

# Upotreba kabela s EE otpada kao dio agregata u betonu

---

Čota, Melina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:499839>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**

*Repository / Repozitorij:*



[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Melina Čota**

**Split, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Melina Čota**

**Upotreba kabela s EE otpada kao dio agregata u  
betonu**

**Diplomski rad**

**Split, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Melina Čota

BROJ INDEKSA: 757

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: GRAĐEVINSKI MATERIJALI I

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Upotreba kabela s EE otpada kao dio agregata u betonu

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti istraživanja koja se bave upotrebom EE otpada u betonu. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi betone u kojima će dio agregata u količini od 1 i 5 % volumena biti zamijenjen usitnjenim kabelima s EE otpada, te mješavinu u kojoj će najmanji kabeli, izrezani na dužinu 3 cm, imati ulogu vlakana. Na svježem betonu se mjeri obradivost, a u očvrslom stanju čvrstoća na pritisak, čvrstoća na savijanje, dinamički modul elastičnosti, kapilarno upijanje i apsorpcija. Sve rezultate potrebno je usporediti s referentnom mješavinom i komentirati.

U Splitu, 20. listopada 2020.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Doc. dr. sc. Ivo Andrić

## **Upotreba kabela s EE otpada kao dio agregata u betonu**

### ***Sažetak:***

Potrošnja betona je raširena u svim zemljama svijeta, pa je kao takav jedan od najvažnijih građevinskih materijala, ali ujedno i veliki zagađivač okoliša. Istraživači već neko vrijeme pokušavaju u svrhu održive gradnje naći ekološki prihvatljivija rješenja. Od davnina su poznata mikro ojačanja betona u obliku vlakana – mikroarmirani beton, a sad se javlja potreba za nalaženjem održivijih rješenja kao npr. za otpadne kabele koji se u nedostatku boljih opcija – pale. U ovom radu će se ispitati svojstva betona s PVC vlaknima od otpadnih kabela i dijelovima kabela s EE otpada kao zamjenom za agregat. Na temelju dobivenih rezultata doneseni su zaključci.

### ***Ključne riječi:***

Beton, mikroarmiranje, kabel s EE otpada, PVC vlakna, agregat

## **Use of cables from e-waste as part of aggregates in concrete**

### ***Abstract:***

Consumption of concrete is widespread in all countries of the world, so as such it is one of the most important building materials, but also a major polluter of the environment. Researchers have been trying for some time to find more environmentally friendly solutions for sustainable construction. Fibers reinforced concrete have been known for a long time and now there is a need to find a solution for more sustainable solutions such as waste cables in the form of fibers that, in the absence of better options, ignite. In this paper, the properties of concrete with PVC fibers and with e-waste cables as a substitute for aggregate will be examined. Based on the obtained results, conclusions were given.

### ***Keywords:***

Concrete, microreinforcement, e – waste cable, PVC fibre, aggregate

1.	UVOD .....	1
2.	OPĆENITO O MIKROARMIRANOM BETONU .....	4
2.1.	Mehaničke karakteristike mikroarmiranog betona .....	5
2.2.	Primjena mikroarmiranog betona .....	9
3.	VLAKNA KORIŠTENA ZA MIKROARMIRANJE.....	10
3.1.	Korelacija vlakana i cementne matrice; načini međusobnog djelovanja .....	13
3.1.1.	Korelacija vlakana i cementne matrice u svježem stanju kompozita.....	14
3.1.2.	Korelacija vlakana i matrice u krutom stanju kompozita.....	16
4.	AGREGAT.....	19
4.1.	Uvod.....	19
4.2.	Prirodni agregat.....	21
4.3.	Reciklirani agregat .....	23
4.3.1.	Beton od recikliranog agregata .....	25
4.3.2.	Plastični agregat .....	28
4.3.2.1.	Osvrt na dosadašnja ispitivanja .....	28
4.3.2.1.1.	Istraživanje trajnosti betona s elektroničkim otpadnim plastičnim agregatom (Alena Sićakova, Erika Figmigová) [25].....	28
4.3.2.1.2.	Upotreba plastičnog otpada kao agregata u pripremi cementnog morta i betona, osvrt (Nabajyoti Saikia, Jorge de Brito) [26].....	31
5.	PROVEDENA ISPITIVANJA BETONA S DODANIM PLASTIČNIM OTPADOM.....	33
5.1.	Svojstva betona s PVC vlaknima (Senthil Kumar Kaliyavaradhan, Tung-Chai Ling).....	33
5.2.	Proizvodnja PVC vlakana .....	33
5.2.1.	Utjecaj PVC vlakana na svojstva svježeg betona.....	34
5.2.1.1.	Slijeganje .....	34
5.2.1.2.	Faktor zbijanja .....	35
5.2.1.3.	Svježa gustoća / suha gustoća.....	36
5.2.2.	Utjecaj PVC vlakana na svojstva očvrslog betona.....	36
5.2.2.1.	Tlačna čvrstoća .....	36
5.2.2.2.	Savojna čvrstoća .....	40
5.2.2.3.	Vlačna čvrstoća na cijepanje .....	41
5.2.2.4.	Posmična čvrstoća .....	43
5.2.2.5.	Modul elastičnosti.....	44
5.2.2.6.	Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa.....	46
5.3.	Zaključak.....	47
6.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	47

6.2. Materijali.....	49
6.2.1. Cement .....	49
6.2.2. Voda .....	50
6.2.3. Agregat .....	51
6.2.4. PVC Kabeli .....	54
6.3. Izrada mješavina i ispitivanja svježeg betona.....	56
6.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava mješavina.....	61
6.4.1. Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće.....	61
6.4.1.1. Rezultati ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće .....	63
6.4.2. Ispitivanje vodoupojnosti i dinamičkog modula elastičnosti .....	69
6.4.2.1. Vodoupojnost.....	69
6.4.2.2. Dinamički modul elastičnosti .....	72
7. ZAKLJUČAK .....	77
8. LITERATURA.....	78

# 1. UVOD

Beton je jedan od najvažnijih građevinskih materijala i njegova potrošnja je velika u svim zemljama i regijama svijeta. Kao osnovni nedostatak betona može se navesti njegova krtoš, odnosno relativno niska vlačna čvrstoća, ograničena duktilnost i mala otpornost na otvaranje i širenje pukotina. Unutarnje mikropukotine su prisutne u betonu i njegova loša nosivost na vlačna naprezanja je posljedica širenja takvih mikropukotina koje u konačnici mogu dovesti do loma betona. U običnom betonu i sličnim krtime materijalima, strukturalne pukotine razvijaju se još prije opterećenja zbog skupljanja uslijed sušenja i drugih utjecaja. Kad se nanosi opterećenje na betonski element unutarnje pukotine se šire i otvaraju zbog naprezanja, te nastaju dodatne pukotine. Razvoj ovih pukotina je uzrok neelastične deformacije u betonu. [1]

Rješenje opisane problematike je čovječanstvo kroz povijest nalazilo upravo u iznimno kreativnom dodavanju raznih vrsta vlakana u ondašnje građevne materijale. Počeci takve prakse nalaze se već u brončanom dobu kad se u građevne materijale dodaju vlakna prirodno – životinjskog porijekla primjerice uporabom konjske dlake, slame i drugih biljnih vlakana u pečenoj opeci od gline. Međutim, slijedeći cjelokupni tijek industrijskog napretka, umjetna vlakna se pojavljuju sredinom prošlog stoljeća kad se u gradnji počinju koristiti azbestna vlakna koja su se, unatoč visokoj korisnosti u gradnji, ipak morala zamijeniti prihvatljivijim rješenjima kao što su polimerna vlakna obzirom na štetan utjecaj azbestnih vlakana na ljudsko zdravlje. Takva inovacija predstavlja značajan napredak kod uporabe umjetnih (sintetičkih) vlakana u gradnji.

Posljednjih godina istraživači su se usmjerili na upotrebu inovativnih vlaknastih materijala od recikliranog otpada u svrhu održivog razvoja. Naročito su se fokusirali na plastični otpad s obzirom da se samo u Europi godišnje proizvode oko 26 mil. tona plastičnog otpada, što je čini drugim najvećim proizvođačem plastičnog materijala u svijetu, odgovornu za proizvodnju oko 20% svjetske plastike [2]. Zagađenje plastikom postalo je jedno od najhitnijih pitanja zaštite okoliša. Polovica plastičnih materijala ikad napravljena je proizvedena u posljednjih 15 godina. Proizvodnja se povećala eksponencijalno, s 2.3 mil. tona 1950. godine na 448 mil. tona 2015. godine. Očekuje se da će se proizvodnja udvostručiti do 2050. godine. Svake godine oko 8 mil. tona plastičnog otpada završi u oceanu. [3] Stoga ni ne čudi usmjeravanje istraživača ka recikliranom plastičnom materijalu i njegovoj uporabi u građevinarstvu, u ovom slučaju u betonu pri čijoj se proizvodnji također vrlo zagađuje okoliš,



a i sami beton čini veliki dio građevinskog otpada, od kojeg se u Hrvatskoj, nažalost, i dalje reciklira samo 5%. [4]

Za sada se ne može izbjeći činjenica da građevinarstvo ima brojne negativne utjecaje na okoliš, obzirom da upravo beton, kao jedan od temeljnih građevnih materijala, troši prirodne resurse kao što su kamen, pijesak i voda. Agregat je još uvijek najčešće korišten element prilikom sastava kompozitnih gradiva, a geološki postupci formiranja agregata traju milijunima godina, pa se posljedično tome, kao i stalnoj povećanoj potrošnji, prirodne rezerve agregata stalno smanjuju.

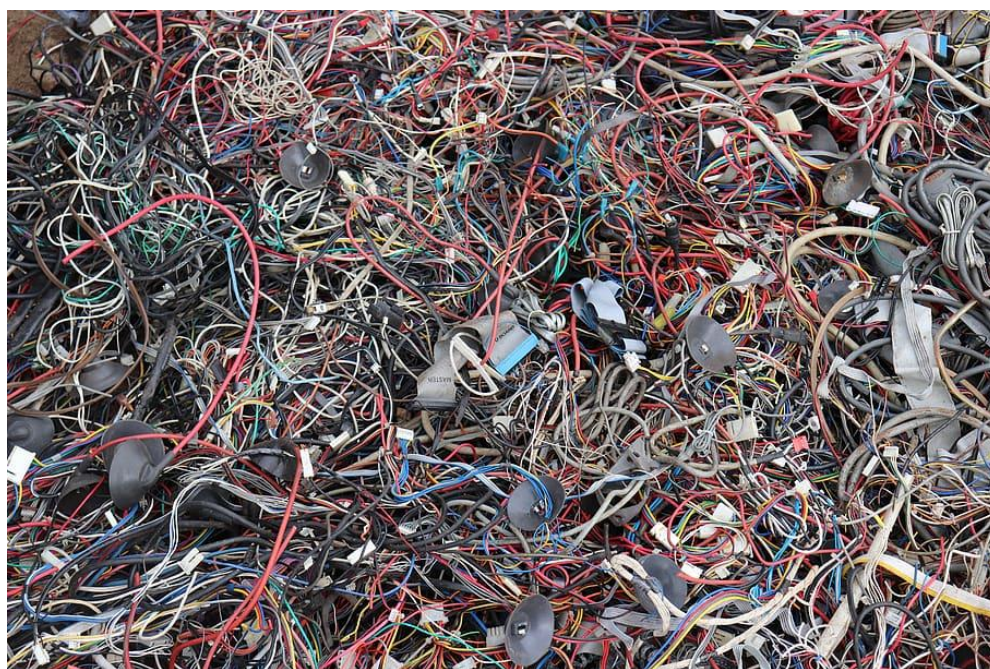
Agregat se, ako se ne crpi kao već gotov materijal - šljunak (riječni materijal), proizvodi procesom predrobljavanja stijenske mase (drobljeni). Proizvodnja agregata za izradu betona i druge namjene obuhvaća različite aktivnosti, pri čemu dolazi do potrošnje energije i stvaranja stakleničkih plinova, tablica 1, stoga se ovaj rad bazira na upotrebi otpadnih kabela kao zamjena za dio agregata upravo kako bi se smanjila potrošnja tog važnog, neobnovljivog izvora, a ujedno i riješilo pitanje spaljivanja e – otpada.

PVC kabele i žice uvelike se koriste u sustavima distribucije električne energije u zgradama, kao i za električnu i elektroničku opremu. PVC kabele dobivaju se polimerizacijom vinil-klorida s usporivačima gorenja i u velikoj se mjeri koriste za izolaciju žica i kabelaških ovojnica zbog visoke otpornosti na vatru i vodu. Obično se otpadni PVC kabele i žice, slika 1, neformalno recikliraju za bakar i aluminij; međutim, vanjska ovojnica kabela izrađena od PVC-a nakon recikliranja odbacuje se kao e-otpad. Uglavnom se odbačena vanjska ovojnica PVC kabela spali pa tijekom gorenja stvara štetne plinove. Stoga istraživači pokušavaju pronaći rješenje za recikliranje PVC plastike iz kabela i žica i stvaranje novih proizvoda kako bi se smanjio opasan utjecaj na okoliš. U ovom radu su uzeti odbačeni PVC kabele te iskorišteni kao dio agregata odnosno vlakna u betonu te je promatrano na koji način su utjecali na svojstva betona sve u svrhu pronalaska rješenja za e-otpad. [2]

*Tablica 1 Potrošnja energije i utjecaj na okoliš različitih vrsta građevnog materijala*

[5]

Materijal	Energija (GJ/m <sup>3</sup> )	Utjecaj na okolinu		
		Potencijal za globalno zatopljanje (kg/m <sup>3</sup> )	Potencijal zakiseljavanja (kg/m <sup>3</sup> )	Potencijal kreiranja fotokemijskog smoga (kg/m <sup>3</sup> )
Aluminij	497	29975,4	162	321,3
Opeka	5,4	342	3,6	30,6
Keramičke pločice	16	1142	8	102
<b>Beton</b>	<b>4,8</b>	<b>156</b>	<b>2,4</b>	<b>0,72</b>
Staklo	19,2	1365,6	96	4,8
Žbuka	4,5	238,5	2,7	1,8
Crijep	2,2	288,2	2,2	2,2
<b>PVC</b>	<b>116</b>	<b>1932</b>	<b>17,9</b>	<b>0,69</b>
Čelik	200	17840	80	6720
Drvo	1,65	63,8	0,55	0,55



*Slika 1 otpadni PVC kabeli [6]*

## 2. OPĆENITO O MIKROARMIRANOM BETONU

Mikroarmirani beton (u daljnjem tekstu označen kao “MAB”, slika 2) je u naravi beton u kojem su ugrađena vlakna radi postizanja veće čvrstoće betona, odnosno njegove savitljivosti, kao i zbog sprječavanja širenja prirodno nastajućih mikropukotina, na način da se naprezanje prenosi s već napuklog presjeka na susjedne presjeke.

Način izrade citiranog betona se sastoji u miješanju sastojaka običnog betona s diskontinuiranim malim vlaknima velike čvrstoće, čime se postiže i veća žilavost, uslijed koje se mogu očekivati i određene značajnije deformacije nakon dostizanja vlačne čvrstoće betona.

Temeljem svojih svojstava zadobivenih na opisani način, predmetni beton se ubraja u kvalifikaciju tzv. betona posebne namjene. Dodatan kriterij razlikovanja MAB-a od običnog betona jest i povećana količina cementa, manja količina krupnog agregata i manje najveće zrno agregata. [7]

U odnosu na ugrađena vlakna, koja pojačavaju svojstva krhke i lomljive cementne matrice, potrebno je istaknuti da krajnji rezultat poboljšanja kvalitete MAB-a ovisi o vrsti i sadržaju upotrijebljenih gradivnih vlakana, a koje poboljšanje bi trebalo u različitoj mjeri uključivati povećanja vlačne ili savojne čvrstoće, žilavosti, duktilnosti, sposobnosti apsorpcije energije, otpornosti na udar, otpornosti na zamor, propusnosti i trajnosti kompozita.[8]

Za upozoriti je da učinak vlakana na mehanička svojstva betona može biti kontradiktoran, no ne može se osporiti utjecaj vlakana na kvalitetu betona, što je izraženo primijećeno upravo kod mehaničkih svojstava betona, i to na način da su dodavanjem vlakana primijećena bolja dinamička svojstva betona, bolja prionjivost betona i armature, povećana žilavost, osjetno manje skupljanje betona, pa čak i efekt u kojem vlakna mogu u potpunosti zamijeniti primarnu armaturu u podnim pločama i kolnicima. [9]

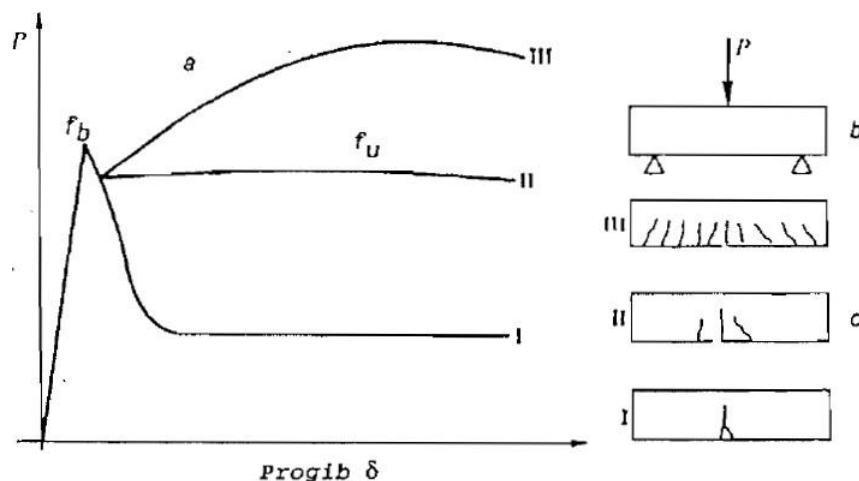


*Slika 2 Mikroarmirani beton [10]*

## 2.1. Mehaničke karakteristike mikroarmiranog betona

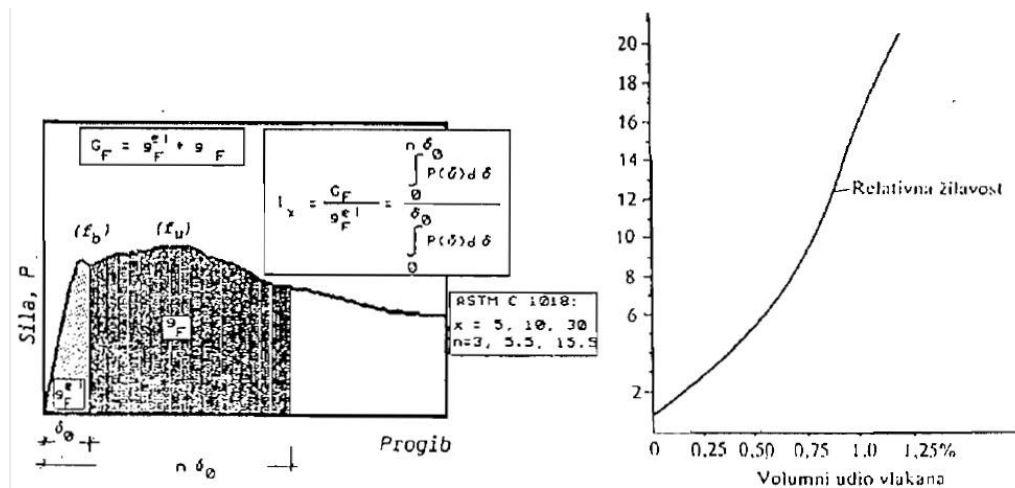
Ispitivanjem prizme se na učinkovit način uočavaju svojstva ovako ojačanog betona, obraćajući pozornost na karakteristične točke u kojima se prizma savijanjem opterećuje do sloma kako je i prikazano na slici 3.

Radni dijagram prikazuje karakteristične točke, a koje točke su čvrstoća pri pojavi prve pukotine  $f_b$ , i krajnja čvrstoća  $f_u$ . [7]



*Slika 3 Radni dijagrami i oblici sloma prizme, s ojačanjem od mikrovlakana, opterećene savijanjem. a) radni dijagrami b) shema opterećenja c) karakteristični oblik pukotina [7]*

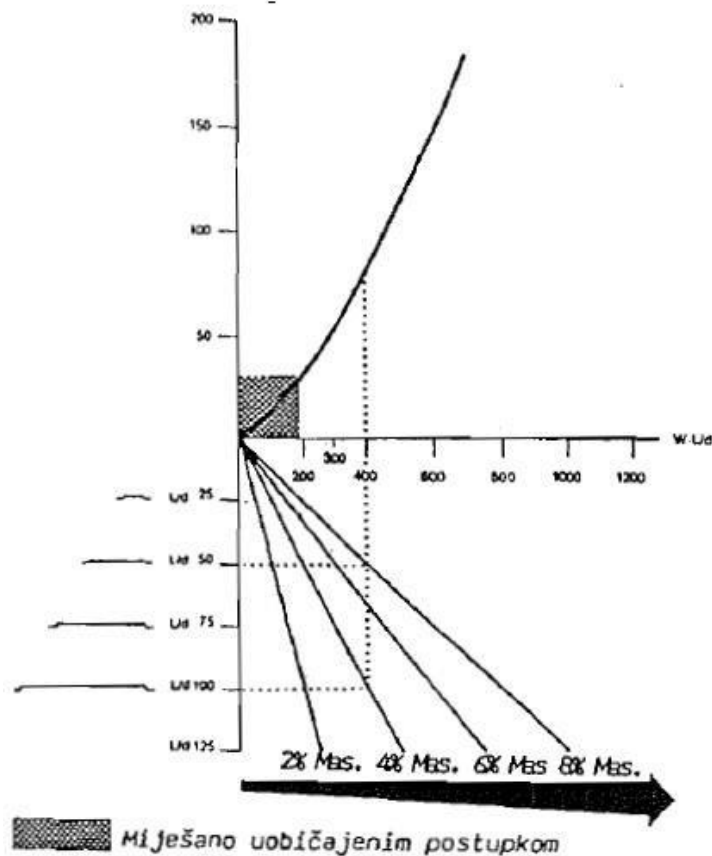
Omjerom površine radnog dijagrama prilikom pojave prve pukotine i površine radnog dijagrama pri nekom višekratniku deformacije pri prvoj pukotini može se prikazati utjecaj vlakana na žilavost. Na taj način se mjere indeksi žilavosti, slika 4, koji ovise o vrsti vlakana i njihovom udjelu u ukupnom volumenu betona. Daljnje zavisne varijable o kojima ovisi ishod takvog mjerenja su i cementna matrica i čvrstoća betona, s naglaskom na vlačnu. [7]



**Slika 4** Indeks žilavosti i njegov mogući porast ovisno o količini vlakana [7]

Indeks žilavosti je jedan od nekoliko orijentira prilikom odabira optimalnog sastava mikroarmiranog betona. Sukladno ASTM C 1018, određivanje indeksa žilavosti uvelike ovisi o mjerenju točnosti progiba prilikom javljanja prve pukotine, koji ovise i o vanjskim utjecajima. Ako se uzmu u obzir vanjski utjecaji, kao što je to utiskivanje na mjestu oslonca i mjestu na kojem se opterećenje nanosi, progib koji se izmjeri pri prvoj pukotini može biti veći od stvarnog i nekoliko puta.

Osim indeksa žilavosti, za uspoređivanje različitih sastava mikroarmiranih betona, postoji i izračun žilavosti koji se pokazao pouzdanijim. Izračun žilavosti je prikazan kao površina ispod radnog dijagrama P-y, za  $y=1/150$ . Zaključak jest da krajnja čvrstoća betona ovisi o količini vlakana, faktoru oblika te o karakteristikama prionjivosti i sidrenju vlakana. Dobra ilustracija tome su podaci iz dijagrama na slici 5. Prikazana je korelacija među krajnje čvrstoće i složenog parametra  $w \cdot 1/d$  gdje je  $w$  masa vlakana, a  $1/d$  je koeficijent oblika vlakna.



*Slika 5 Utjecaj duljine vlakana i složenog parametra  $wxl/d$  na krajnju čvrstoću [7]*

Krajnja čvrstoća mikroarmiranog betona može se prognozirati iz poznatih svojstava vlakana i matrice, prema

$$S_c = AS_m(1 - V_f) + BV_f \left(\frac{L}{d}\right)$$

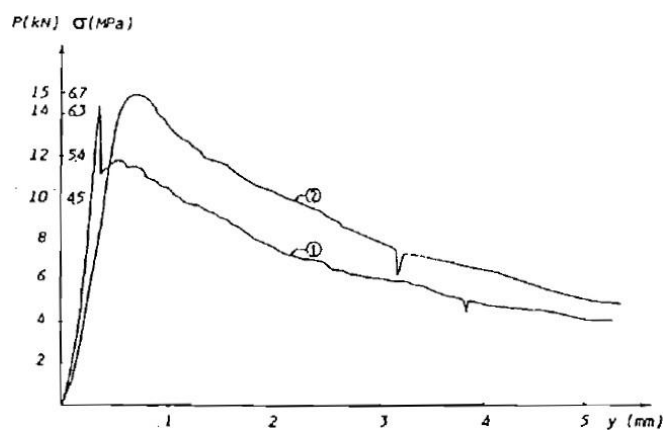
gdje  $S_c$  i  $S_m$  označavaju krajnje čvrstoće matrice,  $V_f$  označava volumni udio vlakana, a  $A$  konstantu. Koeficijent  $B$  ovisi o prionjivosti i orijentaciji vlakana. [7]

Uvođenjem mikroarmature višestruko se povećavaju čvrstoća na umor, dinamička čvrstoća i otpornost na udarce. Slika 6 prikazuje odnos žilavosti prije cikličkog predopterećenja i nakon njega. U odnosu na navedeno, žilavost se ispituje savijanjem nakon cikličkog predopterećenja. Ista ovisi o nivou cikličkog predopterećenja, količini vlakana, te odnosu vlakana i najvećeg zrna agregata.

U odabiru optimalnog sastava spomenutog betona, rezidualna žilavost je dobar pokazatelj. Duljina vlakna mora biti tri ili više puta veća od maksimalnog zrna agregata.

Postoji optimalna količina vlakana iznad koje se ne može postići proporcionalno poboljšanje svojstava MAB dodavanjem vlakana, što je izravna posljedica povećavanja broja vlakana po jedinici površine.

U praksi, kao i prilikom mjerenja, se ispostavilo da specifična prionjivost vlakana opada ako se poveća broja vlakana na jedinicu površine. U slučaju optimalnog doziranja duljine vlakana i količine istih, nosivost MAB i rezidualna žilavost se povećavaju. Trenutno važeća predmnijeva da je ta osjetljivost na optimalan omjer posljedica konsolidiranja defekata u betonu i smanjenja početnih zaostalih vlačnih naprezanja uzrokovanih skupljanjem.[7]



**Slika 6** Karakteristični P-y dijagram, prije (krivulja 1) i nakon (krivulja 2) cikličkog opterećenja [7]

Primjena mikroarmiranih betona u praksi je još uvijek relativno ograničena, upravo zbog visoke cijene vlakana i teškoća u obradi svježeg betona. No, izgledno je pretpostaviti, s obzirom na mogućnost apsorpiranja veće količine energije, velike prednosti u pogledu vlačne i dinamičke čvrstoće, kao i njihovo svojstvo da omogućuju ekonomično rješavanje niza posebnih inženjerskih zadataka, da će se polje njihove primjene nastaviti povećavati.[7]



## 2.2. Primjena mikroarmiranog betona

Mikroarmirani beton se primjenjuje u konstruktivnim elementima gdje klasična armatura nije presudna za sigurnost i cjelovitost konstrukcije, no u nosivim konstruktivnim elementima vlakna ipak ne mogu u potpunosti zamijeniti klasičnu armaturu. Mikroarmirani beton sa čeličnim vlaknima primjenjuje se kod, primjerice, industrijskih podova, predgotovljenih elemenata, za stabilizaciju kosina, u tunelogradnji, potom kod kolničkih ploča, aerodromskih pista, zatim u dijelovima hidrotehničkih objekata, tankim ljuskama i kupolama, za sanaciju i ojačanje konstrukcija te u konstrukcijama izloženim visokim temperaturama, udarnom opterećenju, seizmičkom djelovanju ili eksplozijama. Njegova primjena je također preporučljiva kada treba primiti i apsorbirati veliku količinu energije (npr., kao što je navedeno, od djelovanja neke eksplozije), jer zbog svoje velike vlačne čvrstoće smanjuje opasnost od pojave pukotina. Naposljetku, primjenjuju se i onda kada se u betonski element ne može postaviti uobičajena armatura zbog njegovog nepogodnog oblika.

Prema dostupnim statističkim podacima za područje Europe, mikroarmirani beton najviše se upotrebljava za industrijske podove (oko 50%), u tunelogradnji (oko 45%) i u industriji predgotovljenih elemenata, slika 7 (<5%).



*Slika 7 Mikroarmirani montažni element [12]*



Mikroarmirani beton s polipropilenskim vlaknima, kao posebna vrsta mikroarmiranog betona, koristi se za mlazni beton, u sanacijskim mortovima, za izradu podova, kod mortova za žbuku, za poboljšanje otpornosti na požar i slično. Minimalna količina čeličnih vlakana u betonu treba iznositi  $20 \text{ kg/m}^3$ , a polipropilenskih  $0.9 \text{ kg/m}^3$ . U tablici 2 su prikazani orijentacijski sastavi normalno teških MA. [10]

**Tablica 2** *Orijentacijski sastavi normalno teških MA [9]*

Maksimalno zrno agregata, mm	4	8	16
Količina cementa, $\text{kg/m}^3$	420-700	350-600	300-550
Udio pijeska u agregatu, vol %	100	45	50
Uvučeni zrak, %	7-10	4-7	4-6
Volumni udio vlakana, %			
-čeličnih	0.5-1.5	0.4-1.2	0.3-1.0
-staklenih	2.0-5.0	0.3-1.2	0.8-1.0
-polimernih	0.5-1.5	0.5-1.2	0.15-0.9

### 3. VLAKNA KORIŠTENA ZA MIKROARMIRANJE

Vlakna su elementi kratke duljine. Karakteriziraju ih dužina, promjer, vitkost te vlačna čvrstoća. Pri izboru vrste vlakana potrebno je voditi računa da modul elastičnosti vlakana bude veći od modula elastičnosti betona, te da vlačna čvrstoća primjenjivanih vlakana mora biti znatno veća nego kod betona. Na kvalitetu vlakana utječe i koeficijent oblika vlakana, struktura, dužina i kemijska otpornost. Svojim rasporedom u svježoj betonskoj mješavini vlakna formiraju prostornu rešetku sposobnu da kroz cijeli presjek, bez slabih mjesta, primi i prenese koncentrirane sile. Koeficijent oblika je jedinstveni parametar i definiran je kao omjer duljine i promjera vlakna, te o njemu ovise i svojstva betona u svježem i očvrnulom stanju. S tehnološkog stajališta poželjan je što niži omjer, odnosno što kraća i deblja vlakna, no s tehničkog stajališta povoljnije je da su vlakna duža, jer se bolje sidre u cementni kamen. Vlakna se ponašaju slično kao agregat, ali se lakše umiješavaju u beton. Kako bi se koeficijent oblika pri proizvodnji betona snizio, vlakna se povezuju lijepljenjem u snopove, te se time debljina za istu dužinu povećava. Ljepilo se u dodiru s vodom u betonu otapa i vlakna se ponovno raspršuju i stohastički orijentiraju.

Osnovne skupine vlakana su:

- a) čelična vlakna, slika 9, različitih oblika i dimenzija,
- b) staklena vlakna (u cementnima matricama koriste se samo alkalno otporna vlakna),
- c) sintetička vlakna, slika 8, izrađena s različitim materijalima: polipropilen, polietilen, itd., i
- d) vlakna biljnog porijekla, slika 10 (konoplja, juta, lan, bambus i sl.).



*Slika 8 Sintetička vlakna [8,13]*



*Slika 9 Čelična vlakna [8,13]*



*Slika 10* Primjeri prirodnih biljnih vlakana [14]

Osim navedenih vlakana postoje još i druge vrste vlakana, kao što su ugljična, poliakrilonitrilna vlakna i sl. Prirodna biljna vlakna se koriste samo u običnim betonima u zemljama u kojima su ta vlakna lako dostupna, te u zemljama u razvoju, gdje su konstruktivni elementi s biljnim vlaknima važni za izgradnju jeftinih zgrada. Dakle, nisu pogodna za betone visokih uporabnih svojstava ojačanih vlaknima.

Čelična vlakna uglavnom se koriste kao raspršeno ojačanje industrijskih podova i pločnika u mnogim zemljama, a to je vjerojatno najvažnije polje primjene. Tu su i nekoliko vrsta konstruktivnih elemenata u kojima se čelična vlakna koriste zajedno s čeličnim šipkama, npr. elementi izloženi udarima i zamoru, stupci izgrađeni u seizmičkim zonama, vatrostalni elementi itd. U posljednjih nekoliko godina, raspršena čelična vlakna uspješno se koriste i u prednapetim gredama. Staklena vlakna se koriste uglavnom za vanjske obloge, fasadne ploče i druge elemente u kojima su njihovi učinci posebno potrebni tijekom gradnje. U tablici 3 su prikazana karakteristična svojstva vlakana koja se upotrebljavaju za mikroarmiranje.

Osnovna funkcija primjene vlakana u betonu je:

- a) povećanje vlačne čvrstoće,
- b) poboljšanje otpornosti na pucanje i poslijepukotinsko stanje, te
- c) povećanje otpornosti na udar (eksplozije), habanje i dinamičko opterećenje.

**Tablica 3** Tipična svojstva za mikroarmiranje [7]

Vrsta vlakna	Vlačna čvrstoća MPa	Modul elastičnosti E GPa	Produljenje pri prekidu %	Gustoća, $\rho$ kg/dm <sup>3</sup>
Akrilno	207-414	2.1	25-45	1.1
Azbestno	552-966	84.2	0.6	3.2
Pamučno	414-960	4.8	3-10	1.5
Stakleno	1035-3795	68.9	1.5-3.5	2.5
Najlonsko	799-828	4.1	16-20	1.1
Poliestersko	725-863	8.3	22-23	2.4
Polietilensko	690	0.1-0.4	10	0.95
Polipropilensko	528-759	3.5	25	0.9
Rajonsko	414-621	6.9	10-25	1.5
Kamena vuna	483-760	69-117	0.6	2.7
Čelično	276-2760	210	0.3-35	7.8
Beton	2-4	30	0.35	2.35

### 3.1. Korelacija vlakana i cementne matrice; načini međusobnog djelovanja

Vlakna utječu na svojstva kompozita u svježem i u krutom stanju, ali često u suprotnim funkcijama, zbog čega valja biti posebno oprezan prilikom određivanja količine ugrađenih vlakana.

Za ilustraciju opisanog, količinsko povećanje vlakana u krutom stanju prirodno teži poboljšanju kvaliteti kompozita, ali s druge strane smanjuje fluidnost smjese u svježe miješanom stanju. Navedeno ukazuje na to da se potencijalno poboljšanje svojstava u krutom stanju ne može u potpunosti postići, bilo zbog nejednolike raspodjele vlakana, nepotpune konsolidacije ili slabe zbijenosti svježe mješavine. [9]

Da bi se smanjio štetni utjecaj na svojstva kompozita u svježe miješanom stanju, trebalo bi upotrijebiti malu količinu vlakana, no mala količina ne pridonosi poboljšanju svojstva u nikakvoj značajnoj mjeri, čime ni kompozit ne dobiva osobito na kvaliteti. Naprotiv, veća količina vlakana predstavlja u prethodnim poglavljima opisane poteškoće u proizvodnji, ali maksimizira potencijalni stupanj kvalitete matrice u krutom stanju. Potrebno je razmotriti interakciju vlakana sa matricom, u svježem i krutom stanju, te dovesti mjere do kompromisa koji daje najbolja moguća svojstva kompozita. [9]

### 3.1.1. Korelacija vlakana i cementne matrice u svježem stanju kompozita

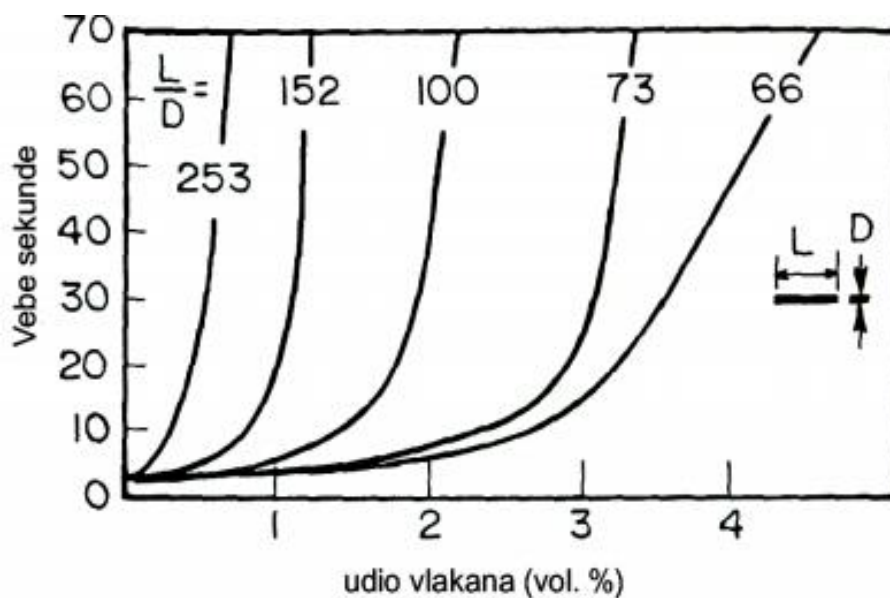
Mikroarmirani beton u svježem stanju treba imati dovoljnu obradivost da se može pravilno ugraditi, zbijati i njegovati, a da se pritom osigura pravilna raspodjela vlakna, bez segregacije i grudvanja. Faktori koji utječu na svojstva mikroarmiranog betona/morta u svježem stanju:

- količina i vrsta vlakana,
- koeficijent oblika vlakana,
- veličina maksimalnog zrna agregata, i
- količina dodanih sitnih čestica.

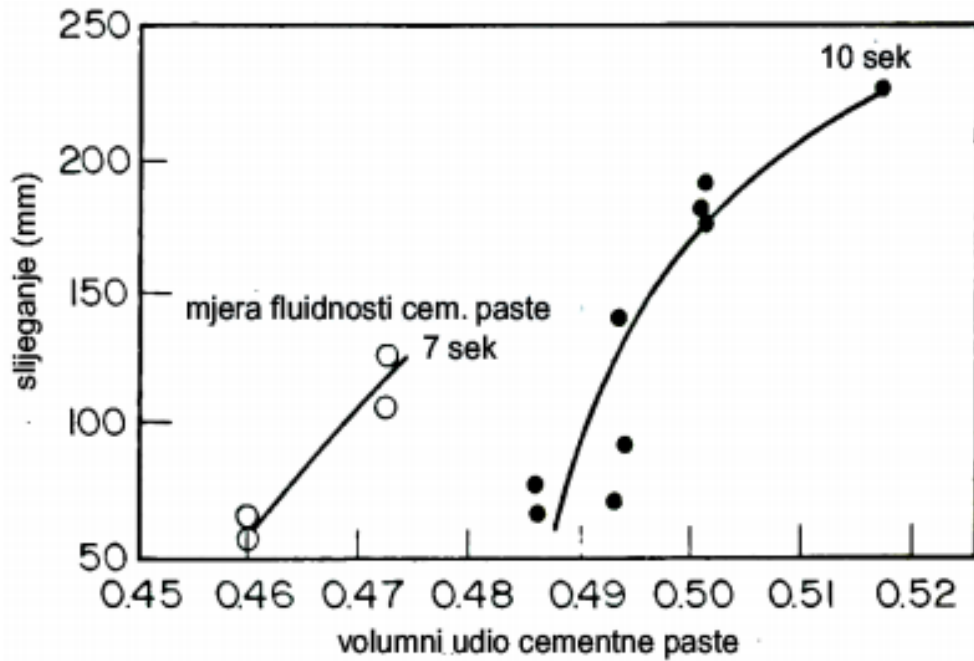
Na slici 11 prikazano je da veći faktor oblika vlakana nepovoljno djeluje na konzistenciju kompozita. Pri ispitivanju su korištena čelična vlakna.

Povećanje volumnog udjela cementne paste povoljno utječe na obradivost mikroarmiranog betona što je vidljivo na slici 12.

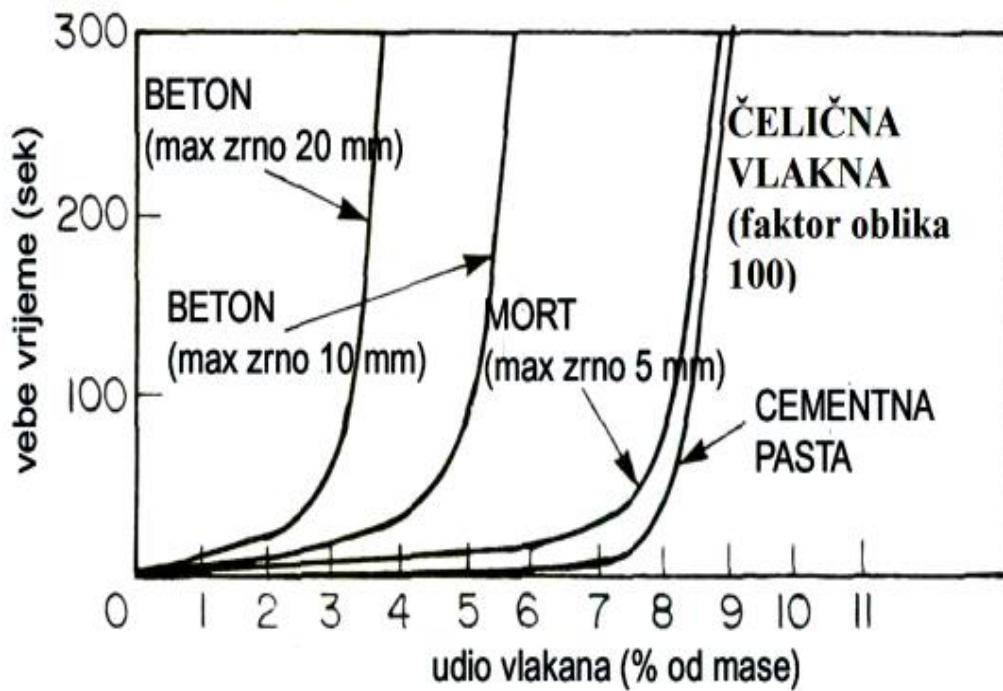
Iz prikaza slike 13 razvidno je da se povećanjem maksimalnog zrna agregata smanjuje količina čeličnih vlakana, dok se povećanjem vlakana smanjuje obradivost kompozita. [9,15]



*Slika 11 Utjecaj faktora oblika vlakana na obradivost mikroarmiranog morta, ojačanog čeličnim vlaknima [9,15]*



*Slika 12 Utjecaj volumnog udjela i konzistencije paste na obradivost mortova ojačanim čeličnim vlaknima [9,15]*



*Slika 13 Utjecaj maksimalnog zrna agregata na konzistenciju kompozita [9,15]*

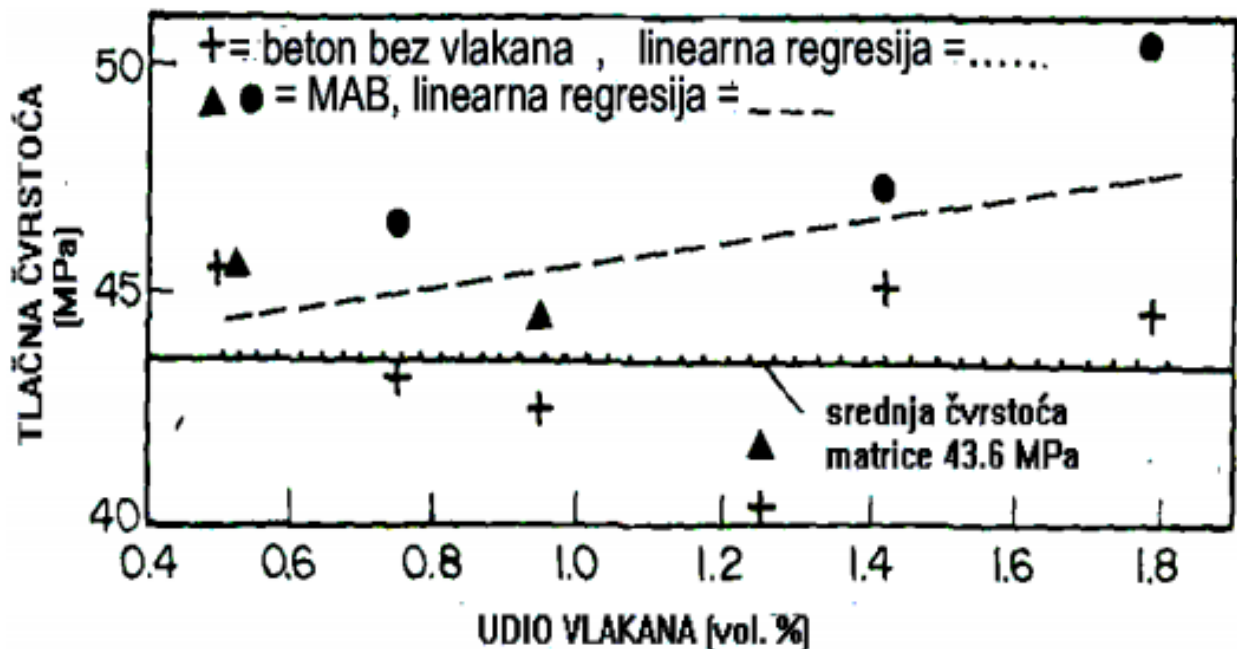


### 3.1.2. Korelacija vlakana i matrice u krutom stanju kompozita

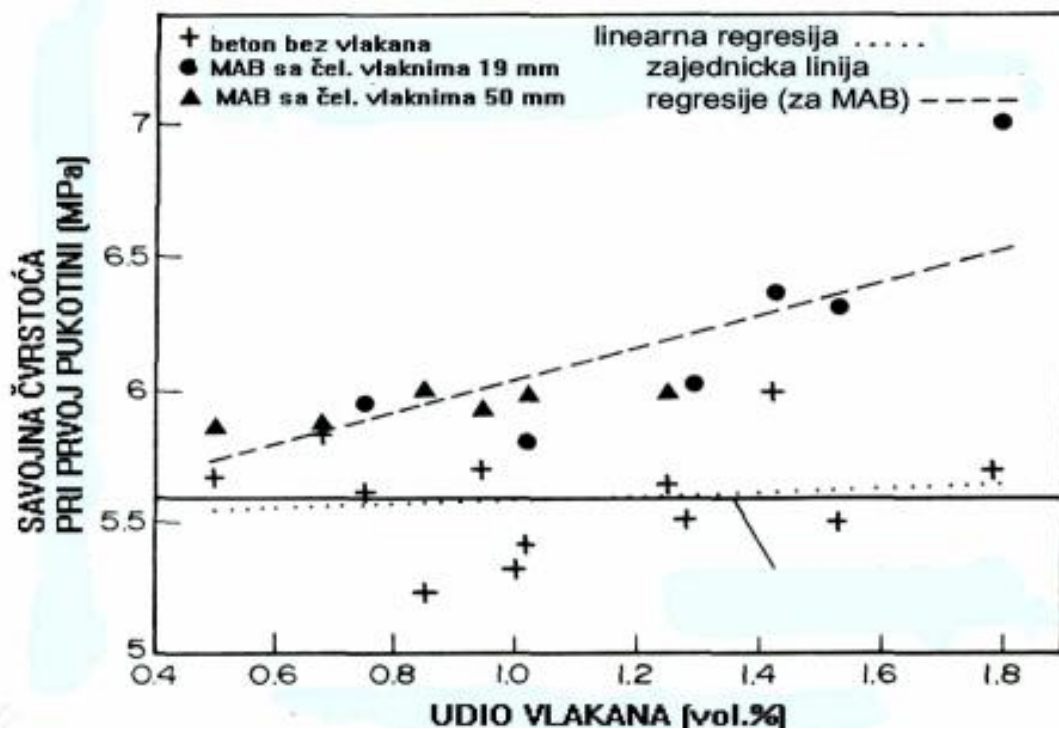
Stupanj poboljšanja svojstava kompozita u očvrslom stanju nakon mikroarmiranja betona vlaknima ovisi o tri stvari:

- količini i vrsti vlakana,
- kvaliteti betonske cementne matrice, i
- o prionjivosti matrice i vlakana.

U odnosu na izbor vrste vlakana, 1994. godine je otkriveno, od strane Johnston i sur., da se dodavanjem čeličnih vlakana u količini do 2% volumnog udjela malo utječe na poboljšanje tlačne, slika 14, i savojne čvrstoće, slika 15, kompozita. Štoviše, pokazalo se da se u nekim slučajevima, osim što je poboljšanje u vidu povećanja tlačne i savojne čvrstoće nezatno, kao nepoželjna posljedica pojavljuje i smanjenje čvrstoće, koje smanjenje se javlja uslijed nepotpune konsolidacije uzorka koja je uočljiva zbog promjene gustoće. U konačnici, iako je odabir vrste vlakana važan, pokazalo se da tlačna i savojna čvrstoća uglavnom ovise prvenstveno o kvaliteti cementne matrice. [15]



Slika 14 Utjecaj vlakana na tlačnu čvrstoću kompozita, za dvije vrste čeličnih vlakana [9,15]

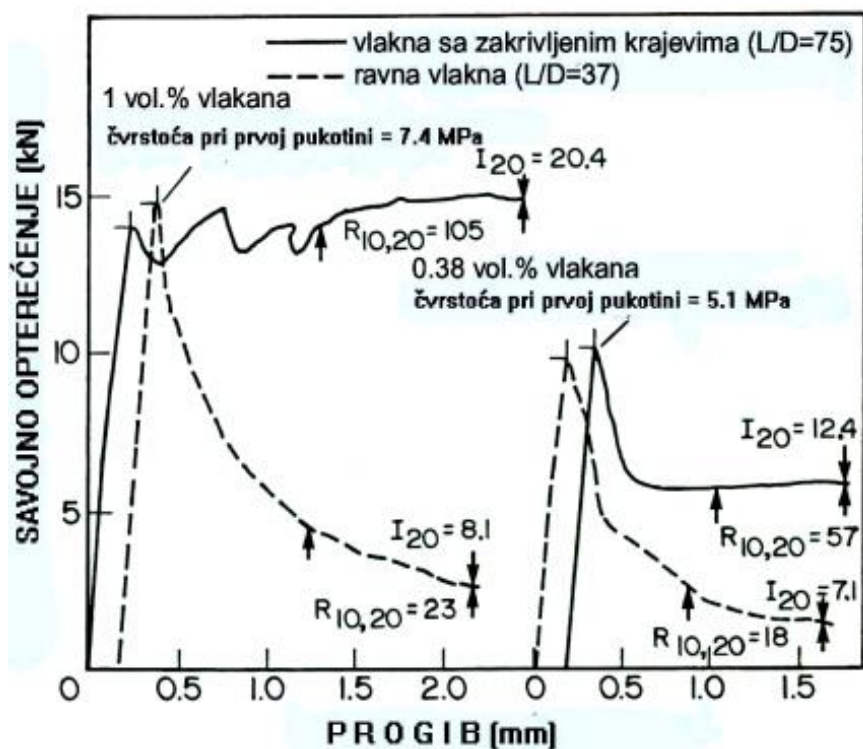


*Slika 15 Utjecaj vlakana na savojnu čvrstoću kompozita, za dvije vrste čeličnih vlakana [9,15]*

Mikroarmiranjem cementne matrice, u očvrslom stanju se znatno poboljšavaju sljedeća svojstva: [9]

- žilavost, slika 16
- duktilnost
- sposobnost apsorpcije energije
- otpornost na udar
- čvrstoća na umor
- sprječavanje nastanka pukotine, smanjenje njihove širine i razmaka





*Slika 16 Razlika između rezidualne čvrstoće i žilavosti za dvije vrste vlakana u dvije različite cementne komponente [9,15]*

Nakon pojave prve pukotine u kompozitu, vlakna su ta koja prenose naprezanja s raspucanog presjeka na neraspucani, susjedni presjek. Pri prenošenju naprezanja, bitna je međusobna posmična čvrstoća između vlakana i cementne matrice. Prijenos naprezanja s matrice na vlakna vrši se posmičnim silama na dodirnoj plohi između vlakana i matrice. Tijekom prijenosa, vlakna su podložna cijelom opterećenju koje kompozit nosi nakon pojave pukotine, a konačna čvrstoća ovisi samo o količini i svojstvima vlakana. Minimalni volumenski udio potreban za podupiranja opterećenja izražava se kao kritični volumenski udio vlakana  $V_f(CR)$ . [9]

$\sigma_{fu}$  – čvrstoća vlakana

$E_f$  – modul elastičnosti vlakana

$$V_{f(CR)} = \frac{\sigma_{mu}}{(\sigma_{fu} - \varepsilon_{mu} E_f + \sigma_{mu})}$$

$\sigma_{mu}$  – čvrstoća matrice

$\varepsilon_{mu}$  – pukotinsko naprezanje

## 4. AGREGAT

### 4.1. Uvod

Agregat za beton se dobiva od kamena te se naziva kameni ili mineralni agregat. Može biti prirodni ili umjetno drobljeni, a u novije vrijeme se istraživači se više okreću ka recikliranom agregatu u svrhu održive gradnje te očuvanja neobnovljivih izvora. U svrhu postizanja veće ekonomičnosti postupka proizvodnje betona, uputno je koristiti veći udio agregata obzirom da je isti znatno jeftiniji od cementnog veziva. Maksimalno zrno agregata bi trebalo biti što veće s kontinuiranom raspodjelom zrna od najsitnijih čestica do krupnog agregata, jer, s obzirom da agregat sačinjava i do 80% betona, njegova čvrstoća ultimativno utječe na čvrstoću samog betona. S obzirom da je tlačna čvrstoća jedna od osnovnih karakteristika betona, agregat mora ispunjavati određene uvjete kvalitete kako bi se postigle željene čvrstoće. U tablici 4 prikazani su uvjeti za kvalitetu kamenog agregata za beton prema važećim standardima. [16]

**Tablica 4** *Uvjeti kvaliteta kamenog agregata za beton [17]*

Tehnička svojstva	Ispitivanje prema normi	Razred ili kriterij
Granulometrijski sastav frakcije agregata	HRN EN 933 - 1	G <sub>F</sub> 85 i CP ili MP odnosno CF ili MF - sitni agregat
		G <sub>C</sub> 85/20 i G <sub>C</sub> 90/15 - krupni agregat
		G <sub>A</sub> 90 - nefrakcionirani agregat
Sadržaj sitnih čestica	HRN EN 933 - 1	f <sub>3</sub> - prirodni i miješani sitni agregat
		f <sub>10</sub> - drobljeni sitni agregat
		f <sub>1,5</sub> - krupni agregat
		f <sub>3</sub> - nefrakcionirani agregat
Oblik zrna krupnog agregata	HRN EN 933 - 4	SI <sub>40</sub> - betoni do razreda tlačne čvrstoće C12/15
		SI <sub>20</sub> - ostali betoni
Otpornost na drobljenje krupnog agregata	HRN EN 1097 - 2	LA <sub>35</sub> - betoni opće namjene
		LA <sub>40</sub> - betoni razreda izloženosti XF1 do XF4

Tehnička svojstva	Ispitivanje prema normi	Razred ili kriterij
Sadržaj sulfata topljivog u kiselini	HRN EN 1744 - 1	AS <sub>0,2</sub> - za sve agregate osim zrakom hlađenu zguru AS <sub>1,0</sub> - za zrakom hlađenu zguru
Sadržaj ukupnog sumpora	HRN EN 1744 - 1	Maks. sadržaj ukupnog sumpora: 1% - za sve agregate osim zrakom hlađene zgyure 2% - za zrakom hlađenu zguru 0,1 - ako u agregatu ima pirotina, nestabilne forme želj. sulfida FeS
Sadržaj klorida	HRN EN 1744 - 1	Maks. sadržaj iona klora: 0,15% - nearmirani beton 0,06% - armirani beton 0,03% - prednapeti beton
Volumenska masa zrna i upijanje vode		Projektne zahtjevi ili zahtjevi naručitelja i kupca
Sastojci koji utječu na brzinu vezivanja i očvršćivanja betona	HRN EN 1744 - 1	Nije dopušteno
Mineraloško - petrografski sastav agregata	HRN EN 932 - 3	Projektne zahtjevi ili zahtjevi naručitelja
Otpornost na zamrzavanje krupnog agregata	HRN EN 1367 - 1 ili HRN EN 1367 - 2	F <sub>NR</sub> ili MS <sub>NR</sub> - betoni u suhom okruženju F <sub>2</sub> ili MS <sub>25</sub> - betoni razreda izloženosti XF1 i XF3 F <sub>1</sub> ili MS <sub>18</sub> - betoni razreda izloženosti XF2 ili XF4
Otpornost na abraziju	HRN EN 1097 - 8	AA <sub>20</sub>
Alkalnoaktivni sastojci	CEN CR 1901	Ako postoji mogućnost alkalnoagregatne reakcije potrebno je provesti daljnja ispitivanja
Sadržaj školjaka u krupnom agregatu	HRN EN 933 - 7	SC <sub>10</sub>
Skupljanje agregata uslijed sušenja	HRN EN 1367 - 4	Maks. 0,075%
Sadržaj raspadnutog dikalcijevog silikata i raspadnutog željeza	HRN EN 1744 - 1	Nije dopušteno ako je agregat proizveden iz zrakom hlađene zgyure

## 4.2. Prirodni agregat

Prirodni agregat, slika 17, sastoji se od drobljenog kamena i pijeska nastalog usitnjavanjem temeljne stijene ili prirodno nekonsolidiranog pijeska i šljunka. To je glavna komponenta betona i asfalta te ima široku primjenu, na ulicama, autocestama, prugama, mostovima, zgradama, nogostupima, kanalizaciji, elektranama i branama - gotovo u svakom dijelu izgrađenog okoliša. Agregat je najiskorištavanija mineralna ruda, ne računajući fosilna goriva, u smislu volumena i vrijednosti. Tijekom 1998. u svijetu je proizvedeno oko 20 milijardi tona agregata u vrijednosti od oko 120 milijardi eura. Procjenjuje se da će svjetska potražnja rasti za 4,7% godišnje. [18]



*Slika 17 Prirodni agregat [19]*

Pijesak i šljunak kopaju se diljem svijeta i predstavljaju najveći volumen čvrstog materijala izvađenog na globalnoj razini i najveći volumen sirovina korištenih na zemlji nakon vode (oko 70% - 80% od 50 milijardi tona iskopanog materijala godišnje). Nastali erozivnim procesima tijekom tisuća godina, sad se vade brzinom daleko većom od njihove obnove. Količina drobljenog agregata koja se minira raste eksponencijalno, uglavnom kao rezultat brzog gospodarskog rasta i rezultirajućeg buma u građevinarstvu. Konzervativna procjena od 40 milijardi tona godišnje za svjetsku potrošnju agregata znači dvostruko veću količinu sedimenta godišnje koju prenose sve rijeke svijeta. [20]

Proizvodnja agregata za izradu betona, kao i u druge svrhe, povećava potrošnju energije i stvara stakleničke plinove. Međutim, takva proizvodnja, uz navedeno, obuhvaća i čitav niz složenih postupaka koji su, svaki za sebe, od štetnog utjecaja na okoliš, od kojih posebice treba izdvojiti:

- uklanjanje vegetacije i zemlje, izgradnja postrojenja i ostale prateće aktivnosti,
- bušenje, miniranje (za drobljeni agregat) i iskop materijala,
- transport materijala od izvorišta do postrojenja za obradu,
- obradu agregata, uključujući više stupnjeva drobljenja, ispiranja i dr., i
- transport do mjesta uporabe.

Naravno, može se (i treba) utjecati na smanjenje nabrojanih negativnih učinaka, koji ponajviše ovise o veličini izvorišta/ postrojenja, organizaciji postrojenja, vrsti stijene ili šljunka, vrsti opreme, njenoj učinkovitosti i održavanju, iskustvu radnika, vrsti transporta i udaljenosti od mjesta uporabe. Potrošnja energije i troškovi transporta, odnosno ekonomičnost i održivost postupka proizvodnje, većinom su presudan faktor za upotrebu agregata iz određenog izvorišta. Preporučuje se upotreba lokalnog agregata radi smanjenja troškova transporta i emisije CO<sub>2</sub>. Pri proizvodnji krupnog agregata emitira se 0,0459 t CO<sub>2</sub> po toni proizvedenog krupnog agregata, a pri proizvodnji sitnog agregata 0,0139 t CO<sub>2</sub> po toni proizvedenog sitnog agregata (uključujući transport). Pri proizvodnji agregata javlja se mnogostruki utjecaj na okoliš u vidu buke, prašine, povećanja prometa, onečišćenja podzemnih voda i vizualnih promjena krajolika koje u smislu održivosti, usporedno s razvitkom ljudske svijesti o važnosti očuvanja prirodnog okoliša, naprosto više nisu prihvatljive. [5]

Utjecaj proizvodnje agregata na okoliš:

1. Promjena krajolika jedan je od najvećih utjecaja koji proizvodnja agregata ima na okoliš, pa se kao uvjet postavlja rehabilitacija kamenoloma.

2. Buka i prašina – Primarni izvor buke nastaje od kretanja vozila, rada proizvodnog pogona i miniranja. Proizvođač je odgovoran da razina buke ne prelazi dozvoljene vrijednosti, o čemu postoji precizna pravna regulativa. Opremu koja proizvodi buku ili prašinu treba smjestiti ispred prirodnih barijera koje će apsorbirati buku i onemogućiti prenošenje prašine.

3. Vibracije od miniranja mogu se pojavljivati na dnevnoj razini ili jednom do dva puta godišnje, pri čemu može doći do vibracija kroz površinu zemlje, a dio energije odlazi u atmosferu i najviše se osjeća unutar konstrukcije.

4. Utjecaj na podzemne vode – Ovisi o lokalnim geološkim, hidrološkim i klimatskim uvjetima. U suhoj klimi evaporacija vode može smanjiti razinu podzemnih voda; u vlažnoj klimi oborine mogu dotjecati u kamenolom i povećati razinu podzemnih voda.

5. Utjecaj na površinske vode – Pri proizvodnji agregata uklanja se vegetacija, što može povećati otjecanje. Da bi se smanjio nepovoljan utjecaj na okoliš, potrebno je prije vađenja agregata provesti detaljne hidrološke studije. Neprikladno vađenje agregata može ubrzati eroziju, ugroziti stabilnost nasipa i kvalitetu vode i prouzročiti gubitak obalnih staništa, no oštećena područja mogu se zaštititi vegetacijom i drenažom. Inspekcijom i primjerenim održavanjem treba se osigurati kontinuirana kontrola erozije.

6. Utjecaj prometa – U području proizvodnje agregata dolazi do pojačanog prometa kamiona – radi smanjenja utjecaja na ostali promet, moguće je na pojedinim dijelovima projektirati posebne prometnice za transport agregata iz kamenoloma i šljunčara; prekriti agregat koji se vozi u kamionima da bi se spriječilo rasipanje materijala, primjereno održavati kamione i prilagoditi prometnicu novim zahtjevima. [5]

Čimbenici koje je moguće kontrolirati kako bi se smanjila potreba za agregatom ograničeni su, pa je uputno nastaviti vršiti istraživanja o prihvatljivim alternativama prilikom korištenja građevinskih materijala. Potrošnja lokalnog agregata može se smanjiti upotrebom alternativnih resursa, primjerice uporabom recikliranog agregata nastalog rušenjem građevina, zgure, industrijski proizvedenih agregata, recikliranog stakla, reciklirane opeke i slično. Upotreba recikliranog agregata je u odnosu na okoliš znatno prihvatljivija varijanta, no zbog potrebe da se za svaki od alternativnih materijala potvrdi njihova prikladnost za specifičnu namjenu je nažalost i manje isplativa.

### **4.3. Reciklirani agregat**

Reciklirani agregat, slika 18, je agregat dobiven recikliranjem inertnog građevnog otpada. Prilikom primjene alternativnih materijala, treba pripaziti na činjenicu da kvaliteta recikliranog agregata ovisi o podrijetlu građevinskog otpada i načinu njegove obrade. U postupku proizvodnje i primjene recikliranog agregata, postoje primarni i sekundarni procesi. Sami prihvati građevinskog materijala i otpada od rušenja, kao i postupak proizvodnje takve vrste agregata se smatra primarnim postupkom. Nabava, prodaja, održavanje i gospodarenje spadaju u sekundarne procese.





*Slika 18 Reciklirani agregat [21]*

Reciklirani agregat se kategorizira ovisno o izvorišnom agregatu kojeg se reciklira, pa se tako u građevinarstvu koristi stari asfalt od cesta recikliranjem kojeg se dobije reciklirani asfaltni agregat, a polje primjene uključuje još i korištenje materijala od zidane gradnje, betonskog materijala, kao i miješanog agregata.

Naravno, kada se vrši komparacija recikliranog s prirodnim agregatom, prilikom uporabe recikliranog agregata se treba posebno voditi računa o njegovim promjenjivim svojstvima (prilikom sastavljanja betonske mješavine i izrade betonskog morta).

Granične vrijednosti onečišćenja temeljene su na aspektima čvrstoće i trajnosti, kao što su:

- utjecaj na usporavanje očvršćivanja cementa,
- korozijska armature,
- bubrenje uslijed apsorpcije vode (npr. drvo),
- formiranje etringita (kalcij aluminij sulfat),
- alkalno silikatne reakcije,
- smanjivanje tlačne čvrstoće (npr. asfalt), i dr.

Za svaki tip recikliranog agregata postoje propisani zahtjevi. Vrijednosti agregata kao što su raspodjela veličine zrna, oblik, alkalno-agregatne reakcije i sadržaj materijala su iste kao i kod prirodnog agregata, no svaka vrsta recikliranog agregata ima i svoje posebne zahtjeve. Univerzalni zahtjevi su da udio sitnih čestica mora biti maksimalno 5%, i da agregat ne sadrži čestice gline, a udio tvari koje sadrže sumpor treba biti maksimalno 1%. S druge strane, postupak procjeđivanja i razina dozvoljenog onečišćenja su ograničeni nacionalnim specifikacijama. [22]

#### **4.3.1. Beton od recikliranog agregata**

Prilikom izrade betona od recikliranog agregata, treba imati na umu značajnu prisutnost nečistoća u obliku laganih čestica, što je uzrokovano malom gustoćom prvobitnog morta, a povezano je s velikom apsorpcijom prirodnog agregata primijenjenog za pripremu betona. Nečistoćama u vidu laganih čestica smatraju se čestice čija je gustoća manja od 2000 kg/m<sup>3</sup>, pa je smjernica da se udio laganih čestica ograniči na 0,97 % za spravljanje betona, s do 20 % udjela recikliranog agregata.

Sukladno preporukama RILEM-a, što je akronim za „Međunarodno udruženje laboratorija i stručnjaka za građevinske materijale, sustave i konstrukcije“, dopuštena ukupna količina svih nečistoća u recikliranom agregatu mora biti ne veća od 1 %. [22]

Prirodni agregat obično ima veću gustoću od recikliranoga, i to posebice gustoća sitnog agregata uslijed većeg sadržaja cementne paste i morta na površini zrna.

Svojstva koja utječu na prionjivost cementnog kamena i agregata u betonu, otpornost betona na djelovanje smrzavanja, kemijsku i erozijsku otpornost betona su poroznost agregata, propusnost za vodu i apsorpcija vode. Europske norme ne propisuju nikakve orijentacijske kriterije u pogledu vrijednosti upijanja vode recikliranog agregata. Do povećanog upijanja vode recikliranog agregata dolazi zbog većeg stupnja upijanja cementnog morta koji obavija zrna agregata. Rezultati španjolskih istraživanja su pokazali da se upijanje vode recikliranog agregata kreće u rasponu od 4,8 % do 9,6 %. Sukladno njihovim normama, vrijednost je ograničena na 5 %, pa navedena istraživanja mogu poslužiti kao okvir. Međutim, određene preporuke za projektiranje recikliranim agregatom su strože od upravo navedenih i propisuju vrijednost apsorpcije vode mješavine recikliranog i prirodnog agregata od 3 %. [23, 24]



Strogo kontroliranje sastavnih komponenti u agregatu je nužno za kvalitetu betona. Iz tablice 5 i 6 je razvidna klasifikacija sastavnih komponenti krupnih recikliranih agregata, koja nije bila obuhvaćena prethodnom verzijom norme HRN EN 12620:2002.

**Tablica 5** Klasifikacija sastavnih komponenti krupnih recikliranih agregata [22]

<b>Komponenta</b>	<b>Sadržaj</b> (postotak mase)	<b>Razred</b>
Rc	≥90	Rc90
	≥80	Rc80
	≥70	Rc70
	≥50	Rc50
	<50	RcDeklarirani
	Bez zahtjeva	RcNR
Rc + Ru	≥95	Rcu95
	≥90	Rcu90
	≥70	Rcu70
	≥50	Rcu50
	<50	RcuDeklarirani
	Bez zahtjeva	RcuNR
Rb	≤10	Rb10
	≤30	Rb30
	≤50	Rb50
	>50	RbDeklarirani
	Bez zahtjeva	RbNR
Ra	≤1	Ra1-
	≤5	Ra5-
	≤10	Ra10-
X + Rg	≤0.5	XRg0.5-
	≤1	XRg1-
	≤2	XRg2-
	<b>Sadržaj</b> [Cm <sup>3</sup> /kg]	<b>Kategorija</b>
FL	≤0.2 <sup>a</sup>	FL0.2-
	≤2	FL2-
	≤5	FL5-

<sup>a</sup> Kategorija ≤0.2 je namijenjena samo za posebne primjene visokokvalitetnih završavanja površina

**Tablica 6** Analiza pojmova iz tablice 5 [22]

Komponentna	Opis
Rc	Beton, betonski proizvodi, mort, betonski zidni blokovi
Ru	Nevezani agregat, prirodni kamen, hidraulički vezan agregat
Rb	Zidni elementi za zidanje od gline (opeka, pločice), kalcijev silikatni elementi za zidanje, aerirani beton
Ra	Bitumenski materijali
FL	Lebdeći materijali
X	Drugi materijali:
	-kohezivni materijali (glina, humus)
	-metali (željezni i neželjezni)
	-neplutajuće drvo, plastika, guma
	-gipsane žbuke
Rg	Staklo

Beton od recikliranog agregata je, analizom podataka iz dostupne literature, po svim svojim svojstvima najbliži lakoagregatnim betonima. Beton od recikliranog agregata s udjelom zamjene 100% i s velikim udjelom cementa, može postići srednju tlačnu čvrstoću 45 N/mm<sup>2</sup>, no isti se nije pokazao ekonomski isplativ za proizvodnju. Betoni od recikliranog agregata (do 25% recikliranog agregata) pripadaju grupi betona sa srednjom tlačnom čvrstoćom 30-45 N/mm<sup>2</sup>. Prilikom odlučivanja na uporabu recikliranog agregata, potrebno je ispitati koji je optimalni koeficijent zamjene prirodnog agregata recikliranim koji daje mješavinu zadovoljavajućih svojstava i čija je proizvodnja ekonomski isplativa. Postotak zamjene prirodnog agregata recikliranim značajno varira te može biti između 1 i 100 %. Važno je pravilno odabrati udio zamjene prirodnog agregata s recikliranim. Ovisno o udjelu, može se dobiti beton od recikliranog agregata sa svojstvima približno sličnim, boljim ili daleko lošijim od betona od prirodnog agregata. Poteškoća prilikom primjene recikliranog agregata je upravo u njihovoj promjenljivoj i neujednačenoj kvaliteti, jer se ne može uvijek jamčiti ujednačenost porijekla agregata. Tako primjerice u slučaju korištenja agregata nastalog rušenjem konstrukcijskih elemenata neke građevine, izvor takvog agregata je vrlo

različit i svakako neće biti ujednačenog sastava, stoga je smjernica da koeficijent zamjene bude u intervalu 50-75 % [22].

#### **4.3.2. Plastični agregat**

U posljednjih nekoliko desetljeća u svijetu je došlo do značajne potrošnje plastičnih proizvoda što znatno doprinosi velikoj proizvodnji plastičnog otpada. Mnogi se plastični proizvodi, poput PET ambalaže koriste jednokratno stoga su se i eksperimentalna istraživanja usredotočila na uporabu plastičnog otpada kao alternativne sirovine, u ovom slučaju kao zamjene za agregat. Razni autori su u svojim istraživanjima koristili plastični otpad u dva oblika: kao vlakna ili kao zamjenu za agregat. Vrste korištene plastike su polietilentereftalat (PET), polivinilklorid (PVC), polietilen niske gustoće (LPDE) i polietilen visoke gustoće (HDPE). U sljedećim poglavljima dan je osvrt na istraživanja usmjerena ka zamjeni prirodnog agregata, plastičnim.

##### **4.3.2.1. Osvrt na dosadašnja ispitivanja**

###### ***4.3.2.1.1. Istraživanje trajnosti betona s elektroničkim otpadnim plastičnim agregatom (Alena Sičákova, Erika Figmigová) [25]***

Primjenu plastičnog otpada kao plastičnog agregata (PA) proučavali su Safi i sur. Usredotočili su se na reciklirani PET koji dolazi iz vrećica, proizveden kao fini agregat, u proizvodnji samozbijajućih mortova umjesto pijeska. Pijesak je zamijenjen recikliranim PET - om u težinskim količinama od 0%, 10%, 20%, 30% i 50%. Rezultati mehaničkih ispitivanja pokazali su da je tlačna čvrstoća nakon 28 dana samozbijajućeg morta koji sadrži do 50% plastičnog otpada bila prihvatljiva za lagane mortove zapreminske mase do 1 500 kg/m<sup>3</sup>. Smanjenje tlačne čvrstoće kretalo se između 15% i 33% za mortove koji sadrže 20% - 50% plastičnog agregata. PET granule također su koristili Albano i sur. Proučavali su mehaničko ponašanje betona i otkriveno je da su betonske mješavine koje sadrže PET granule pokazale smanjenje tlačne čvrstoće, čvrstoće na cijepanje te modula elastičnosti.

Kou i sur. su istraživali svojstva svježeg i očvrstlog betona, koji je pripremljen recikliranim plastičnim otpadom dobivenim od PVC cijevi. Sitni plastični agregat je korišten kao zamjena za riječni pijesak. Riječni pijesak djelomično je zamijenjen PVC granulama u postotku od 0%, 5%, 15%, 30% i 45% volumena. Utvrdili su da su obradivost, gustoća, tlačna

čvrstoća i vlačna čvrstoća pri cijepanju lakog agregatnog betona smanjeni, dok su poboljšana duktilnost, skupljanje uslijed sušenja i otpornost na prodiranje kloridnog iona. Autori navode da bi optimalni postotak zamjene trebao biti unutar 15% volumena agregata.

Gregorova i sur. predstavile su svojstva lakog betona koji sadrži ekspanzirani polistiren (EPS), PVC kabele i granule etilen vinil acetata (EVA). Navedeni plastični agregati su se primjenjivali u različitim postocima te je primijećen pozitivan učinak na toplinska svojstva betona. Najveće vrijednosti čvrstoće postignute su uzorcima gdje je dio agregata bio zamijenjen EPS i EVA, kao i kod uzoraka gdje su kombinirani EVA i PVC kabele u omjeru 1:1. Yang i sur. usredotočili su se na proučavanje samozbijajućeg lakog betona, koji je sadržavao reciklirane modificirane čestice plastike od polipropilena (PP). Uvedene su sljedeće četiri zapreminske razine pijeska po volumenu: 0%, 15%, 20% i 30%. Viskoznost samozbijajućeg lakog betona s dodatkom plastičnog agregata je smanjena kad je razina PA povećana do 15%. Primijećeno je poboljšanje tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće pri cijepanju i vlačne čvrstoće pri savijanju dodavanjem PA do 15%.

Kan i Demirboğa istraživali su učinke korištenja reciklirane, termički modificirane polistirenske pjene (MEPS) kao potencijalni agregat u lakom betonu. MEPS agregat korišten je kao zamjena za prirodni agregat u razinama od 0%, 25%, 50%, 75% i 100% volumena. Rezultati korištenja MEPS -a u betonu kao agregata su pokazali da dok su se neka svojstva betona poboljšala, na druga je MEPS agregat utjecao negativno. Velika količina MEPS -a smanjuje gustoću betona i, u skladu s tim, tlačnu čvrstoću. Međutim, tlačna čvrstoća ispitana nakon 28 dana je rasponu od 12,58 MPa do 23,34 MPa te zadovoljava čvrstoću polukonstrukcijskog lakog betona.

Wu i sur. proučavali su učinak recikliranog politetrafluoroetilena (PTFE) na fizikalna i mehanička svojstva betona. U tu svrhu testirali su reciklirani plastični beton s 0%, 3%, 5% i 7% ukupne mase cementa. Dodavanjem PTFE -a betonu povećala se njegova čvrstoća. Tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća pri cijepanju dosegli su svoje najbolje vrijednosti kada je sadržaj PTFE-a iznosio 5% kod testiranja i nakon 7 i 28 dana stvrdnjavanja betona.

Čipovi iz kućišta malih elektroničkih predmeta, poput tipkovnica, televizora, monitora, hladnjaka i mikrovalnih pećnica čine drugu skupinu plastičnog otpada. Ovlašteni subjekti rukovode s opremom koja rastavlja električne i elektroničke uređaje na pojedinačne komponente. Metali, matične ploče, plastika, staklo i drugi materijali odvajaju se i rukuju pojedinačno. Odvojena plastika se dalje obrađuje te se drobi u razne frakcije pomoću drobilice za plastični otpad. Budući da su dijelovi kućišta ovih električnih aparata izrađeni od

različite vrste plastike, otpad je specifičan po tome što je mješavina različitih vrsta plastike različitih svojstava. Sljedeće vrste imaju najveći udio u mješavinama: polietilen (PE), polistiren (PS), polipropilen (PP), polivinil klorid (PVC) i akrilonitril-butadien-stiren (ABS). Ova plastika nije biorazgradiva i predstavlja značajan teret za okoliš. Međutim, ovakva vrsta otpada ima potencijal koristiti se kao agregat.

Relativno je teško pratiti istraživanje ove vrste plastičnog otpada jer, u proučavanju izvora, Sičáková i sur. su otkrili da autori radova nisu baš dosljedni u svojoj karakterizaciji elektroničkog otpada. Mnogi autori koriste izraz e-otpada, no pomnijim pregledom može se vidjeti da se ovaj izraz koristi i za otpad koji sadrži druge dijelove elektronike, poput stakla ili metalnih elemenata. Bilo u uvodu članka, ili u opisu vlastitog eksperimenta, autori često ne navode točan sastav ili vrstu e-otpada. Taj nedostatak i nejasnoću u sadašnjim člancima Sičáková i sur. pripisuju činjenici da je ovo relativno novo područje istraživanja, a nomenklatura i karakteristike ove vrste otpada nisu još čvrsto utvrđene. U najboljem slučaju, otpad se naziva kao e-otpada od plastike (EWP). U posljednjem desetljeću proizvodnja e-otpada povećana je zbog povećanja uporabe elektroničkih komponenti. Velika količina oštećenih matičnih ploča odbacuje se u okoliš bez odgovarajućeg recikliranja.

Samo je nekoliko studija u svom istraživanju identificiralo plastiku iz kućišta malih elektroničkih predmeta. Ashwini je identificirao komponente e-otpada na sljedeći način: katodne cijevi, matične ploče, čipovi i druge pozlaćene komponente, plastika i računalne žice. To znači da je autor izdvojio matične ploče od druge plastike. Ashwini je proučavao EWP kao sitni i krupni agregati u betonu s postotkom zamjene od 0%, 10%, 20% i 30%. Na temelju rezultata, donio je zaključak da se plastika može koristiti kao zamjena djela agregata u betonskoj mješavini. To bi pridonijelo smanjenju jedinične težine betona kao i smanjenju čvrstoće, te bi se takav beton mogao koristiti kod konstrukcijskih zahvata koje zahtijevaju ne nosivi laki beton. Eksperimentalnu studiju o korištenju čestica EWP -a kao krupnog agregata u betonu s postotkom zamjene u rasponu od 0% do 25% težine krupnog agregata proveli su Lakshmi i Nagan. Utvrdili su da s udjelom otpadne plastike do 12% dodavanje e-plastičnog agregata nije značajno utjecalo na smanjenje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće na cijepanje. Dok je s većim udjelom otpadne plastike smanjenje bilo značajnije. Utvrđeno je da je primjena letećeg pepela korisna u poboljšanju svojstava čvrstoće.

Prednosti korištenja EWP -a u betonu prema Ashwiniju su sljedeće: izuzetna svestranost i mogućnost prilagođavanja u svrhu zadovoljavanja posebnih tehničkih potreba; lakša težina od konkurentskih materijala, što smanjuje potrošnju goriva tijekom prijevoza;

trajnost i dugovječnost; otpornost na kemikalije, vodu i udare; izvrsna toplinska i električna izolacijska svojstva; relativno niži troškovi proizvodnje; i povećanje sposobnosti vezivanja s povećanjem temperaturi do tališta. Glavni nedostaci su sljedeći: slaba sposobnost vezanja, koje utječe na kvalitetu cementne matrice i kontaktne zone agregata što utječe na parametre čvrstoće betona. Prema Awoyeri i Adesini postoje ograničenja primjene plastičnog otpada, posebice zbog nedostatka postavljenih standarda u tom području.

Iz prezentiranih radova usredotočenih na ispitivanje plastičnog agregata u betonu ili mortu, pored svojstva svježih smjesa, usredotočuju se i na ispitivanje mehaničkih svojstava. Utjecaji su dvosmisleni, jer autori izvješćuju i o poboljšanju i o pogoršanju navedenih svojstava. Istraživanje otpornosti na izravno agresivno djelovanje predstavljeno je u manjoj mjeri stoga bi u budućnosti trebalo obratiti pažnju na utjecaj agresivnog djelovanja na beton s plastičnim agregatom.

#### ***4.3.2.1.2 Upotreba plastičnog otpada kao agregata u pripremi cementnog morta i betona, osvrt (Nabajoti Saikia, Jorge de Brito) [26]***

Saikia i de Brito saželi su studije o utjecaju PA na skupljanje, apsorpciju vode, propusnosti plinova i mikrostrukturu te su došli do zaključka da korištenje plastičnog otpada kao agregata u betonu može poboljšati različita svojstva, što posljedično može riješiti dio problema povezanog s odlaganjem plastičnog otpada. Neka od ovih poboljšanih svojstava su istaknuta u nastavku:

1. Ugradnja plastike može smanjiti gustoću betona. Proučavane studije pokazuju da betoni koji sadrži različite vrste plastičnog agregata zadovoljavaju različite nacionalne standarde za laki beton.

2. Korištenje otpadne plastike u betonu može poboljšati njegovu žilavost stoga ova vrsta betona može apsorbirati visoke količine energije, što ima nekoliko praktičnih implikacija. Kompozit od lakog betona s plastičnim agregatom u kombinaciji s poboljšanom žilavošću ima potencijalnu budućnost kod izgradnje građevina otpornih na potres.

3. Iako je dostupno vrlo malo podataka, uočeno je da dodavanje plastičnog otpada kao agregata do određene razine može poboljšati otpornost betona na habanje, koja ima nekoliko praktičnih primjena poput betoniranja blokova za popločavanje i za hidraulične konstrukcije.

4. Plastični otpadni agregat ima značajno nižu toplinsku vodljivost od prirodnog agregata koji se koristi u pripremi betona. Tako će beton koji sadrži plastični agregat imati

bolju toplinsku izolaciju od konvencionalnog betona, što se može iskoristiti za kontroliranje gubitka topline zimi, odnosno povećanja topline ljeti.

Međutim, za praktičnu primjenu plastičnog otpada u pripremi betona, neki drugi važni aspekti, poput analize životnog ciklusa (LCA) te recikliranja na kraju uporabnog vijeka trebaju biti evaluirani.

Značajan je rad proveden je na iskorištavanju različitih vrsta plastičnog otpada kao agregata u betonu. Rezultati iz osvrta [26] su pokazali da se plastični otpad može koristiti kao djelomična zamjena prirodnog agregata. Analizom rezultata dobivenih u studijama [26] mogu se izvući sljedeći zaključci:

1. Postoje dva paralelna pogleda na performanse obradivosti betona koji sadrži plastični agregat. To je uglavnom zbog veličine i oblika plastičnog agregata. Pahuljičast, kao i porozni plastični agregat smanjuju vrijednosti slijeganja svježe betonske mješavine, dok plastični agregat sfernog oblika povećava. Primjena plastičnog agregata može smanjiti gustoću betona i cementnog morta, stoga je provedeno nekoliko studija za pripremu lakog betona s različitim vrstama plastičnih agregata.

2. Bez obzira na vrstu plastike i količinu zamjene, ugradnja plastičnog agregata smanjuje različita svojstva čvrstoće rezultirajućih uzoraka betona i morta. To je uglavnom zbog vrlo niske čvrstoće vezivanja između površine plastičnih čestica i cementne paste. Uspoređujući s kontrolnom mješavinom primijećeno je smanjenje do 72% tlačne čvrstoće za betone pripremljene zamjenom prirodnog agregata s plastičnim od 20%. Međutim, kod morta pripremljenog s 50% plastičnog agregata kao zamjene pijesku primijećeno je 16% smanjenja tlačne čvrstoće. Varijacije u različitim vrijednostima tlačne čvrstoće posljedice su razlike u vrsti plastičnog otpada koji se koristi, njihovoj veličini i obliku i razlike u ponašanju obradivosti betonske mješavine. Beton koji sadrži djelomičnu zamjenu plastičnog agregata zadovoljava nekoliko kriterija čvrstoće za normalne konstrukcijske betone, kao i za laki beton. Nekoliko tehnika je usvojeno za poboljšanje plastike koja će se koristiti kao agregat u pripremi betona uključujući vezivanje između plastičnog agregata i cementne paste.

3. Smanjenje vlačne čvrstoće na cijepanje i savojne čvrstoće je manje od smanjenja tlačne čvrstoće betona uslijed korištenja plastičnog agregata. Ovakva ugradnja značajno utječe na ponašanje betona tijekom sloma. Beton s PA je duktilniji od konvencionalnog betona i može bolje zaustaviti pukotine nastale tijekom mehaničkog sloma betona.

4. Nema mnogo izvještaja o trajnosti betona koji sadrži plastične agregate. Međutim, postojeći podaci ukazuju na to da ugradnja različitih vrsta plastičnih agregata može poboljšati ponašanje permeabilnosti betona stoga će beton koji sadrži plastični agregat biti izdržljiviji prema agresivnim kemijskim utjecajima. Međutim, skupljanje betona s PA je znatno veće za razliku od konvencionalnog betona.

5. Beton koji sadrži modificirani EPS agregat pokazao je veću otpornost na mraz od konvencionalnog betona. Slično, otpornost na požar kod betona koji sadrži PET-agregat inferiorno je u usporedbi s konvencionalnim betonom. Beton koji sadrži poliuretansku pjenu kao agregat također je pokazao nižu toplinsku vodljivost od konvencionalnog betona. Međutim, potrebno je puno više rezultata kako bi se imala jasna slika o ovim svojstvima.

## **5. PROVEDENA ISPITIVANJA BETONA S DODANIM PLASTIČNIM OTPADOM**

### **5.1. Svojstva betona s PVC vlaknima (Senthil Kumar Kaliyavaradhan, Tung-Chai Ling)**

Do danas je provedeno samo nekoliko eksperimentalnih istraživanja kako bi se procijenila izvedivost upotrebe PVC vlakana u betonu. Tablica 7 prikazuje razna ispitivanja koja su istraživači proveli ugrađujući PVC vlakna u beton. U ovom će se poglavlju predstaviti učinkovitost betona s PVC vlaknima na temelju dosadašnjih istraživanja. Razmatrat će se utjecaj PVC vlakana na svojstva svježeg i očvrslog betona, te njihova ograničenja i praktičnost.

### **5.2. Proizvodnja PVC vlakana**

Postupak proizvodnje PVC vlakana od e-otpada prikazan je na slici 19. Prvo se odbačeni električni PVC kabeli recikliraju za metale. Nakon uporabe metala, vanjske ovojnice kabela prikupljene iz postrojenja za reciklažu ručno se režu do željenog oblika i duljine kako je prikazano na slici 19. Ručno izrezana PVC vlakna koja su istraživači koristili u betonu prikazana su na slici 20. Svojstva PVC vlakana navedena u literaturi predstavljena su u tablici 8. Smjesi su dodana PVC vlakna u postotku od 0,4 %, 0,6 %, 0,8 %, 1,0 % u odnosu na masu



cementa ili u postotku od 0,05 %, 0,10 %, 0,15 %, 0,20 %, 0,25 % u odnosu na volumni udio betona (Gull i Balasubramanian, 2014.; Kurup i Kumar, 2017. a, b; Nidhish i Arunima, 2017.).

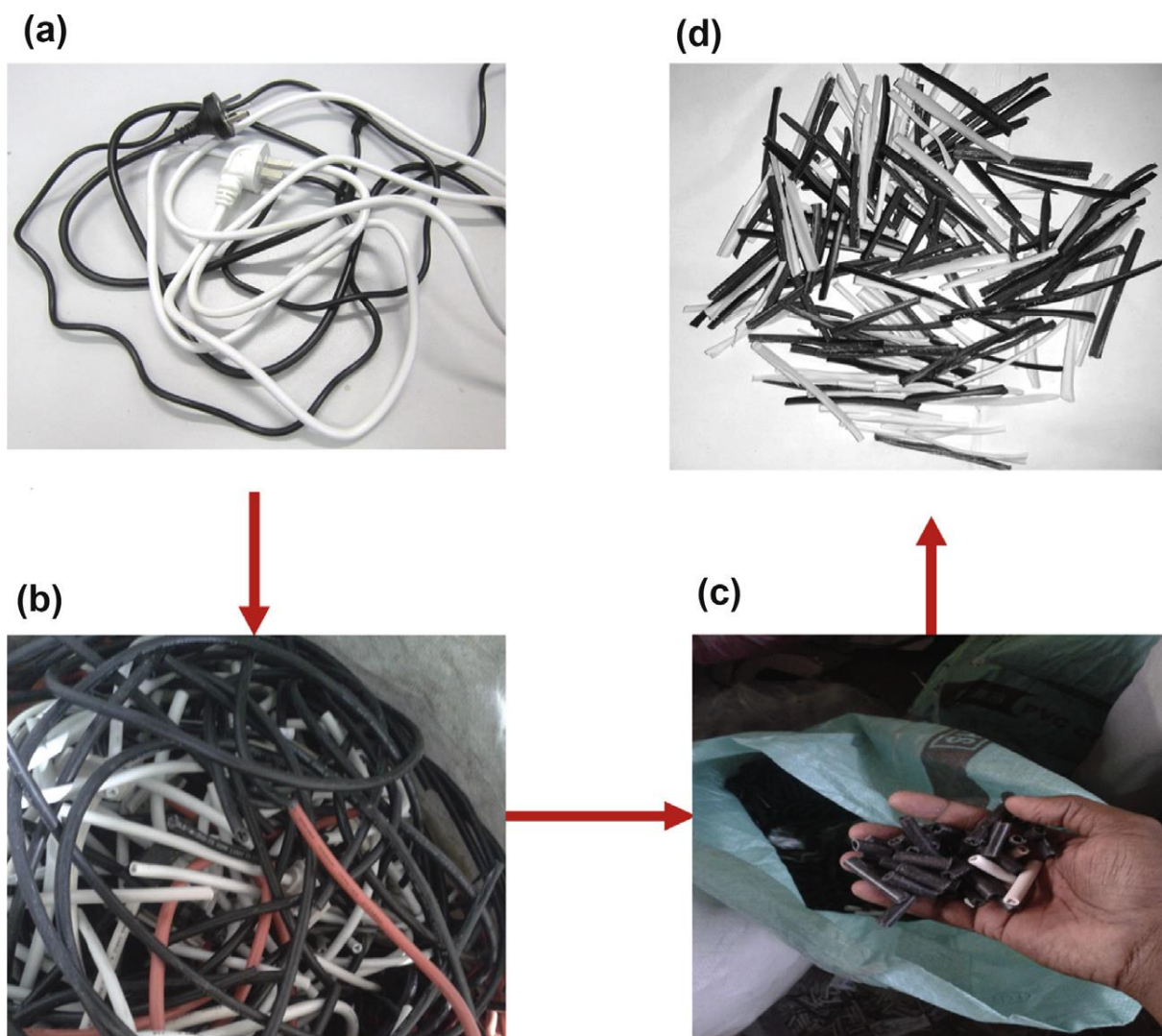
## 5.2.1. Utjecaj PVC vlakana na svojstva svježeg betona

### 5.2.1.1. Slijeganje

Općenito, beton koji sadrži PVC vlakna pokazao je trend smanjenja vrijednosti slijeganja s povećanjem sadržaja vlakana, slika 21. Međutim, to smanjenje nije bilo značajno. Kurup i Kumar (2017.a) primijetili su da dodavanje 1 % sadržaja PVC vlakana (po masi cementa) betonu smanjuje vrijednost slijeganja za približno 6,67 %, slika 21. Slično tome, Nidhish i Arunima (2017.) objavili su da uključivanje 0,25 % PVC vlakana u beton smanjuje vrijednost slijeganja za oko 8,5 %, slika 21. U drugoj studiji Kurup i Kumar (2017.a) ispitali su učinke silikatne prašine (10 % volumnog udjela cementa) na beton s PVC vlaknima i otkrili da se vrijednost slijeganja smanjila za približno 10 % pri dodavanju 1% PVC vlakana, slika 21. Autori su ovaj manjak slijeganja pripisali nasumičnosti vlakana u betonu, kao i teksturi površine, veličini i obliku PVC vlakana (omjer). Unatoč tom smanjenju, vrijednosti slijeganja PVC vlakana – armiranog betona i dalje su unutar potrebne granice između 50 i 75 mm, što se smatra djelomično obradivim rješenjem (Kurup i Kumar, 2017.a; Nidhish i Arunima, 2017.).

**Tablica 7** Svojstva svježeg i očvrstlog betona navedena u literaturi [2]

Autori	Slijeganje	Gustoća		Faktor zbijanja	Tlačna čvrstoća	Savojna čvrstoća	Vlačna čvrstoća na cijepanje	Modul elastičnosti	UPV (ultrazvučno ispitivanje)	Posmična čvrstoća
		SVJEŽA	SUHA							
Gull i Balasubramanian (2014.)	✓			✓	✓	✓	✓			
Kurup i Kumar (2017.a)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
Nidhish i Arunima (2017.)	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Kurup i Kumar (2017.b)										✓
Jose i Sangeetha (2017.)					✓		✓			
Basheer i Antony (2017.)					✓					



*Slika 19* Postupak proizvodnje PVC vlakana od e-otpada. (a) Odbačeni električni PVC kabeli. (b) PVC vlakna. (c) Vanjska ovojnica PVC kabela nakon uporabe metala. (d) Vanjska ovojnica PVC-a izrezana na male dužine. [2]

### 5.2.1.2. Faktor zbijanja

Faktor zbijanja jest omjer težine djelomično zbijenog betona i težine potpuno zbijenog betona, što je izravno povezano s obradivošću. Slično slijeganju, faktor zbijanja također se smanjuje s povećanjem sadržaja PVC vlakana. Nidhish i Arunima (2017.) primijetili su smanjenje faktora zbijanja za oko 6,67 % pri 0,25 % sadržaja vlakana, slika 20. Vrijednost faktora zbijanja utjecala je na površinsku teksturu, postotak volumnog udjela i omjer vlakana. Vrijednost faktora zbijanja smjese do 0,7 smatra se vrlo niskom obradivošću; međutim, smjese s PVC vlaknima imaju faktor zbijanja iznad 0,8, što je jednako srednjoj obradivosti.



**Slika 20** PVC vlakna iz e-otpada koja su istraživači koristili u betonu ((a) Gull i Balasubramanian, 2014.; (b) Kurup i Kumar, 2017.a; (c) Kurup i Kumar, 2017.b; (d) Nidhish i Arunima, 2017.). [2]

### 5.2.1.3. Svježa gustoća / suha gustoća

Dodavanje male količine PVC vlakana betonu ne uzrokuje značajno smanjenje svježe i suhe gustoće betona ojačanog PVC vlaknima u odnosu na gustoću kontrolnog betona (Kurup i Kumar, 2017.a), slika 23. Zabilježen je i proturječan nalaz u radu Kurup i Kumar (2017.a). Autori su primijetili da je dodavanje silikatne prašine rezultiralo blagim smanjenjem svježe i suhe gustoće zbog njegove male jedinične težine što se može vidjeti na slici 23. Iako je gustoća suhog betona ojačanog PVC vlaknima sa silikatnom prašinom niža od normalnog betona, ona je i dalje iznad minimalne suhe gustoće od 2000 kg/m<sup>3</sup>.

## 5.2.2. Utjecaj PVC vlakana na svojstva očvrstlog betona

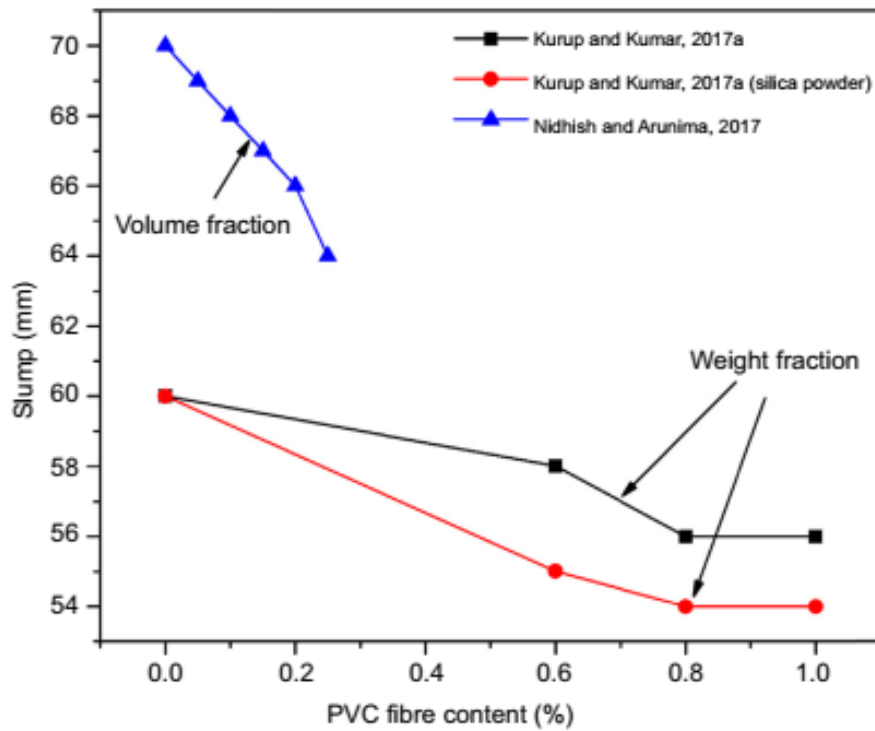
### 5.2.2.1. Tlačna čvrstoća

Kurup i Kumar (2017.a) otkrili su da uključivanje PVC vlakana u beton može povećati tlačnu čvrstoću betona. Istražili su utjecaj PVC vlakana na tlačnu čvrstoću betona pri

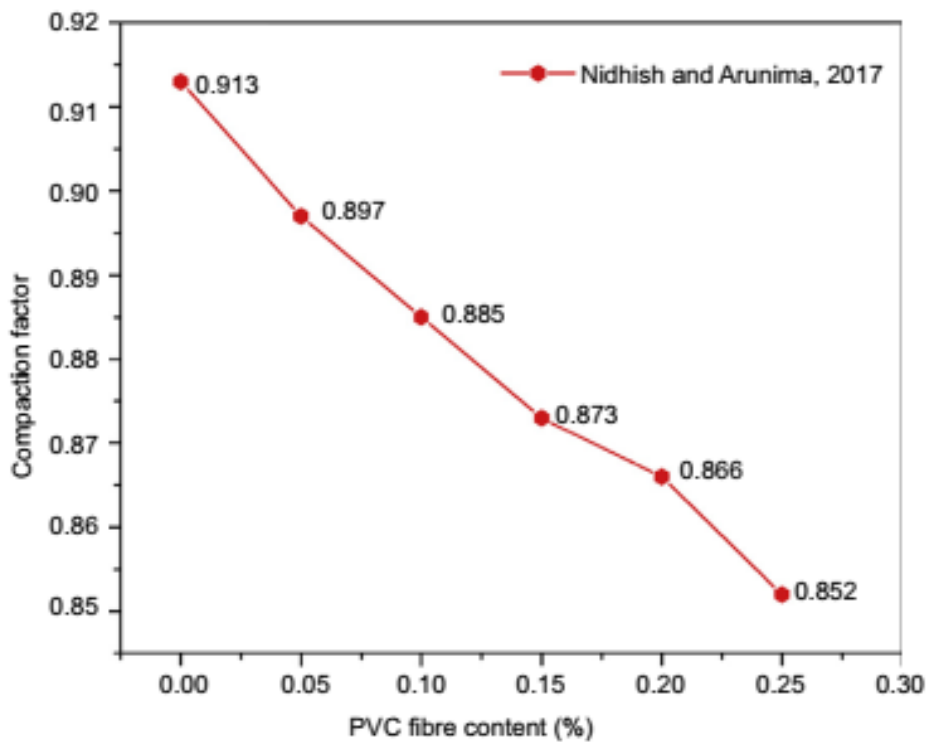
različitim sadržajima vlakana (0,6 %, 0,8 % i 1,0 %). Pokazalo se da se tlačna čvrstoća betona drastično povećala s povećanjem sadržaja PVC vlakana do 0,8 %. U usporedbi s kontrolnim betonom, maksimalna tlačna čvrstoća betona s 0,8 % PVC vlakana povećala se za oko 30,8 %. Smanjenje tlačne čvrstoće primijećeno je za sadržaj vlakana iznad 0,8 %, slika 24. U drugoj su studiji Kurup i Kumar (2017.a) primijetili slične trendove uključivanjem 10 % silikatne prašine kao zamjene za cement u betonu ojačanom PVC vlaknima. Kod 0,8 % PVC vlakana, maksimalna čvrstoća PVC MAB starog 28 dana sa silikatnom prašinom povećala se za 38,49 % u odnosu na konvencionalni beton (Kurup i Kumar (2017.a), slika 24.

**Tablica 8** Svojstva PVC vlakana navedena u literaturi [2]

Autori	Promjer žice (mm)	Debljina izolacije (mm)	Vlačna čvrstoća (Mpa)	Gustoća (g/m <sup>3</sup> )	Relativna gustoća	Duljina vlakna PVC žice (mm)	Širina vlakna PVC žice (mm)	Omjer
Gull i Balasubramanian (2014.)	4	0,8	2,6	1,38	–	30, 40, 50	–	–
Kurup i Kumar (2017.a)	4	0,8	17	–	1,4	35	1	35
Nidhish i Arunima (2017.)	4	0,8	17	–	1,4	30	1	30
Kurup i Kumar (2017.b)	4	0,8	17	–	1,4	35	1	35
Jose i Sangeetha (2017.)	4	–	–	–	1,11	35	1	35
Basheer i Antony (2017.)	4	–	–	–	–	30	–	–

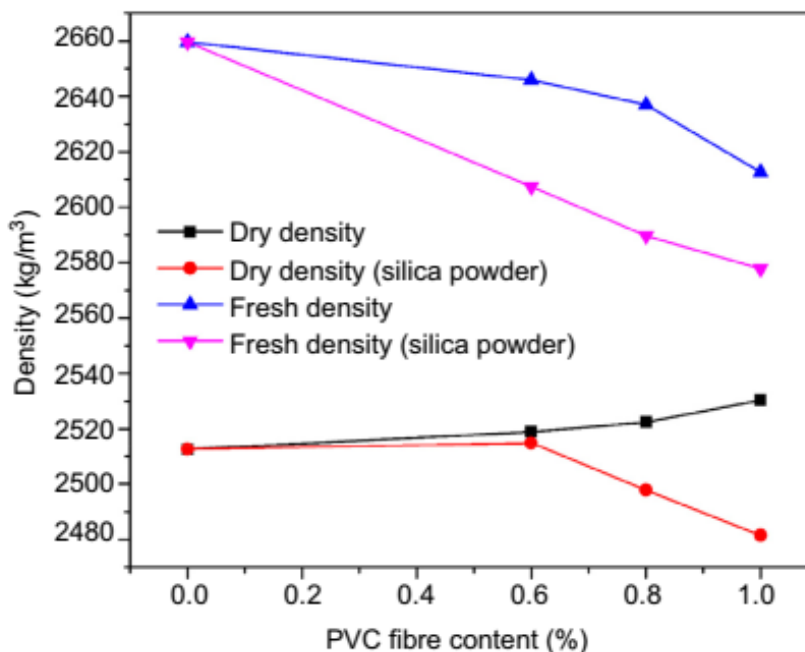


*Slika 21 Utjecaj PVC vlakana na slijeganje betona [2]*

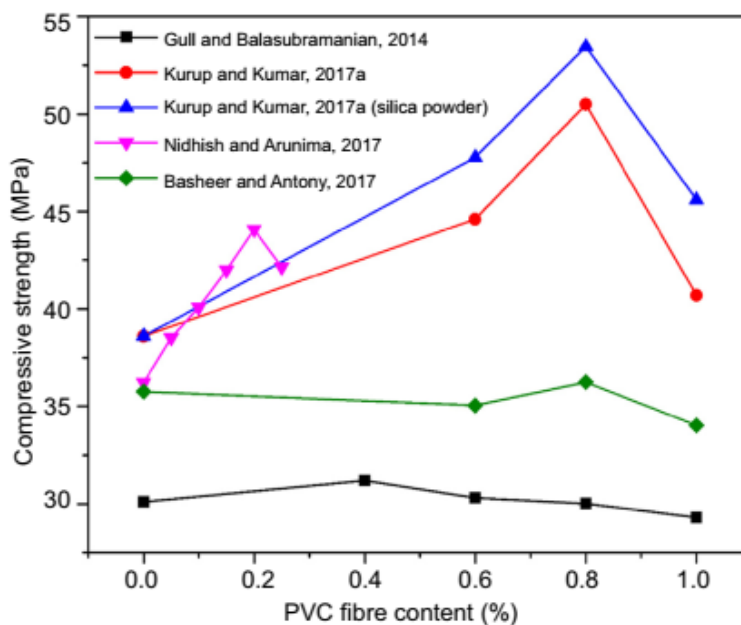


*Slika 22 Utjecaj PVC vlakana na faktor zbijanja betona [2]*

Nidhish i Arunima (2017.) objavili su da se tlačna čvrstoća betona s 0,2 % PVC vlakana (po volumnom udjelu) povećala za oko 21,67 % u odnosu na kontrolni beton, slika 24. Jose i Sangeetha (2017.) istražili su utjecaj dodavanja elektroničke plastike (e-plastike), kao zamjenu za krupni agregat, zajedno s PVC vlaknima u betonu.



Slika 23 Utjecaj PVC vlakana na gustoću betona [2]



Slika 24 Utjecaj PVC vlakana na tlačnu čvrstoću betona starog 28 dana [2]

Tlačna čvrstoća betona smanjila se (do 16,46 %) dodavanjem e-plastike kao zamjene za krupni agregat, dok je 15 % e-plastike s 0,8 % PVC vlakana povećalo čvrstoću za 8,8 % (Jose i Sangeetha, 2017.). Basheer i Antony (2017.) objavili su oprečne rezultate da je 0,8 % PVC vlakana u betonu pokazalo vrlo nizak porast tlačne čvrstoće od oko 1,34 % u usporedbi s kontrolnim betonom, slika 24. Općenito, poboljšanje tlačne čvrstoće upotrebom PVC vlakana može biti posljedica teksture, krutosti vlakana, kao i izvrsne veze između vlakana i cementne matrice (Kurup i Kumar, 2017.a; Nidhish i Arunima, 2017. ). Drugi razlog povećanja čvrstoće betona može se pripisati aktivnoj kontroli širenja pukotina i ograničavajućem učinku koji pružaju PVC vlakna. Nadalje, dodavanje silikatne prašine povećava krutost matrice zbog čega beton izdržava veća opterećenja u usporedbi s konvencionalnim betonom (bez vlakana). S druge strane, Kurup i Kumar (2017.a) objavili su da, za razliku od konvencionalnog betona, beton s PVC vlaknima nije pokazao krhkost ni uzorak u obliku stošca nakon ispitivanja tlačne čvrstoće.

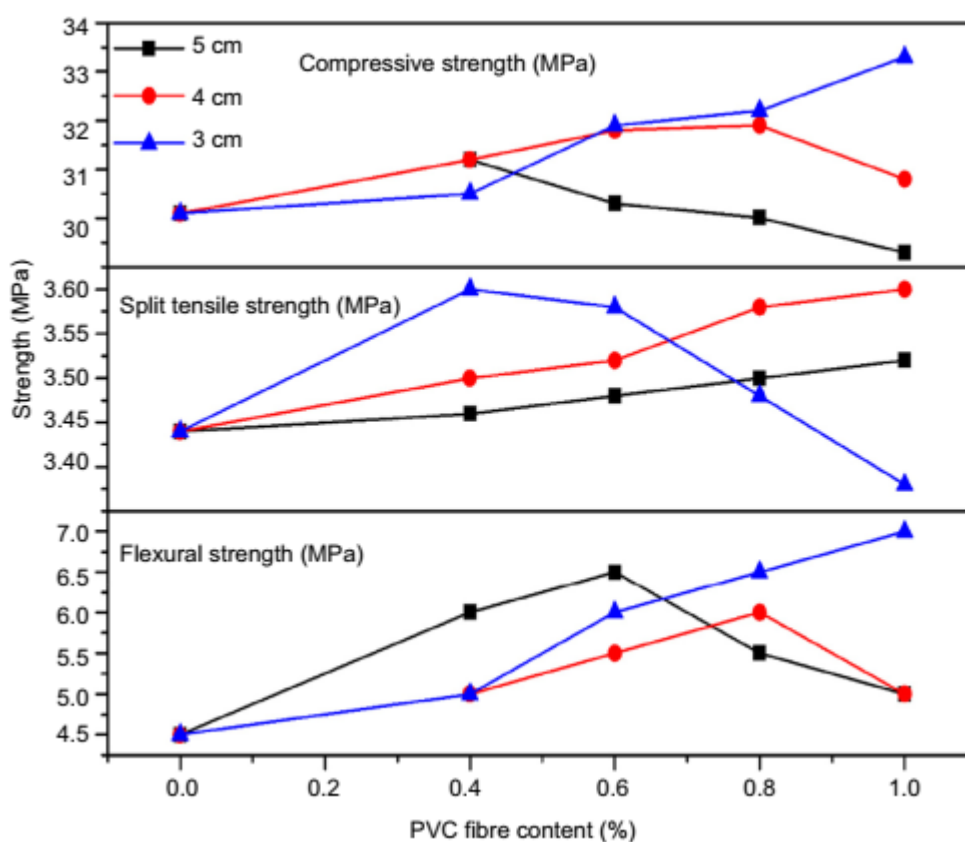
Čvrstoća betona također ovisi o duljini vlakana, omjeru i volumnom udjelu vlakana koja se koriste u matrici. Duljina vlakana ima ključnu ulogu u određivanju svojstava betona. Čvrstoću betona korištenjem različite duljine PVC vlakana analizirali su Gull i Balasubramanian (2014). Utjecaj različitih duljina PVC vlakana na čvrstoću betona prikazan je na Slici 23. Pri 0,8 % sadržaja PVC vlakana duljine od 4 i 3 cm, tlačna čvrstoća povećana je do 5,98 %, odnosno 6,98 %. Međutim, duljina vlakana od 5 cm pokazala je smanjenje čvrstoće za oko 0,29 % u usporedbi s konvencionalnim betonom. Uočeno je da su PVC vlakna kraće duljine (3 cm) povećala tlačnu čvrstoću do 10,6 % pri 1 % sadržaja PVC vlakana, slika 25.

#### **5.2.2.2. Savojna čvrstoća**

Kurup i Kumar (2017.a), Nidhish i Arunima (2017.) te Gull i Balasubramanian (2014.) objavili su da je ugradnjom PVC vlakana u beton povećana savojna čvrstoća betona, slika 26. Kurup i Kumar (2017.a) objavili su da se veće vrijednosti savojne čvrstoće javljaju ne samo kada beton sadrži vlakna već i kada se koristi silikatna prašina. Na slici 26 može se vidjeti da se savojna čvrstoća betona s 0,8 % PVC vlakana povećala za oko 9,11 % u usporedbi s kontrolnim betonom. Slično tome, dodavanje silikatne prašine u PVC MAB povećalo je savojnu čvrstoću za oko 16 % u usporedbi s kontrolnim betonom. Razlog ovog povećanja može se pripisati činjenici da PVC vlakna i dalje nose teret nakon pucanja matrice što



uzrokuje povećanje nosivosti savojnih uzoraka. Uz to, PVC vlakna premošćivala su pukotine i kontrolirala njihovo širenje što je spriječilo krhke lomove tijekom ispitivanja (Kurup i Kumar, 2017.a). Nidhish i Arunima (2017.) primijetili su da povećanje sadržaja vlakana s 0 % na 0,2 % (po volumnom udjelu) postupno povećava savojnu čvrstoću s 4,2 na 4,8 MPa. Iznad 0,2 %, primjećuje se smanjenje savojne čvrstoće. Maksimalni postotak savojne čvrstoće povećava se do 15,71 % kada se u smjesi koristi 0,2 % PVC vlakana, slika 26. Gull i Balasubramanian (2014.) otkrili su da se 3 cm može smatrati optimalnom duljinom vlakana kojom se povećava savojna čvrstoća od oko 55,5 % u odnosu na konvencionalni beton. Nisu primijećene značajne promjene u vrijednostima savojne čvrstoće kod vlakana duljine 4 – 5 cm, slika 25.



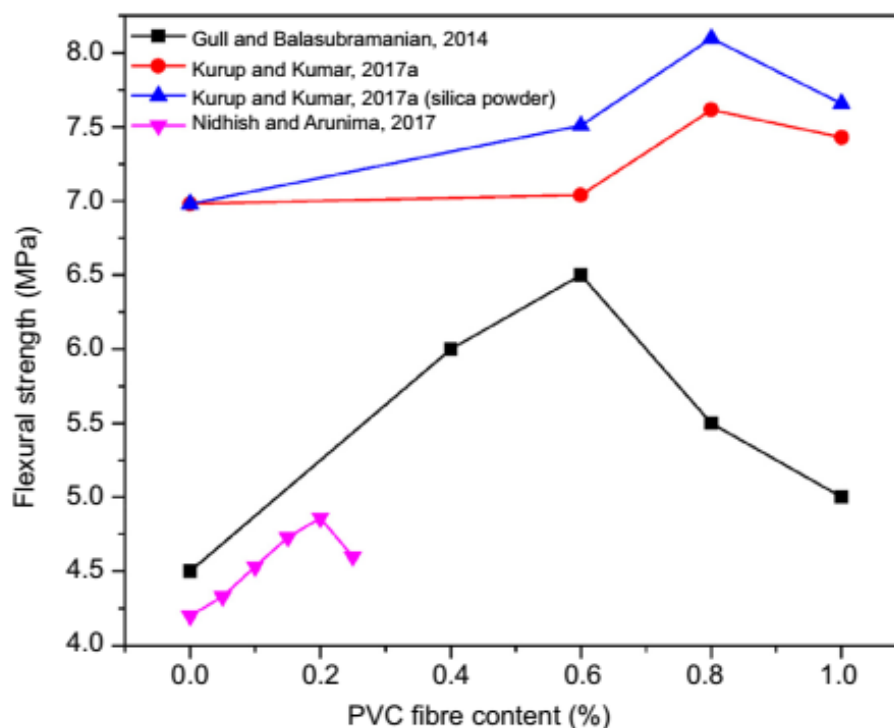
Slika 25 Utjecaj duljine PVC vlakana na različite čvrstoće betona starog 28 dana [2]

### 5.2.2.3. Vlačna čvrstoća na cijepanje

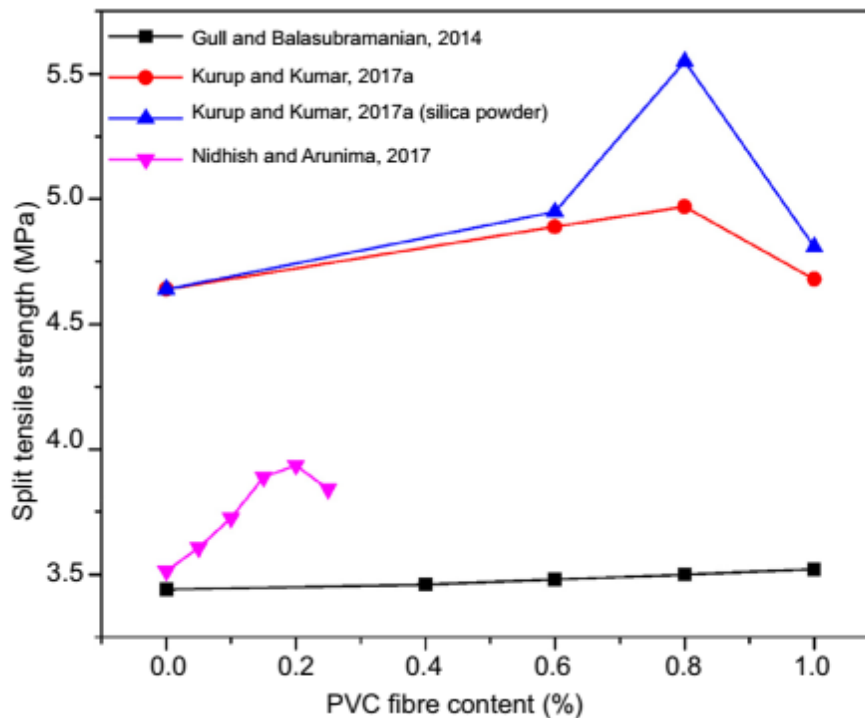
Slično tlačnoj i savojnoj čvrstoći, uključivanjem PVC vlakana povećava se vlačna čvrstoća na cijepanje betona (Kurup i Kumar, 2017.a; Nidhish i Arunima, 2017.). Kurup i Kumar (2017a) objavili su da se vlačna čvrstoća na cijepanje betona koji sadrži 0,8 % PVC vlakana sa silikatnom prašinom ili bez nje povećava do 19,6 %, odnosno 7,11 %, slika 27. Također su otkrili da se cilindrični uzorci nisu podijelili na dva dijela, jer PVC vlakna



premošćuju pukotine i pokazuju učinak raspucavanja MAB-a. Slično tome, Nidhish i Arunima (2017.) objavili su da se vlačna čvrstoća na cijepanje poboljšava dodavanjem PVC vlakana. Vlačna čvrstoća na cijepanje kod normalnog betona bila je 3,51 MPa, a povećana je na 3,93 MPa kada betonska smjesa sadrži do 0,2 % vlakana (po volumnom udjelu). Međutim, primijećen je blagi pad s daljnjim povećanjem sadržaja PVC vlakana, slika 27. Jose i Sangeetha (2017.) primijetili su da su uzorci s 15 % e-plastike u zamjenu za kruti agregat i 0,8 % sadržaja PVC vlakana (po masi) povećali vlačnu čvrstoću za 2,26 % u usporedbi s kontrolnim betonom. Gull i Balasubramanian (2014.) istraživali su vlačnu čvrstoću uzoraka s različitom duljinom PVC vlakana, slika 25, a utvrđeno je da je vlačna čvrstoća kod vlakana duljine 5 i 4 cm (1 % mase) porasla za 2,3 %, odnosno 4,6 %.



*Slika 26 Utjecaj PVC vlakana na savojnu čvrstoću betona starog 28 dana [2]*



*Slika 27 Utjecaj PVC vlakana na vlačnu čvrstoću na cijepanje betona starog 28 dana [2]*

Međutim, za vlakna duljine 3 cm, vlačna se čvrstoća povećavala za 4,6 %, a počela se smanjivati kad se sadržaj vlakana povećao s 0,6 % na 1 %. Trend smanjenja vlačne čvrstoće nije značajan; međutim, razlog smanjenja čvrstoće nije jasan i treba ga proučavati u budućnosti.

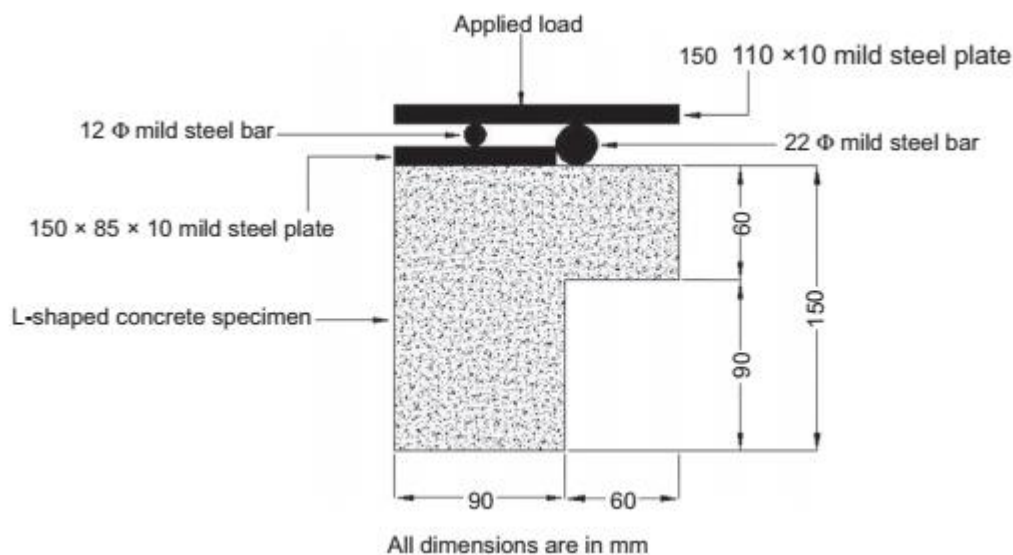
#### 5.2.2.4. Posmična čvrstoća

Kurup i Kumar (2017.b) koristili su uzorak u obliku slova L koji su predložili Bairagi i Modhera (2001) kako bi pronašli posmičnu čvrstoću betona, slika 28. Neki su se istraživači pozvali na ovu metodu kako bi proučavali posmično ponašanje betona (Sivaraja i Kandasamy, 2011.; Kumar i Baskar, 2015.c). Kurup i Kumar (2017.b) otkrili su da se posmična čvrstoća betona koji sadrži PVC vlakna smanjuje s povećanjem sadržaja vlakana, slika 29. Primijećeno je da nema značajnog smanjenja posmične čvrstoće kada se 0,6 % PVC vlakana (po masi) ugradi u beton. Iznad 0,6 % sadržaja PVC vlakana primijećeno je smanjenje posmične čvrstoće. Budući da je područje smicanja kod uzorka u obliku slova L maleno, dostupna količina vlakana možda neće biti ujednačena. To je uzrokovalo smanjenje posmične čvrstoće u usporedbi s ostalim čvrstoćama. Međutim, vrijednosti posmične čvrstoće unutar su

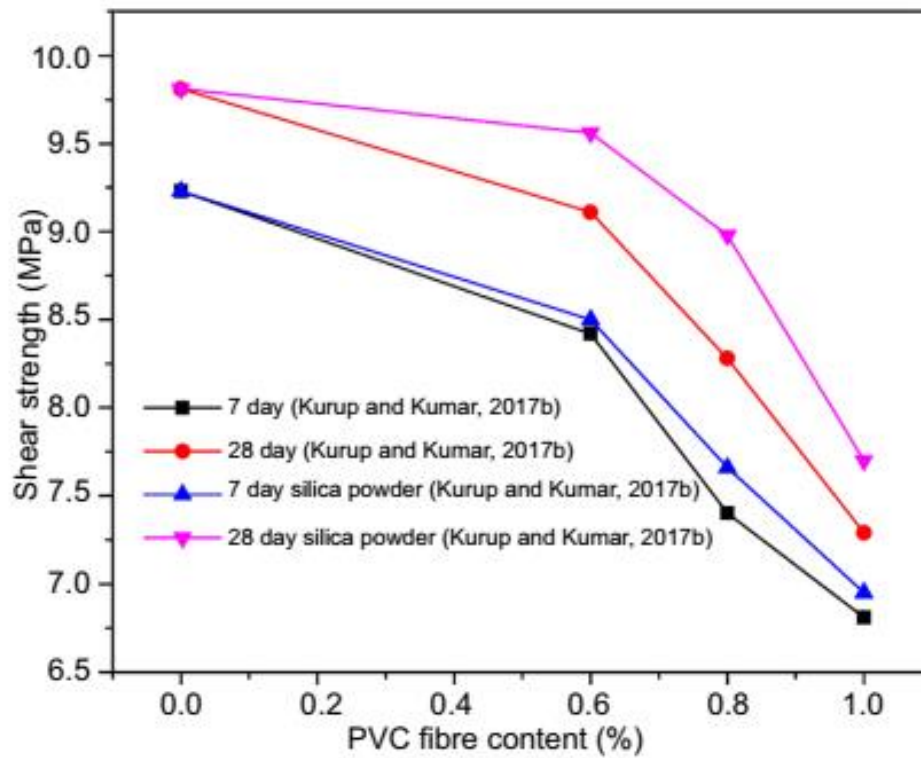
prihvatljivog raspona od 6 do 14 MPa (Kumar i Baskar, 2015.c). Primijećeno je da prisutnost PVC vlakana u posmičnim uzorcima smanjuje krhkost i povećava duktilnost u odnosu na konvencionalni beton. Budući da je autor za proučavanje smicanja upotrijebio samo jedan omjer PVC vlakana, preporučuje se detaljno istraživanje upotrebe različitih veličina PVC vlakana.

### 5.2.2.5. Modul elastičnosti

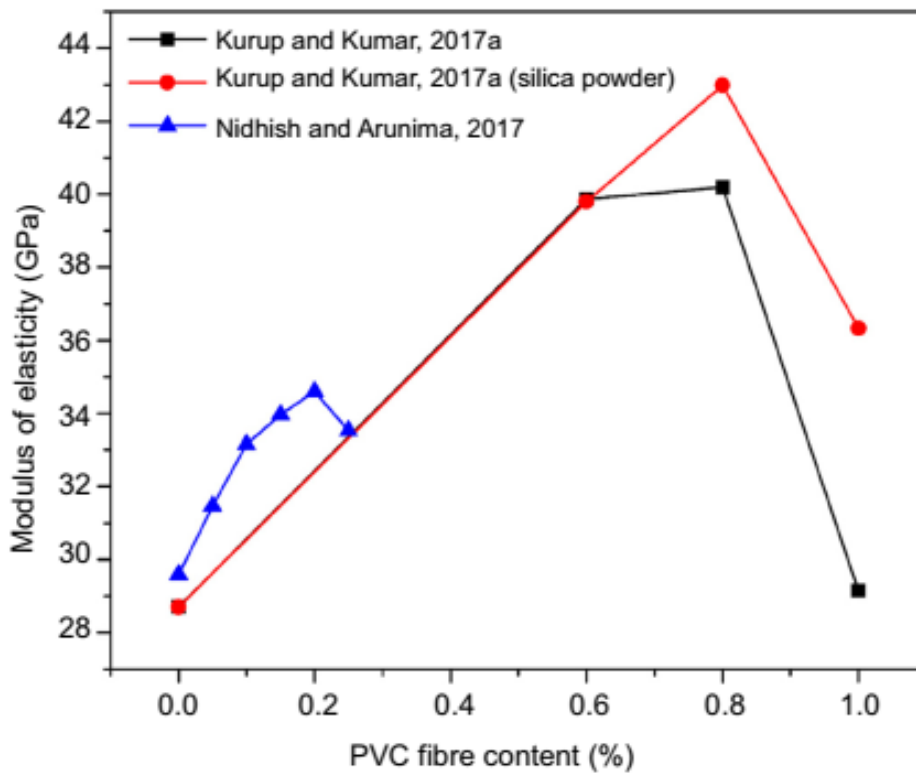
Utjecaj dodavanja PVC vlakana na modul elastičnosti betona prikazan je na slici 30. Kurup i Kumar (2017.a) otkrili su da 0,8 % sadržaja PVC vlakana povećava maksimalni modul elastičnosti za oko 40 %. U slučaju dodavanja silikatne prašine, 10% -tna zamjena za cement u betonu s PVC vlaknima mogla bi povećati modul elastičnosti za oko 49,7 %. To je vjerojatno zbog poboljšanja veze između PVC vlakana i matrice. U slučaju kad je sadržaj vlakana iznad 0,8 %, modul elastičnosti pratio je trend opadanja, slika 30. Slično tome, Nidhish i Arunima (2017.) otkrili su da se modul elastičnosti povećavao kako se povećavao sadržaj PVC vlakana. Smjese koje sadrže 0,2 % (po volumnom udjelu) PVC vlakana najučinkovitije su, što rezultira povećanjem modula elastičnosti od 16,91 % u odnosu na konvencionalni beton.



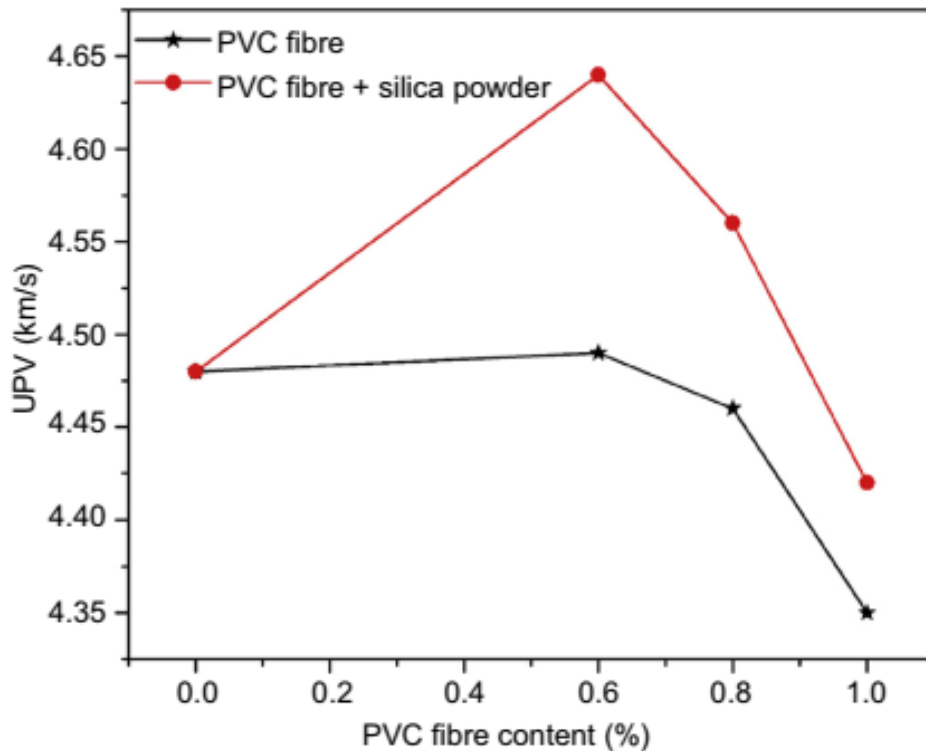
*Slika 28 Tipični plan postava za ispitivanje posmične čvrstoće [2]*



Slika 29 Utjecaj PVC vlakana na posmičnu čvrstoću betona [2]



Slika 30 Utjecaj PVC vlakana na modul elastičnosti betona starog 28 dana [2]



*Slika 31 UPV (brzina ultrazvučnog vala) u odnosu na sadržaj PVC vlakana kod betona starog 28 dana [2]*

#### 5.2.2.6. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa (eng. Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) popularna je metoda nerazornog ispitivanja koja se koristi za testiranje homogenosti, kvalitete, pukotina, šupljina i nedostataka u betonu. Kurup i Kumar (2017.a) ocijenili su kvalitetu betona izrađenog s PVC vlaknima pomoću UPV testa. Pokazalo se da se UPV uzoraka smanjuje s porastom sadržaja PVC vlakana, slika 31. Smatra se da se ovo smanjenje nije dogodilo zbog poroznosti ili unutarnjih nedostataka betona. Zapravo, plastika ima sposobnost apsorpcije impulsa što može biti glavni razlog smanjenja UPV vrijednosti betona (Kumar i Baskar, 2015.a). Prema BIS 13311-1: 1992 (BIS, 1992), kada se vrijednosti UPV-a kreću između 3,5 i 4,5 km/s, beton se smatra dobrim, a kada su vrijednosti iznad 4,5 km/s, riječ je o betonu vrhunske kvalitete. Sa slike 31 jasno se vidi da dodavanje PVC vlakana betonu, sa silikatnom prašinom ili bez, nije utjecalo na kvalitetu betona. Utvrđeno je da su maksimalne i minimalne UPV vrijednosti betona s PVC vlaknima u rasponu od 4,35 do 4,64 km/s.

### 5.3. Zaključak

U ovom su poglavlju predstavljene nedavne pomoci u vezi s betonom s PVC vlaknima. Detaljno su predstavljena svojstva svježeg i očvrstlog betona s PVC vlaknima. Obradivost betona uglavnom se smanjuje s povećanjem sadržaja PVC vlakana. Ugradnjom PVC vlakana također se smanjuje svježina i suha gustoća, ali to je smanjenje zanemarivo. Tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, vlačna čvrstoća na cijepanje te modul elastičnosti betona povećani su dodatkom PVC vlakana. Došlo je do smanjenja posmične čvrstoće i UPV-a dodavanjem PVC vlakana. Međutim, smanjenje nije toliko značajno. Razlike u svojstvima svježeg i očvrstlog betona ojačanog PVC vlaknima uglavnom su posljedica oblika, veličine, količine vlakana, raspodjele vlakana, postavki ispitivanja i dodatnih materijala koji se koriste s PVC vlaknima. U nekoliko studija zabilježeno je da postotci PVC vlakana, bilo 0,8 % (po masi cementa) ili 0,2 % (po volumnom udjelu betona), mogu poboljšati svojstva betona bez značajnih gubitaka. Štoviše, tijekom ispitivanja PVC vlakna premostila su pukotinu i spriječila krhke lomove u odnosu na normalni beton. U cjelini, podatci i rasprave iz ovog poglavlja pomoći će u učinkovitom recikliranju PVC otpada i pronalaženju prikladnih primjena za PVC mikroarmirani beton u graditeljstvu te postizanju cilja održivog razvoja.

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj zamjene dijela agregata s otpadnim kabelima s EE otpada i PVC vlakana na svojstva betona. U tu svrhu u laboratoriju je napravljeno 8 mješavina, kako je prikazano u tablici 9. Prva mješavina je standardni etalon, a preostalih 7 sadrže različite količine izrezanih kabela kao agregata ili PVC vlakana sudjelujući u ukupnom volumenskom udjelu mješavine. Uzorci betona označeni su na sljedeći način:

- E – standardna betonska mješavina
- M1 – betonska mješavina s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio sitnog agregata
- M2 – betonska mješavina s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio sitnog agregata

- M3 – betonska mješavina s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio srednjeg agregata
- M4 – betonska mješavina s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio srednjeg agregata
- M5 – betonska mješavina s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio krupnog agregata
- M6 – betonska mješavina s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio krupnog agregata
- M7 – betonska mješavina s vlaknima od kabela EE otpada, duljine 3cm, u iznosu od 1% ukupnog volumenskog udjela

Pri izradi mješavina korišteni su cement, agregat, voda i izrezani kabele s EE otpada. Promatra se utjecaj količine zamjene prirodnog agregata plastičnim na čvrstoću na savijanje, čvrstoću na tlak, dinamički modul elastičnosti, gustoću te na kvalitetu betona na upijanje. Prikazani postoci udjela otpada za mješavine M1 – M6 odnose se na ukupan volumen agregata u mješavini, a u mješavini M7 na ukupan volumen betona.

**Tablica 9** Oznaka uzoraka

<b>Dodatak</b>	<b>Oznaka</b>
Etalon	E
Beton s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio sitnog agregata	M1
Beton s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio sitnog agregata	M2
Beton s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio srednjeg agregata	M3
Beton s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio srednjeg agregata	M4
Beton s 1% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio krupnog agregata	M5
Beton s 5% udjela izrezanih kabela EE otpada kao dio krupnog agregata	M6
Beton s vlaknima od kabela EE otpada duljine 3cm u iznosu od 1% volumenskog udjela	M7

## 6.2. Materijali

### 6.2.1. Cement

Kao vezivo korišten je CEM II/B-M (S-LL) 42,5N, odnosno miješani portlandski cement, slika 32. Cement je mineralno vezivo, čija je pretežna primjena u građevinarstvu kao vezivo prirodnih ili umjetnih agregata za proizvodnju betona i mortova. Cement je zajednički naziv za sva veziva s izrazito hidrauličkim svojstvima, što znači da vežu i stvrđavaju u dodiru s vodom, svejedno da li se nalaze na zraku ili pod vodom, jer reakcijom s vodom daju stabilne ili netopljive produkte (sve vrste cementa i hidraulično vapno). Riječ cement dolazi od latinskih riječi caedere = lomiti i lapidem = kamen. To je najvažnije mineralno vezivo, koje pomiješano s vodom i agregatom daje beton.

Ovaj tip cementa koristi se za opću upotrebu u proizvodnji betona, morta, žbuke i estriha. Ima visoke čvrstoće, nisku potrebu za vodom, bolju obradivost i dugotrajno održanje ugradljivosti.

Upotreba ovog cementa ima niz prednosti: [27]

- Pri niskim temperaturama, kraći je period podložnosti svježeg betona smrzavanju. U očvrslom stanju betoni su otporniji na mraz što omogućava duži životni vijek konstrukcije.
- Izrada visoko kvalitetnih betonskih podova i estriha otpornih na habanje
- Betonski elementi visokih čvrstoća tanjih presjeka
- Izgradnja objekata i proizvoda gdje se zahtijeva brzo skidanje oplata, manipulacije i opterećenje konstrukcija u ranoj fazi
- Izrada specijalnih injekcijskih mortova i žbuka za brže radove rekonstrukcije

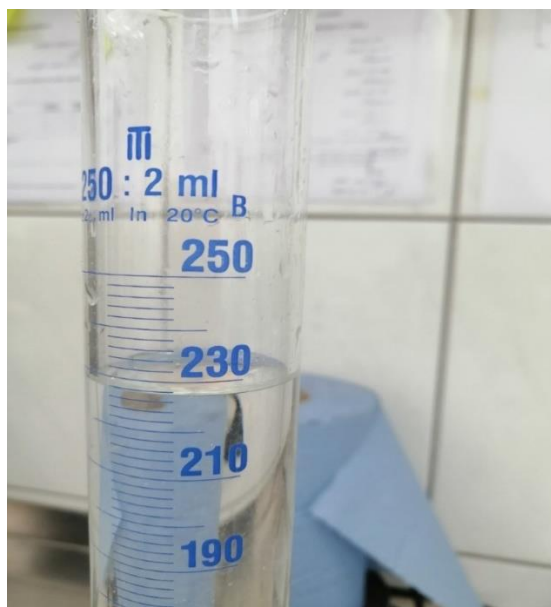




*Slika 32 Cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N*

### 6.2.2. Voda

Za potrebe ispitivanja korištena je samo čista voda iz slavine, slika 33. Otopljene, lebdeće ili plivajuće tvari sadržane u vodi mogu djelovati štetno na kvalitetu svježeg i očvrslog betona. Posebno su opasni šećeri, masti, sapun i deterdženti. Samo se pitka voda može upotrijebiti za izradu betona bez prethodnog ispitivanja.



*Slika 33 Količina vode pri izradi jedne mješavine*

### 6.2.3. Agregat

Za izradu mješavina korišten je agregat veličine zrna 0-4, 4-8, 8-16 mm. Granulometrijski sastav agregata odnosi se na podatke koji definiraju od kojih se veličina zrna sastoji agregat i kolika je količina svake vrste zrna. Određen je prema normi HRN EN 933 – 1, prosijavanjem potpuno suhog uzorka agregata na standardnim sitima. Sita su složena po veličini otvora jedno iznad drugoga. Uzorak se postavlja na gornje sito i poklopi, a potom se cijeli skup sita prosijava na uređaju za prosijavanje, slika 35. Nakon toga se još svako sito dodatno ručno prosijava te se na svakom situ definira masa ostatka i izražava u masenim postotcima. Zbroj sveukupnih ostataka masa mora biti u granicama  $\pm 1\%$  od početne mase uzorka.

Prolazi na situ su dani u tablicama 10-12, a numerički granulometrijski i kumulativni granulometrijski sastav agregata prikazani su u tablicama 13 i 14, te na slici 36.

*Tablica 10 Prolazi na situ za frakciju 0-4 mm*

Sito [mm]	Frakcija 0 – 4 mm		
	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]
63	0,0	811,5	100,0%
31,5	0,0	811,5	100,0%
16	0,0	811,5	100,0%
8	0,0	811,5	100,0%
4	64,7	746,8	92,0%
2	181,7	565,1	69,6%
1	156,1	409	50,4%
0,5	118,3	290,7	35,8%
0,25	139,7	151	18,6%
0,125	116,3	34,7	4,3%
Tava	34,7		
Ukupno	811,5		
Početno	830,3		



*Slika 35 Sito za prosijavanje agregata [41]*

*Tablica 11 Prolazi na situ za frakciju 4-8 mm*

Sito [mm]	Frakcija 4 - 8 mm		
	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]
63	0,0	1890,1	100,0%
31,5	0,0	1890,1	100,0%
16	0,0	1890,1	100,0%
8	1,8	1888,3	99,9%
4	987,1	901,2	47,7%
2	712,2	189	9,99%
1	0,0	189	9,99%
0,5	0,0	189	9,99%
0,25	0,0	189	9,99%
0,125	0,0	189	9,99%
Tava	189		
Ukupno	1890,1		
Početno	1891,6		

**Tablica 12** Prolazi na situ za frakciju 8-16 mm

Sito [mm]	Frakcija 8 – 16 mm		
	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]
63	0,0	2862	100,0%
31,5	0,0	2862	100,0%
16	6,5	2855,5	99,7%
8	1963,7	891,8	31,2%
4	749,7	142,1	4,97%
2	0,0	142,1	4,97%
1	0,0	142,1	4,97%
0,5	0,0	142,1	4,97%
0,25	0,0	142,1	4,97%
0,125	0,0	142,1	4,97%
Tava	142,1		
Ukupno	2862		
Početno	2864,7		

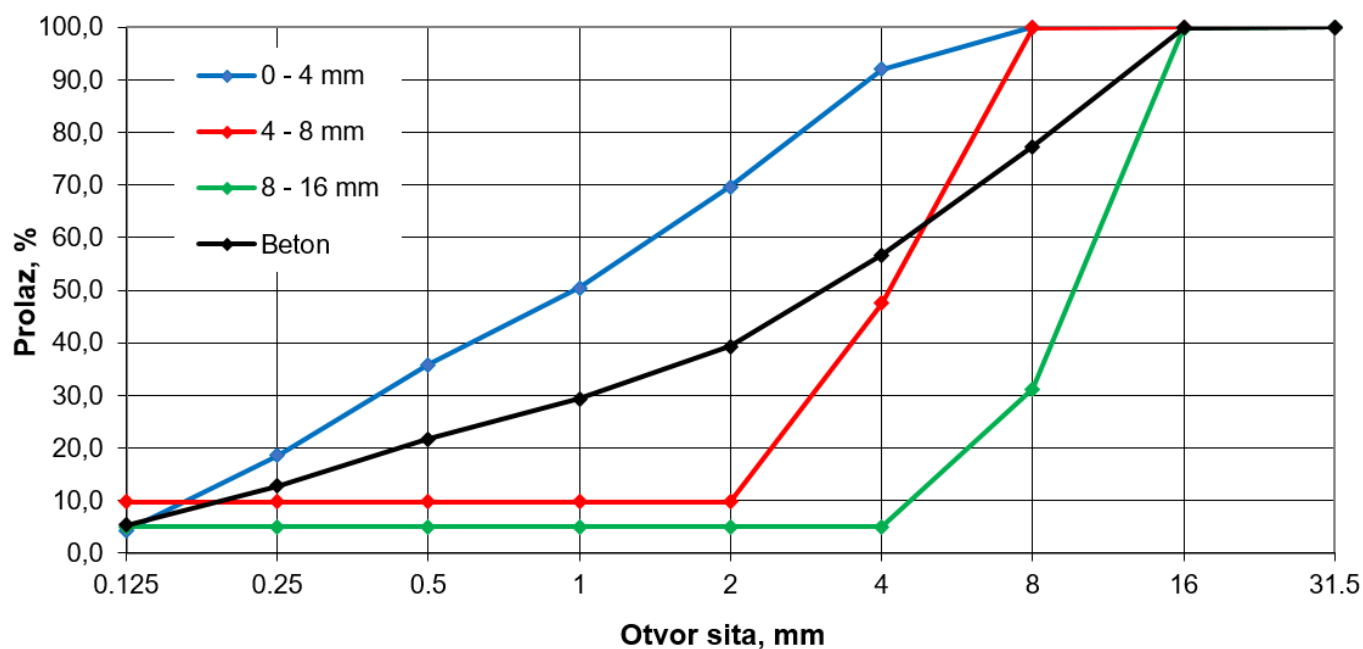
Rezultati navedenog ispitivanja se prikazuju dijagramom kod kojega se na os apscisa nanosi otvor sita u milimetrima, a na ordinatu maseni postotak prolaza, slika 36.

**Tablica 13** Numerički granulometrijski sastav agregata

NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA										
frakcija [mm]	Prolaz [%]	Sito [mm]								
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
0 - 4	%	4,3	18,6	35,8	50,4	69,6	92,0	100	100	100
4 - 8	%	9,99	9,99	9,99	9,99	9,99	47,7	99,9	100	100
8 - 16	%	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97	31,2	99,7	100

**Tablica 14** Kumulativni granulometrijski sastav agregata

KUMULATIVNI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA									
Frakcija [mm]	prolaz [%]	Sito [mm]							
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0 - 4	52	2,2	9,7	18,6	26,2	36,2	47,9	52	52
4 - 8	15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	7,1	15	15
8 - 16	33	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	10,3	32,9
suma	100	5,3	12,8	21,7	29,3	39,3	56,6	77,3	99,9



**Slika 36** Granulometrijska krivulja

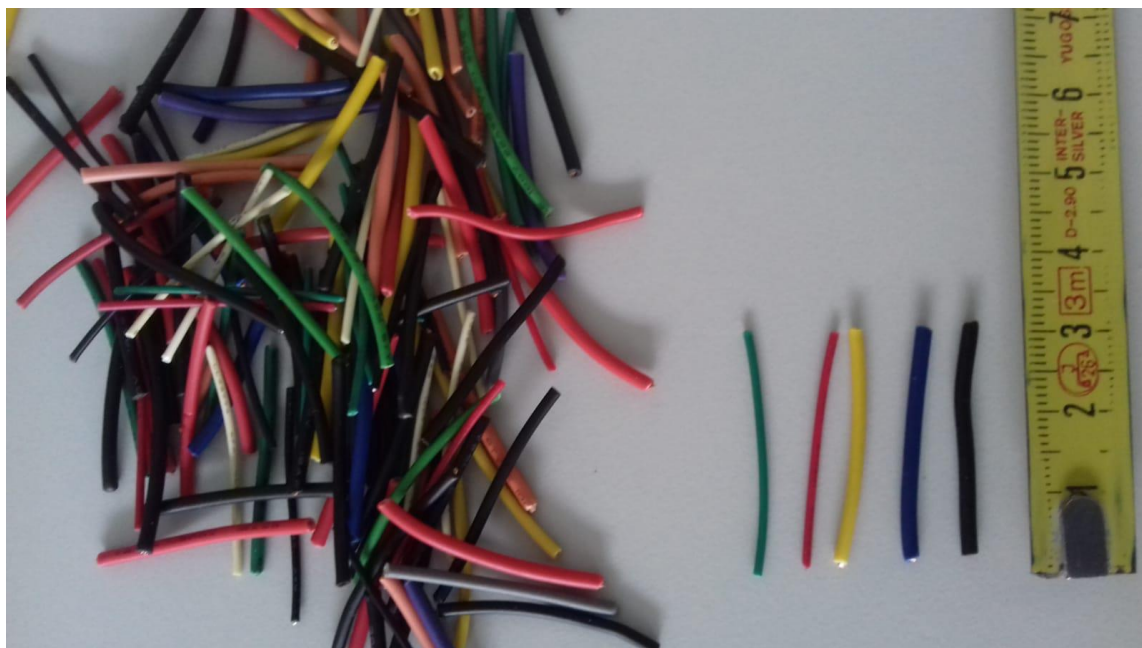
#### 6.2.4. PVC Kabeli

Za dobivanje zamjene za agregat koriste se otpadni kabeli prikupljeni tijekom renovacije fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Postupak proizvodnje vlakana odnosno agregata već je objašnjen u prijašnjem poglavlju, slika 19. Na slikama 37 i 38 prikazani su kabeli

korišteni za mješavine. Za potrebe ovog rada, kabeli su ručno rezani na veličinu koja odgovara frakciji koju ovaj materijal zamjenjuje u betonu. Kabeli su, za razliku od prije spomenutog istraživanja, rezani u svome punom presjeku, bez ikakvog razdvajanja metala. Veličina izrezanih frakcija označena je na slici 37. Prema slici je vidljivo da su kabeli odabrani prema debljini za pojedine frakcije, kako bi se izbjeglo da omjer promjera i duljine bude prevelik. Najtanji kabeli su ručno rezani na duljinu 3 cm i imaju svojstva vlakna u betonu, slika 38.



*Slika 37 PVC kabeli korišteni za mješavine M1 – M6*



*Slika 38 PVC kabeli korišteni za mješavinu M7*

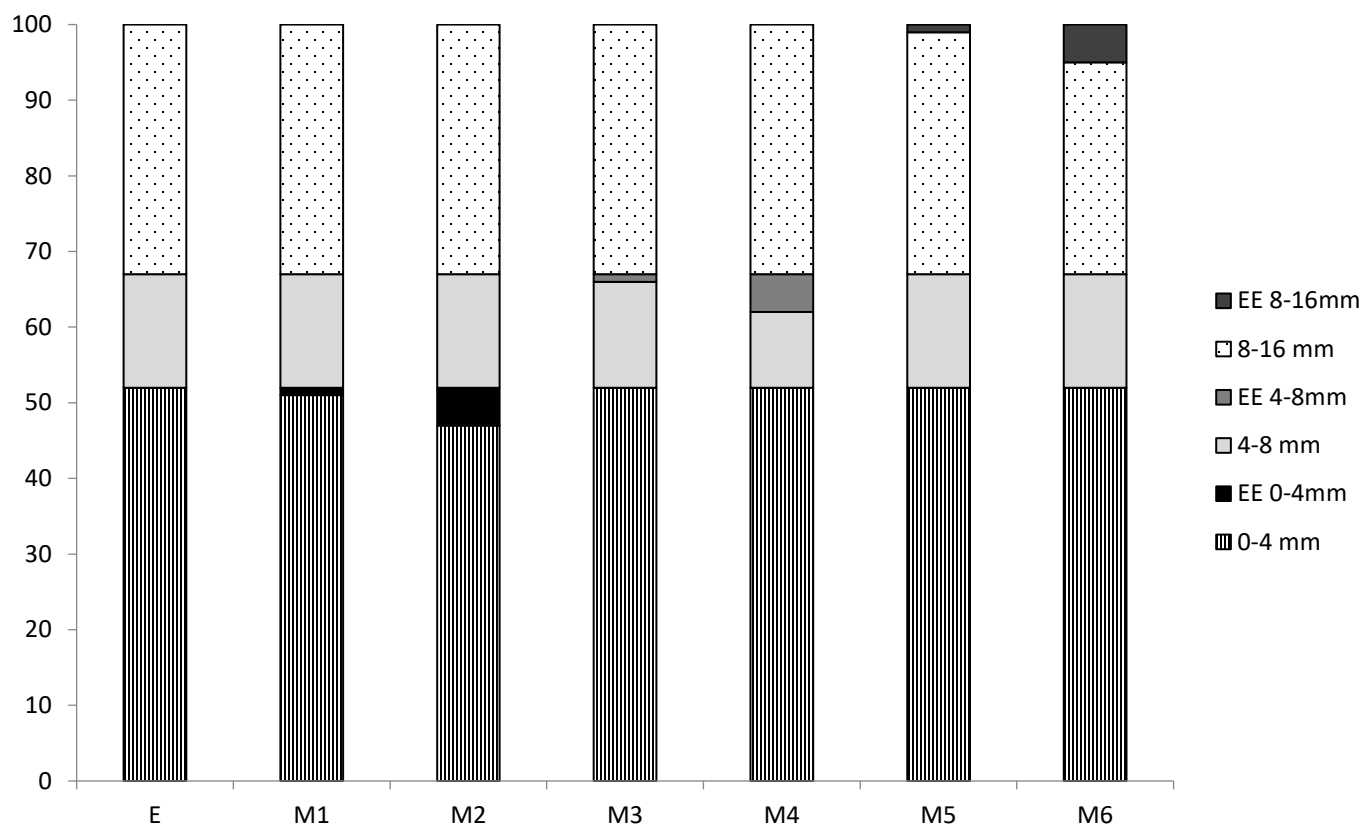
### 6.3. Izrada mješavina i ispitivanja svježeg betona

U laboratoriju su izrađene betonske mješavine: referentna mješavina, 6 mješavina u kojima je dio agregata zamijenjen s izrezanim kabelima EE otpada i mješavina u kojoj su izrezani kabeli dodani kao vlakna. PVC kabeli prethodno su ručno izrezani i pripremljeni te dodani u mješavine u omjeru 1% odnosno 5% ukupnog volumena agregata. Za vezivo je korišten cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5N. Izrađeno je osam mješavina, a od svake mješavine su izrađene kocke dimenzija 10 cm, prizma dimenzija 10 x 10 x 50 cm i valjak promjera 10 cm i visine 20 cm. Smjese se ugrađuju u opisane kalupe kocke, prizme i valjka. Prilikom završetka miješanja i ispitanog slijeganja kreće ugradnja betona u kalupe. Uzorci se ručno, uz pomoć lopatice prebacuju u kalupe, potom vibriraju te naposljetku poravnavaju i označavaju. Kalupe je potrebno dobro namazati sredstvom radi lakšeg vađenja uzoraka iz kalupa. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa te se čuvaju 27 dana na sobnoj temperaturi do ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće, slika 39.



*Slika 39 Ukupljeni uzorci M6*

U mješavinama M1-M6 se dio ukupnog volumena agregata, točnije 1% i 5% zamjenjuje s istom količinom sitnog, srednjeg i krupnog „agregata“ napravljenog od otpadnih EE kabela u odgovarajućoj veličini, slika 40. Ukupni volumen svake frakcije agregata je zadržan isti za sve mješavine. U zadnjoj mješavini M7 dodano je 1% PVC vlakana od ukupnog volumenskog udjela mješavine.



*Slika 40 Prikaz volumena agregata mješavina E – M6*

Beton se miješao u standardnoj laboratorijskoj miješalici, slika 41, na način da su se prvo 'na suho' 60 sekundi miješali cement i agregat za referentnu mješavinu odnosno cement, agregat i zamjena za agregat/vlakna za ostale mješavine, a zatim se dodala voda te se miješalo još četiri minute. Referentna mješavina označena je s E.





*Slika 41 Miješalica sa suhim sastojcima za mješavinu M4*

Nakon završetka miješanja, izmjerena je temperatura svih mješavina te se provelo ispitivanje konzistencije svježeg betona prema normi HRN EN 12350-2. [28]

Temperatura mješavina betona određena je korištenjem digitalnog ubodnog termometra. U svježe izmiješan beton unesena je igla termometra, pazeći da mjeri temperaturu sredine mješavine i da ne dodiruje posudu. Nakon stacioniranja pokazivača temperature, izvršeno je očitavanje u [°C] kako je prikazano na slici 42.



*Slika 42 Temperatura uzorka E*

Ispitivanje slijeganja se provelo koristeći kalup za oblikovanje uzorka za ispitivanje oblika šupljeg krnjeg stošca i šipku za zbijanje. Unutrašnjost kalupa i podloga navlašeni su mokrom spužvom i kalup je postavljen na horizontalnu podlogu širim krajem prema dolje. Tijekom punjenja kalup je čvrsto pridržavan uz podlogu stojeći na papučicama. Kalup je punjen uzorkom svježeg betona u 3 sloja gdje je svaki sloj otprilike visine 1/3 kalupa kad je zbijen. Svaki sloj se zbijao s 25 udaraca šipke za zbijanje. Nakon poravnanja vrha, kalup se pažljivo uklanja podizanjem prema gore. Odmah nakon uklanjanja kalupa je izmjereno i zabilježeno slijeganje tako da se odredila razlika između visine kalupa i najviše točke slegnutog ispitnog uzorka, slika 43.



*Slika 43 Slijeganje uzorka M3*

Ovisno o slijeganju, beton se svrstava u određeni razred kako je prikazano u tablici 15.

*Tablica 15 Razredi konzistencije svježeg betona [29]*

<b>Razred</b>	<b>Slijeganje</b>
S1	10 – 40 mm
S2	50 – 90 mm
S3	100 – 150 mm
S4	160 – 210 mm

U tablici 16 su prikazani rezultati ispitivanja iz kojih je vidno da svi uzorci pripadaju razredu S1 odnosno da udio zamjene za agregat/vlakna ne utječe u značajnoj mjeri na konzistenciju svježeg betona u odnosu na kontrolni uzorak – etalon.

**Tablica 16** Obradivost i temperatura mješavina

Mješavina	Temperatura (°C)	Slijeganje (cm)	Razred
Etalon	21,7	3	S1
M1	22,2	2	S1
M2	22,7	2	S1
M3	22,5	2	S1
M4	21,8	4	S1
M5	22,5	3	S1
M6	23,6	2	S1
M7	23,6	3	S1

## **6.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava mješavina**

### **6.4.1. Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće**

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće vrši se 28 dana nakon izrade mješavina. Na temelju ispitivanja donose se zaključci o utjecaju količine zamjene dijela agregata s rezanim kabelima EE otpada i vlakana na navedene mehaničke karakteristike izrađenih smjesa.

Ispitivanje čvrstoće na savijanje provodi se prema normi HRN EN 12390-5 [28] na uzorcima oblika prizme dimenzija 10x10x50 cm. Postavljanju uzorka u prešu prethodi postavljanje ležajeva na propisanu udaljenost. Uzorci se u prešu postavljaju tako da ih se centrira na ležajeve okomito na smjer ugradnje kako bi opterećenje koje se nanosi brzinom bilo ujednačeno. Uzorak se, dakle, opterećuje jednom koncentriranom silom, slika 44.

Za ispitivanje tlačne čvrstoće prema normi HRN EN 12390-3 [17] koristila se preša u kojoj se stavljaju uzorci u obliku kocke dimenzija 10x10x10 cm. Uzorak se centrira i postavlja tako da je smjer nanošenja opterećenja okomit na smjer ugradnje uzorka. Nakon što se podaci o dimenzijama unesu u softver, slijedi opterećivanje uzorka konstantnom brzinom do loma nakon čega se zabilježe najveća sila i tlačna čvrstoća, slika 45.





*Slika 44 Primjer ispitivanja savojne čvrstoće*



*Slika 45 Primjer ispitivanja tlačne čvrstoće*

### 6.4.1.1. Rezultati ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće

Rezultati provedenih ispitivanja izrađenih mješavina i uzoraka na savojnu i tlačnu čvrstoću prikazani su tablicama 17 – 24 koje su prikazane u nastavku ovog poglavlja.

- Etalon – rezultati ispitivanja

**Tablica 17** Rezultati ispitivanja etalona

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	27.04.	25.05.	28	<b>6,97</b>	/	/
1	27.04.	25.05.	28	/	45,0	
Kocka 2	27.04.	25.05.	28	/	48,3	<b>45,8</b>
3	27.04.	25.05.	28	/	44,2	

- Mješavina M1 – rezultati ispitivanja

**Tablica 18** Rezultati ispitivanja mješavine M1

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	27.04.	25.05.	28	<b>6,45</b>	/	/
1	27.04.	25.05.	28	/	44,7	
Kocka 2	27.04.	25.05.	28	/	42,0	<b>43,3</b>
3	27.04.	25.05.	28	/	43,3	

- Mješavina M2 – rezultati ispitivanja

**Tablica 19** Rezultati ispitivanja mješavine M2

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	28.04.	26.05.	28	<b>6,16</b>	/	/
1	28.04.	26.05.	28	/	39,3	
Kocka 2	28.04.	26.05.	28	/	36,9	<b>38,8</b>
3	28.04.	26.05.	28	/	40,3	

- Mješavina M3 – rezultati ispitivanja

**Tablica 20** *Rezultati ispitivanja mješavine M3*

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	28.04.	26.05.	28	<b>7,09</b>	/	/
1	28.04.	26.05.	28	/	46,6	
Kocka 2	28.04.	26.05.	28	/	42,2	<b>44,5</b>
3	28.04.	26.05.	28	/	44,8	

- Mješavina M4 – rezultati ispitivanja

**Tablica 21** *Rezultati ispitivanja mješavine M4*

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	29.04.	27.05.	28	<b>5,35</b>	/	/
1	29.04.	27.05.	28	/	29,9	
Kocka 2	29.04.	27.05.	28	/	28,4	<b>29,6</b>
3	29.04.	27.05.	28	/	30,4	

- Mješavina M5 – rezultati ispitivanja

**Tablica 22** *Rezultati ispitivanja mješavine M5*

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	29.04.	27.05.	28	<b>6,87</b>	/	/
1	29.04.	27.05.	28	/	40,5	
Kocka 2	29.04.	27.05.	28	/	38,0	<b>40,4</b>
3	29.04.	27.05.	28	/	42,6	

- Mješavina M6 – rezultati ispitivanja

**Tablica 23** *Rezultati ispitivanja mješavine M6*

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	03.05.	31.05.	28	<b>5,55</b>	/	/
1	03.05.	31.05.	28	/	33,5	
Kocka 2	03.05.	31.05.	28	/	33,7	<b>32,8</b>
3	03.05.	31.05.	28	/	31,3	

- Mješavina M7 – rezultati ispitivanja

**Tablica 24** *Rezultati ispitivanja mješavine M7*

Redni broj	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kN)	$f_{c,sr}$ (kN)
Prizma	03.05.	31.05.	28	<b>6,60</b>	/	/
1	03.05.	31.05.	28	/	43,2	
Kocka 2	03.05.	31.05.	28	/	43,9	<b>43,8</b>
3	03.05.	31.05.	28	/	44,3	

Slika 46 prikazuje izgled poprečnog presjeka uzorka nakon ispitivanja savojne čvrstoće. Riječ je o uzorku M6 koji sadrži 5% udjela zamjene krupnog agregata. Površina poprečnog presjeka je vidljivo rupičasta i neravna, te se na istoj fotografiji jasno vidi i struktura samog uzorka. Crvenom bojom je posebno označena kontaktna zona između matrice i zamjene agregata. Zbog teksture kabela očekivano je bilo da neće biti dobra prionjivost i da će tu nastajati problem. Za pretpostaviti je da je loša kontaktna zona dovela i do lošijih mehaničkih svojstava kompozita. Buduća istraživanja trebala bi posvetiti pažnju nalaženju boljeg prijanjanja kontaktne zone matrice i zamjenskog agregata.

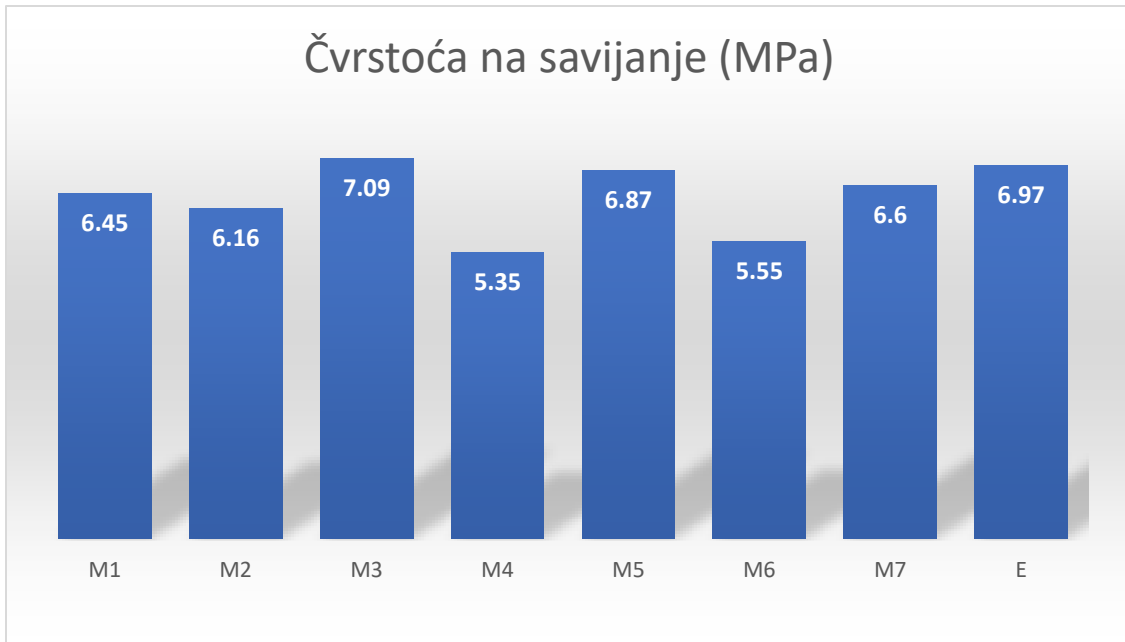




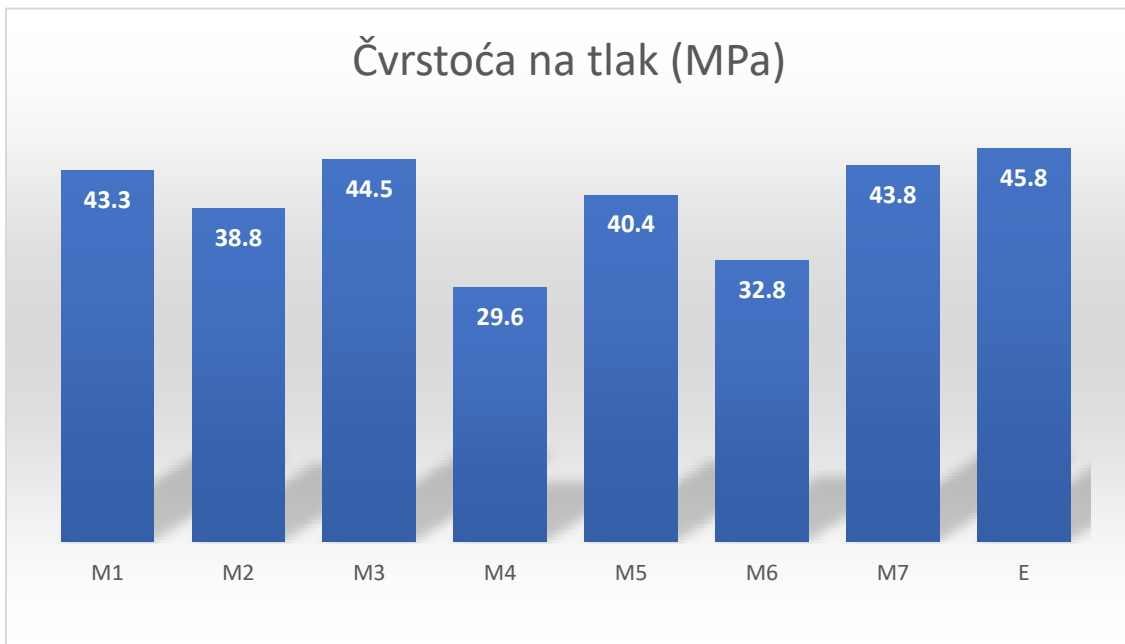
*Slika 46 Presjek uzorka M6*

- **Dijagrami**

Dijagramima Dijagram 1 i Dijagram 2 prikazane su vrijednosti čvrstoće na savijanje i čvrstoće na tlak dobivene kao rezultati provedenih ispitivanja za svaki od izrađenih uzoraka.



*Dijagram 1 Čvrstoća na savijanje*



*Dijagram 2 čvrstoća na tlak*

Iz dijagrama 1 vidljivo je da je najveću vrijednost vlačne čvrstoće ostvario uzorak M3 s 7,09 MPa, 1,7% veću čvrstoću od referentne mješavine, dok kod ostalih uzoraka se primijeti smanjenje vlačne čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu. Isto tako se može primijetiti opadanje vlačne čvrstoće s povećanjem udjela zamjene prirodnog agregata, tako M1 s 1% udjela plastičnog agregata od EE kabela kao sitnog agregata ostvaruje 6,45 MPa, dok M2 s 5% udjela plastičnog agregata kao sitnog agregata ostvaruje 6,16 MPa. Analogno su se ponašali i M3 – M4, te M5 – M6. Uzorak M7 s dodatkom PVC vlakana u iznosu od 1% ukupnog volumnog udjela također ima nešto manju čvrstoću 6,6 MPa, od referentne mješavine E – 6,97 MPa.

Promatranjem rezultata ispitivanja čvrstoće uzoraka na tlak primjetno je da je kontrolna mješavina ostvarila najveću čvrstoću od 45,8 MPa, tek nešto manje su ostvarili uzorci M1, M3, M5 i M7 gdje je dodano 1% zamjene agregata/vlakana, dok se značajniji pad u tlačnoj čvrstoći vidi kod uzoraka M2, M4 i M6 gdje je dodano 5% agregata od otpadnih kabela kao zamjena za agregat, pritom je M4 ostvarila najmanju tlačnu čvrstoću od 29,6 MPa, 35,37% manju čvrstoću od referentne. Mješavina M4 ima najmanju tlačnu čvrstoću zbog toga što se frakcija s najmanjim volumnim udjelom u betonu – frakcija 4 – 8 mm zamijenila još i s 5% plastičnog agregata, a poznato je da različita svojstva agregata imaju značajan utjecaj na čvrstoću betona [32] stoga je takva zamjena najviše utjecala na tlačnu čvrstoću što se jasno vidi iz slike 40. Razlog može biti i u izgledu kabela koji su se koristili za frakciju 4-8 mm. Frakcije 0-4 i 8-16 mm su homogene u cijelom presjeku, dok je kod frakcije 4-8 mm uočeno ispadanje sadržaja iz PVC ovojnice kabela, slika 37.

Može se zaključiti da zamjena dijela agregata s recikliranim kabelima s EE otpada kao i dodatak vlakana od kabela, osim kod mješavine M3, nije doprinijela povećanju savojne i tlačne čvrstoće i opaža se trend smanjenja čvrstoća s povećanjem udjela zamjene agregata. S obzirom da je mješavina M3 s 1% zamjene srednjeg agregata, agregatom s EE otpada imala najveću vlačnu čvrstoću i samo 2,84% manju tlačnu čvrstoću od referentne može se zaključiti da zamjenom agregata do 1% postoji mogućnost za poboljšanjem mehaničkih svojstava betona.

## 6.4.2. Ispitivanje vodoupojnosti i dinamičkog modula elastičnosti

### 6.4.2.1. Vodoupojnost

Vodoupojnost i apsorpcija uzoraka zasićenih vodom ispituju se na uzorcima valjka. Apсорpcija se ispituje na uzorcima starim 28 dana koji se onda suše u peći na  $105 \pm 5$  °C tijekom 24 sata dok se ne postigne konstantna masa. Zatim se uzorci hlade na sobnoj temperaturi kako bi se odredila masa  $M_1$ . Nakon toga, uzorci se uranjaju u vodu na 24 sata dok se ne postigne i izvaže konstantna masa  $M_2$ . Apсорpcija ( $W_a$ ) računa se pomoću:

$$W_a = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\% \quad [32]$$

gdje je  $M_1$  masa uzorka sušenog u pećnici na zraku, a  $M_2$  je masa površinski suhog uzorka na zraku nakon uranjanja. U tablici 25 su prikazani rezultati upijanja do zasićenja  $W_a$ . Prema tablici 25 s povećanjem količine zamjene agregata raste i ukupno upijanje betona. Uzorci  $M_1$  i  $M_7$  imaju manju apсорpciju u odnosu na referentnu mješavinu. Kod mješavina  $M_3$  i  $M_4$  je zabilježena nešto veća apсорpcija u odnosu na ostale mješavine. Mogući razlog tome je u izgledu kabela frakcije 4-8 mm.

**Tablica 25** Rezultati upijanja uzoraka zasićenih vodom

	<i>E</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>	<i>M7</i>
zasićeno, g	3662,1	3726,5	3681,6	3679,1	3659,2	3676,1	3683,7	3733,9
suho, g	3430,6	3498,0	3428,6	3429,9	3387,1	3437,5	3427,8	3509,8
razlika, g	231,5	228,5	253	249,2	272,1	238,6	255,9	224,1
$W_a$ %	6,7	6,5	7,4	7,3	8,0	6,9	7,5	6,4

Ispitivanje vodoupojnosti odnosno kapilarne apсорpcije vode provedeno je prema standardnoj metodi ASTM C1585 [32]. Uzorci su se prvo sušili u peći na  $105 \pm 5$  °C tijekom 24 sata do konstante mase  $M_0$ . Zatim su uzorci ohlađeni na sobnoj temperaturi i izvagani, a samo je jedna površina uzorka izložena vodi. Valjci su se odlagali na male nosače u vodi, tako da je samo <5 mm valjka bilo uronjeno, slika 47.



*Slika 47 Primjer ispitivanja vodoupojnosti*

Količina apsorbirane vode određivala se u različitim razdobljima, nakon 0, 2, 4, 8, 15, 30, 45 i 60 min, te 4 i 24 sata, i to vaganjem valjaka:

$$\Delta W = M_t - M_0 \quad [32]$$

$\Delta W$  označava povećanje mase (g) apsorbirane vode za površinu dimenzija  $100^2 * \pi$  (mm<sup>2</sup>), a  $t$  (min) jest vrijeme u kojem se određuje masa.

Vodoupojnost ( $S$ ) u mm/min<sup>0.5</sup> može se računati iz matematičkog izraza:

$$S = \frac{\Delta W}{A t^{0.5}} \quad [32]$$

gdje je  $\frac{\Delta W}{A}$  povećanje mase u mm uslijed pristupa vode, (1 g vode jednak je 1 mm<sup>3</sup>, pa je g/mm<sup>3</sup> = mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup> = mm),  $A$  je poprečni presjek valjka ( $100^2 * \pi$  mm<sup>2</sup>), a  $t$  je vrijeme mjereno u minutama ( $t = 1440$  min). U tablici 26 i 27 su prikazane vrijednosti promjene mase  $\Delta W$  te rezultati vodoupojnosti  $S$ . Za sve omjere mješavina vrijednosti kapilarnog upijanja vode se kreću

od  $7,33 \times 10^{-6}$  do  $10,9 \times 10^{-6}$  mm/min<sup>0,5</sup>. Ove vrijednosti upućuju na to da voda prodire vrlo sporo.

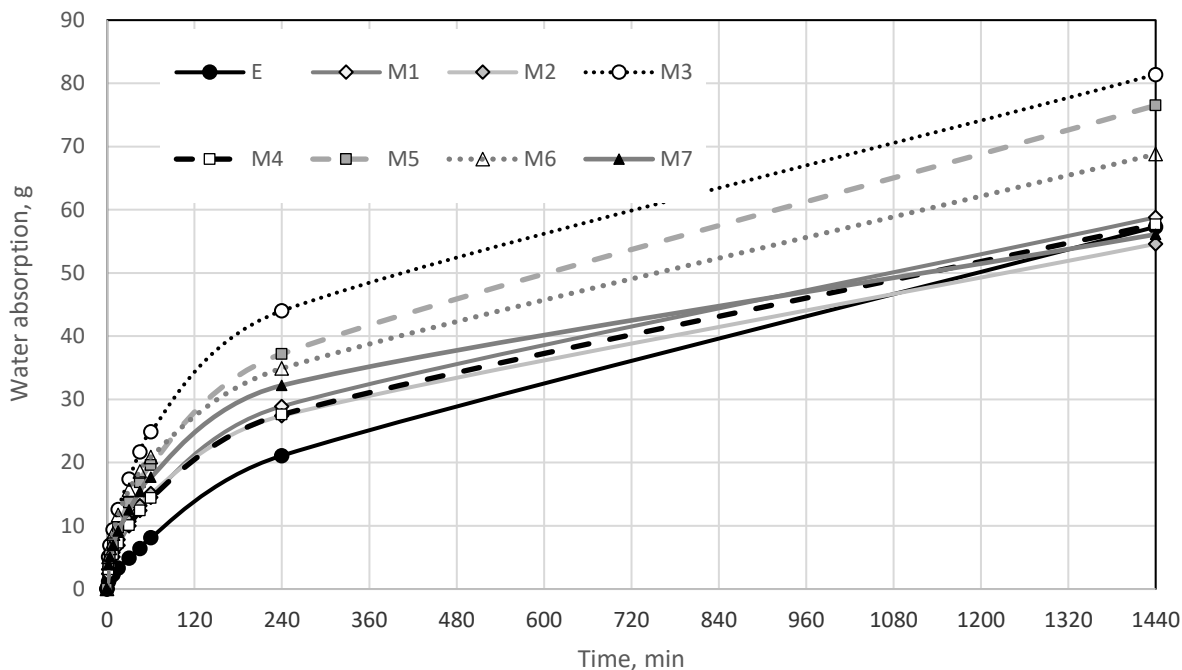
**Tablica 26**

Uzorci Mase	E	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
$m_0$	3430,6	3498,0	3428,6	3429,9	3387,1	3437,5	3427,8	3509,8
$m_2$	3431,8	3500,4	3431,7	3435,0	3390,2	3441,3	3432,9	3513,7
$m_4$	3432,4	3501,5	3432,8	3436,8	3391,2	3442,8	3434,3	3514,9
$m_8$	3432,9	3503,1	3434,4	3439,3	3392,6	3444,7	3436,6	3516,7
$m_{15}$	3433,9	3504,9	3436,4	3442,5	3394,4	3447,2	3439,5	3519,0
$m_{30}$	3435,5	3508	3439,3	3447,3	3397,2	3451,2	3443,5	3522,3
$m_{45}$	3437	3510,4	3441,8	3451,6	3399,5	3454,4	3446,4	3525,2
$m_{60}$	3438,7	3512,5	3443,7	3454,8	3401,5	3457,1	3448,7	3527,5
$m_{4h}$	3451,7	3526,9	3456,0	3473,9	3414,7	3474,7	3462,7	3542,0
$m_{24h}$	3487,9	3556,8	3483,2	3511,3	3444,8	3514,0	3496,6	3565,9
$\Delta W =$ $m_{24h} - m_0$	57,3	58,8	54,6	81,4	57,7	76,5	68,8	56,1

**Tablica 27 Vodoupojnost**

	E	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
$S \times 10^{-5}$ mm/min <sup>0,5</sup>	4,8	4,9	4,6	6,8	4,8	6,4	5,8	4,7

Promjena količine apsorbirane vode (g) u odnosu na početnu težinu uzorka grafički je prikazana na Dijagramu 3 s vremenom (min) za razdoblje mjerenja od 24 sata. Poželjne su niže vrijednosti. Apsorpcija vode (g) je najveća kod uzoraka M3, M5 i M6, dok uzorci M1, M2 i M4 ne odskakuju puno od referentne mješavine, štoviše uzorak M2 je pokazao najmanju sklonost apsorciji vode. S obzirom da je uzorak M2 s 5% udjela zamjene agregata, kao i uzorak M3 s 1% udjela zamjene, pokazao najmanju odnosno najveću sklonost apsorbiranju vode, može se zaključiti da se povećanjem udjela zamjene agregata smanjuje sklonost apsorbiranja vode.



*Dijagram 3 Apsorpcija vode (g) tijekom 24 sata*

#### 6.4.2.2. Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti se određuje metodom ultrazvuka tako da se uz pomoć uređaja kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi, nakon čega se očitava brzina prolaska valova kroz uzorak. Nakon toga se dinamički modul određuje izrazom:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [GPa],$$

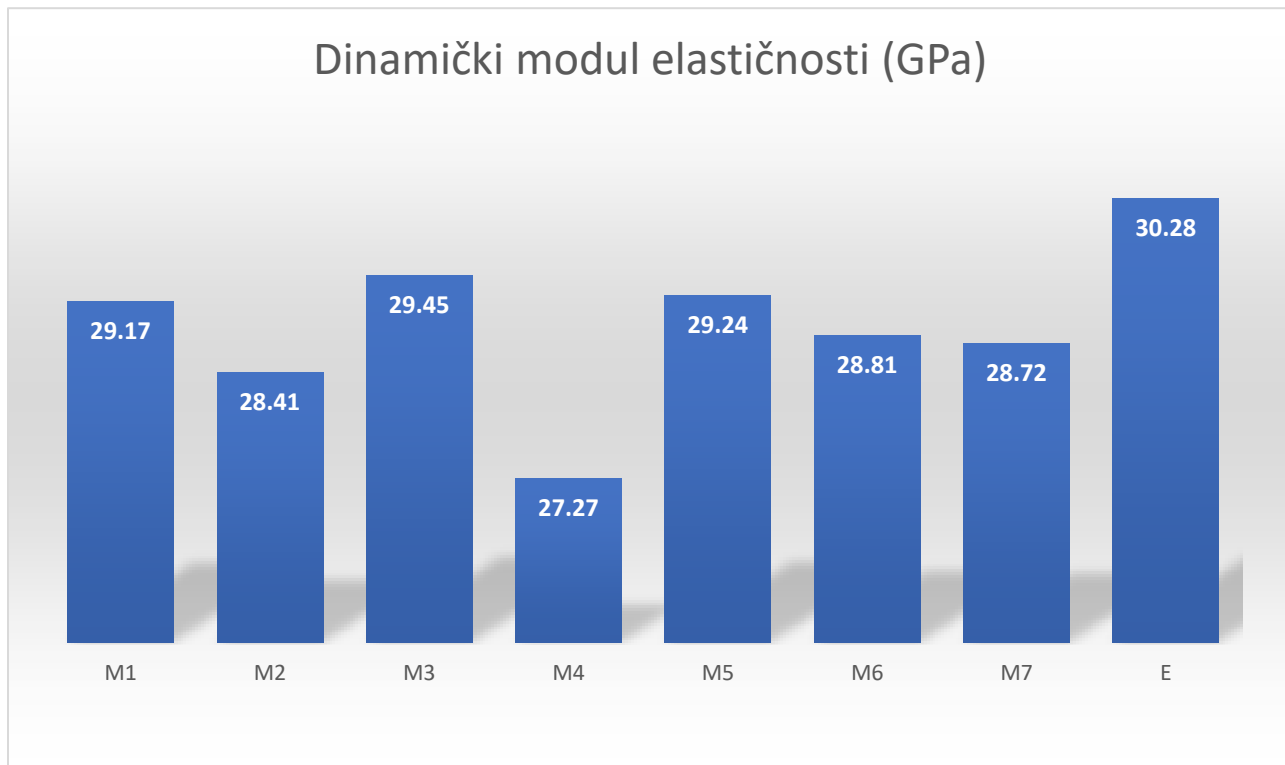
gdje je:

$v$  - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

$\rho$  - gustoća betona [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  - poissonov koeficijent [ $\mu = 0.2$ ]

Dijagramom 4 prikazane su vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka.



***Dijagram 4 Dinamički modul elastičnosti***

Usporedbom rezultata ispitivanja modula elastičnosti kontrolne mješavine s mješavinama s dodacima PVC agregata/vlakana uočavaju se manje vrijednosti kod mješavina s dodacima, što se može objasniti zamjenom agregata plastičnim. Naime, kako agregat ima veći modul elastičnosti od cementne paste, očito je da zamjena dijela agregata rezultira manjim modulom elastičnosti. Dinamički modul elastičnosti smanjuje se s povećanjem udjela zamjenskog agregata. Mješavina M4 ima najmanji modul elastičnosti - 27,27 GPa, što se može prepisati 5% - tnoj zamjeni agregata s plastičnim agregatom, ali i nehomogenosti plastičnog agregata za tu konkretnu frakciju 4 – 8 mm. Mješavine M1, M3 i M5 se razlikuju do 1.1 GPa u odnosu na referentnu mješavinu.

Ultrazvučno ispitivanje brzine impulsa je in-situ, nerazorno ispitivanje za provjeru kvalitete betona i prirodnih stijena. U ovom testu, čvrstoća i kvaliteta betona se procjenjuju mjerenjem brzine ultrazvučnog impulsa koji prolazi kroz betonsku strukturu. Ovo ispitivanje provodi se prolaskom ultrazvučnog impulsa kroz beton koji se testira i mjerenjem vremena



potrebno impulsu da prođe kroz strukturu. Veće brzine ukazuju na dobru kvalitetu i kontinuitet materijala, dok sporije brzine mogu ukazivati na beton s mnogo pukotina ili šupljina. Oprema za ultrazvučno ispitivanje uključuje sklop za generiranje impulsa, koji se sastoji od elektroničkog kruga za generiranje impulsa i pretvarača za pretvaranje elektroničkog impulsa u mehanički impuls s frekvencijom oscilacija u rasponu od 40 kHz do 50 kHz, te prijemnog kruga impulsa koji prima signal. Pretvarač, sat, oscilacijski krug i izvor napajanja sastavljeni su za upotrebu. Nakon umjeravanja na standardni uzorak materijala s poznatim svojstvima, pretvarači se postavljaju na suprotne strane materijala kako je i prikazano na slici 48. Brzina impulsa mjeri se jednostavnom formulom:

$$\text{brzina impulsa } (v) = \frac{\text{širina materijala } (w)}{\text{vrijeme potrebno da impuls prođe } (t)} \quad [30]$$

Pomoću brzine impulsa, određuje se kvaliteta betona koji se ispitivao prema tablici 28.

**Tablica 28** Kvaliteta betona ovisno o brzini impulsa [31]

<b>Brzina impulsa (m/s)</b>	<b>Kvaliteta betona</b>
> 4000	Dobra
3000 – 4000	Srednja
< 3000	Loša



*Slika 48 Primjer ispitivanja ultrazvučne brzine impulsa*

Ispitivanje ultrazvučne brzine impulsa provodi se prema normi HRN EN 12504-4 [29] na uzorcima oblika kocke dimenzija 10x10x10 cm. Postavljanju uzoraka na stol za mjerenje impulsa prethodi mjerenje dužine, širine i visine svakog uzorka. Nakon mjerenja, uzorci se postavljaju na stol, premažu gelom zbog bolje prionjivosti pretvarača te se mjeri impuls na 3 mjesta na uzorku, prvi vrhu, sredini, te dnu uzorka. Brzina impulsa se pritom računa prema gore napisanoj formuli tako da se uzima srednja vrijednost od tri očitana vremena na svakom uzorku. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 28 te se jasno vidi da dodavanje zamjene za agregat ili vlakana nije utjecalo na kvalitetu betona u odnosu na referentnu mješavinu. Kvaliteta betona iz svih mješavina okarakterizirana je kao srednja prema tablici 28.

**Tablica 29** Rezultati ultrazvučnog testa

Uzorak	a (cm)	b (cm)	c (cm)	t <sub>1</sub> (μs)	t <sub>2</sub> (μs)	t <sub>3</sub> (μs)	t <sub>sr</sub> (μs)	v (m/s)	V <sub>sr</sub> (m/s)
E	10,1	10,0	10,0	27,0	27,0	27,2	27,1	3731,5	<b>3771,6</b>
	10,2	10,0	10,0	27,2	27,2	26,8	27,1	3768,5	
	10,3	10,0	10,0	27,2	26,8	27,0	27,0	3814,8	
M1	10,2	10,0	10,0	27,3	27,8	27,5	27,5	3704,6	<b>3718,2</b>
	10,2	10,0	10,0	27,5	27,3	27,0	27,3	3740,8	
	10,2	10,0	10,0	27,3	27,5	27,7	27,5	3709,1	
M2	10,1	10,0	10,0	27,7	27,5	27,6	27,6	3659,4	<b>3667,1</b>
	10,2	10,0	10,0	27,5	27,7	27,7	27,6	3691,2	
	10,1	10,0	10,0	27,7	27,7	27,6	27,7	3650,6	
M3	10,3	10,0	10,0	27,4	27,6	27,4	27,5	3750,0	<b>3733,3</b>
	10,2	10,0	10,0	27,4	27,7	27,2	27,4	3718,1	
	10,2	10,0	10,0	27,6	27,2	27,2	27,3	3731,7	
M4	10,3	10,0	10,0	28,2	28,1	27,6	28,0	3683,0	<b>3613,9</b>
	10,2	10,0	10,0	28,3	28,5	28,0	28,3	3608,5	
	10,0	10,0	10,0	28,2	28,3	28,0	28,2	3550,3	
M5	10,2	10,0	10,0	27,2	27,5	27,6	27,4	3718,1	<b>3731,7</b>
	10,3	10,0	10,0	27,7	27,2	27,2	27,4	3763,7	
	10,1	10,0	10,0	27,2	27,2	27,2	27,2	3713,2	
M6	10,2	10,0	10,0	27,5	27,7	27,2	27,5	3713,6	<b>3704,6</b>
	10,1	10,0	10,0	27,6	27,7	27,5	27,6	3659,4	
	10,3	10,0	10,0	27,6	27,7	27,3	27,5	3740,9	
M7	10,2	10,0	10,0	27,7	27,6	27,1	27,5	3713,6	<b>3691,5</b>
	10,2	10,0	10,0	27,6	27,9	27,4	27,6	3691,2	
	10,3	10,0	10,0	27,6	27,4	27,6	27,5	3669,8	

## 7. ZAKLJUČAK

Jedan od načina gospodarenja plastičnim otpadom je uporaba u betonu. Ova metoda može pomoći u rješavanju dva problema. Prvo, uklanjanjem onečišćenja okoliša smanjenjem troškova skladištenja i količine plastičnog otpada na odlagalištima te količine štetnih plinova ispuštenih u atmosferu tijekom paljenja istog; te pružanjem sekundarne sirovine za građevinsku industriju.

Poboljšanje održivosti betona, prilikom čije se proizvodnje znatno zagađuje okoliš, može se postići i zamjenom prirodnih agregata recikliranim komponentama. Pokazatelji iskorištavanja prirodnih zemljišta rijetko su dio varijable kod procjene analize životnog ciklusa (LCA) što rezultira podcjenjivanjem ekoloških problema povezanih s iscrpljivanjem tla i promjenom topografije, koji su izravno povezani s ukupnom potrošnjom agregata u betonu. Osim toga, u pravilu agregat čini oko 70% ukupne zapremine betona, što nije zanemariva količina materijala, koja se potencijalno može uštedjeti odgovarajućim pravilima recikliranja ili zamijeniti nekim drugim recikliranim materijalom.

Vlakna se nalaze u različitim materijalima (metali, polimeri ili prirodni materijali), raznim oblicima i veličinama, a uvelike se primjenjuju kako u predgotovljenim tako i u *in-situ* betonskim konstrukcijama. Uz to su već dostupna na tržištu za primjenu u betonskim elementima. Karakteristike i svojstva MAB-a mijenjaju se s obzirom na udio veziva, interakcije između vlakna i matrice, vrste vlakna, omjer, gustoću, koncentraciju, orijentaciju i raspodjelu u betonu. Posljednjih godina istraživači su se usmjerili na upotrebu inovativnih vlaknastih materijala od recikliranog otpada za održivi razvoj. Provedena su opsežna istraživanja o iskoristivosti plastičnog otpada na betonskim elementima, s obzirom na to da ga ima u izobilju.

U ovom su radu upotrijebljeni kabeli s EE otpada, i iskorišteni su kao zamjena za dio agregata u betonu, odnosno kao vlakna. PVC kabeli su dodani u mješavine te se u svakoj mješavini dio volumena agregata, sitnog, srednjeg i naposljetku krupnog zamjenjivao s 1%, odnosno 5% otpadnog agregata, te u zadnjoj mješavini M7 dodano 1% otpadnih vlakana duljine 3 cm od ukupnog volumenskog udjela mješavine. Ispitala su im se svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju je ispitano slijeganje, dok se u očvrslom stanju ispitala vlačna i tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti i vodoupojnost, kod svih uzoraka.

Primijećeno je da se zamjenom agregata s recikliranim kabelima s EE otpada ili kao dodatka vlakana od ukupnog volumenskog udjela svojstva betona nisu znatno ni pogoršala, ali ni poboljšala. Mješavina M3 s 1% zamjene srednje frakcije agregata je jedina imala veću vlačnu čvrstoću od referentnog uzorka, ali samo za 1,7%, i samo nešto manju tlačnu čvrstoću od referentne – 2,84 %. Dok s druge strane zamjenom agregata od 5% se vidi pad od 23,24% tlačne čvrstoće, odnosno 35,37% vlačne čvrstoće te smanjenje dinamičkog modula elastičnosti. Može se zaključiti da bi se smanjenjem udjela zamjene agregata do 1% dobili bolji rezultati čvrstoća i modula elastičnosti međutim za to su potrebna daljnja istraživanja. Na rezultate utječe i vrsta i homogenost upotrijebljenih kabela. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa pokazali su da se dodavanjem zamjene agregata/vlakana nije utjecalo na kvalitetu betona, dok se kod rezultata vodoupojnosti može primijetiti, iako su svi uzorci slabo upijajući, da je uzorak M2 s 5% otpadnih kabela kao zamjenom sitnog agregata pokazao najbolje rezultate te se može zaključiti da se s povećanjem udjela otpadnog agregata smanjuje apsorpcija vode.

Zamjena agregata agregatom s EE otpada bez ugrožavanja kriterija obradivosti i čvrstoće zahtijeva opširno istraživanje. Zbog teksture zamjenjujućeg agregata - otpadnih kabela očekivano je bilo da neće biti dobra prionjivost između kontaktne zone i zrna zamjenskog agregata. Za pretpostaviti je da je loša kontaktna zona dovela i do lošijih mehaničkih svojstava kompozita. Buduća istraživanja trebala bi posvetiti pažnju rješavanju nepodobne teksture zamjenjujućih plastičnih agregata, a u svrhu boljeg prijanjanja kontaktne zone matrice i zamjenskog agregata, te optimalnoj količini udjela otpadnog agregata kako bi se poboljšala mehanička svojstva betona.

## 8. LITERATURA

- [1] V. Rogić: Primjena konoplje u betonu, diplomski radi, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2015.
- [2] F. P. Torgal, J. Khatib, F. Colangelo, R. Tuladhar: Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete, 2019.

- [3] L. Parker: the world's plastic pollution crisis explained,  
<https://www.nationalgeographic.com/environment/habitats/plastic-pollution/>,  
pristupljeno (25.07.2021.)
- [4] Development of sustainable construction and demolition waste management system for Croatia,  
[https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=2963&docType=pdf](https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2963&docType=pdf), pristupljeno (25.07.2021.)
- [5] N. Štirmer: Utjecaj građevnog materijala na okoliš, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, 1(2012), str. 293-311
- [6] HD wallpaper: wires, computer wire, power wire, electrical wire, connectors,  
<https://www.wallpaperflare.com/wires-computer-wire-power-wire-electrical-wire-connectors-wallpaper-gcink>, pristupljeno (26.07.2021.)
- [7] V. Ukrainczyk: Poznavanje gradiva, Alcor Zagreb, Zagreb, 2001.
- [8] Beton s vlaknima, 2017, <https://blog.ria.hr/gradnja/beton-s-vlaknima/>,  
pristupljeno (28.07.2021.)
- [9] [https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiXtduTkKbuAhVlkIsKHSe7Ds4QFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.grad.unizg.hr%2F\\_download%2Frepository%2F05\\_PBT\\_Mikroarmirani\\_beton\\_MS.pdf&usg=AOvVaw2SwdHhikeQAEZUYUppzOog](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiXtduTkKbuAhVlkIsKHSe7Ds4QFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.grad.unizg.hr%2F_download%2Frepository%2F05_PBT_Mikroarmirani_beton_MS.pdf&usg=AOvVaw2SwdHhikeQAEZUYUppzOog)  
pristupljeno (28.07.2021.)
- [10] Mikroarmirani beton pomiče granice primjene cementa, 2020.,  
<http://www.gradimo.hr/clanak/mikroarmirani-beton-pomice-granice-primjene-cementa/86693>, pristupljeno (28.07.2021.)
- [11] <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-07408f66b97a375f69360b867507efae-c>,  
pristupljeno (28.07.2021.)
- [12] GFOS, predavanje Betoni-posebnih-namjena-3- Mikroarmirani beton  
<http://www.gfos.unios.hr/download/betoni-posebnih-namjena-3.pdf>,  
pristupljeno (28.07.2021.)
- [13] Visoka kvaliteta sintetičkih vlakana Reinforcement za beton,

- (ntecmono.com), pristupljeno (04.08.2021.)
- [14] Natural Fibers, <http://textilewithme.blogspot.com/2015/04/natural-fibers.html>, pristupljeno (04.08.2021.)
- [15] C.D. Johnston: Fiber-Reinforced Cements and Concretes, Advances in concrete technology, vol 3, 2006.
- [16] I. Kesegić, D. Bjegović, I. Netinger: Upotreba reciklirane opeke kao agregata za beton, 2008. <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-61-2009-01-02.pdf>
- [17] D. Bjegović, N. Štirmer: Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [18] J.M. Khatib: Sustainability of construction materials, 2009.
- [19] <https://www.colas.hr/proizvodi-i-usluge/agregati.html>, pristupljeno (06.08.2021.)
- [20] The mining of sand, a non-renewable resource <https://www.greenfacts.org/en/sand-extraction/index.html>, pristupljeno (06.08.2021.)
- [21] C. James: Reasons to Use Recycled Aggregates for Your Next Project, 2020. <https://www.pat.org.uk/design/07/2020/reasons-to-use-recycled-aggregates-for-your-next-project/3667/> , pristupljeno (06.08.2021.)
- [22] I. B. Pečur, N. Štirmer: Primjena recikliranog agregata u betonu – iskustva u Hrvatskoj, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb
- [23] D. Bjegović, N. Štirmer, D. Mikulić: Construction and Demolition Waste Usage Possibilities, Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V), “Collaboration and Integration in Engineering, Management and Technology”, May 20-22, 2009, Istanbul, Turkey
- [24] D. Bjegović, N. Štirmer, H. Šprajc, M. Serdar: Preporuke za primjenu recikliranog agregata, X. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb 2008, Milanović, Zlatko (ur.), Gospodarstvo i okoliš, 2008., 643-653
- [25] A. Sičáková, E. Figmigová: Durability study of concrete with Electronic Waste Plastic Aggregate, Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS, 2021, 22, pp. 56-69. <https://doi.org/10.13167/2021.22.5>

- [26] N. Saikia, J. de Brito: Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon; ICIST Research Institute, Lisbon, Portugal, 2012.
- [27] Dalmacijacement STRUKTO, Idealan izbor za sve betonske i armiranobetonske konstrukcije, <https://www.cemex.hr/dalmacijacement-strukto>, pristupljeno (08.08.2021.)
- [28] Metode ispitivanja laboratorija za materijale, sveučilište u Zagrebu, građevinski fakultet, zavod za materijale, <https://www.grad.unizg.hr/images/50011531/METODE%20ISPITIVANJA%20LABORATORIJA%20ZA%20MATERIJALE.pdf>, pristupljeno (08.08.2021.)
- [29] Označavanje svježeg betona prema HRN EN 206-1:2006, 2007., [https://www.samoborka.hr/upload/dokumenti\\_i\\_cjenici/oznacavanje\\_svjezeg\\_betona\\_prema\\_hrn\\_en\\_206-1\\_2006\\_151731.pdf](https://www.samoborka.hr/upload/dokumenti_i_cjenici/oznacavanje_svjezeg_betona_prema_hrn_en_206-1_2006_151731.pdf), pristupljeno (08.08.2021.)
- [30] Ultrasonic pulse velocity test, [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_pulse\\_velocity\\_test](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_pulse_velocity_test), pristupljeno (09.08.2021.)
- [31] I. Banjad Pečur: Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu, HDKBR INFO Magazin, 3 (1), 2-9, 2013. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/148799>
- [32] B. Bartulović, S. Juradin, D. Žižić, S. Mrakovčić: Possibility of using cotton knitted fabric waste in concrete, radna verzija rada za 6th World Multidisciplinary Civil Engineering - Architecture - Urban Planning Symposium - WMCAUS 2021, 30.08. - 03.09.2021., Prag