

# UTICAJ DODATKA POLIPROPILENSKIH VLAKANA NA SMANJENJE SKUPLJANJA I FISURACIJU KOMPOZITA TIPMA MALTERA I BETONA

MIHAILO MURAVLJOV, SEKULA ŽIVKOVIĆ,  
DRAGICA JEVTIĆ, DIMITRIJE ZAKIĆ

NAUČNI RAD  
UDK: 666.971.4:667.621.6=861

## 1. UVOD

Kao što je poznato, kompoziti predstavljaju složene veštačke materijale koji se dobijaju kombinovanjem, na makro planu, dva ili više elementarnih materijala, s ciljem optimizacije svojstava tako dobijenih novih materijala, odnosno materijalnih sistema [1]. Postoji više vrsta kompozita, pri čemu malteri i betoni spadaju u tzv. kompozite-aglomerate. To su veštački materijali koji nastaju tokom procesa očvršćavanja mešavina zrnastih materijala – granulata i različitih vrsta organskih ili neorganskih veziva.

Proučavanje sastava složenih građevinskih materijala, u koje svakako spadaju kompoziti-aglomerati tipa maltera i betona, podrazumeva primenu tzv. strukturalističkog koncepta. Ovakav pristup uslovljen je specifičnošću njihove strukture koju čini širok spektar različitih komponenti: od najsitnijih čestica veličine atoma i molekula, pa sve do najkrupnijih zrna agregata u okviru klasičnih betona. Ove komponente su međusobno povezane i prožimaju se po principu "struktura u strukturi". Zato se, u načelu, svi materijali tipa aglomerata posmatraju na dva suštinski različita nivoa: sa stanovišta mikrostrukture i sa stanovišta makrostrukture. U okviru makro nivoa najčešće se razmatra struktura zrna granulata i njihov odnos prema vezivnoj matrici, dok se na mikro nivou pažnja posvećuje pre svega strukturi same vezivne supstance. Na bazi ovog koncepta modeliraju se strukturne karakteristike kompozitnih materijala iz kojih, u najvećoj meri, proizilaze i njihova fizičko-mehanička svojstva.

Armironi kompoziti, u koje spadaju i mikroarmirani malteri i betoni, su složeni materijali kod kojih se, na makro planu, jasno mogu izdvojiti dve komponente: osnovni materijal – matrica i dodatni materijal – armatura čiji je glavni zadatak da obezbedi poboljšanje određenih svojstava osnovnog materijala. Tako, na primer, u slučaju mikroarmiranog maltera, osnovni materijal može da predstavlja cementna matrica, dok se kao armatura jav-

ljaju polipropilenska ili neka druga vlakna. Namena vlakana, kao dodatka osnovnom materijalu, je da poboljšaju neke karakteristike složenog materijala – kompozita, što može da bude od izuzetnog značaja za njegovu praktičnu primenu. Što se tiče polipropilenskih vlakana o kojima je ovde reč, ona imaju višestruku funkciju, pri čemu je njihov doprinos najznačajniji u oblasti povećanja čvrstoće i duktilnosti kompozita, uz istovremeno smanjenje zapreminskih deformacija skupljanja.

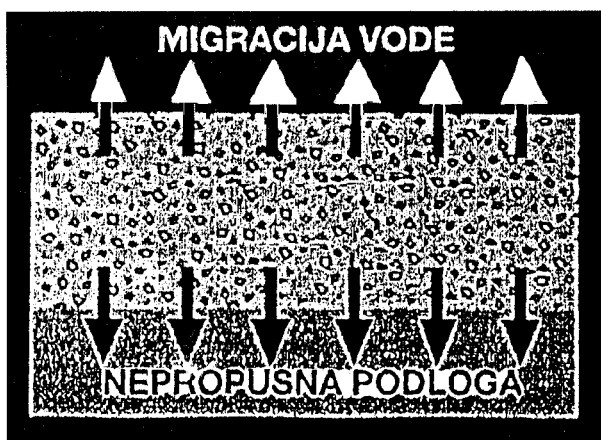
Mikroarmirani malteri i betoni, dakle, predstavljaju kompozitne materijale koji se dobijaju dodavanjem vlakana, nasumice raspoređenih, u svežu mešavinu. Ideja da se vlakna neorganskog ili organskog porekla "umešaju" u svežu matricu maltera i betona nije nova. Ona je nastala u želji da se na relativno jednostavan način poboljšaju osnovna inženjerska i reološka svojstva ovih kompozita, kao što su: čvrstoća pri savijanju i zatezanju, žilavost-duktilnost, udarna čvrstoća, otpornost na zamor, smanjenje deformacija skupljanja i dr.

Pri spravljanju mikroarmiranih maltera i betona treba voditi računa o izvesnim specifičnostima kao što su: vrsta i količina vlakana, prečnik ( $d$ ), odnos  $L/d$ , prionljivost, čvrstoća, mogućnost grupisanja vlakana, itd. U opisu vlakana, kao što se vidi, koristi se parametar "faktor oblika", koji predstavlja odnos dužine  $L$  i prečnika vlakna  $d$ . Ovaj odnos je jedan od bitnih parametara koji u velikoj meri utiče na pripremu, ugrađivanje, reološka svojstva i niz drugih svojstava očvrslilih maltera i betona. Tako, na primer, povećanjem faktora oblika i količine vlakana u jedinici zapremine, pogoršava se obradljivost i ugradljivost svežeg maltera ili betona. S druge strane, veća količina vlakana uglavnom podrazumeva i poboljšana fizičko-mehanička svojstva maltera, odnosno betona. S tim u vezi, bilo bi korisno da se u svakom konkretnom slučaju izvrše prethodna eksperimentalna ispitivanja, koja bi kao rezultat imala usvajanje optimalne recepture predmetnih mikroarmiranih kompozita, kao i redosled i potrebno vreme mešanja komponentnih materijala.

Adrese autora: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, Beograd

## 2. SVOJSTVA MIKROARMIRANIH KOMPOZITA U POČETNOJ FAZI OČVRŠĆAVANJA

U tehnologiji betona (a isto važi i kod maltera), poznata je pojava izdvajanja viška vode na površini nakon spravljanja i ugrađivanja sveže mešavine. Predmetna pojava, koja se u anglosaksonskoj literaturi naziva "bleeding" ("krvarenje"), kao posledicu ima znatno lošiji kvalitet površinskog sloja kompozita – u smislu njegove čvrstoće i trajnosti. Takođe, ovaj efekat može da ugrozi i proces hidratacije cementa, a naglo i nekontrolisano isušivanje maltera ili betona može dovesti do nastanka značajnih prslina usled plastičnog skupljanja. Da bi se sprečila, ili barem što više redukovala pojava raslojavanja maltera (tj. izdvajanja vode, uz istovremenu segregaciju čestica cementa i agregata), treba voditi računa o pravilnoj kompoziciji maltera, kao i o kvalitetu i poroznosti podloge na koju se on nanosi. Naime, ako je predmetna podloga porozna, ona će iz svežeg maltera "izvlačiti" i kapilarno upijati vodu, što može dovesti do znatnog smanjenja sveukupnog kvaliteta očvršlog kompozita. Mehanizam izdvajanja vode iz maltera prikazan je shematski na slici 1.



Slika 1. Mehanizam izdvajanja vode iz svežeg maltera

Prema našim propisima, sposobnost zadržavanja vode kod klasičnih maltera treba da iznosi najmanje 75%. Da bi se ovaj uslov ispunio potrebno je, pre svega, voditi računa o sastavu, odnosno recepturi kompozita. Predmetna pojava usko je povezana sa segregacijom, pa naročitu pažnju treba posvetiti granulometrijskom sastavu agregata, da bi se ostvarila što je moguće veća stabilnost mešavine u toku spravljanja i ugrađivanja.

Prema raspoloživim podacima, upotreba polimernih, a naročito polipropilenskih vlakana kao dodatka malterima i betonima, može u velikoj meri da ublaži posledice izdvajanja vode. Naime, ova vlakna svojim izuzetno velikim brojem i homogenim rasporedom (podjednako u svim pravcima), presecaju sistem kapilarnih pora i time usporavaju difuziju vode. S druge strane, ona svojim statičkim naelektrisanjem vezuju za sebe susedne čestice (kapi) vode, čime proces zadržavanja tečne faze u unutrašnjosti sveže mešavine čine još efikasnijim. Na ovaj način, stvaranjem svojevrstne "hidrokulture", obezbeđena je kontrolisana i ravnomerna hidratacija cementa, kao i postepeno isušivanje slobodne površine maltera. Takođe, na bazi svega što je prethodno rečeno, dodatak polipropilenskih vlakana doprinosi i smanjenju zapremin-

skih deformacija skupljanja, a naročito plastične komponente ove reološke karakteristike maltera.

Mada skupljanje, kao jedno od reoloških svojstava, predstavlja karakteristiku očvršlog kompozita, njegova početna faza (tzv. plastično skupljanje) može da se posmatra i kao osobina svežeg maltera. Ovo stoga što se plastično skupljanje javlja u prvih nekoliko sati nakon spravljanja mešavine, dakle dok je malter još sasvim mlad, a cementni kamen je u početnoj fazi očvršćavanja. S obzirom na ovu činjenicu, kao i na to da se na preostale dve komponente skupljanja (hidratacionu i hidrauličku) ne može značajnije uticati primenom nekih tehnoloških mera, ovom prilikom ćemo se zadržati samo na objašnjenju mehanizma odvijanja plastičnog skupljanja.

Kao što je prethodno već napomenuto, plastična komponenta deformacija skupljanja javlja se veoma brzo nakon spravljanja sveže malterske mešavine, odnosno svega nekoliko časova od trenutka kada su pomešani cement i voda, čime je označen početak hidratacije cementa. Ovaj tip vremenskih deformacija nastaje kao posledica izdvajanja vode iz cementne paste na površinu kompozita i njenog isparavanja sa ove površine. Ukoliko se ovako izgubljena voda na neki način ne nadoknadi, a to se pre svega može učiniti intenzivnom negom mladih maltera, može da bude ugroženo i odvijanje samog procesa hidratacije cementa. Istovremeno sa migracijom i isparavanjem vode, dolazi do zgušnjavanja mešavine i do međusobnog zblizavanja čestica u strukturi maltera, pa se usled toga, vrlo brzo javljaju prslinae i pukotine. Efekat o kome je reč, najizraženiji je na površini kompozita, gde su navedene pojave migracije i isparavanja najintenzivnije, pa su predmetne prslinae mrežastog tipa ovde najviše zastupljene.

Štetne posledice plastičnog skupljanja mogu se sprečiti dosta efikasno, ukoliko se vrši pravovremena, intenzivna i pravilna nega mladih maltera ili betona. Ova nega podrazumeva, pre svega, zaštitu otvorenih površina kompozita (prekrivanjem tkaninama ili folijama), kao i intenzivno kvašenje – naročito u prvih nekoliko sati nakon spravljanja i ugrađivanja. No, i pored toga što je ovaj problem u potpunosti razjašnjen i što je za njegovo uspešno prevazilaženje ponuđeno relativno jednostavno rešenje, on u praksi i dalje postoji, a štetne posledice koje nastaju usled neobraćanja adekvatne pažnje plastičnom skupljanju često su veoma velike. Pomenute štetne posledice se naročito javljaju u slučaju rada pri povišenim temperaturama spoljašnje sredine, uz direktno dejstvo sunčevih zraka i/ili vetra na površinu svežeg ugrađenog maltera (betona). U ovakvim, ekstremnim termohigrometrijskim uslovima, proces izdvajanja i isparavanja vode sa površine je najizraženiji, pa su i efekti plastičnog skupljanja (u smislu nastanka prslina) najveći, najopasniji i najštetniji.

Kao rešenje ovog problema, naravno u slučajevima kada izostane pravovremena i intenzivna nega kompozita, u poslednje vreme nameće se upotreba polimernih – a pre svega polipropilenskih vlakana kao mikroarmature kojom se u krajnjoj liniji poboljšavaju performanse cementnog kamena. Dejstvo predmetnih vlakana, u cilju sprečavanja štetnih efekata plastičnog skupljanja, odvija se u nekoliko pravaca. Kao prvo, njihovo prisustvo u značajnoj meri usporava i redukuje proces izdvajanja vode na površini kompozita, kako je to već objašnjeno. Drugo, brojna ispitivanja su pokazala da polipropilenska vlakna obezbeđuju brži priraštaj čvrstoće, naročito u prvih 2-6

časova nakon spravljanja, što omogućava mladom kompozitu da podnese veće unutrašnje napone [2]. U tom smislu, zahvaljujući pre svega svojoj velikoj specifičnoj površini i ravnomernoj raspoređenosti u sve tri dimenzije, polimerna vlakna su znatno efikasnija od klasične armature u sprečavanju nastanka i propagacije prslina. Konačno, nakon nastanka prvih mikroprslina u ranoj fazi očvršćavanja kompozita, polipropilenska vlakna premošćuju ove prsline i usporavaju dalji proces njihovog širenja. Kao rezultat ovakvog dejstva mikroarmature, javlja se veći broj prslina, ali znatno manjih dimenzija (širine i dubine) nego u slučaju nearmiranog cementnog kamena. Takođe, pomenuti efekat premošćavanja prslina je dodatno pojačan na taj način što se veoma fleksibilna polipropilenska vlakna uvijaju oko i između sitnih zrna agregata, čime je još više otežano njihovo izvlačenje iz cementne matrice (tzv. "pull-out").

Kao što je već naglašeno, jedan od osnovnih motiva za upotrebu polimernih vlakana je njihova sposobnost da poboljšaju duktilnost kompozita, odnosno da povećaju njihov kapacitet deformacije. Ovaj efekat izražen je već u ranim fazama očvršćavanja, tj. u prvih desetak sati nakon spravljanja maltera ili betona. Ovaj period poklapa se sa vremenom u kome se odvija proces plastičnog skupljanja. U realnim konstrukcijama retko se dešava da se deformacije skupljanja uopšte, pa samim tim i njihova plastična komponenta, javljaju kao slobodne deformacije. Polipropilenska vlakna imaju ulogu i u ovakvim slučajevima, kada u okviru kompozita takođe mogu da se javi značajni naponi zatezanja koji dovode do pojave prslina.

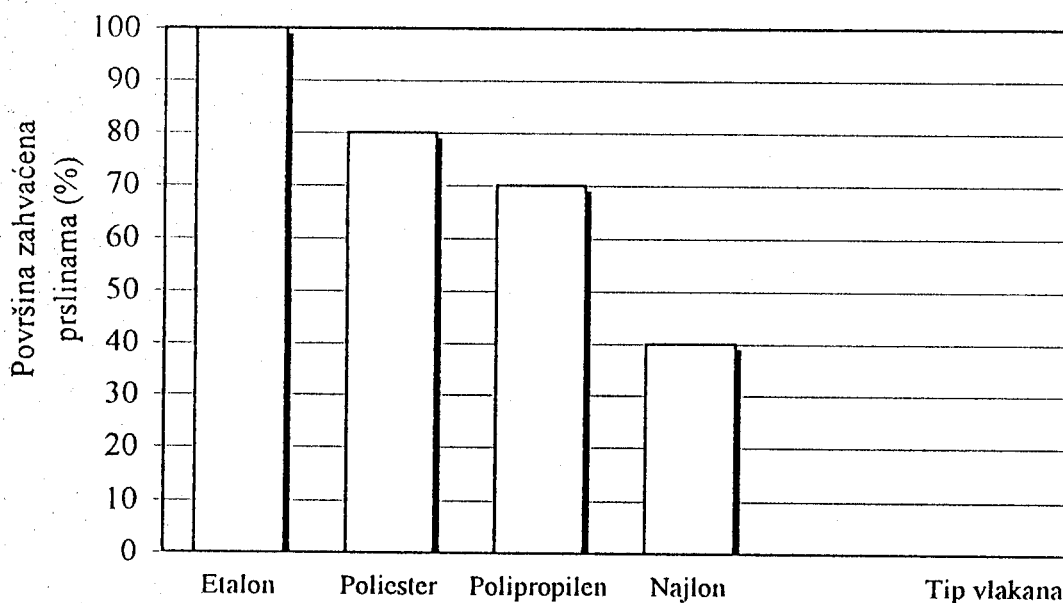
Ukoliko se na vreme ne preduzmu mere zaštite i nega, u smislu kvašenja i pokrivanja otvorenih površina maltera odnosno betona nakon njihovog ugrađivanja u određene elemente, na njima će se veoma brzo pojaviti ozbiljne pukotine koje mogu da se prošire i po celoj visini preseka. Predmetne prsline i pukotine nastaju kao posledica plastičnog skupljanja, koje je pritom često i delimično sprečeno. Naime, usled trenja sa podlogom, donje i bočne površine elemenata najčešće ne mogu slobodno da se deformišu. Istovremeno, gornje – slobodne površi-

ne se najčešće brže skupljaju, u opštem slučaju i usled uticaja temperature i dejstva vetra. Zajedničko delovanje ova dva uticaja rezultuje pojavom ozbiljnih napona zatezanja u gornjim zonama elemenata, koje mladi kompoziti sa izuzetno niskom čvrstoćom na zatezanje ne mogu da podnesu. Kao neminovna posledica javljaju se prsline, naročito u gornjoj – zategnutoj zoni. Ova pojava je posebno izražena kod maltera koji se primenjuju u tankim slojevima, a naročito kod tzv. cementnih "košuljica".

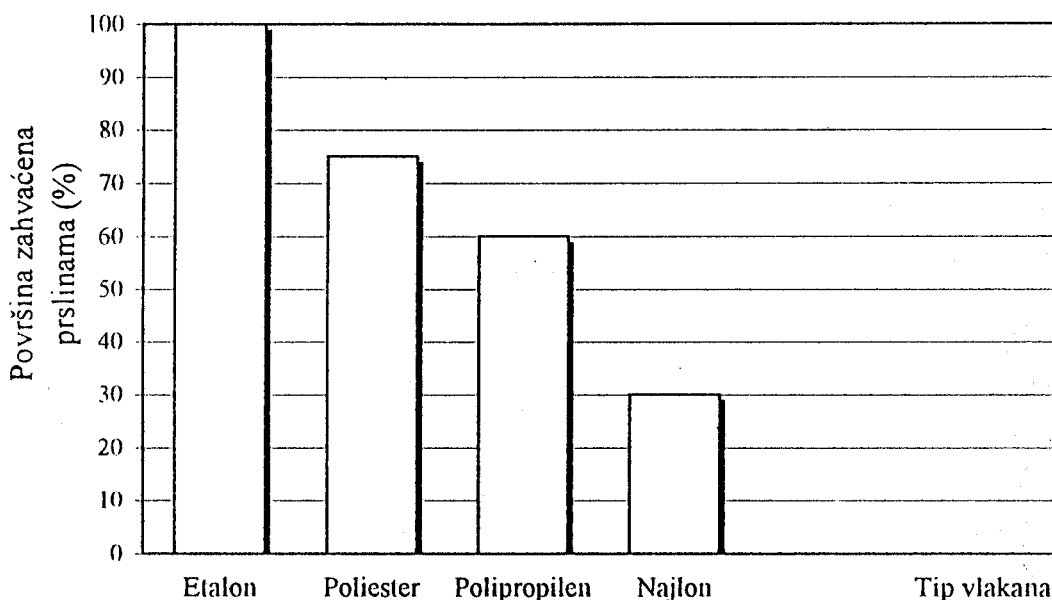
### 3. UTICAJ VLAKANA NA SKUPLJANJE I FISURACIJU MALTERA I BETONA

Dosadašnja ispitivanja su pokazala da dodatak relativno male količine polipropilenskih vlakana (svega  $0,6 \text{ kg/m}^3$ ) može bitno da redukuje opisane posledice koje nastaju usled plastičnog skupljanja [3]. Primena polimera kao mikroarmature se preporučuje i u slučajevima kada je mlad kompozit (prvih nekoliko dana nakon spravljanja) u konstrukciji izložen naponima zatezanja. Na primer, ovakva situacija može da nastane usled postojanja temperaturne razlike na krajevima pojedinih elemenata, pri čemu je sprečeno njihovo slobodno deformisanje.

Eksperimentalna istraživanja [4] koja su vršena na malterima sa dodatkom različitih polimernih vlakana (najlonska, polieterska i polipropilenska) pokazala su značajnu redukciju površine zahvaćene prslinama u odnosu na kontrolne-etalonske uzorke (spravljene bez dodatka vlakana). Uzorci su bili napravljeni u obliku ploča dimenzija  $900 \times 600 \times 19 \text{ mm}$  koje su bile izložene postupku ubrzanog isušivanja u specijalnoj komori (na povišenoj temperaturi i sa fenom koji simulira dejstvo vetra). U sastav predmetnih maltera ušli su cement i rečni pesak u odnosu 1:1,5 (zapreminski), dok je primenjeni vodo cementni faktor iznosio  $\omega = 0,5$ . Sva tri tipa polimernih vlakana imala su istu dužinu od 19 mm, pri čemu su polipropilenska vlakna bila fibrilizovana (međusobno povezana), a najlonska i polieterska monofilamentna (pojedinačna). Količina vlakana je varirana od minimalnih  $0,6 \text{ kg/m}^3$  do maksimalnih  $0,9 \text{ kg/m}^3$ .



Slika 2. Uporedni prikaz površina na kojima se javljaju prsline usled plastičnog skupljanja: različiti tipovi vlakana primenjeni u količini od  $0,6 \text{ kg/m}^3$



Slika 3. Uporedni prikaz površina na kojima se javljaju prsline usled plastičnog skupljanja: različiti tipovi vlakana primenjeni u količini od  $0,9 \text{ kg/m}^3$

Eksperimentalna ispitivanja o kojima je reč kao osnovni cilj imala su ocenu delotvornosti pojedinih vrsta polimernih vlakana na smanjenje plastičnog skupljanja maltera. Ova karakteristika vrednovana je na osnovu poređenja površina zahvaćenih prslinama na uzorcima sa dodatkom mikroarmature u odnosu na etalonske uzorke (bez dodatka vlakana), a sve u funkciji količine i tipa upotrebljenih vlakana. Rezultati predmetnih eksperimentalnih istraživanja prikazani su na slikama 2 i 3 [4].

Kao što se sa prikazanih dijagrama može videti, najbolji rezultati u smislu smanjenja štetnih efekata plastičnog skupljanja postižu se primenom najlonskih vlakana, kao malo manje dobra pokazala su se polipropilenska vlakna, a najslabija su bila poliesterska vlakna. Sa povećanjem sadržaja polimernih vlakana redukcija broja i veličine prsline bila je sve više izražena. Ovakav trend se nastavio i pri upotrebi većih količina mikroarmature od  $0,9 \text{ kg/m}^3$  – prilikom predmetnih ispitivanja sadržaj vlakana je povećavan sve do  $0,5\%$  od ukupne zapremine, što odgovara masi od oko  $4,5 \text{ kg/m}^3$ . U tom slučaju, kod pojedinih uzoraka maltera prsline vidljive golim okom su bile potpuno eliminisane.

S druge strane, ukoliko izdvojimo samo rezultate ispitivanja koji se odnose na uzorke maltera spravljenih na bazi polipropilenskih vlakana, možemo da uočimo da se pri upotrebi minimalne količine vlakana ( $0,6 \text{ kg/m}^3$ ) javlja redukcija površine zahvaćene prslinama od  $30\%$  u odnosu na etalonske uzorke (slika 2). U slučaju povećanog sadržaja vlakana ( $0,9 \text{ kg/m}^3$ ), ovaj pokazatelj smanjenja štetnih efekata plastičnog skupljanja iznosi  $40\%$  (slika 3). Bez obzira na primenjenu količinu mikroarmature, prezentirani rezultati nedvosmisleno ukazuju na svrsishodnost primene polipropilenskih (i uopšte polimernih) vlakana kao dodatka malterima i betonima u cilju ublažavanja ili eliminisanja posledica plastičnog skupljanja.

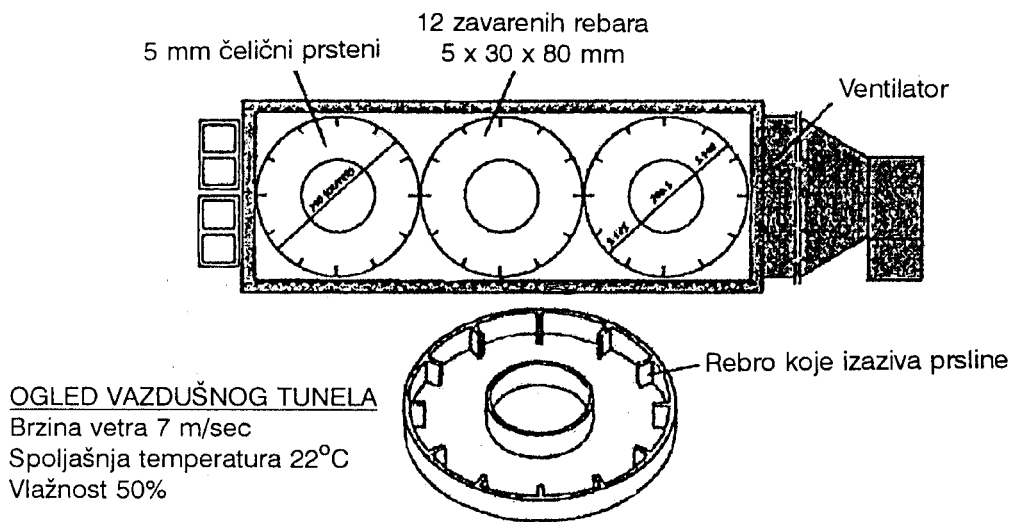
Broj radova publikovanih u naučnoj i stručnoj literaturi koji se odnose na ispitivanja reoloških karakteristika mikroarmiranih kompozita neuporedivo je manji od studija koje tretiraju pitanja njihovih fizičko-mehaničkih svojstava. Tome treba dodati i činjenicu da su dostupni

podaci često kontradiktorni, dok većina autora uglavnom ističe potrebu za dodatnim ispitivanjima koja bi dala pouzdanije rezultate. Ipak, u celini posmatrano, može se zaključiti da prisustvo vlakana u okviru cementne matrice povoljno utiče na neka reološka svojstva mikroarmiranih kompozita tipa maltera i betona.

Kao što je već naglašeno, jedan od osnovnih motiva za upotrebu vlakana kao dodatka malterima i betonima, je sposobnost predmetne mikroarmature da poboljša duktilnost ovih kompozita, odnosno da poveća njihov kapacitet deformacije. Pri tome je naročito izražena uloga čeličnih i vlakana polimernog tipa (kao što su polipropilenska) u redukovanju vremenskih deformacija skupljanja. Imajući u vidu rezultate sopstvenih istraživanja, kao i podatke preuzete od drugih autora, Balaguru i Shah su došli do sledećih generalnih zaključaka koji se tiču skupljanja mikroarmiranih kompozita [3]:

- dodatak vlakana doprinosi smanjenju deformacija skupljanja; sa povećanjem količine upotrebljene mikroarmature ovaj efekat biva sve izraženiji;
- najveća redukcija skupljanja zabeležena je kod cementnog kamena ojačanog vlaknima, zatim kod maltera, a najmanja kod betona sa malim sadržajem cementa;
- kod upotrebe čeličnih vlakana dobijaju se nešto bolji rezultati nego u slučaju primene polipropilenskih vlakana (razlika nije velika);
- doprinosi vlakana smanjenju deformacija izazvanih hidrauličkim skupljanjem je izraženiji u kasnijim fazama, nego na početku ispitivanja; takođe, uočeno je da se kod mikroarmiranih kompozita proces skupljanja stabilizuje brže nego kod etalona (bez dodatka vlakana);
- vreme, dimenzije i oblik uzoraka (tj. srednja debljina preseka  $2A/O$ ), kao i uslovi nege, utiču na deformacije skupljanja na potpuno isti način i u istom obimu kao i u slučaju nearmiranih (klasičnih) kompozita.

Što se tiče uticaja dodatka polipropilenskih vlakana na smanjenje deformacija skupljanja kod kompozita tipa maltera i betona, podaci dostupni iz literature uglavnom ističu u prvi plan doprinos ovih vlakana u najranijim fazama očvršćavanja, tj. kod plastičnog (ranog) skupljanja. O



#### OGLED VAZDUŠNOG TUNELA

Brzina vetra 7 m/sec  
Spoljašnja temperatura 22°C  
Vlažnost 50%

Slika 4. Dispozicija ispitivanja skupljanja u vazдушnom tunelu

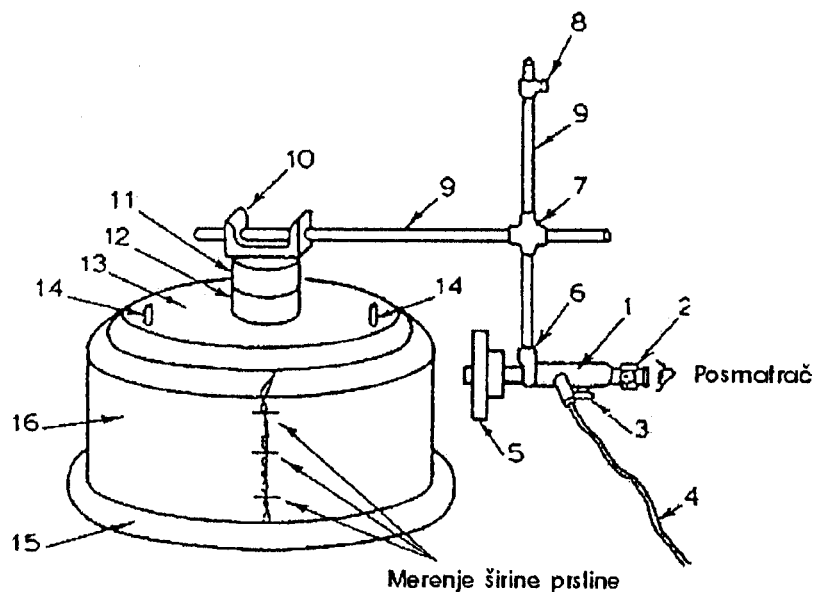
ovoj komponenti skupljanja već je bilo reči, pa ćemo se ovom prilikom više zadržati na razmatranju tzv. hidrauličkog skupljanja, odnosno ukupnih deformacija skupljanja (plastično + hidrataciono + hidrauličko), koje nastaju kao posledica predmetnog reološkog fenomena.

Rezultati ispitivanja ukupnih deformacija skupljanja pokazuju da je kod betona sa dodatkom 0,1% polipropilenskih vlakana (zapreminski) zabeleženo smanjenje skupljanja za 5–7% u odnosu na etalonske uzorke [5]. Takođe, određena poboljšanja reoloških svojstava zabeležena su u slučaju eksperimenata na bazi ubrzanog očvršćavanja u uslovima povišenih temperatura (u klimakomori) [6]. Interesantna su i ispitivanja na uzorcima mikroarmiranih betona (uz dodatak čeličnih vlakana – tip I i polipropilenskih vlakana – tip II) napravljenih u obliku prstenova, pri čemu deformacije skupljanja nisu bile slobodne [7]. Uz sprečavanje slobodnog deformisanja, uzorci su bili izlagani strujanju vazduha (pomoću ventilatora), čime je simulirano dejstvo vetra. Na ovaj način, mereno je skupljanje betona u uslovima ubrzanog

očvršćavanja. Prstenasti oblik uzoraka izabran je iz razloga simulacije delovanja jednoaksijalnog zatezanja u betonu, uz već pomenuto sprečavanje slobodnog odvijanja deformacija skupljanja. Dispozicija ovog interesantnog eksperimentalnog ispitivanja u vazдушnom tunelu prikazana je na slici 4.

Rezultati dobijeni tokom ovog istraživanja pokazali su značajno smanjenje broja i dimenzija prslina na uzorcima spravljanim sa dodatkom čeličnih vlakana, kako u ranim fazama očvršćavanja (pri 1–7 dana starosti), tako i pri većim starostima (1–6 nedelja). Što se tiče uzoraka betona mikroarmiranih polipropilenskim vlaknima, zabeležena su nešto manja poboljšanja nego u slučaju primene čeličnih vlakana, pri čemu su najbolji efekti postignuti kod uzoraka spravljanih sa učešćem vlakana većim od uobičajenih (0,25 – 1,0 %). Dimenzije prslina merene su pomoću specijalnog optičkog instrumenta koji se postavlja na prstenasti uzorak (slika 5).

Kao ilustracija dobijenih rezultata u okviru predmetnog istraživanja mogu da se navedu sledeći podaci:



Slika 5. Optička aparatura za merenje dimenzija prslina

(Napomena: na slici su brojevima označeni delovi aparature koji se ovom prilikom neće navoditi).

- najveća izmerena širina pukotine kod etalonskog uzorka (bez dodatka vlakana) iznosila je 0,900 mm;
- kod uzoraka sa dodatkom 0,25% čeličnih vlakana ova širina iznosila je 0,300 mm (smanjenje od ~ 67%);
- kod uzoraka sa maksimalnom količinom čeličnih vlakana od 1,5% najveća zabeležena širina prsline iznosila je svega 0,011 mm (smanjenje od ~ 99%);
- u slučaju primene polipropilenskih vlakana sa minimalnim sadržajem od 0,1% izmerena je širina od 0,875 mm (smanjenje od ~ 3%);
- maksimalno učešće polipropilenske mikroarmature od 1,0% doprinelo je redukciji širine najveće zabeležene pukotine na svega 0,150 mm (smanjenje od ~ 83%).

Uprkos tome što je broj i obim istraživanja koja se bave ovom problematikom sve veći, teorijski model pomoću koga bismo mogli da proračunamo širinu pukotina i ocenimo uticaj vlakana na smanjenje skupljanja još uvek ne postoji. Suština ovog složenog fenomena nije dovoljno detaljno proučena, tako da danas nemamo čak ni empirijski postupak pogodan za njegovo kvantitativno opisivanje. U takvoj situaciji možemo da se poslužimo samo određenim hipotezama. Pretpostavka, koja se čini najlogičnijom, je da vlakna deluju tako što redukuju površinske naponе zatezanja i obezbeđuju povećanje čvrstoće kod mladih kompozita u početnim fazama očvršćavanja. U kasnijim fazama ovog procesa, vlakna i dalje daju doprinos izvesnom povećanju čvrstoće pri zatezanju kompozita, dok u slučaju nastanka prsline usporavaju njihovo širenje, vršeći transfer sila zatezanja i disipaciju energije deformacije.

#### 4. SOPSTVENA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe eksperimentalnih ispitivanja, koja predstavljaju najznačajniji deo predmetnih istraživanja, bilo je predviđeno da se izvrši spravljanje i ispitivanje svojstava pet različitih vrsta maltera na bazi dodatka polipropilenskih vlakana. Pojedini tipovi maltera označeni su rimskim brojevima (I – V), od kojih svaki broj predstavlja oznaku serije maltera. Pri tome, serija I odnosi se na malter spravljen bez dodatka polipropilenskih vlakana, tj. ovaj kompozit predstavlja referentni malter – etalon. Serije II, III, IV i V spravljenе su sa dodatkom monofilamentnih polipropilenskih vlakana tipa "Fibrin" (engleske proizvodnje), uz varijaciju vrste i količine predmetne mikroarmature. Tako je, u okviru serije II upotrebljeno 600 g/m<sup>3</sup>, a u okviru serije III 900 g/m<sup>3</sup> vlakana tipa "Fibrin 623" (dužine 6 mm). Serija IV bila je spravljenа sa dodatkom 600 g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 23" (dužine 12 mm), a serija V sa 900 g/m<sup>3</sup> istih vlakana. Pri tome su učešća cementa, vode i agregata bila konstantna kod svih tretiranih serija maltera. Takođe, nije menjan ni tip cementa, niti vrsta i granulometrijski sastav agregata (peska). Ovakav način sastavljanja recepture primenjen je iz razloga što je, kao primaran, posmatran uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na promene pojedinih svojstava svežeg i očvrstlog maltera.

Kao što je već naglašeno, jedan od osnovnih razloga za primenu vlakana u vidu mikroarmature kod maltera i betona, svakako leži u smanjenju vremenskih deformacija skupljanja koje se na ovaj način može postići. Brojna ispitivanja na malterima i betonima spravljenim sa dodatkom polipropilenskih i drugih vrsta polimernih vlakana, pokazala su značajno smanjenje dilatacija skupljanja, kako u najranijim fazama očvršćavanja (tzv. plastično sku-

pljanje), tako i u kasnijim etapama (tzv. hidrauličko skupljanje).

Kao što je već napomenuto, pod skupljanjem podrazumevamo reološku (vremensku) deformaciju izraženu u vidu smanjenja dimenzija uzoraka maltera u toku vremena, koje se odvija približno proporcionalno u svim pravcima. Ovo svojstvo, koje je pre svega povezano sa stanjem vlažnosti cementnog kamena, sastoji se od 3 komponente: plastičnog, hidratacionog i hidrauličkog skupljanja. Plastično skupljanje javlja se u prvih nekoliko časova nakon spravljanja maltera i njegovi štetni efekti mogu se relativno lako eliminisati pravilnom i blagovremenom negom mladog maltera. Hidrauličko skupljanje javlja se nakon završetka vezivanja cementa, kao posledica isparavanja vode iz kapilarnih pora, zbog čega dolazi do kontrakcije cementnog kamena. Hidratacionо skupljanje nastaje usled odvijanja fizičko–hemijskog procesa hidratacije cementa.

S obzirom na način spravljanja i nege uzoraka maltera u laboratorijskim uslovima, možemo da kažemo da merenje deformacija skupljanja podrazumeva praktično merenje samo hidratacione i hidrauličke komponente ovog reološkog svojstva. Naime, s obzirom da se uzorci ugrađeni u kalupe, tokom prvih 24 časa nakon spravljanja čuvaju u vlažnom prostoru (H ≥ 90%), a zatim još 48 časova u vodi (T = 20 ± 2°C), jasno je da se na ovaj način potpuno eliminiše uticaj plastičnog skupljanja. S druge strane, pošto polipropilenska vlakna, kao inertan materijal, nemaju nikakav uticaj na proces hidratacije cementa, ovaj dodatak može da doprinese eventualnom smanjenju isključivo hidrauličke komponente deformacija skupljanja ispitivanih maltera.

Kao što je uobičajeno (prema standardu JUS B.B8.029), uzorci za ispitivanje vremenskih deformacija skupljanja su malterske prizme dimenzija 4 x 4 x 16 cm, sa ugrađenim specijalnim, nerđajućim reperima. Ovi uzorci se, do starosti od 3 dana, neguju u pijaćoj vodi sobne temperature, a nakon toga se postavljaju na drvene letvice i tokom daljeg ispitivanja stoje na vazduhu (T = 20 ± 2°C i H = 55 ± 5%).

Prvo merenje (tzv. "nulto čitanje") dužine merne baze uzorka, odnosno rastojanja između dva repera, vrši se pri starosti od 3 dana (tj. 72 ± 0,5 h nakon spravljanja maltera). Sledeća merenja sprovode se nakon 4, 7, 14, 21 i 28 dana, pri čemu je, u konkretnom slučaju, sa ispitivanjima nastavljeno sve do starosti uzorka od 90 dana.

Za merenje deformacije skupljanja u toku vremena korišćen je komparator na bazi ugibomer–sata sa podatkom od 0,001 mm (slika 6).

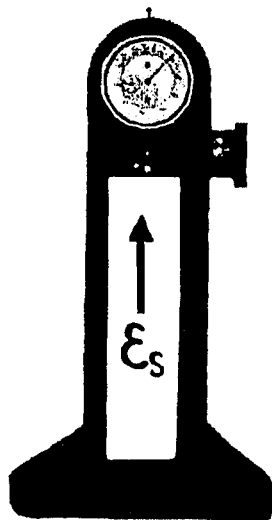
Na bazi izmerenih promena dužine merne baze, dilatacije skupljanja mogu se sračunati preko poznatog obrasca:

$$\varepsilon_{sk}(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} \cdot 1000 = \frac{s(3) - s(t)}{l_0} \cdot 1000 (\text{‰})$$

gde upotrebljene oznake predstavljaju:

- $\varepsilon_{sk}(t)$  – dilataciju skupljanja pri starosti od t dana;
- $\Delta l(t)$  – promenu dužine merne baze nakon t dana;
- $l_0$  – početnu dužinu merne baze, koja iznosi 16 cm;
- s(3) i s(t) – čitanja na mernom instrumentu nakon 3 dana (nulto čitanje), odnosno nakon t dana.

Uobičajeno je da se dilatacije skupljanja maltera izražavaju u ‰, odnosno u mm/m, kao srednje vrednosti sračunate na osnovu tri rezultata ispitivanja.

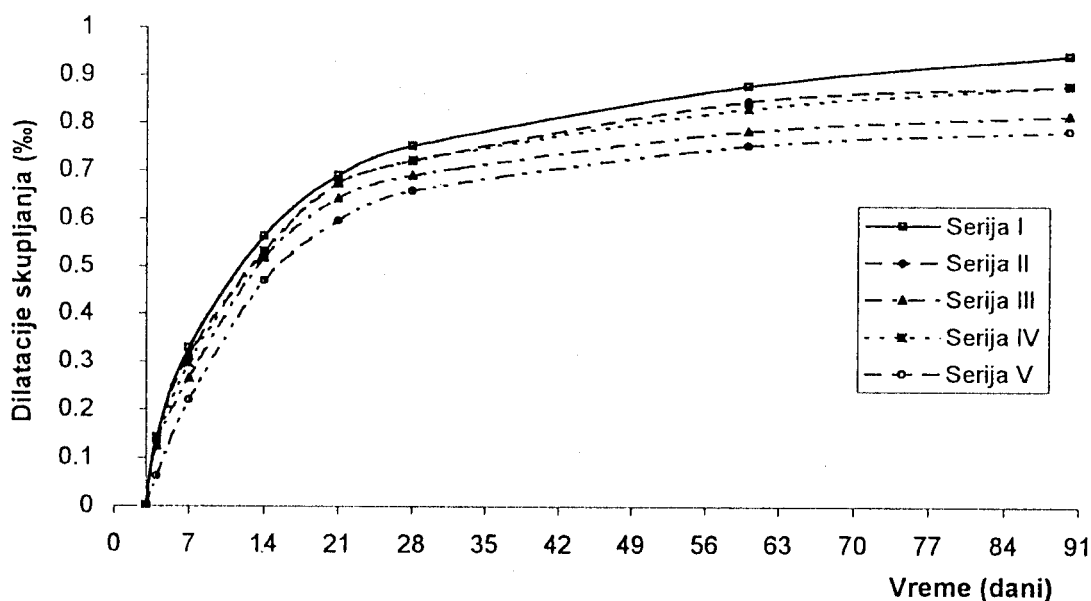


Slika 6. Uređaj – komparator za merenje deformacija skupljanja.

U okviru tabele 1. dati su rezultati ispitivanja skupljanja na uzorcima serija I – V, počevši od 4 dana nakon spravljanja i ugrađivanja maltera, pa sve do starosti od 90 dana. U cilju bolje preglednosti i lakše analize, rezultati predmetnog ispitivanja prikazani su i u vidu dijagrama (slika 7).

Tabela 1. Rezultati ispitivanja skupljanja

Serija	$\epsilon_{sk}(t)$ (‰)						
	t = 4 dana	t = 7 dana	t = 14 dana	t = 21 dan	t = 28 dana	t = 60 dana	t = 90 dana
I	0,141	0,328	0,562	0,688	0,750	0,875	0,938
II	0,141	0,312	0,531	0,672	0,719	0,844	0,875
III	0,125	0,266	0,516	0,641	0,688	0,781	0,812
IV	0,125	0,297	0,531	0,672	0,719	0,828	0,875
V	0,062	0,219	0,469	0,594	0,656	0,750	0,781



Slika 7. Dijagram skupljanja uzoraka maltera u toku vremena

## 5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA I ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ostvarenih tokom opisanih ispitivanja skupljanja maltera može se zaključiti sledeće:

1. Na uzorcima maltera spravljenih sa dodatkom polipropilenskih vlakana tipa "FIBRIN" (serije II, III, IV i V) registrovane su manje ukupne dilatacije skupljanja ( $\epsilon_{sk}$ ) u odnosu na malter spravljen bez dodatka ovih vlakana (serija I – etalon). Procentualno, ovo smanjenje iznosi 6,72 – 16,74 % (pri starosti od 90 dana).

2. Bolji efekti, u smislu smanjenja dilatacija skupljanja, mogu se postići primenom veće količine polipropilenskih vlakana od 900 g/m<sup>3</sup> (serije III i V), mada je određeno poboljšanje zabeleženo i kod uzoraka maltera spravljenih sa minimalnom količinom vlakana od 600 g/m<sup>3</sup> (serije II i IV), što bi i sa ekonomskog stanovišta bilo svrsishodno.

3. Nešto niže vrednosti dilatacija skupljanja postižu se prilikom upotrebe dužih vlakana tipa "FIBRIN 23", u odnosu na uzorke spravljene sa istom količinom vlakana manje dužine, tipa "FIBRIN 623".

4. Što se tiče brzine priraštaja dilatacija skupljanja tokom vremena, može se uočiti da pri nižim starostima (4 i 7 dana) uzorci maltera serije II (600 g/m<sup>3</sup> vlakana "FIBRIN 623") ne pokazuju gotovo nikakvo smanjenje skupljanja u odnosu na uzorke serije I (etalon – bez dodatka vlakana). Uzorci serije III (900 g/m<sup>3</sup> vlakana "FIBRIN 623")

i serije IV ( $600 \text{ g/m}^3$  vlakana "FIBRIN 23") pri istim starostima pokazuju nešto bolje performanse u odnosu na etalonske uzorke, ali je ovaj efekat izražen tek u kasnijim fazama očvršćavanja. Uzorci serije V ( $900 \text{ g/m}^3$  vlakana "FIBRIN 23") pokazuju značajno smanjenje dilatacija skupljanja u odnosu na etalon već u najranijim fazama ispitivanja (na 4 i 7 dana), pri čemu ovakav trend ostaje isti i u kasnijim etapama sve do kraja ispitivanja (90 dana).

Na kraju, može se izvući generalni zaključak da predmetna polipropilenska vlakna u izvesnoj meri doprinose smanjenju ukupnih deformacija skupljanja tretiranih maltera, a da je ovaj efekat izraženiji prilikom upotrebe kako veće količine vlakana, tako i vlakana veće dužine – tj. mikroarmature sa višim vrednostima faktora oblika ( $L/d$ ).

#### LITERATURA

- [1] Muravljev M.: Kompozitni materijali, Naše građevinarstvo br. 45, 5–6, 1991. godina, str. 319–324.
- [2] Lohmann M.: Kunststoffasfaserbeton – Eigenschaften des Frischbetons und des erhaerteten Betons, Universitaet – Gesamthochschule Essen, Deutschland, 1997.
- [3] Balaguru P.N., Shah S.P.: Fiber Reinforced Cement Composites, Mc Graw–Hill, New York, 1992.
- [4] Balaguru P., Khajuria A.: Evaluation of New Synthetic Fibers for Use in Concrete, Civil Engineering Report, Report No 89–13, 1989, str. 89.
- [5] Litvin A.: Report to Wire Reinforcement Institute on Properties of Concrete Containing Polypropylene Fibers, CTL, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, SAD, 1985.
- [6] Zollo R.F., Ilter J.A., Bouchacourt G.B.: Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibers, 3rd International Symposium on Developments in Fiber Reinforced Cement and Concrete, RILEM, 1986.
- [7] Grzybowski M., Shah S.P.: Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, No 87, 1990, str. 138.
- [8] Prospekti proizvođača vlakana – firme "FIBRIN", Adfil – UK, Beverly, England.
- [9] Muravljev M., Uljarević M.: Mikroarmirani betoni, Monografija "Specijalni betoni i malteri – svojstva, tehnologija, primena", Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd 1999. godina, str. 97–117.
- [10] Ukrainčik V., Šušteršič J.: Neka svojstva mikroarmiranih betona, Naše građevinarstvo br. 45, 7–8, 1991. godina, str. 461–468.
- [11] Hannant D.S.: Fiber Cements and Fiber Concretes, John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [12] Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Interscience Publishers – a Division of John Wiley and Sons, New York, 1969, Vol. 11, str. 597–619.
- [13] Muravljev M., Jevtić D., Zakić D.: Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na neka osnovna svojstva maltera, Simpozijum INDIS 2000, Novi Sad, 2000, knjiga 2, str. 37–45.
- [14] Soroushian P., Mirza F., Alhozaimy A.: Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, No 92, 1995, str. 553.
- [15] Soroushian P., Khan A., Hsu J.W.: Mechanical Properties of Concrete Materials Reinforced with Polypropylene or Polyethylene Fibers, ACI Materials Journal, No 89, 1992, str. 535.
- [16] Zakić D.: Fizičko–mehanička svojstva maltera sa dodatkom polipropilenskih vlakana, Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2001.
- [17] Jevtić D., Zakić D.: Uticaj vrste i količine polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona, Metalurgija No 1, Vol. 8, 2002. godina, str. 39–51.