

Utjecaj mikroarmature na svojstva 3D printanog betona

Božiković, Vini

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:601408>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD
UTJECAJ MIKROARMATURE NA SVOJSTVA
3D PRINTANOG BETONA

Vini Božiković

Zagreb, 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ MIKROARMATURE NA SVOJSTVA 3D PRINTANOG BETONA

Mentor:

prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur

Student:

Vini Božiković



TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta:

JMBAG:

Završni ispit iz predmeta:

Naslov teme
završnog ispita:

HR	
ENG	

Opis teme završnog ispita:

Datum:

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

SAŽETAK

Glavna svrha rada je obrada standardnih ispitivanja koja se provode na 3d printanom betonu. U uvodnom, teorijskom dijelu prikazani su i objašnjeni osnovni pojmovi koje vežemo uz 3D beton. Također, prikazana je tehnologija izvedbe takvog betona te njegova svojstva. Uz teorijski dio, provedeno je eksperimentalno istraživanje. U eksperimentalnom dijelu opisane su četiri mješavine betona te su provedena ispitivanja na vlačnu čvrstoću savijanjem i tlačnu čvrstoću. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama te je analiziran utjecaj vlakana na mikroarmiranje. Iz provedenih ispitivanja zaključujemo kako mikroarmatura može djelovati pozitivno i negativno na svojstva 3D printanog betona.

Ključne riječi: 3D printani beton, eksperimentalno istraživanje, savojna čvrstoća, tlačna čvrstoća, mikroarmiranje

SUMMARY

The main purpose of the work is the processing of standard tests that are carried out on 3D printed concrete. In the introductory, theoretical part, the basic terms associated with 3D concrete are presented and explained. Also, the technology of such a concrete performance and its properties are presented. In addition to the theoretical part, experimental research was carried out. In the experimental part, four concrete mixes were described and flexural strength and compressive strength tests were performed. The test results are presented in tables and the influence of fibers on microreinforcement was examined. From the conducted tests, we conclude that microreinforcement can have a positive and negative effect on the properties of 3D printed concrete.

Key words: 3D printed concrete, experimental research, flexural strength, compressive strength, microreinforcement

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. TEORIJSKI DIO	3
2.1. TEHNOLOGIJA IZVEDBE	3
2.2. KOMPONENTE MJEŠAVINE BETONA	5
2.2.1. Cement	5
2.2.2. Agregat	5
2.2.2. Voda	5
2.2.2. Dodaci betonu	6
2.2.4.1. Kemijski dodaci	6
2.2.4.2. Mineralni dodaci	6
2.2.4.3. Vlakna za mikroarmiranje	7
2.3. SVOJSRVA 3D PRINTANOG BETONA	8
3. EKSPERIMENTALNI DIO	9
3.1. CILJ ISTRAŽIVANJA	9
3.2. ISPITANE MJEŠAVINE	9
3.2.1. Mješavina M-1	10
3.2.2. Mješavina M-2	14
3.2.2. Mješavina M-3	16
3.2.2. Mješavina M-4	18
3.3. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA	20
3.3.1. Vlačna čvrstoća savijanjem	20
3.3.2. Tlačna čvrstoća	23
3.4. UTJECAJ MIKROARMATURE NA SVOJSTVA 3D PRINTANOG BETONA	26
4. ZAKLJUČAK	30
5. LITERATURA	31
POPIS SLIKA	32
POPIS TABLICA	33

1. UVOD

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, aditivna proizvodnja, nadaleko poznata kao 3D printanje, privukla je pozornost istraživača iz cijelog svijeta zbog njegove sposobnosti transformacije crtež u predmet. [1] Ova tehnologija kombinira tradicionalne građevinske materijale, poput betona, s naprednim postupkom slojevitog dodavanja materijala. Najveće promjene koje ova tehnologija donosi su ugradnja betona bez oplata i bez vibriranja ugrađenog betona. Glavna prednost korištenja 3D printanja u građevinskoj industriji je ušteda mnogih proizvodnih troškova na materijalnom otpadu. To je zato što 3D printer, kao što su robotske ruke, koristi točno onu količinu materijala koja im je potrebna. Također, velika prednost koju ovakva tehnologija donosi u građevinarstvo je znatno smanjenje ljudskog rada, a s time i utjecaja ljudskih pogrešaka, smanjenje vremena gradnje, a u konačnici i smanjenje troškova gradnje.[1] Nadalje, s 3D printanim betonom moguće je izgraditi kompleksne projekte. Nevjerojatna prednost te tehnologije je i brzina. Također, najveća prednost 3D printanog betona očituje se u proizvodnji predgotovljenih betonskih elemenata za koje nisu više potrebne skupe proizvodne linije, već se ti elementi mogu proizvoditi odmah na gradilištu. [2]

Kako bi gradnja bila održiva i uspješna, materijali za 3D printanje moraju imati mogućnost brzog očvršćavanja, odgovarajuću čvrstoću, otpornost na pojavu pukotina i određenu veličinu čestica. No da bi svaki materijal uspješno ispunio potrebne zahtjeve, potrebno je pronaći odgovarajuću mješavinu. U ovom radu, uz opis teorijskog dijela o 3D printanom betonu, provest će se i eksperimentalno istraživanje različitih mješavina betona s mineralnim i kemijskim dodatcima što će na kraju rezultirati odabirom one s najboljim svojstvima za tehnologiju 3D printanja. [1-4]

2. TEORIJSKI DIO

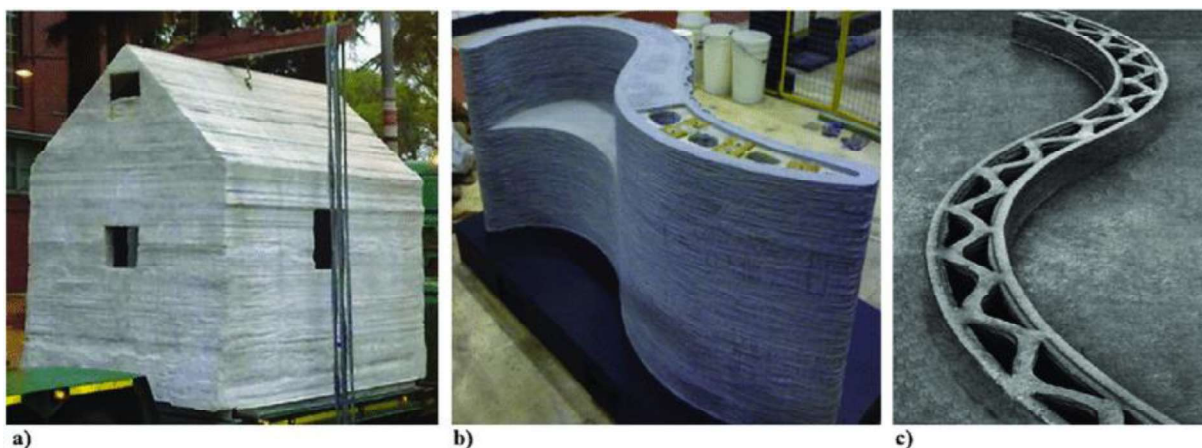
2.1. TEHNOLOGIJA IZVEDBE

Dosad razvijene, glavne metode 3D printanja betona su: Contour Crafting (CC), Concrete Printing (CP) i D-Shape (Slika 1). [5]

Contour Crafting (CC) je metoda slojevite gradnje za izradu građevina velikih dimenzija s glatkom površinom. Takva metoda razvijena je za automatizaciju izgradnje struktura cijele kuće uključujući elektriku, vodovod, suhozid i izolaciju, a također smanjuje troškove gradnje, povećava brzinu gradnje, daje više fleksibilnosti za arhitektonski dizajn i osigurava sigurno i prijateljsko okruženje.

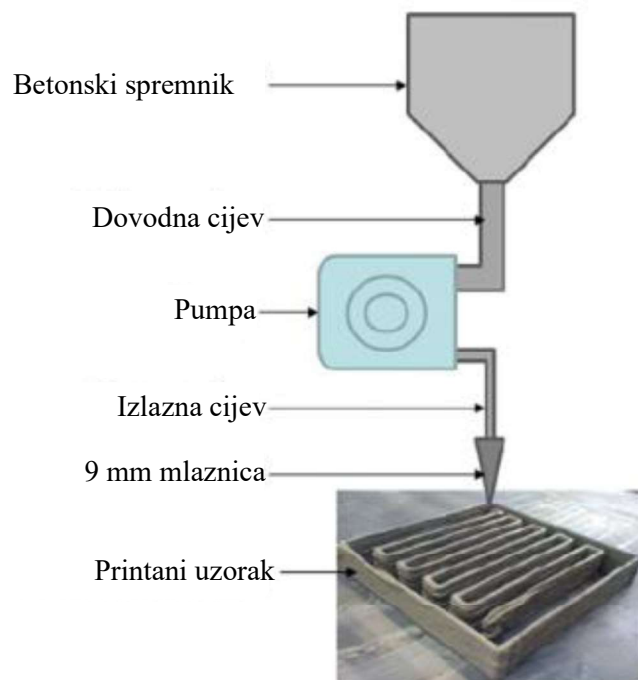
Concrete Printing je istiskivanje cementnog morta. Proces je razvijen da zadrži 3D slobodu, s manjom rezolucijom u nanošenju, što omogućuje veću kontrolu unutarnjih i vanjskih dimenzija i oblika.

D_shape tehnika koristi selektivno nanošenje praškastih komponenti otvrdnutih lokalnim nanošenjem vezivnog materijala. Svaki sloj materijala postavlja se na potrebnu debljinu i zbija, a zatim se mlaznicama pričvršćenim na okvir nanosi vezivo na mjesto gdje dio treba biti čvrst. [5]



Slika 1 Glavne metode 3D printanja betona. a) D-shape metoda, b) Concrete printing metoda i c) Contour Crafting metoda

Proces printanja 3D printerom za betonske konstrukcije sastoji se od tri faze: priprema printanja, priprema materijala i printanje. Pripremljena mješavina betona se kroz sustav cijevi transportira pod pritiskom pumpe do mlaznice na glavi printera kroz koju se istiskuju tanke, kontinuirane betonske niti koje zajedno tvore betonske slojeve, koji tvore čitavi betonski element (Slika 2.). [1] Prvi korak u procesu izrade 3D printanog betona je digitalno modeliranje strukture koja se želi izgraditi. Sljedeći korak je priprema betonske mješavine koja će se koristiti za 3D printanje. Ovisno o projektu i zahtjevima, betonska mješavina se može sastojati od cementa, agregata, vode i aditiva. Nakon pripreme betonske mješavine i podešavanja printera, može započeti proces 3D printanja. Printer postupno polaže betonsku mješavinu sloj po sloj, prema digitalnom modelu. Nakon što se slojevi polažu, potrebno je pričekati da beton očvrсне prije nego što se nastavi s dodavanjem sljedećih slojeva. Nakon završetka 3D printanja, struktura se može dodatno obraditi, poput brušenja ili nanošenja zaštitnih premaza, kako bi se postigao željeni izgled i trajnost.



Slika 2. Shema procesa 3D printanja betona [11]

2.2. KOMPONENTE MJEŠAVINE BETONA

2.2.1. Cement

Cement je praškasti materijal, koji pomiješan s vodom (cementna pasta), kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrsnuli cementni kamen. Smatra se osnovnim vezivnim sredstvom u betonu. Proizvodi se pečenjem sirovine u rotacijskim pećima pod visokom temperaturom. Cement u betonu ima dvije glavne zadaće, a to su: slijepiti zrna agregata i betonu dati odgovarajuću čvrstoću te ispuniti prostor među česticama agregata i s njime tvoriti nepropusnu masu. U betonu uzrokuje skupljanje i puzanje. [6]

U eksperimentalnom dijelu ovog rada korišten je cement CEM I 42,5 R Primus proizvođača Holcim Hrvatska.

2.2.2. Agregat

U građevinarstvu, agregati se opisuju kao mineralni ili organski dodatci koji pomiješani s različitim vezivima služe za proizvodnju građevnih materijala. Za 3D printani beton izuzetno je bitan granulometrijski sastav jer ova vrsta betona zahtjeva sitna zrna granulacije 0-2 mm. Uz odgovarajući granulometrijski sastav, agregat treba biti čvrst, tvrd i žilav. Izuzetno je bitan u betonu jer zrna agregata čine skelet koji daje krutost betonu, daje dimenzionalnu stabilnost tj. umanjuje dugotrajne volumne promjene svojstvene za cementni kamen i relativno je jeftin pa to osigurava ekonomičnost betonskih konstrukcija. [6]

2.2.2. Voda

Količina vode u betonu je izuzetno bitna jer ima zadaću reguliranja viskoznosti betona. Ukoliko je količina vode u betonu veća nego što je to potrebno za hidrataciju cementa, dolazi do povećanja količina pora, a time se smanjuje čvrstoća i trajnost betonskih konstrukcija. [6]

2.2.2. Dodaci betonu

Dodatci za beton su tvari koje se dodaju tijekom miješanja ili transporta betona da bi modificirali svojstva svježeg ili očvrtnulog betona.

Dodatci za beton dijele se na kemijske i mineralne.

2.2.4.1. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci su materijali kojim se modificiraju svojstva svježeg i/ili očvrtnulog betona, a dodaju se za vrijeme miješanja u malim količinama u postotku na masu cementa. Prema sastavu se dijele na površinski aktivne tvari i topljive kemikalije. Prema namjeni dijele se na: plastifikatore, superplastifikatore, aerante, ubrzivače vezivanja, usporivače vezivanja... U ovom eksperimentalnom istraživanju se koristio superplastifikator koji je značajan za povećanje obradivosti smjese, te smanjivanje potrebe za vodom. [7]

2.2.4.2. Mineralni dodaci

Mineralni dodaci su fino usitnjeni materijali koji se dodaju radi poboljšanja nekih svojstava ili za dobivanje specijalnih svojstava betona. Dodaju se u velikim količinama na masu cementa. Dijele se na prirodne i industrijske; leteći pepeo i silicijska prašina koji su također korišteni u eksperimentalnom istraživanju pripadaju u skupinu sekundarnih proizvoda iz industrije.

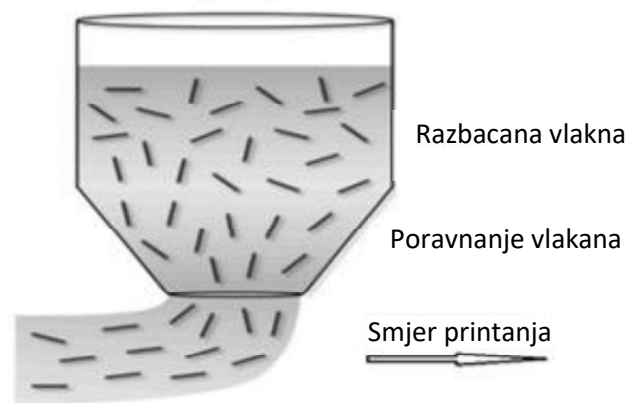
Leteći pepeo nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen koji mora prethodno biti samljeven. Poboljšavaju svojstva betona na dva načina: fizikalnim efektom povezanog s povišenjem udjela finih čestica – čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa i pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama. Zbog sitnijih čestica, povećava se obradivost smjese i smanjuje potreba za vodom.

Silicijska prašina sastoji se od vrlo finih čestica nastalih kao sporedni proizvod pri proizvodnji silicijskih ferosilicijskih legura. Sitne čestice povećavaju kohezivnost, obradivost, čvrstoću i popunjavaju unutarnju strukturu. S tim karakteristikama se omogućuje smanjenje propusnosti. Smatra se najkvalitetnijim pucolanom s najvećom aktivnošću, a tvari koje pripadaju skupini pucolana imaju svojstvo kemijske reakcije s vapnom. [7]

2.2.4.3. Vlakna za mikroarmiranje

Uobičajeni građevinski materijali na bazi portland cementa pokazuju visoku tlačnu čvrstoću, ali su niži u pogledu vrijednosti vlačne i savojne čvrstoće. Kako bi se postigla veća vlačna i savojna čvrstoća, bez upotrebe čelične armature, pri izvedbi 3D printanog betona dodaju se različita vlakna. [7] Vlakna za mikroarmiranje mogu biti čelična, mikrosintetička (polipropilenska) ili makrosintetička, a korištenjem bilo kojih od njih poboljšavaju se svojstva betonske konstrukcije jer se miješanjem vlakana s betonima ona ravnomjernije od klasične armature distribuiraju u betonskoj mješavini i stvaraju pravilnu prostornu matricu koja daje potrebnu čvrstoću, otpornost i dugotrajnost betonu (Slika 3.). [9]

U eksperimentalnom istraživanju koristila su se polipropilenska vlakna, doziranje 1,2 kg u m³ betona, duljina vlakna L= 10 mm.



Slika 4. Shematski prikaz poravnanja vlakana unutar ispisne mlaznice tijekom procesa 3D printanja

2.3. SVOJSRVA 3D PRINTANOG BETONA

Svojstva betona se razlikuju u svježem i očvrslulom stanju. Svježi beton definiran je svojstvima konzistencije, segregacije, temperature i sadržaja pora u svježem betonu. Ključno svojstvo za 3D printani beton je konzistencija. Konzistencija je svojstvo materijala da se odupire trajnomu mijenjaju oblika. Ispitivanjem konzistencije u svježem stanju možemo vidjeti kakva su svojstva mješavine koju izrađujemo. U ovom radu konzistencije je ispitana metodom rasprostiranja na potresnom stoliću.

Za 3D printani beton je izuzetno važno vrijeme vezivanja i tiksotropija. Tiskotropija je promjena reoloških svojstava betona, odnosno dolazi do povećanja fluidnosti betona pri posmičnom naprzanju, što omogućuje gradnju slojeva u 3D printanju. Gradnja slojeva podrazumijeva kompaktno vezivanje slojeva bez pojave deformacija u donjim slojevima.

Vrijeme vezivanja je vrijeme u kojem beton prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Početkom vezivanja betona gubi se konzistencija i beton nije više prikladan za ugrađivanje jer bi to utjecalo na postizanje mehaničkih svojstava. Kod 3D printanja ovo je vrlo važno svojstvo jer postoji vremenski interval između printanja dviju „niti“ betona.

Nakon što svježi beton prijede u fazu očvrslulog stanja time se mijenjaju i glavni zahtjevi. Glavni zahtjevi očvrslulog betona su: zadovoljavajuća vlačna čvrstoća savijanjem, velika tlačna čvrstoća i malo sakupljanje betona od sušenja. U ovom eksperimentalnog istraživanja ispitane su tlačna i savojna čvrstoća uzorka uz priželjkivanje iznosa tlačne čvrstoće od 100 N/mm² i savojne čvrstoće od 10 N/mm². Za 3D printanje je visoka čvrstoća izuzetno važno svojstvo jer se time postiže izdržljiv i trajan beton. [10]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je prikazati i usporediti svojstva 3D printanog betona kroz različite mješavine te donijeti zaključak koja je mješavina najoptimalnija. Eksperimentalno istraživanje i ispitivanje provedeno je na četiri mješavine, sve četiri s istim osnovnim komponentama betona, cementom, agregatom i vodom, ali s različitim dodacima. Ispitana svojstva su: tlačna čvrstoća i savojna čvrstoća.

3.2. ISPITANE MJEŠAVINE

Komponente koje smo koristili u mješavinama prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Komponente mješavina 3D printanog betona

Cement	CEM I 42,5 R Primus Holcim
Pijesak	0 – 2 mm, nalazište Očura, Holcim
Voda	Iz vodovoda
Leteći pepeo	Plomin
Silicijska prašina	BASF
Superplastifikator	Pantarhit PC 180

Sastav veziva u mješavinama sadržava 70 % cementa, 20 % letećeg pepela i 10 % silicijske prašine s dodatkom od 1,2 kg/m³ mikro polipropilenskih vlakana, 1 % superplastifikatora, 0,5 % usporivača vezivanja. [11]

3.2.1. Mješavina M-1

Prva mješavina u eksperimentalnom istraživanju sadrži osnovne komponente betona, dva mineralna dodatka i jedan kemijski.

U tablici 2. prikazane su količine komponenti mješavine M-1 betona u kg/m^3 , za 1,5 L mješavine.

Tablica 2. Sastav komponenti betona mješavine M-1

	kg/m^3	kg
Cement	579	0,87
Pijesak	1241	1,86
Voda	232	0,35
Leteći pepeo	165	0,25
Silicijska prašina	83	0,12
	kg	ml
Superplastifikator	10,42	15,66

Vodocementni omjer iznosi 0,40, a vodovezni omjer 0,28

Proces kreće prosijavanjem agregata kroz sito (Slika 5.) za dobivanje sitnih zrna granulacije 0-2 mm te mjerenjem svih komponenti mješavine (Slika 5.). Potom se komponente postepeno miješaju u miješalici (Slika 6.) uslijed čega nastaje svježi beton (Slika 7.).



Slika 6. Prikaz prosijavanja agregata



Slika 7. Prikaz mjerenja cementa, letećeg pepela i silicijske prašine



Slika 8. Miješanje komponenti betona u miješalici



Slika 9. Beton u svježem stanju

Izmiješanom betonu u svježem stanju prvo je izmjerena temperatura koja je iznosila 28,7 °C (Slika 8.).

Zatim je provedeno ispitivanje konzistencije (Slike 9. i 10.) mješavine metodom rasprostiranja na potresnom stoliću (za ispitivanje konzistencije morta).

Takvo ispitivanje provodi se na način da se kalup oblika krnjeg stošca puni svježim betonom u 2 nivoa. Svaki nivo potrebno je zbiti batom 10 puta te se po potrebi gornji sloj nakon zbijanja dopuni betonom nakon čega se pričeka 30 s pa se kalup podiže vertikalno. Nakon toga podložna ploča se podiže i spušta 15 puta te se dobivenoj rasprostranjenoj smjesi mjeri promjer rasprostiranja betona u dva okomita smjera. [6]

Konzistencija rasprostiranjem mješavine M-1 iznosila je 145 × 145 mm.



Slika 10. Prikaz mjerenja temperature betona u svježem stanju mješavine M-1



Slike 11. i 12. Ispitivanje konzistencije mješavine M-1



Slika 13. Simulacija ručnog 3D printanja betona mješavine M-1

Kod mješavine M-1 uspješno je simulirano 3D printanje, a sama mješavina zadovoljava uvjete slijeganja te vezivanje novih slojeva (Slika 11.).

3.2.2. Mješavina M-2

Druga mješavina također sadrži osnovne komponente betona, dva mineralna dodatka i jedan kemijski te su u nju još dodana polipropilenska vlakna (Slika 12).

U tablici 3. prikazane su količine komponenti mješavine M-2 betona u kg/m^3 , za 1,5 L mješavine.

Tablica 3. Sastav komponenti betona mješavine M-2

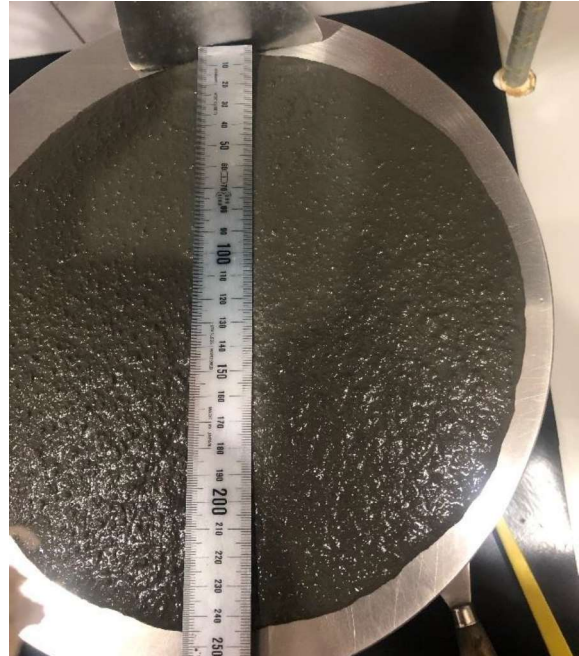
	kg/m^3	kg
Cement	579	0,87
Pijesak	1241	1,86
Voda	216	0,32
Leteći pepeo	165	0,25
Silicijska prašina	83	0,12
Polipropilenska vlakna	1,2	0.0018
	kg	ml
Superplastifikator	16,31	24,5

Vodocementni omjer iznosi 0,37, a vodovezni omjer 0,26



Slika 14. Polipropilenska vlakna

Izmjerena je temperatura mješavine M-2 od 27,5 °C te je ispitana konzistencija rasprostiranjem koja iznosi 245 × 250 mm (Slike 13. i 14.).



Slike 15. i 16. Mjerenje konzistencije mješavine M-2



Slika 17. Simulacija ručnog 3D printanja betona mješavine M-2 u kalup

3.2.2. Mješavina M-3

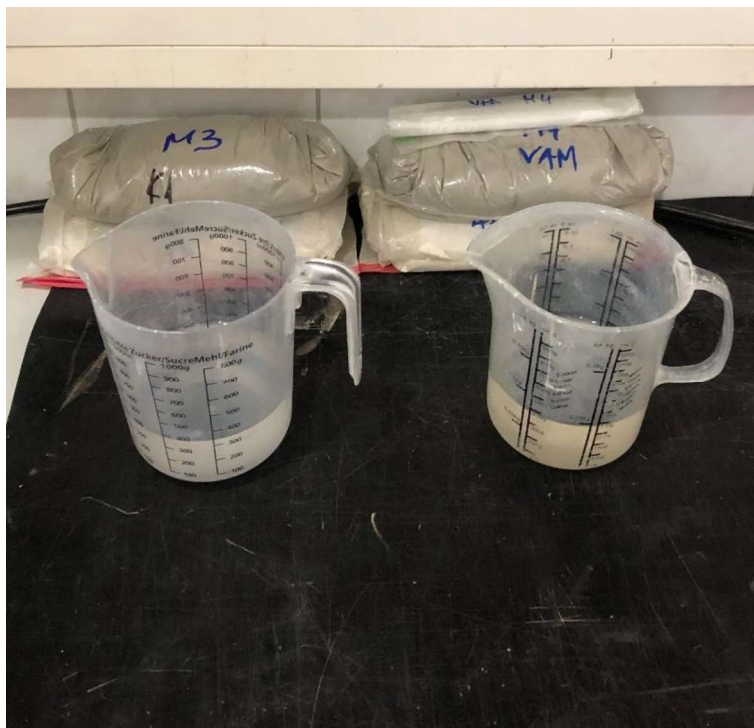
Mješavina M-3 sadrži osnovne komponente betona no ne sadrži silicijsku prašinu kao u prethodne dvije mješavine i ne sadrži polipropilenska vlakna. Od aditiva se trećoj mješavini nalazi samo leteći pepeo.

U tablici 4. prikazane su količine komponenti mješavine M-3 betona u kg/m^3 , za 1,5 L mješavine.

Tablica 4. Sastav komponenti betona mješavine M-3

	kg/m^3	kg
Cement	579	0,87
Pijesak	1241	1,86
Voda	232	0,35
Leteći pepeo	165	0,25
	kg	ml
Superplastifikator	16,31	24,5

Vodocementni omjer iznosi 0,40, a vodovezni omjer 0,31. Pripremljene komponente betona za mješavine M-3 i M-4 prikazane su na Slici 16.



Slika 18. Prikaz izvaganih komponenti treće i četvrte mješavine

Izmjerena temperatura mješavine M-3 iznosi 27,5 °C.

Konzistencija rasprostranjem mješavine M-3 iznosi 220×225 mm (Slika 17.). Ugradnja M-3 u kalup je prikazana na Slici 18.



Slika 19. Mjerenje konzistencije mješavine M-3



Slika 20. Simulacija ručnog 3D printanja mješavine M-3 u kalup

3.2.2. Mješavina M-4

Posljednja mješavina M-4 koja je izrađena sadrži osnovne komponente betona te polipropilenska vlakna kao i mješavina M-2, ali ne sadrži silicijsku prašinu.

U tablici 5. prikazane su količine komponenti mješavine M-4 betona u kg/m^3 , za 1,5 L mješavine.

Tablica 5. Sastav komponenti betona mješavine M-4

	kg/m^3	kg
Cement	579	0,87
Pijesak	1241	1,86
Voda	232	0,35
Leteći pepeo	165	0,25
Polipropilenska vlakna	1,2	0,0018
	kg	ml
Superplastifikator	7,32	11,0

Vodocementni omjer iznosi 0,40, a vodovezni omjer 0,31.

Izmjerena temperatura mješavine M-4 iznosi $27,8\text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 19.)

Konzistencija rasprostiranjem mješavine M-4 iznosi $200 \times 210\text{ mm}$ (Slika 20.).



Slika 21. i 22. Prikaz mjerenja temperature i konzistencije betona u svježem stanju mješavine M-4



Slika 23. Prikaz isprintanog 3D betona ručnom simulacijom mješavine M-3 i M-4

Na Slici 21. prikazan je izgled uzoraka printanog sloj na sloj (van kalupa).

Sve mješavine smo metodama simuliranog 3D printanja i ručne ugradbe ugradili u kalupe dimenzija $b \times h \times d = 40 \times 40 \times 160$ mm te ih čuvali u vlažnoj komoru (Slika 22.) i nakon 42 dana ispitivali.



Slika 24. Čuvanje uzoraka u vlažnoj komori

3.3. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

3.3.1. Vlačna čvrstoća savijanjem

Savojna čvrstoća se ispituje na uzorcima oblika prizme (gredice). Površina uzoraka betona treba biti ravna i glatka. Bilo koja neravnina ili nepravilnost na površini može utjecati na rezultate ispitivanja.

Uzorci se postavljaju u hidrauličku prešu s nastavkom za ispitivanje čvrstoće na savijanje (Slika 23.). Na sredini uzorka primjenjuje se vertikalno opterećenje. Sila se postupno povećava sve dok ne dođe do loma (Slika 24.).

Tijekom ispitivanja mjeri se sila loma.

Izraz za vlačnu čvrstoću savijanjem:

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

σ – savojna čvrstoća, [N/mm²]

F – najveća primijenjena sila – sila loma, [N]

l – duljina uzorka, [mm]

b – širina uzorka, [mm]

h – visina uzorka, [mm]



Slike 25. i 26. Uzorak prije i nakon ispitivanja na vlačnu čvrstoću

U narednim tablicama 6., 7., 8. i 9. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem na svim mješavinama M-1 do M-4.

Tablica 6. Savojna čvrstoća mješavine M-1

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumenska masa kg/m ³	Razmak među osloncima mm	Sila loma- savijanje kN	Savojna čvrstoća N/mm ²
	b	h	d						
Mješavina 1									
M1 – 1 – ručno	41,2	39,8	159,3	2,61*10 ⁻⁴	604,8	2317,24	100	4,59	10,55
M1 – 2 – ručno	40,6	39,8	159,8	2,58*10 ⁻⁴	597,3	2315,12	100	4,00	9,33
M1 – 3 – ručno	40,8	39,9	159,4	2,59*10 ⁻⁴	598,9	2312,36	100	4,24	9,79

Tablica 7. Savojna čvrstoća mješavine M-2

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumenska masa kg/m ³	Razmak među osloncima mm	Sila loma- savijanje kN	Savojna čvrstoća N/mm ²
	b	h	d						
Mješavina 2									
M2 – 1 – 3D	40,3	39,8	159,6	2,56*10 ⁻⁴	600,00	2342,75	100	3,85	9,05
M2 – 2 – 3D	41,6	40,0	159,5	2,65*10 ⁻⁴	612,7	2312,08	100	4,39	9,89
M2 – 3 – 3D	39,8	39,8	159,5	2,53*10 ⁻⁴	574,8	2271,94	100	4,18	9,95
M2 – 4 – ručno	39,8	39,5	159,2	2,50*10 ⁻⁴	590,5	2362,00	100	4,40	10,63
M2 – 51 – ručno	39,8	39,6	159,1	2,51*10 ⁻⁴	592,7	2361,35	100	3,73	8,96

Tablica 8. Savojna čvrstoća mješavine M-3

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumenska masa kg/m ³	Razmak među osloncima mm	Sila loma- savijanje kN	Savojna čvrstoća N/mm ²
	b	h	d						
Mješavina 3									
M3 – 1 – 3D	40,7	39,9	159,5	2,59*10 ⁻⁴	597,1	2305,41	100	3,81	8,82
M3 – 2 – 3D	41,3	39,9	159,4	2,63*10 ⁻⁴	603,9	2296,20	100	4,35	9,92
M3 – 3 – 3D	41,1	39,9	160,1	2,63*10 ⁻⁴	609,7	2318,25	100	4,37	10,02
M3 – 4 – ručno	40,6	40,0	159,7	2,59*10 ⁻⁴	605,7	2338,61	100	4,47	10,32

Tablica 9. Savojna čvrstoća mješavine M-4

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen	masa	Volumenska masa	Razmak među osloncima	Sila loma-savijanje	Savojna čvrstoća
	b	h	d	m ³	g	kg/m ³	mm	kN	N/mm ²
Mješavina 4									
M4 – 1 – 3D	41,2	39,9	160,3	2,58*10 ⁻⁴	608,9	2360,08	100	4,22	9,65
M4 – 2 – 3D	39,9	39,9	159,7	2,54*10 ⁻⁴	586,3	2308,27	100	3,63	8,57
M4 – 3 – 3D	40,8	39,9	159,7	2,60*10 ⁻⁴	602,4	2316,92	100	4,52	10,44
M4 – 4 – ručno	37,0	39,9	159,6	2,36*10 ⁻⁴	550,5	2332,63	100	3,11	7,92
M4 – 51 – ručno	36,0	39,9	159,6	2,26*10 ⁻⁴	537,5	2347,16	100	3,25	8,51

3.3.2. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća, u slučaju betona, je mjera njegove otpornosti na kompresiju.

Nakon ispitivanja uzoraka na savojnu čvrstoću, uzorci su se prepolovili na pola pa se svaka ta polovica uzorka ispituje na tlačnu čvrstoću (slike 25. i 26.). Preostali uzorci se postavljaju u prešu i opterećuju se konstantnom silom sa prirastom od 2400 N/s. Ovaj postupak uključuje primjenu sila na uzorak betona sve dok ne dođe do njegovog loma. Mjeri se najveća primijenjena sila (sila loma), a zatim se tlačna čvrstoća izračunava dijeljenjem te sile s površinom na koju je sila djelovala.

Formula za tlačnu čvrstoću:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ – tlačna čvrstoća, [N/mm²]

F – sila sloma uzorka, [N]

A – površina uzorka, [mm²]

Kako bi se dobila konačna tlačna čvrstoća uzorka, potrebno je izračunati srednju vrijednost tlačnih čvrstoća dviju polovica jednog uzorka

Formula za tlačnu čvrstoću (srednja vrijednost):

$$\sigma_{SR.VR.} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$



Slike 27. i 28. Uzorci ispitani na tlačnu čvrstoću

U narednim tablicama 10., 11., 12. i 13. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem na svim mješavinama M-1 do M-4.

Tablica 10. Tlačna čvrstoća mješavine M-1

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumen- ska masa kg/m ³	Sila loma - tlak		Tlačna čvrstoća		Tlačna čvrstoća (sr. vr.) N/mm ²
	b	h	d				kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	
Mješavina 1											
M1 – 1- ručno	41,2	39,8	159,3	2,58×10 ⁻⁴	604,8	2317,24	155,33	142,57	97,57	89,55	93,56
M1 – 2- ručno	40,6	39,8	159,8	2,58×10 ⁻⁴	597,3	2315,12	146,25	151,34	91,87	95,06	93,47
M1 – 3- ručno	40,8	39,9	159,4	2,59×10 ⁻⁴	598,9	2312,36	162,12	165,04	101,58	103,41	102,50

Tablica 11. Tlačna čvrstoća mješavine M-2

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumen- ska masa kg/m ³	Sila loma - tlak		Tlačna čvrstoća		Tlačna čvrstoća (sr. vr.) N/mm ²
	b	h	d				kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	
Mješavina 2											
M2 – 1 – 3D	40,3	39,8	159,6	2,56×10 ⁻⁴	600,00	2342,75	155,47	157,44	97,66	98,89	98,28
M2 – 2 – 3D	41,6	40,0	159,5	2,65×10 ⁻⁴	612,7	2312,08	158,47	153,41	99,04	95,88	97,46
M2 – 3 – 3D	39,8	39,8	159,5	2,53×10 ⁻⁴	574,8	2271,94	141,69	161,60	89,45	102,02	95,74
M2–4–ručno	39,8	39,5	159,2	2,50×10 ⁻⁴	590,5	2362,00	160,26	117,46	101,94	74,72	88,33
M2–5–ručno	39,8	39,6	159,1	2,51×10 ⁻⁴	592,7	2361,35	162,56	152,53	103,14	96,78	99,96

Tablica 12. Tlačna čvrstoća mješavine M-3

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumen- ska masa kg/m ³	Sila loma - tlak		Tlačna čvrstoća		Tlačna čvrstoća (sr. vr.) N/mm ²
	b	h	d				kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	
Mješavina 3											
M3 – 1 – 3D	40,7	39,9	159,5	2,59×10 ⁻⁴	597,1	2305,41	136,50	137,59	85,53	86,21	85,87
M3 – 2 – 3D	41,3	39,9	159,4	2,63×10 ⁻⁴	603,9	2296,20	135,36	135,63	84,81	84,98	84,90
M3 – 3 – 3D	41,1	39,9	160,1	2,63×10 ⁻⁴	609,7	2318,25	137,29	143,97	86,02	90,21	88,12
M3–4–ručno	40,6	40,0	159,7	2,59×10 ⁻⁴	605,7	2338,61	147,98	150,65	92,49	94,16	93,33

Tablica 13. Tlačna čvrstoća mješavine M-4

Oznaka uzoraka	Dimenzije uzoraka (mm)			Volumen m ³	masa g	Volumen- ska masa kg/m ³	Sila loma - tlak		Tlačna čvrstoća		Tlačna čvrstoća (sr. vr.) N/mm ²
	b	h	d				kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	
Mješavina 4											
M4 – 1 – 3D	41,2	39,9	160,3	2,58×10 ⁻⁴	608,9	2360,08	140,91	139,2	88,29	87,22	87,76
M4 – 2 – 3D	39,9	39,9	159,7	2,54×10 ⁻⁴	586,3	2308,27	138,36	133,45	86,91	83,82	85,37
M4 – 3 – 3D	40,8	39,9	159,7	2,60×10 ⁻⁴	602,4	2316,92	141,23	137,54	88,49	86,18	87,34
M4–4–ručno	37,0	39,9	159,6	2,36×10 ⁻⁴	550,5	2332,63	130,81	133,04	88,61	90,12	89,37
M4–5–ručno	36,0	39,9	159,6	2,26×10 ⁻⁴	537,5	2347,16	132,03	128,78	91,92	89,65	90,79

3.4. UTJECAJ MIKROARMATURE NA SVOJSTVA 3D PRINTANOG BETONA

Analizom podataka mješavina 1, 2, 3 i 4 zaključuje se da mješavina M-1 ima najbolja svojstva te je jedina zadovoljila zahtjeve gradnje sloj po sloj. (slika 27.) Također mješavina M-1 imala je i najbolju konzistenciju rasprostiranjem te sposobnost istiskivanja, obradivost i vrijeme vezivanja.



Slika 29. Uzorci simulirano 3D printanog betona mješavine M-1, nakon 42 dana

Rezultati konzistencije svježeg betona svih izrađenih mješavina prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Rezultati konzistencije 3D printanog betona

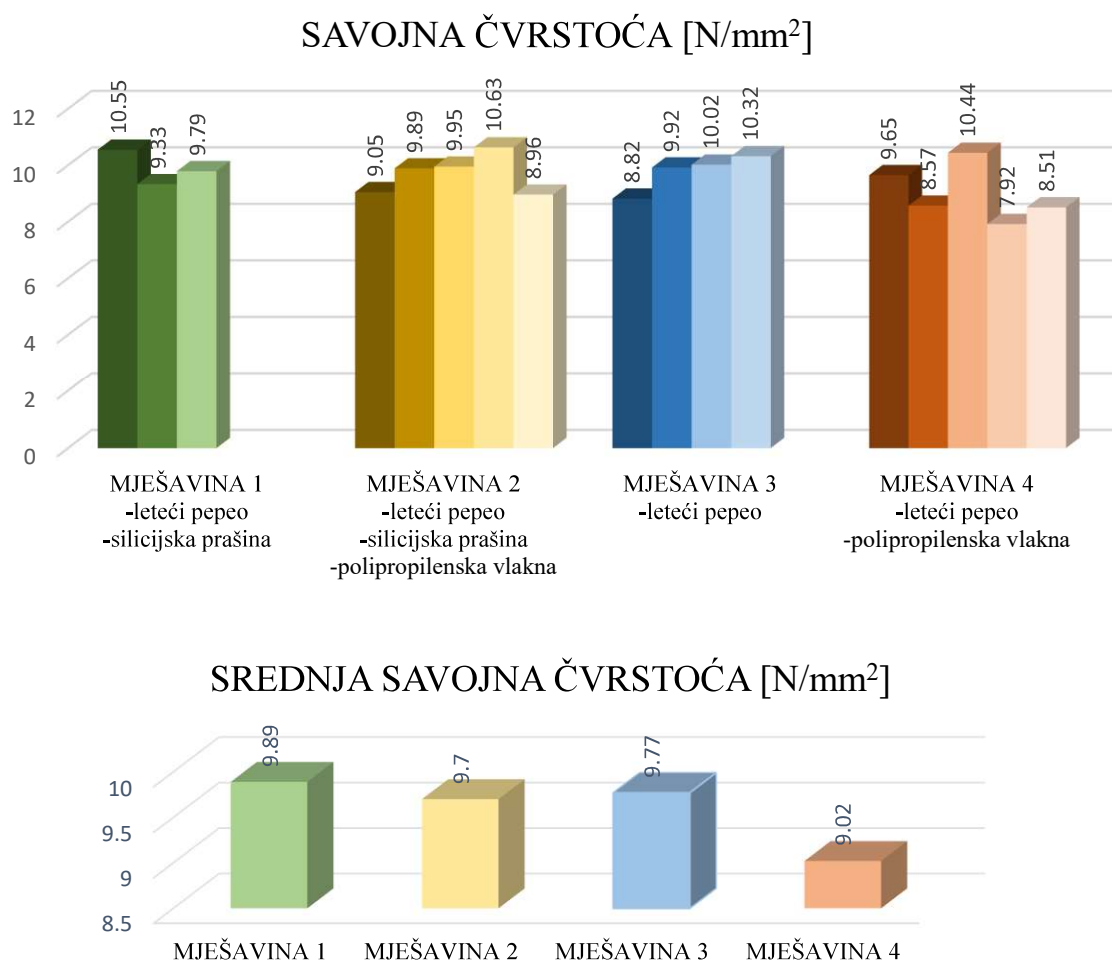
Mješavina	Konzistencija – rasprostiranje (mm)
M-1	145×145
M-2	245×250
M-3	220×225
M-4	200×210

Rezultat konzistencije mješavine M-1 je manji od rezultata konzistencije ostalih mješavina, a i ta mješavina je imala jedina konzistenciju zadovoljavajuću da se može ugrađivati sloj na sloj

betona te možemo zaključiti da ostale mješavine imaju veće rasprostiranje od onog koje nam omogućava ugradnju tehnologijom 3D printanja. Potrebno je provesti još ispitivanja kako bi se optimirala konzistencija i način ugradnje sloj na sloj. Vjerujemo da bi uređaji za izvedbu 3D printanja betona pokazali još neke druge zahtjeve

Usporedbom rezultata savojne čvrstoće zaključuje se da su sve mješavine djelomično zadovoljile zahtjeve za čvrstoću na savijanje. Zahtjevi nalažu čvrstoću veću od 10 N/mm^2 što svaka od četiri ispitanе mješavine i je postigla bar na jednom ispitanom uzorku, ali je srednja vrijednost kod svih mješavina manja od 10 N/mm^2 .

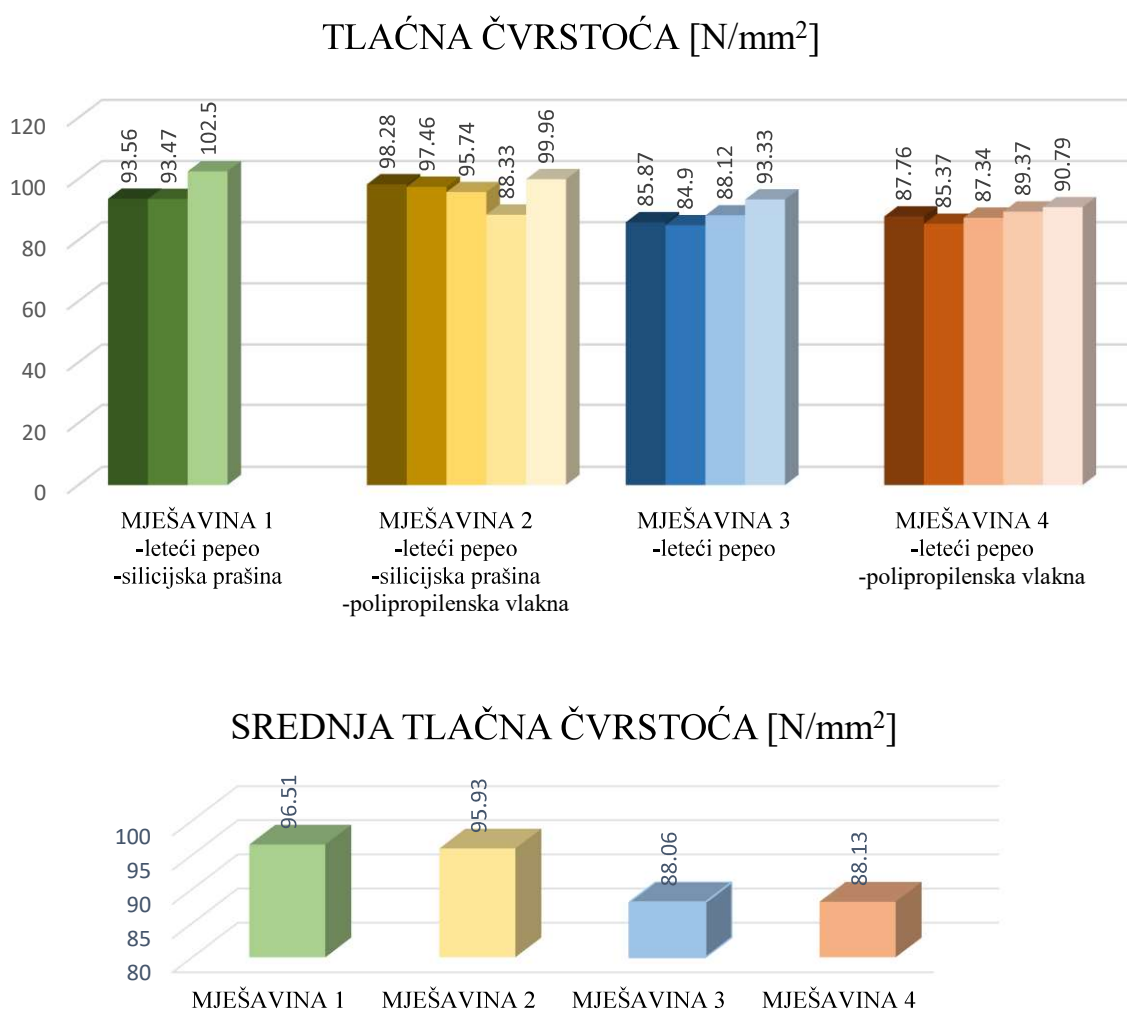
Na slici 28. prikazane su rezultati svih ispitanih uzoraka na savojnu čvrstoću te srednja savojna čvrstoća svake mješavine.



Slika 30. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavina M-1 do M-4

Usporedbom rezultata tlačne čvrstoće zaključuje se da su prve dvije mješavine postigle najveće čvrstoće, između 90 i 100 N/mm², dok je treći uzorak prve mješavine čak postigao tlačnu čvrstoću veću od 100 N/mm², što je dodatni pokazatelj da je mješavina M-1 bila najuspješnija. Nadalje, gledajući rezultate tlačnih čvrstoća vidi se mali pad kod mješavina M-3 i M-4, one su postigle nešto manje tlačne čvrstoće.

Na slici 29. prikazane su vrijednosti svih ispitanih uzoraka na tlačnu čvrstoću te srednja tlačna čvrstoća svake mješavine.



Slika 31. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavina M-1 do M-4

Razmatrajući rezultate i sve dodatke koji su bili dodani mješavinama, zaključuje se da mješavine koje sadrže silicijsku prašinu imaju najbolje zahtjeve i za tlačnu i za savojnu čvrstoću, što nam ukazuje kako je taj mineralni dodatak iznimno važan dodatak za 3D printani beton, uz leteći pepeo koji je bio dodan svim mješavinama i kemijski dodatak, superplastifikator koji je također dodan u sve četiri mješavine.

Vlakna za mikroarmiranje mogu imati značajan utjecaj na svojstva 3D printanog betona. Iz priloženih grafičkih prikaza ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće može se zaključiti da polipropilenska vlakna djeluju najbolje u kombinaciji kada je mješavini betona dodana i silicijska prašina što dokazuje da su mineralni dodaci neophodni u 3D printanom betonu. Iako imaju brojne prednosti i koriste se kao dodatak betonu radi poboljšavanja njegovih svojstava, postoje negativni aspekti polipropilenskih vlakana koje treba uzeti u obzir. U primjeru ovih ispitivanja vlakna su smanjila i tlačnu i savojnu čvrstoću u odnosu na iste mješavine bez vlakana.

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je opisati i usporediti rezultate dobivene ispitivanjem savojne i tlačne čvrstoće te ispitati utjecaj vlakana za mikroarmiranje na svojstva 3D printanog betona.

Iz provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

Najbolje tlačne čvrstoće postigle su mješavine M-1 i M-2 koje su sadržavale silicijsku prašinu, dok mješavine M-3 i M-4 nisu zadovoljile zahtjeve tlačne čvrstoće, a nisu imale silicijsku prašinu. Može se zaključiti da se veća tlačna čvrstoća betona postiže s mineralnim dodatkom silicijska prašina. Zahtjeve savojne čvrstoće od 10 N/mm^2 zadovoljava barem po jedan uzorak svih mješavina, ali je kod svih mješavina srednja vrijednost savojne čvrstoće manja od zahtjeva.

Sveukupno gledano mješavina M-1 najviše odudara od drugih u pozitivnom smislu. Pokazala se kao najoptimalnija mješavina, a sastojala se od osnovnih sastojaka betona: cement, agregat i voda, od mineralnih dodataka, leteći pepeo i silicijska prašina te od kemijskog dodatka superplastifikator. Pokazala nam je najbolja svojstva u svježem i u očvrslom stanju betona poput konzistencije rasprostiranjem, sposobnost istiskivanja, ispisa sloj po sloj, obradivosti i brzog vremena vezivanja.

Laboratorijskima istraživanjima i ispitivanjima dokazano je da mikroarmatura može utjecati pozitivno i negativno na svojstva 3D printanog betona. Svakako bi trebalo još provesti dodatna istraživanja sastava 3D printanog betona kojim bi se udio komponenti prilagodio upotrebi vlakana za mikroarmiranje, posebno većim vlaknima koja mogu imati veći pozitivan efekt na mehanička svojstva 3D printanog betona.

5. LITERATURA

- [1] J. H. Jun, J. W. Byung , C. Woohyun, K. Jung-Hoon, Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials, International Journal of Concrete Structures and Materials, Hanyang University, 2020.
- [2] <https://egradnja.hr/vijesti/kako-ce-3d-printanje-gradevina-utjecati-na-buducnost-odrzive-gradnje-218/>
- [3] Richard Buswell Ana Blanco Sergio Cavalaro Peter Kinnell: Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication Digital Concrete 2022
- [4] Ricov L. : Sastav betona za 3D printanje; Concrete mix design for 3D printing, Diplomski rad
- [5] <https://www.hindawi.com/journals/je/2020/1424682/>
- [6] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, kolegij Građiva, predavanje Beton
- [7] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, kolegij Građiva, predavanje Dodaci betonu
- [8] M. Hambach, D. Volkmer, Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, Cement and Concrete Composites, 2017.
- [9] <https://www.duly.hr/vlakna-za-beton>
- [10] Z. Yu, Z. Yunsheng, S. Wei, Y. Lin, L. Guojian, Y. Yonggan, Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete, Construction and Building Materials, 2019.
- [11] T.T. Le, S.A.Austin, S Lim, R.A. Buswell, A. G. F. Gibb and T. Thorpe, Materials and Structures, Springer, Loughborough, 2018

POPIS SLIKA

Slika 1 Glavne metode 3D printanja betona. a) D-shape metoda, b) Concrete printing metoda i c) Contour Crafting metoda	3
Slika 2. Shema procesa 3D printanja betona [11].....	4
Slika 3. Shematski prikaz poravnanja vlakana unutar ispisne mlaznice tijekom procesa 3D printanja.....	7
Slika 4. Prikaz prosijavanja agregata	10
Slika 5. Prikaz mjerenja cementa, letećeg pepela i silicijske prašine	10
Slika 6. Miješanje komponenti betona u miješalici	11
Slika 7. Beton u svježem stanju	11
Slika 8. Prikaz mjerenja temperature betona u svježem stanju mješavine 1	12
Slike 9. i 10. Ispitivanje konzistencije mješavine 1	12
Slika 11. Simulacija ručnog 3D printanja betona mješavine 1	13
Slika 12. Polipropilenska vlakna	14
Slike 13. i 14. Mjerenje konzistencije mješavine 2.....	15
Slika 15. Simulacija ručnog 3D printanja betona mješavine 2 u kalup	15
Slika 16. Prikaz izvaganih komponenti treće i četvrte mješavine	16
Slika 17. Mjerenje konzistencije mješavine 3	17
Slika 18. Simulacija ručnog 3D printanja mješavine 3 u kalup.....	17
Slike 19. i 20. Prikaz mjerenja temperature i konzistencije betona u svježem stanju mješavine M-4	18
Slika 21. Prikaz ispintanog 3D betona ručnom simulacijom mješavine 3 i 4	19
Slika 22. Pohrana uzoraka u vlažnoj komori	19
Slike 23. i 24. Uzorak prije i nakon ispitivanja na vlačnu čvrstoću.....	20
Slike 25. i 26. Uzorci ispitani na tlačnu čvrstoću.....	24
Slika 27. Uzorci simulirano 3Dprintanog betona mješavine M-1, nakon 42 dana.....	26
Slika 28. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće mješavina M-1 do M-4.....	27
Slika 29. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavina M-1 do M-4	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Komponente mješavina 3D printanog betona	9
Tablica 2. Sastav komponenti betona mješavine M-1	10
Tablica 3. Sastav komponenti betona mješavine M-2.....	14
Tablica 4. Sastav komponenti betona mješavine M-3.....	16
Tablica 5. Sastav komponenti betona mješavine M-4.....	18
Tablica 6. Savojna čvrstoća mješavine M-1	21
Tablica 7. Savojna čvrstoća mješavine M-2.....	21
Tablica 8. Savojna čvrstoća mješavine M-3.....	21
Tablica 9. Savojna čvrstoća mješavine M-4.....	22
Tablica 10. Tlačna čvrstoća mješavine M-1	24
Tablica 11. Tlačna čvrstoća mješavine M-2.....	25
Tablica 12. Tlačna čvrstoća mješavine M-3.....	25
Tablica 13. Tlačna čvrstoća mješavine M-4.....	25
Tablica 14. Rezultati konzistencije 3D printanog betona.....	26