]

SINTETIČKA VLAKNA

Sintetička vlakna uključuju: aramid, akril, najlon, ugljik, poliester, polietilen i polipropilen. Polipropilenska vlakna (prikazana su na Slici 5.) proizvode se u različitim veličinama i oblicima. Proizvode se u obliku kontinuiranih monofilamenata, kružnog presjeka koji se mogu usitniti na potrebnu duljinu, ili fibriliranih filmova ili traka pravokutnog presjeka. Dodavanjem ovih vlakana u beton poboljšava se žilavost, čvrstoća na savijanje i otpornost na udarce. Polipropilenska vlakna uvelike smanjuju širenje mikro pukotina na veće makro pukotine. Tlačna čvrstoća dodavanjem malog postotka vlakana se ne mijenja previše, dok pri dodavanju većeg postotka ovih vlakana tlačna čvrstoća opada. Prednost je što su vlakna jeftina i dostupna u velikim količinama. [3]



Slika 5: Polipropilenska vlakna [5]

2.2. Hibridni mikroarmirani beton (HMAB)

Hibridni mikroarmirani beton (HMAB) je vrsta betona armirana s dvije ili više vrste vlakana. Najnovija istraživanja pokazuju da korištenje hibridnih vlakana doprinosi puno većem poboljšanju mehaničkih svojstava betona od armiranja samo jednom vrstom vlakana. Svaka vrsta vlakana pridonosi boljim svojstvima betona na svoj način. Cilj istraživanja hibridnog armiranog betona je istražiti koja kombinacija dvaju ili više vrsta vlakana je najpogodnija, to znači koji omjer i koja vrsta vlakana daje najbolje rezultate po pitanju mehaničkih i nemehaničkih svojstava. [3]

2.2.1. Mehanička svojstva

Tlačna čvrstoća – dodavanjem vlakana u beton povećava se tlačna čvrstoća betona u odnosu na normalni beton. Tlačna čvrstoća se mijenja ovisno o vrsti vlakna, volumenu pojedinog vlakna u kompozitu te njihovom modulu elastičnosti. Dodavanjem samo čeličnih vlakana tlačna čvrstoća betona je najveća. Prema nekim istraživanjima, visok modul elastičnosti povećava tlačnu čvrstoću elementa. Dodavanjem malih količina polipropilenskih vlakana u betonsku mješavinu nema značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću. Veće količine polipropilenskih vlakana dovest će do opadanja tlačne čvrstoće. Na kraju, HMAB ima manju tlačnu čvrstoću nego beton armiran jednom vrstom vlakana. Povećanjem udjela polipropilenskih vlakana u HMAB tlačna čvrstoća sve se više opada. [2]

Čvrstoća na savijanje – dodavanjem vlakana u beton povećava se vlačna čvrstoća betona na savijanje u odnosu na normalni beton. Vlačna čvrstoća izravno ovisi o vrsti i postotku volumena pojedinog vlakna u mješavini. Zbog prisutnosti vlakana koja imaju veći modul elastičnosti poboljšava se vlačna čvrstoća pri nastanku prve pukotine. S druge strane, vlakna s malom veličinom imaju bolju funkciju u kontroli širenja mikro pukotina. Istraživanja pokazuju da hibridno mikroarmirani beton postiže najbolju vlačnu čvrstoću kombiniranjem čeličnih vlakana sa malim postotkom polipropilenskim vlaknima iz razloga što čelična vlakna imaju visok modul elastičnosti dok su polipropilenska vlakna malena i sprječavaju širenje mikro pukotina. Dodavanjem veće količine polipropilenskih vlakana smanjuje se vlačna čvrstoća na savijanje. Može se zaključiti da su hibridni mikroarmirani betoni osjetljiviji, ne samo na količinu vlakana, nego i na vrstu vlakana koja se dodaje kompozitu. [2]

Otpornost na udarce- dodavanjem vlakana u beton povećava se otpornost na udarce u odnosu na normalni beton. Bez obzira na vrstu vlakna, povećanje količine vlakana pridonose boljoj otpornosti na udarce. Veliki postotak čeličnih vlakana u kompozitu rezultira velikom otpornošću na udarce zbog visokog modula elastičnosti i visoke vlačne čvrstoće čeličnih vlakana. Duljina vlakana također pridonosi boljoj otpornosti na udarce. Polipropilenska vlakna u kompozitu nisu najbolja za korištenje kad govorimo o otpornosti na udarce. Iz svega slijedi da u hibridnim mikroarmiranim mješavinama najbolju otpornost na udarce imaju mješavine koje imaju najveći postotak čeličnih vlakana. [2]

2.2.2. Nemehanička svojstva

Obradivost svježeg betona- dodavanjem vlakana u betonsku matricu smanjuje se obradivost betona te se uočava stvaranje gruda vlakana, takozvanih ježeva. Dodavanjem sve većeg postotka vlakana ta pojava je sve izraženija. Zbog velikog broja i velike površine vlakana, ona apsorbiraju više cementne paste koja ih obavija te utječe na viskoznost betonskih mješavina, uzrokujući smanjenu obradivost. [5] Obradivost se može povećati dodavanjem superplastifikatora.

Toplina- polipropilenska vlakna imaju sposobnost zadržavanja topline određeno vrijeme što pridonosi poboljšanju žilavosti i usporava širenje pukotina u dijelu nakon pojave prve pukotine [9]

Temperatura- porastom temperature smanjuje se tlačna čvrstoća HMAB. Pri manjim temperaturama nema velike razlike u tlačnoj čvrstoći. Do temperature od 300 °C tlačna čvrstoća se ne smanjuje u odnosu na tlačnu čvrstoću pri sobnoj temperaturi. Pri daljnjem povećanju temperature dolazi do naglog pada tlačne čvrstoće HMAB. Tako pri temperaturi od 500 °C tlačna čvrstoća je manja za 20%, dok pri temperaturi od 800 °C tlačna čvrstoća je manja i do 75% u odnosu na tlačnu čvrstoću pri sobnoj temperaturi.

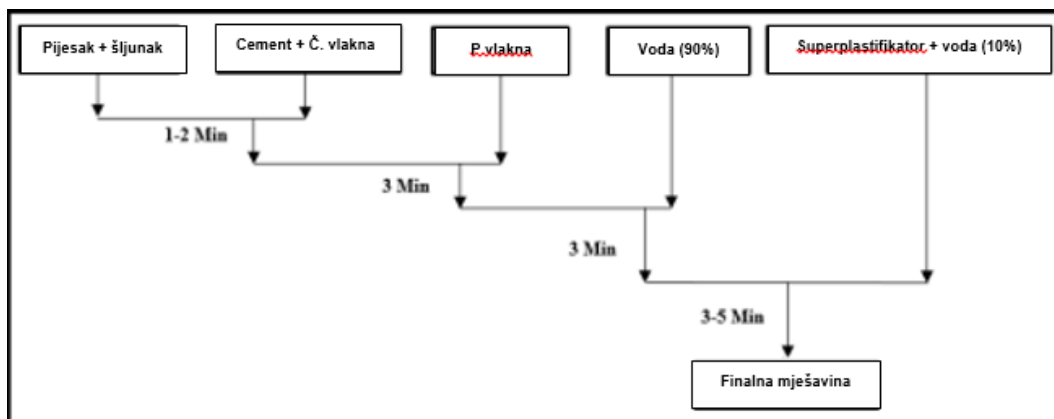
Porastom temperature smanjuje se i vlačna čvrstoća na savijanje HMAB. U usporedbi s tlačnom čvrstoćom, vlačna čvrstoća na savijanje i pri manjim temperaturama ima nagli pad. Tako pri 300 °C vlačna čvrstoća na savijanje je manja 40% u odnosu na vlačnu čvrstoću pri sobnoj temperaturi. Daljnjim povećanjem temperature pad vlačne čvrstoće je i dalje prisutan. Pri temperaturi od 600 °C vlačna čvrstoća na savijanje je manja za 60%. [13]

2.2.3. Hibridni mikroarmirani beton s čeličnim i polipropilenskim vlaknima

Prijašnja istraživanja su pokazala da čelična i polipropilenska vlakna imaju dobru sinergiju. Prednosti korištenja ova dva materijala za armiranje vlaknima su sljedeći:

- Veličina vlakana je bitna. Vlakna s malom veličinom imaju utjecaj na širenje mikro pukotine, dok veća vlakna sprječavaju širenje makro pukotina. Upravljanje mikro i makro pukotinama rezultira većom vlačnom čvrstoćom, odnosno žilavosti kompozita
- Vlakna sa fleksibilnim i duktilnim svojstvima poboljšavaju žilavost i deformaciju u zoni nakon pucanja, dok jača i čvršća vlakna poboljšavaju čvrstoću do pojave prve pukotine i naposljetku maksimalnu čvrstoću
- Vlakna visoke trajnosti povećavaju žilavost i čvrstoću u budućnosti, dok manje izdržljiva vlakna jamče kratkoročne performanse kompozitnih elemenata koji se koriste u transportu i ugradnji [4]

Postupak dodavanja vlakana je taj da se čelična vlakna miješaju zajedno sa cementom i agregatom jedno vrijeme (1-2 min) nakon čega se dodaju polipropilenska vlakna i sve zajedno se miješa 3 min nakon čega se dodaje voda i nakraju se dodaju aditivi. [2] Postupak dodavanja vlakana prikazan je na Slici 6.



Slika 6: Postupak dodavanja vlakana u mješavinu [6]

2.3. Primjena hibridnog mikroarmiranog betona

Hibridni mikroarmirani beton se može primijeniti u svim betonskim konstrukcijama zbog njegovih jedinstvenih svojstava, a u isto vrijeme možemo postići vrlo visoke vrijednosti čvrstoća. HMAB se primjenjuje u gradnji mostova, kolnika autocesta, staza aerodroma te za obloge tunela i stabilizaciju nagiba od mlaznog betona. Također se koristi i za gradnju kolnika, industrijskih podova, temelja i ploča. [8]

Primjer korištenja HMAB je u izgradnji betonske ploče za skladište smještenog u okolici Zagreba, Hrvatska. Betonska ploča je 22 cm debljine, kvadrature 5x5 m. Beton je dopremljen u betonskoj miješalici, ugrađen pomoću pumpe i završno obrađen. Postavljenje i završna obrada betona se može vidjeti na Slici 7. Korišteno je 30 kg/m³ čeličnih vlakana te 1 kg/m³ polipropilenskih vlakana.

Primjena HMAB pokazala se korisnom. Dodavanje vlakana nije utjecalo na estetsku kvalitetu nakon završne obrade vanjske površine. Tijekom uporabe konstrukcije, ojačanom čeličnim i polipropilenskim vlaknima, na betonskoj ploči nije došlo do pukotina. [12]



Slika 7: Ugradnja hibridne mikroarmirane betonske mješavine (lijevo) i završna obrada (desno) [7]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci 18.,19. i 20. svibnja 2020.godine. Osnovni cilj ispitivanja bio je usporediti kako kombinacija čeličnih vlakana s različitim omjerom polipropilenskih vlakana utječe na gustoću i vlačnu čvrstoću savijanjem HMAB. U daljnjem dijelu rada opisani su uzorci i rezultati ispitivanja.

3.1. Uzorci i betonske mješavine

Korišteni su uzorci pripremljeni 2017.godine u sklopu diplomskog rada “Prodor klorida kroz mikroarmirani beton visoke čvrstoće” autora Ivana Ušića. Navedeni uzorci od mikroarmiranog betona su spravljeni korištenjem sljedećih sastojaka (Slika 8):

- Bijeli cement CEM I 52,5R – BIJELI, gustoće $3,04 \text{ g/cm}^3$
- Silicijska prašina SikaFume, gustoće $2,18 \text{ g/cm}^3$
- Voda iz gradskog vodovoda Rijeka
- Superplastifikator GLENIUM SKY 629 W, gustoće $1,04 \text{ g/cm}^3$
- Stabilizator RHEOMATRIX 100, gustoće $1,01 \text{ g/cm}^3$
- Agregat: prosijani vapnenac frakcije 0-2 mm, gustoće $2,88 \text{ g/cm}^3$ i pijesak frakcije 0,1-0,6 mm, gustoće $2,62 \text{ g/cm}^3$
- Čelična vlakna DRAMIX 0L 13*0,2 mm, gustoće $7,8 \text{ g/cm}^3$
- Polimerna monofilamentna vlakna, gustoće $0,91 \text{ g/cm}^3$

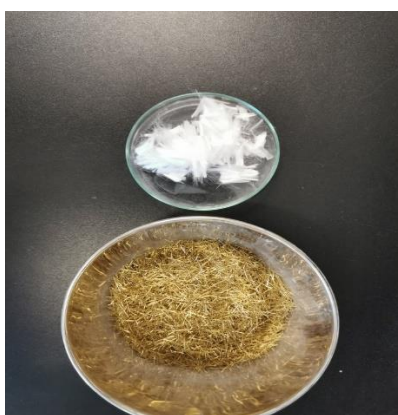


Slika 8: Sastavne komponente hibridnog mikroarmiranog betona [8]

Da bi bila usporediva s drugim ispitivanjima istog tipa, ispitivanja su izvršena po Hrvatskim normama. Ispitivanja su se provela na uzorcima spravljenim od 5 različitih mješavina. U Tablici 1. je dan prikaz oznake uzorka obzirom na mješavinu te oznaka udjela i vrste vlakana. Jedna mješavina je bila referentna (oznaka uzorka REF), a preostale četiri mješavine s istim udjelom čeličnih vlakana (oznaka S 1,5%), ali različitim udjelom polipropilenskih monofilamentnih vlakana (oznake uzoraka MF 0%, 0,1%, 0,2% i 0,3%). Dakle, iz oznake uzorka je vidljiva vrsta i udio vlakna u pojedinoj mješavini. Oznaka S1,5 se odnosi na uzorke spravljenje od mješavine koja sadrži 1,5% čeličnih vlakana dok npr. oznaka S1,5 -MF0,1 se odnosi na uzorke spravljenje od mješavine u kojoj je volumni postotak čeličnih vlakana 1,5% i 0,1% monofilamentnih vlakana. Vlakna koja su korištena u ispitanim uzorcima prikazana su na Slici 9.

Tablica 1: Oznaka vrste i udjel vikanaca u mješavini te broj uzoraka svake mješavine [1]

R. br. Mješavine	Oznaka uzorka	Čelična vlakna % vol (1 m ³)	Monofilamentna vlakna % vol (1m ³)	Broj uzoraka
I	REF	-	-	3
II	S1,5	1,5%	-	2
III	S1,5 - MF0,1	1,5%	0,1%	3
IV	S1,5 - MF0,2	1,5%	0,2%	4
V	S1,5 - MF0,3	1,5%	0,3%	3



Slika 9: Čelična i polipropilenska vlakna korištena u ispitanim uzorcima [9]

Na uzorcima starim 3 godine oblika prizme dimenzija 100 mm x 100 mm x 400 mm od hibridnog mikroarmiranog betona ispitana je gustoća i vlačna čvrstoća savijanjem.

3.2. Gustoća očvrslih betonskih mješavina

Kako bi odredili srednju vrijednost gustoće po pojedinoj mješavini za svaki uzorak prizme izmjerene su dimenzije te masa. Dimenzije, masa, gustoća te broj ispitanih uzorka po pojedinoj mješavini zajedno sa srednjom vrijednošću gustoće pojedine mješavine prikazani su u Tablica 2 do Tablica 6.

Mješavina I: REF

Tablica 2: Dimenzije, masa i gustoća REF mješavine [2]

Br. uzorka	duljina d (mm)	širina š (mm)	visina v (mm)	volumen V(cm ³)	masa t(g)	gustoća ρ (g/cm ³)	Srednja vrijednost gustoće
1	400	100,2	100,54	4029,64	8614	2,14	2,13
2	399	100,29	99,6	3985,56	8421	2,11	
3	399	99,65	99,62	3960,93	8497,3	2,15	

Mješavina II: S - 1,5%, MF - 0%

Tablica 3: Dimenzije, masa i gustoća S1,5 mješavine [3]

Br. uzorka	duljina d (mm)	širina š (mm)	visina v (mm)	volumen V(cm ³)	masa t(g)	gustoća ρ (g/cm ³)	Srednja vrijednost gustoće
1	399	100,57	99,99	4012,34	9418,5	2,35	2,33
2	399	101,67	101,18	4104,50	9425,9	2,30	

Mješavina III: S - 1,5%, MF - 0,1%

Tablica 4: Dimenzije, masa i gustoća S1,5 – MF0,1 mješavine [4]

Br. uzorka	duljina d (mm)	širina š (mm)	visina v (mm)	volumen V(cm ³)	masa t(g)	gustoća ρ (g/cm ³)	Srednja vrijednost gustoće
1	399	100,44	100,62	4032,40	8797,9	2,18	2,22
2	399	100,46	100,42	4025,19	8962,2	2,23	
3	399	100,69	99,86	4011,91	9052,5	2,26	

Mješavina IV: S - 1,5%, MF - 0,2%

Tablica 5: Dimenzije, masa i gustoća *SI,5 – MF0,2* mješavine [5]

Br. uzorka	duljina d (mm)	širina š (mm)	visina v (mm)	volumen V(cm ³)	masa t(g)	gustoća ρ (g/cm ³)	Srednja vrijednost gustoće
1	399	101,38	100,06	4047,49	8912	2,20	2,18
2	400	99,48	100,08	3982,38	8854,8	2,22	
3	400	101,8	101,43	4130,23	8900,6	2,15	
4	400	102,5	101,2	4149,20	8829,3	2,13	

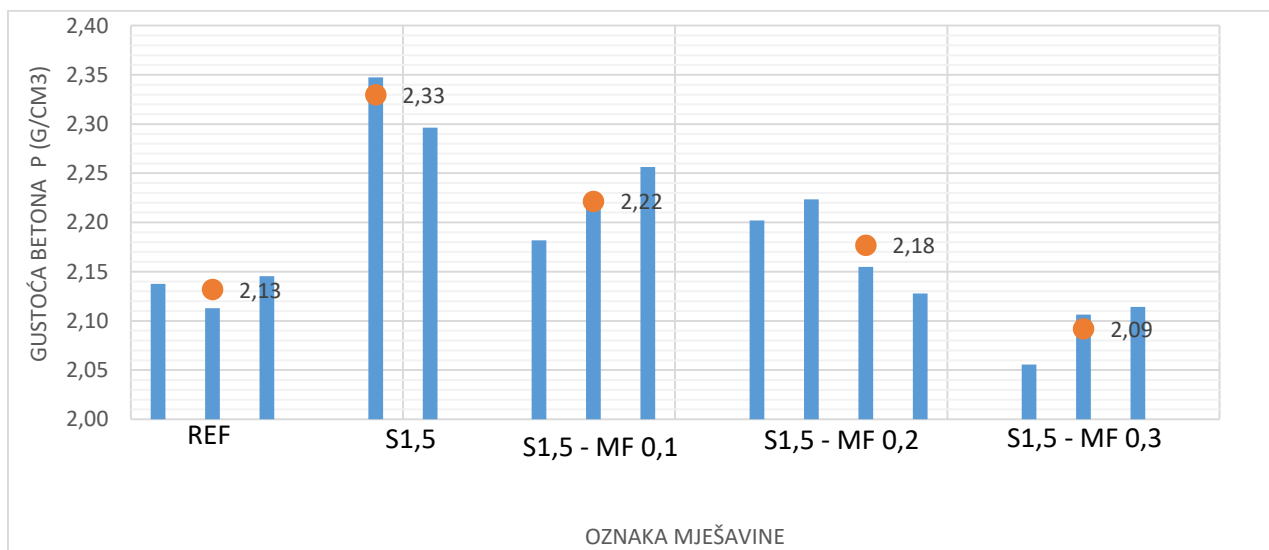
Mješavina V: S - 1,5%, MF - 0,3%

Tablica 6: Dimenzije, masa i gustoća *SI,5 – MF0,3* mješavine [6]

Br. uzorka	duljina d (mm)	širina š (mm)	visina v (mm)	volumen V(cm ³)	masa t(g)	gustoća ρ (g/cm ³)	Srednja vrijednost gustoće
1	400	100,3	100,78	4043,29	8311,2	2,06	2,09
2	399	101,23	100,52	4060,08	8551,7	2,11	
3	398	100,35	100,97	4032,67	8526,2	2,11	

Gustoća uzoraka se mijenja ovisno o vrsti i udjelu pojedinih vlakana. Na Slici 10. je prikazan odnos gustoća uzoraka. Narančastom točkicom je označena srednja vrijednost gustoće po pojedinoj mješavini. Referentna betonska mješavina ima srednju vrijednost gustoće $2,13 \text{ g/cm}^3$. Dodavanjem 1,5% čeličnih vlakana gustoća raste te iznosi $2,33 \text{ g/cm}^3$. Dodavanjem sintetičkih vlakana u mješavinu s čeličnim vlaknima srednja vrijednost gustoće pada. Srednja vrijednost za 1,5% čeličnih vlakana i 0,1% sintetičkih vlakana iznosi $2,22 \text{ g/cm}^3$. Pri povećanju postotka sintetičkih vlakana u mješavini srednja vrijednost gustoće nastavlja padati. Tako pri miješanju 1,5% čeličnih vlakana i 0,2% sintetičkih vlakana srednja vrijednost gustoće iznosi $2,18 \text{ g/cm}^3$, dok za mješavine od 1,5% čeličnih vlakana i 0,3% sintetičkih vlakana srednja gustoća je najmanja od svih mješavina i iznosi $2,09 \text{ g/cm}^3$.

Zaključak je da dodavanjem samo čeličnih vlakana izrazito raste srednja vrijednost gustoće uzoraka u odnosu na referentnu betonsku mješavinu jer čelik ima veću gustoću od betona. Dodavanjem sve većeg postotka laganih sintetičkih vlakana srednja vrijednost gustoće uzoraka pada jer su sintetički proizvodi lagani.



Slika 10: Gustoća uzoraka po pojedinoj mješavini [10]

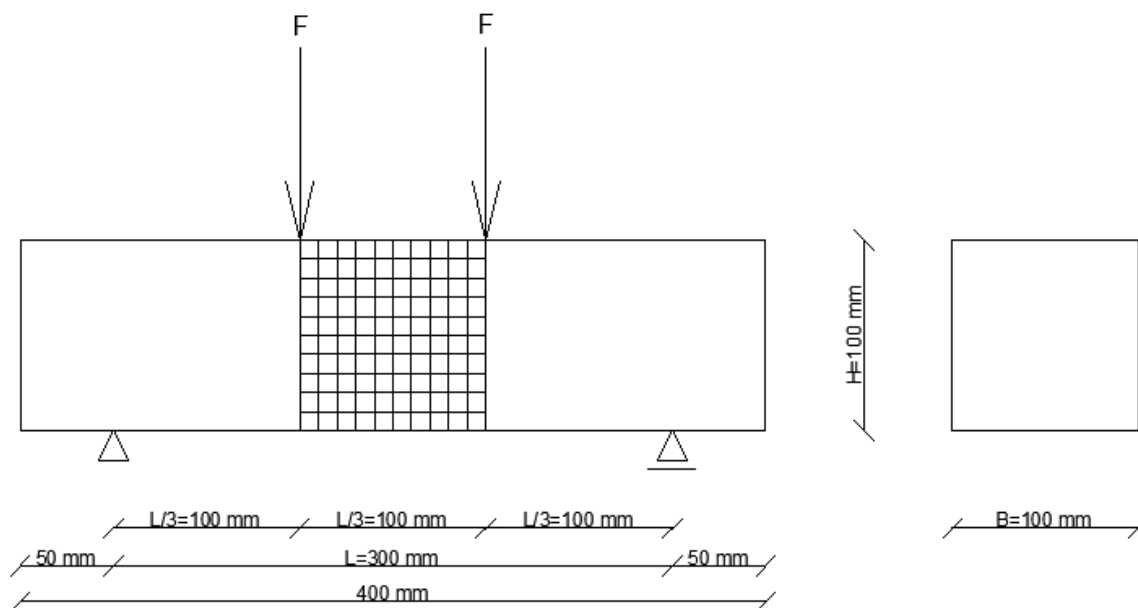
3.3. Vlačna čvrstoća savijanjem s kontrolom pomaka

3.3.1. Opis ispitivanja

Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provedeno je prema uputama norme HRN EN 12390-5 i ASTM C 1018 - 97. Ispitivanje savojne čvrstoće je provedeno na prizmama dimenzija 100 mm x 100 mm x 400 mm pomoću preše Controls maksimalnog kapaciteta 300 kN. S obzirom na mjesto nanošenja opterećenja, postoje dvije metode ispitivanja po Hrvatskim normama. Jedna je da se koncentrirana sila nanosi točno na sredini raspona uzorka, dok kod druge metode se dvije koncentrirane sile nanose u trećinama raspona uzorka. U ovom ispitivanju korištena je druga metoda, tj. opterećenje je nanošeno na trećinama raspona s dvije koncentrirane sile pod kontrolom pomaka. Prilikom ispitivanja korištena su tri LVDT uređaja s maksimalnim mjernim pomakom od 10 mm, od čega jedan za kontrolu pomaka a preostala dva za mjerenje progiba na sredini raspona uzorka. Brzina prirasta pomaka sredine raspona uzorka za referentni beton bila je 0.1 $\mu\text{m/s}$ dok je za ostale mješavine brzina bila 1.8 $\mu\text{m/s}$. Ukupno je provedeno 15 ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem.

Postupak ispitivanja uzorka prizme bio je sljedeći:

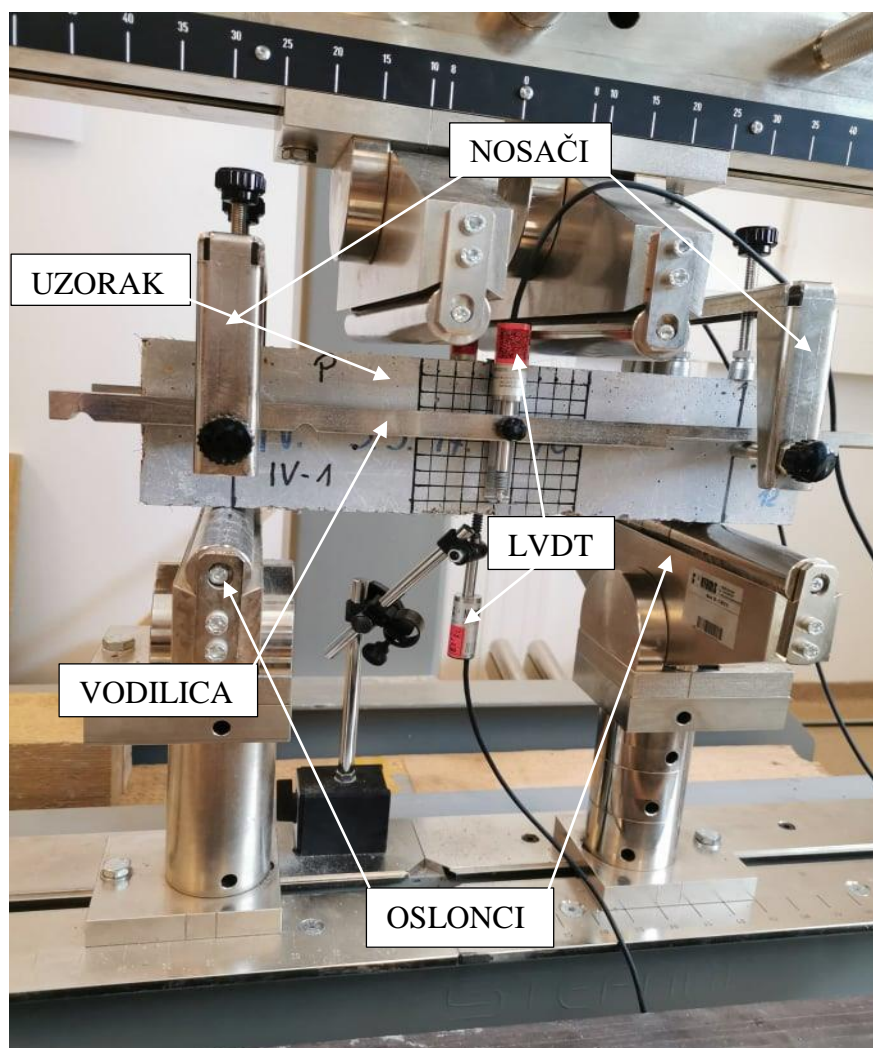
- Prije početka ispitivanja za svaki uzorak prizme je radi lakšeg određivanja položaja pukotine na prednjoj i zadnjoj strani uzorka (strane koje su paralelne sa smjerom ulijevanja betona u kalupe) nacrtana kvadratna mreža (vidjeti Sliku 11). Mreža je iscrtana u sredini raspona prizme, tako da tvori 100 malih kvadratića duljine stranice 10 mm (10x10 kvadratića dimenzija 10x10 mm).



Slika 11: Shema opterećenja s dimenzijama prizme za izračun vlačne čvrstoće na savijanje i položaj iscrtane mreže u sredini raspona [11]

- Nakon toga se zalijepi pomoćni lim u sredinu raspona uzorka (na njega se postavlja LVDT uređaj za mjerenje pomaka u vertikalnom smjeru), te postavi nosač na koje idu vodilice koje drže LVDT uređaj.
- Tako pripremljeni uzorak se postavi na oslonce preše čiji razmak iznosi 300 mm. Uzorak je potrebno postaviti okomito na smjer lijevanja betona na oslonce gdje se opterećenje nanosi na trećinama raspona uzorka. Kako bi se tokom ispitivanja mjerili vertikalni pomaci dva LVDT uređaja su postavljena sa prednje i stražnje strane uzorka, a jedan LVDT uređaj na sredini raspona i sredini širine donje stanice uzorka prizme (vidjeti Sliku 12).

- Nakon što je uzorak postavljen u uređaj za ispitivanje, pomoću računala pokreće se program ADVANTEST 9. Nakon upisivanja svih potrebnih parametara započinje postupak ispitivanja.
- Pri dodiru gornjih oslonaca sa uzorkom preša se automatski zaustavlja. Tada se namještaju LVDT uređaji (nuliraju se) i s pritiskom na „start“ počinje ispitivanje konstantnom brzinom prirasta pomaka koji je prethodno definiran.
- Za betonske prizme bez vlakana ispitivanje se provodilo do trenutka sloma uzorka
- Za betonske prizme s vlaknima ispitivanje se provodilo do trenutka kada je LVDT uređaj kojim se kontrolirao pomak ostvari pomak od 3,5 mm.
- Za vrijeme ispitivanja kontinuirano se bilježila sila, vrijeme, pomaci na sredini raspona prizme te snimao video (prikazano na Slici 12).



Slika 12: Preša s uzorkom, LVDT uređajima, vodilicama i nosačima za vodilice [12]

3.3.2. *Rezultati ispitivanja*

U nastavku su dani rezultati ispitivanja za svaku mješavinu posebno. Na temelju ispitivanja za svaki pojedini uzorak određena je sila za prvu pukotinu, maksimalna sila, pomak pri nastanku prve pukotine i pri dostizanju maksimalne sile te vrijeme pojave pukotine od početka ispitivanja. Čvrstoća na savijanje za svaki ispitani uzorak kao i srednja vrijednost čvrstoće za svaku mješavinu dobivena je korištenjem izraza za određivanje vlačne čvrstoće na savijanje opterećenjem u trećinama raspona:

$$\sigma = \frac{F_{max} * L}{B * H^2} \quad (1.)$$

gdje je:

σ - vlačna čvrstoća na savijanje [MPa = N/mm²],

F_{max} - maksimalna dosegnuta sila u uzorku [N],

L - raspon (razmak oslonaca) [mm],

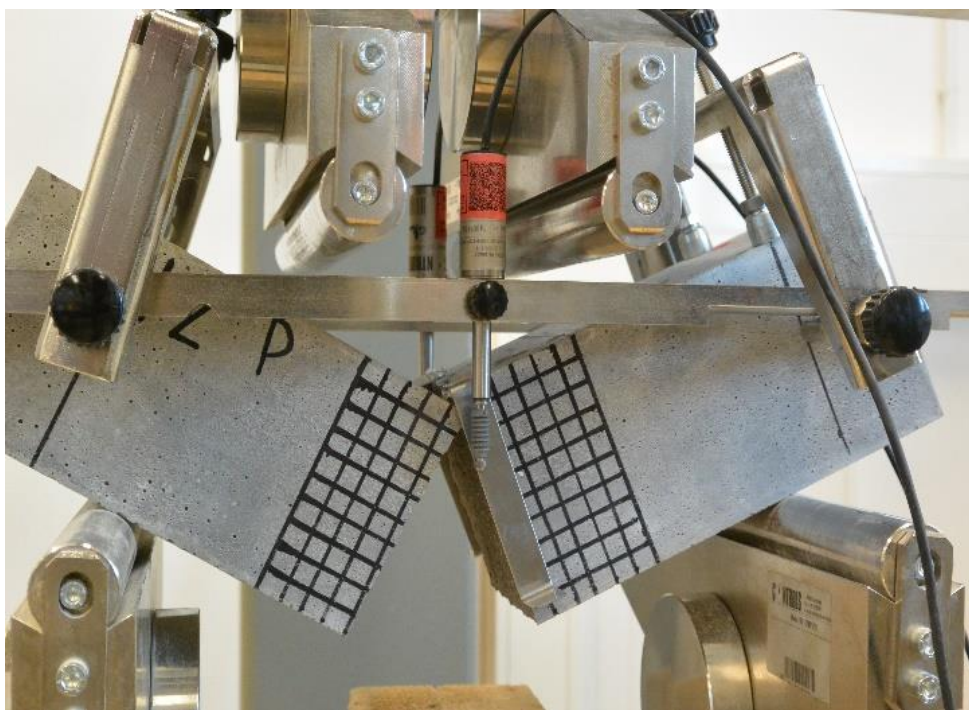
B – širina poprečnog presjeka prizme [mm],

H – visina poprečnog presjeka prizme [mm].

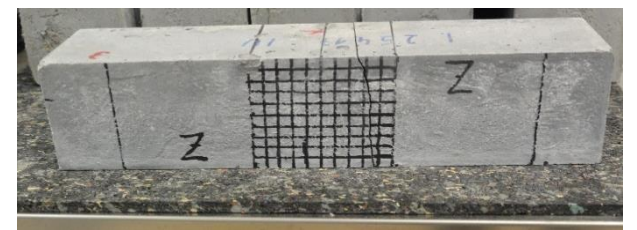
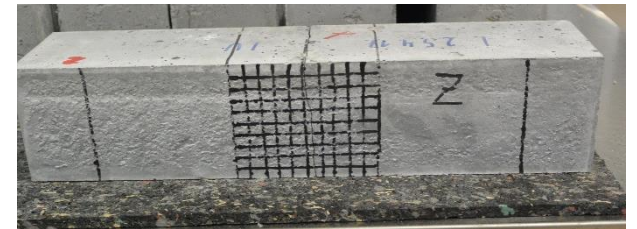
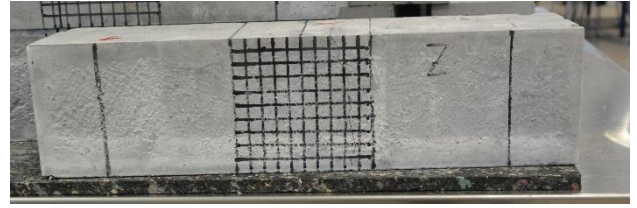
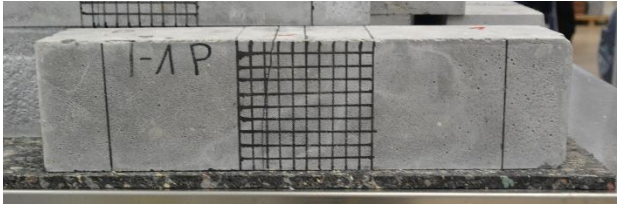
Nadalje, za svaki uzorak je prikazan dijagram sila-pomak te mjesto nastanka pukotine. Mjesto nastanka pukotina mjereno je od sredine raspona uzoraka pomoću mreže iscrtane na uzorcima na početku ispitivanja.

REF betonska mješavina

Za referentnu mješavinu bez vlakana ispitano je ukupno 3 uzorka. Uzorci su ispitani brzinom nanošenja pomaka od $0,1 \mu\text{m/s}$ do trenutka sloma. Za ove uzorke je specifično to što pri iniciranju prve pukotine odmah dolazi do krtoq loma cijelog uzorka (vidjeti slika 13). U Tablici 7 prikazane su dimenzije ispitanih prizmi, sile sloma za svaki pojedini uzorak, pomak pri maksimalnoj sili, vrijeme pojave pukotine od početka ispitivanja, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardna devijacija (odstupanja od srednjih vrijednosti). Prikaz položaja pukotine s prednje i stražnje strane dan je na Slici 14. Maksimalni iznos sile na tri ispitana uzorka iznosi 28,04 kN, što daje naprezanje, tj. vlačnu čvrstoću na savijanje od 8,46 MPa. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje na tri ispitana uzorka iznosi 6,74 MPa. Standardna devijacija za čvrstoću na savijanje za ispitane uzorke iznosi 1,22. MPa. Prikaz eksperimentalno dobivenih dijagrama sila-pomak za ispitane uzorke REF mješavine dan je na Slika 15.



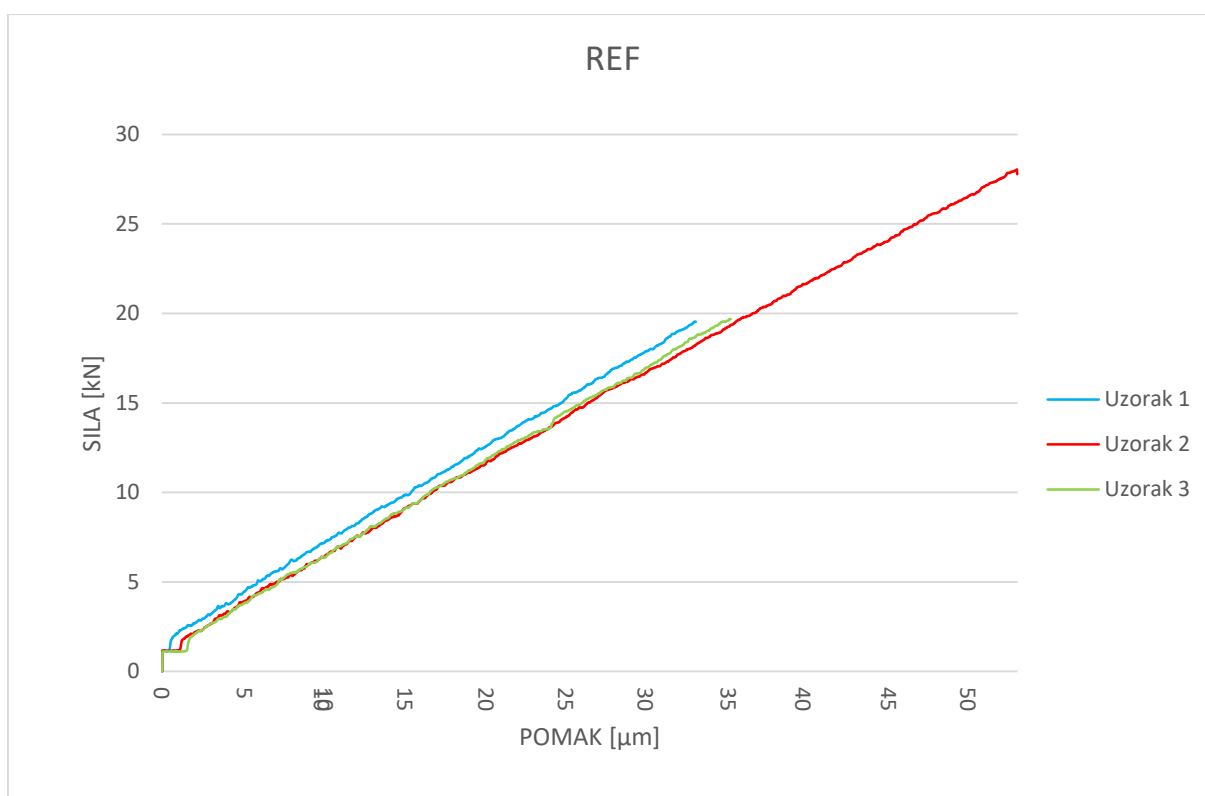
Slika 13: Krti slom REF uzorka bez vlakana [13]



Slika 14: Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke REF mješavine [14]

Tablica 7: Vlačna čvrstoća na savijanje, pomak pri maksimalnom naprezanju i vrijeme pojave pukotine od početka ispitivanja za REF mješavinu [7]

Br. uzorka	širina B (mm)	visina H (mm)	raspon L (mm)	maksimalna vrijednost			vrijeme pojave pukotine (s)	brzina v ($\mu\text{m/s}$)
				sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)		
1	100,2	100,54	300	19,53	33,3	5,78	348,90	0,1
2	100,29	99,6	300	28,04	52,95	8,46	557,20	0,1
3	99,65	99,62	300	19,68	35	5,97	370,50	0,1
Sr.vrijednost	-	-	-	22,42	40,42	6,74	425,53	-
MAX	-	-	-	28,04	52,95	8,46	557,20	-
MIN	-	-	-	19,53	33,3	5,78	348,90	-
St.devijacija	-	-	-	3,98	8,89	1,22	93,52	-

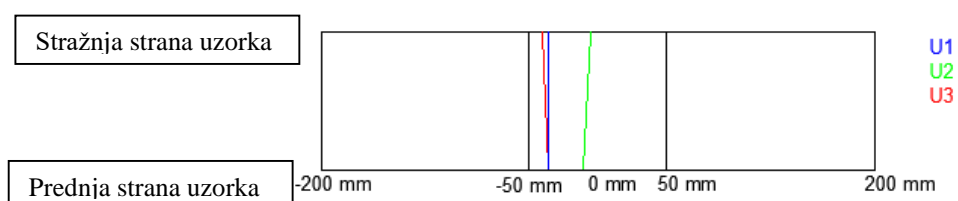


Slika 15: Dijagram sila-pomak za 3 uzorka REF mješavine [15]

U Tablici 8. prikazani su odmaci pukotina na dnu uzorka s prednje i stražnje strane mjerene od središta uzorka za sve uzorke REF mješavine. Na Slici 16. je dan tlocrtni prikaz pukotine na dnu uzorka za sve uzorke REF mješavine.

Tablica 8: Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) [8]

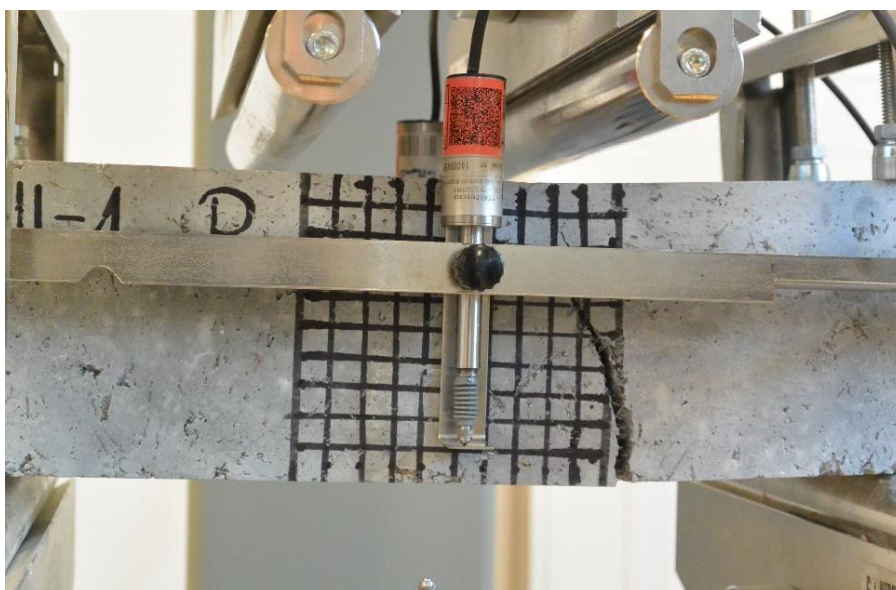
REF	U1	U2	U3
Prednja strana (mm)	-35	-10	-35
Stražnja strana (mm)	-35	-5	-40



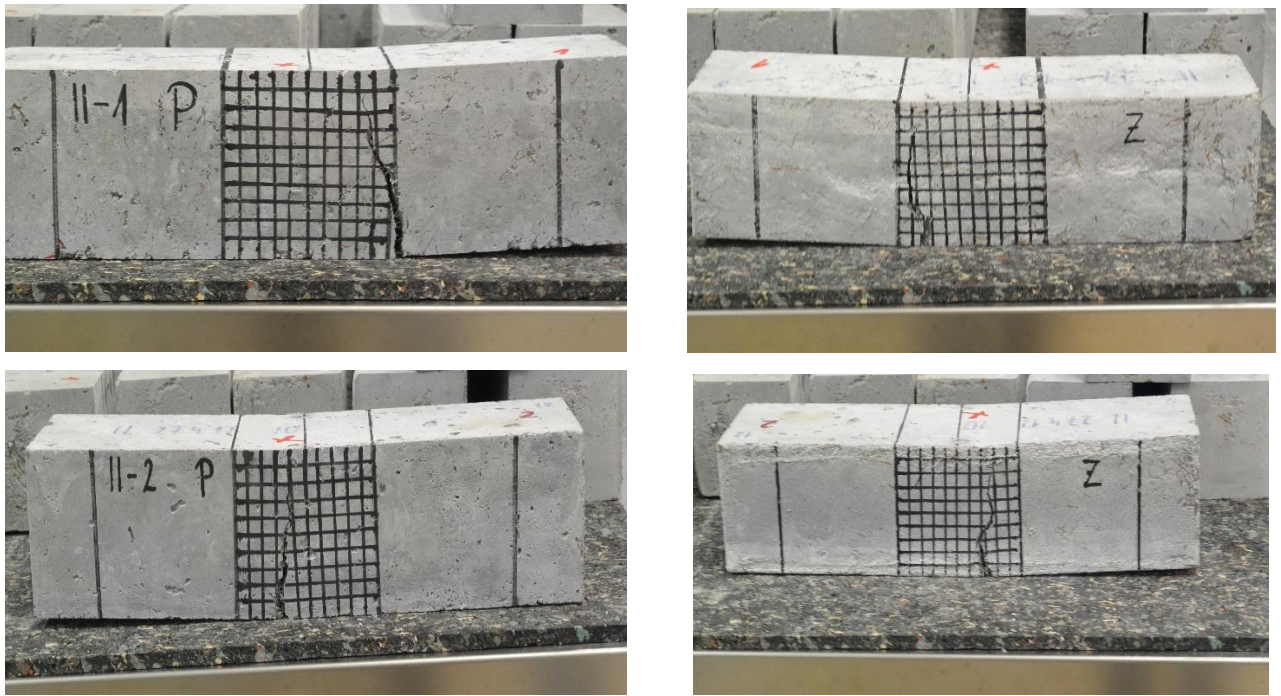
Slika 16: Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima REF mješavine (odmak od središta) [16]

Beton mješavine S1,5

Za mješavinu s 1,5% čeličnih i 0% monofilamentnih vlakana ispitana su ukupno 2 uzorka. Uzorci su ispitani brzinom nanošenja pomaka od 1,8 $\mu\text{m/s}$ do pomaka od 3500 μm . Za uzorke ojačane vlaknima specifično je to što pri pojavi prve pukotine ne dolazi do krtog sloma cijelog uzorka već materijal pokazuje svojstvo žilavosti, tj. svojstvo materijala da se plastično deformira bez krtog sloma (vidjeti Sliku 17). U Tablici 9. prikazani su rezultati ispitivanja za sve uzorke betonske mješavine S1,5 (dimenzije ispitanih prizmi, sila, pomak i naprezanje pri pojavi prve pukotine, vrijeme pojave prve pukotine mjereno od početka ispitivanja, sile sloma za svaki pojedini uzorak, pomak pri maksimalnoj sili, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardna devijacija (odstupanja od srednjih vrijednosti)). Sila, pomak i naprezanje za prvu pukotinu su određeni na temelju eksperimentalnih rezultata prema dijagramu sila-pomak na mjestu gdje je došlo do prvog pucanja vlakana u uzorku. Prikaz položaja pukotine s prednje i stražnje strane dan je na Slici 18. Maksimalni iznos sile za dva ispitana uzorka pri duktilnom slomu iznosi 51,52 kN, što daje naprezanje, tj. vlačnu čvrstoću na savijanje od 14,85 MPa. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje za dva ispitana uzorka iznosi 13,72 MPa. Standardna devijacija za čvrstoću na savijanje za ispitane uzorke iznosi 1,13 MPa. Do pojave prve pukotine u prosjeku dolazi nakon 29,7 s, pri srednjem naprezanju od 8,75 MPa. Prikaz eksperimentalno dobivenih dijagrama sila-pomak za ispitane uzorke S1,5 mješavine dan je na Slici 19.



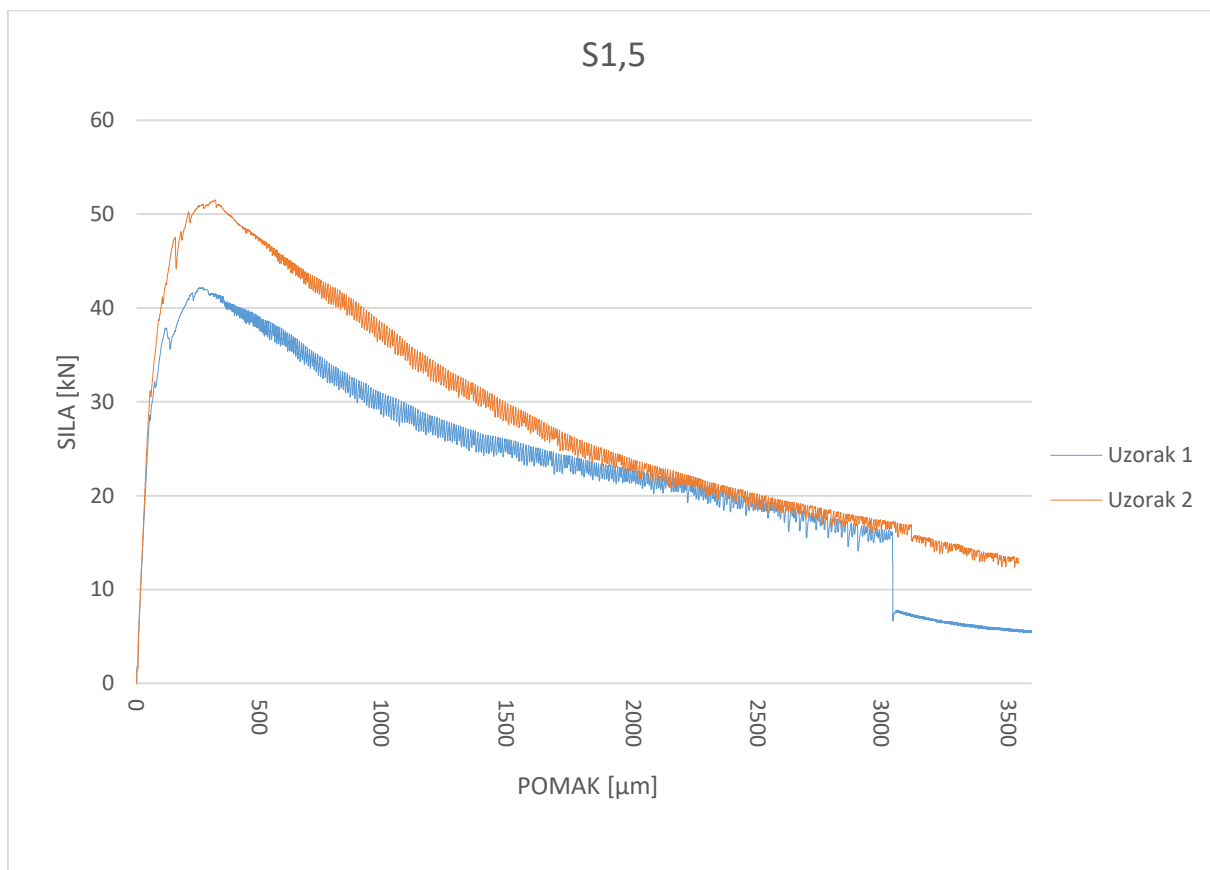
Slika 17: Svojstvo žilavosti, deformacija bez krtog sloma [17]



Slika 18: Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5 mješavine [18]

Tablica 9: Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) [9]

Br. uzorka	širina B (mm)	visina H (mm)	raspon L (mm)	prva pukotina				maksimalna vrijednost			
				silu F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	vrijeme pojave prve pukotine (s)	silu F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	brzina v ($\mu\text{m/s}$)
1	100,57	99,99	300	28,56	53,25	8,52	29,00	42,18	249,3	12,58	1,8
2	101,67	101,18	300	31,15	54	8,98	30,40	51,52	320,65	14,85	1,8
Sr.vrijednost	-	-	-	29,86	53,63	8,75	29,70	46,85	284,98	13,72	-
MAX	-	-	-	31,15	54,00	8,98	30,40	51,52	320,65	14,85	-
MIN	-	-	-	28,56	53,25	8,52	29,00	42,18	249,30	12,58	-
St.devijacija	-	-	-	1,30	0,38	0,23	0,70	4,67	35,67	1,13	-

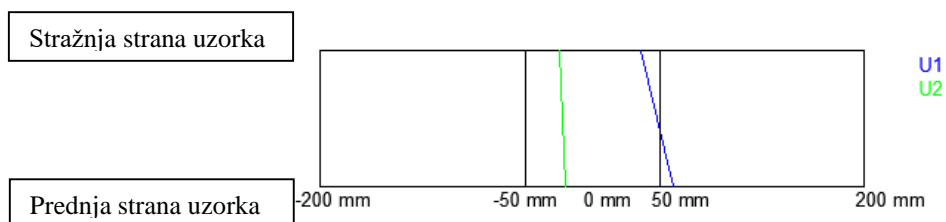


Slika 19: Dijagram sila-pomak za 2 uzorka S1,5 mješavine [19]

U Tablici 10. prikazani su odmaci pukotina na dnu uzorka s prednje i stražnje strane mjerene od središta uzorka za sve uzorke S1,5 mješavine. Na Slici 20. je dan tlocrtni prikaz pukotine na dnu uzorka za sve uzorke S1,5 mješavine.

Tablica 10: Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) [10]

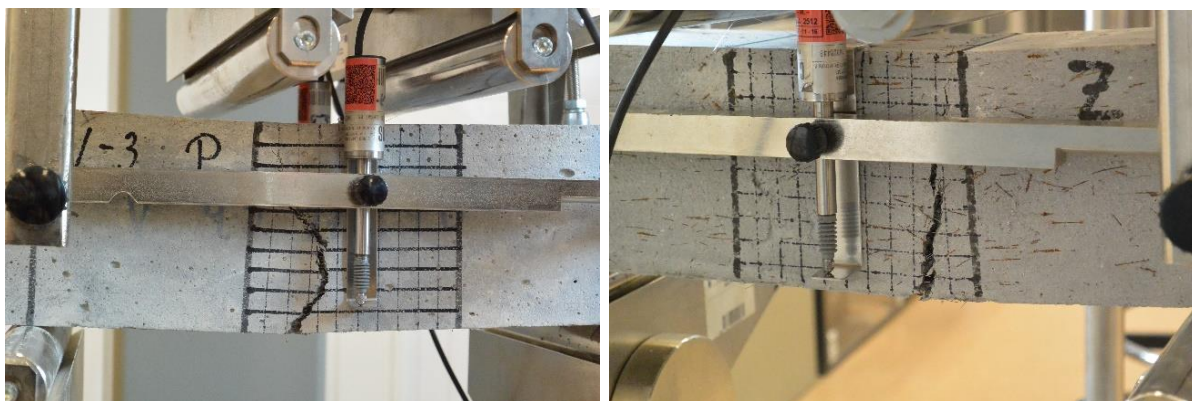
S1,5	U1	U2
Prednja strana (mm)	60	-20
Stražnja strana (mm)	35	-25



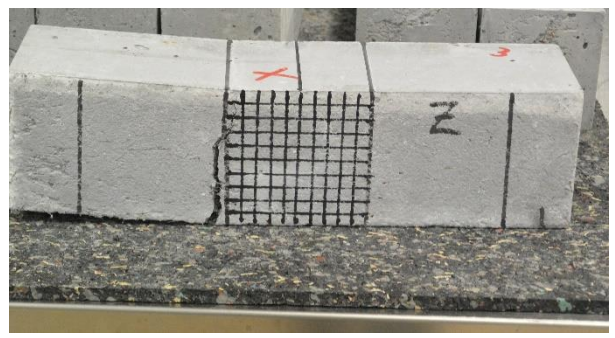
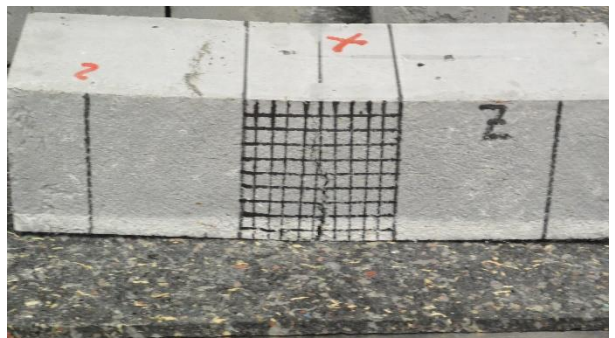
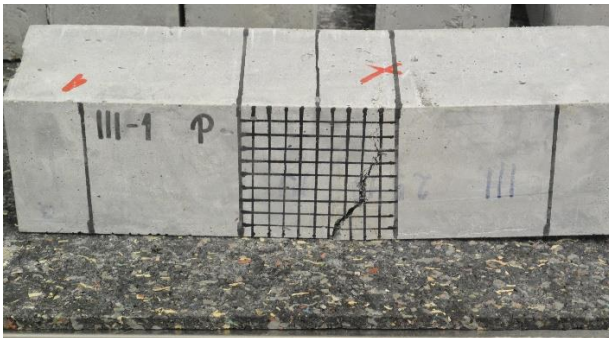
Slika 20: Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 mješavine (odmak od središta) [20]

Beton mješavine S1,5 – MF0,1

Za mješavinu s 1,5% čeličnih i 0,1% monofilamentnih vlakana ispitana su ukupno 3 uzorka. Uzorci su ispitani brzinom nanošenja pomaka od 1,8 $\mu\text{m/s}$ do pomaka od 3500 μm . Duktilni slom jednog od uzoraka mješavine vidi se na Slici 21. U Tablici 11. prikazani su rezultati ispitivanja za sve uzorke betonske mješavine S1,5-MF0,1 (dimenzije ispitanih prizmi, sila, pomak i naprezanje pri pojavi prve pukotine, vrijeme pojave prve pukotine mjereno od početka ispitivanja, sile sloma za svaki pojedini uzorak, pomak pri maksimalnoj sili, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardna devijacija (odstupanja od srednjih vrijednosti)). Prikaz položaja pukotine s prednje i stražnje strane dan je na Slici 22. Maksimalni iznos sile za tri ispitana uzorka pri duktilnom slomu iznosi 71,01 kN, što daje naprezanje, tj. vlačnu čvrstoću na savijanje od 20,95 MPa. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje za tri ispitana uzorka iznosi 17,8 MPa. Standardna devijacija za čvrstoću na savijanje za ispitane uzorke iznosi 2,41 MPa. Do pojave prve pukotine u prosjeku dolazi nakon 39,5 s, pri srednjem napreznju od 11,04 MPa. Prikaz eksperimentalno dobivenih dijagrama sila-pomak za ispitane uzorke S1,5-MF0,1 mješavine dan je na Slici 23.



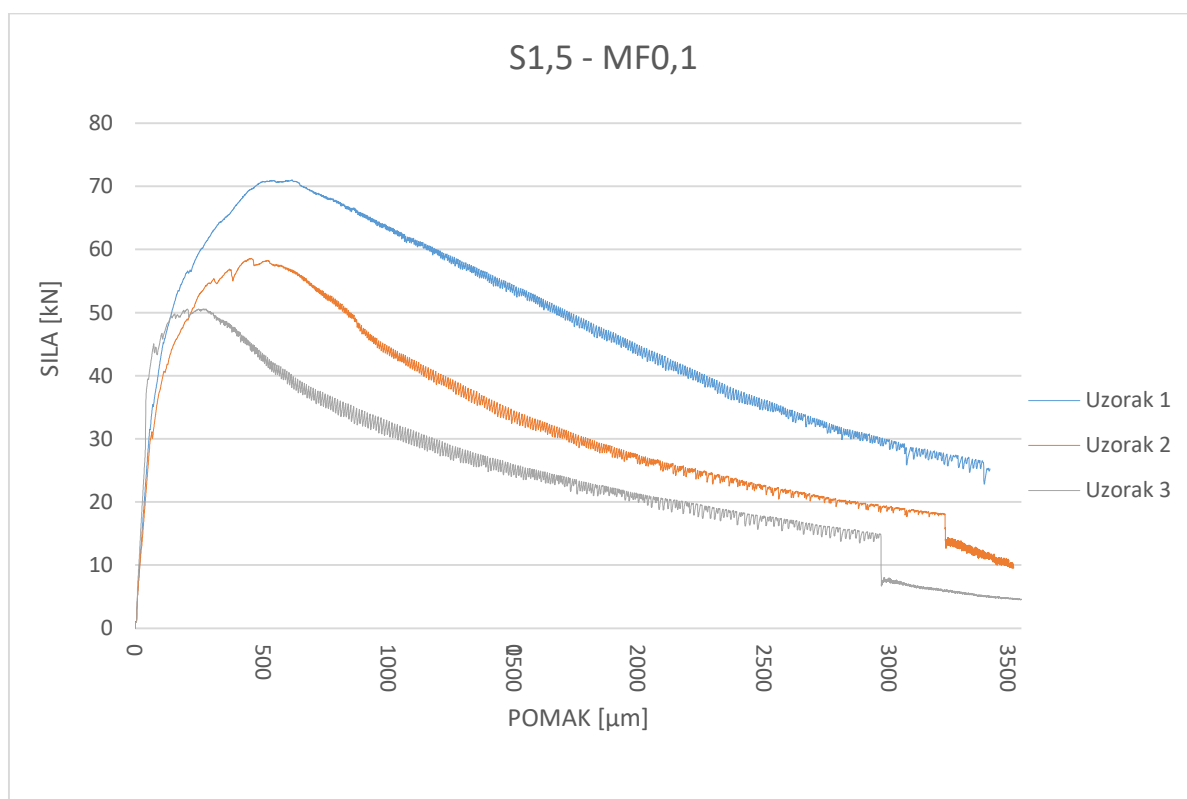
Slika 21: Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,1 [21]



Slika 22: Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,1 mješavine [22]

Tablica 11: Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,1 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) [11]

Br. uzorka	širina B (mm)	visina H (mm)	raspon L (mm)	prva pukotina				maksimalna vrijednost			brzina v ($\mu\text{m/s}$)
				sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	vrijeme pojave prve pukotine (s)	sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	
1	100,44	100,62	300	35,46	71,6	10,46	39,5	71,01	625,05	20,95	1,8
2	100,46	100,42	300	31,07	62,4	9,20	37,3	58,6	444,25	17,35	1,8
3	100,69	99,86	300	45,03	85,15	13,45	41,7	50,57	287,8	15,11	1,8
Sr.vrijednost	-	-	-	37,19	73,05	11,04	39,50	60,06	452,37	17,80	-
MAX	-	-	-	45,03	85,15	13,45	41,70	71,01	625,05	20,95	-
MIN	-	-	-	31,07	62,40	9,20	37,30	50,57	287,80	15,11	-
St.devijacija	-	-	-	5,83	9,34	1,78	1,80	8,41	137,80	2,41	-

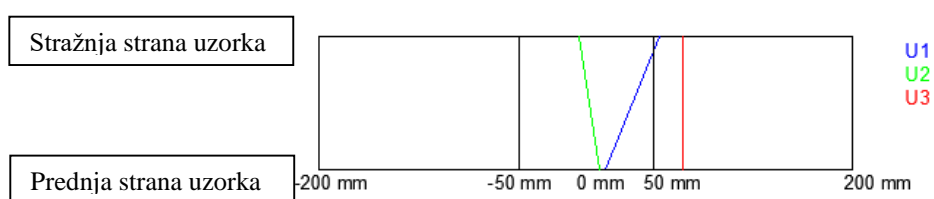


Slika 23: Dijagram sila-pomak za 3 uzorka S1,5 – MF0,1 mješavine [23]

U Tablici 12. prikazani su odmaci pukotina na dnu uzorka s prednje i stražnje strane mjerene od središta uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,1 mješavine. Na Slici 24. je dan tlocrtni prikaz pukotine na dnu uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,1 mješavine.

Tablica 12: Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) [12]

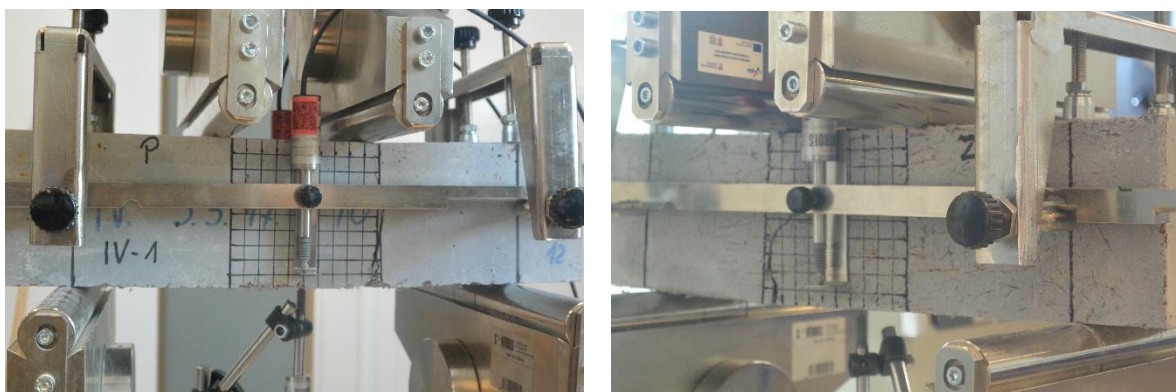
S1,5-MF0,1	U1	U2	U3
Prednja strana (mm)	15	10	60
Stražnja strana (mm)	55	-5	60



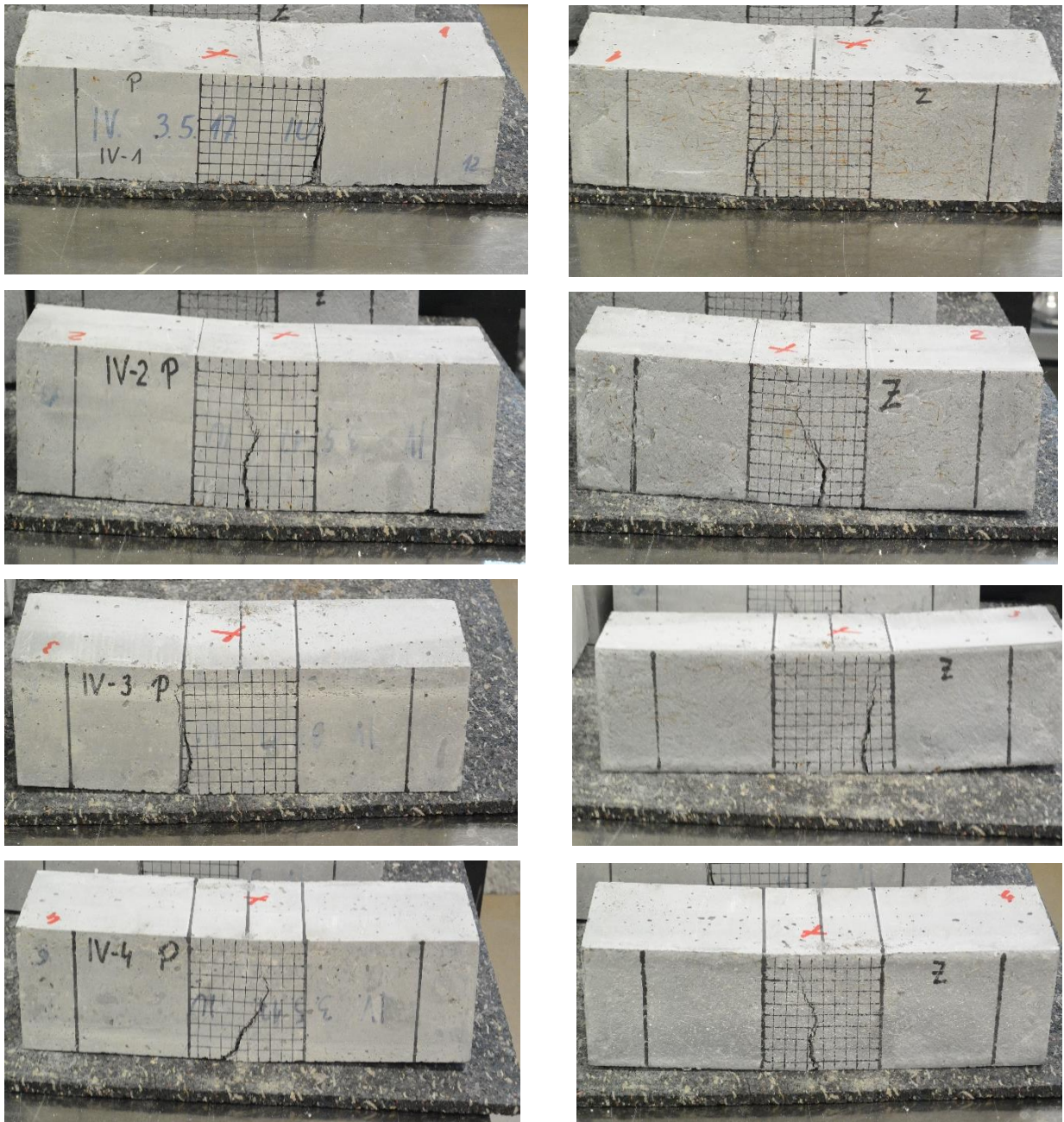
Slika 24: Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,1 mješavine (odmak od središta) [24]

Beton mješavine S1,5 – MF0,2

Za mješavinu s 1,5% čeličnih i 0,2% monofilamentnih vlakana ispitano je ukupno 4 uzorka. Uzorci su ispitani brzinom nanošenja pomaka od 1,8 $\mu\text{m/s}$ do pomaka od 3500 μm . Duktilni slom jednog od uzoraka mješavine vidi se na Slici 25. U Tablici 13. prikazani su rezultati ispitivanja za sve uzorke betonske mješavine S1,5-MF0,2 (dimenzije ispitanih prizmi, sila, pomak i naprezanje pri pojavi prve pukotine, vrijeme pojave prve pukotine mjereno od početka ispitivanja, sile sloma za svaki pojedini uzorak, pomak pri maksimalnoj sili, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardna devijacija (odstupanja od srednjih vrijednosti)). Prikaz položaja pukotine s prednje i stražnje strane dan je na Slici 26. Maksimalni iznos sile za četiri ispitana uzorka pri duktilnom slomu iznosi 62,02 kN, što daje naprezanje, tj. vlačnu čvrstoću na savijanje od 18,67 MPa. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje za četiri ispitana uzorka iznosi 15,02 MPa. Standardna devijacija za čvrstoću na savijanje za ispitane uzorke iznosi 2,47 MPa. Do pojave prve pukotine u prosjeku dolazi nakon 49,1 s, pri srednjem naprezanju od 10,44 MPa. Prikaz eksperimentalno dobivenih dijagrama sila-pomak za ispitane uzorke S1,5-MF0,2 mješavine dan je na Slici 27.



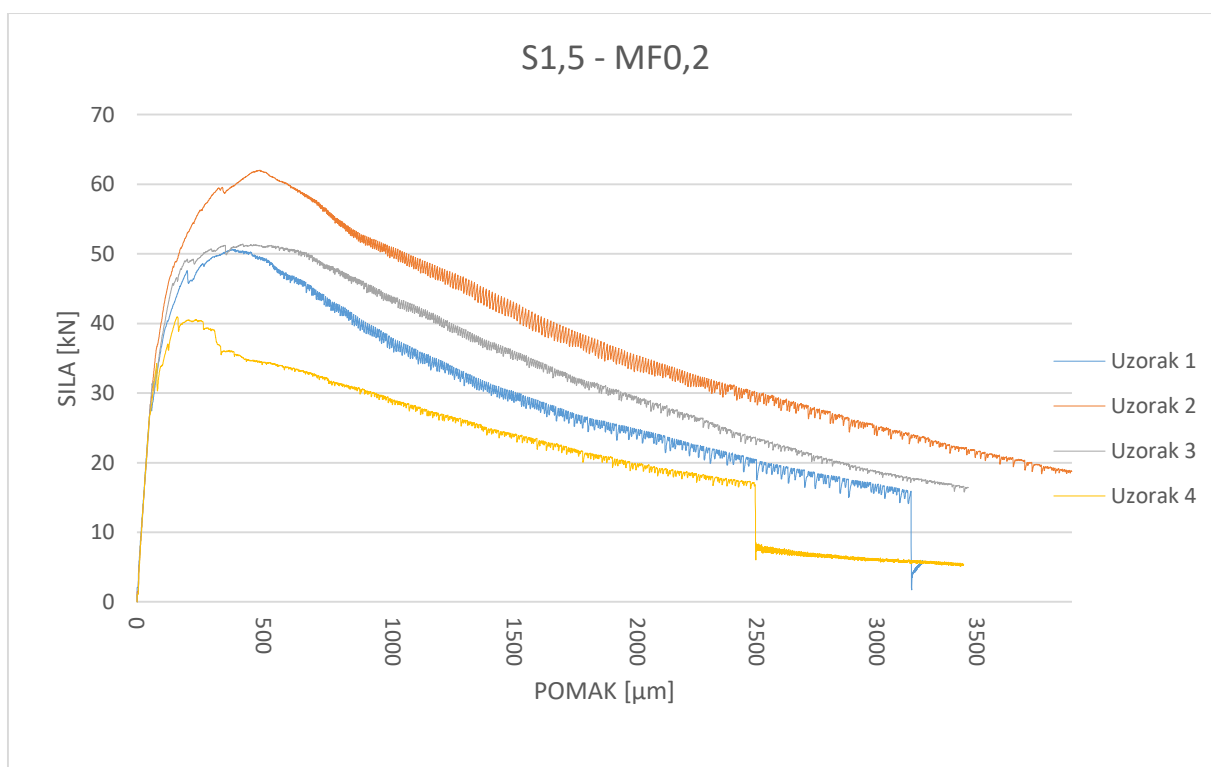
Slika 25: Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,2 [25]



Slika 26: Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,2 mješavine [26]

Tablica 13: Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,2 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) [13]

Br. uzorka	širina B (mm)	visina H (mm)	raspon L (mm)	prva pukotina				maksimalna vrijednost			brzina v ($\mu\text{m/s}$)
				sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	vrijeme pojave prve pukotine (s)	sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	
1	101,38	100,06	300	28,68	54,15	8,48	31,8	50,67	381,95	14,98	1,8
2	99,48	100,08	300	48,18	145,55	14,51	83,9	62,02	489,95	18,67	1,8
3	101,8	101,43	300	31,35	60,35	8,98	35,1	51,42	417,4	14,73	1,8
4	102,5	101,2	300	34,25	80,5	9,79	45,6	40,94	170	11,70	1,8
Sr.vrijednost	-	-	-	35,62	85,14	10,44	49,10	51,26	364,83	15,02	-
MAX	-	-	-	48,18	145,55	14,51	83,90	62,02	489,95	18,67	-
MIN	-	-	-	28,68	54,15	8,48	31,80	40,94	170,00	11,70	-
St.devijacija	-	-	-	7,52	36,21	2,40	20,73	7,46	119,03	2,47	-

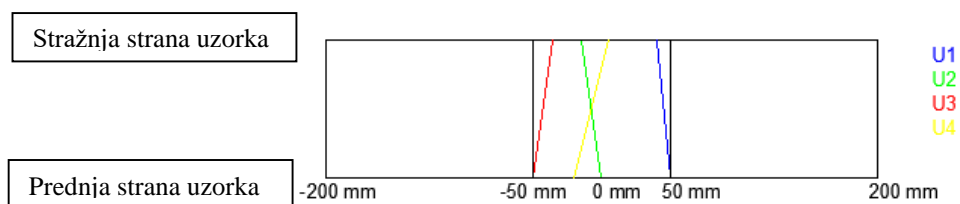


Slika 27: Dijagram sila-pomak za 4 uzorka S1,5 – MF0,2 mješavine [27]

U Tablici 14. prikazani su odmaci pukotina na dnu uzorka s prednje i stražnje strane mjerene od središta uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,2 mješavine. Na Slici 28. je dan tlocrtni prikaz pukotine na dnu uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,2 mješavine.

Tablica 14: Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) [14]

S1,5-MF0,2	U1	U2	U3	U4
Prednja strana (mm)	50	0	-50	-20
Stražnja strana (mm)	40	-15	-35	5



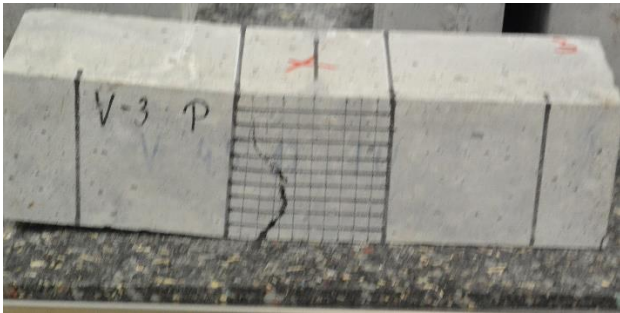
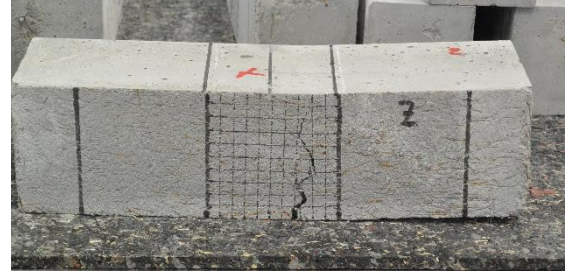
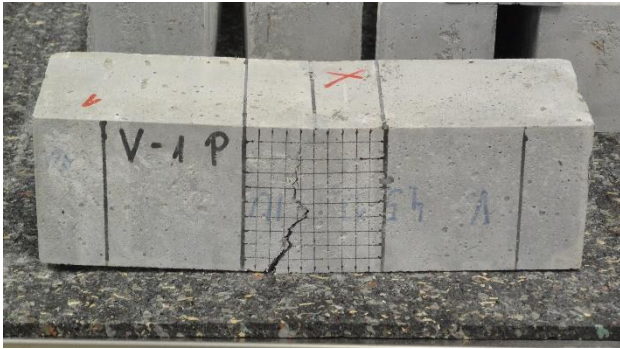
Slika 28: Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,2 mješavine (odmak od središta) [28]

Beton mješavine S1,5 – MF0,3

Za mješavinu s 1,5% čeličnih i 0,3% monofilamentnih vlakana ispitana su ukupno 3 uzorka. Uzorci su ispitani brzinom nanošenja pomaka od 1,8 $\mu\text{m/s}$ do pomaka od 3500 μm . Duktilni slom jednog od uzoraka mješavine vidi se na Slici 29. U Tablici 15. prikazani su rezultati ispitivanja za sve uzorke betonske mješavine S1,5-MF0,3 (dimenzije ispitanih prizmi, sila, pomak i naprezanje pri pojavi prve pukotine, vrijeme pojave prve pukotine mjereno od početka ispitivanja, sile sloma za svaki pojedini uzorak, pomak pri maksimalnoj sili, izračunate vrijednosti čvrstoće na savijanje i standardna devijacija (odstupanja od srednjih vrijednosti)). Prikaz položaja pukotine s prednje i stražnje strane dan je na Slici 30. Maksimalni iznos sile za tri ispitana uzorka pri duktilnom slomu iznosi 68,06 kN, što daje naprezanje, tj. vlačnu čvrstoću na savijanje od 19,96 MPa. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje za tri ispitana uzorka iznosi 15,26 MPa. Standardna devijacija za čvrstoću na savijanje za ispitane uzorke iznosi 3,33 MPa. Do pojave prve pukotine u prosjeku dolazi nakon 38,1 s, pri srednjem naprezanju od 8,85 MPa. Prikaz eksperimentalno dobivenih dijagrama sila-pomak za ispitane uzorke S1,5-MF0,3 mješavine dan je na Slici 31.



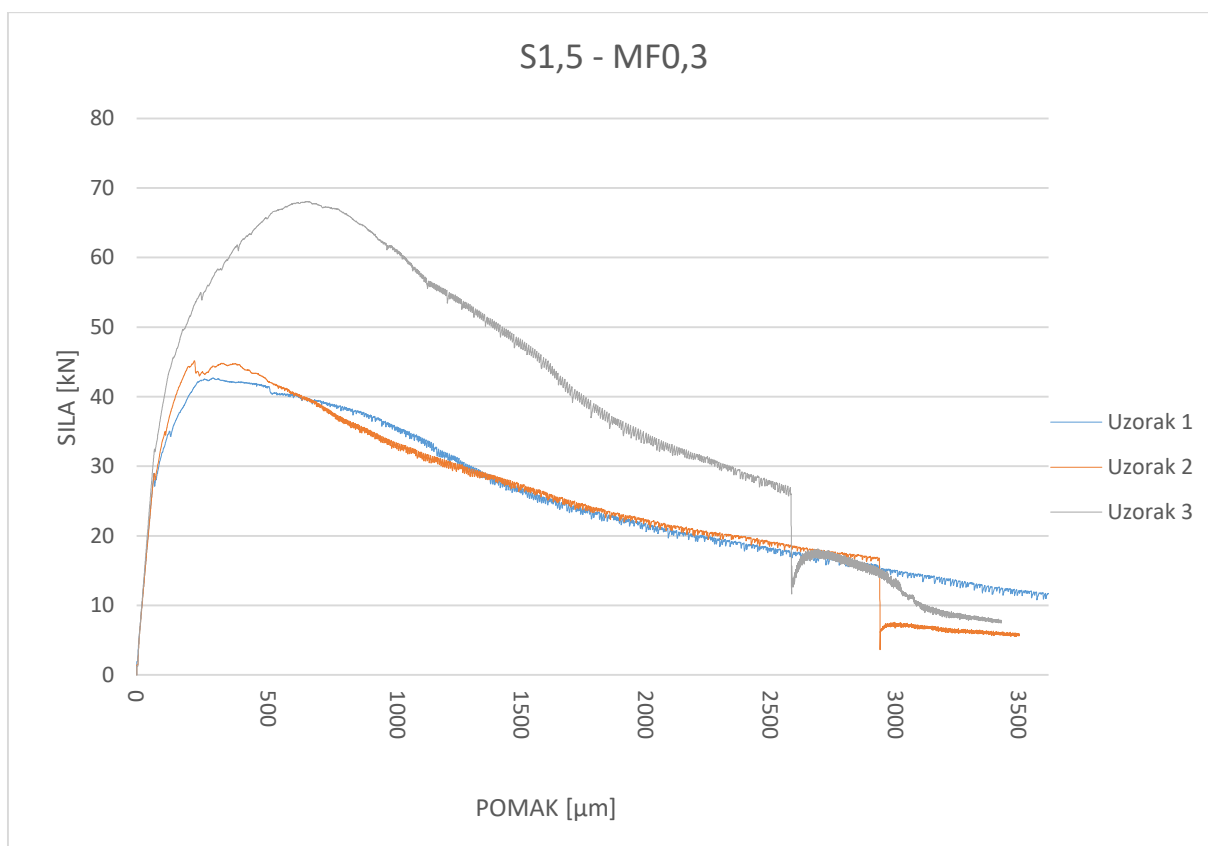
Slika 29: Duktilni slom uzorka mješavine S1,5-MF0,3 [29]



Slika 30: Položaj pukotine s prednje strane (lijevo) i sa stražnje strane (desno) za uzorke S1,5–MF0,3 mješavine [30]

Tablica 15: Prikaz parametara za računanje vlačne čvrstoće na savijanje S1,5 – MF0,3 uzorka (pojava prve pukotine i maksimalno dostignute vrijednosti) [15]

Br. uzorka	širina B (mm)	visina H (mm)	raspon L (mm)	prva pukotina				maksimalna vrijednost			brzina v ($\mu\text{m/s}$)
				sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	vrijeme pojave prve pukotine (s)	sila F_{max} (kN)	pomak δ (μm)	naprezanje σ (MPa)	
1	100,3	100,78	300	28,96	63,05	8,53	37	42,7	284,05	12,57	1,8
2	101,23	100,52	300	28,97	64,45	8,50	38,4	45,17	219,05	13,25	1,8
3	100,35	100,97	300	32,49	68,05	9,53	38,9	68,06	647,75	19,96	1,8
Sr.vrijednost	-	-	-	30,14	65,18	8,85	38,10	51,98	383,62	15,26	-
MAX	-	-	-	32,49	68,05	9,53	38,90	68,06	647,75	19,96	-
MIN	-	-	-	28,96	63,05	8,50	37,00	42,70	219,05	12,57	-
St.devijacija	-	-	-	1,66	2,11	0,48	0,80	11,42	188,65	3,33	-

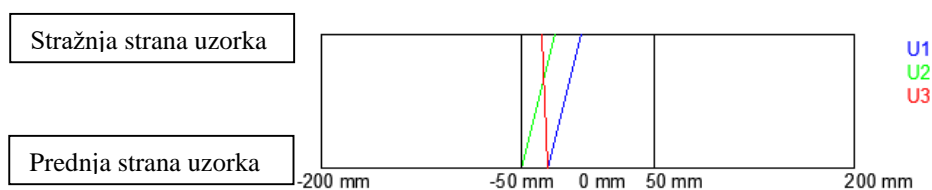


Slika 31: Dijagram sila-pomak za 3 uzorka S1,5 – MF0,3 mješavine [31]

Tablici 16. prikazani su odmaci pukotina na dnu uzorka s prednje i stražnje strane mjerene od središta uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,3 mješavine. Na Slici 32. je dan tlocrtni prikaz pukotine na dnu uzorka za sve uzorke S1,5-MF0,3 mješavine.

Tablica 16: Prikaz mjesta nastanka pukotina (odmak od središta uzorka) [16]

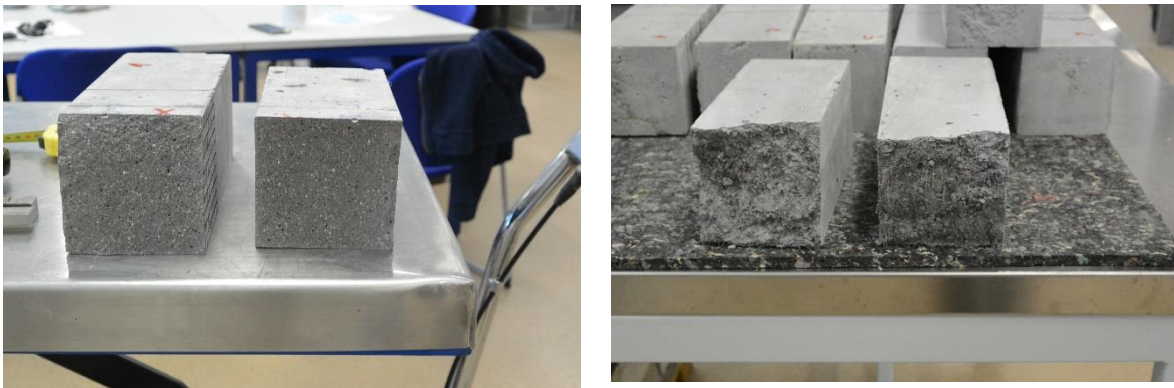
S1,5-MF0,3	U1	U2	U3
Prednja strana (mm)	-35	-50	-30
Stražnja strana (mm)	-15	-25	-35



Slika 32: Tlocrtni prikaz nastanka pukotina na uzorcima S1,5 – MF0,3 mješavine (odmak od središta) [32]

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Slom uzoraka pri ispitivanju čvrstoće savijanjem se uvelike razlikuje za uzorke REF mješavine i uzorke preostalih mješavina. Uzorci REF mješavine nakon iniciranja pukotine popuštaju naglo a nastala ploha sloma je glatka i ravna što upućuje na kruti oblik slom. Nasuprot tome, za uzorke s vlaknima do sloma dolazi postepeno jer vlakna premošćuju pukotine a ploha sloma je neravna. Na Slici 33. prikazan je slomljen uzorak bez vlakana i uzorak s vlaknima.



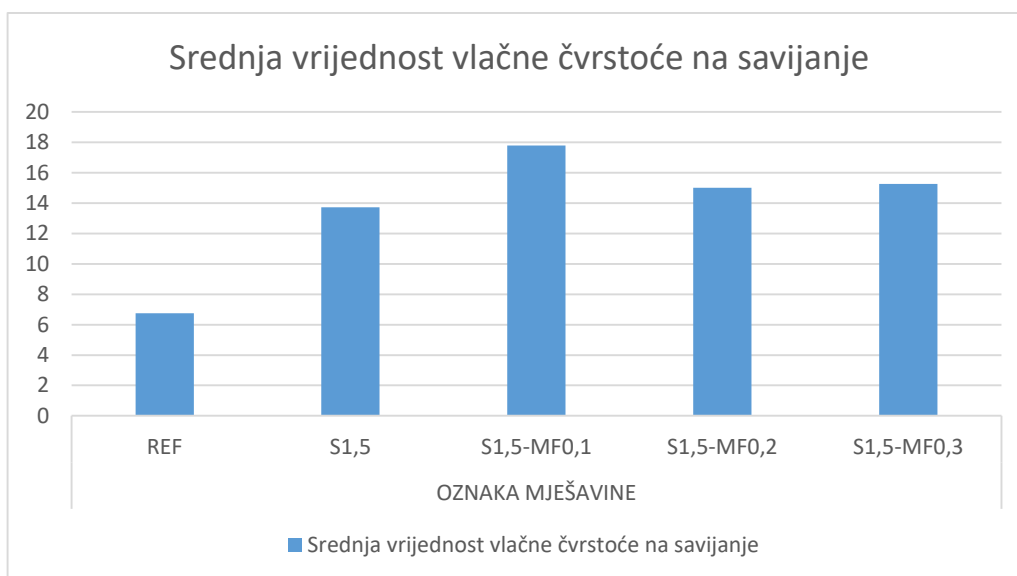
Slika 33: Ravnost površina normalnog betona (lijevo), неправиан slom i popucala vlakna (desno) [33]

Srednje vrijednosti gustoće i vlačne čvrstoće savijanjem prikazani su u Tablica 17. Na temelju rezultata ispitivanja možemo zaključiti:

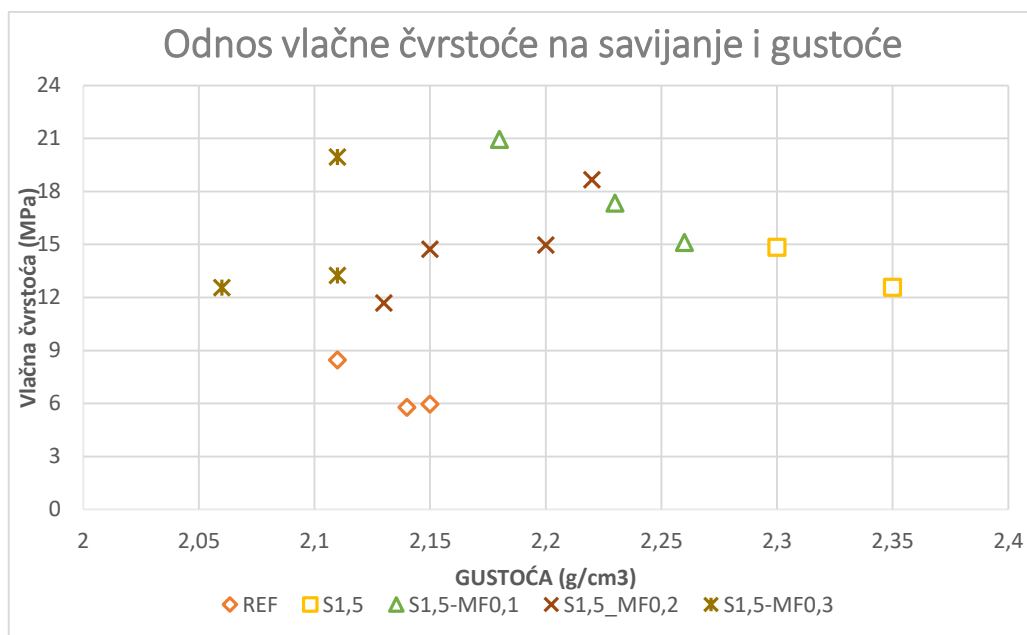
- Gustoća svih mješavina mikroarmiranog betona je veća u odnosu na gustoću referentne mješavine osim za slučaj mješavine s 1,5% čeličnih vlakana i 0,3% monofilamentnih vlakana gdje je gustoća manja od gustoće referentne mješavine. Najveća gustoća je u mješavini sa samo čeličnim vlaknima te dodavanjem sve većeg udjela polipropilenskih vlakana dolazi do trenda smanjenja gustoće uzoraka. Jedan od problema pri spravljanju mikroarmiranih betonskih mješavina je taj što je teško postići jednoliki raspored vlakana u mješavini i sama ugradnja vlakana je problem. [1]
- Dodatkom 1,5% čeličnih vlakana vlačna čvrstoća na savijanje povećana je za 100% u odnosu na referentni beton. Najveću vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje ima hibridna mješavina s volumnim udjelom 1,5% čeličnih vlakana i 0,1% polipropilenskih vlakana. U odnosu na referentni beton bez vlakana vlačna čvrstoća je veća za više od 2,5 puta, odnosno 29% veća od mješavine samo s čeličnim vlaknima. Dodavanjem sve većeg udjela polipropilenskih vlakana u mješavine smanjuje se vlačna čvrstoća na savijanje hibridnog betona, ali je svejedno veća od vlačne čvrstoće mješavine armirane jednom vrstom vlakana. Odnos vlačne čvrstoće na savijanje svih mješavina dan je u obliku stupčastog dijagrama na Slici 34.
- Rezultati vlačne čvrstoće na savijanje za svaki ispitani uzorak pokazuju rasipanje rezultata od srednje vrijednosti (prikazano mjerom standardne devijacije). Rasipanje rezultata vlačne čvrstoće savijanjem za referentni beton i beton armiran samo jednom vrstom vlakana je maleno (st.dev za REF beton je 1,22 a za S1,5 1,13). Kod hibridnog betona povećanjem volumnog udjela vlakana odstupanja postaju sve veća. Tako za mješavinu s 1,5% čeličnih i 0,3% polipropilenskih vlakana (S1,5 - MF0,3) odstupanja od srednje vrijednosti su najveća s iznosom st. dev. od 3,33 MPa
- Vlačna čvrstoća na savijanje i gustoća nisu u nikakvoj korelaciji. Na Slici 35. prikazani su rezultati gustoće i vlačne čvrstoće na savijanje gdje se ne vidi nikakav trend, tj. gustoća ne utječe izravno na vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje.

Tablica 17: Rezultati ispitivanja [17]

	OZNAKA MJEŠAVINE				
	REF	S1,5	S1,5-MF0,1	S1,5-MF0,2	S1,5-MF0,3
	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
Srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje	6,74	13,72	17,8	15,02	15,26
Standardna devijacija	1,22	1,13	2,41	2,47	3,33
Srednja vrijednost gustoće	2,13	2,33	2,22	2,18	2,09



Slika 34: Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće na savijanje [34]



Slika 35: Odnos vlačne čvrstoće savijanjem i gustoće [35]

5. ZAKLJUČAK

Korištenje jedne vrste vlakana ili kombinacija hibridnih vlakana pozitivno utječu na poboljšanje vlačne čvrstoće na savijanje u odnosu na normalni beton. Kod normalnog betona dolazi do krčkog sloma, tj. pri pojavi prve pukotine dolazi do sloma cijelog uzorka. Kod betona armiranog vlaknima nakon pojave prve pukotine ne dolazi do krčkog sloma, već se ističe svojstvo duktilnosti i žilavosti, tj. da uzorak nakon pojave prve pukotine plastično deformira bez loma cijelog uzorka, naprezanje preuzimaju vlakna koja nisu popucala. Na temelju ovog istraživanja je zaključeno da hibridna vlakana poboljšavaju neka osnovna mehanička svojstva kao što je vlačna čvrstoća betona savijanjem. Dodavanjem prevelikog udjela polipropilenskih vlakana negativno utječe na vlačnu čvrstoću na savijanje. Prema tome, da bi se postigla željena poboljšanja odgovarajućih svojstava očvrstnulo hibridnog betona treba izabrati odgovarajuću vrstu vlakana i optimalni volumni udio hibridnih vlakana.

6. LITERATURA

- [1] Bede N., Ušić I., Mrakovčić S., *Utjecaj hibridnih vlakana na mehanička svojstva betona*, GF Zbornik radova, Rijeka, 2009.
- [2] Moghimi G., *Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete*, Master of Science in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Gazimagusa, North Cyprus, 2014.
- [3] Kumbhar D., Ganbavale M., Jain A., Reddy R., Gayathri S., *Compressive Strength of Hybrid fibre reinforced concrete*, Project report, Birla Institute of Technology and Science, Pilani. 2014-2015.
- [4] Selvi T, Thandavamoorthy, T.S. *Mechanical and Durability Properties of Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete*. International Journal of Earth and Space Sciences and Engineering, 2014, 696-703.
- [5] Kanagavel, R., Kalidass, A. *Mehanička svojstva hibridnog mikroarmiranog betona s miješanim cementom*, Građevinar 69(2017) 1,1-10
- [6] Smolčić, Z., *Modeliranje betona armiranog čeličnim vlaknima: trodimenzionalni numerički mezo-model*, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.
- [7] Ušić, I., *Prodor klorida kroz mikroarmirani beton visoke čvrstoće*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.
- [8] R.H. Mohankar, M.D. Pidurkar, P.V. Thakre, S.S. Pakhare, *Hybrid fibre reinforced concrete*, International Journal of Science, Engineering and Technology Research, College of Engineering, Nagpur, 2016.
- [9] Sureshkumar N., Gurupandi M., P. Senthil K., K.A. Ragul, M. Muni S., *Past Investigations on Mechanical and Durability Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete*, International Journal of Civil Engineering and Technology 10(3), 2019, pp. 1–10.

[10] HRN EN 12350-5:2009. *Ispitivanje očvrsnuloga betona - 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje*, Hrvatski zavod za norme, 2009.

[11] ASTM C 1018 - 97. *Flexural and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*-American Standard, GRD Journals- Global Research and Development Journal for Engineering, Iraq, 2019.

[12] Skazlić M., *Development and Application of Hybrid Fibre Reinforced Concrete*, Sustainable Construction Materials and Technologies / Zachar, John ; Claisse, Peter ; Naik, Tarun R. ; Ganjian, Eshmaiel - Ancona, Italy : UWM Center, 2010, 1843-1850

[13] Bošnjak J., Sharma A., Grauf K., *Mechanical Properties of Concrete with Steel and Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures*, Fibers, Stuttgart, Germany, 2019.