

primljen: 16.01.2023.  
korigovan: 02.02.2023.  
prihvaćen: 01.03.2023.

izvorni naučni rad

UDK : 691.555:666.9.015.66

## UTICAJ DUŽINE POLIPROPILENSKIH MULTIFILAMENTNIH I FIBRILIZANIH VLAKANA NA SVOJSTVA CEMENTNOG MALTERA

Dušan Grdić<sup>1</sup>, Nenad Ristić<sup>2</sup>, Zoran Grdić<sup>3</sup>, Gordana Topličić - Ćurčić<sup>4</sup>, Dejan Krstić<sup>5</sup>

**Rezime:** Polipropilenska vlakna spadaju u grupu sintetičkih vlakana koja se zbog svojih svojstava, korisnog efekta i povoljne cene najčešće dodaju cementnim kompozitima. U radu su prikazani rezultati ispitivanja uticaja koji promena dužine dve vrste polipropilenskih vlakana ima na određena svojstva maltera u očvrslom stanju. Prilikom spravljanja maltera dodavana su polipropilenska multifilamentna vlakna i fibrilizirana vlakna u količini od 900 g/m<sup>3</sup>, pri čemu je dužina ovih vlakana iznosila: 6 mm, 12 mm i 18 mm. Na očvrslom malteru ispitana su sledeća svojstva: zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju i skupljanje maltera usled sušenja. Generalno se može zaključiti da je povećanje čvrstoće pri savijanju utoliko veće ukoliko je dužina vlakana veća. Takođe, utvrđeno je da dodatak vlakana povoljno utiče na smanjenje skupljanja maltera usled sušenja u periodu od 4 do 28 dana.

**Cljučne reči:** multifilamentna vlakna, fibrilizirana vlakna, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju, skupljanje maltera

## EFFECTS OF THE LENGTH OF POLYPROPYLENE MULTIFILAMENT AND FIBRILLATED FIBERS ON CEMENT MORTAR PROPERTIES

**Abstract:** Polypropylene fibers belong to the group of synthetic fibers which because of their properties, positive effects and affordable price are most often added to cement composites. The paper presents the results of tests of the effects the variation of the length of two types of polypropylene fibers has on certain properties of mortar in hardened state. On the occasion of making the mortar, polypropylene multifilament fibers and fibrillated fibers were added, in the amount of 900 g/m<sup>3</sup>, whereby the length of the fibers was: 6 mm, 12 mm and 18 mm. The hardened mortar was tested for the following properties: density of hardened mortar, compressive strength, flexural strength and mortar shrinkage in air. In general it can be concluded that the flexural strength increase is correlated with the fiber length increase. Also, it was determined that the addition of fibers has a positive effect on the reduction of mortar shrinkage due to drying in the period from 4 to 28 days.

**Key words:** Multifilament Fibers, Fibrillated Fibers, Compressive Strength, Flexural Strength, Mortar Shrinkage

<sup>1</sup> Doc. dr, mast. inž. građ, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, dusan.grdic@gaf.ni.ac.rs

<sup>2</sup> V. prof. dr, dipl. inž. građ., Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs

<sup>3</sup> Red. prof., dipl. inž. građ., Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs

<sup>4</sup> Red. prof., dipl. inž. građ., Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs

<sup>5</sup> Dipl. inž. građ., Građevinsko – arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, dejan.krstic@gaf.ni.ac.rs

### 1 UVOD

Priroda cementnih maltera i betona je takva da se oni odlikuju ne samo malom čvrstoćom pri zatezanju, već da se prilikom takvog naponskog stanja dešava tzv. krti lom. Takođe, cementni malteri i betoni često nisu u dovoljnoj meri otporni na udarno opterećenje, kao i niz drugih dejstava. Urađena su zaista brojna istraživanja sa ciljem da se neka svojstva maltera i betona poprave i na način koji je drugačiji nego što je korišćenje klasične armature. Jedan od njih je tzv. mikroarmiranje betona koje se sastoji u dodavanju mikroarmature u beton prilikom njegovog spravljanja. Ova tehnologija, iako poznata i mnogo ranije, naročito je počela da se razvija kasnih '60-tih godina prošlog veka. Odmah treba naglasiti da mikroarmiranje betona svojim efektima ne može da zameni klasičnu armaturu ali ima pozitivne efekte na određena svojstva betona [1].

Koncept upotrebe vlakana za poboljšanje ponašanja građevinskih materijala je star i intuitivan. Primeri uključuju dodavanje vlakana slame u opeke od blata sušene na suncu prvenstveno napravljene od gline (čerpiča), konjske dlake u glinu od blata i azbestnih vlakana u keramičku keramiku, čime se stvara kompozit sa boljim performansama [2]. U slučaju čerpiča, na primer, koji se koristio u Mesopotamiji na Bliskom istoku, vlakna slame možda nisu dovela do povećanja zatezne čvrstoće. Međutim, njihove stvarne prednosti (kako ih danas razumemo) bile su da ograniče fragmentaciju nakon pucanja, spreče pukotine da se šire otvore, smanje stopu degradacije u uslovima cikličnog ponavljanja delovanja temperature i vlažnosti, kao i poboljšanje žilavosti. Stoga, nije iznenađenje da su, kada je portland cementni malter i beton počli da se razvijaju kao građevinski materijali tokom XIX veka, učinjeni pokušaji da im se dodaju vlakna kako bi se poboljšala njihova svojstva [2].

Godine 1855., francuski patent Džozefa Luja Lambota zagovarao je kombinaciju „gvozdених žica (koje formiraju kontinualnu mrežu) i cementa” što je dovelo do materijala nazvanog na francuskom „ferciment”, danas poznatog kao ferocement [2]. Ubrzo nakon toga nastao je armirani beton. Prednapregnuti beton je usledio u prvoj trećini XX veka [3]. Čini se da je ideja o korišćenju jakih diskontinuiranih vlakana kao armature za beton bila izazov za mnoge praktičare i građevinske inženjere. Jednostavno dodavanje mikro armature u mešalicu betona u obliku vlakana, da bi se stvorio homogen,

izotropan, jak, žilav, izdržljiv i oblikovni konstruktivni materijal je san koji je počeo krajem XIX veka. Iako u mnogo čemu početne premise nisu dokazane i danas se istraživanja na ovu temu i dalje obavljaju.

Dva različita vremenska perioda karakterišu tempo razvoja primene vlakana posebno namenjenih za malter i beton. Prvi period, pre 1960-ih, odgovara fazi pionirstva sa mnogo ideja, ali gotovo bez praktične primene [2]. Savremeni razvoj maltera i betona armiranih vlaknima započeo je ranih 1960-ih nakon istraživačkog rada Romualdija i saradnika u SAD [4] i Krenchel u Danskoj [5]. Američki istraživači su pretpostavili da se čvrstoća pri zatezanju betona se može značajno povećati dodavanjem vlakana. Pretpostavili su da vlakna igraju ključnu ulogu u zaustavljanju pukotina i da je razmak između vlakana stoga jednak maksimalnoj veličini pukotina. Ova hipoteza je izazvala značajnu pažnju (i kontroverzu) među istraživačima i praktičarima jer je ponudila rešenje za povećanje zatezne čvrstoće betona.

Od 1960-ih, mnoštvo vlakana i vlaknastih materijala se kontinuirano uvode na tržište uporedo sa novim rezultatima istraživanja i novim mogućnostima primene. Uvođenju novih vlakana ili vlaknastih materijala uvek prethode istraživačke studije koje pružaju eksperimentalnu podršku i bolje razumevanje mehanike armiranja vlaknima (mehanika kompozitnih materijala, mehanika loma, mehanika oštećenja). Takve studije ukazuju na bolje razumevanje i identifikaciju poželjnih karakteristika vlakana i matrice za bilo koju određenu primenu [2].

Danas se u širokoj upotrebi nalazi veoma veliki broj različitih tipova vlakana. S tim u vezi, uputno je izvršiti klasifikaciju mikroarmature, a kao najlogičniji način da se to učini nameće se podela prema vrsti vlakana i materijalu od kojeg su ona napravljena. U tom smislu, kao najšira mogla bi se dati podela na vlakna vestačkog i na vlakna prirodnog porekla [1, 6].

Vlakna vestačkog porekla možemo, prema vrsti materijala od kojeg se proizvode, dalje klasifikovati u tri velike grupe:

- čelična vlakna (od običnog ili nerđajućeg čelika),
- polimerna vlakna (polipropilenska, polietilenska, najlonska, karbonska i dr.),
- mineralna vlakna (staklena, azbestna i dr.).

Kao najvažnije vrste vlakana prirodnog porekla možemo da navedemo celulozna, parnučna, jutana i vlakna od konoplje [7].

Polimer polipropilen u komercijalnu primenu ulazi 1958. godine, a već desetak godina kasnije samo u SAD njegova potrošnja je premašila 500 miliona tona, zahvaljujući pre svega niskoj ceni i širokim mogućnostima primene [8]. Ovaj sintetički materijal nastaje polimerizacijom nezasićenog ugljovodonika propilena ( $\text{CH}_3\text{-CH=CH}_2$ ) i spada u grupu tzv. termoplastičnih polimera. To znači da kod polipropilena pri zagrevanju dolazi do njegovog razmekšavanja (na oko  $160\text{ }^\circ\text{C}$ ), a zatim i topljenja na višim temperaturama, pri čemu ovaj materijal nakon hlađenja ponovo očvršćava, zadržavajući svoja početna svojstva. Postupak razmekšavanja i stvrdnjavanja može se ciklično ponavljati više puta, bez pogoršavanja tehničkih karakteristika.

Što se tice primene polipropilena u vidu vlakana, danas su u širokoj upotrebi pre svega monofilamentna vlakna (prečnika od nekoliko desetina do nekoliko stotina mikrona i dužine od 5 do 50 mm), mada se dosta koriste i u fibrilizovanom obliku. Ono što polipropilenska vlakna posebno preporučuje kao mikroarmaturu za maltere i betone je veoma povoljan faktor oblika  $l/d$ . Ovaj koeficijent, koji daje odnos između dužine vlakana ( $l$ ) i njihovog prečnika ( $d$ ), predstavlja jednu od najznačajnijih karakteristika mikroarmature i u slučaju polipropilena kreće se u granicama od 50 do 5000 [6]. Osnovna razlika između ove monofilamentnih i fibrilizovanih vlakana ogleda se u strukturi i dimenzijama. Monofilamentna vlakna su manjih dimenzija, tanja i lakša, pa se bolje disperguju u masi kompozita. Fibrilizovana vlakna se proizvode kao snopovi debljih vlakana međusobno povezanih u vidu mreže [1]. Fibrilizovana vlakna imaju tendenciju „isplivavanja“ na površinu sveže mesavine tokom ugradnje, a nakon očvrscavanja kompozita se mogu jasno primetiti na njegovoj površini (tzv. „dlakavi malter“). Monofilamentna vlakna se ravnomerno raspoređuju u svim pravcima, pa su samim tim gotovo neuočljiva na površini kompozita. Treća važna razlika između monofilamentne i fibrilizovane mikroarmature ogleda se u broju vlakana u jedinici zapremine ugrađenog maltera ili betona. Broj monofilamentnih polipropilenskih vlakana kreće se, u zavisnosti od primenjene količine, u granicama između 182 - 273 miliona po  $1\text{m}^3$  sveže mešavine, dok odgovarajući broj fibrilizovanih vlakana iznosi svega 5 do 7 miliona/ $\text{m}^3$  [6].

Polipropilenska mikro vlakna se odlikuju nizom povoljnih svojstava posmatrano sa aspekta primene u cementnim kompozitima. Doduše, neka od ovih svojstava se mogu sagledati i sa onog drugog, negativnog aspekta, što pre svega zavisi od namene

maltere i betona i izloženosti spoljašnjim dejstvima. U literaturi se najčešće navode sledeća svojstva polipropilenskih mikrovlakana:

- specifična masa (gustina) polipropilenskih vlakana iznosi oko  $0,91\text{ kg/m}^3$  [9],
- postojan je na temperaturama nižim od  $150$  do  $160\text{ }^\circ\text{C}$ , ali je krh na temperaturama ispod  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,
- hemijski je inertan (ponaša se neutralno u toku hidratacije cementa),
- ima visoku otpornost u uslovima agresivnog delovanja kiselina i soli,
- alkalna sredina, koja je karakteristična za maltere i betone, nema značajnijeg uticaja na promenu kvaliteta ili trajnosti polipropilenskih vlakana [10],
- polipropilen je neporozan (ne apsorbuje vodu i praktično ima hidrofobnu površinu),
- čvrstoća pri zatezanju je izuzetno visoka i kreće se u granicama od  $240$  do  $900\text{ MPa}$  [11],
- nizak modul elastičnosti  $1,5$  do  $12\text{ GPa}$  [11],
- jako izražena duktilnost  $15$  do  $80\%$  [11],
- visoka vrednost Poasonovog koeficijenta od  $0,40$  do  $0,45$  (beton oko  $0,15$  do  $0,25$ ) [12],
- prilično slaba adhezija sa cementnom matricom što se prevazilazi posebnim tretmanom površine vlakana u procesu proizvodnje [6],
- visoka vrednost faktora  $l/d$  utiče na prilično veliku specifičnu površinu koja dostiže i do  $200\text{ m}^2/\text{kg}$ , itd.

Danas se može naći zaista veliki broj referenci čija je tematika istraživanje uticaja koji dodatak polipropilenskih mikrovlakana ima na svojstva svežeg i očvrstlog cementnog maltera i betona. Koristi koju upotreba ove vrste vlakana u malterima i betonima donosi u njihovim specifičnim praktičnim primenama su veoma brojne. Kada je reč o doprinosu čvrstoći pri pritisku pomenutih kompozita mišljenja autora su prilično usaglašena i uglavnom se, u zavisnosti od procenta dodatka i geometrijskih karakteristika polipropilenskih vlakana, govori o mogućem povećanju od  $5\%$  do  $10\%$  [13]. Navedeno se ne nikako ne odnosi na čelična mikro vlakna i njihovu primenu u reaktivnim praškastim betonima, što nije tematika ovog rada. S druge strane, povećanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem koje se može postići primenom mikro propilenskih vlakana može iznositi i do  $60\%$  [13]. Međutim, treba imati u vidu da su čvrstoće pri zatezanju cementnih maltera i betona male, tako da i pored ovog povećanja i dalje ostaju

dovoljno male da se o eventualnoj zameni klasične armature ne može ni razmišljati (ovo je inače nekada davno bila početna ideja u primeni mikroarmature u betonu).

Kada se polipropilenska vlakna dodaju u malter i beton, formira se trodimenzionalna nasumična mreža koja efikasno inhibira stvaranje i razvoj mikroprslina u potpunosti ili u veoma velikoj meri [14]. Tu se ubrajaju mikroprslinae koje mogu nastati u ranoj fazi usled gubitka vode iz maltera i betona u periodu vezivanja (naročito kod pločastih konstruktivnih elemenata), zatim mikroprslinae koje nastaju usled termičkog delovanja (na primer kod masivnih betona koji se zagrevaju usled razvoja toplote hidratacije), onda eventualne mikroprslinae uzrokovane deformacijama tečenja, kao i drugih uticaja (na primer udarno opterećenje) [15]. Ako se prethodno izneti stavovi uzmu u razmatranje onda je logičan zaključak do kojeg su mnogi istraživači došli, a to je smanjena permeabilnost i absorpcija vode. U vezi sa tim poboljšana je trajnost maltera i betona u uslovima izloženosti agresivnim delovanjima kao što su: prodor vode pod pritiskom (bazeni, rezervoari), delovanje mraza u prisustvu soli za odmrzavanje (mostovi, betonski kolovozi), delovanje sulfata (na pr. iz otpadnih voda), štetni efekti procesa karbonatizacije, mehanička abrazija (na pr. kod hidrotehničkih konstrukcija) itd. [15]. Štaviše, ima istraživanja koja pokazuju da polipropilenska vlakna čak mogu poboljšati ponašanje betona u uslovima delovanja visokih temperatura, tj. u slučaju požara. Ovaj efekat se objašnjava topljenjem polipropilenskih vlakana čime se stvaraju mikrokapilari koji omogućavaju prostor za relaksaciju visokog unutrašnjeg pritiska pare u uslovima visoke temperature koja se razvija tokom požara [16]. Najnovija istraživanja su usmerena i ka tzv. održivoj upotrebi polipropilenskih vlakana kao komponente za spravljanje cementnih kompozita [17].

## 2 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

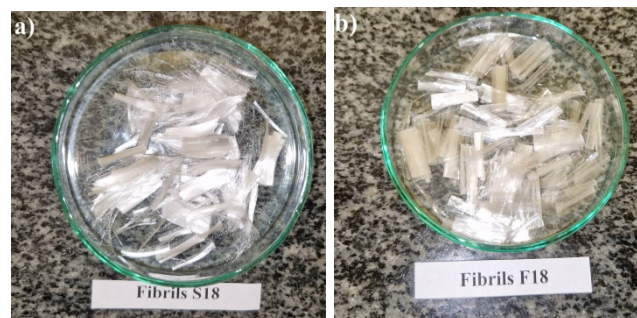
### 2.1 MATERIJALI KORIŠĆENI U EKSPERIMENTU

Za izradu eksperimentalnih malterskih mešavina korišćen je cement CEM II/A-L 42.5R proizvođača „Moravacem“ Novi Popovac, koji zadovoljava sve propisane uslove kvaliteta prema standardu SRPS EN 197-1 [18]. Takođe, korišćene su tri frakcije standardnog peska (0.09 – 0.5 mm, 0.5 – 1.0 mm i 1.0 – 2.0 mm) proizvođača „SNL – Societe Nouvelle du

Littoral“, Francuska koji zadovoljava sve propisane uslove kvaliteta prema standardu SRPS EN 196-1 [19]. Korišćena su polipropilenska multifilamenta vlakna (Fibrils S) i fibrilizirana vlakna (Fibrils F) dužine 6 mm, 12 mm i 18 mm proizvođača „Tornado Plus“ d.o.o. iz Šajkaša. Osnovne karakteristike Na slici 1,a prikazana su multifilamenta vlakna, dok su na slici 1,b prikazana fibrilizirana vlakna.

**Tabela 1- Karakteristike vlakana Fibrils S i Fibrils F**

Karakteristika	Fibrils S	Fibrils F
Osnovni materijal	Polipropilen	Polipropilen
Način proizvodnje	Ekstrudiranjem	Ekstrudiranjem
Prečnik (ekvivalentni)	0.032	0.080
Dužina	6, 12, 18 mm	6, 12, 18 mm
Faktor oblika	190 – 560	75 – 225
Čvrstoća pri zatezanju	≥ 300 MPa	≥ 385 MPa
Temperatura topljenja	160 °C	160 °C
Preporučeno doziranje	0.91 kg/m <sup>3</sup>	0.91 kg/m <sup>3</sup>



**Slika 1 – Polipropilenska multifilamenta vlakna (a) i fibrilizirana vlakna (b)**

### 2.2 PLAN I PROGRAM ISPITIVANJA

U cilju utvrđivanja uticaja dodatka polipropilenskih fibriziranih vlakana FIBRILs F i polipropilenskih multifilamentnih FIBRILs S vlakana na svojstva cementnog maltera napravljeno je 7 različitih vrsta malterskih mešavina. Varirana je dužina svake vrste vlakna koja je iznosila: 6 mm, 12 mm i 18 mm. Za svaku mešavinu spravljen su 4 serije malterskih prizmi dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Svaka serija se sastoji od tri prizme što ukupno čini osamdesetčetiri (7 x 4 x 3 = 84) prizme.

Čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pritisku su ispitane pri starosti uzoraka od 2, 7 i 28 dana, u svemu prema odredbama standarda SRPS EN 196-1 [19]. Pre ispitivanja čvrstoća maltera, utvrđena je zapreminska

masa maltera prema odredbama standarda SRPS EN 1015-10 [20]. Na prizmama je praćeno skupljanje na vazduhu u periodu od 28 dana u skladu sa standardom SRPS B.C8.029 – povučen [21].

Spravljanje malterskih mešavina je urađeno u svemu prema standardu SRPS EN 196-1 [19]. Za izradu maltera korišćen je laboratorijski mikser Hobart N-50. Nakon ugradnje maltera u kalupe, uzorci su negovani u kabinetu Controls 65-L0013/D (temperatura 22°C i važnost vazduha 95%) u trajanju od 24 h. Potom su izvađeni iz čeličnog kalupa i negovani su u vodi u laboratorijskim uslovima do trenutka ispitivanja. Serija uzoraka za praćenje skupljanja maltera posle sušenja su negovane po režimu: 24 h u kalupu na temperaturi  $20 \pm 2$  °C i relativnoj vlažnosti vazduha > 95%, zatim dva dana u vodi temperature  $20 \pm 2$  °C, a na dalje, sve do kraja ispitivanja, na vazduhu temperature  $20 \pm 2$  °C i vlažnosti cca. 50%.

### 2.3 SASTAV MALTERSКИH MEŠAVINA

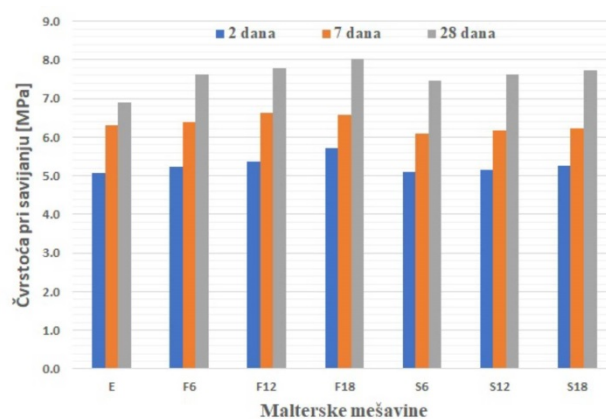
Cementni malter – etalon, spravljen je u razmeri cement : standardni pesak = 1 : 3 (450 g cementa i 3 x 450 g = 1350 g svake međufrakcije sitnog agregata). Vodocementni faktor je bio konstantan i iznosio je 0.5. Ostale vrste maltera su spravljanje na identičan način, ali uz dodatak 0.85 g FIBRILs F, odnosno FIBRILs S vlakana nakon sipanja vode i cementa u mikser. Posmatrano po 1 m<sup>3</sup> maltera dodatak vlakana je iznosio 900 g/m<sup>3</sup>. Malter bez dodatka vlakana korišćen je kao etalon i u radu je označen slovom „E“. U zavisnosti od vrste vlakana i njihove dužine formirane su oznake ostalih maltera. Malteri spravljeni sa Fibils F vlaknima označeni su slovom „F“ uz dodatak broja koji odgovara njihovoj dužini. Malteri spravljeni sa multifilamentnim vlaknima Fibrils S označeni su slovom „S“ i brojem koja i u ovom slučaju predstavlja dužinu vlakna u mm. Tako su formirane sledeće oznake eksperimentalnih malterskih mešavina: E, F6, F12, F18, S6, S12 i S18.

## 3 REZULTATI I DISKUSIJA

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju sprovedeno je na hidrauličkoj presi UTEST UTCM - 6710 mernog opsega 0 do 250 kN za silu pritiska i 0 do 10 kN za silu savijanja i klase tačnosti 0.5% (Slika 2). Uticaj vrste i dužine vlakna na promenu čvrstoće pri savijanju pri starosti uzoraka od 2, 7 i 28 dana prikazan je na slici 3. Može se primetiti da dodatak vlakana Fibils F utiče na povećanje



Slika 2 – Ispitivanje čvrstoće pri savijanju maltera (a); ispitivanje čvrstoće pri pritisku maltera (b)

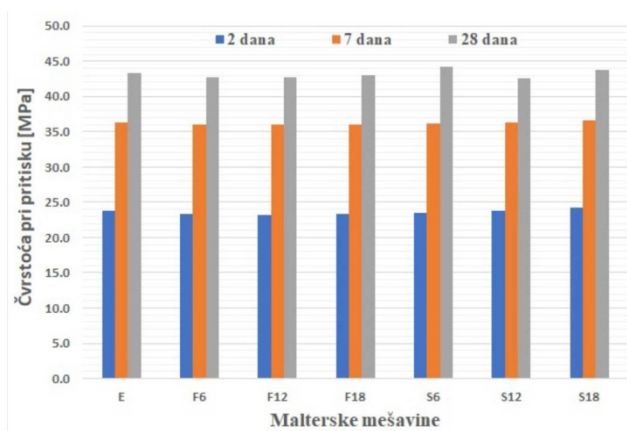


Slika 3 – Uticaj vrste i dužine vlakana na promenu čvrstoće pri savijanju maltera pri starosti od 2, 7 i 28 dana

Može se primetiti da dodatak vlakana Fibils F utiče na povećanje čvrstoće pri savijanju maltera pri svim starostima, dok kod dodatka vlakana Fibrils S ova konstatacija važi tek pri starosti od 28 dana. Takođe, može se reći da je povećanje čvrstoće pri savijanju utoliko značajnije ukoliko je dužina vlakana veća. Tako na primer, pri ispitivanju na 28 dana, malteri F6 i S6 imaju 10.50% odnosno 8.42% veću čvrstoću pri savijanju od etalona. Malterske mešavine F12 i S12 pri istoj starosti imaju 13.06% i 10.47% veću čvrstoću pri savijanju maltera od referentne serije. Konačno, dodavanjem vlakana Fibrils F i Fibrils S dužine 180 mm u količini od 900 g/m<sup>3</sup> maltera, čvrstoća pri savijanju se povećava za 16.40% i 12.04% respektivno. Može se primetiti da je veći prirast čvrstoća pri savijanju izmeren kod malterskih mešavina sa dodatkom polipropilenskih fibriziranih vlakana u odnosu na multifilamentna vlakna posmatrano za istu dužinu vlakana. Razlog tome se

verovatno može naći u boljoj adheziji fibriliziranih vlakana sa cementnom matricom kao i uniformnijim raspoređivanjem ovih vlakana u malterskoj mešavini. Prilikom mešanja multifilamentnih vlakna bila je mnogo prisutnija pojava „grudvica“ vlakana koje se nisu dovoljno dobro dispergovale u cementnom kompozitu.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera u zavisnosti od dužine i vrste polipropilenskih vlakana prikazani su na slici 4. Očekivano, dodatak obe vrste vlakana malteru nije uticao na značajniju promenu čvrstoće pri pritisku bilo u pogledu njenog povećanja, niti u pogledu smanjenja pri svim starostima (2, 7 i 28 dana). Sve malterske mešavine dostigle su predviđenu klasu čvrstoće 42.5.



Slika 4 – Uticaj vrste i dužine vlakana na promenu čvrstoće pri pritisku maltera pri starosti od 2, 7 i 28 dana

Pre ispitivanja mehaničkih čvrstoća maltera na malterskim prizmicama je određena prividna zapreminska masa u skladu sa standardom SRPS EN 1015-10 [20]. Rezultati su prikazani u Tabeli 1.

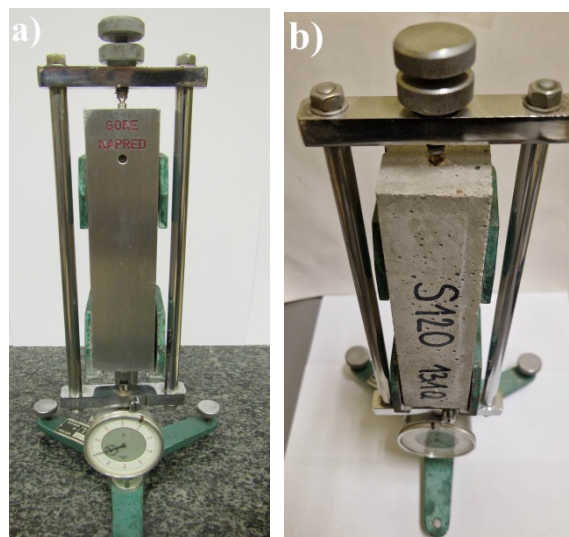
Tabela 1- Prividne zapreminske mase maltera pri starosti od 2, 7 i 28 dana

Malterska mešavina	Zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]		
	2 dana	7 dana	28 dana
E	2246	2289	2297
F6	2266	2281	2316
F12	2316	2281	2281
F18	2309	2301	2324
S6	2266	2277	2285
S12	2262	2289	2277
S18	2285	2258	2289

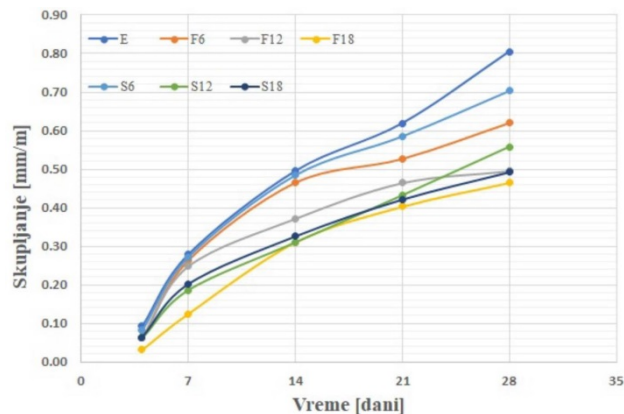
Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 1 može se zaključiti da dodatak vlakana Fibrils F i Fibrils S praktično ne utiče na promenu zapreminske mase

očvrstlog maltera ni pri jednoj starosti. Utvrđene razlike zapreminskih masa se nalaze u okviru  $\pm 1\%$  što je u stvari u granicama pouzdanosti primenjene metode merenja.

Ispitivanje skupljanja maltera izvršeno je prema standardu SRPS B.C8.029-povučen [21]. Promena dužine malterskih prizmi standardnih dimenzija praćena je pri starosti maltera od 3, 4, 7, 21 i 28 dana u skladu sa navedenim standardom. Promena dužine epruvete  $\Delta l(t)$ , nastala usled skupljanja maltera na vazduhu, računa se u odnosu na prvo merenje izvršeno posle  $72 \pm 0,5$  h. Kako bi se kompenzovao uticaj promene temperature tokom ispitivanja koristi se etalon prizma standardnih dimenzija (Slika 5a) od legure koja je stabilna na uobičajnim temperaturama merenja. Postupak ispitivanja skupljanja maltera na vazduhu prikazan je na slici 5b. Uticaj dodatka Fibrils S i Fibrils F vlakana različite dužine na skupljanje maltera prikazano je na slici 6.



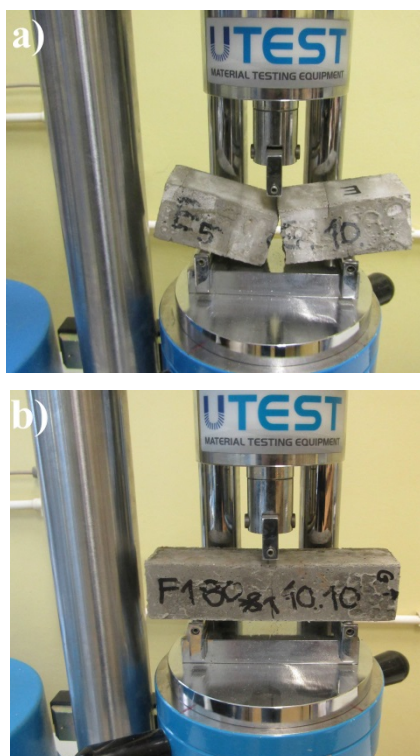
Slika 5 - Kontrolno merenje na "etalon" prizmi (a); merenje skupljanja na malteru (b)



Slika 6 – Uticaj dodatka Fibrils S i Fibrils F vlakana na skupljanje maltera na vazduhu u periodu do 28 dana

Dodatak Fibrils F i Fibrils F vlakana veoma povoljno utiče na smanjenje skupljanja maltera usled sušenja pri svim starostima. I ovom prilikom je uočen trend kakav je opisan kada je u pitanju uticaj dodatak vlakana na promenu čvrstoće pri savijanju. Naime, pri konačnom ispitivanju na 28 dana dodatak vlakana Fibrils F i Fibrils S dužine 6 mm uticao je na smanjenje skupljanja u iznosu od 9.34% i 7.30% u zavisnosti od vrste vlakana u odnosu na referentnu maltersku mešavinu. Pri istoj starosti, dodatak polipropilenskih fibriziranih vlakana i polipropilenskih multifilamentnih vlakana dužine 12 mm doveo je do smanjenja skupljanja maltera u iznosu od 27.59% i 24.53%, dok je dodatak pomenutih vlakana dužine 18 mm smanjio skupljanje maltera u iznosu od čak 32.12% i 28.18%, respektivno. Efekat smanjenja skupljanja maltera usled sušenja izazvan dodavanjem vlakana ima značajan uticaj na smanjenje broja i veličinu otvora površinskih prslina izazvanih ovim uticajem.

Prisustvo vlakana povoljno utiče na ponašanje uzoraka maltera prilikom loma tokom ispitivanja čvrstoće pri savijanju. Delovi uzoraka – prizmi, ostaju povezani i nakon loma što nije slučaj sa etalon malterom koji je spravljen bez dodatka vlakana (slika 7).



*Slika 7 – Etalon uzorak posle loma prilikom ispitivanja čvrstoće pri savijanju (a); Uzorak sa dodatkom Fibrils F vlakana dužine 18 mm posle loma prilikom ispitivanja čvrstoće pri savijanju (b)*

Ovo takođe ukazuje i na povećanu udarnu otpornost maltera sa dodatkom vlakana, odnosno povećanu žilavost. Mikroskopskom analizom površine malterske mešavine F18 na mestu loma nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju može se uočiti da su fibrilizirana vlakna ostala zalepljena u snopove (slika 8).



*Slika 8 – Površina maltera F18 na mestu loma nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju*

#### 4 ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja koji su prikazani u ovom radu mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Dodatak polipropilenskih fibriliziranih vlakana Fibrils F i polipropilenskih multifilamentnih vlakana Fibrils S ne utiče na promenu zapreminske mase očvrstlog maltera ni pri jednoj starosti,
- Dodatak vlakana Fibrils F i Fibrils S utiče na promenu čvrstoće pri savijanju u smislu njenog povećanja. Generalno se može zaključiti da je povećanje čvrstoće pri savijanju utoliko veće ukoliko je dužina vlakana veća. Malterske mešavine sa dodatkom vlakana Fibrils F i Fibrils S dužine 18 mm u količini  $900 \text{ g/m}^3$  maltera uticalo je na povećanje čvrstoće pri savijanju za 16.40% i 12.04% u odnosu na referentnu mešavinu,
- Dodatak polipropilenskih fibriliziranih vlakana i multifilamentnih vlakana ne utiče značajno na promenu čvrstoće pri pritisku maltera,
- Dodatak vlakana Fibrils F i Fibrils S utiče na smanjenje skupljanja maltera usled sušenja pri svim starostima pri čemu je uočen isti trend kao i prilikom ispitivanja čvrstoće pri savijanju. Pri konačnom ispitivanju na 28 dana, dodatak predmetnih vlakana dužine 18 mm uticao je na

smanjenje skupljanja maltera od čak 32.12% i 28.18% u odnosu na etalon, respektivno.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja obavljenog u okviru projekta TR 36017 – „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji“, koji je podržalo Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije. Veoma smo zahvalni zbog te podrške.

## LITERATURA

- [1] Grdić Z.: **Tehnologija betona**, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, ISBN 978-86-80295-94-7, CIP 666.97/98.(075.8), 2011.
- [2] Naaman, A.E.: **Fiber Reinforced Concrete: Five Decades of Progress**, 4<sup>th</sup> Brazilian Conference on Composite Materials, Rio de Janeiro, July 2018, <https://doi.org/10.21452/bccm4.2018.02.01>
- [3] Naaman, A.E.: **Ferrocement and Laminated Cementitious Composites**, Techno Press 3000, Ann Arbor, Michigan, ISBN 0-9674939-0-0, 2000, 370 pages, ([www.technopress3000.com](http://www.technopress3000.com)).
- [4] Romualdi, J.P., Batson, G.B.: **Mechanics of Crack Arrest in Concrete**, Materials Science, Journal of Engineering Mechanics, ASCE. Vol. 89, 1963.
- [5] Krenchel, H.: **Fibre Reinforcement**, Akademisk Forlag, Copenhagen, Denmark, English translation, 1964.
- [6] Zakić D.: **Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na ateziju maltera za podlogu**, Materijali i konstrukcije, 44 (39-46), 3-4 ,2001.
- [7] Muravljov M., Uljarević M.: **Mikroarmirani betoni**, Monografija „Specijalni betoni i malteri - svojstva, tehnologija, primena“, Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd, 1999.
- [8] **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**, Interscience Publishers - a Division of John Wiley and Sons, New York, Vol. 11, p. 597-619., 1969.
- [9] Varghese J, Remya U. R , Snigdha.V. K.: **The Effect of Polypropylene Fibre on the Behaviour of Soil Mass with Reference to the Strength Parameters**, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 5 Issue 03, March-2016.
- [10] Mujeebul R. L., Oznur B., Ali Mardani A.: **Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties**, Journal of Adhesion Science and Technology, April 2021., DOI: 10.1080/01694243.2021.1922221
- [11] Hedjazi S., Castillo D.: **Utilizing Polypropylene Fiber in Sustainable Structural Concrete Mixtures**, CivilEng 2022, 3, DOI: 10.3390/ civileng3030033
- [12] Plastics Pipe Institute: **Chapter 2 - HDPE & Propylene Materials**, 105 Decker Court, Suite 825, Irving TX, 75062, 469-499-1044, 2019.
- [13] Anthony E., Ige A.O.: **Optimal Polypropylene Fiber Content for Improved Compressive and Flexural Strength of Concrete**, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, January 2014, DOI: 10.9790/1684-1134129135
- [14] Y. Qin, H. Wu, Y. Zheng, W. Wang, Z. Yi: **Microscopic texture of polypropylene fiber-reinforced concrete with X-ray computed tomography**, Advances in Civil Engineering, vol. 2019, Article ID 2386590, 2019.
- [15] Yanzhu L., Liang W., Ke C., Lei S.: **Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete**, Advances in Civil Engineering, Volume 2021, DOI: 10.1155/2021/6652077
- [16] Han C.G., Hwang Y.S., Yang S.H., Gowripalan N.: **Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement**, Cement and Concrete Research, vol. 35, no. 9, pp. 1747–1753, 2005., DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.013
- [17] Jawada H.S., Al-Haydari I.S.: **Sustainable Use of Polypropylene Fibers as a Cement Mortar Reinforcement**, International Journal of Engineering, Vol. 35, No. 08, (August 2022), p. 1494-1500, DOI: 10.5829/ije.2022.35.08b.05
- [18] SRPS EN 197-1: Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente, Institut za standardizaciju Srbije, 2013.
- [19] SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Određivanje čvrstoće, Institut za standardizaciju Srbije, 2017.
- [20] SRPS EN 1015-10: Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, Institut za standardizaciju Srbije, 2008.
- [21] SRPS B.C8.029: Cement - Skupljanje cementnog maltera usled sušenja, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, 1979.