

# Utjecaj tretiranja vlakana brnistre mikrovalnom pećnicom na svojstva cementnog morta

---

Musinov, Toni

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:886101>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**

*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**

**Toni Musinov**

**Split, 2021.**

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

**Toni Musinov**

**Utjecaj tretiranja vlakana brnistre mikrovalnom pećnicom na  
svojstva cementnog morta**

**Diplomski rad**

**Split, 2021.**

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: Toni Musinov  
BROJ INDEKSA: 778  
KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**  
PREDMET: GRAĐEVINSKI MATERIJALI I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj tretiranja vlakana brniste mikrovalnom pećnicom na svojstva cementnog morta

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti svojstva mikroarmiranog betona, te primjenu prirodnih vlakana u svrhu mikroarmiranja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke cementnog morta. Referentna mješavina je standardni mort, a ostali mortovi su ojačani vlaknima brniste dobivene stavljanjem grančica u otopinu 15 % NaOH i zatim u mikrovalnu pećnicu na 800 W kroz period od 10 minuta. Vlakna su duljine 1, 2 i 3 cm a dodaju se u količini od 0.5 i 1 % ukupnog volumena. Potrebno je odrediti čvrstoću na savijanje i tlak na 28-dnevnim uzorcima, te ih usporediti sa rezultatima ostalih vlaknima ojačanim uzorcima. Rezultate treba usporediti sa rezultatima cementnog morta ojačanim vlnama brniste koja je tretirana sa 15 % NaOH tijekom 8 dana na sobnoj temperaturi, a uzorci su prethodno napravljeno na Katedri za materijale. Na nekoliko uzoraka potrebno je prikazati dijagram opterećenje – pomak i usporediti ga sa referentnim mortom. Temeljem dobivenih rezultata potrebno je komentirati kvalitetu vlakana vezano za način maceracije.

U Splitu, 18.10.2020.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc. Sandra Juradin

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

# **Utjecaj tretiranja vlakana brnistre mikrovalnom pećnicom na svojstva cementnog morta**

## ***Sažetak:***

Brnistra je samonikla grmolika biljka mediteranskog područja, gdje se nekad koristila kao sirovina za tekstil, izradu cipela, užadi, jedara, mreža, košara itd. Sve je veći trend ispitivanja i korištenja prirodnih vlakana u građevinarstvu iz nekoliko razloga kao što je ekološka prihvatljivost, lokalna dostupnost, a potom i jeftinija varijanta u odnosu na sintetička i čelična vlakna. U ovom radu će se ispitati svojstva morta ojačanim vlaknima brnistre. Vlakna su tretirana u otopini od 15% NaOH u mikrovalnoj pećnici na 800W tijekom 10 minuta. Dobiveni rezultati će se usporediti sa rezultatima referentnog morta i rezultatima mortova ojačanih vlaknima brnistre koja su tretirana u 15% NaOH na sobnoj temperaturi tijekom 8 dana.

## ***Ključne riječi:***

Mikroarmirani mort, vlakna, brnistra, mikrovalna tehnika, NaOH

# **Influence of microwave treatment of spanish broom fibers on the properties of cement mortar**

## ***Abstract:***

Spanish broom is wild shrub plant from the Mediterranean area, where it was once used as a raw material for textiles, shoes, ropes, sails, nets, baskets, etc. Today, there is a growing trend on testing and using natural fibers in construction industry for several reasons, such as environmental friendliness, local availability and cheaper variant compared to synthetic and steel fibers. In this paper, the properties of mortar with reinforced broom fibers will be examined. The fibers were treated in a solution of 15% NaOH in a microwave for 10 minutes. The obtained results will be compared with the results of the reference mortar and the results of broom fiber reinforced mortars treated in 15% NaOH at room temperature for 8 days.

## ***Keywords:***

Microreinforced mort, fibers, spanish broom, microwave technique, NaOH

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. MIKROARMIRANI BETON .....	2
2.1. Općenito o mikroarmiranom betonu .....	3
2.2. Interakcija vlakana i cementne matrice .....	6
2.2.1. Interakcija vlakana i cementne matrice u svježem stanju kompozita .....	6
2.2.2. Interakcija vlakana i matrice u krutom stanju kompozita .....	8
3. MIKROARMIRANJE PRIRODNIM VLAKNIMA .....	11
3.1. Podjela prirodnih vlakana .....	12
3.2. Kemijski sastav biljnih vlakana .....	13
3.3. Prednosti upotrebe prirodnih vlakana .....	15
3.4. Nedostaci upotrebe prirodnih vlakana .....	15
3.5. Interakcija prirodnih vlakana i matrice .....	15
4. BRNISTRA .....	17
4.1. Povijest brnistre .....	19
4.2. Sastav brnistre .....	20
4.3. Provedena istraživanja- svojstva brnistre .....	22
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	25
6.1. Materijali .....	34
6.1.1. Vlakna brnistre .....	34
6.1.2. Cement .....	37
6.1.3. Pijesak .....	39
6.1.4. Voda .....	40
6.2. Izrada morta .....	40
6.3. Ispitivanje očvrsljih uzoraka morta .....	43
7. ZAKLJUČAK .....	49
8. LITERATURA .....	51

## 1.UVOD

Industrija graditeljstva odgovorna je za potrošnju velikih količina neobnovljivih resursa. Ova aktivnost generira ne samo milijune tona mineralnog otpada već i milijune tona ugljikovog dioksida, koji značajno zagađuje okoliš. Beton je najčešće korišteni materijal na Zemlji, a poznat je po visokoj tlačnoj i maloj vlačnoj čvrstoći. Dodavanjem čelične armature zamjenjujemo nedostatak koji beton ima u vlačnoj zoni. Ovako klasično armirani beton ima visoku propusnost koja omogućuje prodiranje vode i drugih agresivnih kemikalija, što dovodi do problema kao što je korozija. Korozija čeličnih elemenata zapravo je glavni razlog propadanja infrastrukture, dok je trajnost betonskih konstrukcija povezana s okolišem. Ako uspijemo povećati životni vijek betona, njegov negativni utjecaj na okoliš bi se znatno smanjio. [1]

Ekološka svijest diljem svijeta dovela je do istraživanja i razvoja jeftinih i biorazgradivih materijala koji su dostupni diljem svijeta. Upotreba biljaka i njihovih vlakana kao ojačanje kompozita, dobila je značajan interes posljednjih godina. Zamjenom tradicionalnog građevinskog materijala i upotrebom kompozita sa prirodnim materijalima možemo postići stvarnost koja doprinosi održivijoj ekonomiji. [1]

Mnoge biljke kao što su brnistra, konoplja, juta, lan itd. pripadaju celuloznoj klasi biljaka. Sastoje se uglavnom od celuloze, hemceluloze i lignina. Ove su biljke široko rasprostranjene po svijetu, a njihova upotreba u tekstilnoj industriji je već odavno poznata. Imaju brojne prednosti kao što su: biorazgradljivost, lokalna dostupnost, obnovljivost sirovina, nisu abrazivna, jeftina proizvodnja i obrada. Zbog dobrih mehaničkih svojstava, kao što su vlačna čvrstoća i žilavost, mogu se upotrijebiti kao ojačanje kompozita, odnosno za mikroarmiranje cementne matrice. [2]

Ovaj rad raspravlja o uporabi biljnih vlakana kao ojačanja cementne matrice, gdje su korištena vlakna brnistre prethodno obrađena pomoću mikrovalne tehnike. Tretiranjem vlakana u 15% otopini NaOH i u mikrovalnoj pećnici 10 min na 800W, mijenjamo samu strukturu vlakana. Uklanjammo dijelove vlakana koji su osjetljivi na djelovanje alkalija u cementnoj matrici i općenito utječemo na njihovu interakciju sa matricom. Dobivene mješavine vlakana brnistre i morta, u očvrslom stanju, ispitujemo na vlačnu i tlačnu čvrstoću. Dobivene rezultate uspoređujemo sa referentnim mortom bez dodataka vlakana.

Upotreba mikrovalne tehnike relativno je novi izum u području građevinarstvu i tekstilnoj industriji. Pokazala se kao efikasnom i brzom tehnikom gdje energija mikrovalova lako prodire u unutarnje čestice biljaka. Na taj način sve se čestice istovremeno zagrijavaju, smanjujući problem prijenosa topline. Upotreba mikrovalne tehnike još uvijek nije dovoljno dobro istražena i otvorena je za daljna istraživanja.

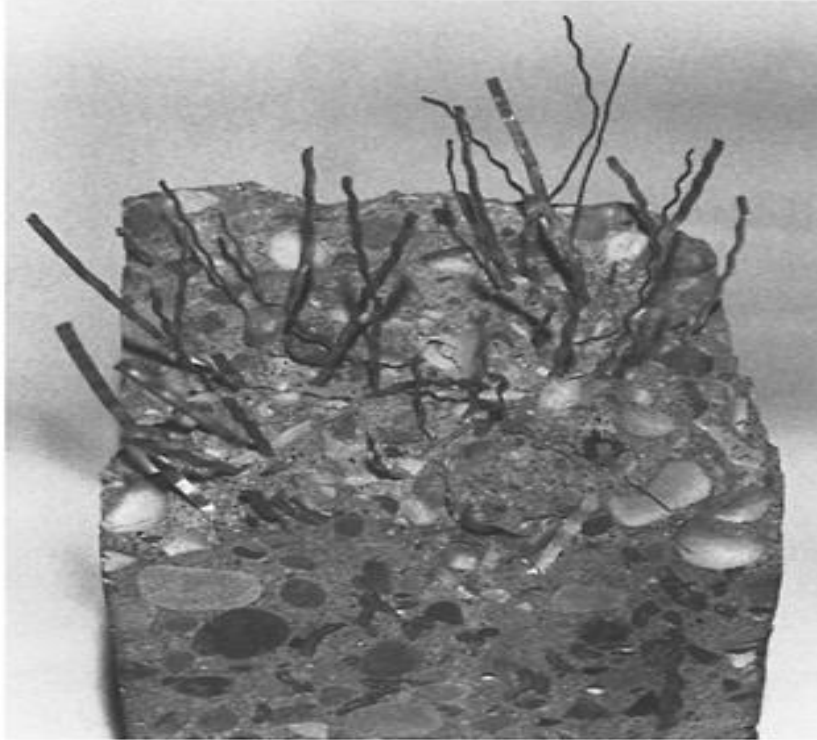
## 2. MIKROARMIRANI BETON

Matrica krtoq materijala poput betona posjeduje malu vlačnu čvrstoću, ograničenu duktilnost i mali otpor na lom. U običnom betonu i sličnim krhkim materijalima, strukturne pukotine razvijaju se i prije opterećenja povodom sušenja i skupljanja uzoraka. Krhkost se u strukturnom elementu nadoknađuje uvođenjem čelika za ojačanje ili prednapinjanjem u vlačnoj zoni. Međutim, to ne poboljšava osnovna svojstva betona. To je samo metoda korištenja dvaju materijala za potrebne karakteristike koje bi taj kompozit u cjelini trebao imati. Glavni problem male vlačne čvrstoće matrice i zahtijevane visoke snage i dalje postoji. Tako dolazimo do upotrebe malih, usko razmaknutih i ravnomjerno raspršenih vlakana. [3]

Jedan od značajnih građevinskih materijala koji je u razvojnom trendu je mikroarmirani beton. Općenito, mikro ojačani betoni su kompozitni materijali dobiveni jačanjem cementne matrice pomoću ravnomjerno raspoređenih vlakana. Ovaj koncept nije ništa novo, a u građevinskoj je praksi prisutan mnogo duže nego što je to slučaj s uporabom betona.

Princip ojačanja krkih građevinskih materijala različitim vlaknima seže iz daleke prošlosti. Kolibe napravljene upotrebom pečene gline ojačane slamom i mortom ojačanim životinjskom dlakom su primjeri materijala ojačanog vlaknima. Prvi moderni primjer građevinskog materijala, ojačanog vlaknima, te proizveden sa kontroliranom i predvidljivom kvalitetom, bio je azbest-cement. Azbest - cement se koristio u svrhe oblaganja ploča, krovova i cijevi. Njegova upotreba opada oko 1970.-ih zbog opasnosti po zdravlje ljudi. Azbestna vlakna su zamijenjena polimernim vlaknima, a nakon polimernih počela su se koristiti staklena vlakna. Kasnije su se pojavila čelična vlakna, koja su se pokazala izuzetno kvalitetna i iskoristiva. Na *slici 1*, prikazan je primjer mikroarmiranog betona armiran čeličnim vlaknima.





*Slika 1. Betonski element armiran čeličnim mikro vlaknima [4]*

## **2.1. Općenito o mikroarmiranom betonu**

Mikroarmirani beton je kompozitni materijal kojemu se u procesu miješanja, osim uobičajenih sastojaka betona, dodaju mala diskontinuirana vlakna velike čvrstoće. Osim dodanih vlakana, mikroarmirani beton se od običnog betona razlikuje po manjoj količini krupnog agregata, manjem maksimalnom zrnom agregata i većoj količini cementa. [5]

Ova vrsta betona se upotrebljava u nekonstruktivnim elementima gdje glavna armatura nije presudna za stabilnost i cjelovitost konstrukcije. Bitno je naglasiti da vlakna ne mogu zamijeniti glavnu konstruktivnu armaturu u nosivim elementima. Tako se mikroarmirani beton primjenjuje u: tunelogradnji, industrijskim podovima, kod predgotovljenih elemenata, aerodromima, pločama mostova, kolničkim konstrukcijama, za izradu tankih ljuski, kupola, bazena i hidrotehničkih građevina, za sanaciju armirano betonskih konstrukcija, te u konstrukcijama izloženim udarnim opterećenjima, potresima, eksplozijama ili visokim temperaturama. [5]

Vlakna se mogu podijeliti na čelična, sintetička i prirodna vlakna. Dok se sintetička vlakna dalje mogu podijeliti na organska i anorganska, a prirodna na biljna, životinjska i mineralna vlakna. Neka vlakna su poprilično kruta kao što su čelična vlakna, dok su vlakna od polipropilena ili staklena vlakna poprilično fleksibilna. [5]



*Slika 2. Sintetička vlakna [6,7]*



*Slika 3. Čelična vlakna [6,7]*



*Slika 4. Primjeri prirodnih biljnih vlakana [8]*

Razlog upotrebe vlakana je pojačavanje svojstava krhke i lomljive cementne matrice. Ovisno o vrsti i sadržaju vlakana, ovo poboljšanje može u različitoj mjeri uključivati poboljšanja vlačne ili savojne čvrstoće, žilavosti, duktilnosti, sposobnosti apsorpcije energije, otpornosti na udar, otpornosti na zamor, propusnost i trajnosti kompozita.[6] Također, upotrebom vlakana odgađamo širenje mikropukotina. To se postiže tako da vlakna prenose naprezanja s mjesta nastalog presjeka na susjedne presjeke.

Iako učinak vlakana na mehanička svojstva betona može biti kontradiktoran, može se reći da su najvažniji učinci vlakana na mehanička svojstva betona: [5]

- vlakna malo utječu na tlačnu čvrstoću betona
- vlakna mogu poboljšati dinamička svojstva betona
- vlakna mogu bitno povećati žilavost i energiju sloma betona
- vlakna mogu bitno poboljšati prionjivost betona i armature
- utjecaj vlakana na puzanje betona je zanemariv
- vlakna mogu bitno smanjiti skupljanje betona
- vlakna mogu potpuno zamijeniti primarnu armaturu u podnim pločama i kolnicima

## **2.2. Interakcija vlakana i cementne matrice**

Vlakna utječu na svojstva kompozita u svježem i u krutom stanju, ali često u suprotnim funkcijama. Na primjer, količinsko povećanje vlakana u krutom stanju prirodno teži poboljšanju kvaliteti kompozita, ali također smanjuje fluidnost smjese u svježe miješanom stanju. To znači 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. [5]

Mala količina vlakana ima najmanje štetni utjecaj na svojstva kompozita u svježe miješanom stanju, ali malo pridonosi poboljšanju svojstva. Dok veća količina vlakana predstavljaju 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 do kompromisa koji daju najbolja moguća svojstva kompozita. [5]

### **2.2.1. Interakcija vlakana i cementne matrice u svježem stanju kompozita**

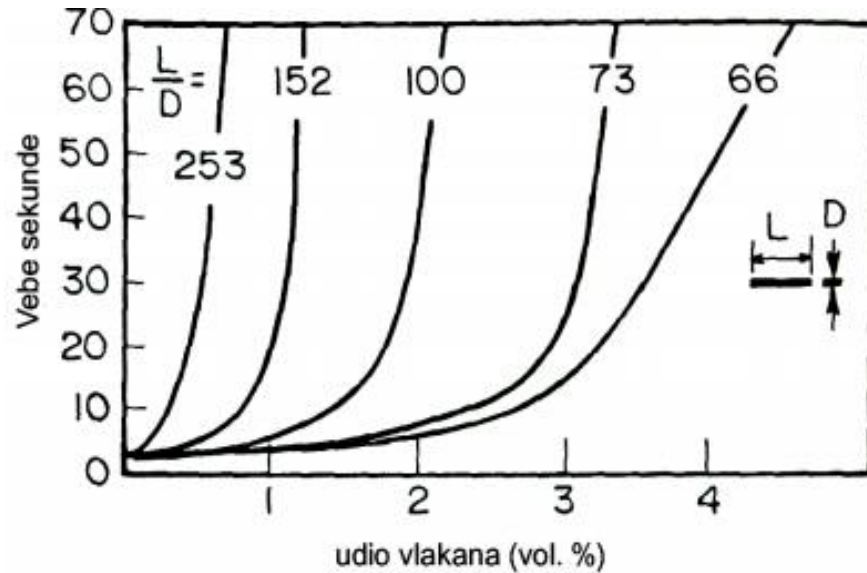
Mikroarmirani beton u svježem stanju treba imati dovoljnu obradivost da se može pravilno ugraditi, zbijati i njegovati, a da se pritom osigura pravilna raspodjela vlakna, bez segregacije i grudvanja. [8] Dodavanjem bilo koje vrste vlakana koja ne upijaju vodu u cementnoj pasti, mortu ili betonu, smanjujemo fluidnost smjese zbog iglastog oblika i visoke specifične površine vlakana. Dok vlakna koja apsorbiraju vodu mogu uzrokovati daljnje smanjenje fluidnosti smjese. [5]

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. [5]

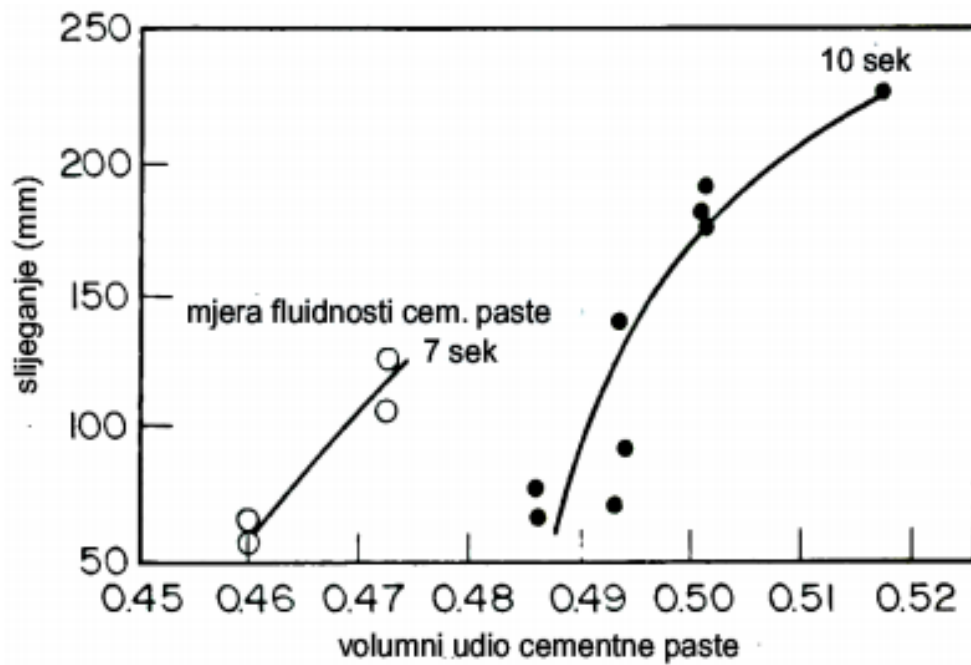
Hannant i suradnici (1947.g.) su definirali točnu granicu o sadržaju vlakana u određenom mortu, iznad koje obradivost naglo opada. Takva ograničenja ovise o vrsti vlakana i o sastavu morta. Na slici 5. prikazali su da veći faktor oblika vlakana nepovoljno djeluje na konzistenciju kompozita. Pri ispitivanju su koristili čelična vlakna. [4,5]

Peiffer i sur. (1994.g) su pokazali da obradivost kompozita ovisi o količini cementne paste. Što je veći sadržaj cemente paste, tj. volumenski udio tekuće faze unutar kojeg se vlakna mogu okretati i rotirati, bolja je obradivost za bilo kojeg sadržaja vlakana. (slika 6.) [4,5]

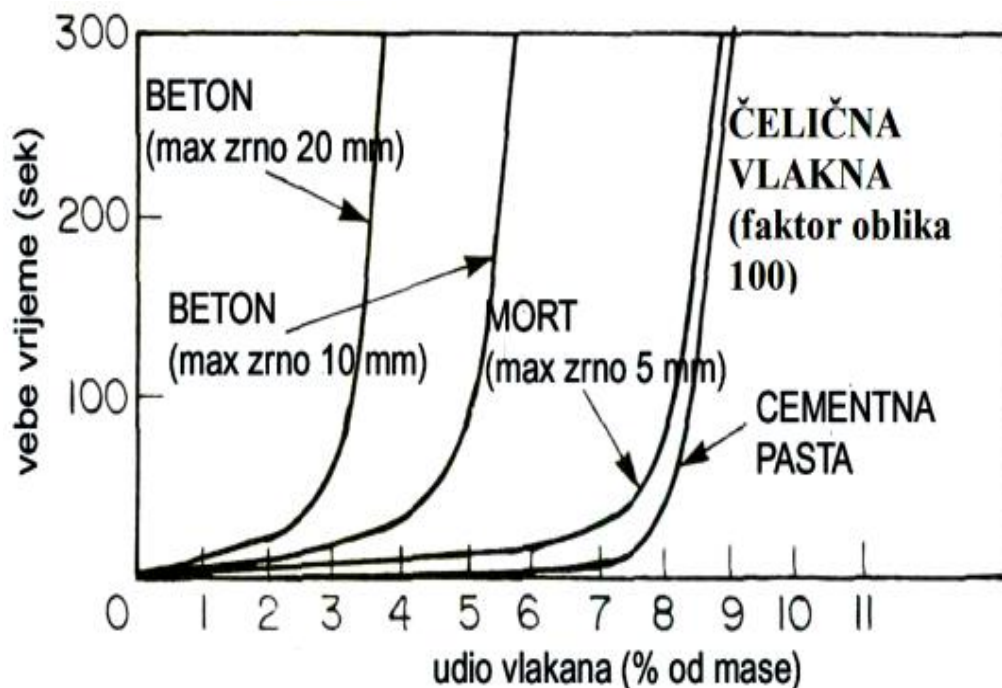
Na slici 7. možemo primjetiti da se povećanjem maksimalnog zrna agregata smanjuje količina čeličnih vlakana, dok se povećanjem vlakana smanjuje konzistencija kompozita. (Hannat, 1978.) [4]



Slika 5. Utjecaj faktora oblika vlakana na obradivost mikroarmiranog morta, ojačan čeličnim vlaknima (Hannant, 1978.) [5]



Slika 6. Utjecaj volumnog udjela i konzistencije paste na obradivost mortova ojačanim čeličnim vlaknima (Peiffer, 1994.) [5]



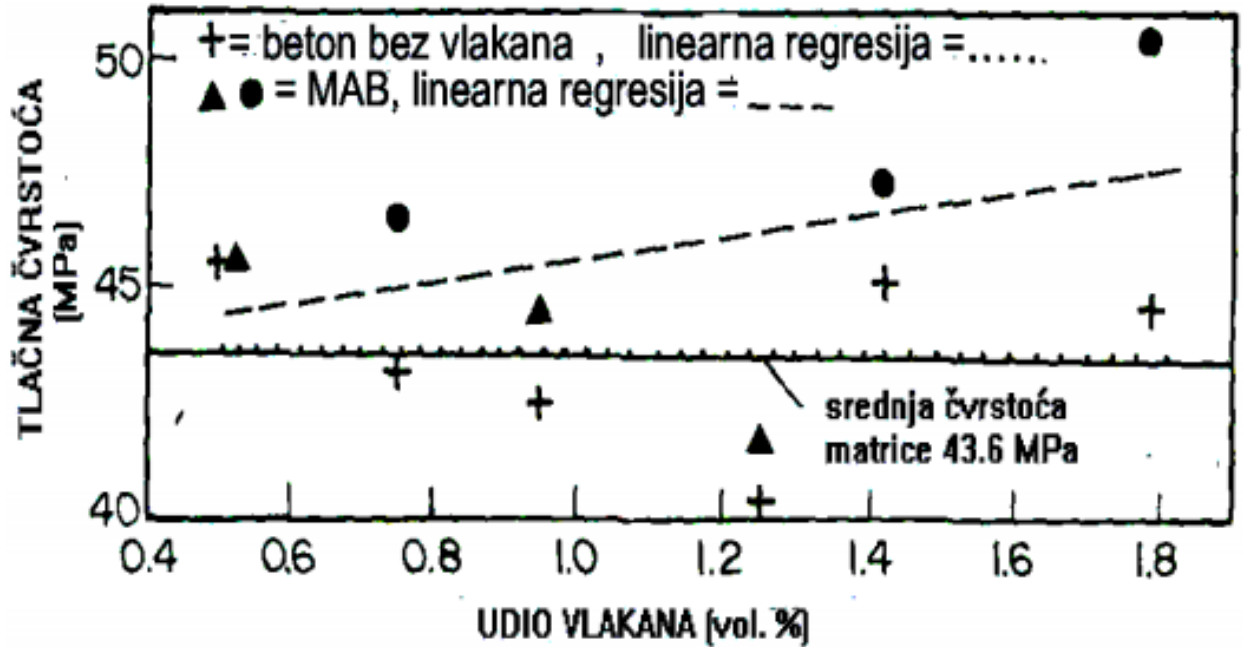
Slika 7. Utjecaj maksimalnog zrna agregata na obradljivost kompozita (Hannat, 1978) [5]

### 2.2.2. Interakcija vlakana i matrice u krutom stanju kompozita

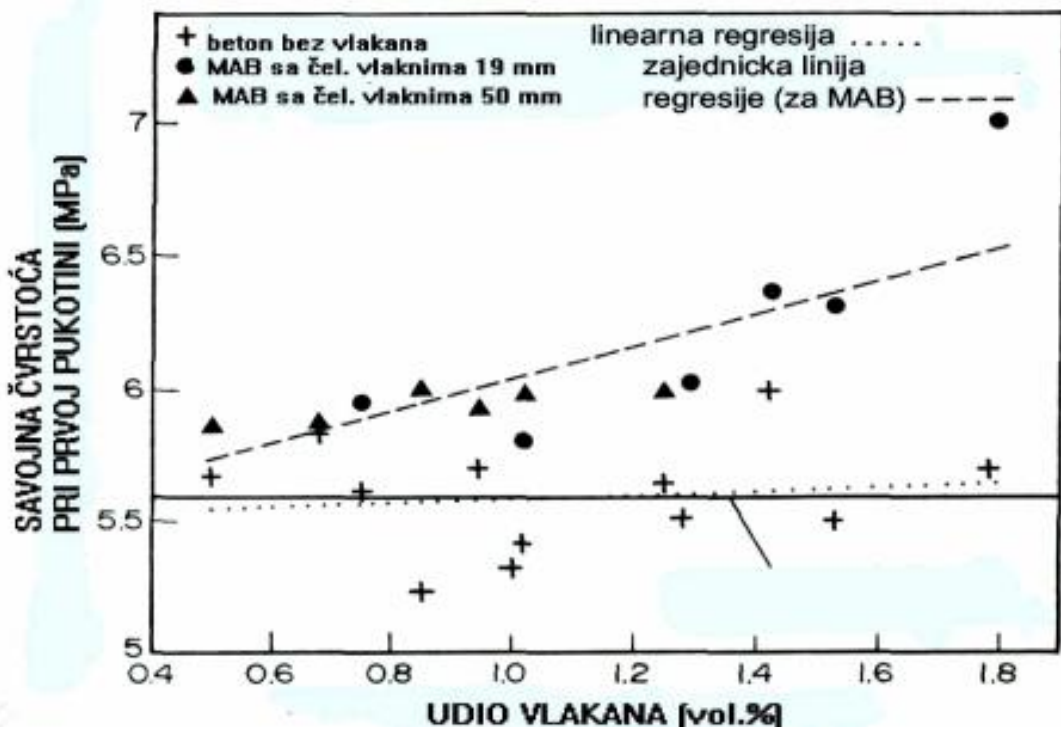
Intezitet poboljšanja svojstava kompozita u očvrslom stanju, uslijed mikroarmiranja vlaknima ovisi o: [4,]

- vrsti i količini vlakana
- prionjivosti vlakana i matrice
- kvaliteti betonske cementne matrice

Johnston i suradnici, 1994.g su pokazali da dodavanjem čeličnih vlakana u količini do 2% volumnog udjela, malo se utječe na poboljšanje tlačne (slika 8.) i savojne čvrstoće (slika 9.) kompozita. Ustanovili su da u nekim slučajevima osim malog povećanja tlačne i savojne čvrstoće, može se i javiti smanjenje čvrstoće. To smanjenje javlja se uslijed nepotpune konsolidacije uzorka, koja je uočljiva zbog promjene gustoće. U konačnici, pokazalo se da tlačna i savojna čvrstoća uglavnom ovise prvenstveno o kvaliteti cementne matrice. [4]



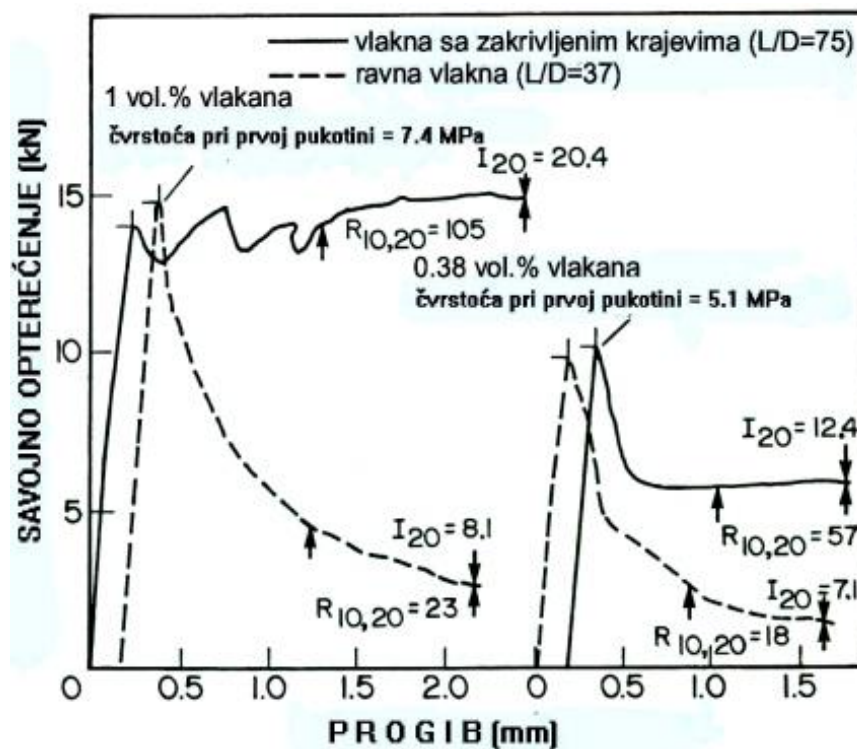
Slika 8. Utjecaj vlakana na tlačnu čvrstoću kompozita, za dvije vrste čeličnih vlakana (Johnson, 1994.) [5]



Slika 9. Utjecaj vlakana na savojnu čvrstoću kompozita, za dvije vrste čeličnih vlakana (Johnson, 1994.) [5]

Mikroarmiranjem cementne matrice, u očvrslom stanju se znatno poboljšaju sljedeća svojstva : [5]

- Žilavost (slika 10.)
- Duktilnost
- Sposobnost apsorpcije energije
- Otpornost na udar
- Čvrstoća na umor
- Sprječavanje nastanka pukotine, smanjenje njihove širine i razmaka



Slika 10. Razlika između rezidualne čvrstoće i žilavosti za dvije vrste vlakana u dvije različite cementne komponente ( Johnston, 1991) [5]

Nakon pojave prve pukotine u kompozitu, vlakna su ta koja prenose naprezanja s raspucanog presjeka na neraspucani presjek. Pritom je bitna međusobna posmična čvrstoća između vlakana i cementne matrice. Prijenos naprezanja sa matrice na vlakna vrši se posmičnim silama na dodirnoj plohi između vlakana i matrice. Tokom 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 podupiranje opterećenja izražavamo kao kritični volumenski udio vlakana  $V_{f(CR)}$ . [5]

$\sigma_{fu}$  – čvrstoća vlakana

$E_f$  – modul elastičnosti vlakana

$\sigma_{mu}$  – čvrstoća matrice

$\varepsilon_{mu}$  – pukotinsko naprezanje

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

### 3. MIKROARMIRANJE PRIRODNIM VLAKNIMA

Zbog ekološke svijesti velika pozornost posljednjih desetljeća se posvećuje upotrebi prirodnih vlakana. Prirodna vlakna predstavljaju veliki izazov za znanstvenike i inženjere. Troškovi proizvodnje se nastoje svesti na minimum, dok se mehanička svojstva materijala nastoje maksimizirati.

Korištenje prirodnih materijala u kompozitima datira još iz davnina, gdje su se u starom Egiptu prije 3000 godina vlakna koristila kao ojačanje gline. U istraživanju 2011. Kim i suradnici [9] su ustanovili da prirodna vlakna u kompozitu mogu podnijeti veću energiju opterećenja u odnosu na staklena vlakna u kompozitu. Zbog ovih i još mnogih prednosti pri mikroarmiranju prirodnim vlaknima, potrebno je i dalje poticati istraživanja koja sve više upućuju na njihovu upotrebu u građevinskoj industriji.

Biljna vlakna su sami po sebi prirodni kompoziti sa staničnom strukturom, a karakterizira ih velika vlačna čvrstoća i nizak modul elastičnosti. Prirodna vlakna koja se koriste kao ojačanja, mogu biti obrađena i neobrađena. Obradena vlakna ukazuju na bolja mehanička svojstva i bolju otpornost na utjecaj alkalija i vlage, dok se neobrađena vlakna koriste samo u slučajevima ojačanja betona sa nižim sadržajem vlakana. Općenito kvaliteta prirodnih vlakana ovisi o samom podrijetlu sirovine, kemijskom sastavu, geometrijskim karakteristikama, načinu obrade vlakana, površinskoj hrapavosti te o geografskim i klimatskim uvjetima. [2]

Najčešći način dodavanja vlakana u praksi vrši se izravim dodavanjem u miješalicu u već zamiješan beton. Prilikom dodavanja vlakana u cementnu matricu javlja se problem otežanog miješanja i ugradnje kompozita. Zato se prirodna vlakna dodavaju u granicama od 0,2 do 2%.

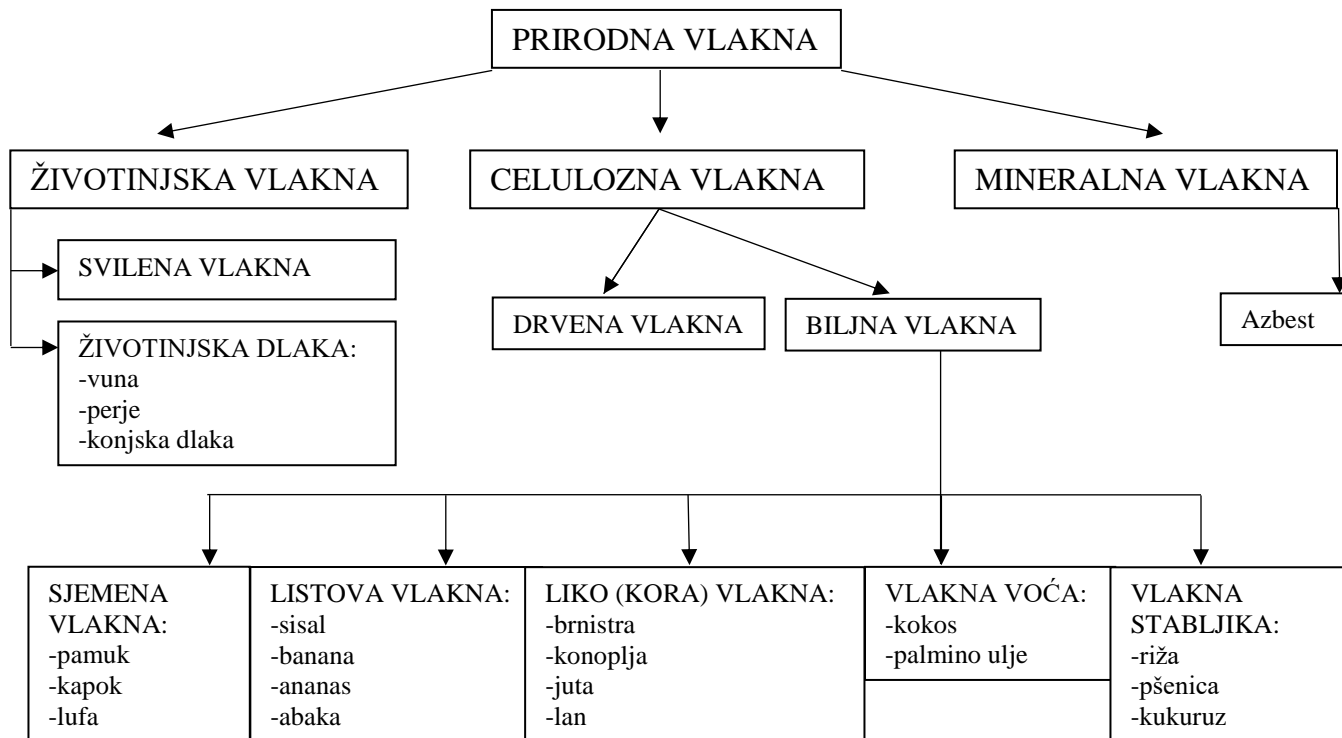
Također se može i javiti problem jednolikog rasporeda vlakana, što vodi do stvaranja snopova vlakana. [2]



Slika 11. Vlakna pamuka [10]

### 3.1. Podjela prirodnih vlakana

Na slici 12. prikazana je podjela prirodnih vlakana. [11]



Slika 12. Klasifikacija prirodnih vlakana [11]

Sva vlakna možemo razvrstati u tri osnovne skupine: u prirodna vlakna, čelična i sintetička vlakna. Sintetička se dijele na organska i anorganska vlakna. U ovom radu koristimo prirodna vlakna, odnosno prirodna vlakna biljnog podrijetla. Osim biljnog podrijetla, prirodna vlakna još mogu biti životinjskog i mineralnog podrijetla. Biljna vlakna su nastala procesom fotosinteze gdje biljka uzima potreban kisik a izbacuje ugljikov dioksid. Uglavnom se biljna vlakna sastoje od celuloze, hemiceluloze i lignina dok se životinjska sastoje od proteina. Životinjska i mineralna vlakna imaju široku obradu i malu količinu sirovina koje ograničavaju njihovu učinkovitost i upotrebu. Uspoređujući prirodna vlakna sa čeličnim i sintetičkim, prirodna imaju mogućnost potencijalno većeg iskorištenja, stabilnije ekološke održivosti i obnovljivosti, koji u konačnici rezultiraju nižim troškovima proizvodnje i upotrebe. [11]

### **3.2. Kemijski sastav biljnih vlakana**

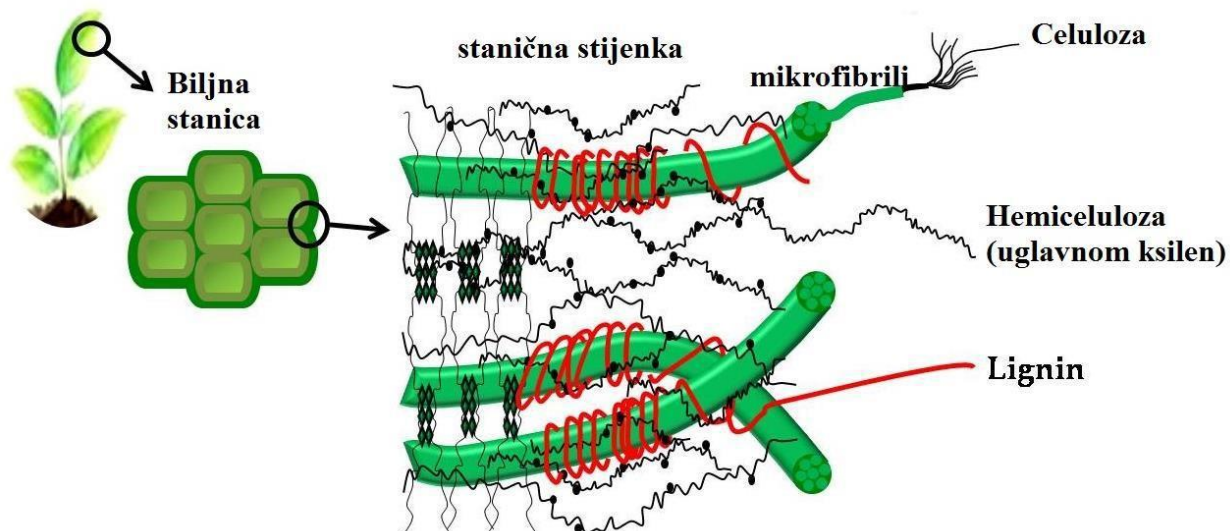
Biljna vlakna su sami po sebi prirodni kompoziti sa staničnom strukturom. Sastoje se od celuloze, hemiceluloze, lignina, pektina, voska i još nekih čestica. Različita vlakna imaju različite kemijske sastave (*tablica 1*), a prema tome se može predvidjeti ponašanje pojedinih vlakana u kompozitu. [2]

Celuloza je jedan od najrasprostranjenijih polisaharida, a čini ju bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa. Glavni je sastojak staničnih stijenki biljaka, a građena je od dugih nizova međusobno povezanih disaharida. Celuloza ima tendenciju stvaranja jakih intermolekularnih vodikovih veza koji su odgovorni za veliki dio jake molekularne strukture, odnosno za čvrstoću i žilavost biljaka. Također celulozna vlakna su hidrofilna i polarna, te imaju malu otpornost na vlagu. Ti nedostaci često upućuju na nedostatke pri interakciji kompozita sa prirodnim vlaknima. [2]

Za razliku od celuloze, hemiceluloza je topiva u vodi i hidroskopna. Ima otvorenu strukturu i potpuno je amorfn. Hemiceluloza se veže za celulozu, te se može razgraditi pri visokim temperaturama. Ona također povezuje lignin i celulozu, a bez lignina biljka ne može postići rast u visinu. Veća količina lignina uzrokuje smanjenje modula elastičnosti i vlačne čvrstoće. [2]

Odmah nakon celuloze, lignin je drugi najprisutniji organski polimer u prirodi. On smanjuje propusnost vode kroz staničnu stijenku koja se sastoji od celuloze i amorfne hemiceluloze, te na taj način omogućuje transport vodenih otopina kroz tkivo. Biljke obogaćene ligninom vrlo su

otporne na mikroorganizme, jer sprječavaju prodor destruktivnih enzima u staničnu stijeku. [12]  
Također služi kao kemijsko ljepilo između vlakana, dok veća količina lignina uzrokuje smanjenje modula elastičnosti i vlačne čvrstoće biljke. [2]



Slika 13. Prikaz biljne stanice, mikrofibrila koja sadrži celulozu i oko koje su omotani lignin i hemiceluloza [12]

Fiber	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Extractives (%)	Ash Content (%)
Cotton	82.7	5.7	—	6.3	—
Jute	64.4	12	11.8	0.7	—
Flax	64.1	16.7	2.0	1.5–3.3	—
Ramie	68.6	13.1	0.6	1.9–2.2	—
Sisal	65.8	12.0	9.9	0.8–0.11	—
Oil palm EFB	65	—	19.0	—	2.0
Oil palm frond	56.0	27.5	20.5	4.4	2.4
Abaca	56–63	20–25	7–9	3	—
Hemp	74.4	17.9	3.7	0.9–1.7	—
Kenaf	53.4	33.9	21.2	—	4.0
Coir	32–43	0.15–0.25	40–45	—	—
Banana	60–65	19	5–10	4.6	—
PALF	81.5	—	12.7	—	—
Sun hemp	41–48	8.3–13.0	22.7	—	—
Bamboo	73.9	12.5	10.2	3.2	—
Hardwood	31–64	25–40	14–34	0.1–7.7	<1

Tablica 1. Kemijski sastav nekih biljnih vlakana [11]

### **3.3. Prednosti upotrebe prirodnih vlakana**

Prednosti upotrebe prirodnih vlakana : [11]

- ekološki su prihvatljiviji i manja je ukupna potrošnja energije pri proizvodnji od sintetičkih i sličnih vlakana
- lokalno su dostupna i ekonomična, pa se mogu iskorištavati u mnogim zemljama
- biorazgradiva su, neabrazivna, nisu vodiči, sigurnija su u rukovanju i proizvodnji od ostalih vlakana
- karakterizira ih velika vlačna čvrstoća i mala gustoća, što im daje potrebna mehanička svojstva da bi se koristila kao ojačanja kompozita
- njihova upotreba utječe na smanjenje plastičnog skupljanja, povećanje toplinske i zvučne izolacije te na prigušenje vibracija u cementnim kompozitima

### **3.4. Nedostaci upotrebe prirodnih vlakana**

Nedostaci upotrebe prirodnih vlakana: [2]

- Prirodna vlakna su polarna i hidrofilna, upijaju vodu i imaju malu otpornost na vlagu. To može izazvati slabu vezu na kontaktoj zoni između matrice i vlakana, što rezultira trajnim oštećenjem i manjom čvrstoćom kompozita.
- Prirodna vlakna nemaju konstantna svojstva za određenu vrstu biljke, već se javljaju varijacije od biljke do biljke. To otežava upotrebu vlakana u kompozitu, jer svakom mješavinom imamo drugačiji proračun a time i različita mehanička svojstva kompozita.
- Javlja se i problem trajnosti. Alkalnost Portland cementa u kompozitu utječe na strukturnu razgradnju vlakana.
- Dodavanje prirodnih vlakana u kompozit je ograničeno. Veća količina otežava miješanje i dolazi do grudvanja vlakana.

### **3.5. Interakcija prirodnih vlakana i matrice**

Uvidjevši na prednosti i nedostatke upotrebe prirodnih vlakana u kompozitu od cementne matrice, možemo zaključiti da na trajnost samog kompozita možemo utjecati modificiranjem komponenti vlakana ili modificiranjem same matrice. Sposobnost kompozita da se odupre

unutrašnjim (alkalnost cementa, volumenske promjene itd.) ili vanjskim oštećenjima (sulfatni i kloridni napadi, temperatura, vlažnost itd.) uvelike utječe na životni vijek kompozita. [13]

- Modificiranje vlakana – tretmani koji se primjenjuju na prirodna vlakna općenito se dijele na kemijske, fizikalne i fizikalno-kemijske metode. Kemijske metode utječu na strukturu i površinsku teksturu vlakana, te općenito poboljšavaju vezu vlakna i matrice. Obuhvaćaju obradu vlakana prije ugradbe, tako da se uklone dijelovi koji su osjetljivi na djelovanje alkalija. Fizikalne metode utječu na poboljšanje prijanjanja trećeg materijala između matrice i vlakna. Taj materijal poboljšava kompaktilnost između vlakana sa hidrofilnim ponašanjem i hidrofobnom matricom. Na primjer, impregnacijom vlakna natrijevim sulfitom ili magnezijevim sulfatom, te premazima sa voodbojnim sredstvima.[13]
- Modificiranje matrice – matricu modificiramo na način da smanjujemo alkalnost koja napada celulozna vlakna, odnosno otapa celulozu i hemicelulozu. To radimo na način da se dio cementa zamijeni sa silikatnom prašinom, letećim pepelom, metakaolinom, zgurom, crnim pepelom dobivenim spaljivanjem rižinih ljuski i sličnim materijalima. Smanjenje alkalnosti također postižemo i ubrzanom karbonatizacijom, gdje kalcijev karbonat dobivamo spajanjem vapna i ugljičnog dioksida.[13]

Količina prirodnih vlakna koji možemo ugraditi u mikroarmirani beton varira od 0,2 do 2%. Donja granica je postavljena da bi se uvela minimalna poboljšanja u odnosu na standardni beton/mort bez vlakana. Iznad gornje granice od 2% otežan je proces miješanja i ugradnje mikroarmirnog betona. Također, zbog maksimalne temperature prerade i hidrofilnih svojstava vlakana, njihova uporaba je ograničena. Zbog problema jednolikog rasporeda vlakana po kompozitu, posebna pažnja se posvećuje i miješanju. U praksi se vlakna dodavaju u već prethodno zamiješan beton.

#### 4. BRNISTRA

Brnistra ili žuka (lat. naziv: *Spartium junceum* L.) (slika 14.) je trajna biljka iz porodice mahunarki, koja cvate intezivnim žutim cvjetovima tijekom ljeta. U svijetu je poznata i kao Spanish broom. Grmolikog je rasta, naraste do visine od 1 do 1,5 m a stariji primjeri mogu narasti i više. Stanište pronalazi na prirodnom mediteranskom području, a nakon otkrića Amerike rasprostranila se na južnu i sjevernu Ameriku. Također raste na području jugozapadne Azije i sjeverozapadne Afrike. Dok se u SAD-u i Novom zelandu smatrala kao korov, na Mediteranskom području je imala široku primjenu, kao što je izrada pokrivača, slamarica, tepiha i cipela. U prošlosti su Rimljani, Kartežani i Grci koristili brnistru kao sirovinu za izradu mreža, torbi, košara, pa čak i jedara.



Slika 14. Grm brnistre [14]

Nakon Drugog svjetskog rata, dolaskom novih tehnologija, čovjek se sve više odmiče od prirode. Tek u novije vrijeme budi se svijest o potrebi očuvanja okoliša, i kroz različite ekološke inicijative nastoji se održati taj trend. Jedan od pokušaja ekološke proizvodnje je uporaba zaboravljenih autohtonih biljaka. Brnistra kao autohtona biljka nameće se kao ideja da se iskoristi u raznovrsne tekstilne i građevinske svrhe. Ima veliki potencijal, njena mehanička kvalitetna svojstva i dostupne sirovine daju nam mogućnost da se prvenstveno istraži, a potom omogućiti revitalizacija kojom bi se ona mogla uvelike iskoristavati.



*Slika 15. Brnistra [15]*

Premda se brnistra u prošlosti nije mogla iskoristiti za veću proizvodnju, njeno iskorištavanje pokazalo bi se veoma ekološko i ekonomično. Iskorištavanje sirovina ne utječe mnogo na okoliš, biljka je samonikla i poprilično uspijeva na mjestima kao što su vapnena, neutralna, kisela i alkalična tla.[2] Brnistra je otporna na sušu, niske temperature i ima veliku sposobnost prilagodbe. Za rast biljka zahtjeva sunčani krajolik, zato i uspijeva na području Mediterana. Također se sadila u Španjolskoj, Italiji i Francuskoj, tamo gdje lan i konoplja nisu uspijevali zbog lošeg tla i zagađenih gradova. [16]



## 4.1. Povijest brnistre

Brnistra se nekoć u Dalmaciji koristila u razne svrhe, ponajprije u tekstilnoj industriji. Od nje se izrađivala obuća, pokrivači za spavanje, a u nekim krajevima, u kombinaciji s lanom, se izrađivala odjeća. Osim za tekstilne potrebe, također se koristila za pletenje košara i manjih vrša, cjedila za masline, za izradu mreža itd. U novije vrijeme dolazi do ponovnog buđenja upotrebe brnistre, jer znanstvenici pronalaze neka nova uporabna svojstva ove svestrane biljke. Trenutačno se koristi u industriji papira i u kozmetičke svrhe. Od brnistre se može dobiti eterično ulje, a cvjetovi intezivnog mirisa nalaze mjesto u parfemskoj industriji i pčelarstvu. Žuti pigment koristi se u slikarstvu. Novija istraživanja navode brnistru kao vrlo upotrebljivu za stabilizaciju pokosa, odnosno zaštitu od erozije. Njezino korijenje dosta dobro veže tlo. [17]

Tradicionalno branje i obrada brnistre (*slika 16*) u dalmatinskim krajevima obuhvaćala je ručno skidanje vlakana koje je bilo jako sporo i mukotrpno, a maceracija u vodi dugotrajan posao. Postupak je počinjao branjem brnistre. Grane bi se posložile i malom sjekiricom rezale na manje komade određene duljine. Rezani komadi bi se slagali u snopiće i onda bi se namakali u moru. To namakanje bi trajalo otprilike 40 dana. Slijedilo je trljanje u moru na hrapavom kamenu, kako bi se izvukla potrebna vlakna. Brnistru su za tekstilne svrhe pretežno koristili siromašniji stanovnici koji nisu imali ovaca od kojih su mogli dobiti vunu. [18]



*Slika 16. Tradicionalna obrada brnistre [16]*

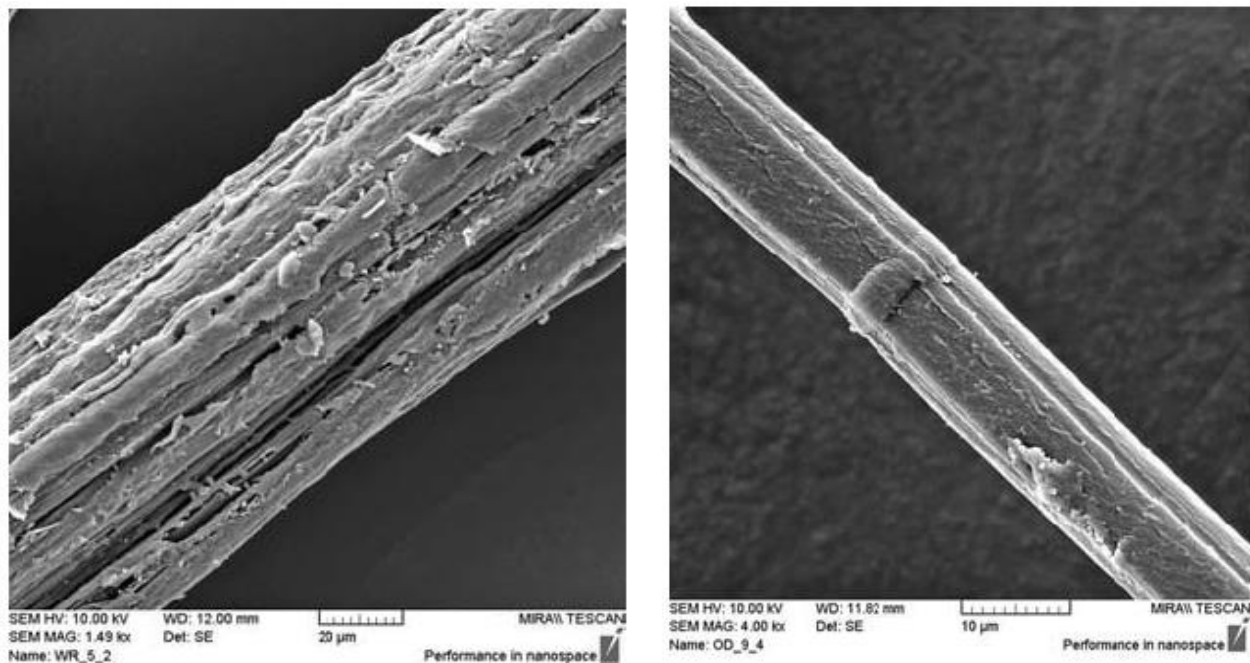
U dalmatinskim krajevima i Istri javili su se nekoliko pokušaja industrijalizacije prerade brnistre. Početkom 20.-og stoljeća u Omišu je izgrađena “tvornica“ za preradu brnistre, ali je brzo propala jer se brnistra u moru namakala šest mjeseci, zbog čega je sagnijela. U Vodicama se 1949. godine otvorila tvornica za preradu brnistre a zatvorila 1954.g. zbog nerentabilnosti. Izrađivale su se još male tvornice u Zakučcu i Opuzenu.[17] Međutim, sve je to vodilo do neuspjeha. Istovremeno su se počeli koristiti i drugi tekstilni materijali kao što su pamuk, lan, juta, konoplja i vuna. Ti materijali su se tokom proizvodnje pokazali kao jeftiniji resursi. Također se pojavljuju i jeftina sintetička vlakna, koji totalno iziskuju brnistru. Još jedan od razloga zašto je prestala proizvodnja vlakana brnistre je zbog velikih troškova koji su se odnosili na njeno branje, sakupljanje, prijevoz i obradu te mala količina vlakana nakon prerade.

## 4.2. Sastav brnistre

Brnistra je grmolika biljka koja se sastoji od dva osnovna dijela: korijenja i grana. Jedina je vrsta u rodu *Spartium*. Visina grma naraste do 1,5 m visine. Jarki žuti cvjetovi brnistre cvjetaju u periodu od svibnja do srpnja, a mahune sa sjemenkama dozrijevaju u razdoblju od kolovoza do listopada. Korijenje brnistre duboko prodire u tlo, te ga dosta dobro povezuje. Također ga obogaćuje atmosferskim dušikom koji dobiva simbiozom s bakterijama u kvržicama i zadebljanjima korijenja. [17]

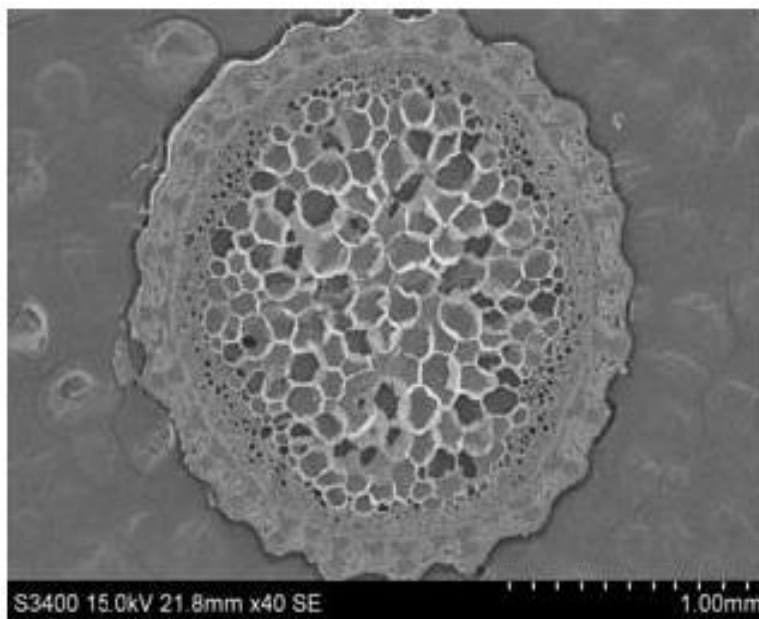
Grane brnistre odlikuju velikom žilavošću, te zbog toga su u ovom istraživanju prikazani kao najvažniji dio biljke. Izbojci se sastoje od unutrašnjeg i vanjskog dijela. Središnji dio je poprilično drvenast i porozan što čini biljku laganom. Tek u vanjskom dijelu se nalaze namnažajna vlakna. U tom dijelu razlikuju se dvije vrste vlakana: elementarno i tehničko vlakno (*slika 17*). Elementarna vlakna su pektinskim lamelama povezana u snopiće, dok su tehnička vlakna uzduž grančice povezani ligninom. Elementarna vlakna pravilnog su promjera i iznose od 5 do 10 mikrometara, a promjer snopa je oko 50 mikrometara. [17]

Prema autorima [19], kemijski sastav brnistre se sastoji od 91,7% celuloze, 3,2% lignina, 4,1% pentozana i nešto pepela.



*Slika 17. Tehničko (lijevo) i elementarno (desno) vlakno brnistre snimljeno na elektronskom mikroskopu [17]*

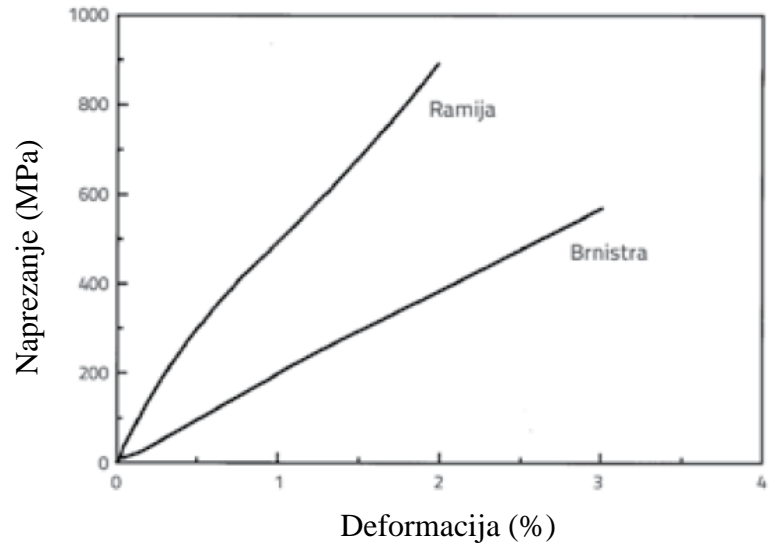
Poprečnim presjekom (*slika 18*) izbojka brnistre možemo uočiti: epidermu, parenhim kore s klorofilom, endoderm, snopiće vlakna kore i snopiće vlakna pericikla. Dobro se vide agregati vlakana kore i pericikla, glavičastog oblika, koji su spojeni u gotovo neprekidan prsten. [17]



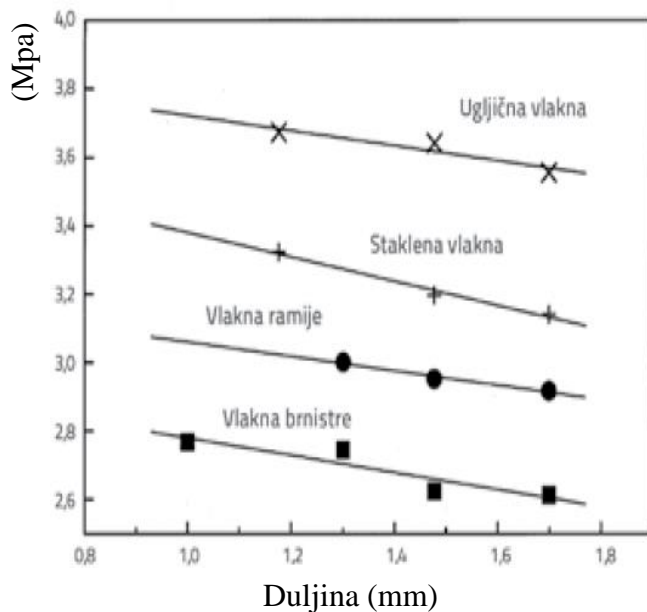
*Slika 18. Poprečni presjek izbojka brnistre [17]*

### 4.3. Provedena istraživanja- svojstva brnistre

Angelini i suradnici usporedili su vlakno brnistre s vlaknom ramije. Pokazalo se da vlakna brnistre imaju nešto slabije mehaničke karakteristike od ramije, slika 19. Dijagram naprezanja obe vrste vlakana je gotovo linearan do trenutka loma. Iako je modul elastičnosti vlakana brnistre za 30 % manji od vlakana ramije, autori ističu da se mogu koristiti kao ojačanja kompozita, jer još uvijek imaju veći modul od nekih neorijentiranih polimera čija je vrijednost oko 1 i 3 GPa. [2]



Slika 19. Dijagram naprezanje-deformacija [2]

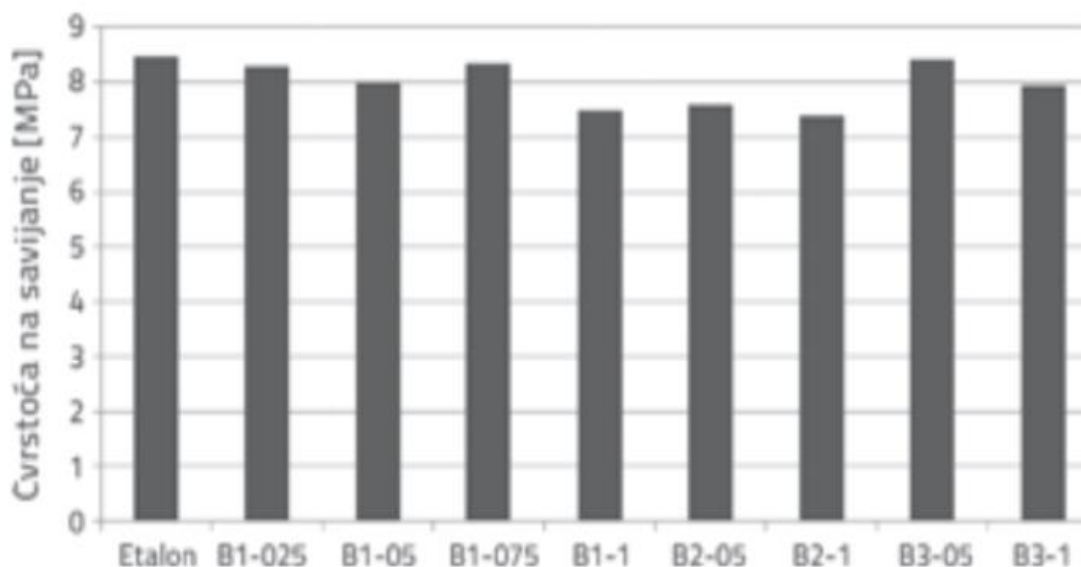


Slika 20. Utjecaj duljine vlakna na deformacije [2]

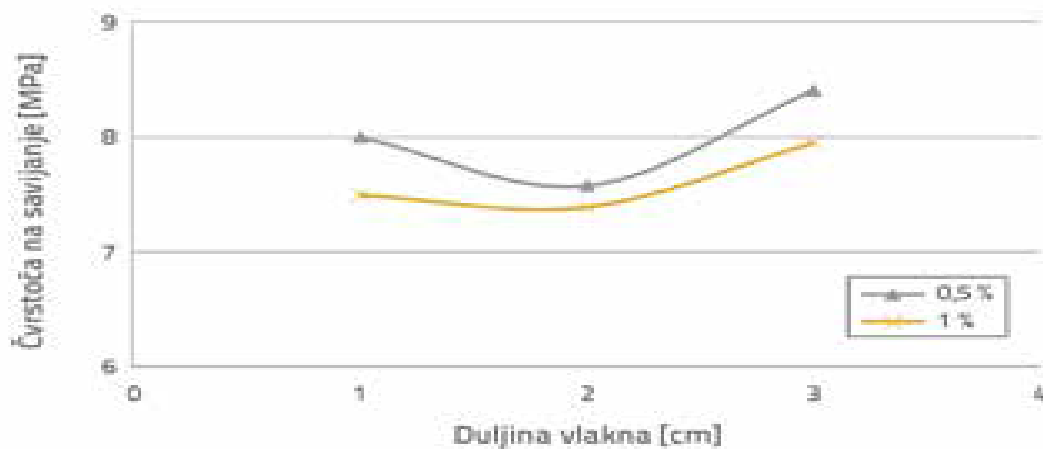
Na slici 20. može se uočiti da celulozna vlakna imaju manju čvrstoću od umjetnih vlakana od ugljika i E-stakla. Također se može primjetiti da porastom duljine vlakana čvrstoća opada, neovisno o kojem tipu vlakana se radi. Angelini i ostali su zaključili da unatoč manjoj čvrstoći, vlakna brnistre zbog veće specifične težine mogu se koristiti kao ojačanja, barem u nekonstruktivnim dijelovima. [2]

Nekka i suradnici su ispitivali upijanje vode kompozita napravljenog od vlakana brnistre i polipropilenske matrice. Uzorci su na temperaturi od 70°C prvenstveno osušeni do konstantne mase, pa stavljani u destiliranu vodu na temperaturu od 23 i 85°C. Zaključili su da je upijanje vode veće što je veći udio vlakana u kompozitu. Također, manje upijanje kompozita se javila kod tretiranih vlakana. Vlakna su se tretirala silanom, što je također omogućilo dobru prionjivost vlakana i matrice. [2]

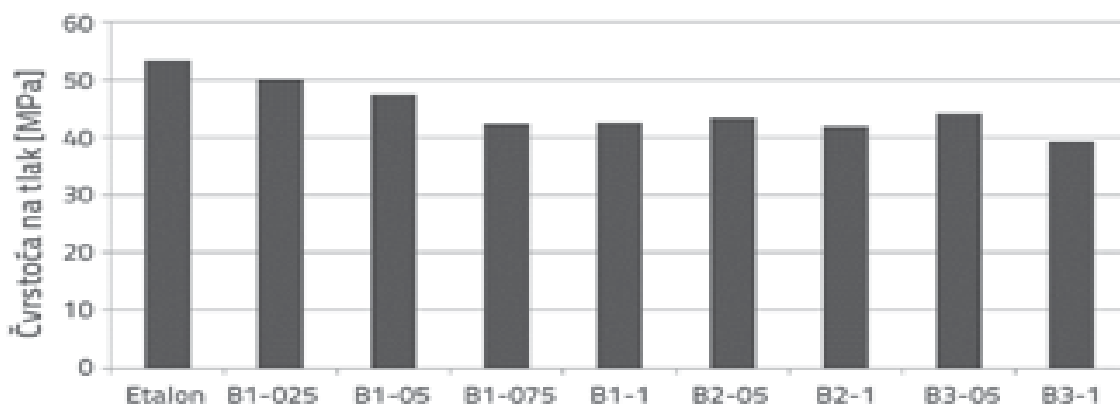
Juradin i suradnici [2], prvi put su ispitivali mogućnost ojačanja cementne matrice sa vlaknima brnistre. Usporedili su dobivene rezultate sa drugim celuloznim vlaknima, i pokazalo se da vlakna brnistre imaju potencijala kao ojačalo u cementnom kompozitu. Na slici 21, vidljivo je da uzorci sa vlaknima brnistre imaju nešto manje čvrstoće u odnosu na etalon (etalon je referentna cementna matrica bez dodanih vlakana). Vlakna duljine 10 i 30 mm ostvaruju bolje rezultate čvrstoće na savijanje od vlakana duljine 20 mm, što je prikazano na slici 22. Također su ustanovili da veći volumni udio vlakana u kompozitu ostvaruju niže čvrstoće na savijanje. Na slikama 23. i 24., prikazani su rezultati tlačne čvrstoće, te su ustanovili da tlačna čvrstoća opada što je veći volumni udio vlakana, a tako i njihova duljina. Što je bilo i za očekivati, jer dodavanjem dužih vlakana teže je zbijati uzorak i tako dobivamo veću poroznost i slabije konačne čvrstoće.



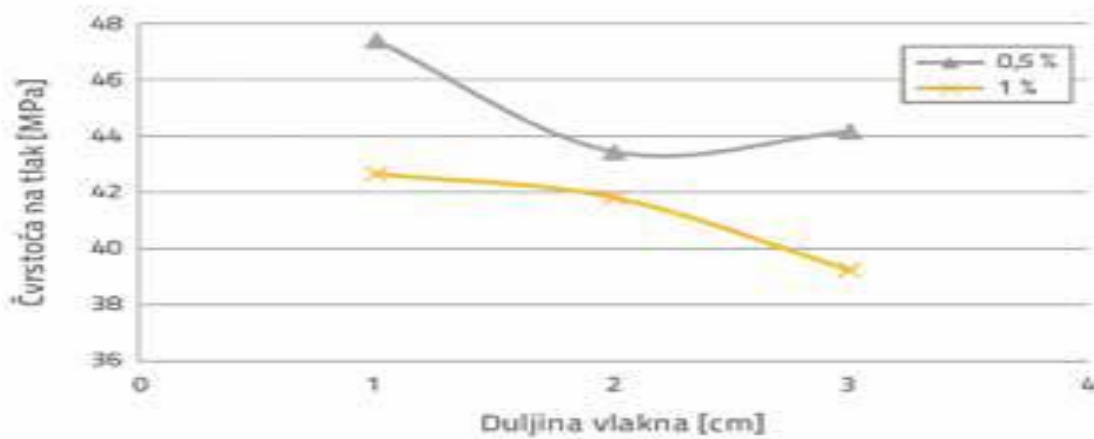
Slika 21. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje [2]



Slika 22. Utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na savijanje [2]



Slika 23. Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak [2]



Slika 24. Utjecaj duljine i količine vlakana na rezultate čvrstoće na tlak [2]

Juradin i suradnici [19] ispitivali su mogućnost upotrebe vlakana brnistre kao ojačanje cementnog morta. Proučavali su utjecaje vremena berbe, metode obrade, duljine i količine vlakana na mehaničke karakteristike cementnog kompozita. 28 dana nakon izrade cementnih prizmica, uzorci su ispitani na tlačnu i savojnu čvrstoću te uspoređeni sa referentnim uzorkom bez dodanih vlakana. Pet uzoraka je ispitano nakon 56 dana. Prema dobivenim rezultatima vlakna su se pokazala sposobna za ojačanje cementnih matrica.

Vlakna su obradili kemijskim putem: maceracijom u morskoj vodi i maceracijom u 5% otopini NaOH. Pri obrađivanju u morskoj vodi svježe ubrani izbojci brnistre stavljeni su 28 dana u more. Nakon toga su izvađeni i mehanički putem odvojena potrebna vlakna. Ova vlakna su označena sa M. Jedan dio suhih vlakana je stavljen u 5% NaOH otopinu na period od 7 dana, zatim isprano u vodi i ostavljeno da se suši na zraku. Ovi uzorci su označeni sa MN. [19]

Pri maceraciji u otopini NaOH izbojci brnistre, ubrani u ljetnom periodu, su stavljeni 14 i 15 dana u 5% otopinu NaOH. Nakon toga vlakna su se odvajala trljanjem od grubu betonsku površinu. Ova vlakna su označena sa NU. Vlakna označena sa N su 18 i 19 dana držana u otopini. Osim što su autori ispitivali izbojke ubrane u ljetnom razdoblju, također su uzorke ubrane u jesenskom razdoblju 20 dana držali u otopini NaOH. Pokazalo se da su se ta vlakna teže odvajala od unutrašnjeg drvenastog dijela. Na *slici 25*. prikazani su N, NU, M i MN uzorci. [19]

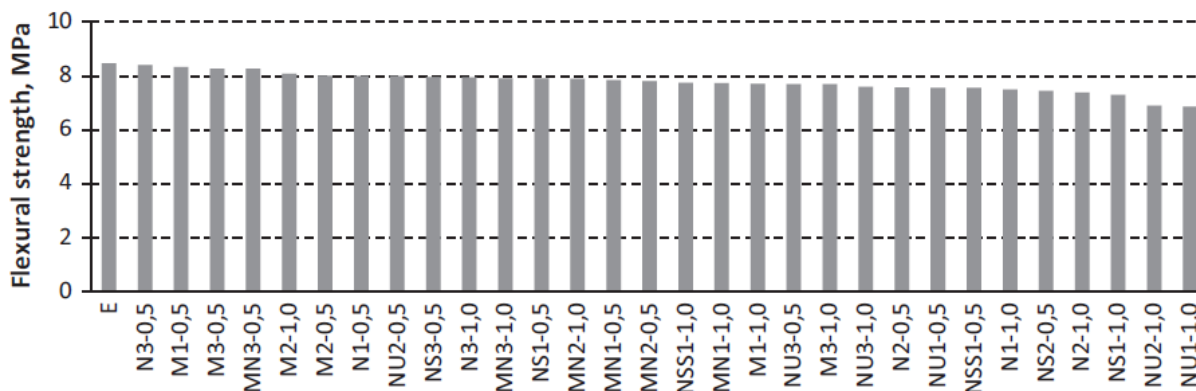


*Slika 25. Uzorci vlakana N, NU, M i MN dobivena ovisno o metodi maceracije [19]*

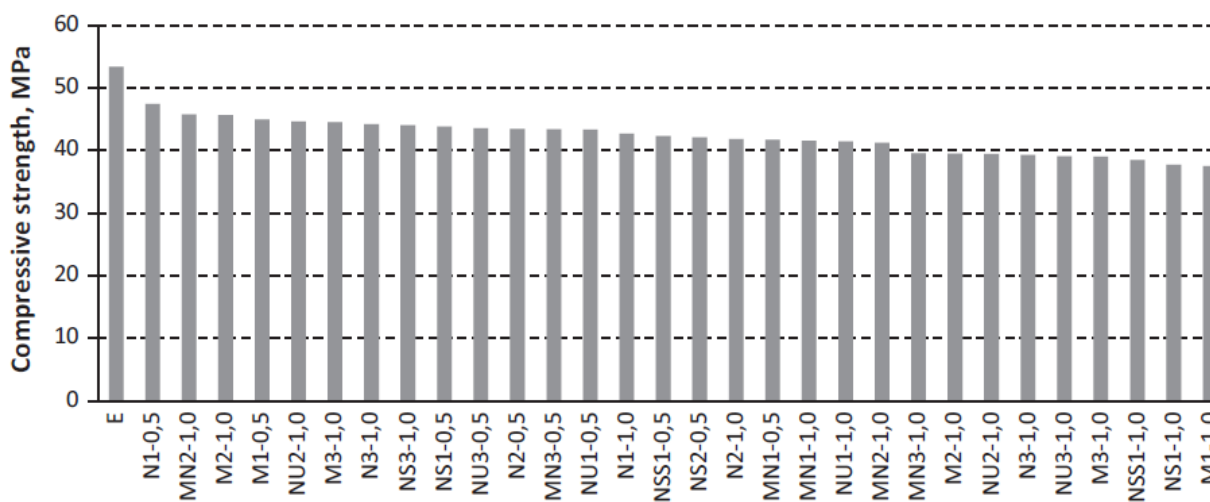
Napravljeni su 31 različitih uzoraka za potrebe ispitivanja. U *tablici 3*. prikazani su sve mješavine morta, a na *slikama 26 i 27* prikazan je u utjecaj obrade vlakana na mehaničke karakteristike cementnog morta te uspoređeni sa referentnim etalom. Prema digramima, ni jedna od mješavina nije premašila vrijednost etalonske čvrstoće. [19]

Mixtures	Spanish Broom fiber separation methods	Fiber length (cm)	The amount of fibers (% by volume)	Cement (g)	Water (ml)	w/c	Standard quartz sand (g)
E	-	-	-	450	225	0,5	1350
NU1-0,5	Maceration of summer harvesting in 5% NaOH for period of 14 and 15 days	1	0,5				
NU1-1,0		1	1,0				
NU2-0,5		2	0,5				
NU2-1,0		2	1,0				
NU3-0,5		3	0,5				
NU3-1,0		3	1,0				
N1-0,5	Maceration of summer harvesting in 5% NaOH for period of 18 and 19 days	1	0,5				
N1-1,0		1	1,0				
N2-0,5		2	0,5				
N2-1,0		2	1,0				
N3-0,5		3	0,5				
N3-1,0		3	1,0				
M1-0,5	Maceration in sea water during 28 days	1	0,5				
M1-1,0		1	1,0				
M2-0,5		2	0,5				
M2-1,0		2	1,0				
M3-0,5		3	0,5				
M3-1,0		3	1,0				
MN1-0,5	Treatment with 5% NaOH during 7 days after 28 days of maceration in sea water	1	0,5				
MN1-1,0		1	1,0				
MN2-0,5		2	0,5				
MN2-1,0		2	1,0				
MN3-0,5		3	0,5				
MN3-1,0		3	1,0				
NSS1-0,5	Maceration of fall harvesting in 5% NaOH for period of one month	1	0,5				
NSS1-1,0		1	1,0				
NSS2-0,5		2	0,5				
NSS2-1,0		2	1,0				
NSS3-0,5		3	0,5				
NSS3-1,0		3	1,0				
NSS1-0,5	Maceration of fall harvesting in 5% NaOH for period of two month	1	0,5				
NSS1-1,0		1	1,0				
NSS2-0,5		2	0,5				
NSS2-1,0		2	1,0				
NSS3-0,5		3	0,5				
NSS3-1,0		3	1,0				

Tablica 3. Detalji mješavine morta [19]



Slika 26. Savojna čvrstoća mješavina morta uspoređena sa etalomom [19]



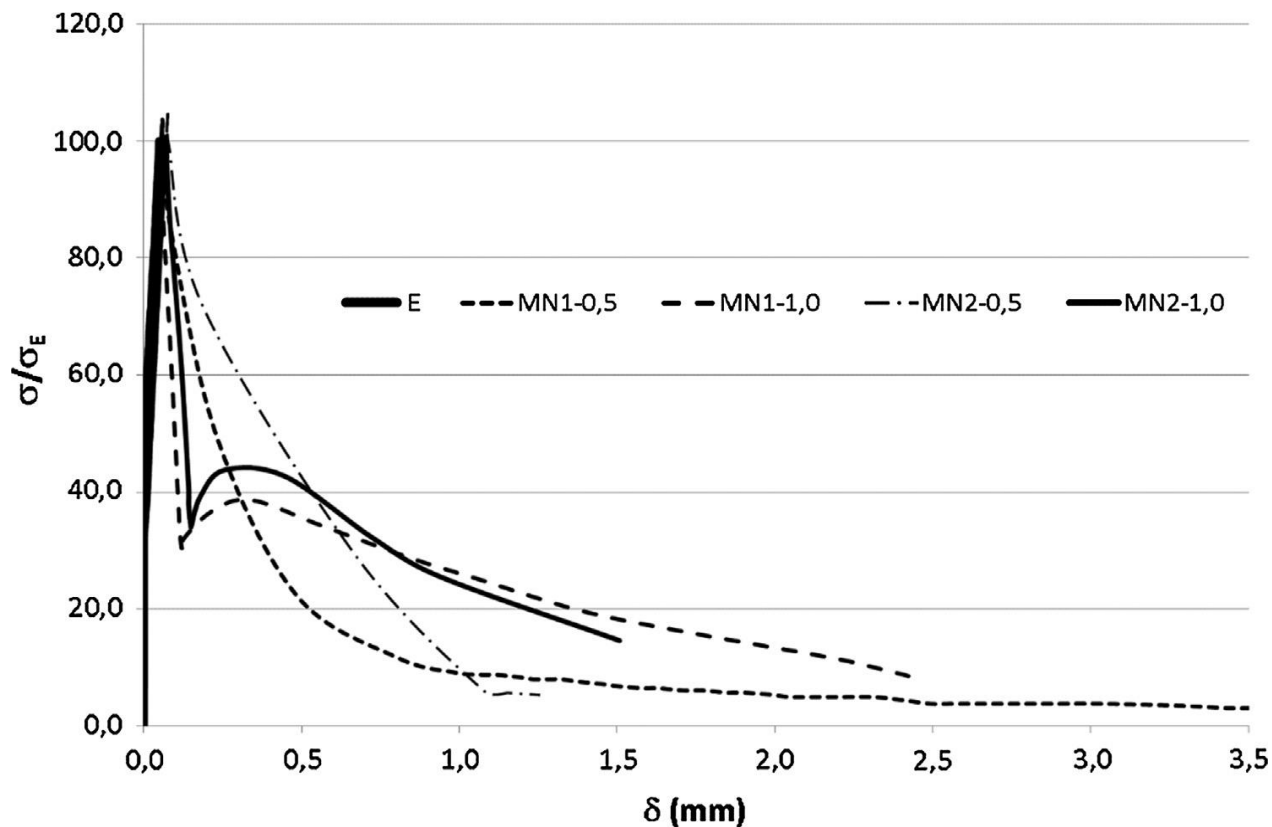
Slika 27. Tlačna čvrstoća mješavina morta uspoređena sa etalomom [19]



Pet serija uzoraka MN1-0,5; MN1-1,0; MN2-0,5 i MN2-1,0 su 56 dana čuvani u vodi pri temperaturi od 20°C. Nakon toga ispitane su njihove savojne i tlačne čvrstoće. Savojna se čvrstoća odredila prema EN 12390-4, a rezultati su prikazani na slici 28, na  $\sigma/\sigma_E - \delta$  dijagramu. Uzorci s 0,5% vlakana, tj MN1-0,5 i MN2-0,5, pokazali su veću savojnu čvrstoću u odnosu na etalon, u iznosu od 103% i 104%.

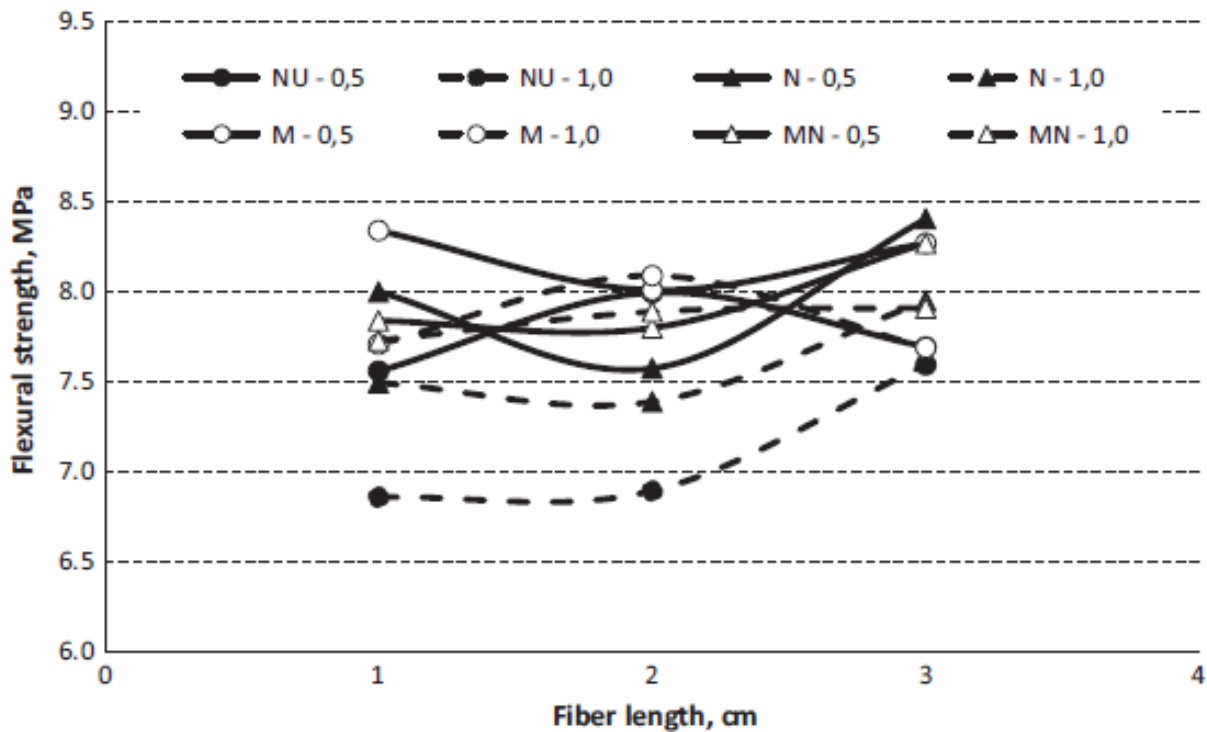
Dodavanjem i povećanjem duljine vlakana povećava se tlačna i savojna čvrstoća. Rezultati su pokazali da uzorak s vlaknima duljine 1 cm ostvaruje čvrstoću na pritisak 107%, dok uzorak sa vlaknima duljine 2 cm ostvaruje 110% čvrstoće etalona. Uzorci koji sadrže 1% vlakana ostvarili su nešto manju čvrstoću od uzoraka sa 0,5% vlakana, čije su čvrstoće slične etalonskim.

Prema dijagramu relativnog omjera naprezanja uzorka u usporedbi s maksimalnim naprezanjem etalona, primjećuje se da kod etalona domah dođe do sloma, dok uzorci koji su ojačani vlaknima i dalje mogu izdržati opterećenje, što i je svrha mikroarmiranja. Autori su naveli da se uzorcima sa duljim vlaknima povećava otpornost na slom, a isti dijagram treba napraviti za sve duljine i količine vlakana u uzorku.

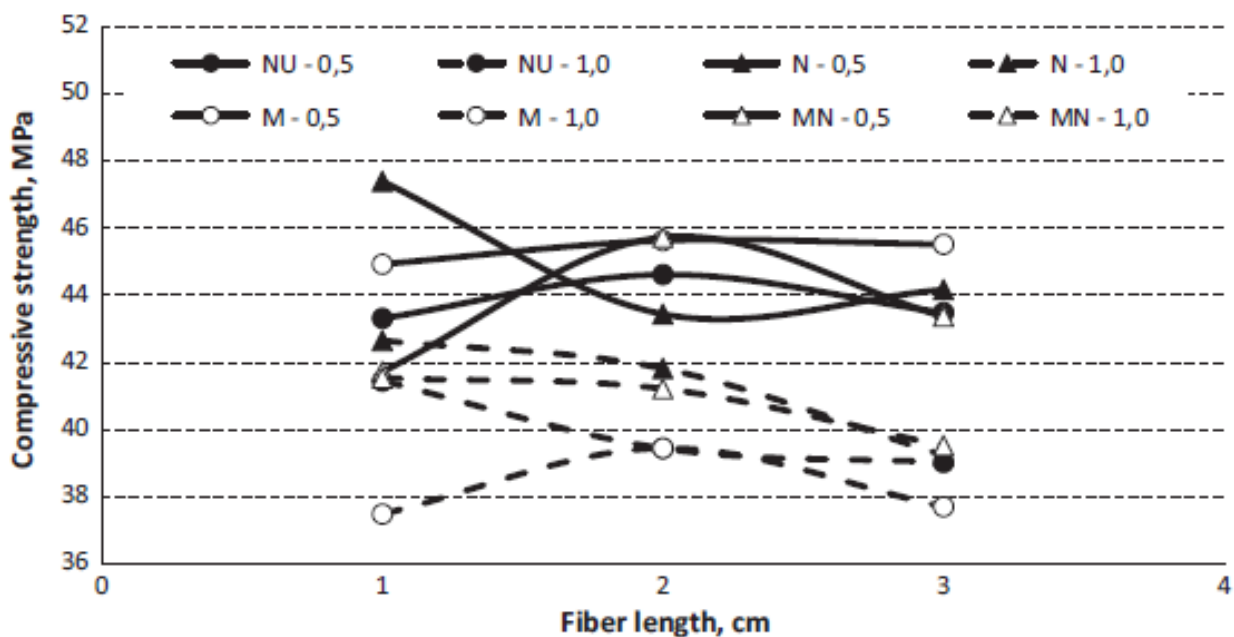


Slika 28.  $\sigma/\sigma_E - \delta$  dijagram [19]

Utjecaj duljine vlakana na mehaničke karakteristike kompozita prikazane na *slikama 29 i 30*. Prema *slici 29* može se primjetiti da najbolje rezultate na savijanje imaju uzorci sa vlaknima od 30 mm, dok na *slici 30*. uzorci sa kraćim vlaknima postižu bolje rezultate na tlačnu čvrstoću.

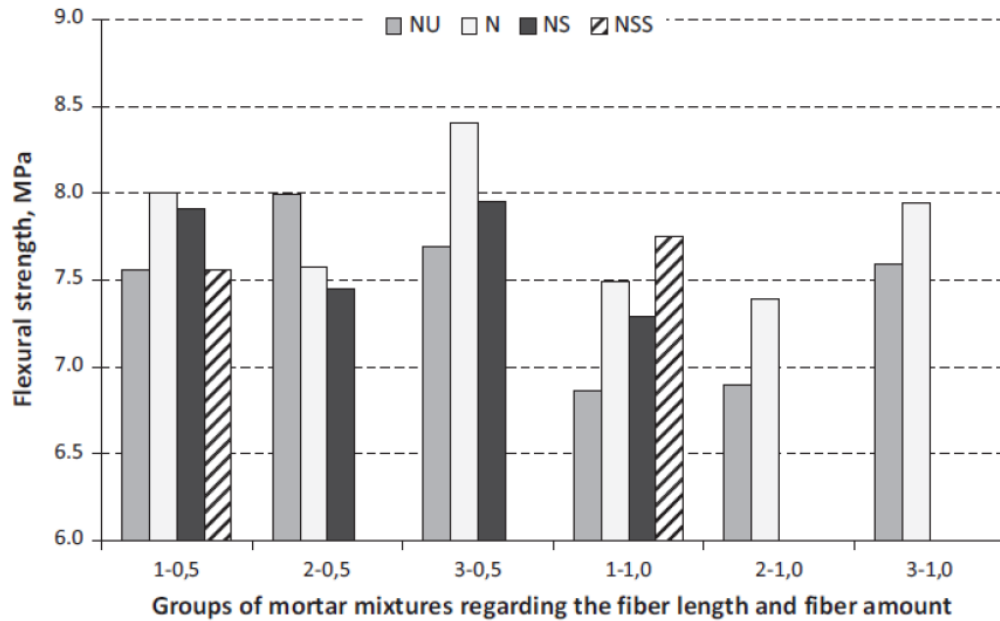


Slika 29. Utjecaj duljine vlakana na savojnu čvrstoću morta [19]

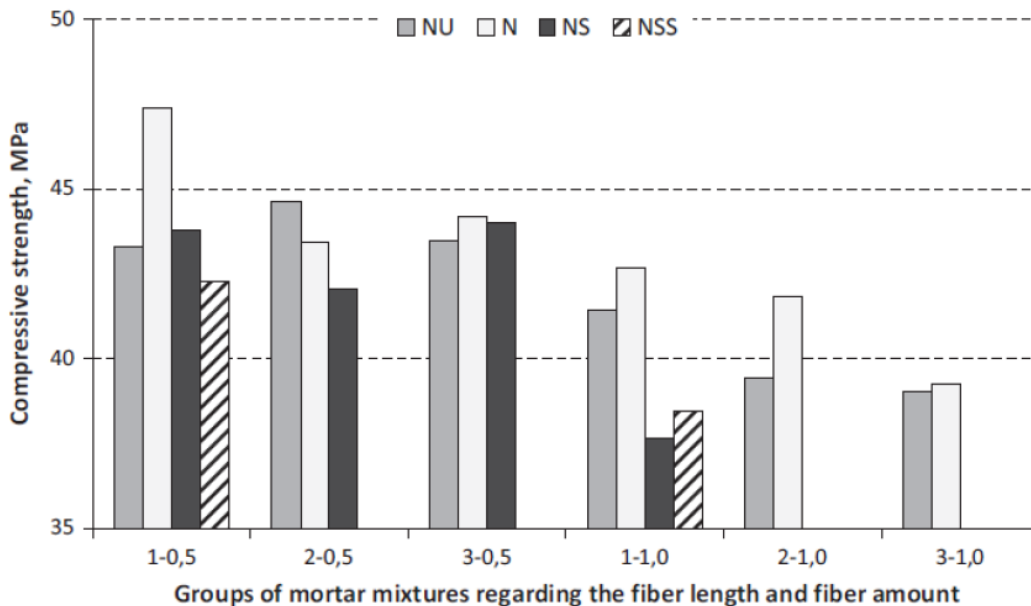


Slika 30. Utjecaj duljine vlakana na tlačnu čvrstoću morta [19]

Autori [19] su ispitali utjecaj vremena branja brniste na mehaničke karakteristike kompozita. Na slikama 31 i 32 prikazane su mehaničke čvrstoće uzoraka NS i NSS. Uzorak NSS1-1,0 postigao je najbolje rezultate. Slika 32. prikazuje da su rezultati savojne čvrstoće uglavnom lošiji u odnosu na rezultate uzorka koji imaju sadržana vlakna iz ljetnje berbe. Autori navode da uzrok loših rezultata može biti odsupanje od preporučenog vremena berbe i predug vremenski period uronjenosti vlakana u 5 % otopinu NaOH.



Slika 31. Utjecaj berbe na savojnu čvrstoću [19]



Slika 32. Utjecaj berbe na tlačnu čvrstoću [19]

Na temelju provedenog istraživanja, autori [19] su zaključili:

- Bolje mehaničke karakteristike ostvarili su izbojci brnistre ubrani u ljetnom periodu, obrađeni 28 dana u morskoj vodi i 19 dana u otopini od 5% NaOH
- Uzorci koji su obrađeni maceracijom u moru, a zatim uronjeni u NaOH su prema ispitivanju rezultirali boljom tlačnom čvrstoćom u slučaju većeg udjela vlakana u kompozitu
- Maceracija morskom vodom, za razliku od drugih kemijskih tretmana, pokazala se kao jeftinijom i ekološki prihvatljivijom metodom
- Uzorci čija su vlakna obrađivana maceracijom u trajanju od 15 dana u 5% otopini NaOH pokazali su lošije rezultate, u odnosu na uzorke čija su vlakna uronjeni nekoliko dana duže
- Žetva u jesen je dala dvostruko manju količinu vlakana. Ekstrakcija vlakana je bila otežana i njihovi uzorci rezultirali su lošijim mehaničkim svojstvima.
- Rezultati uzoraka od 56 dana starosti pokazali su se bolji od uzoraka starih 28 dana.
- Uzorci s vlaknima duljine 30 mm dali su najbolje vrijednosti savojne čvrstoće, a s time je smanjena tlačna čvrstoća
- Vlačna čvrstoća vlakana brnistre pokazala se izuzetno velika, usporedivši ih sa ostalim prirodnim vlaknima. Autori su zaključili da se vlakna brnistre treba uzeti u obzir kao potencijalno ojačanje cementnih kompozita.

Kovačević i suradnici [20] su ispitivali kemijski sastav vlakna brnistre dobivena različitim metodama. Te metode su obuhvaćale tri različite ekstrakcije elementarnih vlakana:

- Maceracija u morskoj vodi – svježe izrezane grane brnistre (100 g) vezale su se u snopiće i stavile u vodu, gdje su se namakale 21 dan. Nakon toga vlakna su se trljanjem od hrapave stijene i ispiranjem u morskoj vodi odvajala od središnjeg drvenastog dijela. Sadržaj dobivenih vlakana iznosio je približno 12% ukupne težine suhих izbojaka.
- Kemijskim putem u otopini od 15% NaOH – Svježe ubrane grane brnistre (100 g) stavile su se tri sata u otopinu pri temperaturi od 120 °C. Uslijedilo je lako odvajanje potrebnih vlakana. Ova metoda je dala 30% potrebnih vlakana od ukupne težine suhих grana.
- Ekstrakcija pomoću mikrovalne pećnice – 50 g suhих grana brnistre i 300 ml 15% otopine NaOH stavljeno je u teflonsku posudu, a potom sve skupa u mikrovalnu pećnicu na 900 W, na period od 10 minuta. Teflonska posuda je otporna na djelovanje mikrovalne. Nakon

obrade u mikrovalnoj pećnici uzorci su isprani vrućom, a zatim hladnom destiliranom vodom. Tokom ispiranja vlakna su se lako odvajala od središnjeg drvenastog dijela. Sadržaj dobivenih vlakana iznosio je približno 30% ukupne težine suhih izbojaka.

Na spektrometru ATR-FTIR su uočili da je postupak s 15% NaOH rezultirao najboljim uklanjanjem neceluloznih spojeva vlakana. Obrada vlakana natrijevim hidroksidom na 105 °C tijekom 2 sata potpuno uklanja lignin i vosak, dok je pektin uočljiv u tragovima. Obrada vlakana sa istom alkalnom otopinom, ali zagrijavana u mikrovalnoj pećnici 10 minuta (900 W) rezultirala je većim uklanjanjem pektina, ali ne i lignina. U *tablici 2.* prikazani su kemijski sastavi vlakana dobiveni prethodno opisanim metodama. Kovačević i suradnici su prikazali da jedina važna razlika uspoređujući rezultate metode mikrovalne pećnice sa ostalima, je da rezultira sa najmanjim postotkom celuloze i najvećim postotkom lignina.

	Cellulose %	Lignin %	Polyoses %	Extractives %	Ash %
<b>Maceracija u morskoj vodi</b>	<b>55</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>Maceracija u otopini 15 % NaOH</b>	<b>83</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
<b>Metoda mikrovalne pećnice</b>	<b>52</b>	<b>34</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

*Tablica 2. Kemijski sastav vlakana brnistre dobivenim prema različitim metodama [21]*

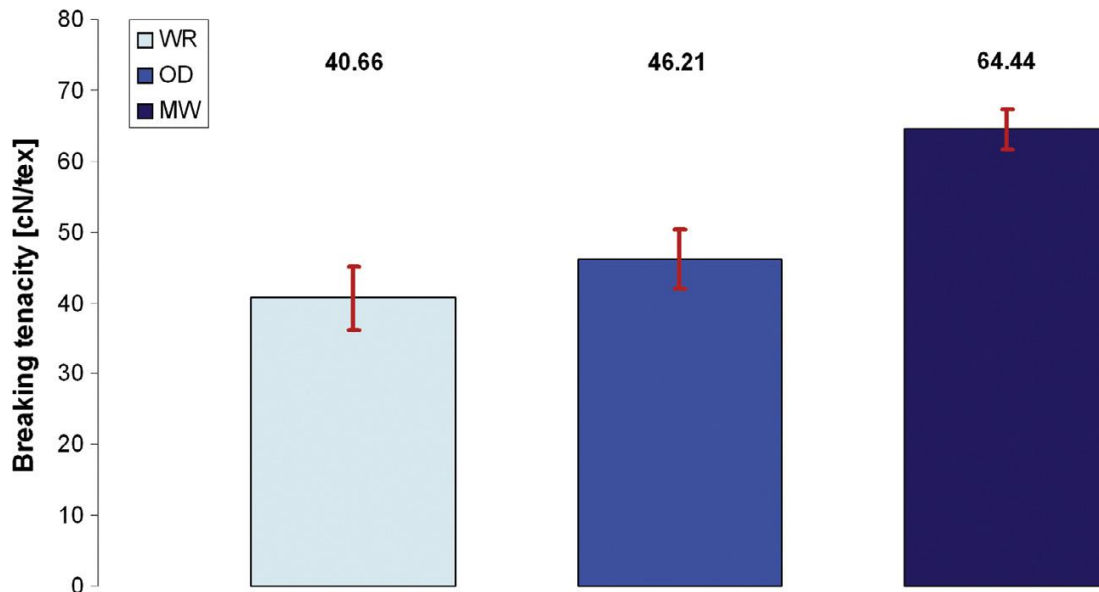
Bischof i suradnici [21] su ispitivali prekidnu silu vlakana brnistre nakon obrade mikrovalnom pećnicom, namakanjem u vodi i osmotskim degumiranjem. Obradom mikrovalne pećnice dobiveni su bolji rezultati od namakanja u vodi i osmotskog degumiranja za 58,5% i 39,5% (*slika 33.*).

Metoda mikrovalne pećnice obuhvaća obradu vlakana brnistre u mikrovalnoj pećnici 5 minuta na 900 W. Prethodno su vlakna stavljena u 5% otopinu NaOH, a nakon tretiranja u mikrovalnoj vlakna su odvojena u destiliranoj vodi. [21]

Fizikalna metoda osmotskog degumiranja temelji se na prirodnim fizikalnim zakonima: difuzija vode, osmoza i osmotski pritisak radi dobivanja veće kvalitete vlakana. Ova metoda pruža kontrolu protoka vode, pH vrijednosti, temperaturu i vrijeme obrade. Uzorci brnistre stavljani su u stakleni vodomjer od 2000 ml napunjen toplom vodom i sve skupa postavljeno u spremnik pun

zagrijane vode (30 °C). Jedan kraj gumenog crijeva uronjen je u stakleni mjerač, a drugi kraj u malu plastičnu posudu. Osmotsko degumiranje izbojaka brnistre trajalo je 28 dana, nakon čega su vlakna dobivena mehaničkim putem. [22]

Pri metodi namakanja uzorci izbojaka brnistre su stavljani u spremnik s vodom, zagrijanom na temperaturu od 30,6 - 33 °C. Izbojci su se 20 dana namakali u spremniku, nakon čega su se mehaničkim putem odvajala potrebna vlakna. [22]



Slika 33. Rezultati mjerenja žilavosti vlakana brnistre nakon obrade metodom; WR namakanje u vodi, OD osmotsko degumiranje i MW mirkovalna pećnica [22]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog istraživanja je utvrditi mogućnost tretiranja vlakana brnistre uporabom mikrovalne pećnice. Osim što se ovom metodom tretiraju vlakna, čime se poboljšaje prijanjanje vlakana i cementne matrice, na taj način se odvajaju vlakna od drvenastog dijela izbojka brnistre. Rezultate uzoraka, čija su vlakna dobivena metodom mikrovalne pećnice, su uspoređena sa rezultatima uzoraka gdje su vlakna obrađena u 15% otopini NaOH, čuvana na sobnoj temperaturi

Eksperimentalni dio sadrži pripremu i obradu vlakana brnistre 10 minuta u 15% otopini NaOH u mikrovalnoj pećnici na 800W, pripremu mješavina u laboratoriju te ispitivanje morta u očvrslom stanju. Obradna vlakna su u različitim omjerima i duljinama dodani u mort. Izrađeno je šest različitih mješavina i jedna referentna mješavina bez vlakana (etalon). Također je u prethodnim ispitivanjima na Katedri za materijale napravljeno 6 mješavina morta čija su se vlakna obradili u 15% otopini NaOH. Njihovi rezultati uzoraka su poslužili kao usporedba rezultata. Mortne prizmice su ispitivane na tlak i vlak.

Uzorci morta označeni su sa :

M – standardna mješavina morta

MW15-1-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 1 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

MW15-1-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 1 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

MW15-2-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 2 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

MW15-2-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 2 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

MW15-3-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 3 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

MW15-3-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 3 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena mikrovalnom pećnicom i u otopini od 15% NaOH.

N15-1-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 1 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

N15-1-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 1 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

N15-2-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 2 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

N15-2-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 2 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

N15-3-0,5 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 3 cm, u iznosu od 0,5% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

N15-3-1 - Mort istog sastava kao i M, uz dodatak vlakana brnistre od 3 cm, u iznosu od 1% volumnog udjela. Vlakna su obrađena u otopini od 15% NaOH.

U poglavljima koji slijede naveden je detaljan opis i svojstva korištenih materijala, postupak obrade vlakana pomoću mikrovalne tehnike i izrada mješavina te rezultati provedenih istraživanja.

## **6.1. Materijali**

Za izradu mješavina koristili su se materijali potrebni za standardnu mješavinu morta: pijesak, cement i voda uz dodatak obrađenih vlakana brnistre.

### **6.1.1. Vlakna brnistre**

Za dobivanje vlakana koriste se grančice brnistre (*slika 34*).



*Slika 34. Grane brnistre*





*Slika 35. Natrijev hidroksid*



*Slika 36. Posuda sa otopinom NaOH i grančicama brnistre u mikrovalnoj pećnici*

U mikrovalnoj pećnici vlakna u otopini NaOH se 10 minuta zagrijavaju na 800 W (*slika 36*). Nakon tretiranja u mikrovalnoj, vlakna se pod mlazom hladne vode iz slavine, ispiru i odvajaju od drvenastog dijela grančice (*slika 37*).



*Slika 37. Vlakna nakon tretiranja u mikrovalnoj pećnici (lijevo). Odvajanje vlakana brnistre pod mlazom hladne vode iz slavine (desno)*



*Slika 38. Odvojena vlakna, spremna za sušenje*

Usljedilo je sušenje na sobnoj temperaturi, dva do tri dana, i skladištenje također na sobnoj temperaturi. Za potrebe ispitivanja osušena vlakna su se rezali na duljine od 1, 2, 3 cm



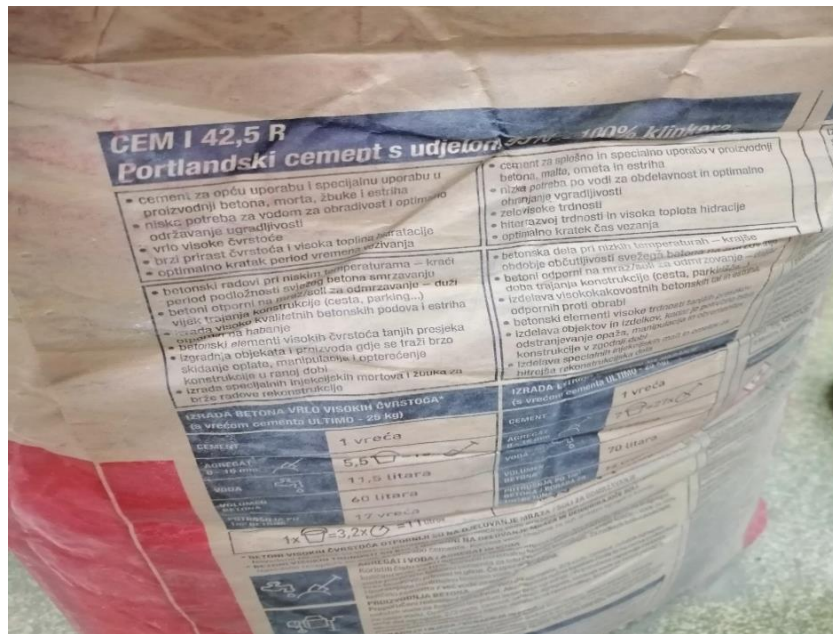
*Slika 39. Osušena i izrezana vlakna spremna za ispitivanje, na duljine od 1,2,3 cm*

### **6.1.2. Cement**

Kao vezivo korišten je CEM I 42.5 R, odnosno portlandski cement s udjelom 95% - 100% klinkera (*Slika 40.*). Ovaj tip cementa koristi se za opću upotrebu i specijalnu uporabu u proizvodnji betona, morta, žbuke i estriha. Ima vrlo visoke čvrstoće i nisku potrebu za vodom za obradivost i optimalno održavanje ugradljivosti. Također ima brzi prirast čvrstoća, visoku toplinu hidratacije i optimalno kratak period vremena vezivanja. [23]

Upotreba ovog cementa ima niz prednosti: [23]

- 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 havanje
- Betonski elementi visokih čvrstoća tanjih presjeka
- Izgradnja objekata i proizvoda gdje se zahtjeva brzo skidanje oplata, manipulacije i opterećenje konstrukcija u ranoj fazi
- Izrada specijalnih injekcijskih mortova i žbuka za brže radove rekonstrukcije



Slika 40. Vreća cementsa



Slika 41. Izvagana količina cementsa korištena za izradu jedne mješavine morta

### 6.1.3. Pijesak

Za potrebe izrade morta korišten je CEN Standardni pijesak, EN 196-1. To je prirodni, silikatni pijesak najfinijih frakcija. Njegove čestice su zaobljenog i izometričnog oblika. Proizvođač navodi da se pijesak suši, priprema i pregledava u modernoj radionici koja nudi jamstvo u pogledu kvalitete i konzistentnosti. Pijesak je pakiran u vrećice, od kojih svaka sadrži  $1350 \pm 5$  g (slika 42.). [24]



Slika 42. Pakiranje CEN standardnog pijeska

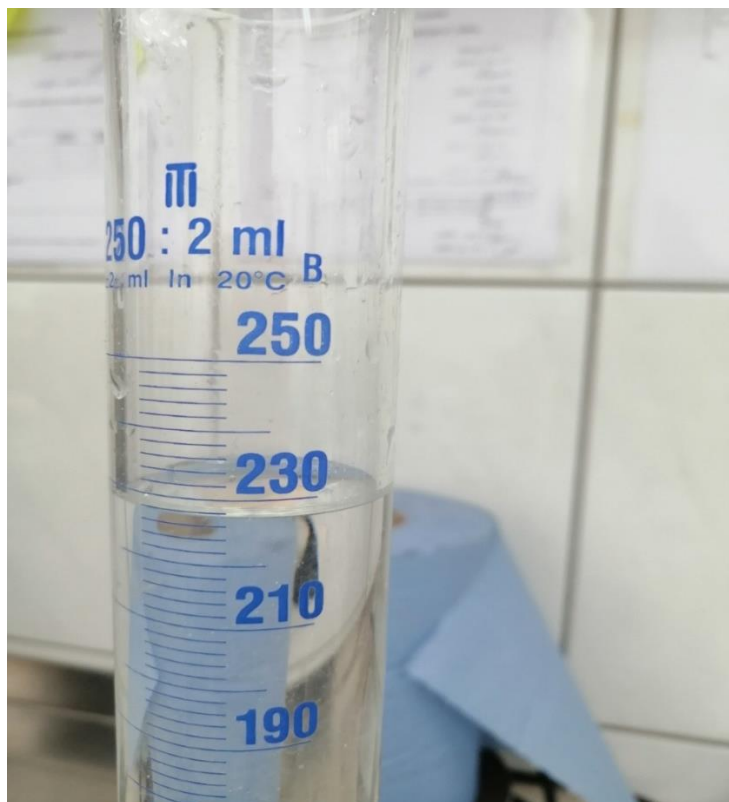
Prosijavanje je mjereno u skladu s EN 196-1 i ISO 679:2009. Rezultati su prikazani u tablici 3.

Square mesh Size (mm)	Cumulative (%) retained
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Tablica 3. Kumulativni prikaz ostataka na situ dobivenih prosijavanjem [25]

#### 6.1.4. Voda

Za potrebe ispitivanja korištena je samo čista voda iz slavine.



*Slika 43. Količina vode pri izradi jedne mješavine morta*

#### 6.2. Izrada morta

U laboratoriju su izrađene cementne mortne prizme koje su ojačane vlaknima brnistre. Osušena vlakna brnistre prethodno su izrezana na veličine od 1, 2 i 3 cm. Za vezivo je korišten cement CEM I 42.5 i CEN standardni pijesak. Izrađeno je šest mješavina, a od svake mješavine je izrađeno po tri prizme. Svaka mješavina je sadržavala 450 g cementa, cijelu vrećicu standardnog pijeska mase  $1350 \pm 5$  g i 225 g vode. U mješavinu od 0,5% vlakana dodano je 4,8 g vlakana, a u mješavinu od 1% dodano je 9,6 g vlakana brnistre.

Mort se miješao u standardnoj laboratorijskoj miješalici (*Slika 44.*) na način da su se prvo 30 sekundi miješali cement i voda a zatim se dodao pijesak i sve skupa miješalo još 30 sekundi. Nakon pauze od 90 sekundi, mort se miješao još 60 sekundi. Cijeli postupak je standardiziran. Referentni mort je označen sa M.



*Slika 44. Standardna laboratorijska miješalica i posuda sa mortom*

Uz standardnu mješavinu morta, izrađeni su još 6 mješavina:

1. Mort sa vlaknima duljine od 1cm u iznosu od 0,5% volumenskog udjela
2. Mort sa vlaknima duljine od 1cm u iznosu od 1% volumenskog udjela
3. Mort sa vlaknima duljine od 2cm u iznosu od 0,5% volumenskog udjela
4. Mort sa vlaknima duljine od 2cm u iznosu od 1% volumenskog udjela
5. Mort sa vlaknima duljine od 3cm u iznosu od 0,5% volumenskog udjela
6. Mort sa vlaknima duljine od 3cm u iznosu od 1% volumenskog udjela

Tijekom ručnog dodavanja vlakana u mortu (*Slika 43.*) primjećeno je da je teže bilo miješati vlakna koja su dodana u količini od 1% volumenskog udjela, bez obzira koja je duljina vlakana bila miješana.



*Slika 45. Ručno miješanje vlakana i morta*

Nakon dodavanja i miješanja vlakana, mješavina se stavlja u trodijelni kalup i zbija na vibrostolu, *slika 46*. Nakon standardnog vremena vibriranja, kalup se skida sa uređaja i višak morta se ukloni, *slika 47*. Konačno, mješavine u kalupima stavile su se u uređaj koji održava standardiziranu temperaturu i vlagu uzoraka, *slika 48*. Nakon 24 sata uzorci se izvade iz kalupa i 27 dana čuvaju na sobnoj temperaturi, do ispitivanja.



*Slika 46. Vibrostol sa trodijelnim kalupom i mješavinom*



*Slika 47. Poravnanje uzoraka*





*Slika 48. Komora za čuvanje uzoraka pri standardnoj temperaturi i vlazi*

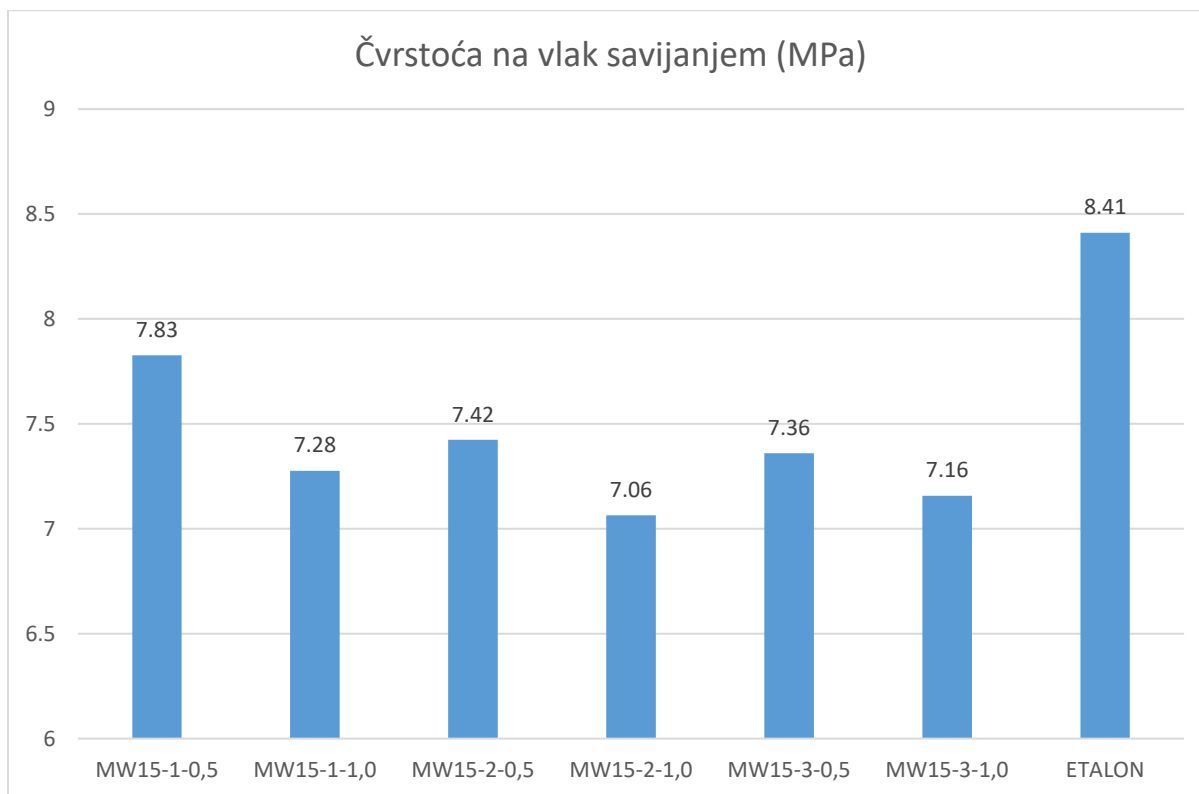
### **6.3. Ispitivanje očvrsljih uzoraka morta**

Uzorci u obliku prizmica se u hidrauličkoj presi ispituju najprije na vlak (vlak savijanjem) a zatim i na tlak, *slika 49*.



*Slika 49. Ispitivanje čvrstoće na vlak (savijanjem)*

Na slici 50. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće uzoraka MW.



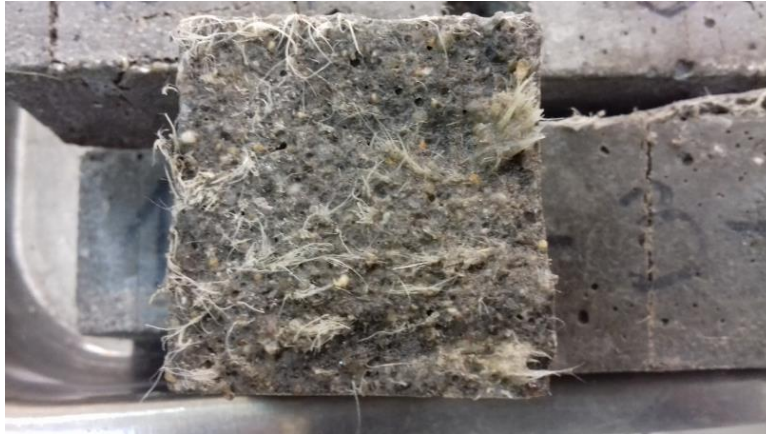
Slika 50. Rezultati vlačnih čvrstoća za uzorke sa vlaknima dobivenim metodom mikrovalne

Iz dijagrama na slici 50., najveću vrijednost, najbliže etalonu, je ostvario uzorak **MW15-1-0,5** sa 7,83 MPa. Slijede ga **MW15-2-0,5** sa 7,42 MPa, **MW15-3-0,5** sa 7,36 MPa, **MW15-1-1** sa 7,28 MPa, **MW15-3-1** sa 7,16 MPa, i kao posljednji **MW15-2-1** sa 7,06 MPa.



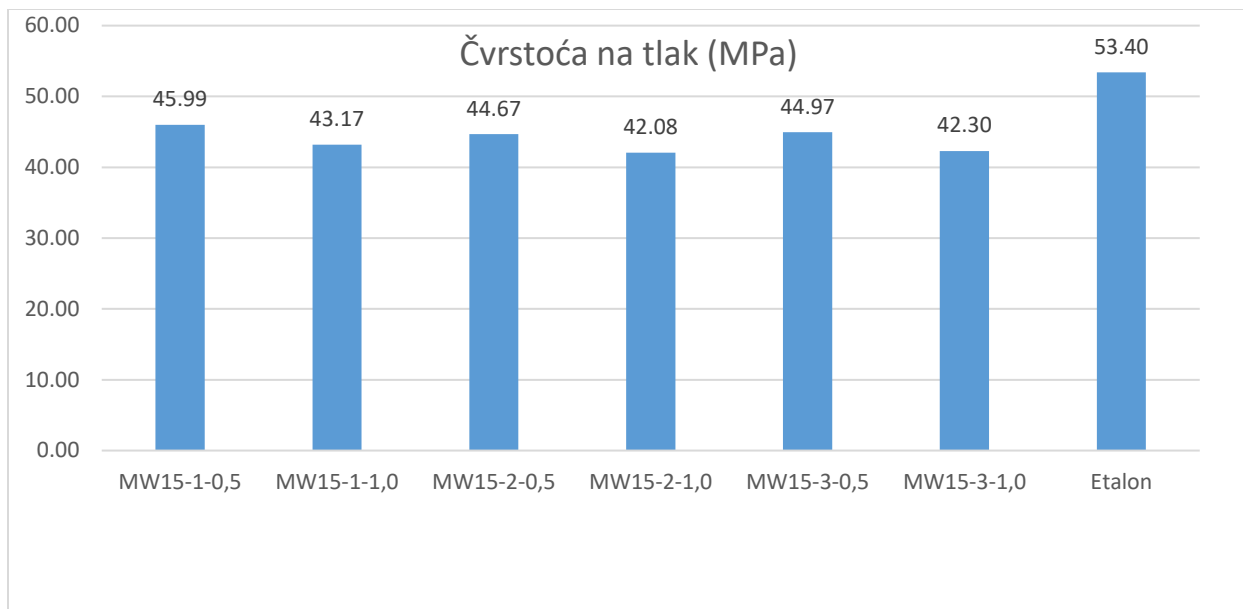
Slika 51. Presjek uzorka MW15-1-0,5

Na *slici 52*, može se primjetiti da je došlo do nakupljanja vlakana na pojedinim mjestima u u uzorku. Poželjno je da se vlakna pravilo rasporede, kako bi s ostvarili najbolji mogući rezultati. Autori [5] navode neke uzorke stvaranja snopova vlakana: prevelika količina vlakana, prekomjerno miješanje, loše projektiran sastav betona, prebrzo dodavanje vlakana u mješavinu male obradljivosti, dodavanje vlakana prije ostalih komponenti betona, miješanje u neadekvatnoj opremi.

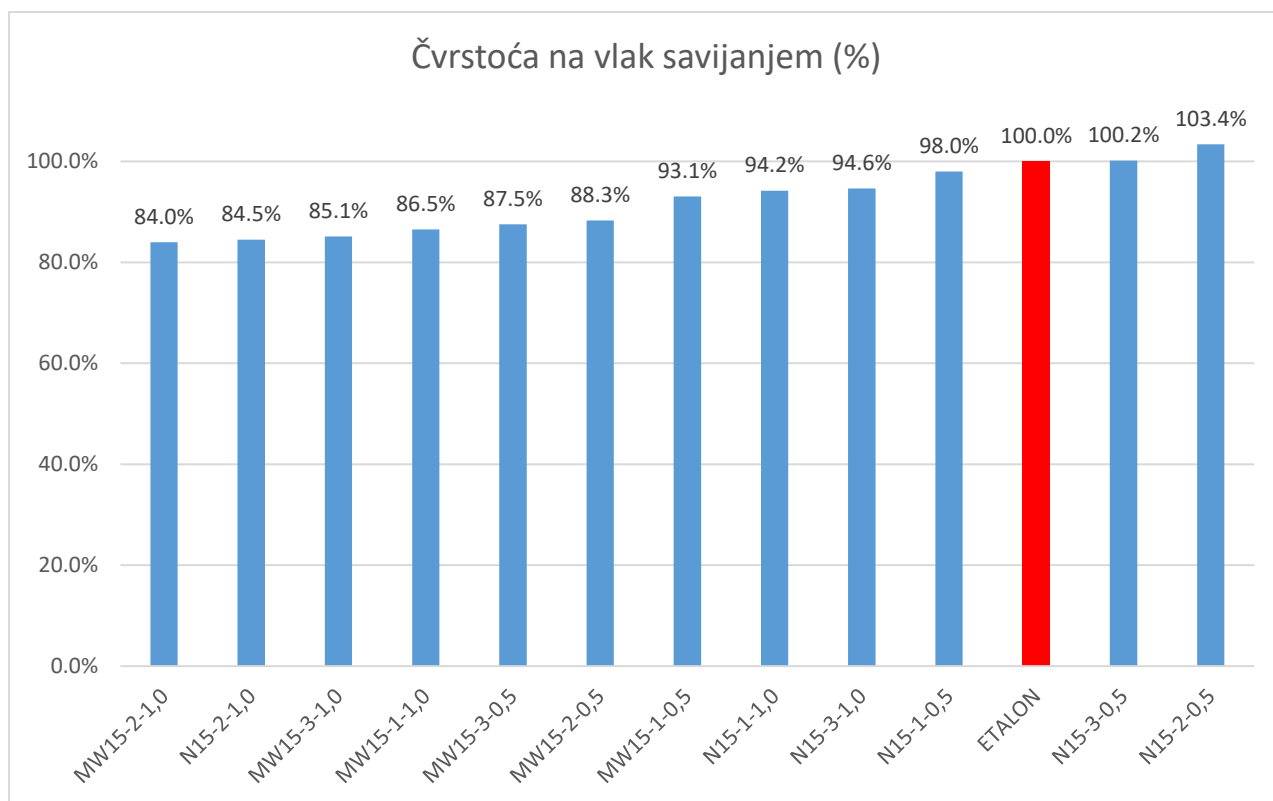


*Slika 52. Presjek uzorka MW15-3-1*

Na *slici 53*. prikazani su rezultati čvrstoće na tlak, uzoraka čija su vlakna dobivena mikrovalnom tehnikom. Vidljivo je da je **etalon** rezultirao najvećom tlačnom čvrstoćom od 53,4 MPa, a manju vrijednost su ostvarili uzorci sa dodanim vlaknima. Od njih je najveću vrijednost ostvario uzorak **MW15-1-0,5** od 46,0 MPa, slijede ga uzorci **MW15-3-0,5** sa 44,97 MPa i **MW15-2-0,5** sa 44,67 MPa. Kao kod rezultata na vlak, može se primjetiti da najnižu vrijednost na tlak su ostvarili uzorci kod kojih je volumni udjel vlakana iznostio 1%. Tako je od njih najveću vrijednost ostvario **MW15-1-1** sa 43,17 MPa, zatim **MW15-3-1** sa 42,3 MPa i posljednji sa najmanjom vrijednošću je **MW15-2-1** sa 42,08 MPa.



Slika 53. Rezultati tlačnih čvrstoća uzoraka čija su vlakna dobivena mikrovalnom tehnikom



Slika 54. Vlačne čvrstoće uzoraka MW i N, uspoređene s etalomom

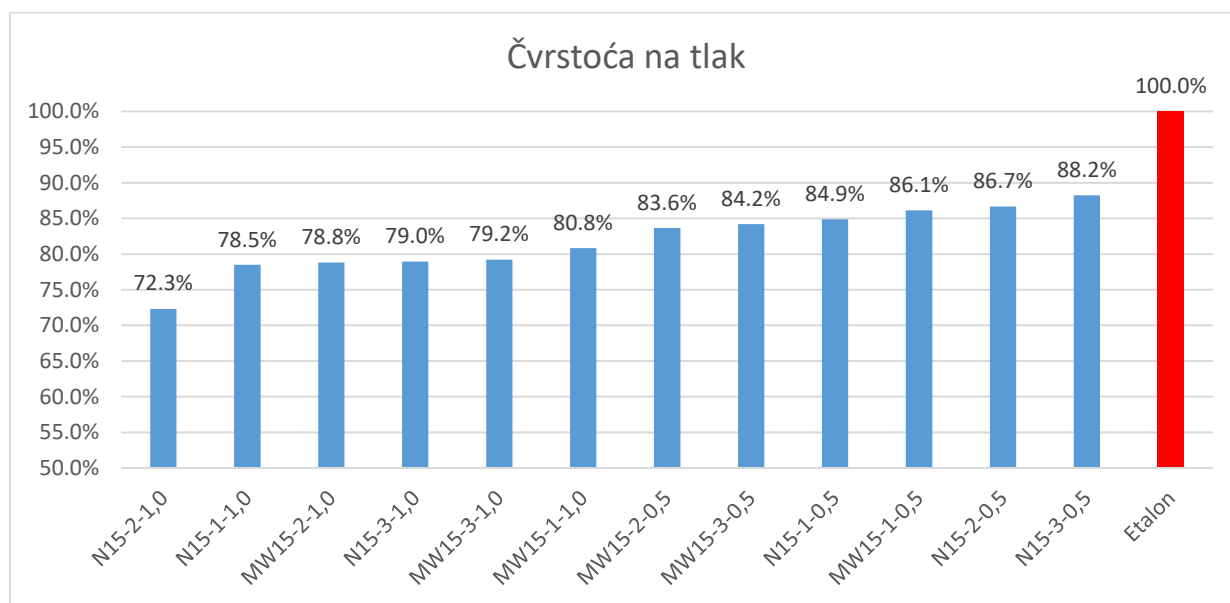
Postignute čvrstoće uzoraka MW i N u odnosu na etalon prikazane su na slikama 54 i 55. Uzorci N15-3-0,5 i N15-2-0,5 su jedini postigli bolje rezultate tlačne čvrstoće od etalona. Nijedan drugi uzorak nije premašio vrijednost čvrstoće koju je postigao etalon.

Vlačna čvrstoća uzoraka MW varira između 84,0 i 93,1 % etalonske čvrstoće, a čvrstoća uzoraka N od 84,5 do 103,4%. Može se primjetiti da su svi uzorci MW ostvarili manje vlačne čvrstoće od uzoraka N, osim uzorka N15-2-1,0.

Rezultati tlačnih čvrstoća (slika 55.) uzoraka, čija su vlakna dobivena u otopini NaOH, ne odstupaju puno od rezultata dobivenim pomoću mikrovalne pećnice. Najveću razliku i najlošije rezultate ostvario je uzorak **N15-2-1,0**, a najbolje **N15-3-0,5**. Svi uzorci su ostvarili lošije rezultate u odnosu na etalon.

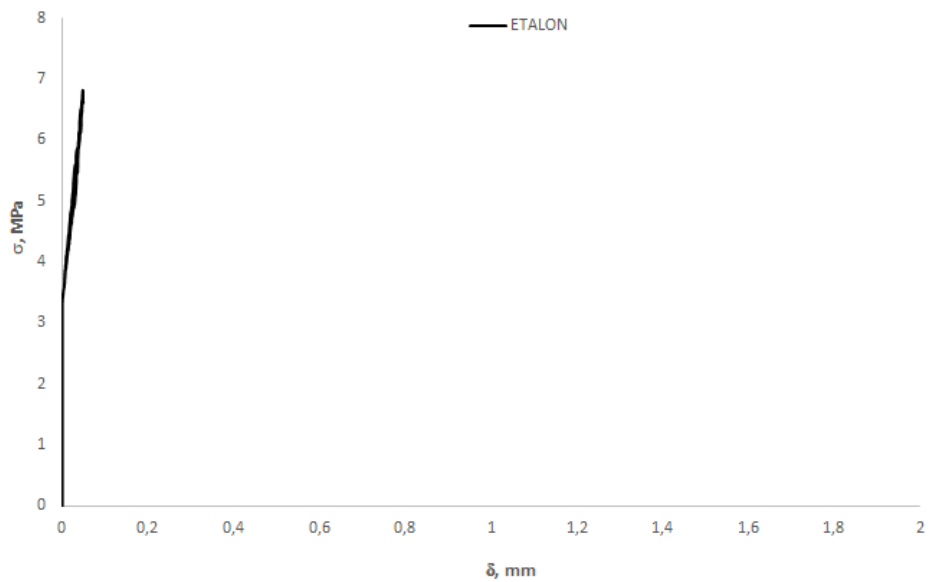
Sa dijagrama se može primjetiti da su svi uzorci sa 0,5% ukupne mase, neovisno koje metode obrade i duljine vlakana, ostvarili veće vlačne i tlačne čvrstoće, u odnosu na uzorke sa 1% ukupne mase. To je bilo za očekivati, veći postotak volumnog udjela vlakana u mortu je uzrokovao slabiju obradivost, a time veću poroznost i nižu konačnu čvrstoću u očvrslom stanju.

Kod uzoraka N sa 0,5% vlakana, primjećuje se trend povećanja tlačne čvrstoće sa povećanjem duljine vlakana. Međutim, prema rezultatima to ne vrijedi i za uzorke MW sa 0,5 % vlakana. Najveću čvrstoću ostvaruje uzorak sa vlaknima dugim 1 cm, zatim 3 i 2 cm. Također vrijedi i za uzorke MW sa 1% vlakana.

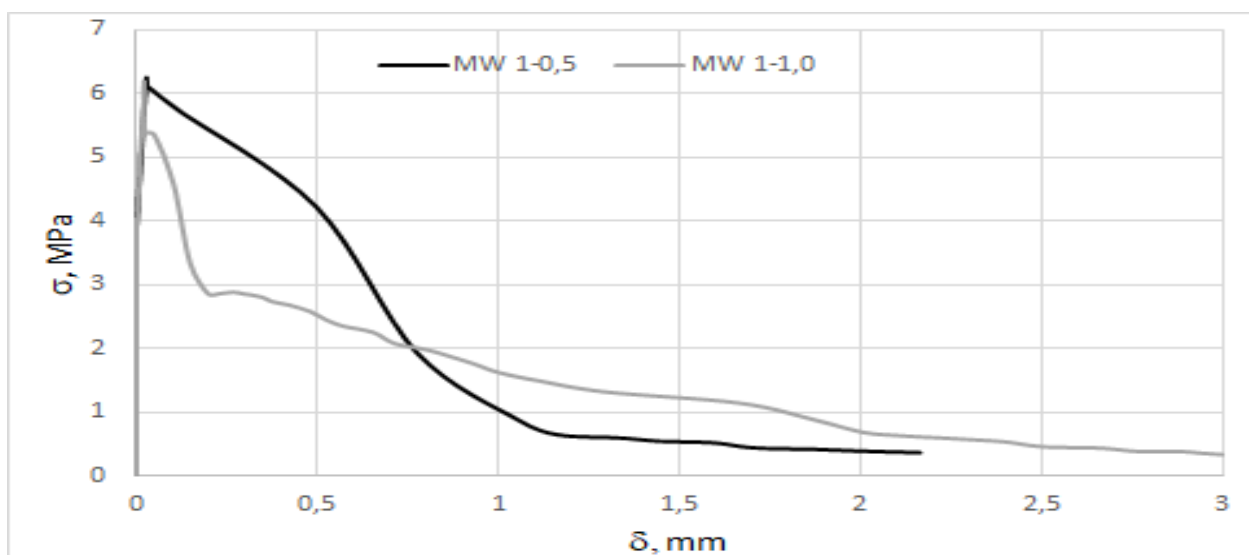


Slika 55. Tlačne čvrstoće uzoraka MW i N, uspoređene s etalom

Svojstva mikroarmiranog betona se najbolje izražavaju pri ispitivanju prizme opterećene savijanjem do sloma. Karakteristične točke na radnom dijagramu, kao što su čvrstoća pri pojavi prve pukotine i kranja čvrstoća, uzoraka MW1-0,5; MW1-1,0 i etalona, prikazani su na slikama 45 i 46.



Slika 45.  $\sigma$ - $\delta$  dijagram za etalon (56 dana starost uzoraka)



Slika 46.  $\sigma$ - $\delta$  dijagram za vlakna duljine 1 cm (28 dana starost uzoraka)

Autori [20] navode da krajnja čvrstoća uzoraka ovisi o količini dodanih vlakana, faktoru oblika i karakteristikama prionjivosti i sidrenju vlakana. Manja duljina sidrenja daje manji doprinos krajnjoj čvrstoći. Na *slici 46* ispitivana je samo duljina vlakana od 1 cm, stoga bi bilo dobro za buduća istraživanja, izraditi radne dijagrame za različite duljine vlakana te usporediti njihova svojstva pod opterećenjem.

Radnim dijagramom se grafički pokazuje ponašanje materijala pod djelovanjem opterećenja, a površina ispod njega predstavlja energiju koju tijelo može apsorbirati. Prema *slici 45* može se primjetiti da je krhki materijal mort u pogledu žilavosti jako loš jer se naglo lomi. Unatoč ostvarenim manjim čvrstoćama pri pojavi prve pukotine, krajnja čvrstoća uzoraka MW1-0,5 i MW1-1,0 rezultirala je znatno boljom žilavošću od uzorka bez dodanih vlakana.

Uspoređujući uzorke MW1-0,5 i MW1-1,0 na *slici 46*, pokazalo se da dodavanjem veće količine vlakana smanjuje se čvrstoća pri pojavi prve pukotine, dok se žilavost kompozita povećaje. Prema nekim autorima, iako povećanjem postotka vlakana poboljšajemo mehanička svojstva, to ujedno smanjuje obradivost mješavine u svježem stanju. Zato je potrebno istražiti idealnu količinu koja zadovoljava sve parametre u svježem i očvrslom stanju.

## 7. ZAKLJUČAK

Dodavanjem malih diskontinuiranih vlakana u mješavinu standardnog betona ili morta dobivamo mikroarmirani beton poboljšanih svojstava. Osim dodanih vlakana, mikroarmirani beton se od klasičnih sastojaka razlikuje po manjoj količini krupnog agregata i manjem maksimalnom zrnu, dok se potrebna količina cementne paste povećava. Ova vrsta mikro armiranja betona ne može zamijeniti klasičnu armaturu u vlačnoj zoni. Unatoč tome, pokazalo se da upotreba ovih vlakana znatno poboljšaje mehanička svojstva samog kompozita. Provedena su mnoga istraživanja o interakciji cementne matrice i vlakana. Njihova kompaktibilnost ovisi o mnogim faktorima, kao što su vrsta i količina dodanih vlakana, način ugradbe i prethodno tretiranje vlakana, sastav komponenata betona itd.

Brnistra, poznatija kao Spanish Broom, grmolika je biljka čije se stanište pronalazi na Mediteranskom području, jugozapadnoj Aziji, sjeverozapadnoj Africi, južnoj i sjevernoj Americi. Na području Mediterana vlakna brnistre su oduvijek imala svestranu primjenu, ponajviše u

tekstilnoj industriji. Međutim, sam proces izvlačenja i tretiranja vlakana u morskoj vodi i maceracijom bio je težak i mukotrpan posao, stoga se često odustajalo od njezine primjene.

Da bi se izdvojila potrebna vlakna brnistre od unutrašnjeg drvenastog dijela grana, u ovom radu, vlakna se tretiraju u mikrovalnoj pećnici 10 minuta na 800 W. Nakon navedenog tretiranja, izrađeno je šest mješavina morta i jedna referetna mješavina bez vlakana. Prethodno je izrađeno šest mješavina morta sa vlaknima obrađenim 8 dana u 15% otopini NaOH.

Rezultati ojačanih uzoraka ostvarili su manje vlačne i tlačne čvrstoće u odnosu na etalon. Također su ostvarili lošije vlačne čvrstoće od uzoraka čija su vlakna 8 dana obrađena u 15% otopini NaOH, dok su ispitivanjem na tlak uzorci ostvarili podjednake rezultate.

Veći postotak volumnog udjela vlakana uzrokuje slabiju obradivost, veću poroznost i nižu konačnu čvrstoću. To se pokazalo prema rezultatima gdje su uzorci sa 0,5% vlakana ostvarili bolje vlačne i tlačne čvrstoće od uzoraka sa 1% dodanih vlakana.

Kod uzoraka čija su vlakna tretirana 15% otopinom NaOH povećanjem duljine vlakana povećaje se tlačna čvrstoća. Međutim, prema dobivenim rezultatima, to ne vrijedi i za uzorke sa vlaknima tretiranim u mikrovalnoj pećnici, gdje su uzorci sa vlaknima duljine 1 cm ostvarili najbolje rezultate, a zatim uzorci sa 3 i 2 cm.

Upotreba mikrovalne pećnice se pokazala kao efikasno i brzo rješenje. Za razliku od ostalih načina tretiranja, kao što je npr. samo kemijskim putem u otopini NaOH, znatno se skraćuje potrebno vrijeme ekstrakcije vlakana. Mikrovalovi pećnice jednoliko prodiru i zagrijavaju cijeli presjek grana i utječu na odvajanje vlakana.

Rezultati vlačnih i tlačnih čvrstoća uzoraka, čija su vlakna brnistre obrađena mikrovalnom tehnikom, su zadovoljavajući u odnosu na rezultate uzoraka čija su vlakna obrađena u 15 % otopini NaOH tijekom 8 dana.



## 8. LITERATURA

- [1] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 25(2), 575-581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- [2] Juradin, S., Boko, I. (2018). Mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre, GRAĐEVINAR, 70 (6), 487-495, doi : <http://casopis-gradjevinar.hr/archive/article/2293>
- [3] GFOS, predavanje Betoni-posebnih-namjena -3-Mikroarmirani beton 21.07.2020.  
<http://www.gfos.unios.hr/download/betoni-posebnih-namjena-3.pdf>
- [4] Johnston, C.D. (2006.). Fiber-Reinforced Cements and Concretes, ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, vol.3
- [5] [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&usq=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&usq=AOvVaw2SwdHhikeQAEZUYUppzOog) 21.07.2020.
- [6] <https://blog.ria.hr/gradnja/beton-s-vlaknima/> 21.07.2020.
- [7] <http://m.hr.ntecmono.com/synthetic-fiber-reinforcement/high-quality-synthetic-fiber-reinforcement.html> 22.07.2020. 23.07.2020.
- [8] <http://textilewithme.blogspot.com/2015/04/natural-fibers.html> 23.07.2020.
- [9] Kim, W., i sur., (2012). High strain-rate behavior of natural fiber-reinforced polymer composites, JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS, 46(9), 1051-1065, doi:<https://doi.org/10.1177/0021998311414946>
- [10] <https://textileapplied.blogspot.com/2016/04/what-properties-natural-fiber.html> 11.08.2020.
- [11] Campilho, Raul D. S. G. (2016). Natural fiber composites, CRC Press
- [12] El-Sayed, I. (2016). Proizvodnja biogoriva na osnovi lignoceluloze, završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
- [13] Rogić, V., (2015). Primjena konoplje u betonu, Diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek
- [14] <https://www.zadarskilist.hr/clanci/09062012/nekad-se-brnistru-i-jelo-i-prelo> 10.08.2020.
- [15] [Udruga Kačić - ŽUKA \(BRNISTRA\) U POVIJESTI DALMACIJE Žuka... | Facebook](#) 13.08.2020

- [16] <https://www.profil-klett.hr/brnistra-biljka-koja-spaja-tradiciju-ekologiju-i-likovno-stvaralastvo> 25.07.2020.
- [17] Kovačević, Z., Krnčević, M., Katović, D. (2010). Brnistra - zaboravljena tekstilna sirovina, TEKSTIL, 59 (2010), 9, 410-421
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=6dyJy5SJxe8> 01.08.2020.
- [19] Juradin, S., Boko, I., Netinger Grubeša, I., Jozić, D., Mrakovčić, S., (2019). Influence of harvesting time and maceration method of Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibers on mechanical properties of reinforced cement mortar, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 225(2019), 243-255, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.207>
- [20] Kovačević, Z., Krnčević, M., Katović, D. (2011). Spanish broom fibers as constituents of composite materials
- [21] Kovačević, Z., Bischof, S., Vujasinović, E., Fan, M., (2016). The influence of pretreatment of *Spartium junceum* L. fibers on the structure and mechanical properties of PLA biocomposites, ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY, 12(4), 449-463, doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.08.004>
- [22] <https://www.yumpu.com/en/document/read/46160709/review-of-retting-methods-project-t-pot> 26.01.2021.
- [23] <https://www.cemex.hr/documents/47380066/47381413/Tehni%C4%8Dka+uputa+CEM+II+B-S+42%2C5+N+Sv.Kajo.pdf/34fed7e4-227f-ee03-113e-f31b771a6d9b> 20.09.2020. 11.12.2020.
- [24] <https://www.standard-sand.com/en/standard-sand-cen-en-196-1-2/> 10.12.2020.