

Analiza utjecaja polimernih i vunenih vlakana na mehanička svojstva betona

Vukadin, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:998226>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Teorija i tehnologija betona**

**Ivan Vukadin
JMBAG: 0114033957**

**Analiza utjecaja polimernih i vunelih vlakana na mehanička
svojstva betona**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

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



Ivan Vukadin

U Rijeci, 2. rujna 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta
ANALIZA MOGUĆNOSTI UPORABE RECIKLIRANIH MATERIJALA U PROIZVODNJI
ODRŽIVOG BETONA

Voditelj projekta	<u>izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić</u>
Šifra projekta	<u>uniri-iskusni-tehnic-23-108</u>
Financijer projekta	<u>Sveučilište u Rijeci</u>
Pravna nadležnost	<u>Republika Hrvatska</u>

U Rijeci, 30. kolovoza 2024.

Mentor:



Zahvala

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić na stručnim savjetima i podršci tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Neiri Torić Malić na suradnji tijekom izrade rada te laborantima Dini Juriševiću i Dominiku Štroku na pomoći prilikom provedbe ispitivanja u laboratoriju.

Na kraju, posebno zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog fakultetskog obrazovanja.

Sažetak

Predmet ovoga rada je analiza utjecaja polipropilenskih i vunениh vlakana na mehanička svojstva betona. U kontekstu sve izraženijih ekoloških izazova u proizvodnji građevinskih materijala, pojavljuje se potreba za održivim prirodnim materijalima. S obzirom na činjenicu da na otocima Krku i Cresu postoji određena kvantiteta vune neuporabljive za druge namjene, pojavila se ideja korištenja iste u betonu umjesto polipropilenskih vlakana. Primarni fokus rada jest utvrditi opravdanost korištenja vunениh vlakana kao komponente mikroarmiranog betona. U tom kontekstu, provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem te modula elastičnosti. Sva ispitivanja su u skladu s trenutno važećim europskim normama te pripadajućim hrvatskim nacionalnim dodacima. U radu je napravljen pregled dosadašnjih saznanja i istraživanja o utjecaju polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva betona. Tema betona mikroarmiranog vunениm vlaknima trenutno je slabo obrađena u znanstvenoj zajednici, stoga je u radu dokumentirano samo jedno ispitivanje koje se bavilo sličnom tematikom. Provedena ispitivanja izvršena su na uzorcima s 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % te 2,00 % polipropilenskih vlakana te 0,50 % vunениh vlakana. Za mješavine je korištena identična receptura i postupak njegovanja, kako bi se vrsta i količina vlakana mogle dovesti u što točniju vezu s rezultatima. Nadalje, u radu je konstatirano kako obje vrste vlakana rezultiraju povećanjem tlačne i vlačne čvrstoće u odnosu na referentni beton. Također, u radu je zaključeno kako je modul elastičnosti uzorka mikroarmiranih vunениm vlaknima veći u odnosu na beton mikroarmiran polipropilenskim vlaknima.

Ključne riječi: polipropilenska vlakna, vunena vlakna, mikroarmirani beton, mehanička svojstva, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem, modul elastičnosti

Abstract

This paper aims to demonstrate the effect of polypropylene and wool fibers on the mechanical properties of concrete, particularly in view of the increasingly important environmental issues and the use of sustainable resources. Due to the fact that there is a significant quantity of wool on the islands of Cres and Krk that is not used for other purposes, an idea emerged to use it in concrete instead of polypropylene fibers. The paper's focus is to determine whether the use of wool fibers as a component of micro – reinforced concrete is justified. In that regard, experimental tests for compressive strength, flexural strength, and modulus of elasticity were conducted. All tests are in accordance with current European standards and the corresponding Croatian national annexes. The paper provides a review of the existing research on the impact of polypropylene fibers on the mechanical properties of concrete. The subject of concrete reinforced with wool fibers is currently scantily explored in the scientific community, hence the paper presents a single study that addressed a similar subject. The tests were performed on samples with 0.50%, 1.00%, 1.50%, and 2.00% polypropylene fibers and 0.50% wool fibers. An identical recipe and curing process were used for all mixtures to ensure that the type and quantity of fibers could be accurately associated with the results. Furthermore, the paper determined that polypropylene and wool fibers result in an increase in compressive and flexural strength compared to reference concrete. Ultimately, it is concluded that the modulus of elasticity of the sample containing wool fibers is higher compared to concrete with added polypropylene fibers.

Keywords: polypropylene fibers, wool fibers, fiber – reinforced concrete, mechanical properties, compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Pregled literature	2
3. Eksperimentalna ispitivanja	14
3.1. Projektiranje mješavina betona.....	14
3.2. Cement.....	16
3.3. Voda.....	17
3.4. Kemijski dodaci.....	17
3.5. Superplastifikator.....	18
3.6. Agregat	20
3.7. Vlakna.....	20
4. Ispitivanje mehaničkih svojstava betona	22
4.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće	22
4.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće.....	24
4.3. Ispitivanje modula elastičnosti	28
5. Rezultati ispitivanja	32
5.1. Tlačna čvrstoća	32
5.2. Vlačna čvrstoća.....	38
5.3. Modul elastičnosti.....	47
6. Zaključak.....	64
Literatura.....	66

Popis slika

Slika 1: Odnos vlačne čvrstoće savijanjem uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1] ..2	2
Slika 2: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1]	3
Slika 3: Odnos modula elastičnosti uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1]	3
Slika 4: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [6]	5
Slika 5: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [6]	6
Slika 6: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [8]	7
Slika 7: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [8]	7
Slika 8: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9]	8
Slika 9: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9]	9
Slika 10: Odnos modula elastičnosti uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9] ...	9
Slika 11: Odnos modula elastičnosti o vremenu za pojedinu mješavinu [11]	11
Slika 12: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [12]	12
Slika 13: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [12]	12
Slika 14: Granulometrijska krivulja agregata	15
Slika 15: Superplastifikator [14]	17
Slika 16: Shematski prikaz djelovanja plastifikatora: (a) flokulantni sustav čestica; (b) dispergirane čestice [15]	18
Slika 17: Dodatak superplastifikatora u vodu [14]	19
Slika 18: PP vlakna duljine 18 mm	21
Slika 19: Prirodna vunena vlakna nakon tretiranja i čišćenja [18]	21
Slika 20: Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće	23
Slika 21: Uzorak pozicioniran u uređaju	24
Slika 22: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće	25
Slika 23: Oslabljenje presjeka prizme izvedbom zareza visine 25 mm	27
Slika 24: Mjerni uređaj pričvršćen na uzorku	27
Slika 25: Ekstenzometar pričvršćen na uzorku	29
Slika 26: Ekstenzometar s vidljivim konusnim čeličnim vrhovima	30
Slika 27: Ekstenzometri montirani i pričvršćeni na uzorak betona s vlaknima	31
Slika 28: Relativni odnos tlačne čvrstoće pojedine skupine uzoraka i čvrstoće referentnog betona	33
Slika 29: Beton s 1,50 % PP vlakana	34
Slika 30: Beton s 2,00 % PP vlakana	34
Slika 31: Detalj segregacije	34
Slika 32: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 0,50 % polipropilenskih vlakana ...	35
Slika 33: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 1,00 % polipropilenskih vlakana ...	35
Slika 34: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 1,50 % polipropilenskih vlakana ...	36
Slika 35: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 2,00 % polipropilenskih vlakana ...	36
Slika 36: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 0,50 % vunениh vlakana	37
Slika 37: Slom uzorka s 0,50 % PP vlakana	37
Slika 38: Slom uzorka s 0,50 % vunениh vlakana	38
Slika 39: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	39

Slika 40: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	40
Slika 41: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	40
Slika 42: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	41
Slika 43: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	41
Slika 44: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	42
Slika 45: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana	42
Slika 46: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana	43
Slika 47: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana	43
Slika 48: Ploha sloma uzorka s vunениm vlaknima	44
Slika 49: Ploha sloma uzorka s PP vlaknima	44
Slika 50: Dijagram naprezanje - deformacija za karakteristični uzorak svake mješavine.....	45
Slika 51: Usporedba vlačne čvrstoće ispitanih uzoraka s referentnim betonom	46
Slika 52: Princip očitavanja deformacija za inicijalni sekantni modul elastičnosti.....	49
Slika 53: Princip očitavanja deformacija za stabilizirani sekantni modul elastičnosti.....	50
Slika 54: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	51
Slika 55: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	51
Slika 56: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	52
Slika 57: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	52
Slika 58: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	53
Slika 59: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana	53
Slika 60: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	54
Slika 61: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	54
Slika 62: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	55
Slika 63: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	55
Slika 64: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	56
Slika 65: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana	56

Slika 66: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	57
Slika 67: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	57
Slika 68: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	58
Slika 69: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	58
Slika 70: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	59
Slika 71: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % vunelih vlakana	59
Slika 72: Usporedba inicijalnog i stabiliziranog ME betona s vunelim i polipropilenskim vlaknima.....	62

Popis tablica

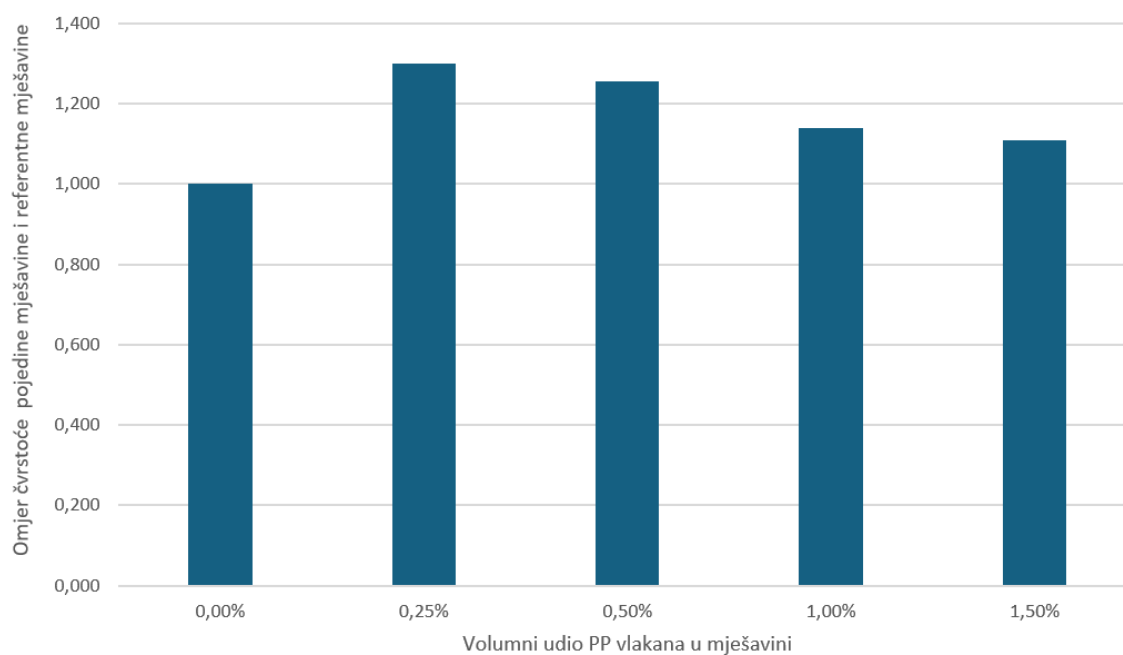
Tablica 1: Masa sastojaka za m ³ betona	16
Tablica 2: Vrijednosti opterećenja za modul elastičnosti	29
Tablica 3: Ispitivanje tlačne čvrstoće - Geometrijske i mehaničke karakteristike uzoraka	32
Tablica 4: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	39
Tablica 5: Rezultati ispitivanja inicijalnog sekantnog modula elastičnosti	60
Tablica 6: Rezultati ispitivanja stabiliziranog sekantnog modula elastičnost	61

1. Uvod

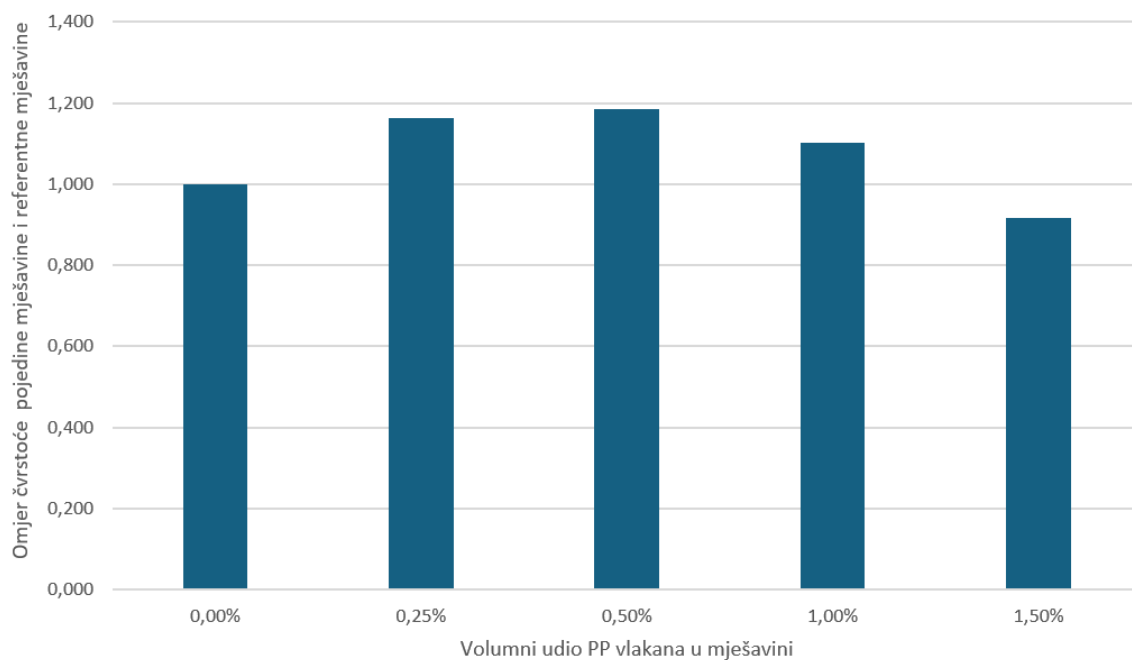
Zahvaljući svojoj širokoj primjeni u građevinarstvu, beton je drugi najkorišteniji materijal na svijetu. S obzirom na sve veće konstrukcijske zahtjeve, sve češće se istražuje mogućnost poboljšanja mehaničkih svojstva betona. Primjena vlakana u betonu smanjuje potrebu za tradicionalnim armiranjem, čime se proces gradnje ubrzava. Posljedično, istraživanje utjecaja vlakana na mehanička svojstva betona postaje sve aktualnije. Prednost mikroarmiranog betona u odnosu na obični beton jest njegova dulja trajnost kada je pravilno projektiran, ali i poboljšana mehanička svojstva – primarno se misli na vlačnu čvrstoću koja je "slaba karika" običnog betona. Iako postoje različite vrste vlakana koje se dodaju betonu, poput čeličnih, staklenih i polimernih, sve se češće pojavljuju inicijative korištenja prirodnih vlakana za mikroarmiranje betona. Time se suzbijaju negativni efekti koje proizvodnja industrijskih vlakana ima na okoliš te se umanjuje cijena mikroarmiranih betona. Nadalje, prednost prirodnih vlakana u odnosu na konvencionalna jest i smanjenje biootpada, s obzirom da određena prirodna vlakna nisu dovoljne kvalitete da budu primijenjena u drugim industrijama, pa ostaju bez ikakve namjene. U tom kontekstu, javila se inicijativa uporabe vunениh vlakana sa otoka Krka i Cresa gdje postoji višak vune koja je takve kvalitete da ne može biti primijenjena u drugim industrijama. Shodno tome, vunena vlakna predstavljaju lako dostupni dodatak koji može poboljšati mehaničke performanse betona, ali čiji je utjecaj na beton nedovoljno istražen u stručnoj i znanstvenoj literaturi. S druge strane, polipropilenska vlakna već su etablirana kao dodatak betonu te su uz izabrani tip polipropilenskih vlakana poznate i vrijednosti duljine vlakana, vlačne čvrstoće te njihove strukture koje garantira proizvođač. Ipak, njihov optimalni volumni udio u betonu i dalje je nedovoljno istražen te varira ovisno o betonskoj mješavini. Stoga, cilj ovoga rada jest utvrditi optimalni udio polipropilenskih vlakana u mješavini, odnosno onaj koji rezultira maksimalnim vrijednostima mehaničkih svojstava. Iz tog razloga, spravljene su mješavine u kojima je količina vlakana u varirana od 0,50 % do 2,00 % vlakana. S druge strane, ovčja vunena vlakna u potpunosti su novi koncept u domeni betonskih dodataka, stoga je u radu napravljena jedna mješavina s 0,50 % vunениh vlakana kako bi se mogao analizirati njihovo utjecaj na parametre betona. Betonskim uzorcima eksperimentalno su ispitana svojstva tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem te modula elastičnosti. Na temelju rezultata ispitivanja, napravljena je analiza parametara te su sukladno njoj dokumentirani zaključci o utjecaju pojedine vrste vlakana na karakteristike betona.

2. Pregled literature

U provedenim ispitivanjima [1] dokumentiran je utjecaj polipropilenskih vlakana na modul elastičnosti, vlačnu i tlačnu čvrstoću betona. Polipropilenska vlakna dodavana su u mješavine u postotcima volumena u iznosu od 0,25 %, 0,50 %, 1,00 %, te 1,50 %. Vlačna čvrstoća savijanjem povećana je pri udjelu od 0,25 %, 0,50 %, 1,00 %, te 1,50 %. Ipak, maksimalni porast vlačne čvrstoće od 30,00 % u odnosu na referentnu mješavinu zabilježen je pri udjelu PP vlakana od 0,25 %, dok je pri udjelu vlakana od 0,50 % vlačna čvrstoća povećana za 25,50 % (Slika 1.). Daljnje dodavanje vlakana pokazalo je sve manji rast vlačne čvrstoće betona, kao što je prikazano na Slici 1. Tlačna čvrstoća mjerena pri starosti betona od 28 dana povećana je (u odnosu na referentnu mješavinu) pri udjelu PP vlakana od 0,25 %, 0,50 % te 1,00 %, dok je pad tlačne čvrstoće zabilježen pri količini PP vlakana od 1,50 %. Najveći rast tlačne čvrstoće od 18,40 % zabilježen je kod mješavine s 0,50% vlakana, dok je pad od 8,89% zabilježen na uzorcima s 1,50 % PP vlakana (Slika 2.).

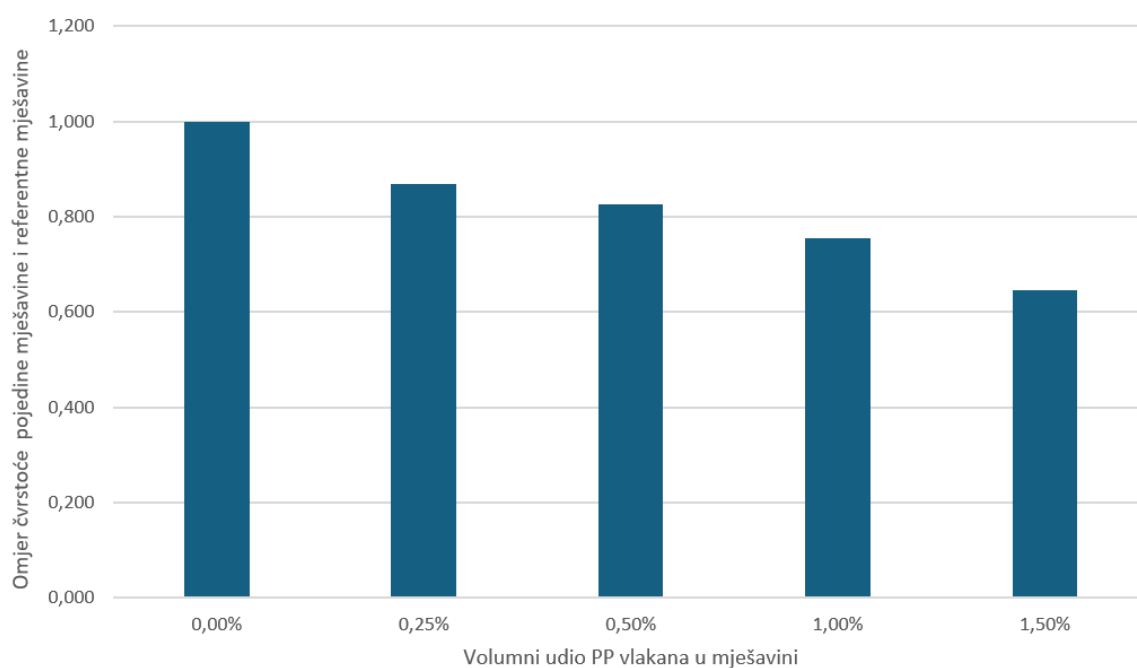


Slika 1: Odnos vlačne čvrstoće savijanjem uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1]



Slika 2: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1]

Modul elastičnosti pokazao je sve manju vrijednost pri svakom povećanju udjela PP vlakana. Točnije, pri udjelu vlakana od 0,50 % zabilježen je pad modula elastičnosti u iznosu 21,16 %, dok je pri udjelu PP vlakana od 1,50 % ostvaren pad modula elastičnosti od čak 54,68 % (Slika 3.). Sva ispitivanja provedena su pri starosti betona od 28 dana.



Slika 3: Odnos modula elastičnosti uzoraka s PP vlaknima i referentnog uzorka [1]

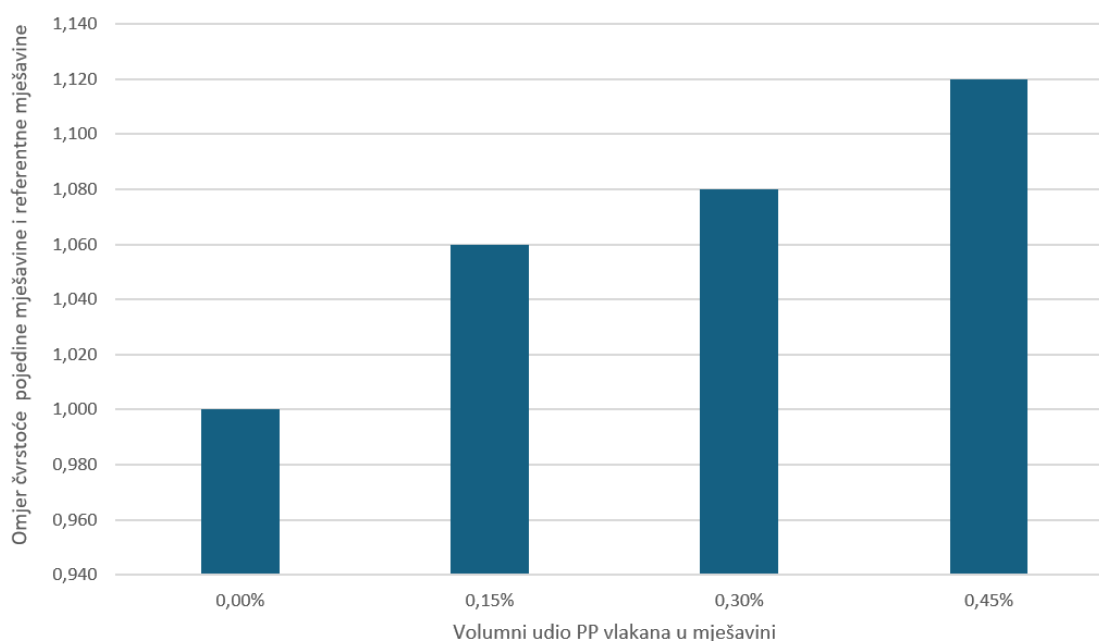
Mašek et al. [2] istraživali su mehanička svojstva betona pri dodatku 2 vrste polipropilenskih vlakana dobivenih od otpadnog materijala. Temeljna razlika među vlaknima jest u teksturi same površine i obliku poprečnog presjeka, točnije jedna serija mješavina spravljena je sa jednom vrstom vlakana (glatke površine i relativno pravilnog kružnog presjeka), dok je druga serija mješavina pripremljena s drugom vrstom PP polipropilenskih vlakana (hrapave površine te nepravilnijeg poprečnog presjeka). Kod obje serije uzoraka, duljina vlakana je bila približno 31 mm, dok je udio vlakana iznosio 0,50 % mase cementa. Nakon 28 dana, vlačna čvrstoća uzorka sa zelenim PP vlaknima bila je veća za 72,00 % u odnosu na referentnu mješavinu te 29 % u odnosu na uzorke sa sivim PP vlaknima. S druge strane, ispitivanjem tlačne čvrstoće utvrđeno je kako porast tlačne čvrstoće nakon 28 dana iznosi približno 45,00 % kod uzoraka sa obje vrste PP vlakana. Točnije, tlačna čvrstoća referentne mješavine iznosila je 49 MPa, dok je kod mješavine sa zelenim vlaknima izmjerena tlačna čvrstoća bila 72 MPa.

U radu [3] analizirane su vlačna i tlačna čvrstoća betona s dodatkom polipropilenskih vlakana pri starosti od 14 i 28 dana. Polipropilenska vlakna dodana su u mješavinu u količini od 0,50 % volumena, a u mješavinu je dodan i leteći pepeo kako bi se postigla gušća matrica betona. Tlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima kocke (50 x 50 x 50 mm) u skladu s normom ASTM C109. Zaključci su bili da je tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana tek 0,50 % veća u odnosu na čvrstoću nakon 14 dana. Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je na prizmatičnim uzorcima (30 x 30 x 100 mm) savijanjem u 3 točke, u skladu s normom ASTM C307. Vlačna čvrstoća uzorka s PP vlaknima veća je u odnosu na referentnu mješavinu za ? %

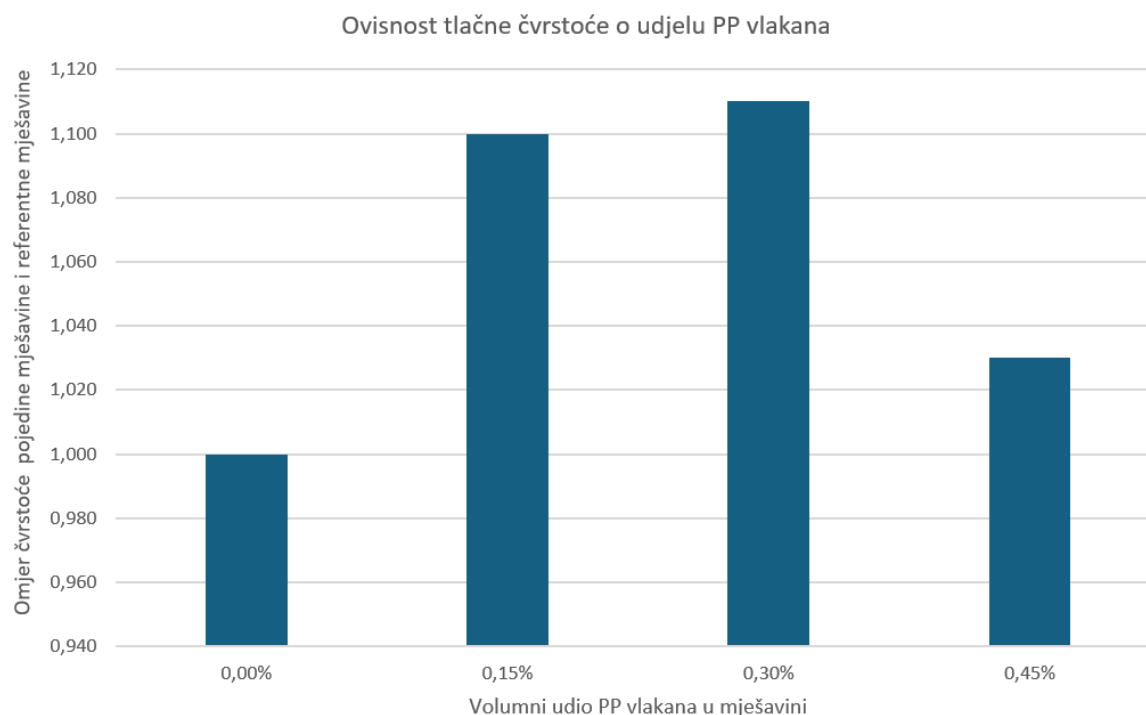
U radu [4] istraživana je tlačna čvrstoća betona s dodatkom (u odnosu na volumen) 0,60 % makro i 0,30 % mikro PP vlakana. Vlakna tipa A duljine su 50 mm, promjera 0,5 mm, dok su vlakna tipa B duljine 12 mm i promjera 0,018 mm. Nadalje, u betonskim mješavinama korišteni su superplastifikator te aerant kako bi se postigla bolja obradivost te povećala otpornost na cikličko smrzavanje i odmrzavanje. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM C39, a rezultati su pokazali da ni jedna vrsta vlakana nije imala značajan učinak na tlačnu čvrstoću nakon 28 dana. Štoviše, došlo je do malog pada tlačne čvrstoće u odnosu na obični beton. Zaključeno je kako porastom volumnog udjela vlakana dolazi do sve veće redukcije tlačne čvrstoće.

U radu [5] prikazan je utjecaj različitih vrsta vlakana na svojstva svježeg betona te mehanička i trajnosna svojstva. U istraživanju se analizirala vlačna čvrstoća mikroarmiranih betona s različitim vlaknima, među kojima su čelična, staklena i polietilenska vlakna. Ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće provedeno je sukladno normi BS EN 12390-5. Dodatak 0,50 % polietilenskih vlakana u mješavinu rezultirao je povećanjem vlačne čvrstoće betona za 9,00 % u odnosu na običan beton. Suprotno tome, zaključeno je kako dodatak polietilenskih, čeličnih ili staklenih vlakana ima minimalan ili nikakav utjecaj na tlačnu čvrstoću betona.

U studiji [6] istražen je utjecaj dodatka čeličnih i PP vlakana na mehanička i neka trajnosna svojstva na betone velikih čvrstoća (HSC). Polipropilenska vlakna duljine 12 mm korištena su u 3 različita volumenska udjela od 0,15 %, 0,30 %, 0,45 %. U betone s vlaknima dodano je 10,00 % silicijske prašine kao svojevrsne zamjene za cement. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem dimenzija 80 x 100 x 400 mm ispitivani su savijanjem u 4 točke. Tlačna čvrstoća betona ispitana je na uzorcima kocke brida 100 mm. Rezultati naznačuju kako su mehanička svojstva betona bila poboljšana pri svakom povećanju udjela PP vlakana. Točnije, udio PP vlakana od 0,15 %, 0,30 % te 0,45 % izazvao je redom porast vlačne čvrstoće od 6,00 %, 8,00 % i 12,00 % (Slika 4.). Slični postotci povećanja zabilježeni su pri ispitivanju tlačne čvrstoće gdje su udjeli vlakana od 0,15 %, 0,30 % te 0,45 % rezultirali porastom od redom 10,00 %, 11,00 % i 13,00 % (Slika 5.).



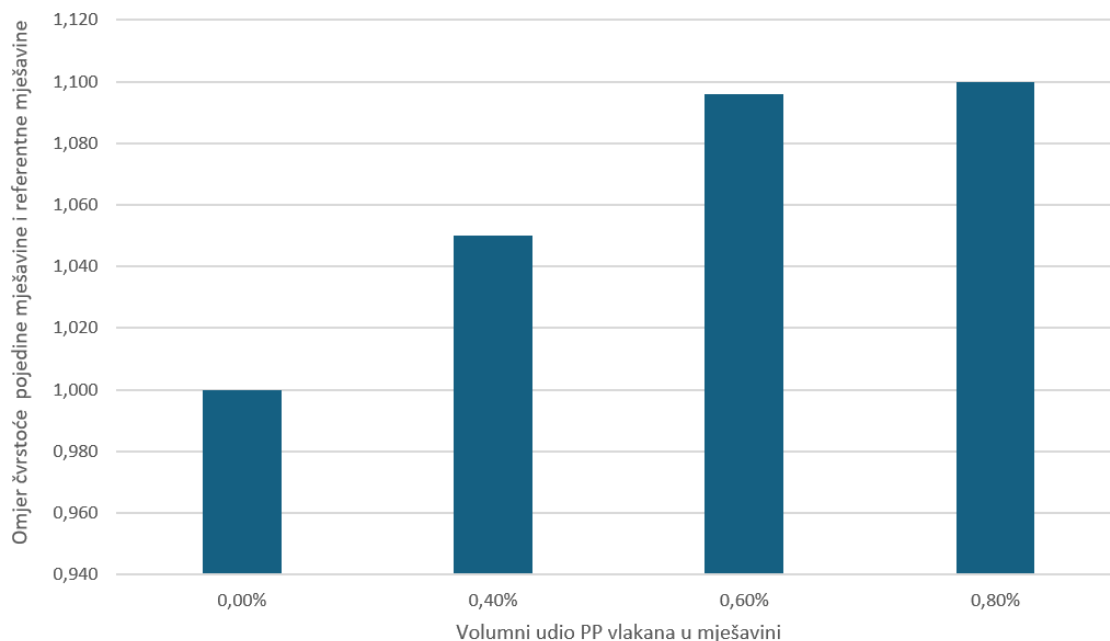
Slika 4: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [6]



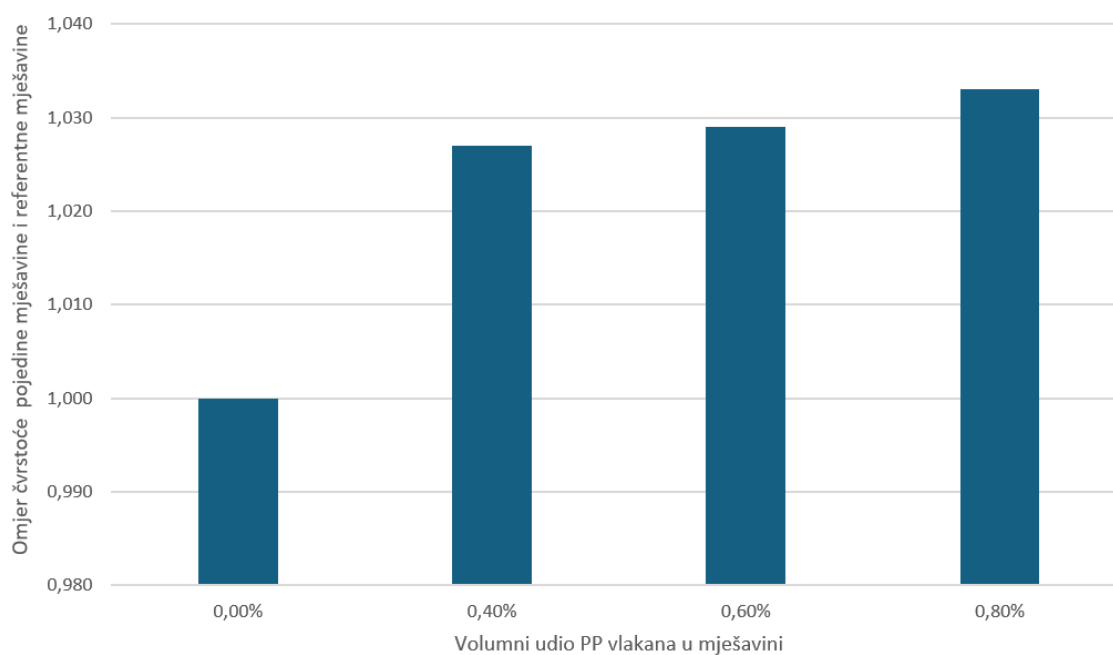
Slika 5: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [6]

Gencel et al. [7] istraživali su obradivost i mehanička svojstva samozbijajućeg betona ojačanog polipropilenskim vlaknima. Spravljene su 2 mješavine; prva s udjelom vlakana od 0,86 %, 1,71 %, 2,57 % te 3,43 % u odnosu na masu cementa od 350 kg m^{-3} . Druga mješavina sadržavala je 0,67 %, 1,33 %, 2,00 % te 2,67 % u odnosu na masu cementa od 450 kg m^{-3} . Zabilježen je porast tlačne čvrstoće za sve udjele vlakana, dok je najveća tlačna čvrstoća kod prve serije uzoraka dokumentirana u mješavini s 2,57 % vlakana, a kod druge serije uzoraka u mješavini s 2,00 % PP vlakana. Povećanje je iznosilo otprilike 10 %. Nadalje, vlačna čvrstoća je značajno (oko 130 %) povećana u odnosu na tlačnu čvrstoću referentnog betona, najveća izmjerena vlačna čvrstoća iznosila je $9,53 \text{ MPa}$ pri udjelu vlakana od 12 kg m^{-3} . Dodatno, ispitivanje modula elastičnosti pokazalo je kako je vrijednost E rasla blago za sve mješavine osim one s količinom vlakana od 3 kg m^{-3} – vrijednost E za tu mješavinu zanemarivo je manja od one običnog betona.

Behfarnia K. i Behravan A. [8] istraživali su utjecaj polipropilenskih vlakana velikih performansi (HPP) na tlačnu i vlačnu čvrstoću betona. Mješavine prikazane u radu sadržavale su 0,40 %, 0,60 % i 0,80 % volumena vlakana, što se može vidjeti na Slikama 6. i 7. Tlačna čvrstoća vrlo je blago rasla, a najveći rast čvrstoće od 3,30 % zabilježen je u uzorku s 0,80 % vlakana. Nadalje, u radu je zaključeno kako je za količinu vlakana od 0,80 % vlačna čvrstoća betona narasla za 10,00 %.

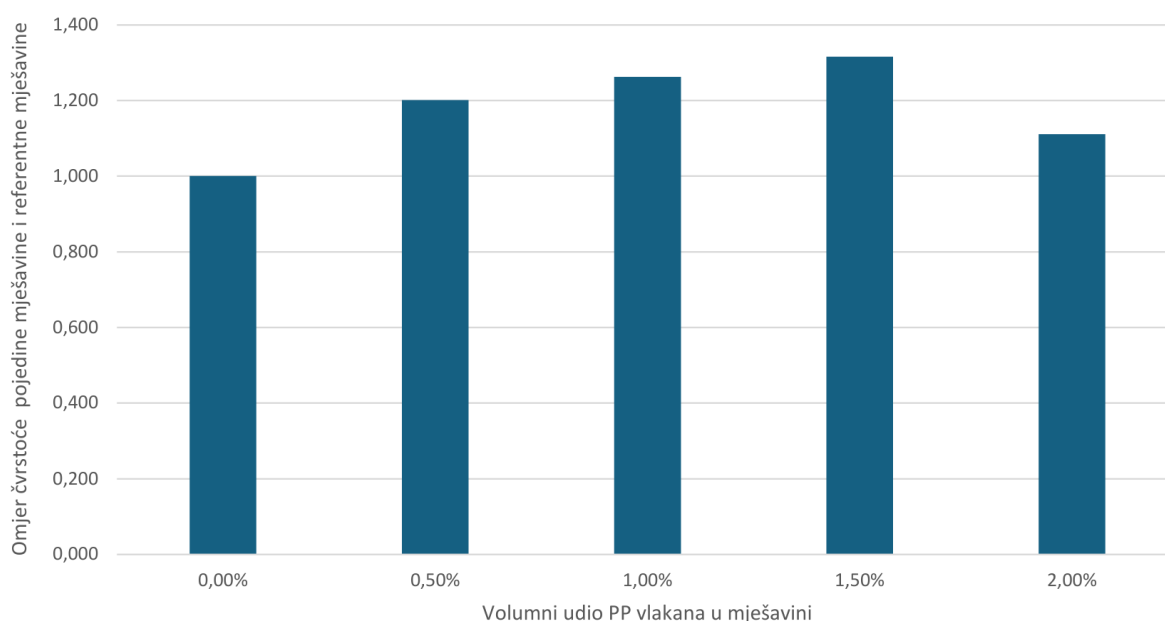


Slika 6: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [8]

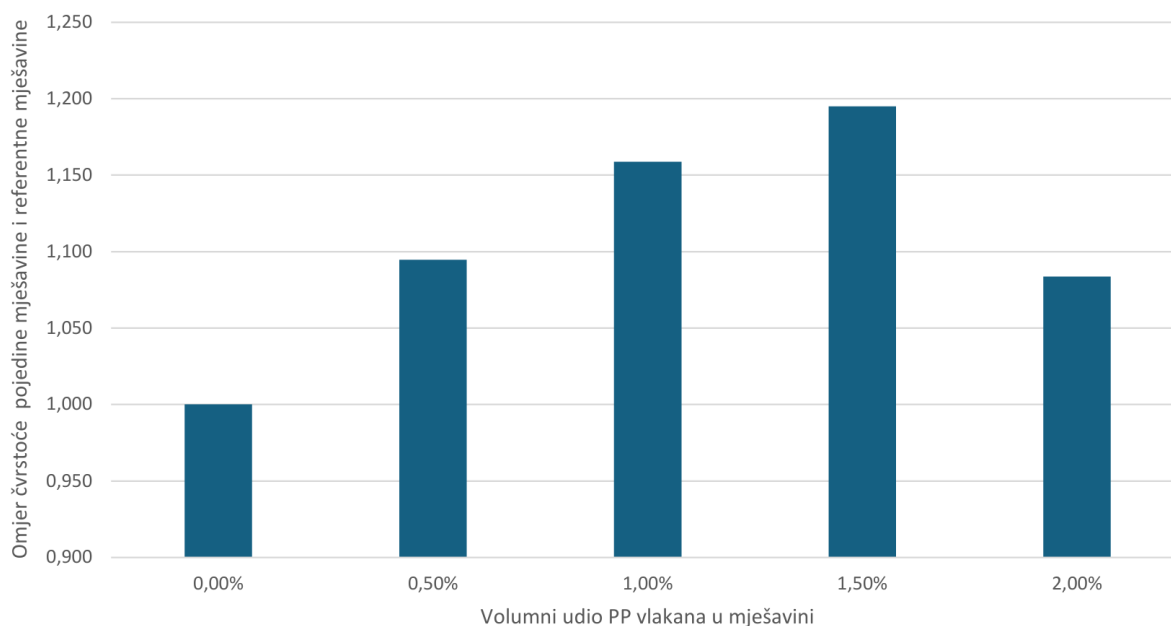


Slika 7: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [8]

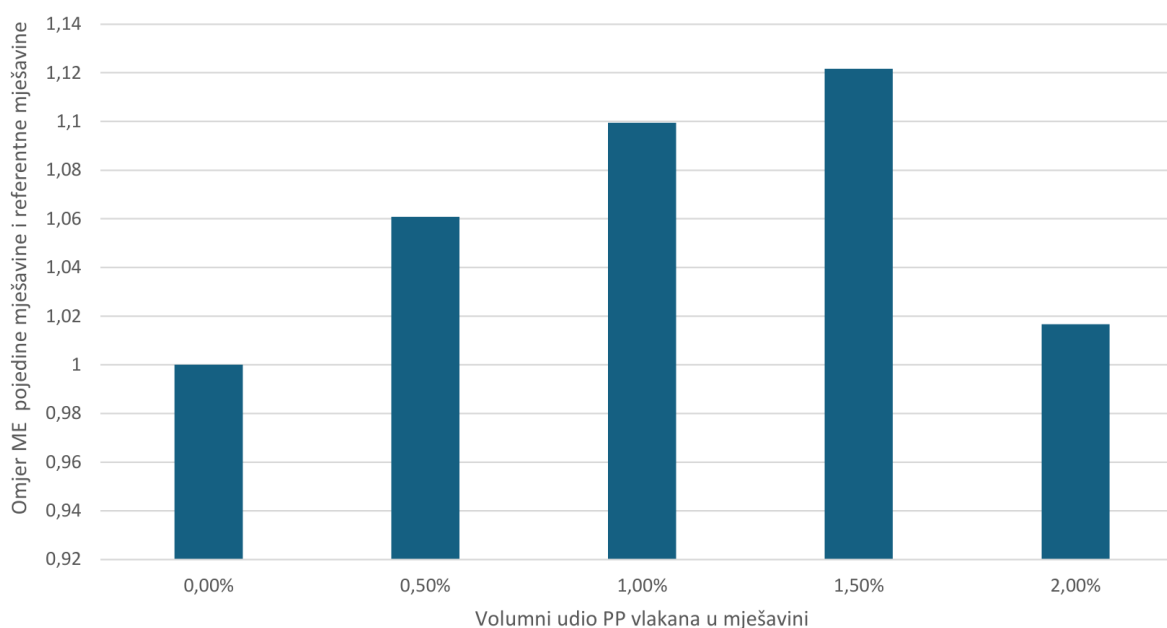
U radu [9] eksperimentalno su istraživani obradivost, vlačna čvrstoća savijanjem, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i modul elastičnosti na uzorcima s promjenjivim količinama PP vlakana (0,50 %, 1,00 %, 1,50 %, 2,00 % volumena betona). Ispitivanjem nakon 28 dana, demonstrirano je povećanje tlačne i vlačne čvrstoće te modula elastičnosti, kao što je prikazano na Slikama 8. – 10. Volumni udio vlakana od 1,50 % pokazao se optimalnim s obzirom da je zabilježen rast tlačne čvrstoće od 19,50 %, dok je vlačna čvrstoća narasla za 31,60 % u odnosu na tlačnu čvrstoću referentnog betona. Modul elastičnosti u svim je uzorcima s dodatkom vlakana ostvario veću vrijednost u odnosu na modul elastičnosti referentnog betona, dok je maksimalni porast dokumentiran pri udjelu vlakana 1,50 % te iznosi 12,20 %.



Slika 8: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9]



Slika 9: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9]

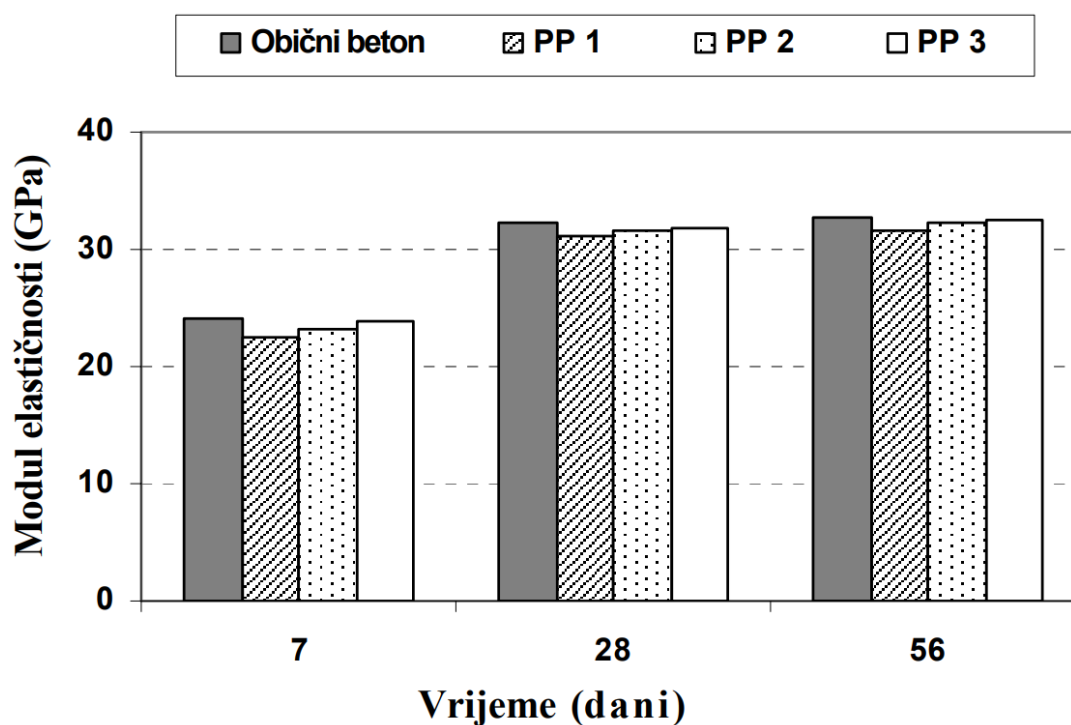


Slika 10: Odnos modula elastičnosti uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [9]

Ahmed T. H. i Daoud O. M. A [10] za cilj su imali pronaći optimalni udio polipropilenskih vlakana u betonu između 3 volumna udjela vlakana od 0,10 %, 0,30 % te 0,50 %. Svojstva koja su ispitana uključuju tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću savijanjem, vlačnu čvrstoću cijepanjem te modul elastičnosti. Korištena PP vlakna duljine su 12 mm. Tlačna čvrstoća ispitana je sukladno BS EN 12390, te je čvrstoća za sve uzorke s volumnim udjelom vlakana blago

smanjena u odnosu na tlačnu čvrstoću referentnog betona. Točnije, mješavina s 0,10 % PP vlakna ostvarila je 0,94 % manju čvrstoću, a mješavine s 0,30 % i 0,50 % ostvarile su tlačnu čvrstoću 1,17 % manju u odnosu na kontrolnu mješavinu. Vlačna čvrstoća ispitana je sukladno zahtjevima norme BS EN 12390-5:2000 na uzorcima 100 x 100 x 500 mm savijanjem u 3 točke. Dokumentiran je rast vlačne čvrstoće od 8,50 % pri udjelu vlakana od 0,50 %. Konačno, modul elastičnosti svih uzoraka s vlaknima ostvario je vrijednosti od 2,00 % do 9,00 % manje u odnosu na modul elastičnosti kontrolne mješavine.

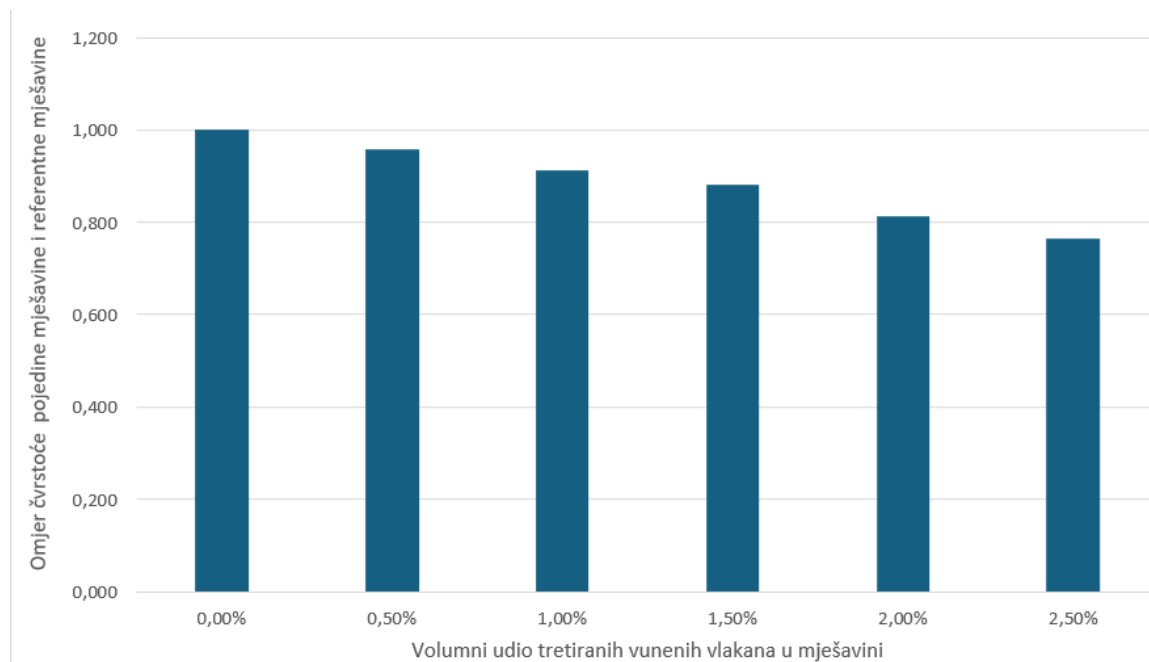
U radu [11] istražen je utjecaj polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva betona. Ispitana su 3 tipa mješavina – s vlaknima duljine 6 mm (oznaka "PP 1"), 12 mm (oznaka "PP 2") i 19 mm (oznaka "PP 3"). Sve 3 vrste mješavina sadržavale su 2 kg (0,60 %) vlakana pojedine vrste vlakana te 350 kg cementa. Tlačna čvrstoća ispitana je sukladno normi BS 1881, a pokazano je kako tlačna čvrstoća betona s vlaknima ima nižu vrijednost od referentnog betona za sve 3 duljine vlakana. Kod uzorka betona s vlaknima duljine 6 mm, najveći pad tlačne čvrstoće iznosio je 10,00 %, dok je kod uzorka s vlaknima duljine 19 mm tlačna čvrstoća bila gotovo ekvivalentna tlačnoj čvrstoći referentnog betona. Vlačna čvrstoća analizirana je sukladno normi ASTM C293 pri starosti od 28 dana. Rezultati ukazuju kako je vlačna čvrstoća uzoraka s vlaknima veća od one referentnog betona u sva 3 slučaja. Također, primjetno je da rast vlačne čvrstoće prati povećanje duljine vlakana. Vlačna čvrstoća betonske mješavine s vlaknima duljine 19 mm 10,00 % je veća u odnosu na referentnu betonsku mješavinu. Modul elastičnosti uzoraka ispitan je prema zahtjevima u ASTM C469, te je iz Slike 11. razvidno kako je uporaba vlakana sve 3 duljine umanjila modul elastičnosti. U radu je zaključeno kako su PP vlakna korisna pri kontroliranju malenih pukotina i skupljanja betona.



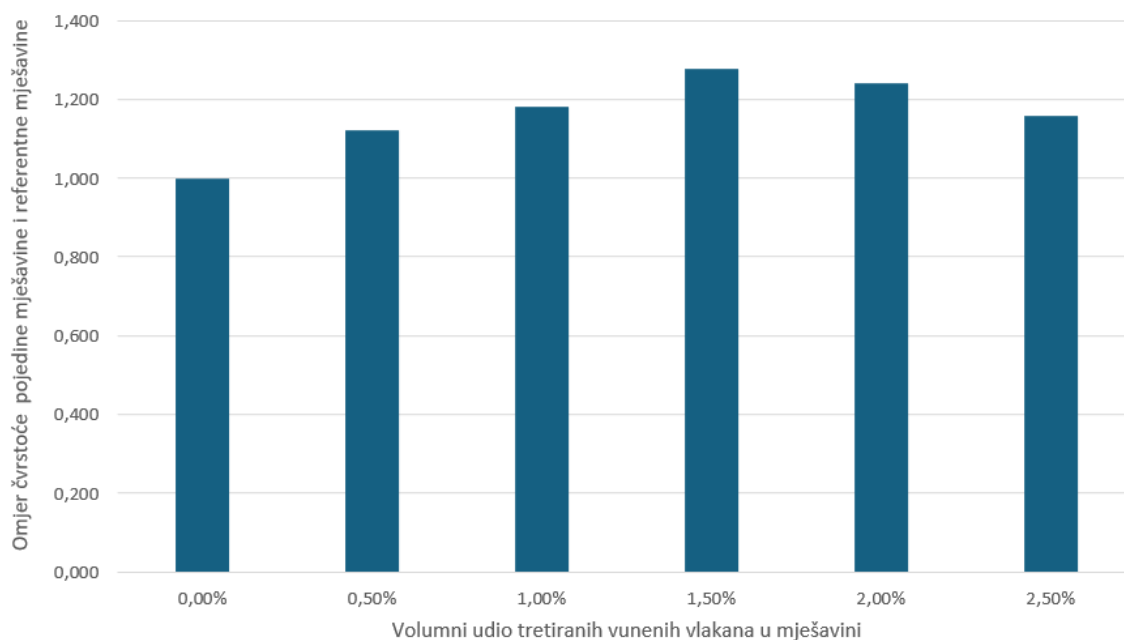
Slika 11: Odnos modula elastičnosti o vremenu za pojedinu mješavinu [11]

Alyousef R. et. al. [12] eksperimentalno su istraživali utjecaj ovčjih vunenih vlakana na mehanička svojstva i obradivost betona. Korištene su dvije vrste vlakana – konvencionalna prirodna vunena vlakna te vlakna koja su tretirana potapanjem u slanoj vodi prethodno ugradnji. Vlakna su dodavana u količini od 0,50 %, 1,00 %, 1,50 %, 2,00 % te 2,50 % volumena mješavine betona. Nakon 90 dana, dokumentiran je pad tlačne čvrstoće kod svih uzoraka s dodanim vlaknima. U odnosu na onu referentnog betona, tlačna čvrstoća je smanjena redom 7,50 %, 13,40 %, 17,00 %, 27,60 %, i 29,80 % kod netretiranih vlakana te 4,10 %, 8,80 %, 11,90 %, 18,70 % i 23,50 % kod uzoraka čija se vlakna tretirana u slanoj vodi (Slika 12.). S druge strane, razvidno je kako je dodatak vunenih vlakana utjecao na porast vlačne čvrstoće za sve udjele vlakana (Slika 13.). U seriji uzoraka s konvencionalnim prirodnim vlaknima, najveća vlačna čvrstoća zabilježena je kod uzorka s 1,50 % vlakana te je iznosila 5,1 MPa, dok je kod tretiranih vlakana najveća čvrstoća zabilježena također kod uzorka s 1,50 % vlakana, vrijednosti 5,3 MPa. Kako je vlačna čvrstoća referentnog betona iznosila 4,15 MPa, primjetno je da je porast iznosio 22,90 % kod betona s prirodnim vlaknima te 27,70 % kod onoga s tretiranim vlaknima. U radu je primijećeno kako je povećavanjem udjela vunenih vlakana rasla i vlačna čvrstoća, osim pri udjelu 2,50 % gdje rast nije nastavljen. Ovo može biti povezano s

neadekvatnom disperzijom vlakana unutar betonske matrice, čime je uzrokovano nakupljanje vlakana u matrici.



Slika 12: Odnos tlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [12]



Slika 13: Odnos vlačne čvrstoće uzoraka s dodatkom vlakana i referentnog uzorka [12]

Sukladno istaknutim podacima iz znanstvene literature, može se zaključiti kako je kod svih provedenih ispitivanja dodatak polipropilenskih vlakana izazvao povećanje vlačne čvrstoće savijanjem. U tom smislu, u ovome se radu ispitivanjem vlačne čvrstoće očekuju analogni rezultati, to jest da će doći do povećanja vlačne čvrstoće neovisno o volumnom udjelu dodanih vlakana. Nadalje, očekivani utjecaj vlakana na tlačnu čvrstoću kompleksnije je procijeniti obzirom da je u 5 studija ([2], [6], [7], [8], [9]) zabilježen rast čvrstoće, u 2 studije ([4], [5]) tlačna čvrstoća ostala je nepromijenjena, dok je u 2 rada ([10], [11]) dokumentirano kako PP vlakna umanjuju tlačnu čvrstoću. U studiji [1] tlačna čvrstoća je rasla pri volumnom udjelu vlakana do 1,00 %, dok je pala kod volumnog udjela 1,50 %. Slijedom navedenog, očekivano je da će polipropilenska vlakna povećati tlačnu čvrstoću ili na nju neće imati utjecaja.

3. Eksperimentalna ispitivanja

Cilj ovog rada je analizirati utjecaj vunelih i polimernih vlakana na mehanička svojstva betona. Za potrebe analize provedena su eksperimentalna ispitivanja, projektirano je ukupno 5 mješavina betona s različitim volumnim udjelom vlakana:

- beton s dodatkom polipropilenskih vlakana od 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % i 2,00 % volumena betona
- beton s dodatkom vunelih vlakana od 0,50 % volumena betona.

Ukupno je pripremljeno 15 kocki brida 150 mm te 15 prizmi dimenzija 100 x 100 x 400 mm, odnosno za potrebe pripreme uzoraka za ispitivanja u ovom radu utrošeno je 0,11 m³ betona. Receptura svih 5 mješavina gotovo je istovjetna te, izuzev vlakana, jedinu razliku čini maseni udio superplastifikatora koji je dodavan zbog povećanja obradivosti, no čiji je utjecaj na mehanička svojstva betona zanemariv.

Granulometrijski sastav agregata za sve mješavine jednak je te na taj način jedina "promjenjiva varijabla" u mješavinama ostaje količina i vrsta vlakana. Posljedično, rezultati ispitivanja mogu se dovesti u vezu s vlaknima, eliminirajući pritom utjecaj različitosti drugih komponenti mješavine. Laboratorijska ispitivanja provedena su u laboratoriju za materijale Građevinskoga fakulteta u Rijeci.

3.1. Projektiranje mješavina betona

Projektiranje smjese betona sastoji se od odabira komponenti betona te određivanja njihova relativnog omjera kako bi se na što ekonomičniji način proizveo beton zahtijevane obradivosti, čvrstoće i trajnosti. Postupak projektiranja temeljen je na postizanju zahtijevane tlačne čvrstoće betona C25/30, razreda slijeganja S4 te razreda izloženosti XC3 prema HRN EN 206-1:2006. Projektirani beton konstrukcijske je namjene – za elemente poput temelja, zidova, ploča i stupova.

Komponente koje su uporabljene za izradu betonskih smjesa su:

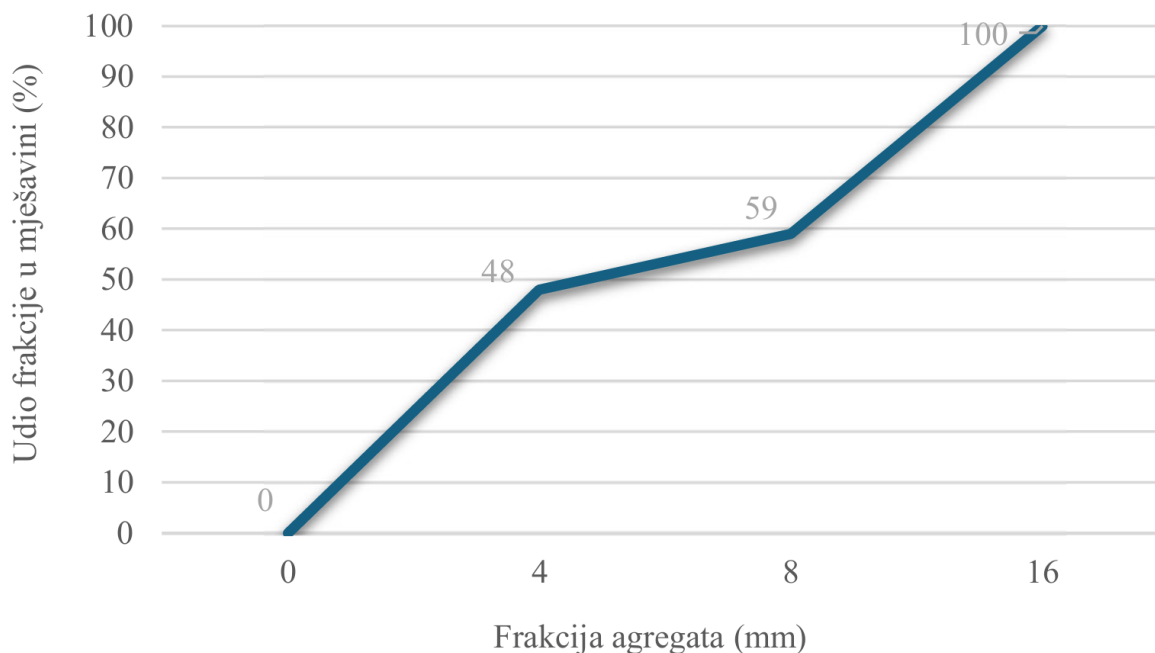
- cement CEM II/B-LL 42,5 N
- superplastifikator

- polipropilenska vlakna duljine 18 mm
- pijesak (0 /4 mm)
- drobljenac (4/8 mm, 8/16 mm)
- tretirana ovčja vunena vlakna
- voda

Vodocementni omjer u svim mješavinama iznosi 0,45 te je definiran sukladno uvjetima čvrstoće i konzistencije. Nepromjenjivost vodocementnog omjera u mješavinama vrlo je važna s obzirom da su količina i kvaliteta vode bitne za čvrstoću betona [13], a upravo je ona predmet ispitivanja. Volumni udio frakcija agregata u svim mješavinama u potpunosti je ekvivalentan te ga čine frakcije u sljedećim udjelima:

- 48 % frakcije 0 – 4 mm
- 11% frakcije 4 – 8 mm
- 41% frakcije 8 – 16 mm

Granulometrijska krivulja prikazana je na Slici 14., dok je sastav pojedine mješavine betona vidljiv u Tablici 1.



Slika 14: Granulometrijska krivulja agregata

Tablica 1: Masa sastojaka za m^3 betona

Komponente mješavine	Referentni beton	Polipropilenska vlakna				Vunena vlakna 0,5 %
		PP 0,5 %	PP 1,0 %	PP 1,5 %	PP 2,0 %	
cement (kg/m^3)	415	415	414,8	415	415	415
voda (kg/m^3)	185	185	185	185	185	185
superplastifikator (%)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,75	0,75
0/4 mm (kg/m^3)	832	826	819	813	806	825
4/8 mm (kg/m^3)	193	191	190	188	187	191
8/16 mm (kg/m^3)	716	711	705	700	693	710
PP vlakna (kg/m^3)	0	5	9	14	18	0
vlakna vune (kg/m^3)	0	0	0	0	0	1
vodocementni omjer	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

3.2. Cement

Cement je hidraulično vezivo, praškasti materijal koji pomiješan s vodom, putem kemijskih reakcija prelazi u cementnu pastu te očvrsnuli cementni kamen. Hidratacija cementa je kemijska reakcija cementa i vode pri čemu nastaju amorfnu masa (C-S-H gel) te veliki heksagonalni kristali kalcijevog hidroksida. Kako se portlandski cement sastoji od različitih minerala, tijekom hidratacije se simultano odvija nekoliko reakcija s obzirom da minerali ne hidratiziraju jednakom brzinom. Aluminati hidratiziraju puno brže od silikata, stoga se gubitak obradivosti i vezanje u ranoj fazi u značajnoj mjeri pripisuje reakcijama koje uključuju aluminate. Iako silikati hidratiziraju kasnije od aluminata, prvotno dolazi do hidratacije alita (C_3S), koji počinje hidratizirati unutar 1 sata od trenutka dodavanja vode cementu. Belit (C_2S) reagira značajno sporije te je zaslužan za kasniju čvrstoću cementnog kamena. Stehiometrijskim proračunom [13] pokazano je kako hidratacijom alita nastaje 61 % $C_3S_2H_3$ i 39 % kalcijevog hidroksida, dok hidratacija belita rezultira nastankom 82 % $C_3S_2H_3$ i 18 % kalcijevog hidroksida. Normirana čvrstoća cementa je tlačna čvrstoća ispitana prema normi HRN EN 196-1, osnovno svojstvo cementa prema kojemu se utvrđuje razred čvrstoće, a može biti 22,5, 32,5, 42,5 ili 52,5 MPa. Izbor cementa provodi se sukladno zahtijevanim karakteristikama čvrstoće, brzine rasta čvrstoće, topline hidratacije [13]. Cement korišten u projektiranju mješavina betona bio je CEM II/B-LL 42,5 N.

3.3. Voda

Voda je temeljna komponenta za pripremu betona, čiji je utjecaj vidljiv u različitim fazama izrade i primjene betona. Količina i kvaliteta vode bitna je za karakteristike betona u svježem i očvrslom stanju, kao što su obradivost, udio pora, vrijeme vezanja, čvrstoća i trajnost. Povećanje količine vode u sastavu betona može rezultirati segregacijom i izdvajanjem vode te smanjenjem čvrstoće betona. Potrebno je osigurati dovoljnu količinu vode koja će se adsorbirati na površinu čvrstih čestica te ispuniti prostor između čestica, a dodatna voda potrebna je za podmazivanje čestica odvajajući ih filmom vode. Beton se većinom proizvodi upotrebom pitke vode [13]. U pripremljenim mješavinama korištena je pitka voda iz gradskog vodovoda.

3.4. Kemijski dodaci

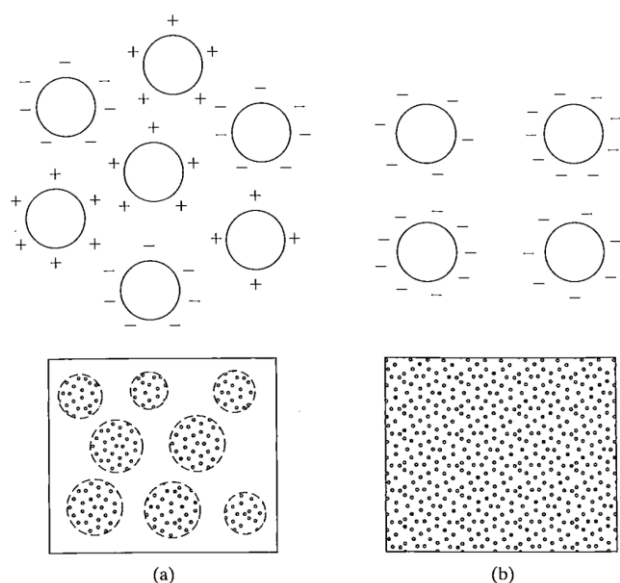
Zadnjih su godina kemijski dodaci postali neizostavni dio betona s obzirom da razvoj složenih inženjerskih rješenja zahtijeva i sve bolja svojstva betona. Poznato je [13] kako kemijski dodaci modificiraju svojstva svježeg ili očvrslulog betona, dok je njihov udio u betonskoj mješavini vrlo malen u odnosu na masu cementa. Uporaba kemijskih dodataka naglo je porasla s početkom ovog stoljeća. Danas je na tržištu prisutan veliki broj kemijskih dodatka koji se kategoriziraju po načinu djelovanja, a ne kemijskom sastavu. Kemijski dodaci mogu se podijeliti u četiri glavne klase: plastifikatori, aeranti, ubrzivači vezanja te usporivači vezanja. Superplastifikator korišten u betonskoj mješavini prikazan je na Slici 15.



Slika 15: Superplastifikator [14]

3.5. Superplastifikator

Superplastifikatorima nazivamo kemijske dodatke koji su bazirani na sulfoniziranom melamin formaldehidu, sulfoniziranom naftalen formaldehidu, pročišćenom sulfoniziranom ligninu ili polikarboksilatu. Upotrebljavaju se za proizvodnju betona visoke fluidnosti koji se lako ugrađuju ili zbijaju. Prilikom dodatka superplastifikatora betonskoj smjesi, povećava se obradivost cementne paste, stoga se može smanjiti količina vode u smjesi uz zadržavanje iste konzistencije betona. Posljedično, smanjuje se vodocementni omjer što dovodi do povećanja čvrstoće, smanjenja propusnosti i generalno poboljšanja svojstava trajnosti betona. Nadalje, superplastifikatori su negativno nabijene organske molekule koje se adsorbiraju prvenstveno na sučeljku čvrstih čestica i vode. Čvrste čestice karakteriziraju rezidualni naboji, koji mogu biti pozitivni, negativni ili oboje. U cementnoj pasti, suprotni naboji susjednih čestica cementa mogu izazvati elektrostatsku privlačnost, vežući značajnu količinu vode u tim aglomeratima, uzrokujući time flokulantni sustav čestica (slika 16.a). Time dolazi do adsorbiranja vode u čvrste čestice te dolazi do manjka vode u smjesi i pada obradivosti. S druge strane, molekule superplastifikatora površinski su aktivne tvari koje neutraliziraju površinske naboje, dajući česticama cementa negativni elektrostatski naboj (slika 16.b). Kada se čestice cementa međusobno odbijaju, ostaju potpuno dispergirane u pasti te dolazi do povećanja fluidnosti svježeg betona. [15]



Slika 16: Shematski prikaz djelovanja plastifikatora: (a) flokulantni sustav čestica; (b) dispergirane čestice [15]

Važan sekundarni učinak dodavanja kemijskih dodataka u beton je stvaranje djelomične barijere za vodu putem adsorbiranih molekula kemijskih dodataka. Takav proces može produžiti period relativne neaktivnosti cementa i smanjiti brzinu hidratacije alita u ranom periodu. Shodno tome, superplastifikatorima se može pripisati i učinak retardera za vezanje cementne paste i rani prirast čvrstoće. Mehanička svojstva i trajnost očvrstnalog betona ostaju nepromijenjena i slična su onima koje očekujemo kod običnog betona istog vodocementnog omjera, uz dva izuzetka. Prvotno, može se javiti zanemarivi rast čvrstoće nakon 28 dana, koji se pripisuje disperziji čestica cementa, uzrokujući na taj način veću kontaktnu površinu između zrnaca cementa i vode. Dodatno, zbog smanjenja površinske napetosti vode, plastifikatori uvlače u beton oko 1 - 2% zraka, što doprinosi smanjenju gustoće i čvrstoće betona.

Kao što je ranije navedeno, za potrebe ovog istraživanja korišten je superplastifikator. Isti je dio nove generacije superplastifikatora za beton, zasnovan je na bazi polikarboksilatnih eterskih polimera čime značajno poboljšava disperziju cementa. Mehanizam eterskog polimera s dugim bočnim lancima omogućuje protočni beton s uvelike smanjenom potrebom za vodom. [16] Prilikom spravljanja mješavine, prvotno je superplastifikator dodan u vodu (Slika 17.), nakon čega je ta mješavina dodana betonskoj mješavini.



Slika 17: Dodatak superplastifikatora u vodu [14]

3.6. Agregat

Agregat najčešće čini 60 – 80 % volumena betona te su najvažnije karakteristike za uporabu u betonu granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna, poroznost, gustoća, apsorpcija i vlažnost. [13] Agregat je granulirani materijal dobiven iz prirodnih izvora, drobljeni ili riječni, a može se proizvoditi i industrijskim procesima. [15] Poželjno je u mješavini betona upotrijebiti što više agregata čija će zrna biti povezana s očvrnulom cementnom pastom. Važna je kontinuirana raspodjela veličina zrna, od sitnog pijeska do krupnog šljunka, kako bi udio šupljina u betonu bio što manji. Nadalje, agregat je inertna ispuna betona – ne bubri, ne skuplja se i ne hidratizira. Temeljna karakteristika koju agregat omogućava betonu je dimenzijska stabilnost, iako se može reći kako u većini slučajeva čvrstoća agregata nema utjecaja na čvrstoću betona. [15] Nema specifične mineraloške vrste stijene koja bi trebala zadovoljiti "uvjete" potrebne da se koristi kao agregat u betonu, s obzirom da se od većine vrsta stijena može proizvesti prihvatljivi agregat koji zadovoljava uvjete norme HRN EN 12620:2008. Iznimka su neke vrste vapnenaca i pješčenjaka koje mogu imati čvrstoću manju od 100 MPa – stoga su neprikladne za uporabu u betonima velikih čvrstoća. [13] Također, kod betona niskog koeficijenta toplinske provodljivosti ili betona velike gustoće [15], može biti zahtijevan specifičan mineraloško – petrografski sastav agregata. U ovome istraživanju korišten je Holcim Majstor pijesak 0 – 4 mm te Holcim Majstor drobljenac 4 – 8 mm i 8 – 16 mm. Prema Certifikatu o sukladnosti proizvođača dobivenom pri dostavi materijala u laboratorij, tvornička proizvodnja navedenih frakcija agregata ispunjava sve zahtjeve tehničke specifikacije EN 12620:2002+A1:2008.

3.7. Vlakna

Korištena polipropilenska vlakna su duljine 18 mm (Slika 18.). Karakterizira ih bijela boja, okrugli poprečni presjek i vlačna čvrstoća 40 cN/tex. Uz povećavanje vlačne čvrstoće betona, vlakna povoljno djeluju na beton smanjenjem poroznosti te sprječavanjem formiranja mikropukotina za vrijeme sušenja. [17]



Slika 18: PP vlakna duljine 18 mm

Također, korištena su i prirodna ovčja vunena vlakna koja su prošla nekoliko procesa čišćenja prethodno ugradnji u beton. Prvotno su s vlakana uklonjene razne nečistoće, nakon čega su vlakna potopljena u moru na 28 dana. Time je postignuta veća hrapavost vunениh vlakana i posljedično bolja prionjivost za beton. Nakon perioda u moru, vuna (Slika 19.) je isprana vodom te narezana na duljinu gotovo jednaku polipropilenskim vlaknima kako bi rezultati bili što mjerodavniji.



Slika 19: Prirodna vunena vlakna nakon tretiranja i čišćenja [18]

4. Ispitivanje mehaničkih svojstava betona

Nakon 28 dana sazrijevanja i njegovanja u vodi, ispitani su uzorci betona. Očvrslome betonu ispitana su svojstva tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem u tri točke te modula elastičnosti.

4.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća osnovno je svojstvo materijala da se odupre osnom tlačnom opterećenju. Dosezanjem maksimalne tlačne sile koju materijal može podnijeti, dolazi do sloma materijala [19]. Tlačna čvrstoća betona ekvivalentna je omjeru maksimalne tlačne sile pri kojoj je zabilježen slom i ploštine nazivnog poprečnog presjeka kocke. Iako se smatra [13] da više od 50 čimbenika može prouzročiti varijabilnost čvrstoće betona, ipak se mogu izdvojiti faktori koji najčešće imaju utjecaj na varijabilnost čvrstoće betona. Glavni parametri koji utječu na varijabilnost čvrstoće betona su [13]:

- veličina i oblik uzorka
- vrsta i brzina nanošenja opterećenja
- utjecaj cementne matrice
- utjecaj agregata
- utjecaj njege
- utjecaj vibriranja

Smjernice za ispitivanje tlačne čvrstoće obuhvaćene su normom HRN EN 12390 – 3. Oblik i dimenzije uzorka koje predviđa norma HRN EN 12390 – 1 su kocke brida 150 mm ili valjci promjera 150 mm i visine 300 mm. U ovome radu je ispitivanje provedeno na uzorcima dimenzija 150 x 150 x 150 mm koji su njegovani sukladno normi HRN EN 12390 – 2, pri starosti 28 dana. Ispitano je ukupno 14 uzoraka – po 3 od svake mješavine s polipropilenskim vlaknima (0,50 %, 1,00 %, 1,50 % i 2,00 %) te 2 uzorka betona s dodatkom 0,5 % vunenih vlakana. Ispitivanje je provedeno uređajem za ispitivanjem tlačne čvrstoće kapaciteta 3000 kN te maksimalnog tlaka 650 bara. Prema tehničkome listu proizvođača, uređaj (Slika 20.) zadovoljava uvjete stabilnosti sukladno normi HRN EN 12390 – 2, dok njegove sastavne dijelove čine:

- konstrukcija s četiri zavarena čelična stupa
- gornja čelična ploča sa sferičnim osloncem
- donja čelična ploča
- prednja vrata
- stražnja prozirna pregrada za krhotine
- indikator pomaka pistona (pomičnog klipa)



Slika 20: Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće

Nakon 28 dana, uzorci su izvađeni iz vode te su osušeni i izvagani, te je napravljena izmjera bridova uzoraka. Uzorci su postavljeni na donju čeličnu ploču promjera 300 mm te su orijentirani na način da opterećenje djeluje okomito na smjer betoniranja (Slika 21.). Prethodno umetanju uzoraka u uređaj, donja ploča je detaljno očišćena kako bi uzorak bio pozicioniran u potpunosti ravno kako ne bi došlo do neravnomjernog opterećivanja uzorka. Uzorci su postavljeni u sredinu ploče, s točnošću od 1 %, kako bi se postiglo ujednačeno nanošenje opterećenja [19]. Nakon ispravnog postavljanja, zatvorena su prednja vrata, kao i stražnja zaštita za krhotine te pokrenut proces nanošenja opterećenja na uzorak.



Slika 21: Uzorak pozicioniran u uređaju

4.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće

Vlačna čvrstoća je otpor kojim se materijal suprotstavlja odvajanju na jedinicu ploštine [13], odnosno maksimalno naprezanje kojem se materijal može oduprijeti pri djelovanju vlačnih sila [19]. Na uzorcima od betona moguće ju je ispitivati direktnim vlakom, savijanjem ili cijepanjem. Vlačna čvrstoća direktnim vlakom provodi se pomoću uzoraka suženih u sredini kako bi se u tome dijelu presjeka izazvala koncentracija naprezanja i posljedično slom. S obzirom na kompliciranost prihvata uzorka pri toj metodi, kao i složenost pri izvedbi uzoraka, takav se način ispitivanja rijetko primjenjuje na uzorcima od betona. Nadalje, ispitivanje vlaka cijepanjem može se provoditi na kockama ili valjcima, na način da se na donjoj i gornjoj

stranici uzorka zabilježe dvije linije uzduž kojih se nanosi opterećenje (linijski). Opterećenje koje se nanosi je tlačno, uslijed čega se u smjeru okomitom na smjer nanošenja opterećenja pojavljuju vlačna opterećenja. Konačno, vlačna čvrstoća može se ispitivati savijanjem, metodom koja je korištena u eksperimentalnome dijelu ovoga rada. U normi HRN EN 12390 – 5 sadržani su naputci za ispitivanje, dok su uzorci oblika prizme izrađeni u skladu s normom HRN EN 12390 – 1. Uzorci izvedeni u kalupima trebaju zadovoljiti uvjete propisane u HRN EN 12350 – 1 i HRN EN 12390 – 2 [19]. Samo ispitivanje provedeno je u uređaju za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem (Slika 22.) koji može generirati maksimalnu silu iznosa do 300 kN, dok mu je ukupni hod pistona 110 mm. Povrh toga, razmak donjih valjaka (oslonaca uzorka) može se prilagoditi u rasponu 60 – 1500 mm, dok je razmak gornjih valjaka (mjesto opterećivanja) moguće odabrati od 60 do 500 mm. Sukladno tehničkom listu proizvođača, komponente uređaja su:

- čvrsti čelični okvir
- RAM (dio hidrauličkog sustava za nanos opterećenja)
- gornji valjci
- donji valjci
- kontrolna ploča
- mobilni prednji stup s opcijom fiksiranja



Slika 22: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje je provedeno na uzorcima dimenzija 100 x 100 x 400 mm, koji zadovoljavaju sve primjenjive zahtjeve prema HRN EN 12390 – 1. Prizme su postavljene na donje valjke tako da raspon oslonaca iznosi 300 mm, dok gornji valjak opterećuje prizmu točno u sredini, to jest na udaljenosti 150 mm od oba oslonca. Prethodno ispitivanju, uzorci su pregledani, mjereni i vagani, a zapažene karakteristike i geometrijske imperfekcije prikazane su u Tablici 3. Na uzorcima je označen smjer ugradnje betona, te su ispitivani tako da je smjer opterećivanja okomit na smjer ugradnje betona. Također, presjek na sredini prizme je oslabljen zarezom visine 25 mm kako bi se izazvalo stvaranje pukotina na tom dijelu (Slika 23.).

Tablica 3: Geometrijske karakteristike prizmi

Vlakna	Oznaka uzorka	Masa m (kg)	Duljina l (mm)	Širina d ₁ (mm)	Visina d ₂ (mm)	Volumen V (m ³)	Gustoća ρ (kg/m ³)
PP 0,5 %	P1	9,45	402	102	100	0,0041	2306,96
	P2	9,69	402	104	100	0,0042	2323,83
	P3	9,60	401	101	100	0,0041	2364,62
PP 1,0 %	P4	9,26	400	103	100	0,0041	2245,30
	P5	9,05	401	99	100	0,0040	2286,65
	P6	9,35	400	101	100	0,0040	2316,63
VUNA 0,5 %	V1	9,90	400	102	100	0,0041	2440,86
	V2	9,73	395	101	101	0,0040	2431,58
	V3	9,61	390	101	101	0,0040	2425,15



Slika 23: Oslabljenje presjeka prizme izvedbom zareza visine 25 mm

Opterećenje je na uzorke nanošeno pomakom pistona prema dolje točno zadanom brzinom pomaka – brzina je prilagođavana na način da trajanje ispitivanja pojedinog uzorka nije dulje od 5 minuta, stoga se brzina ispitivanja kreće u rasponu 20 do 100 $\mu\text{m}/\text{min}$. Dodatna provjera ispitivanja provedena je kontrolom pomaka tako što je na uzorak montirana čelična konstrukcija pomoću koje su pričvršćeni LVDT uređaji za mjerenje pomaka (Slika 24.).



Slika 24: Mjerni uređaj pričvršćen na uzorku

Linearni varijabilni diferencijalni transformatori (model LVDT 50 – C1601/8) postavljeni su na obje stranice prizme. Prema tehničkom listu proizvođača dostupnom u laboratoriju, mjerni uređaj ima sljedeće specifikacije:

- ukupni hod ± 50 mm
- ulazni napon 10 V izravne struje
- osjetljivost 54,35 mV/V/mm
- nelinearnost: 0,05 %

Nelinearnost mjernog uređaja kazuje odstupanje od potpuno linearne veze između ulazne veličine (mjerenog pomaka) i izlazne veličine, odnosno električnog signala koji sam uređaj generira. Iako bi izlazni signal u teoriji trebao biti apsolutno proporcionalan pomaku jezgre unutar njenog hoda, zbog raznih čimbenika (greške u proizvodnji, temperatura, nesavršenosti) može doći do malog odstupanja.

4.3. Ispitivanje modula elastičnosti

Za ispitivanje modula elastičnosti prvotno je bilo potrebno ispitati tlačnu čvrstoću uzoraka kako bi se dobila vrijednost predopterećenja σ_b koja iznosi 10 do 15 % tlačne čvrstoće. U Tablici 2. prikazane su prosječne tlačne čvrstoće betona s različitim udjelom vlakana te odgovarajuća vrijednost naprezanja σ_b sukladno normi HRN EN 12390 – 13:2013. Nadalje, modul elastičnosti ispitan je na uzorcima kocke brida 150 mm u uređaju koji je prikladan za kocke veličine brida do 200 mm. Na svaki uzorak montirana su dva elektronska ekstenzometra,. Ekstenzometri su visinski postavljeni na način da je udaljenost do oba kraja uzorka ekvivalentna. Po širini, njihove su pozicije kontrolirane tako što je na gornjoj stranici betonskog uzorka iscrtana os simetrije te su zatim ekstenzometri postavljeni tako da se njihovo središte podudara s tom osi (Slika 25.).

Tablica 2: Vrijednosti opterećenja za modul elastičnosti

VLAKNA	f_c	\bar{f}_c	σ_a	σ_b			σ_p
				min ($0,10 \cdot f_c$)	max ($0,15 \cdot f_c$)	odabran	
PP 0,5 %	45,36	46,72	15,57	4,67	7,01	5,50	2,00
	48,26						
	46,54						
PP 1,0 %	44,78	42,94	14,31	4,29	6,44	5,50	2,00
	42,85						
	41,18						
VUNA 0,5 %	51,30	52,50	17,50	5,25	7,88	6,00	2,00
	53,70						



Slika 25: Ekstenzometar pričvršćen na uzorku

Mjerni uređaj (model 55-C0222/F) je dvodjelan – jedan dio je nepomičan te se s jednim parom konusnih istaka (igli) usidri u beton, dok je drugi dio uređaja pomičan duž osi senzora te također iglama naliježe u betonski uzorak (Slika 26.). Fiksni i mobilni dio uređaja na stražnjoj strani imaju izvedene utore za nalijeganje elastične trake (Slika 27.). S obzirom da je opseg trake manji od uzorka, rastezanjem trake te njenim nalijeganjem u predviđene utore postignuta je određena stabilnost mjernih uređaja tijekom ispitivanja. Nakon što su montirani na uzorak, zbog dodatne stabilnosti i sprječavanja klizanja tijekom ispitivanja, ekstenzometre je gumenim čekićem potrebno kucnuti kako bi se konusni vrhovi od kaljenog čelika (igle) pričvrstili na uzorak. Prilikom opterećivanja uzorka u preši izazvana je vertikalna deformacija uzorka koju ekstenzometri zabilježavaju pomoću razlike udaljenosti između 2 para igli (na fiksnom i pomičnom dijelu). Konstrukcija od aluminijskog i čelika u kojoj se nalazi pretvornik pomaka omogućuje kretanje bez trenja između fiksnog i mobilnog dijela uređaja. Hod ekstenzometra iznosi $\pm 1,50$ mm, dok mu je osjetljivost $0,20 \mu\text{m}$.



Slika 26: Ekstenzometar s vidljivim konusnim čeličnim vrhovima



Slika 27: Ekstenzometri montirani i pričvršćeni na uzorak betona s vlaknima

Prema normi HRN EN 12390 – 13:2013, razina opterećenja σ_b treba biti u rasponu od 10 do 15 % tlačne čvrstoće, a uzorak se tome opterećenju izlaže tako da na početku opterećenje brzinom $0,60 \pm 0,20$ MPa raste na vrijednost σ_b , zatim je uzorak konstantno izložen tom opterećenju u periodu koji ne prelazi 20 sekundi. Nadalje, opterećenje pada brzinom od $0,60 \pm 0,20$ MPa na vrijednost predopterećenja σ_p te ostaje na toj razini ne dulje od 20 sekundi. Analogni ciklus opterećenja ponavlja se ukupno 3 puta.

Nadalje, u sljedećoj se fazi ispitivanja uzorak izloži predopterećenju σ_p u trajanju koje ne prelazi 60 sekundi, a potom raste – prvotno na vrijednost σ_b , a zatim na vrijednost σ_a koja je definirana kao trećina tlačne čvrstoće uzorka. Ciklus rasta opterećenja σ_a analogan je onome za σ_b , uz to da je donja granica σ_b , a donja granica σ_a . Prvi rast opterećenja na vrijednost σ_p omogućuje definirati inicijalni modul elastičnosti, dok je treći rast opterećenja na vrijednost σ_p mjerodavan za stabilizirani sekantni modul elastičnosti.

5. Rezultati ispitivanja

5.1. Tlačna čvrstoća

Sukladno normi EN12390:3 – 2009 tlačna čvrstoća uzoraka proračunata je prema izrazu (1):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

gdje su:

f_c – tlačna čvrstoća (N/mm²)

F – tlačna sila pri slomu uzorka (N)

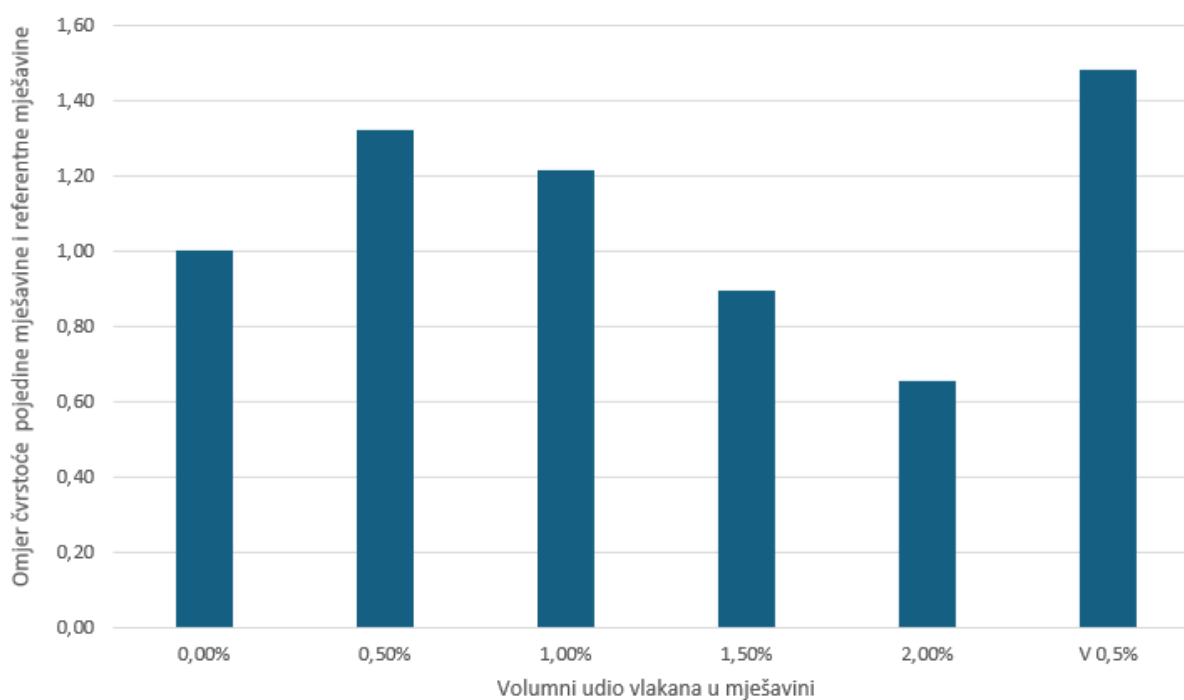
A_c – površina poprečnog presjeka na koji djeluje tlačna sila (mm²)

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3: Ispitivanje tlačne čvrstoće - Geometrijske i mehaničke karakteristike uzoraka

Vlakna	Oznaka uzorka	Masa uzorka (kg)	Duljina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Tlačna čvrstoća uzorka f_c (N/mm ²)	Prosječna tlačna čvrstoća uzorka f_c (N/mm ²)
PP 0,5 %	P1	7,56	145	150	150	45,36	46,72
	P2	7,92	149	150	150	48,26	
	P3	8,00	150	154	150	46,54	
PP 1,0 %	P4	8,04	154	150	150	44,78	42,94
	P5	7,65	150	148	150	42,85	
	P6	7,71	151	150	153	41,18	
PP 1,5 %	P7	7,40	150	150	149	34,80	31,66
	P8	7,15	149	151	154	26,44	
	P9	7,53	150	151	155	33,74	
PP 2,0 %	P10	6,88	150	156	151	18,50	23,22
	P11	7,38	150	155	151	27,90	
	P12	7,10	151	155	151	23,25	
VUNA 0,5 %	V1	7,96	149	147	150	51,30	52,50
	V2	8,05	152	148	146	53,70	

Tlačna čvrstoća referentnog betona ranije je eksperimentalno određena te iznosi 35,41 MPa. U odnosu na nju, zabilježen je pad čvrstoće kod uzoraka s 1,50 % i 2,00 % polipropilenskih vlakana te rast čvrstoće kod uzoraka s dodatkom 0,50 % i 1,00 % PP vlakna i uzoraka s 0,50 % vunenih vlakana. Najveći rast tlačne čvrstoće zabilježen je kod betona s dodatkom vunenih vlakana gdje je čvrstoća narasla za 48,26 % u odnosu na referenti beton (Slika 28.). Ovakav rast čvrstoće uzoraka s vunenim vlaknima može biti objašnjen time da vunena vlakna smanjuju nastanak mikropukotina u cementnoj matrici. U Tablici 3. je dokumentirano kako uzorci s vunom imaju prosječno najveću masu, što dovodi do zaključka da je cementna matrica gušća, to jest s manje šupljina u odnosu na ostale uzorke. Nadalje, uzorci s dodatkom 0,50 % i 1,00 % pokazali su redom 32 % i 21 % veću vlačnu čvrstoću u odnosu na referentni beton. Prema [20], učinkovito povećanje tlačne čvrstoće jest posljedica toga što polipropilenska vlakna značajno mijenjaju mikrostrukturu betona, odnosno stvaraju mrežu koja smanjuje količinu i veličinu kristala u cementnoj matrici, ali i mikro – pukotine na sučeljku između agregata i cementne paste.



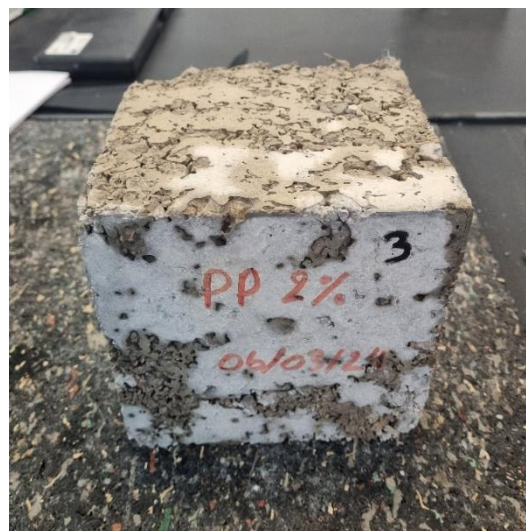
Slika 28: Relativni odnos tlačne čvrstoće pojedine skupine uzoraka i čvrstoće referentnog betona

S druge strane, tlačna čvrstoća uzoraka s 1,50 % i 2,00 % polipropilenskih vlakana pokazala se značajno manjom od svih drugih uzoraka. Pretpostavka je da se to može pripisati grešci prilikom doziranja komponenti betonske mješavine budući da je izmjerena konzistencija

slijeganjem navedenih uzoraka bila značajnije manja. Na Slikama 29. – 31. primjetno je kako uzorci navedenih mješavina imaju značajno veći broj šupljina u odnosu na ostale uzorke. Smatra se kako je ovakav izgled uzoraka posljedica neadekvatnog doziranja vode ili superplastifikatora. Slijedom toga, rezultati tlačne čvrstoće uzoraka s 1,50 % i 2,00 % PP vlakna neće se smatrati mjerodavnima u zaključku rada.



Slika 29: Beton s 1,50 % PP vlakana

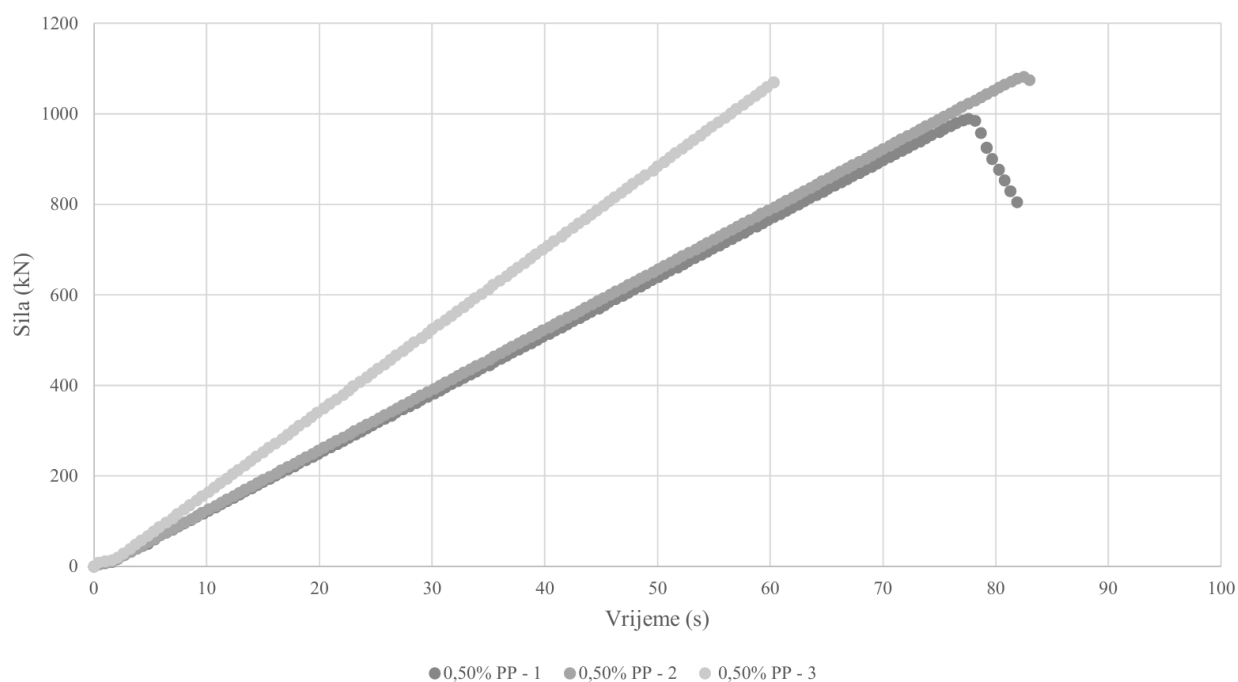


Slika 30: Beton s 2,00 % PP vlakana

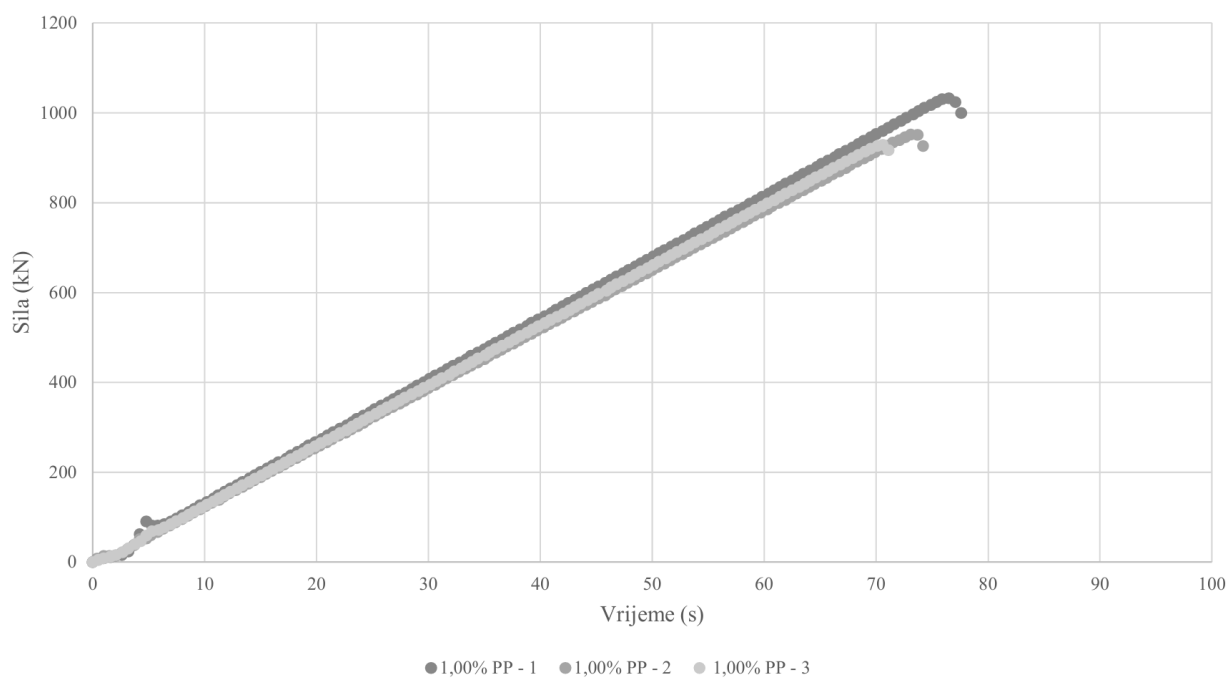


Slika 31: Detalj segregacije

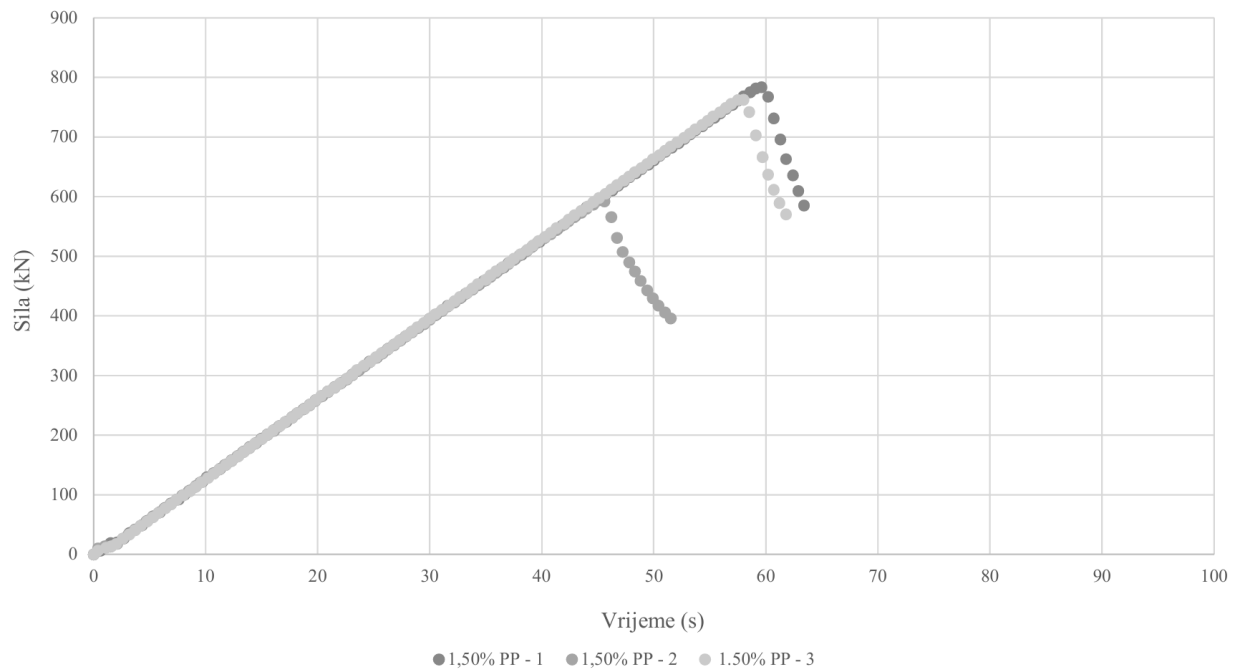
Na slikama 32. – 36. prikazan je međusobni odnos sile i vremena za svaku ispitanu skupinu uzoraka.



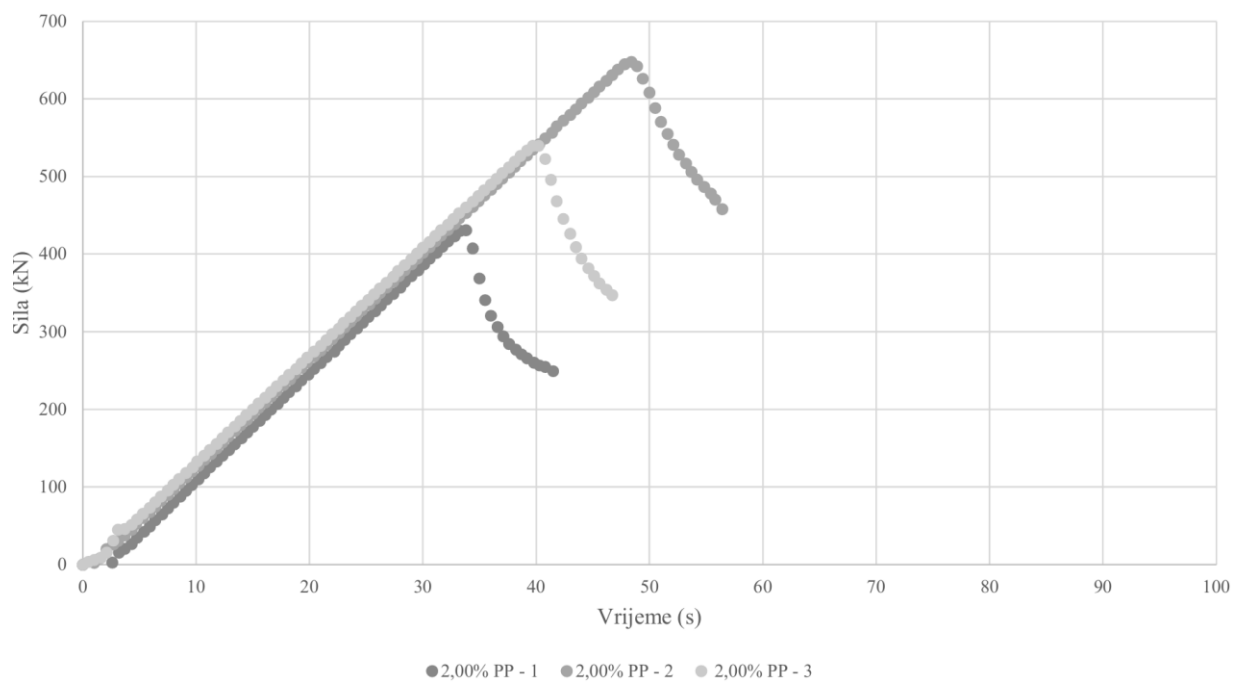
Slika 32: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 0,50 % polipropilenskih vlakana



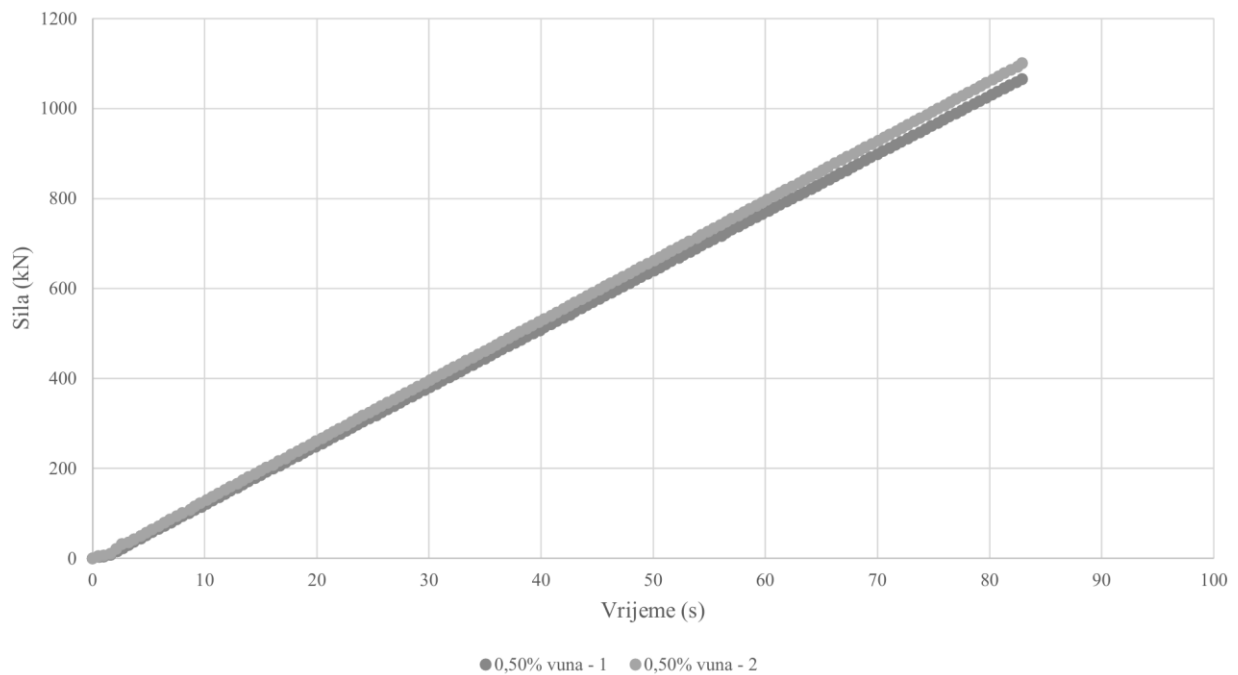
Slika 33: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 1,00 % polipropilenskih vlakana



Slika 34: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 1,50 % polipropilenskih vlakana

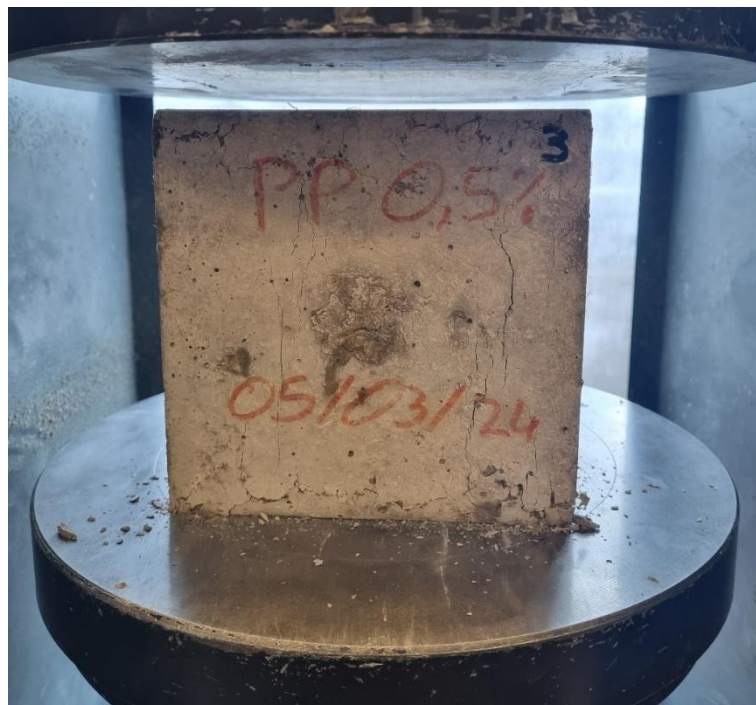


Slika 35: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 2,00 % polipropilenskih vlakana

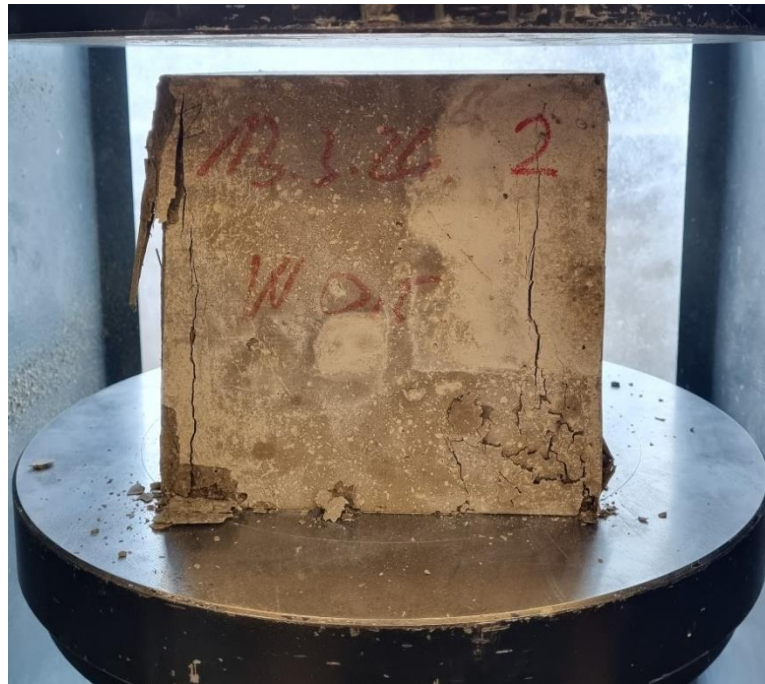


Slika 36: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzoraka s 0,50 % vunениh vlakana

Na Slikama 37. i 38. prikazani su oblici sloma dobiveni tlačnim opterećivanjem uzoraka te su isti u skladu s karakterističnim oblicima sloma definiranim normom HRN EN 12390-3:2009.



Slika 37: Slom uzorka s 0,50 % PP vlakana



Slika 38: Slom uzorka s 0,50 % vunениh vlakana

5.2. Vlačna čvrstoća

Uzorci prizmi izloženi su savijanju u 3 točke, stoga je sukladno normi EN12390:5 – 2009 vlačna čvrstoća istih proračunata prema izrazu (2):

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (2)$$

gdje su:

F – vlačna sila pri pojavi prve pukotine (N)

l – udaljenost između oslonaca (mm)

d₁ – širina uzorka (mm)

d₂ – visina uzorka (mm)

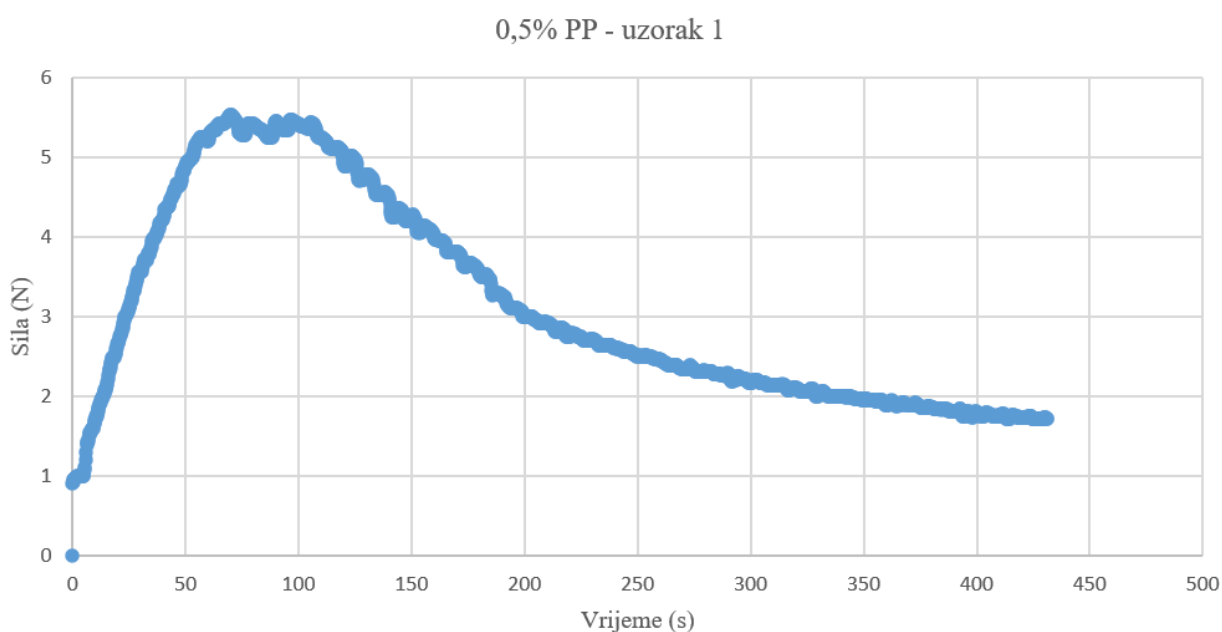
f_{cf} – vlačna čvrstoća (N/mm²).

Visina uzoraka umanjena je za 30 mm koliko je iznosila visina zarez a izvedenog u kritičnom poprečnom presjeku. Korigirane visine uzoraka te izračunate čvrstoće evidentirane su u Tablici 4.

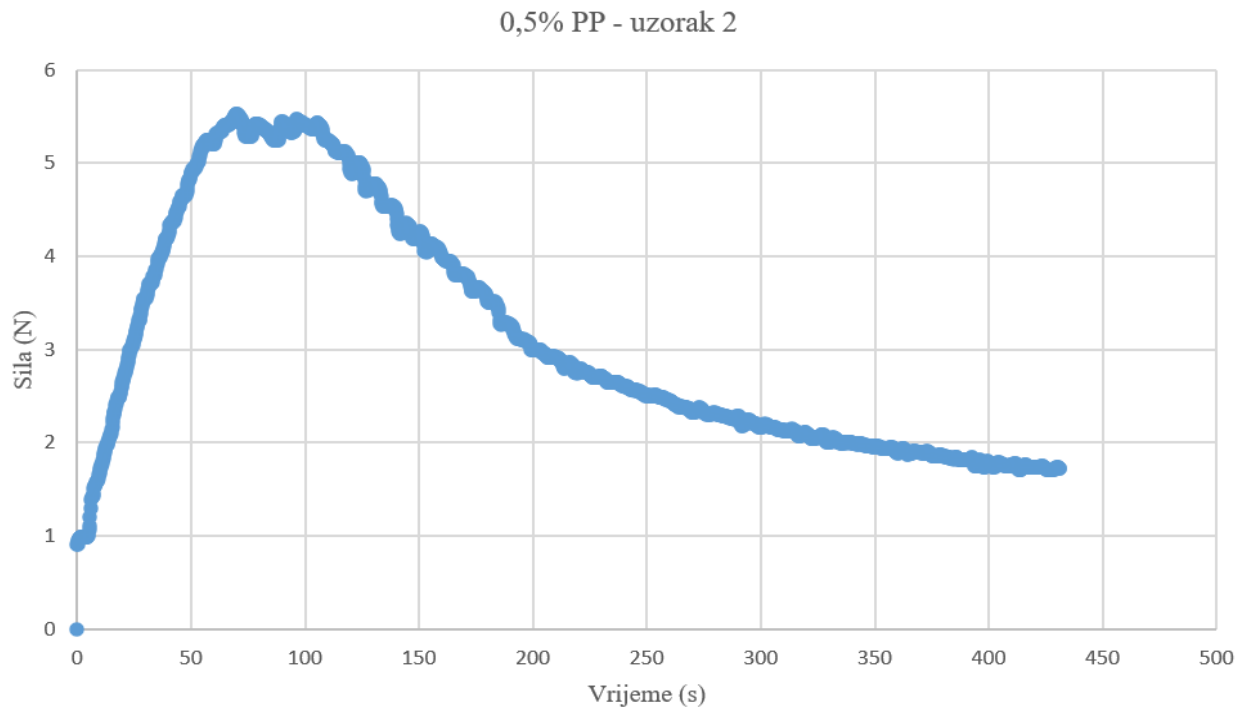
Tablica 4: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Vlakna	Oznaka uzorka	Brzina ispitivanja ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Maksimalna sila (kN)	Duljina l (mm)	Širina d_1 (mm)	Visina d_2 (mm)	Vlačna čvrstoća uzorka f_{ct} (N/mm ²)	Prosječna vlačna čvrstoća f_{ct} (N/mm ²)
PP 0,5 %	P1	100	6,12	300	102	70	5,53	5,29
	P2	20	5,53	300	104	70	4,90	
	P3	100	6,00	300	101	70	5,44	
PP 1,0 %	P4	20	5,80	300	103	70	5,17	5,11
	P5	40	6,01	300	99	70	5,57	
	P6	20	5,06	300	101	70	4,60	
VUNA 0,5 %	V1	20	5,52	300	102	70	5,01	4,84
	V2	40	5,81	300	101	71	5,21	
	V3	20	4,84	300	101	71	4,29	

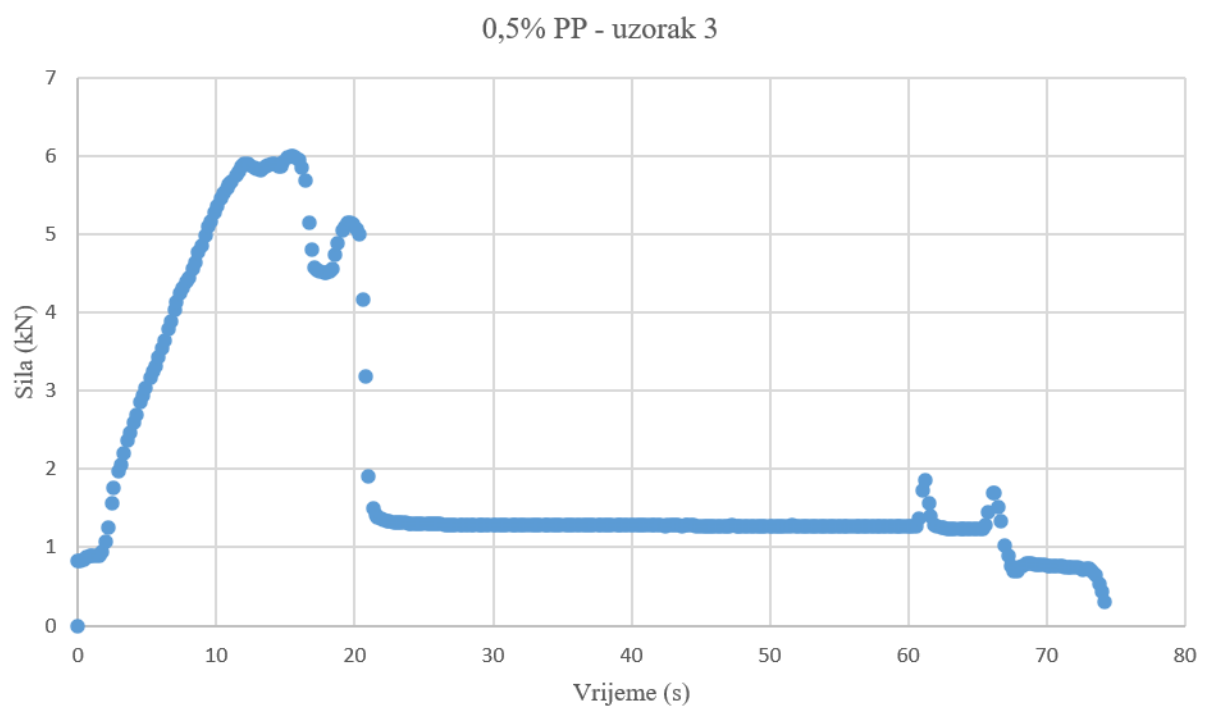
Dijagrami ispitivanja vlačne čvrstoće prikazani su na Slikama 39. – 47.



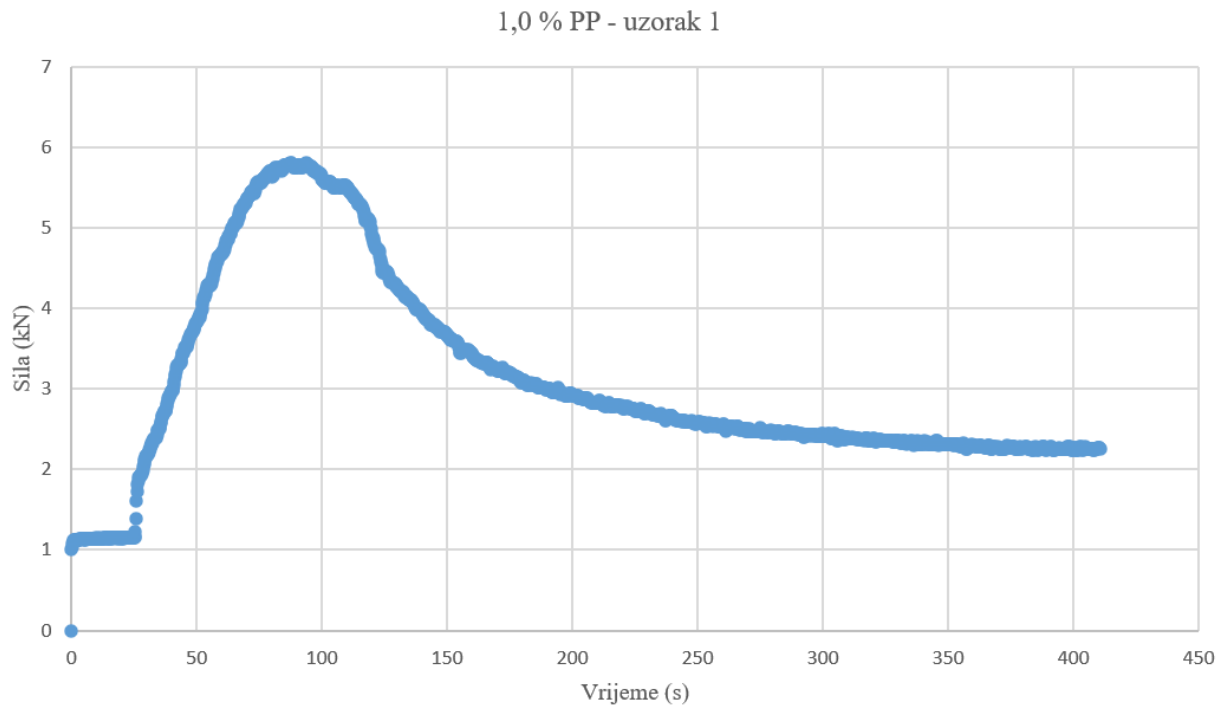
Slika 39: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



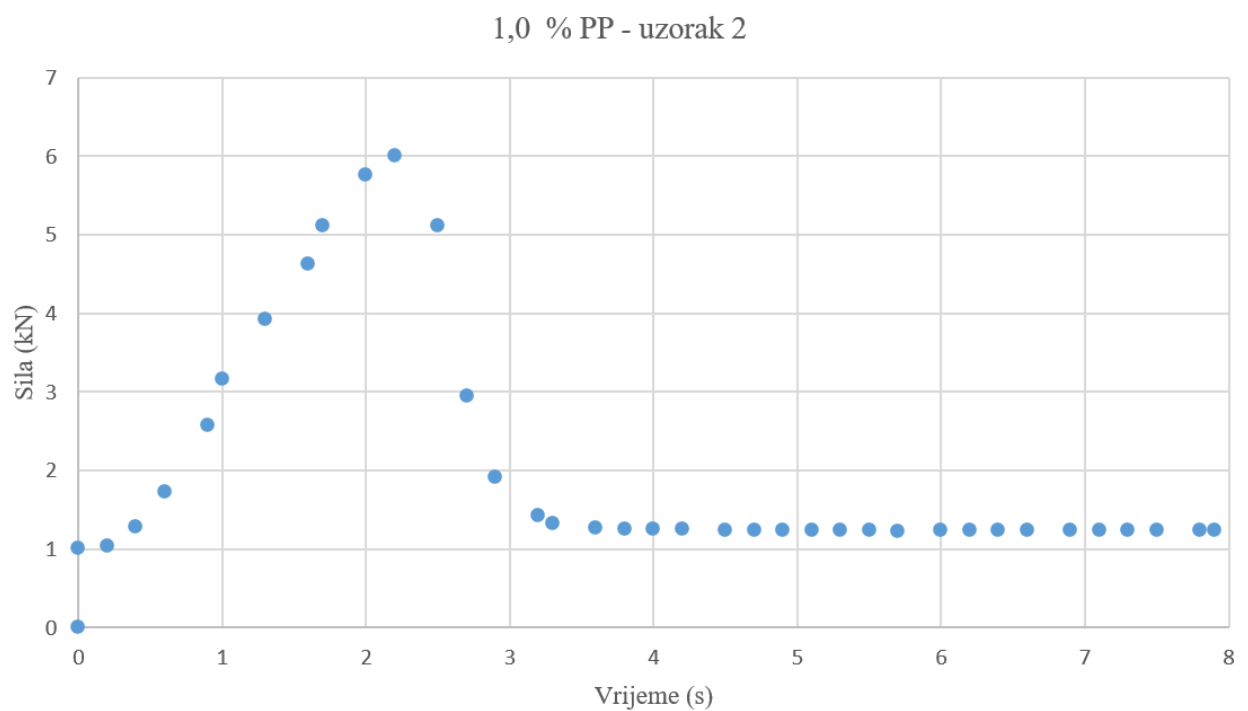
Slika 40: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



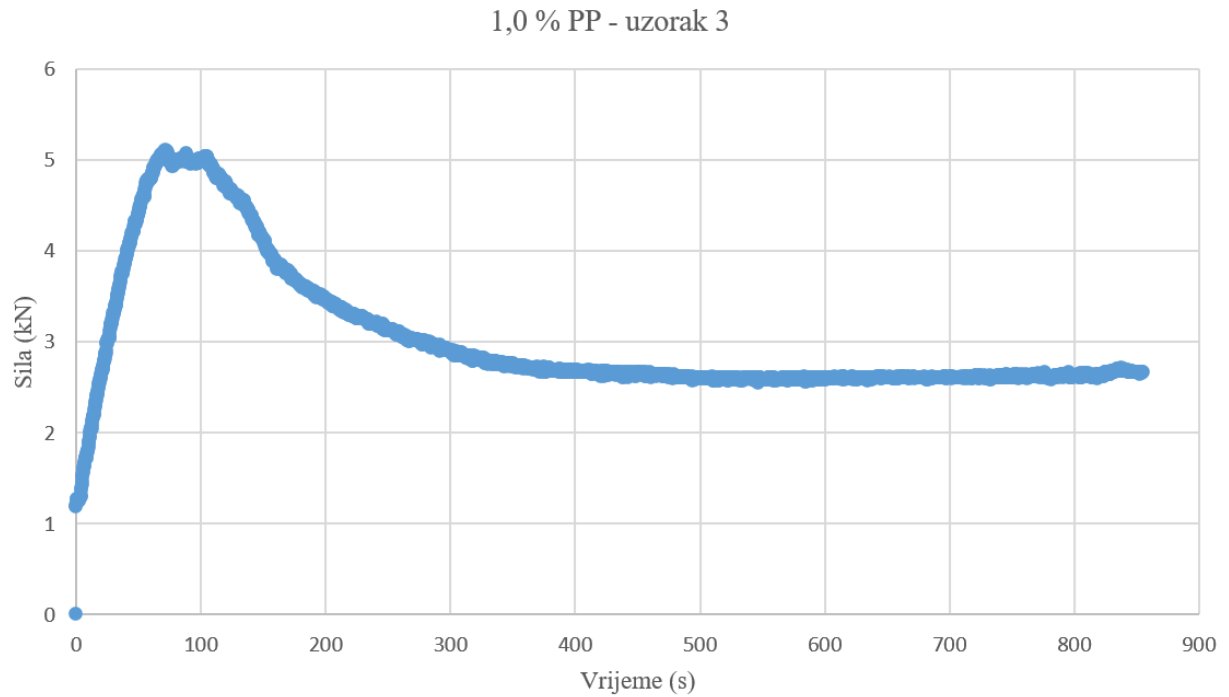
Slika 41: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



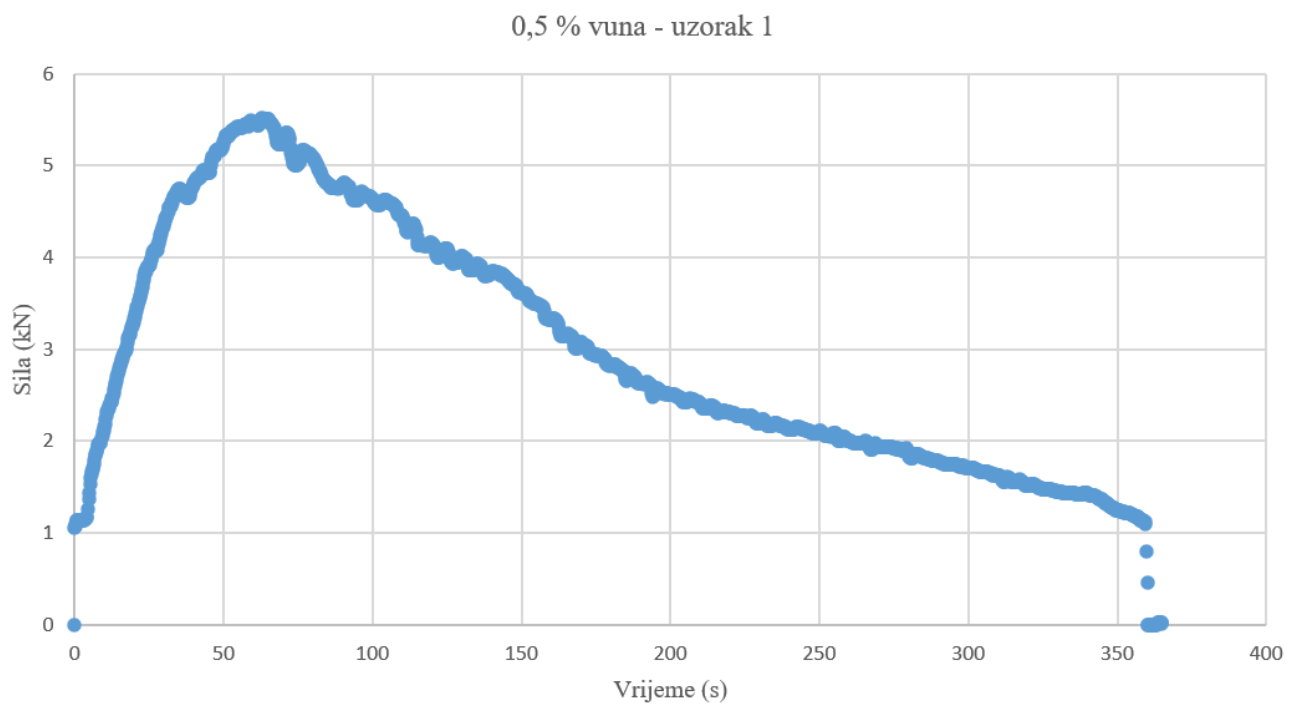
Slika 42: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



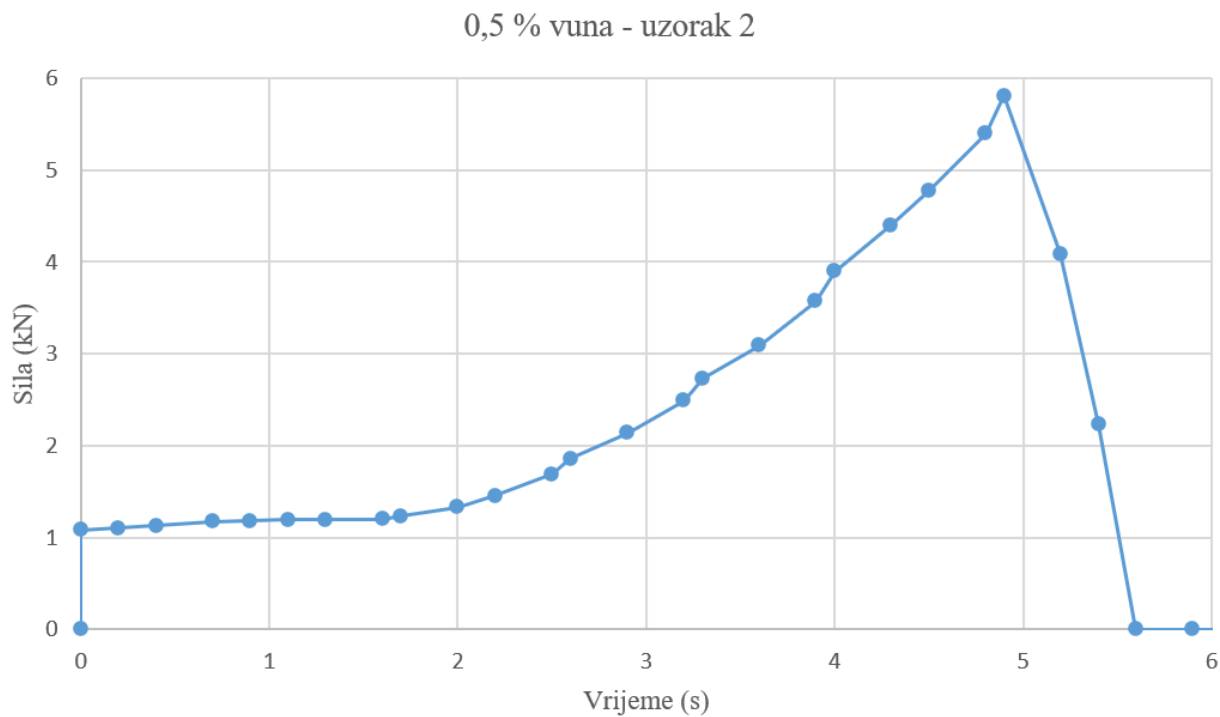
Slika 43: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



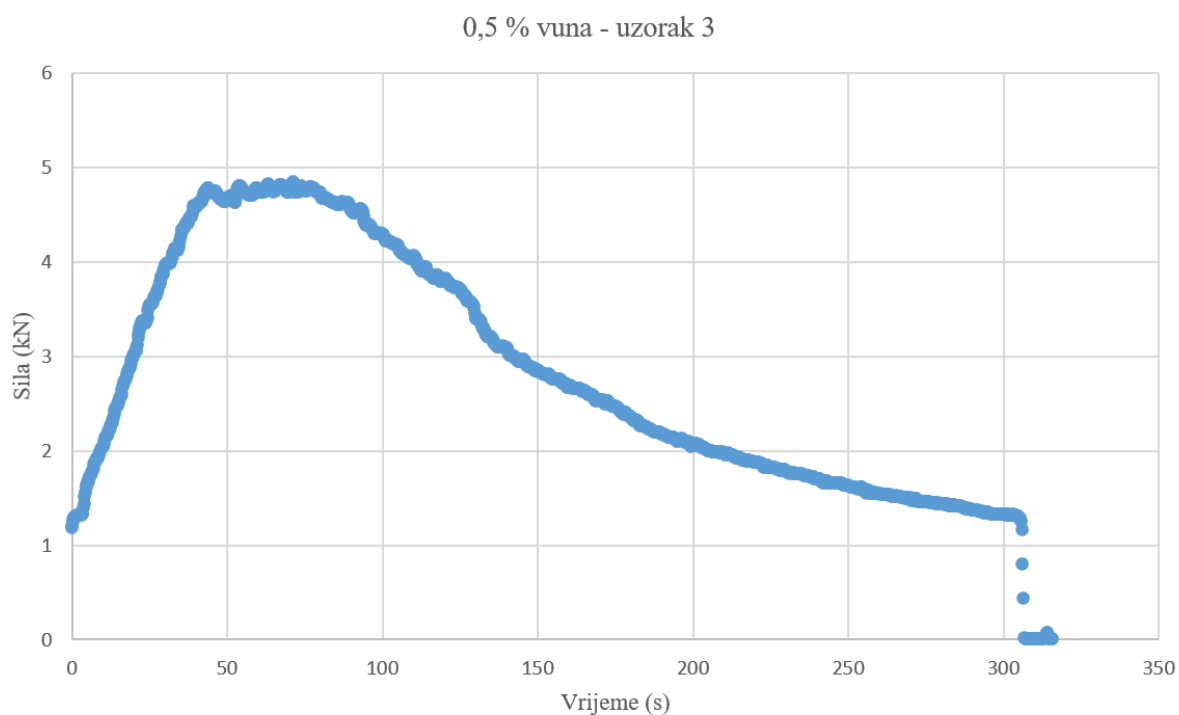
Slika 44: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



Slika 45: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana



Slika 46: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana



Slika 47: Dijagram zavisnosti sile o vremenu uzorka s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana

Slom u kritičnom poprečnom presjeku evidentiran je na Slikama 48. i 49.



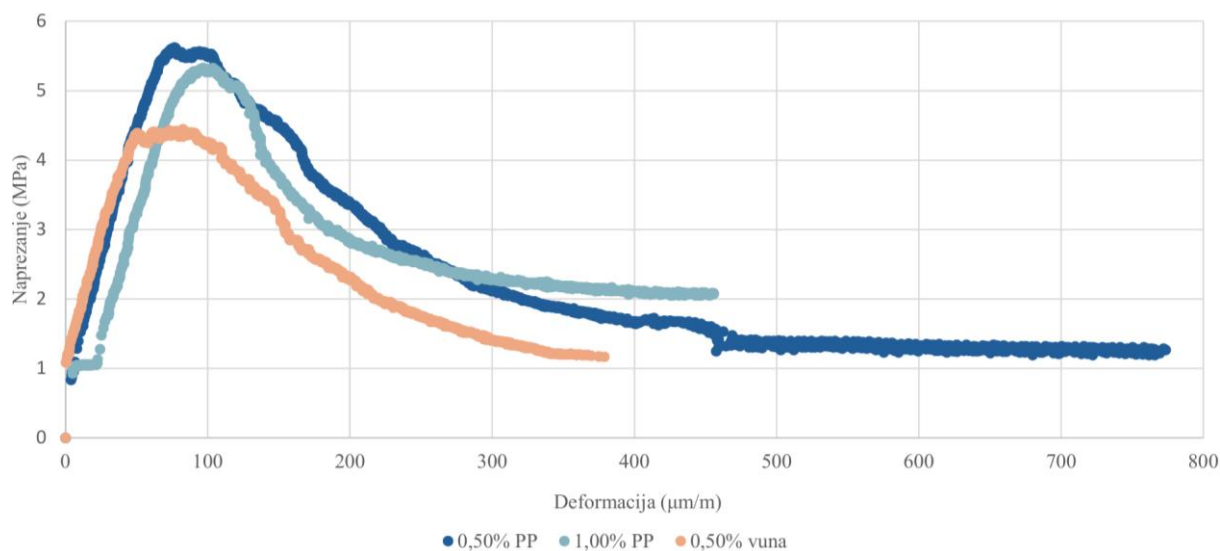
Slika 48: Ploha sloma uzorka s vunениm vlaknima



Slika 49: Ploha sloma uzorka s PP vlaknima

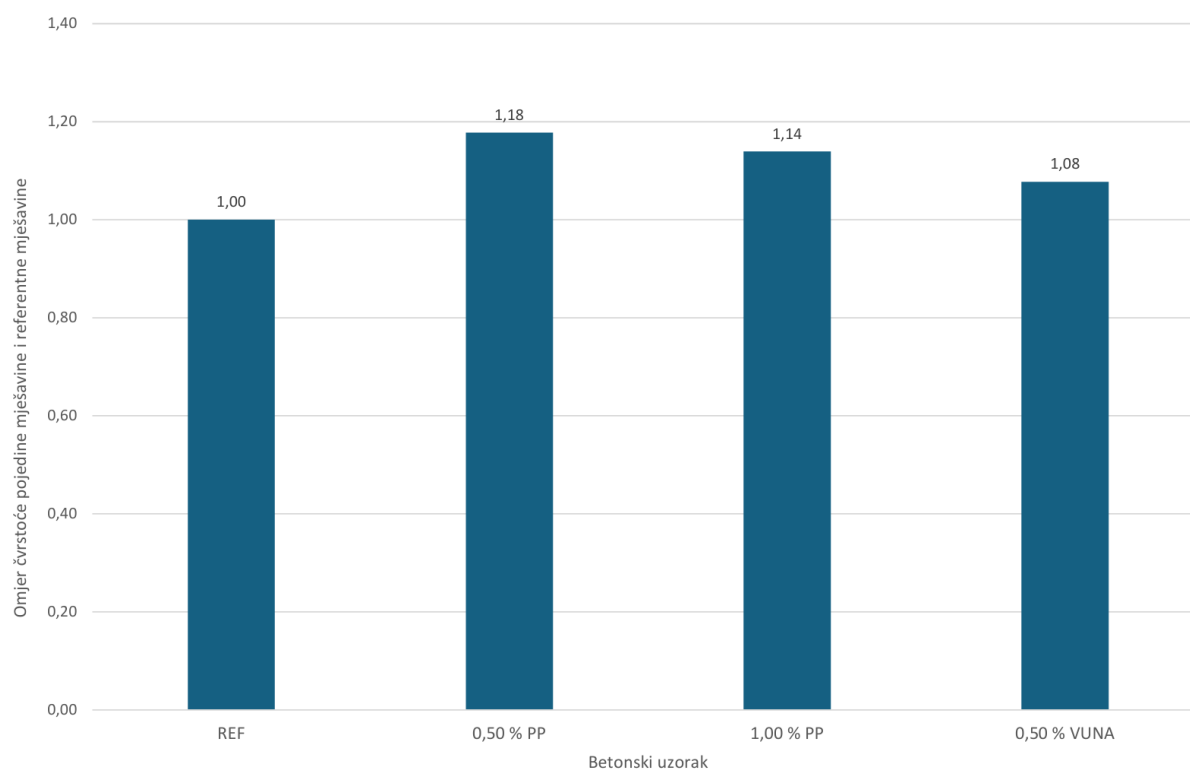
Promatrajući dijagrame zavisnosti sile o vremenu, može se zaključiti kako unatoč različitom trajanju eksperimentalnog ispitivanja uzoraka, postoji pravilnost u dijagramima uzoraka. Naime, maksimalna se je sila kod svih uzoraka kretala oko vrijednosti od 5 kN. Međutim, može se primijetiti značajno kraća kosa grana dijagrama (manja žilavost) uzorka 3 (0,50 % PP), uzorka 2 (1,00 % PP) te uzorka 2 (0,50 % vuna). Raniji slom u odnosu na sve ostale uzorke manifestiran je pri većim brzinama nanošenja opterećenja. Kada bi ispitivanje nekog uzorka trajalo dulje od 5 minuta, brzina nanošenja je kod sljedećeg uzorka povećana što je kod nekih uzoraka rezultiralo uranjeni slom. Prema Tablici 3., medijan sile svih uzoraka iznosi 5,80 kN, dok je njena prosječna vrijednost sile svih uzoraka 5,64 kN.

Nadalje, na Slici 50. dani su radni dijagrami uzoraka iz svake analizirane mješavine. Deformacija je izračunata pomoću pomaka uzoraka koji je mjereno LVDT uređajima. Primjetno je kako uzorak s 0,50 % PP vlakna ima najdulju horizontalnu (kosu) granu što ukazuje na njegovu žilavost. Oblik krivulja nakon granice popuštanja ukazuje na to da, dodatnim pucanjem betona, vlakna imaju sposobnost preuzimanja sile i "držanja" uzorka u mjerodavnom presjeku – sve do konačnog sloma uzorka.



Slika 50: Dijagram naprezanje - deformacija za karakteristični uzorak svake mješavine

Vlačne čvrstoće uzoraka s 0,50 % PP vlakana, 1,00 % PP vlakana te 0,50 % vunениh vlakana redom iznose 5,29 MPa, 5,11 MPa te 4,84 MPa. Uspoređujući navedene vrijednosti s vlačnom čvrstoćom referentnog betona iznosa 4,49 MPa, razvidno je kako je dodatak vlakna izazvao rast čvrstoće kod svih uzoraka. Prema Slici 51., kod uzoraka s 0,50 % polipropilenskih vlakana, vlačna čvrstoća ostvarila je porast od 17,76 %, kod uzoraka s 1,00 % polipropilenskih vlakana za 13,90 %, dok se dodatkom 0,50 % vunениh vlakana u beton dogodio rast vlačne čvrstoće od 7,74 % (Slika 51.).



Slika 51: Usporedba vlačne čvrstoće ispitanih uzoraka s referentnim betonom

Rast vlačne čvrstoće može biti objašnjen time što vlakna imaju sposobnost premostiti mikropukotine koje se javljaju uslijed vlačnog naprezanja u betonu. Također, polipropilenska vlakna smanjuju kristalizaciju i orijentaciju $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u betonu te stvaraju mrežu koja povezuje mikropukotine i preraspodjeljuje naprezanja [20]. Uspoređujući pritom međusobni utjecaj vunениh i polipropilenskih vlakana na vlačnu čvrstoću, može se utvrditi kako PP vlakna izazivaju veći rast vlačne čvrstoće od vunениh vlakana. To može biti posljedica veće krutosti PP vlakna te njihove sposobnosti premoštenja veće pukotine na plohi sloma. S druge strane, vunena vlakna nisu vidljiva na plohi sloma, unatoč tome što je nedvojbeno da doprinose rastu

vlačne čvrstoće. Stoga, pretpostavlja se da je ponašanje vunelih vlakana u betonu analogno PP vlaknima, osim što je ono prisutno pri premoščivanju samo mikropukotina. Uslijed početka razvlačenja betona, inicijalne vlačne pukotine su premoštene vunenim vlaknima. Međutim, daljnjim napredovanjem pukotina, vunena vlakna više nemaju mogućnost premostiti pukotine iz kojeg razloga je proračunata vlačna čvrstoća manja od one kod PP vlakana.

5.3. Modul elastičnosti

Sekantni modul elastičnosti definiran je kao nagib pravca koji spaja ishodišnu točku i točku krivulje $\sigma - \varepsilon$ koja označava približno vrijednost 40 % naprezanja [13]. Inicijalni sekantni modul elastičnosti određen je prema izrazu (3):

$$E_{C,0} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_0} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}} \quad (3)$$

gdje su:

$E_{C,0}$ – inicijalni (početni) sekantni modul elastičnosti (MPa)

σ_a^m – izmjereno gornje naprezanje (MPa)

σ_b^m – izmjereno donje naprezanje (MPa)

$\varepsilon_{a,1}$ – deformacija na kraju prvog ciklusa gornjeg naprezanja σ_a

$\varepsilon_{b,0}$ – deformacija pri donjem naprezanju σ_b , prije početka prvog ciklusa gornjeg naprezanja

Nadalje, stabilizirani sekantni modul elastičnosti određen je prema izrazu (4):

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (4)$$

gdje su:

$E_{C,S}$ – stabilizirani sekantni modul elastičnosti

$\varepsilon_{a,3}$ – deformacija na kraju trećeg ciklusa gornjeg naprezanja σ_a

$\varepsilon_{b,2}$ – deformacija pri donjem naprezanju σ_b , između drugog i trećeg ciklusa gornjeg naprezanja

Modul elastičnosti običnog (referentnog) betona izračunat je sukladno Eurokodu 2, pomoću izraza (5) i (6) [21]:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f'_{cm}}{10}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$f'_{cm} = f'_c + 8 \quad (6)$$

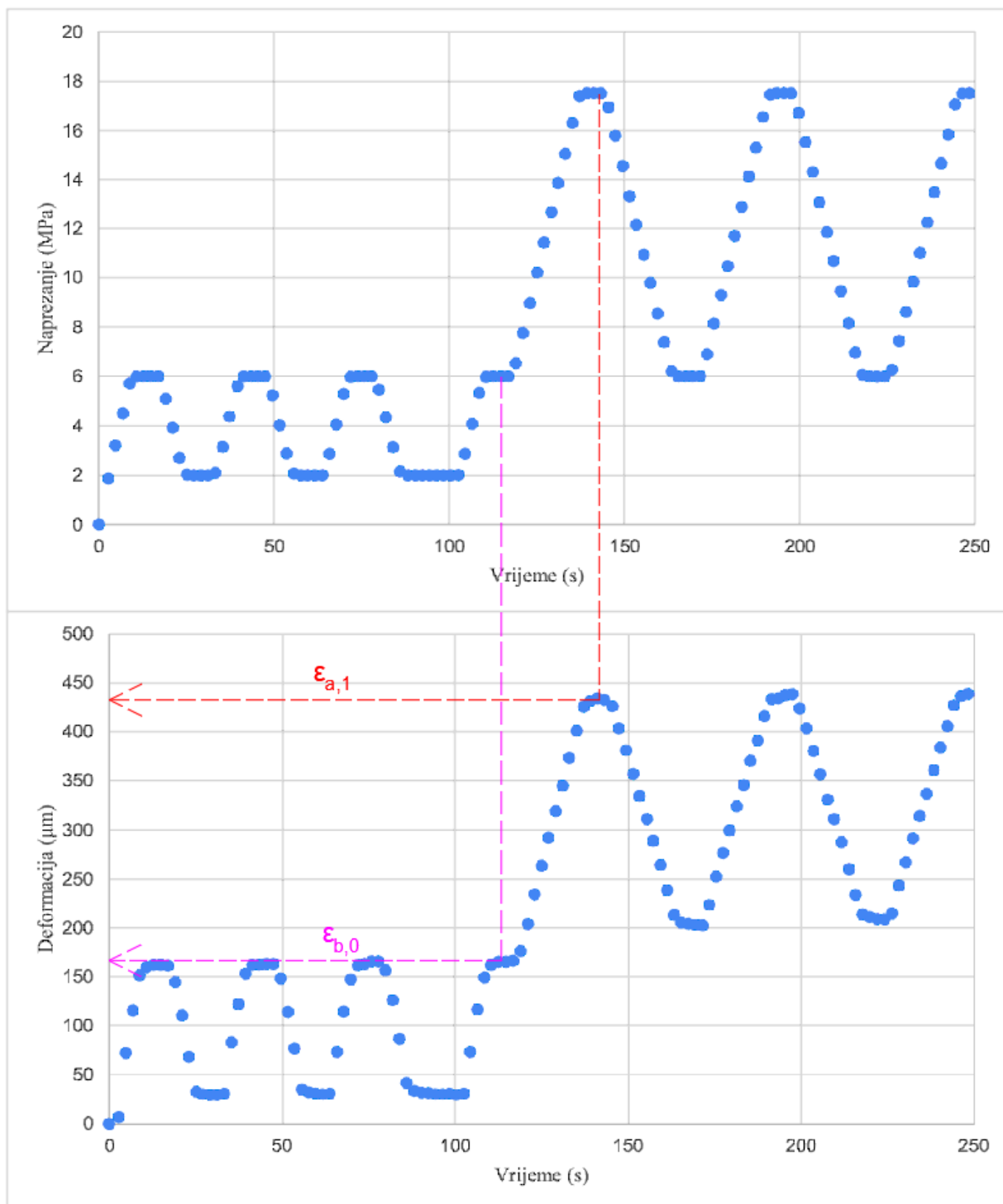
gdje su:

E_{cm} – vlačna čvrstoća (GPa)

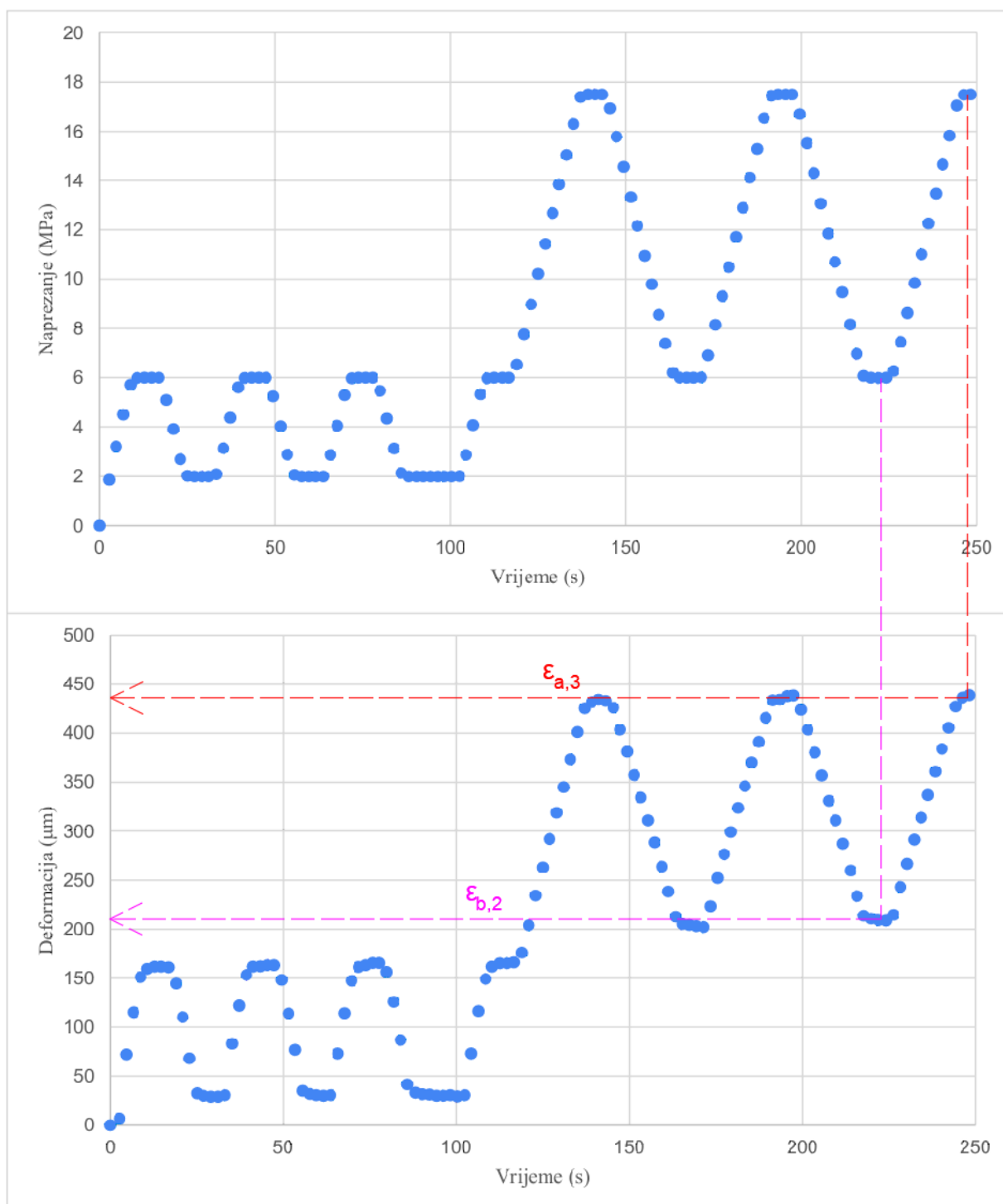
f'_c – tlačna čvrstoća betona na valjku (MPa)

f'_{cm} – srednja tlačna čvrstoća (MPa)

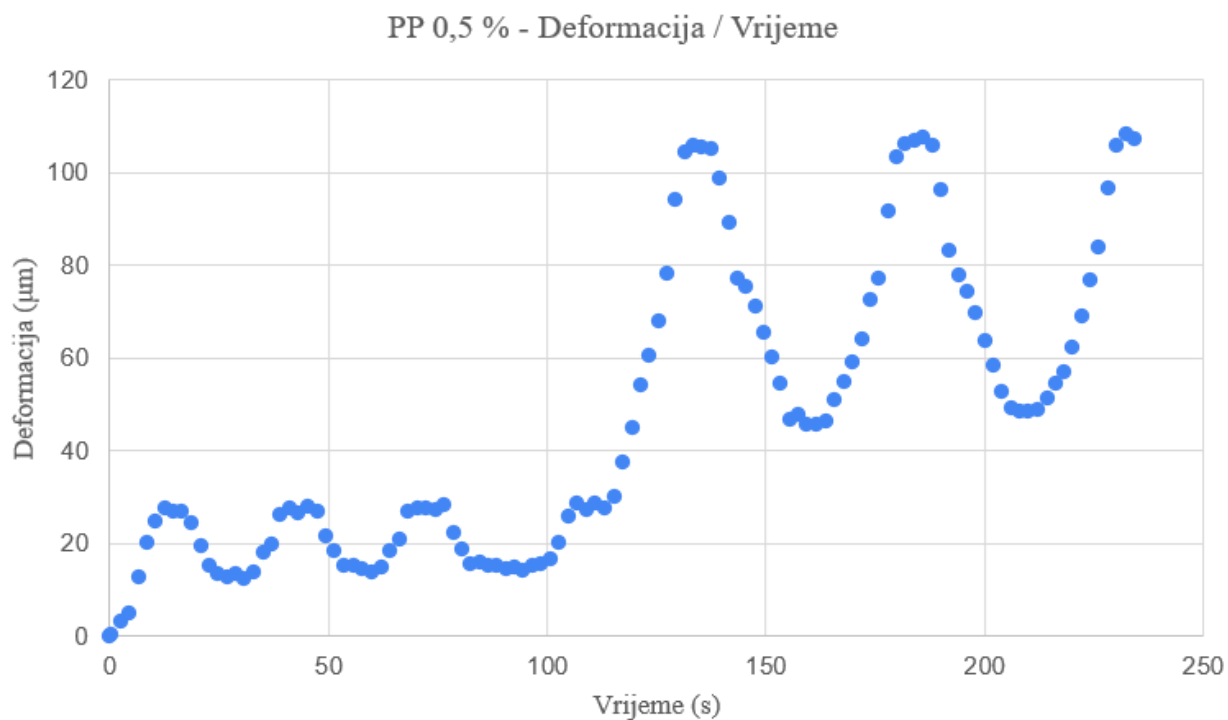
Prije provedbe cjelovitog ispitivanja modula elastičnosti, norma zahtijeva da razlika deformacije pri drugom i trećem ciklusu donjeg naprezanja ne smije biti veća od 20 %, u suprotnome se testiranje mora ponoviti. Zbog navedenog zahtjeva, ispitivanja uzorka 4 s dodatkom 1,0 % PP vlakana te uzorka 3 s dodatkom 0,5 % vunениh vlakana su prekinuta te ponovljena dok se nije postigla manja razlika. Na preostalim 7 uzoraka je iz prvog pokušaja postignut zahtijevan uvjet deformacije. Tražene deformacije za proračun inicijalnog i stabiliziranog sekantnog modula elastičnosti očitane su kombiniranjem dijagrama naprezanje – vrijeme i deformacija – vrijeme, kao što je demonstrirano na Slikama 52. i 53, dok su rezultati ispitivanja uzoraka prikazani na Slikama 54. – 71.



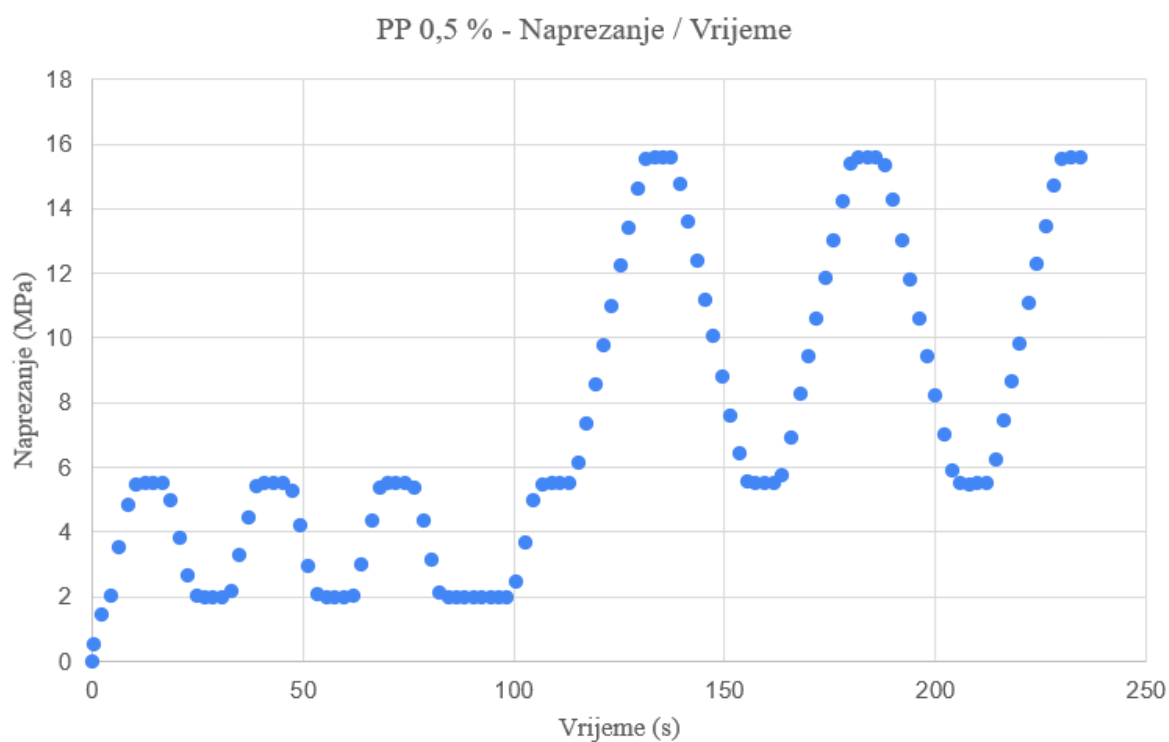
Slika 52: Princip očitavanja deformacija za inicijalni sekantni modul elastičnosti



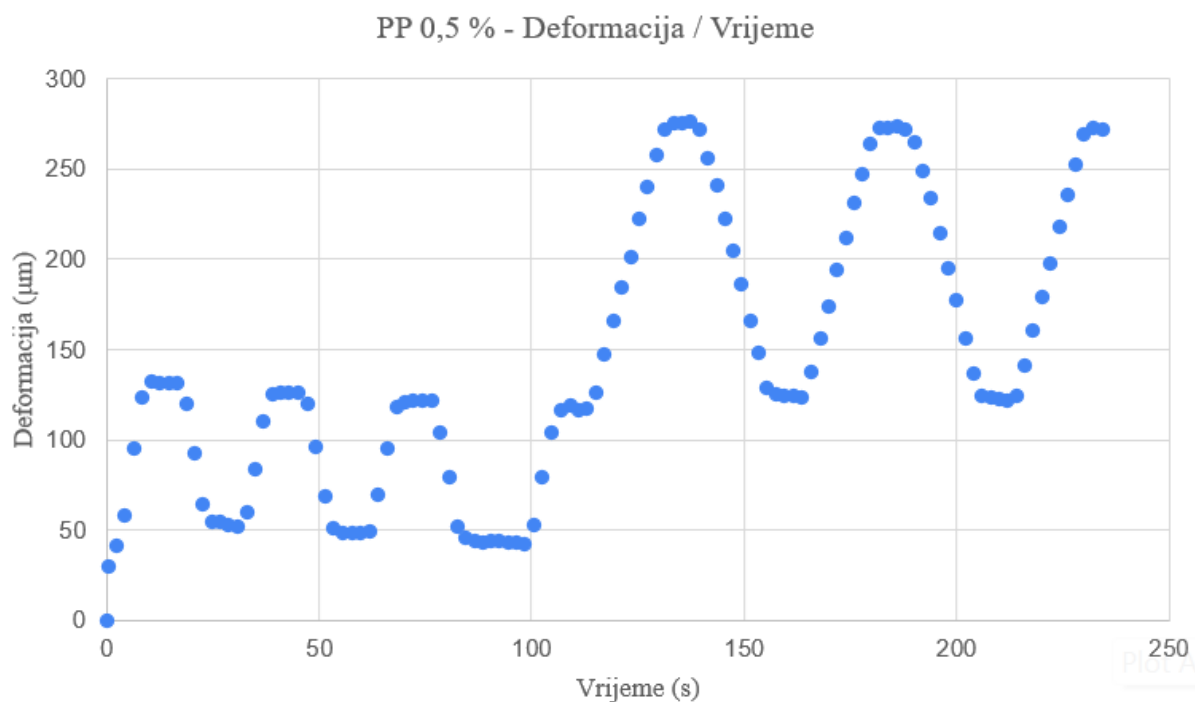
Slika 53: Princip očitavanja deformacija za stabilizirani sekantni modul elastičnosti



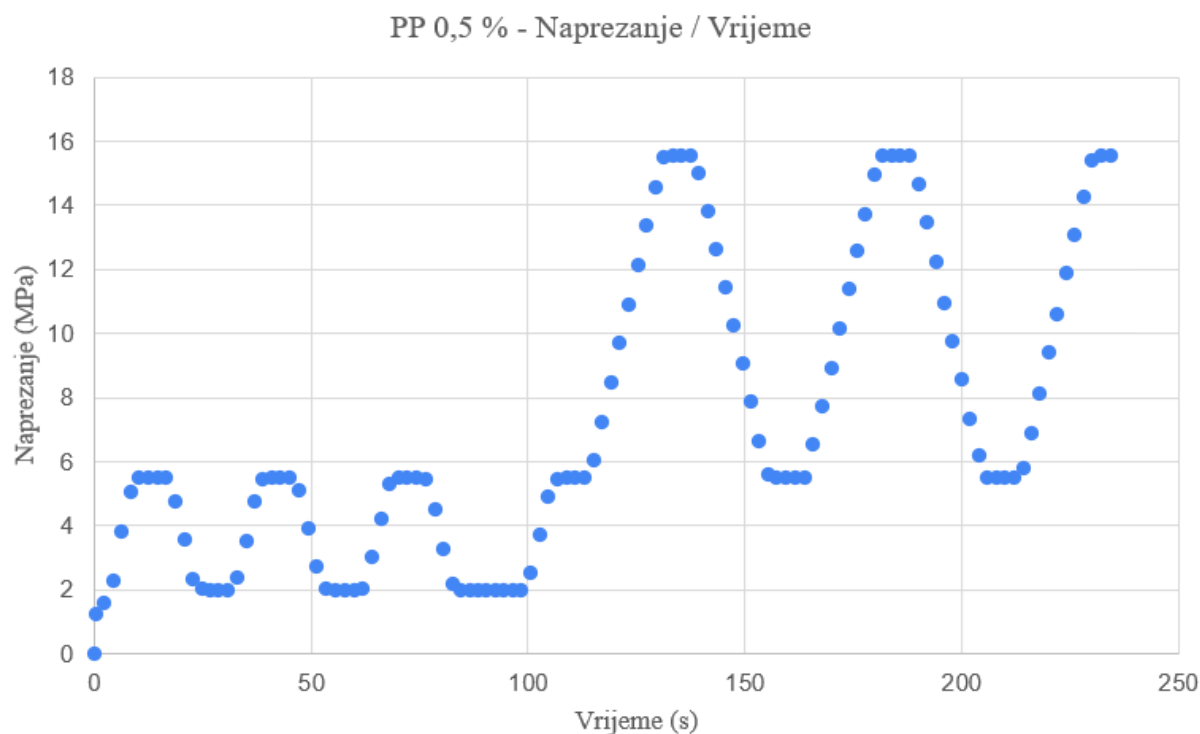
Slika 54: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



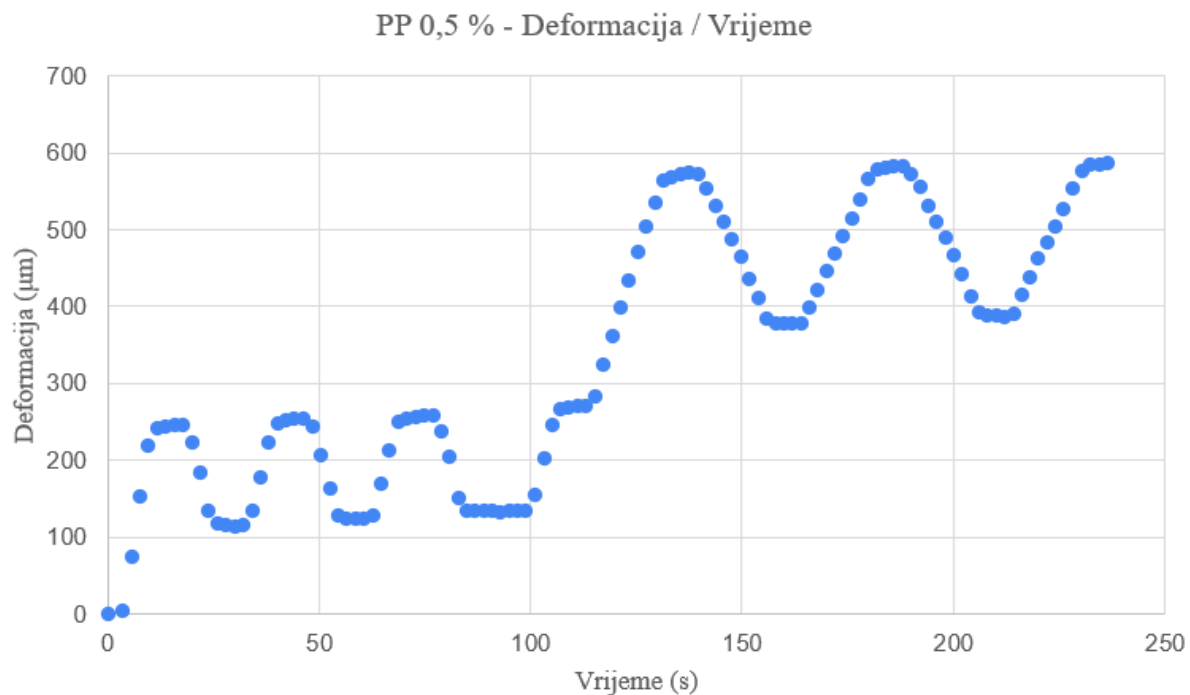
Slika 55: Dijagram zavisnosti napreznja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



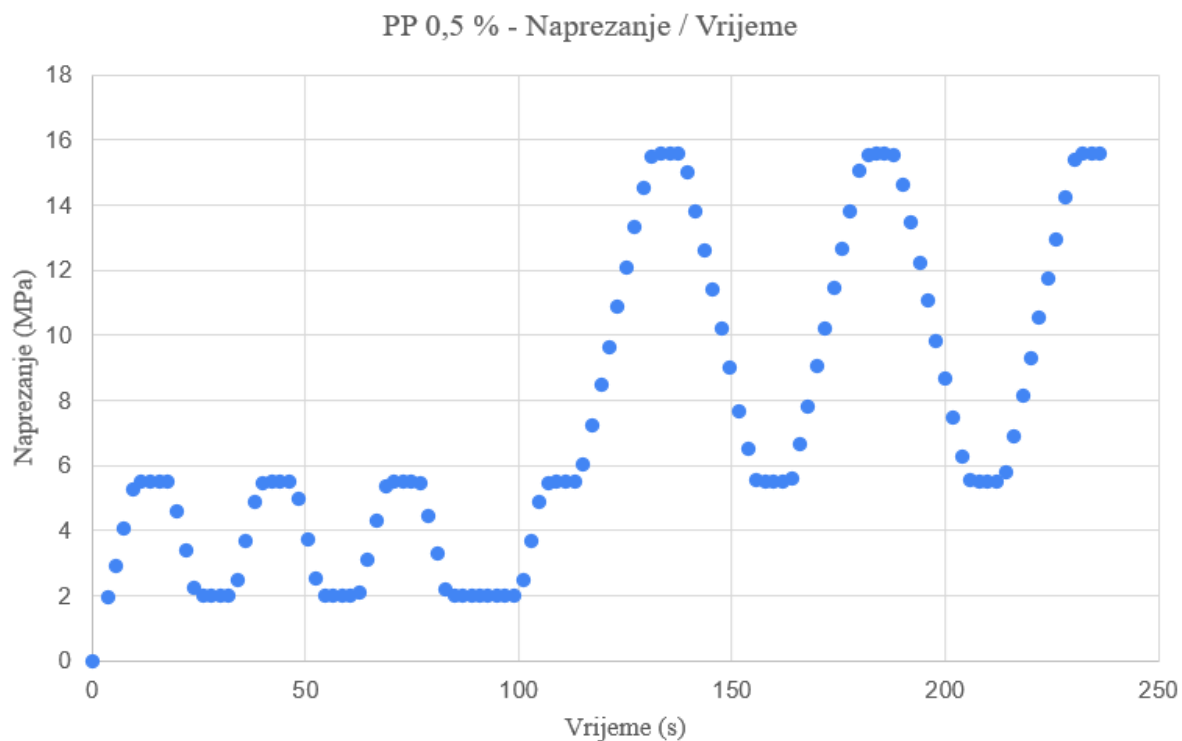
Slika 56: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



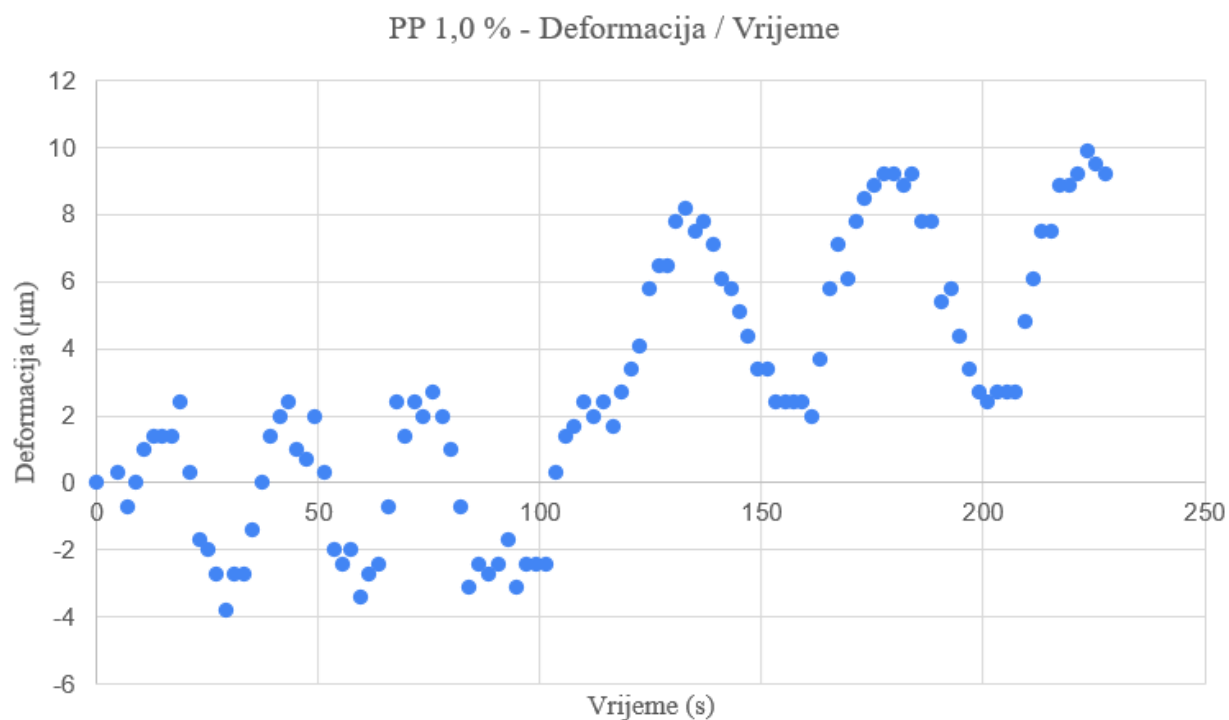
Slika 57: Dijagram zavisnosti naprežanja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



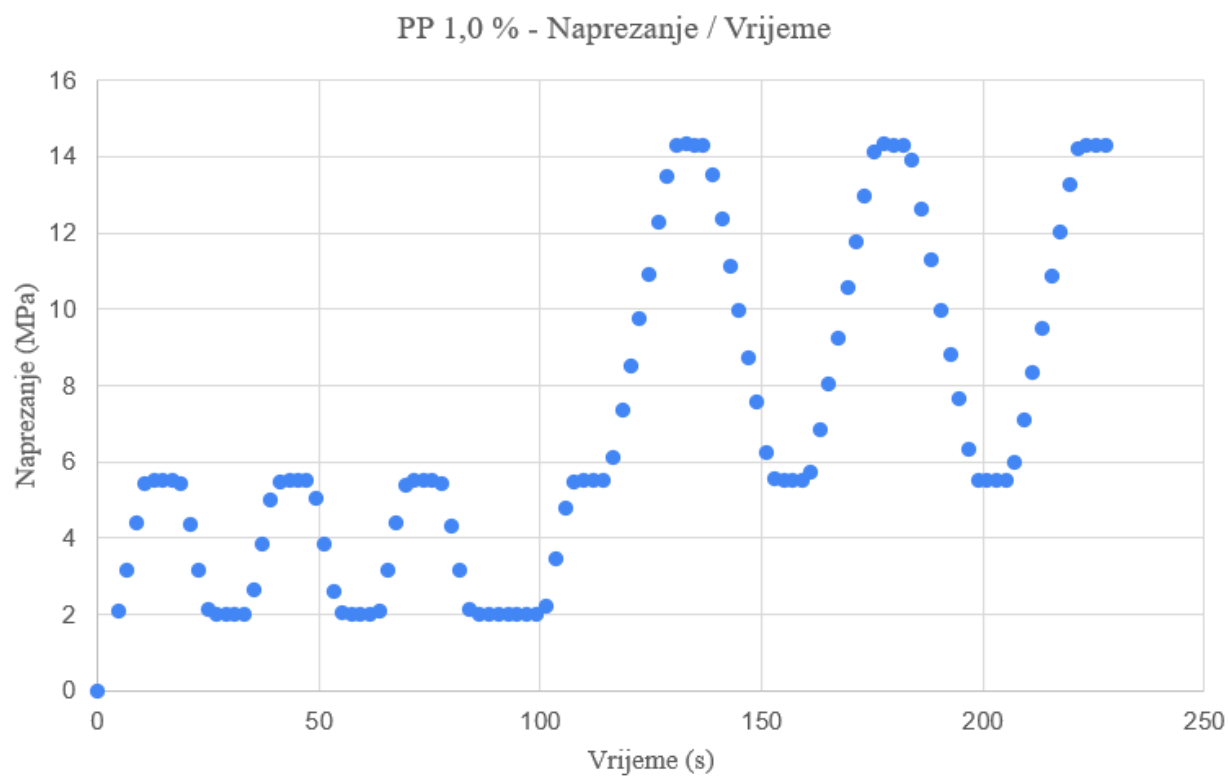
Slika 58: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



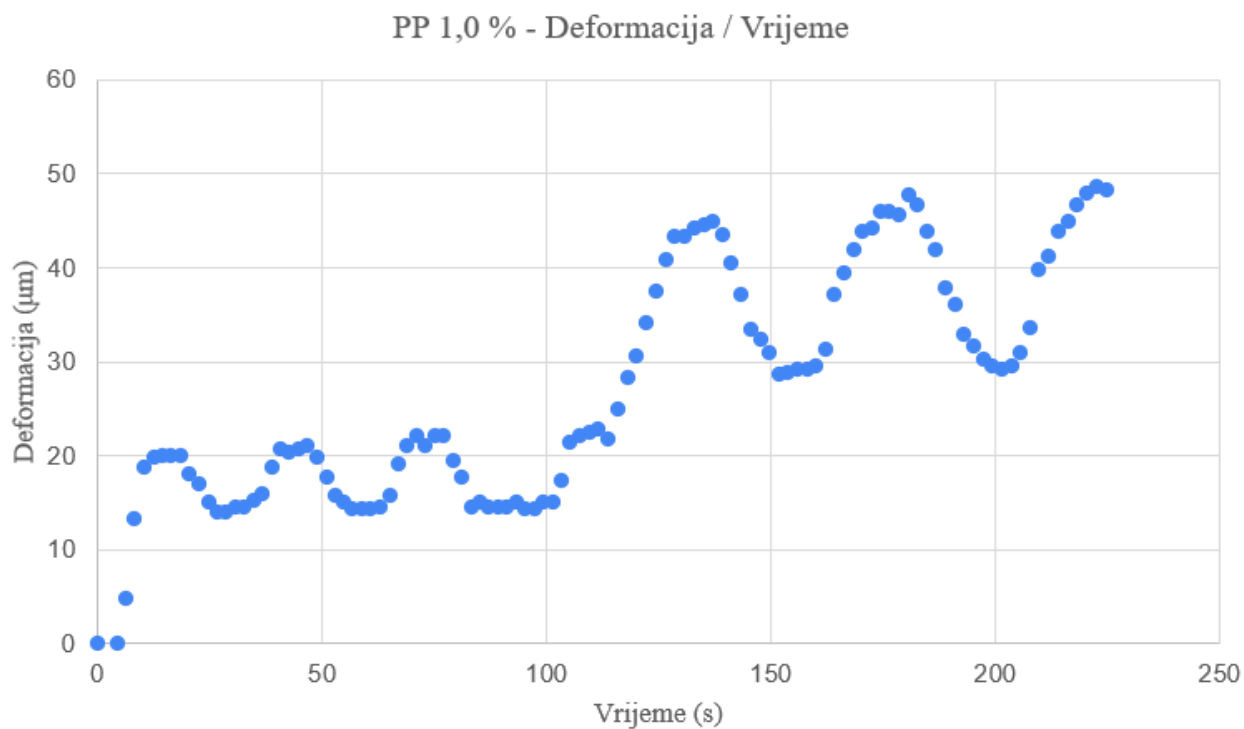
Slika 59: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana



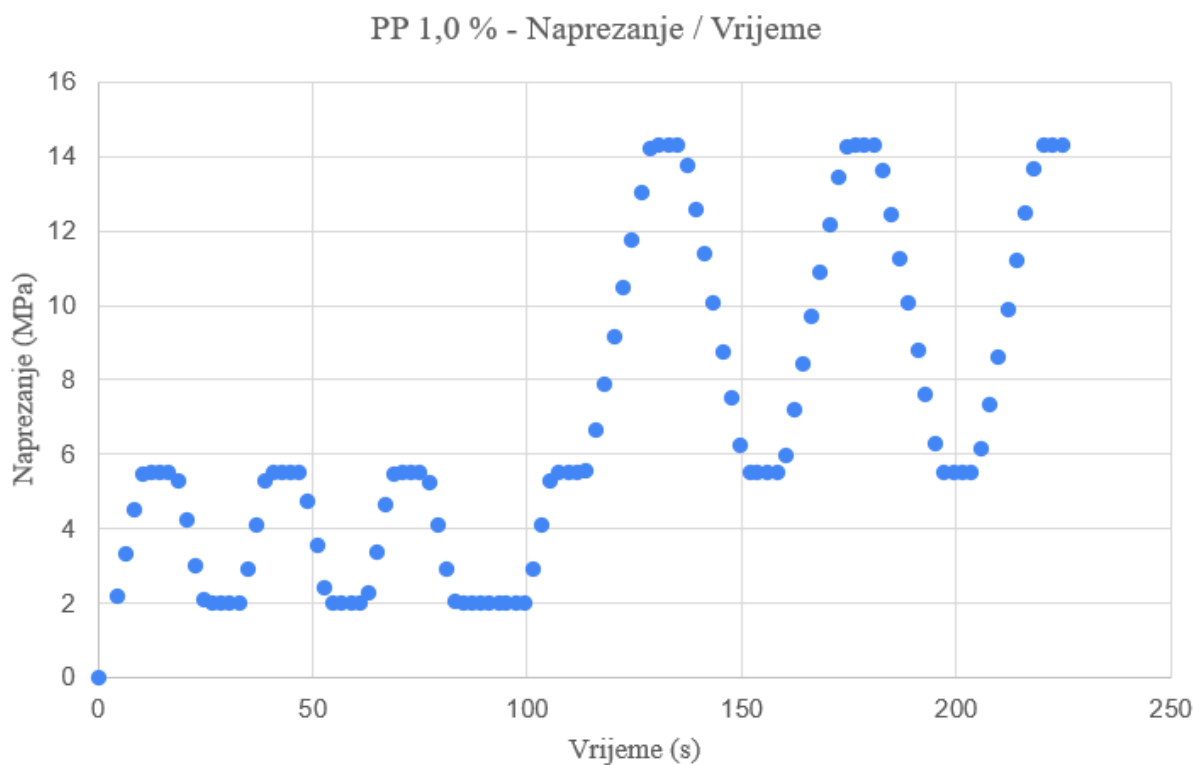
Slika 60: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



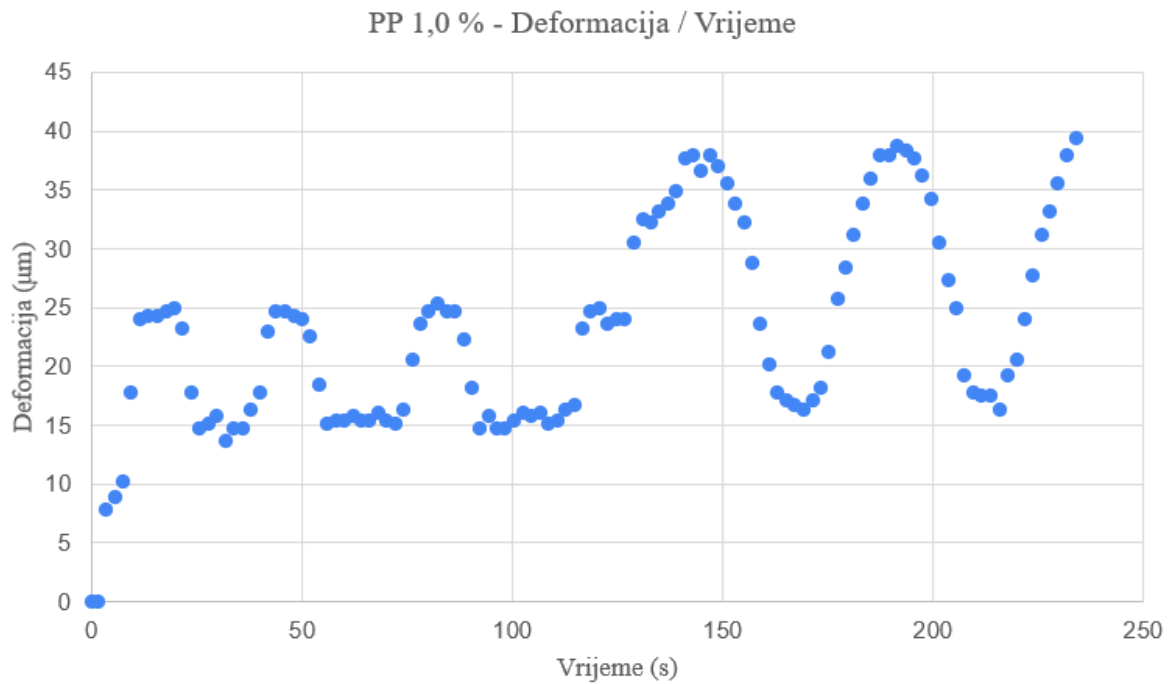
Slika 61: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



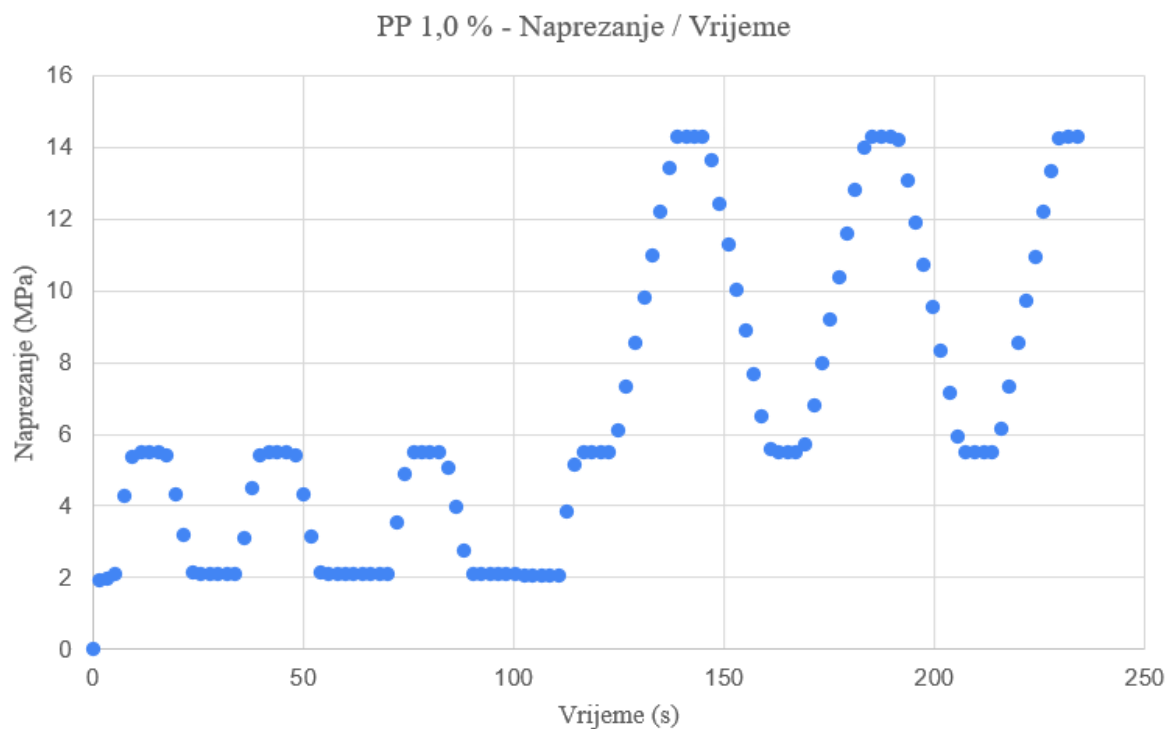
Slika 62: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



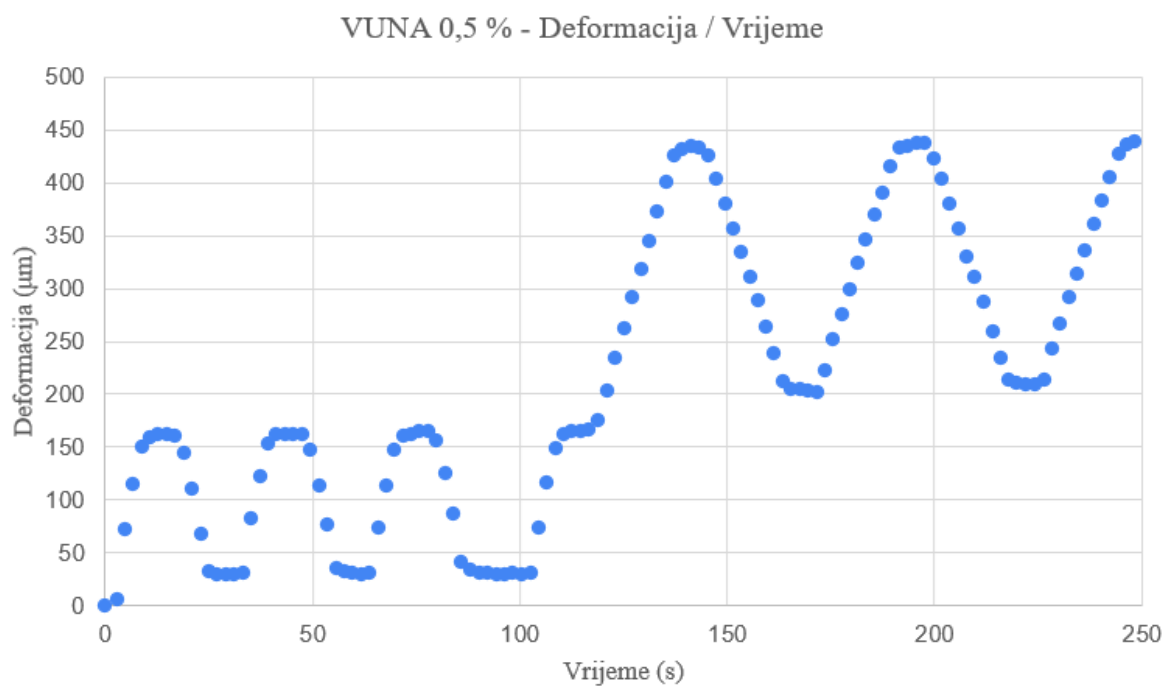
Slika 63: Dijagram zavisnosti napreznja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



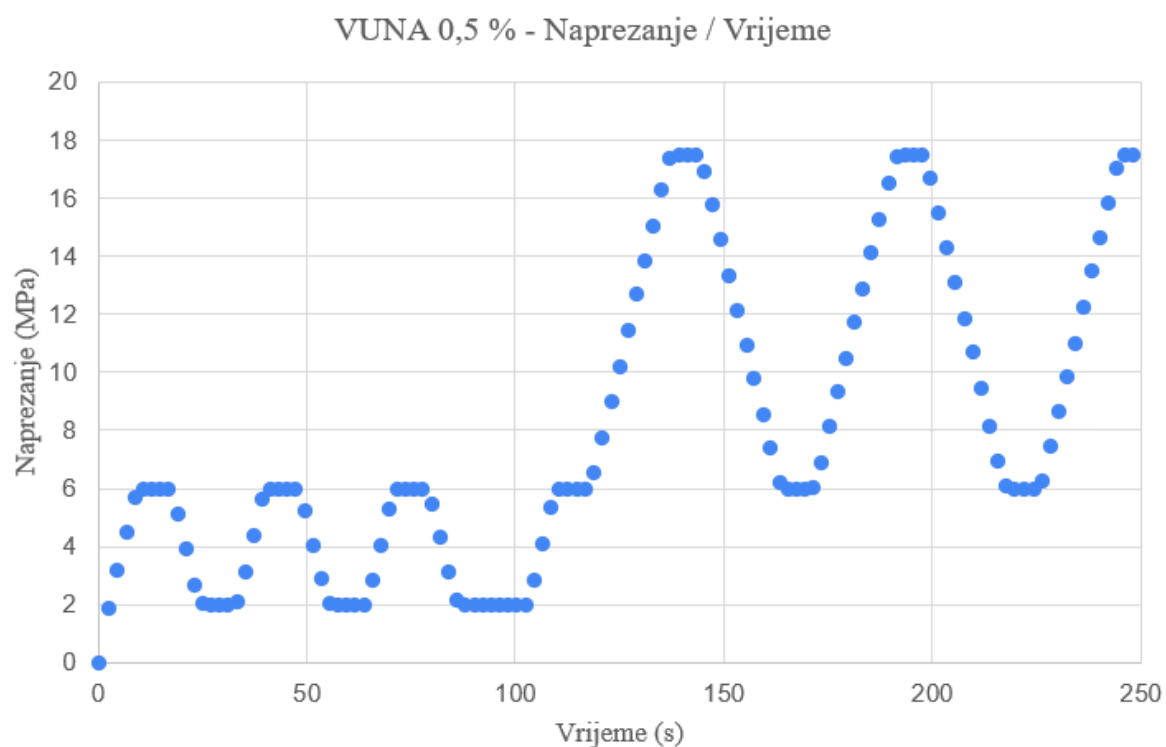
Slika 64: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



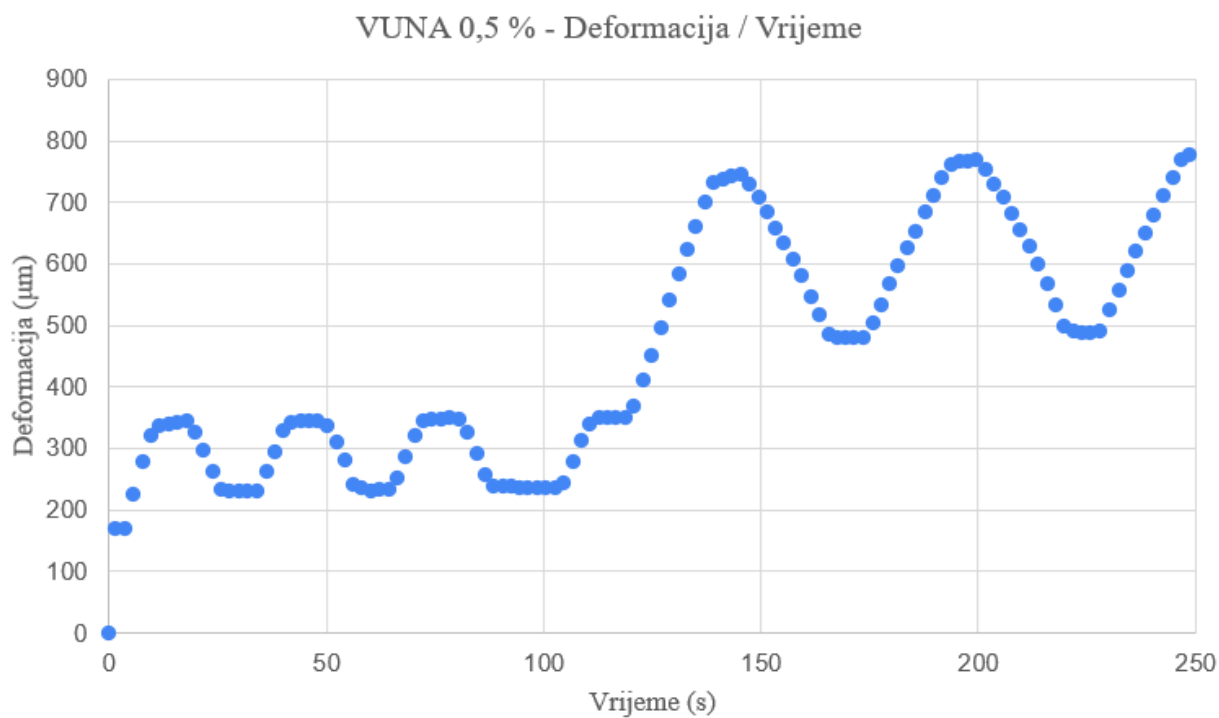
Slika 65: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 1,00 % polipropilenskih vlakana



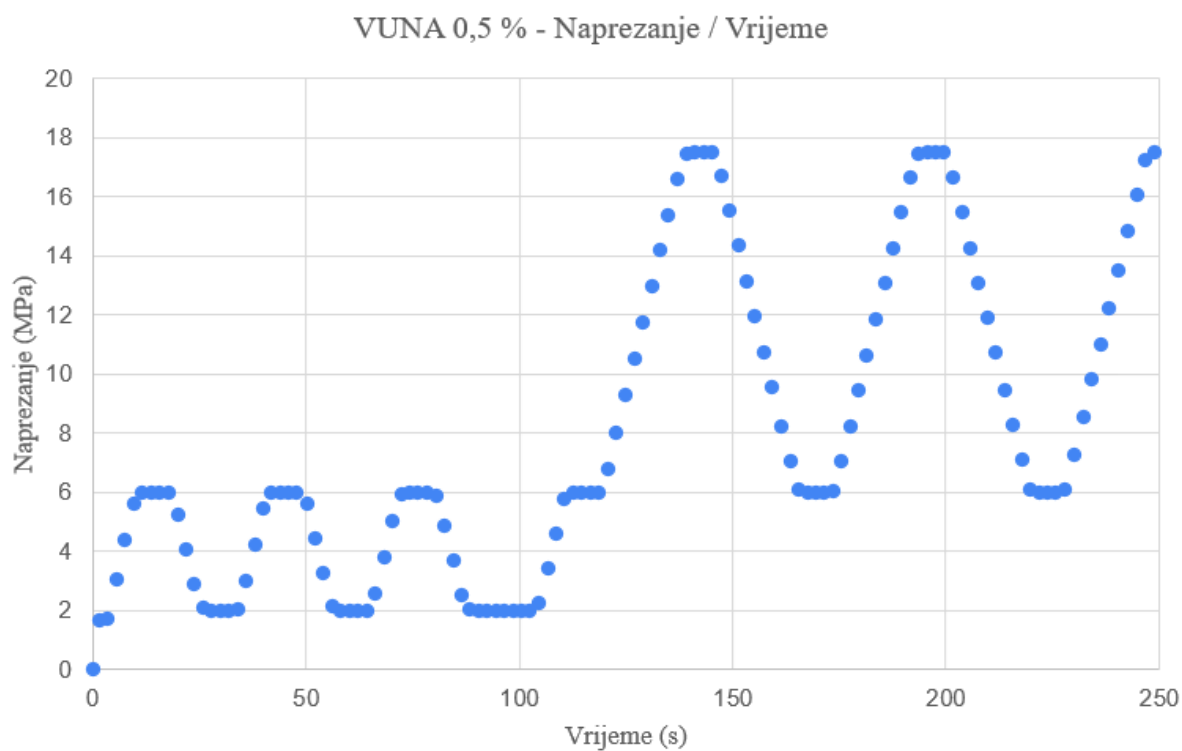
Slika 66: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunenih vlakana



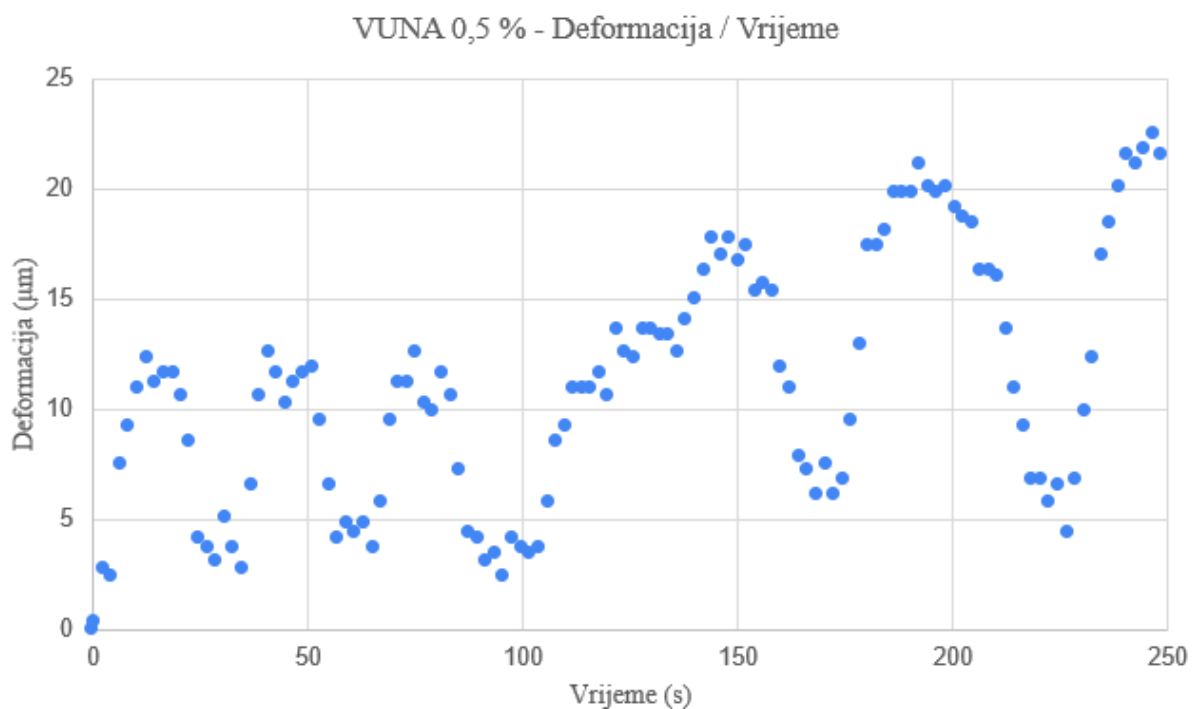
Slika 67: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 1 s dodatkom 0,50 % vunenih vlakana



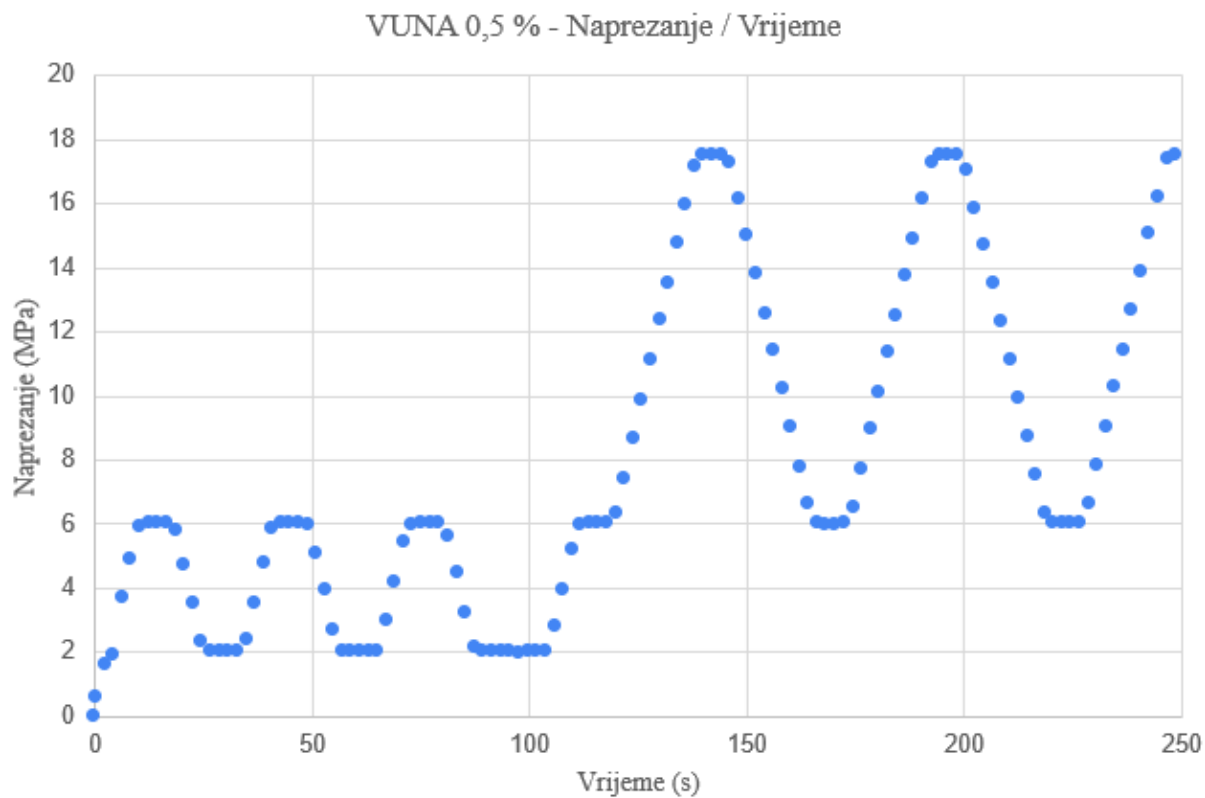
Slika 68: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunenih vlakana



Slika 69: Dijagram zavisnosti naprezanja o vremenu uzorka 2 s dodatkom 0,50 % vunenih vlakana



Slika 70: Dijagram zavisnosti deformacije o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana



Slika 71: Dijagram zavisnosti naprežanja o vremenu uzorka 3 s dodatkom 0,50 % vunениh vlakana

Iz Tablica 5. i 6. može se primjetiti kako su kod 5 uzoraka (P1, P4, P5, P6, V3) izmjerene vrijednosti deformacija značajno odstupaju te uvrštavanjem istih u izraze za inicijalni i stabilizirani modul elastičnosti rezultiraju vrijednostima modula koje nisu realne. S obzirom da se odstupanja pojavljuju kod pojedinih (ne svih) uzoraka iz iste mješavine, smatra se da se radi o pogrešci kod mjerenja. Dodatan argument tom zaključku je taj što su u radu ispitani uzorci duljine brida 15 cm, a norma HRN EN 12390 – 13:2013 i aparatura predviđaju veće uzorke. Iz tog su razloga ekstenzometri pokrili cijeli uzorak, te su mjerili uz sami rub uzorka, gdje postoji mogućnost proklizavanja prilikom deformiranja. Slijedom svega navedenog, gore navedeni uzorci ne smatraju se mjerodavnima te se odbacuju. Iako bi se trebali odbaciti svi uzorci mješavine u kojoj 2 od 3 uzorka imaju grešku mjerenja, uzimajući u obzir resurna ograničenja, za potrebe rada su ipak određene vrijednosti modula elastičnosti za preostala 4 uzorka. Točnije, kod uzoraka P2, P3, V1 i V2 provedena je daljnja analiza na temelju vrijednosti modula elastičnosti koji su bili u očekivanim granicama. Nadalje, iz podataka prikazanih u Tablicama 5. i 6., može se izvesti odnos stabiliziranog ME i inicijalnog ME za svaku skupinu uzoraka. Tako je kod betona s dodatkom 0,50 % polipropilenskih vlakana dokumentiran porast od 31,49 %, dok kod betona s vunanim vlaknima on iznosi 23,30 %.

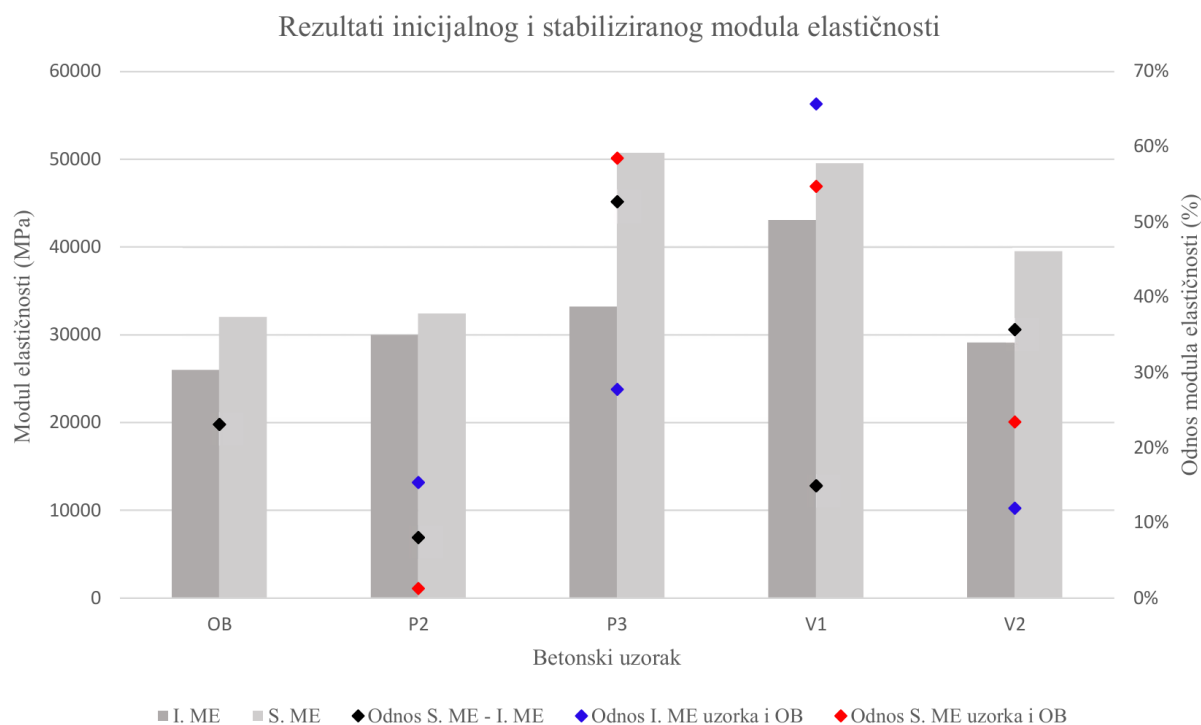
Tablica 5: Rezultati ispitivanja inicijalnog sekantnog modula elastičnosti

Vlakna	Oznaka uzorka	σ_a^m (MPa)	σ_b^m (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\varepsilon_{b,0}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\varepsilon_{a,1}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\Delta\varepsilon_0$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$E_{c,0}$ (MPa)
PP 0,5 %	P1	15,57	5,50	10,07	27,60	105,20	77,60	129.768,04
	P2	15,57	5,50	10,07	420,7	756,4	335,70	29.997,02
	P3	15,57	5,50	10,07	271,00	574,20	303,20	33.212,40
PP 1,0 %	P4	14,31	5,50	8,81	2,40	7,80	5,40	1.631.481,48
	P5	14,31	5,50	8,81	22,80	44,60	21,80	404.128,44
	P6	14,31	5,50	8,81	24,00	38,00	14,00	629.285,71
VUNA 0,5 %	V1	17,50	6,00	11,50	166,20	433,20	267,00	43.071,16
	V2	17,50	6,00	11,50	349,80	744,90	395,10	29.106,56
	V3	17,50	6,00	11,50	11,60	17,70	6,10	1.885.245,90

Tablica 6: Rezultati ispitivanja stabiliziranog sekantnog modula elastičnosti

Vlakna	Oznaka uzorka	σ_a^m (MPa)	σ_b^m (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\varepsilon_{b,2}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\varepsilon_{a,3}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\Delta\varepsilon_S$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$E_{c,s}$ (MPa)
PP 0,5 %	P1	15,57	5,50	10,07	49,00	107,30	58,30	172.727,27
	P2	15,57	5,50	10,07	446,4	757,1	310,70	32.410,69
	P3	15,57	5,50	10,07	387,50	586,10	198,60	50.704,93
PP 1,0 %	P4	14,31	5,50	8,81	2,70	9,20	6,50	1.355.384,62
	P5	14,31	5,50	8,81	29,60	48,40	18,80	468.617,02
	P6	14,31	5,50	8,81	16,40	39,40	23,00	383.043,48
VUNA 0,5 %	V1	17,50	6,00	11,50	208,80	441,10	232,30	49.504,95
	V2	17,50	6,00	11,50	488,40	779,60	291,20	39.491,76
	V3	17,50	6,00	11,50	4,40	21,10	16,70	688.622,75

Prema Slici 72., prosječni inicijalni modul elastičnosti uzoraka s 0,5 % PP vlakana iznosi 31.604,71 MPa, dok je kod uzoraka s vunenim vlaknima proračunan inicijalni modul elastičnosti od 36.088,86 MPa. U nastavku, evidentno je kako je vrijednost stabiliziranog modula elastičnosti uzoraka s 0,5 % PP vlakana 41.557,81 MPa, dok isti kod betona s vunenim vlaknima iznosi 44.498,35 MPa. Drugim riječima, beton s dodatkom vunenih vlakana pokazao je 14,19 % veću vrijednost inicijalnog, te 7,08 % veću vrijednost stabiliziranog modula elastičnosti u odnosu na beton s polipropilenskim vlaknima. Valja napomenuti kako stupanj varijacije između inicijalnog i stabiliziranog modula elastičnosti može biti indicacija podložnosti materijala mikropukotinama izazvanim naprezanjem ili mikropukotinama uzrokovanim bušenjem u slučaju kada se uzorci uzimaju iz konstrukcije.



Slika 72: Usporedba inicijalnog i stabiliziranog ME betona s vunenim i polipropilenskim vlaknima

Rast modula elastičnosti pri udjelu od 0,50 % vunenih i PP vlakana može biti objašnjen time da je poznato [22] kako udio PP vlakana u količini 0,50 % mase cementa omogućuje formiranje mikrostrukture betona veće gustoće što posljedično dovodi do rasta tlačne čvrstoće. Međutim, povećavanje udjela vlakana na 1,00 % rezultira padom tlačne čvrstoće zbog toga što vlakna koja nisu uniformno disperzirana mogu izazvati slabe točke u betonskoj matrici. Nadalje, uzorci koji sadrže vlakna manja veličine imati će bolju disperziju istih u betonskoj matrici i biti manje porozni [23]. Kako se tlačna čvrstoća betona može dovesti u korelaciju s modulom elastičnosti, ne iznenađuje činjenica da uzorci s vunenim vlaknima prosječno pokazuju veći modul elastičnosti s obzirom na njihovu finiju strukturu i kraću duljinu u odnosu na PP vlakna. Također, Liang et al. [24] istraživali su ponašanje mikro i makro PP vlakana te zaključili kako mikro vlakna imaju značajnu ulogu u odvajanju i povezivanju pora, što zapravo ima učinak pročišćavanja betonske matrice od pora – a samim time i povećava tlačnu čvrstoću. S druge strane, makro vlakna mogu poboljšati krhki slom karakterističan za beton, s obzirom da mogu premostiti pukotine zbog veće krutosti i ploštine. Dodatno, treba napomenuti kako metode bazirane na tlačnoj čvrstoći često nedovoljno točno procjenjuju modul elastičnosti te ne mogu biti primjenjive za više vrsta betona. Naprotiv, preporučljivo je korištenje modela koji se zasnivaju primarno na tipu korištenog agregata i gustoći betona [25]. Nadalje, zanimljivo je

primijetiti varijacije omjera S. ME i I. ME – kod uzoraka P2 i V1 taj odnos je manji u odnosu na referentni beton, a kod uzoraka P3 i V2 taj odnos ima veću vrijednost. Unatoč spomenutim različitim odnosima ME, svi analizirani uzorci s dodatkom vlakana (PP i vuna) pokazali su veće vrijednosti inicijalnog i stabiliziranog modula elastičnosti u usporedbi s običnim betonom. Stoga, valja istaknuti kako dodatak vlakana u beton rezultira većom gustoćom betonske matrice te smanjenjem poroznosti, što posljedično dovodi do porasta modula elastičnosti.

6. Zaključak

Interpretacijom rezultata eksperimentalnih ispitivanja može se izvesti zaključak kako se dodatkom polipropilenskih ili vunениh vlakana u beton mogu unaprijediti njegova mehanička svojstva. Naime, uzorci s dodatkom vunениh vlakana pokazali su najveći rast tlačne čvrstoće koja je 48 % veća u odnosu na referentni beton. Nadalje, beton s dodatkom polipropilenskih vlakana manifestirao je veću tlačnu čvrstoću za čak 32 % pri udjelu vlakana od 0,50 %, dok je porast tlačne čvrstoće iznosio 21 % kod betona s 1,00 % vlakana. Slijedom navedenog, bilo bi potrebno ponoviti ispitivanja na uzorcima s udjelom vlakana u preciznijim gradacijama između vrijednosti 0,25 % i 1,00 % kako bi se definirao udio vlakna pri kojem je porast tlačne čvrstoće maksimalan. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka s 1,50 % i 2,00 % PP vlakana ne prihvaćaju se i ne smatraju mjerodavnima. Naime, kod tih je uzoraka prisutan značajan volumen šupljina te je tlačna čvrstoća u potpunosti podbacila. Pretpostavka je da je takvo stanje betona posljedica neadekvatnog doziranja vode ili superplastifikatora.

S druge strane, analizom rezultata vlačne čvrstoće može se doći do zaključka kako polipropilenska i vunena vlakna pozitivno utječu na vlačnu čvrstoću betona s obzirom da je kod svih ispitanih uzoraka zabilježen rast. Iz grafova je primjetno kako uzorke s vlaknima karakterizira duktilni slom – pucanjem betona vlakna imaju sposobnost preuzimanja sile sve do konačnog sloma uzorka. Kako je za obični beton karakterističan kruti slom, dolazi se do zaključka da i sam oblik grafa (duktilni slom) uzoraka s vlaknima ukazuje na povećanje vlačne čvrstoće. Vrijednost porasta za uzorke s 0,50 % i 1,00 % polipropilenskih vlakana iznosila je redom 17,76 % te 13,90 %, dok je rast kod uzorka s 0,50 % vunениh vlakana iznosio 7,74 %. Pretpostavlja se da su vunena vlakna izazvala manji rast čvrstoće u odnosu na PP vlakna s obzirom da, u odnosu na PP vlakna, imaju manju mogućnost premošćivanja vlačnih mikropukotina zbog svoje finije i mekane strukture. Međutim, rast od 7,74 % ukazuje na to da vunena vlakna imaju potencijal za uporabu u betonu kada je cilj povećati vlačnu čvrstoću. Kako bi se preciznije moglo korelirati vlačnu čvrstoću i udio vunениh vlakana, nužno je učiniti dodatna ispitivanja s različitim gradacijama udjela vlakana.

Konačno, ispitivanjem modula elastičnosti demonstrirano je kako su uzorci s vunениm vlaknima ostvarili 14,19 % veću vrijednost inicijalnog, te 7,08 % veću vrijednost stabiliziranog modula elastičnosti u odnosu na uzorke s dodatkom polipropilenskih vlakana. Takav odnos rezultata ME u skladu je s dostupnom literaturom s obzirom da su vlakna vune, u odnosu na PP vlakna, bolje distribuirana u betonskoj matrici te ju čine gušćom.

Zaključno, evidentno je kako su dodatkom PP vlakana u beton dobiveni rezultati koji su u skladu s brojnim dostupnim podacima iz literature. S druge strane, ispitivanja svih triju mehaničkih svojstava betona s dodatkom vunениh vlakana generirala su pozitivne vrijednosti, stoga se dolazi do zaključka kako vunena vlakna imaju potencijal kao komponenta betona. Štoviše, potrebno je provesti daljnja eksperimentalna ispitivanja trajnosti vune u betonu s obzirom na njeno organsko podrijetlo, kao i detaljnije varirati omjere vune i ostalih komponenti kako bi se definirao optimalan udio vunениh vlakana za poboljšanje mehaničkih svojstava ili njihovo održavanje na razini rezultata dobivenih na uzorcima s PP vlaknima.

Literatura

- [1]: RAS., M.: *Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete*, Journal of Engineering Sciences, Assiut University, 2006.
- [2]: Małek, M., Życiński, W., Jackowski, M., Wachowski, M.: *Effect of polypropylene fiber addition on mechanical properties of concrete based on portland cement*, Technical Sciences, 2018.
- [3]: Monazami, M., Gupta, R.: *Influence of polypropylene, carbon and hybrid coated fiber on the interfacial microstructure development of cementitious composites*, Fibers, 2021.
- [4]: El-Newihy, A., Azarsa, P., Gupta, R., Biparva, A.: *Effect of polypropylene fibers on self-healing and dynamic modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete*, Fibers, 2018.
- [5]: Alzyoud, S., Ziadat, A.: *Effect of fibers on concrete fresh, mechanical and transport properties*, 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2018.
- [6]: Afroughsabet, V., Ozbakkaloglu, T.: *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers*, Construction and building materials 94, 2015.
- [7]: Gencil, O., Ozel, C., Brostow, W., Martínez-Barrera, G.: *Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres*, Materials Research Innovations, 2011.
- [8]: Behfarnia, K., Behravan, A.: *Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels*, Materials & Design, 2014.
- [9]: Dharan, D. S., Lal, A.: *Study the effect of polypropylene fiber in concrete*, International Research Journal of Engineering and Technology, 2016.
- [10]: Ahmed, T. H., Daoud, O. M. A.: *Influence of polypropylene fibres on concrete properties*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2016.
- [11]: Najimi, M., Farahani, F.M., Pourkhorshidi, A.R.: *Effects of polypropylene fibers on physical and mechanical properties of concretes*, Concrete Department, Building and Housing Research Centre, Tehran, Iran, 2009.
- [12]: Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Ebid, A. A. K., Alabduljabbar, H.: *An integrated approach to using sheep wool as a fibrous material for enhancing strength and transport properties of concrete composites*, Materials 15, 2022.
- [13]: Bjegović, N., Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
- [14]: Coppin, B., Le Map-Lujic, E., Bornet, L., Lejeune, T.: *Adding synthetic fibres to concrete to improve its mechanical properties*, 2024.
- [15]: Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D.: *Concrete 2nd edition*, Technical Documents, 2003.

- [16]: <https://mbcc.sika.com/en-sg/products/mastergleniumsky/masterglenium-sky-8320---high-range-water-reducing-admixture>, 6.7.2024.
- [17]: <https://www.bitpromet.hr/polipropilenska-vlakna-za-glazuru-900-gr/prid/628>, 5.7.2024.
- [18]: Budić, M.: *Analiza trajnosnih svojstava betona s recikliranim komponentama*, 2023.
- [19]: Bjegović, N., Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona – mjerne metode*, 2022.
- [20]: Sun, Z., Xu, Q.: *Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete*, Materials Science and Engineering A, 2009.
- [21]: Subramanian, N.: *Elastic modulus of concrete*, 2021.
- [22]: Asgarian, A., Roshan, N., Ghalehnovi, M.: *The Strength, Microstructure, and ecological assessment of concrete mix incorporating waste glass powder and polypropylene fiber*, 2023.
- [23]: Malić, N. T., Bede, N., Kožar, I.: *Damage detection in steel fiber reinforced concrete using resonant method*, 2019.
- [24]: Liang, N., You, X., Yan, R., Miao, Q., Liu, X.: *Experimental investigation on the mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced roller-compacted concrete pavements*, 2022.
- [25]: Wok Sun, R., Fanourakis, G. C.: *An assessment of factors affecting the elastic modulus of concrete*, 2022.