

Primljen / Received: 19.5.2015.

Ispravljen / Corrected: 18.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 18.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.9.2016.

Preliminarno istraživanje utjecaja orijentacije vlakana u mikroarmiranim mortovima

Autori:



Dr.sc. **Julien Michels**, dipl.ing.građ.
Švicarski državni laboratorij za materijale
i tehnologije - EMPA
julien.michels@empa.ch



Doc.dr.sc. **Matija Gams**, dipl.ing.građ.
Slovenski državni institut za građevinarstvo
matija.gams@zag.si

Prethodno priopćenje

Julien Michels, Matija Gams

Preliminarno istraživanje utjecaja orijentacije vlakana u mikroarmiranim mortovima

U radu se obrađuje utjecaj čeličnih vlakana u mikroarmiranim mortovima. Uzorci morta u svježem stanju, s nasumično raspoređenim vlaknima su smješteni u spiralnu zavojnicu i izloženi elektromagnetskom polju u cilju postizanja usmjerenosti vlakana. Lokacija i orijentacija vlakana je određena rendgenskom snimkom. Provedena su ispitivanja čvrstoće na savijanje uz kontrolu progiba ISC sustavom (engl. Digital Image Correlation System - ICS). S obzirom na orijentaciju vlakana, rezultati su pokazali poboljšanu disipaciju energije i veću energiju pri lomu kod uzoraka s usmjerenim vlaknima.

Ključne riječi:

proizvodnja i tehnologija betona, betonske konstrukcije, čvrstoća, ispitivanje materijala

Preliminary report

Julien Michels, Matija Gams

Preliminary study on the influence of fibre orientation in fibre reinforced mortars

The influence of steel fibres in fibre reinforced mortars is considered in the paper. Fresh mortar samples with randomly distributed fibres are placed in a spiral coil and exposed to electromagnetic field so as to achieve orientation of fibres. The location and orientation of fibres is defined by x-ray images. The bending strength testing with deflection checking using the ICS system (Digital Image Correlation System) is conducted. Considering the fibre orientation and load applied, the results exhibit better energy dissipation and greater energy at fracture in case of samples with oriented fibres.

Ključne riječi:

concrete manufacturing and technology, concrete structures, strength, material testing

Vorherige Mitteilung

Julien Michels, Matija Gams

Vorläufige Untersuchung zum Einfluss der Faserorientierung in mikroarmierten Mörteln

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Stahlfasern in mikroarmierten Mörteln untersucht. Mörtelproben in frischem Zustand mit zufällig angeordneten Fasern wurden in eine Spiralspule gelegt und einem Elektromagnetfeld ausgesetzt, um die Fasern auszurichten. Lage und Ausrichtung der Fasern wurden mit Röntgenaufnahmen ermittelt. Prüfungen zur Biegefestigkeit einschliesslich Kontrolle der Verformungen mittels ISC System (engl. Digital Image Correlation System - ICS) wurden durchgeführt. In Bezug auf die Ausrichtung der Fasern und die erzielten Spannungen haben die Resultate bei den Proben mit ausgerichteten Fasern eine verbesserte Energiedissipation und erhöhte Energie beim Versagen nach der Entwicklung von Rissen gezeigt.

Ključne riječi:

Betonherstellung und Betontechnologie, Betonkonstruktionen, Festigkeit, Materialuntersuchungen

1. Uvod

Prednost armiranja betona ili morta čeličnim vlaknima danas je prepoznata diljem svijeta, a rezultati takvih istraživanja su objavljeni u brojnim radovima tijekom proteklih nekoliko desetljeća. Detaljan pregled razvoja vlakana koja se koriste za ojačanje betona je prikazan u literaturi [1]. Glavna promjena uzrokovana dodavanjem vlakana u cementnu mješavinu je transformacija takvog materijala iz krhkog u duktilni, budući da dodatno ojačanje omogućuje prijenos vlačnih naprezanja čak i kod većih pukotina. Parametri koji značajno poboljšavaju vlačna svojstva u usporedbi s običnim betonom ili mortom jesu masa vlakana ili volumni udio (koji se obično izražava u $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ili [%]), dimenzije vlakana (odnos duljine i promjera vlakna), učinkovitost veze ugrađenih vlakana, kao i njihova orijentacija u odnosu na smjer naprezanja. Veći volumni udio vlakana i veći omjer utječu na povećanu čvrstoću uzorka nakon loma [2-11]. S druge strane, svojstva veze ugrađenih vlakana su određena geometrijom vlakna i površinskom adhezijom [12, 13]. Konačno, u betonskom elementu koji je izložen savijanju, utjecaj vlakana je najučinkovitiji kad je njegova orijentacija u smjeru inducirano g vlačnog naprezanja. Međutim, dodavanje vlakana u svježu betonsku mješavinu uzrokuje njihovu nasumičnu raspodjelu i orijentaciju što rezultira nepovoljnom orijentacijom vlakana u odnosu na opterećenje. Sa stajališta kvalitete, vlakna kao ojačanja u gredama su najučinkovitija kada je njihov položaj horizontalan. Orijentacija vlakana ovisi o konstrukcijskom elementu, geometriji i dimenzijama oplata s obzirom na dimenzije vlakana [14-17] te na smjer ugradnje. Primjerice, rezultati istraživanja u kojem su uzorci dobiveni bušenjem iz različitih smjerova, iz izvedenog mikroarmiranog betonskog elementa [18] pokazali su razlike u vlačnoj čvrstoći. Utjecaj skaliranja pri laboratorijskom ispitivanju manjih greda na savijanje ili ispitivanje elemenata većeg raspona prikazan je u literaturi [4].

Usmjeravanje vlakana je dokumentirano u patentu iz SAD-a [19], u kojem se magnetni uređaj koristi za usmjeravanje čeličnih vlakana tijekom procesa ugradnje betona. U ovom je radu također riječ o usmjerenim vlaknima, ali na relativno malim uzorcima. Zato su prizme položene u spiralnu zavojnicu u koju je uvedeno magnetsko polje. Rendgenske snimke [20] napravljene su kako bi se dobio vizualni dokaz o promjeni orijentacije vlakana. Na manjim elementima je potom ispitana vlačna čvrstoća na savijanje. Cilj je ovog istraživanja kvantitativno procijeniti utjecaj orijentacije vlakana, koji bi se kasnije upotrijebio u analizi troškova i koristi za optimalizaciju proizvodnje predgotovljenih elemenata uz smanjenje volumnog udjela vlakana u mortu. Geometrija korištenih vlakana je očito manja od standardnih laboratorijskih uzoraka koji služe za ispitivanje svojstava mikroarmiranog betona. To pokazuje da rezultate čvrstoće nakon loma treba vrednovati kvalitativno, a ne kvantitativno. Cilj je ovog istraživanja eksperimentalno odrediti izvodljivost tehnike usmjeravanja vlakana u cementnim materijalima i uvjeta u kojima je to moguće izvesti. Eksperimentalno ispitivanje je primijenjeno kako bi se proučio utjecaj usmjerenih vlakana u odnosu na nasumično raspoređena vlakna.

2. Materijali, uzorci i metode

2.1. Materijali

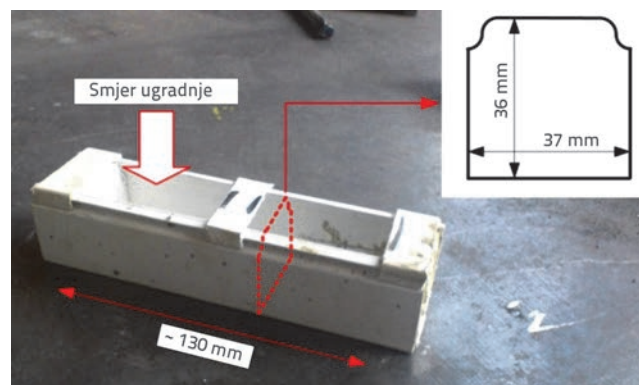
Zbog malih dimenzija uzorka, nije bilo moguće koristiti beton uobičajenog sastava. Stoga je upotrijebljena mješavina morta s agregatom veličine zrna do 3 mm. Nije primijenjen poseban granulometrijski sastav. Prema navodu proizvođača, tlačna čvrstoća je veća od 5 MPa nakon 28 dana njegovanja uzorka [21]. Za mikroarmiranje primijenjena su kukasta čelična vlakna (slika 1.). Vlakna su duljine 30 mm (l_f) i promjera 0,6 mm (d_f), a odnos duljine i promjera iznosi 50 (λ). Deklarirana vlačna čvrstoća vlakana je 1200 MPa, prema [22].



Slika 1. Čelična vlakna primjenjena u istraživanju

2.2. Uzorci

Dimenzije uzoraka su 37 mm x 36 mm u poprečnom presjeku (širina x visina) s blagim zaobljenjem na vrhu (približno 3 mm x 3 mm) zbog oblika plastičnih kalupa koji su se koristili kao oplata. Takav je kalup odabran jer je trebalo što jednostavnije pripremiti velik broj uzoraka. Štoviše, spiralna zavojnica ima ograničene dimenzije, što je još jedna prepreka za veće dimenzije uzoraka.



Slika 2. Kalup i poprečni presjek uzorka

Na slici 2. je prikazan oblik kalupa i uzorak. Ukupna duljina uzorka je približno 130 mm, a raspon od 100 mm je korišten kod ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje.

Za pripremu uzoraka korištene su dvije vrste vlakana, M_f od 30 i 40 kg/m³. Taj omjer odgovara volumnom udjelu od 0,39 % i 0,52 % . Za oba takva udjela uzeta su u obzir nasumično orijentirana i usmjerena vlakna. Voda je dodana suhoj mješavini morta u propisanoj količini, a potom su svi sastojci izmiješani. Svi uzorci su pripremljeni od iste vrste morta. Tablica 1. prikazuje vrstu i broj uzoraka te njihove karakteristike.

Tablica 1. Serije ispitivanja

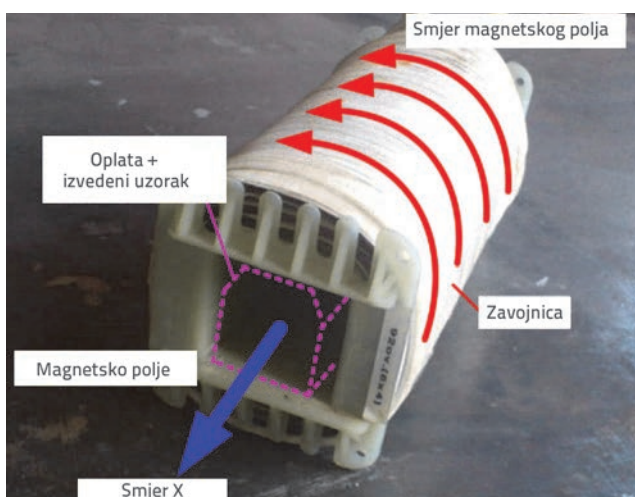
| Serija | Broj uzoraka | Volumni udio vlakana [kg/m ³] | Orijentacija vlakana |
|--------|--------------|---|----------------------|
| 30-RD | 6 | 30 | nasumično |
| 30-OR | 6 | 30 | orijentirana |
| 40-RD | 6 | 40 | nasumično |
| 40-OR | 7 | 40 | orijentirana |

2.3. Orijentacija vlakana i modeliranje

U ovom poglavlju obrađen je način usmjeravanja vlakana uz pomoć elektromagnetske zavojnice te su prikazani rezultati rendgenskog snimanja na kojima je vidljiva orijentacija vlakana i njihov položaj. Procjena raspodjele vlakana i njihova orijentacija u pripremljenim mješavinama, koja je određena primjenom računalne tomografije, objašnjena je u [23, 24]. Računalna tomografija (engl. *computed tomography* - CT) računalna je rekonstrukcija tomografirane ravnine. Riječ je o slikovnoj radiološkoj metodi koja nam daje slojevni prikaz pregledavanog dijela, a za nastanak slike rabi se ionizirajuće-rengensko zračenje.

2.3.1. Postupak usmjeravanja vlakana

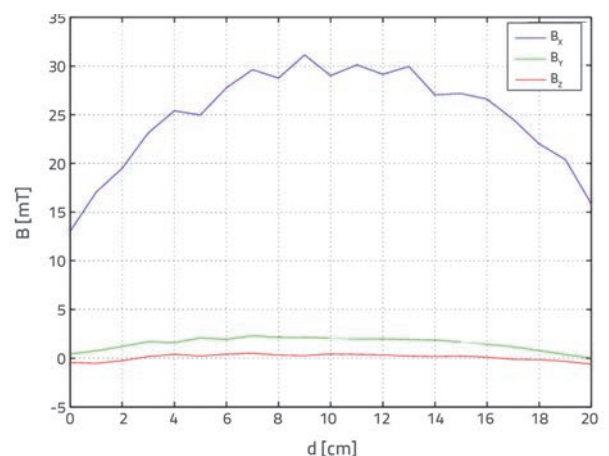
Uzorci su označeni simbolom za orijentaciju (30-OR i 40-OR) te su postavljeni u elektromagnetsku zavojnicu (slika 3.).



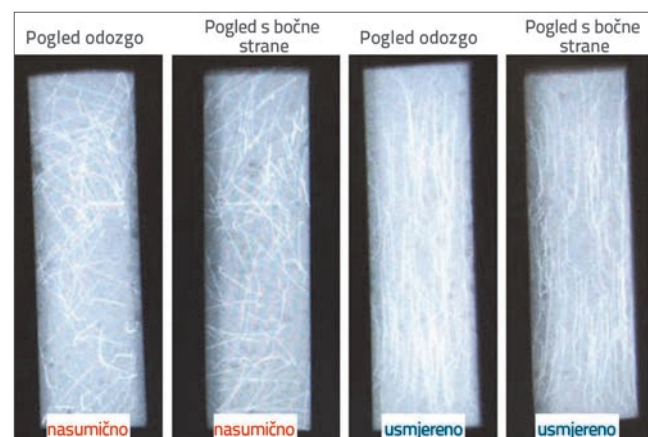
Slika 3. Elektromagnetska zavojnica

Zavojnica s uzorkom je postavljena na stol na kojem se provodi ispitivanje konzistencije betona rasprostiranjem. Tijekom djelovanja magnetskog polja u zavojnici, ploča na kojoj je uzorak slobodno je padala 10 puta u 10 sekundi. Nakon toga, ispitivanje je zaustavljeno, a uzorci su iz elektromagnetske zavojnice prebačeni u hermetički zatvorenu plastičnu vrećicu radi njegovanja. Procedura usmjeravanja vlakana je eksperimentalna, a dobivena je ispitivanjem mješavina suhog pijeska i vlakana. Elektromagnetska zavojnica je napravljena prema dimenzijama potrebnima za ovo ispitivanje. Zavojnica ima šuplju jezgru pravokutnog oblika 4 x 4 cm, duljine 20 cm. Sastoji se od 100 zavoja od bakrene žice pravokutnog oblika 8 x 5 mm, a jakost struje je bila približno 220 A, što proizvodi magnetsko polje jakosti 134,2 mT. Vrijednosti su izmjerene pomoću Hallove sonde. Intenzitet električne struje je određen prema pokusnim ispitivanjima mješavina sa suhim pijeskom.

Za demonstraciju, raspodjela magnetskog polja u uzdužnom smjeru (B_x) te u oba poprečna smjera (B_y), (B_z) pri jakosti struje od od 50 A prikazana je na slici 4. Najjači intenzitet je stvoren u središnjem dijelu zavojnice, a slabiji je prema rubovima zavojnice.



Slika 4. Vrijednosti magnetskog polja B_x , B_y i B_z [mT] u tri smjera, uzdužnom (x) i poprečnom (y, z) uslijed struje jakosti 50 A



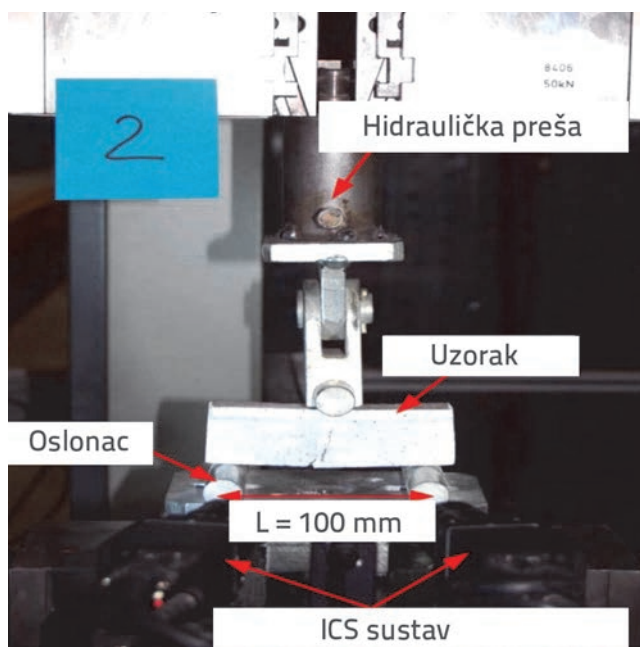
Slika 5. Rendgenske snimke bočnih i gornjih strana uzoraka s nasumičnim i usmjerenim vlaknima

2.3.2. Rendgenske snimke

Kako bi se odredila orijentacija vlakana u očvršnutim uzorcima, provedeno je rendgensko snimanje. Medicinski rendgen je korišten za snimanje uzoraka s bočne i gornje strane. Te slike su pokazale značajne razlike između uzoraka s nasumičnim i usmjerenim vlaknima, što je vidljivo na slici 5.

2.3.3. Određivanje položaja vlakana

Da bi se matematički odredila orijentacija vlakana unutar uzoraka, rendgenske slike su najprije digitalizirane i obrađene kako bi se povećao kontrast između vlakana i morta. Digitalne slike su skalirane do stvarnih dimenzija. Pored svakog uzorka su postavljeni etaloni, tako da je skaliranje bilo pouzdano i točno. Na nekim je slikama zapažena visoka ili čak premala koncentracija vlakana, a ispitivač je morao sam identificirati pojedina vlakna. Zbog prirode tog postupka, mogle su se pojaviti i pojedine pogreške koje ne utječu značajno na ukupni rezultat. Veličina uzoraka i gustoća vlakana je odabrana na način kako bi se izbjegle navedene pogreške. Svaki uzorak je snimljen s gornje i bočne strane, pa je zahvaljujući tome određen trodimenzionalni položaj vlakana u uzorcima. Najvažniji dio tog postupka je određivanje prikladnog para za projekciju. Kako bi se to ostvarilo, napravljen je jednostavni računalni program koji uspoređuje položaj središnjih točaka projekcije. Najbliže točke su odabrane kao parovi, a sljedećim ograničenjima: svaka projekcija bi se koristila jednom, a maksimalna dopuštena udaljenost između središnjih točaka projekcija iznosila je 10 mm. Ako se u projekcijama nisu dogodile pogreške, program bi pronašao (odgovarajući) par vlakana. Međutim, zbog prije spomenutog ograničenja, parovi nekih projekcija se nisu mogli spojiti. Broj projekcija bez parova iznosio je približno 10%.



Slika 6. Prikaz ispitivanja čvrstoće na savijanje

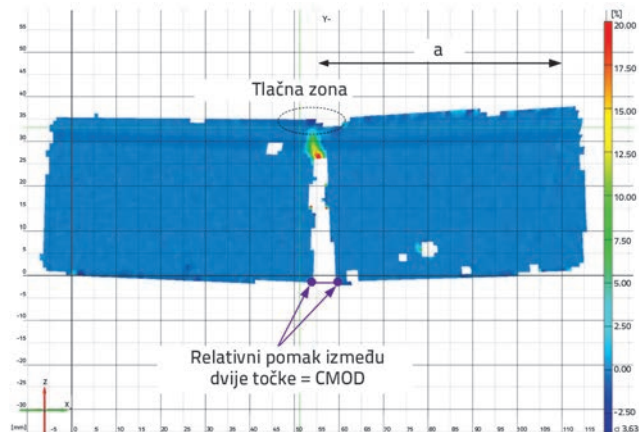
2.4. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Ispitivanje čvrstoće na savijanje je provedeno u laboratoriju Slovenskog nacionalnog instituta za građevinarstvo (ZAG), a prikazano je na slici 6.

Uzorci su opterećeni uz kontrolirane pomake, a prirast opterećenja iznosio je 1 mm/min. Raspon L je iznosio 100 mm u svakom ispitivanju. Progibi su zabilježeni pomoću ICS sustava (engl. *Digital Image Correlation System* - ICS), a obje kamere su prikazane na slici 6. Ta tehnika također omogućava snimanje pomaka u ravnini i izvan nje za prethodno određeno područje, odnosno kontrastni uzorak, prema [25, 26].

2.5. Eksperimentalne i numeričke procjene maksimalne širine pukotine

Maksimalna širina pukotine (engl. *crack mouth opening displacement* - CMOD) koja nastaje uslijed progiba je vrlo značajan konstrukcijski parametar u istraživanju i projektiranju konstrukcija. Od ključne je važnosti prilikom ispitivanja trajnosti konstrukcije. Donosi se usporedba između eksperimentalnog i numeričkog pristupa procjene CMOD-a. S eksperimentalnog stajališta, mjerenje ISC sustavom omogućuje jednostavnu evaluaciju relativnog pomaka između dvije točke, a pukotina je prikazana na slici 7.



Slika 7. Procjena CMOD-a sustavom ICS

Ovdje je prikazan pojednostavljeni geometrijski pristup za određivanje CMOD-a rotacijom zgloba i visinom tlačne zone. U poglavlju 3. prikazana je usporedba između rješenja na temelju obrnute analize i direktne procjene s ICS sustavom. Objе rotacije kuta (slika 8.) mogu se odrediti primjenom vertikalnih pomaka:

$$\psi_1 = \frac{\delta}{L/2} \tag{1}$$

$$\psi_2 = \frac{\delta_r}{\alpha} \tag{2}$$

Budući da je

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\delta_r}{L-a} \tag{3}$$

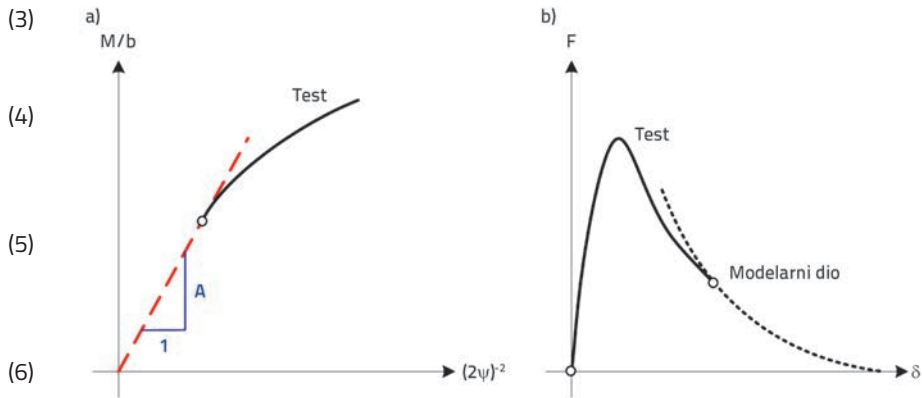
$$\delta_r = 2 \cdot \delta \cdot \frac{L-a}{L} \tag{4}$$

te

$$\theta = \Psi_1 + \Psi_2 \tag{5}$$

rotacija zgloba se može napisati kao:

$$\theta = \frac{2 \cdot \delta}{L} \cdot \left(\frac{L-a}{L} + 1 \right) = \frac{2 \cdot \delta}{\alpha} \tag{6}$$



Slika 9. Shematski prikaz: a) M/b u odnosu na $(2\Psi)^2$ krivulju; b) modelirani dio do nulte sile

U poprečnom presjeku s visinom h , rotacija zgloba se može povezati sa CMOD i visinom tlačne zone x_c geometrijskim odnosima koji su prikazani na slici 8.

$$\theta = \frac{CMOD}{h - x_c} \tag{7}$$

Točna pozicija x_c može se odrediti analizom poprečnog presjeka što je prikazano u [4]. Inverzna analiza odgovara materijalnim parametrima eksponencijalnog smanjivanja konstitutivnog zakona. Veza σ - ε poznata je pod nazivom konstitutivni zakon:

$$\sigma(\varepsilon) = f_{pc} \cdot e^{-\beta(\varepsilon_t - \varepsilon_{ct})} \tag{8}$$

gdje f_{pc} predstavlja čvrstoću neposredno nakon pojave prve pukotine, a ε_{ct} je vlačna čvrstoća.

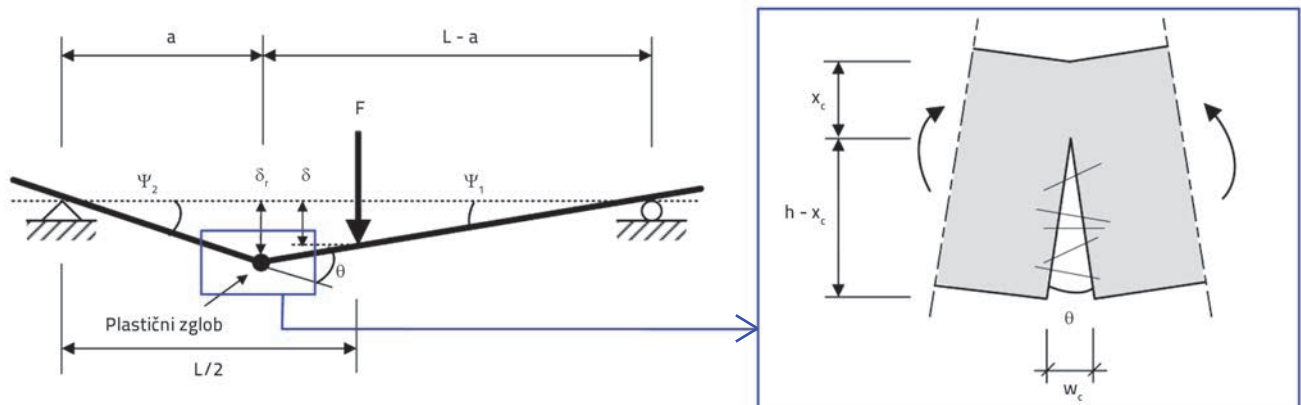
Algoritam predstavlja pukotinu nastalu uslijed rotacije zgloba (slika 8.), a položaj zgloba je poznat iz eksperimenta, pa se po tome prilagođavaju parametri f_{pc} i β do vrijednosti koja najbolje odgovara dobivenim eksperimentalnim rezultatima [4]. Veličina t označava da je za stopu opterećenja, visina tlačne zone poznata iz ravnoteže između vlačne i tlačne sile u poprečnom presjeku. Budući da se θ može odrediti iz progiba i položaja pukotine (udaljenost a), širina pukotine CMOD se može izračunati primjenom izraza (7).

2.6. Numerička derivacija energije sloma

Energija sloma je općenito definirana kao područje ispod krivulje tlačne pukotine, a maksimalna vrijednost se ostvaruje kada se nulta vlačna napreznja prenose kroz otvor pukotine. Druga mogućnost za izračun, preko disipacije energije W (područje ispod krivulje sile i progiba):

$$G_r = \frac{W}{b \cdot h} \tag{9}$$

Izraz $b \cdot h$ je ekvivalent poprečnom presjeku, s potpunim slomom na krajevima elementa. Radi jednostavnosti, odabrani poprečni presjek je pravokutnog oblika, širine 37 mm, a visine 36 mm. Kako bi se odredila ukupna energija loma, potrebno je provoditi ispitivanja dok se sila ne prestane prenositi kroz poprečni presjek. Ni u jednom predstavljenom ispitivanju ne može se odrediti disipacija energije dok ne dođe do potpunog sloma uzoraka. Kako bi se odredila potpuna nosivost iz dostupnih rezultata, primijenjena je tehnika ekstrapolacije prikazana u [27] (na temelju prethodnog istraživanja Bažanta [28] i drugih [29, 30]). Metoda se temelji na određivanju parametra omekšanja A , koji definira oblik krivulje omekšanja. Taj parametar se može otkriti iscrtavanjem momenta preko uzorka širine M/b u odnosu

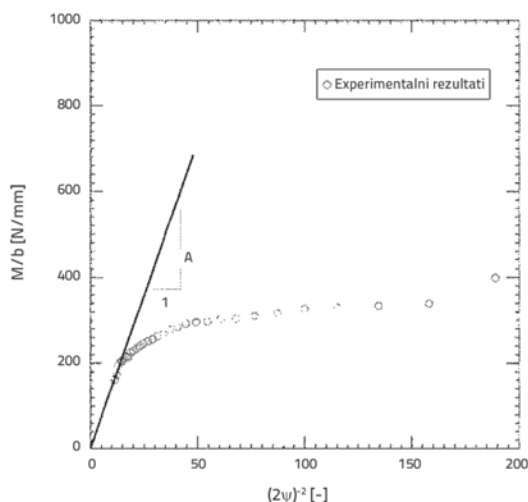


Slika 8. Uzorak pukotine i rotacija zgloba (ispitivanje savijanjem u tri točke)

na $(2\psi)^{-2}$, a odgovara početnom nagibu krivulje. Shematski prikaz je na slici 9. Preostala sila nakon zadnjeg mjerenja je određena izrazom

$$F_{tail} = \frac{b \cdot L \cdot A}{4 \cdot \delta} \tag{10}$$

Kut rotacije ψ je isti kao kut rotacije prikazan na slici 8., a određen je naknadno za progibe u zglobu. Naposljetku, vrijednosti progiba na sredini raspona su transformirane u geometrijske odnose (slika 8.). Dodatni položaj pukotine se može direktno odrediti mjerenjem ICS sustavom. Primjer određivanja parametra omekšanja A je prikazan na slici 9. Podaci su dobiveni ispitivanjem uzorka masenog volumnog udjela vlakana od 40 kg/m³ s nasumičnom raspodjelom vlakana. Položaj linearne linije je odluka istraživača, koju donosi nakon vizualnog pregleda krivulje [27].

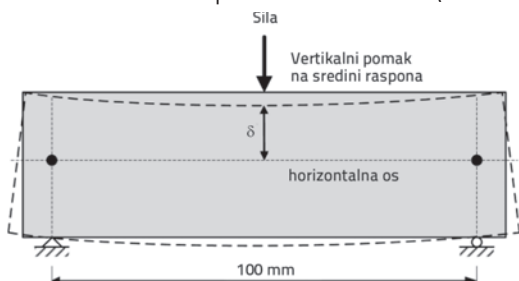


Slika 10. Primjer određivanja parametra omekšanja (A) kod uzorka s udjelom vlakana od 40 kg/m³ (nasumična raspodjela vlakana)

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

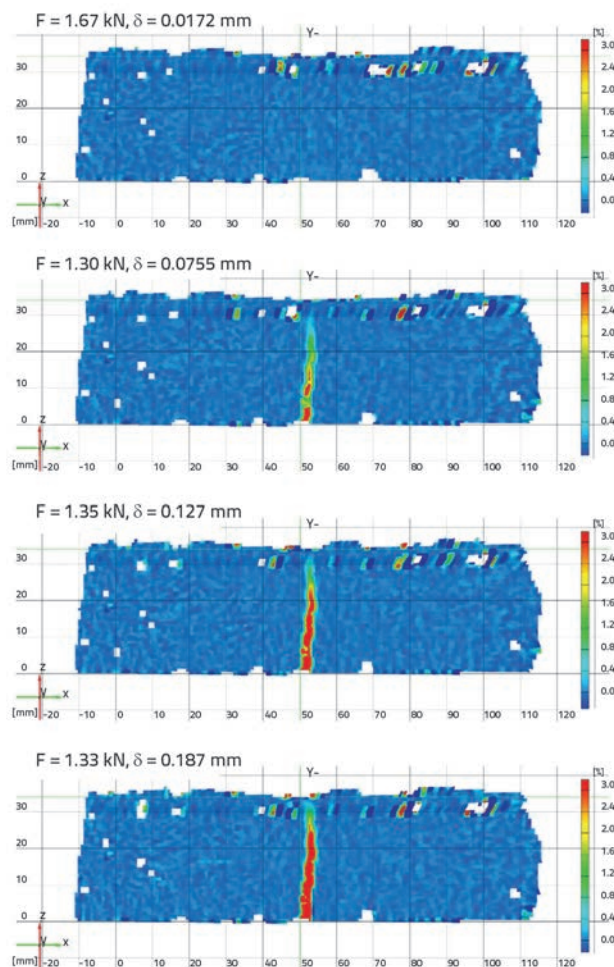
3.1. Rezultati ispitivanja

Iako postavke ispitivanja i uzorci ne zadovoljavaju sve uvjete ispitivanja za mikroarmirane betone, prema [31-33], progib na sredini raspona je određen slično kao pomak između površine morta i horizontalne osi na polovini visine uzorka (slika 11.).



Slika 11. Progib na sredini raspona

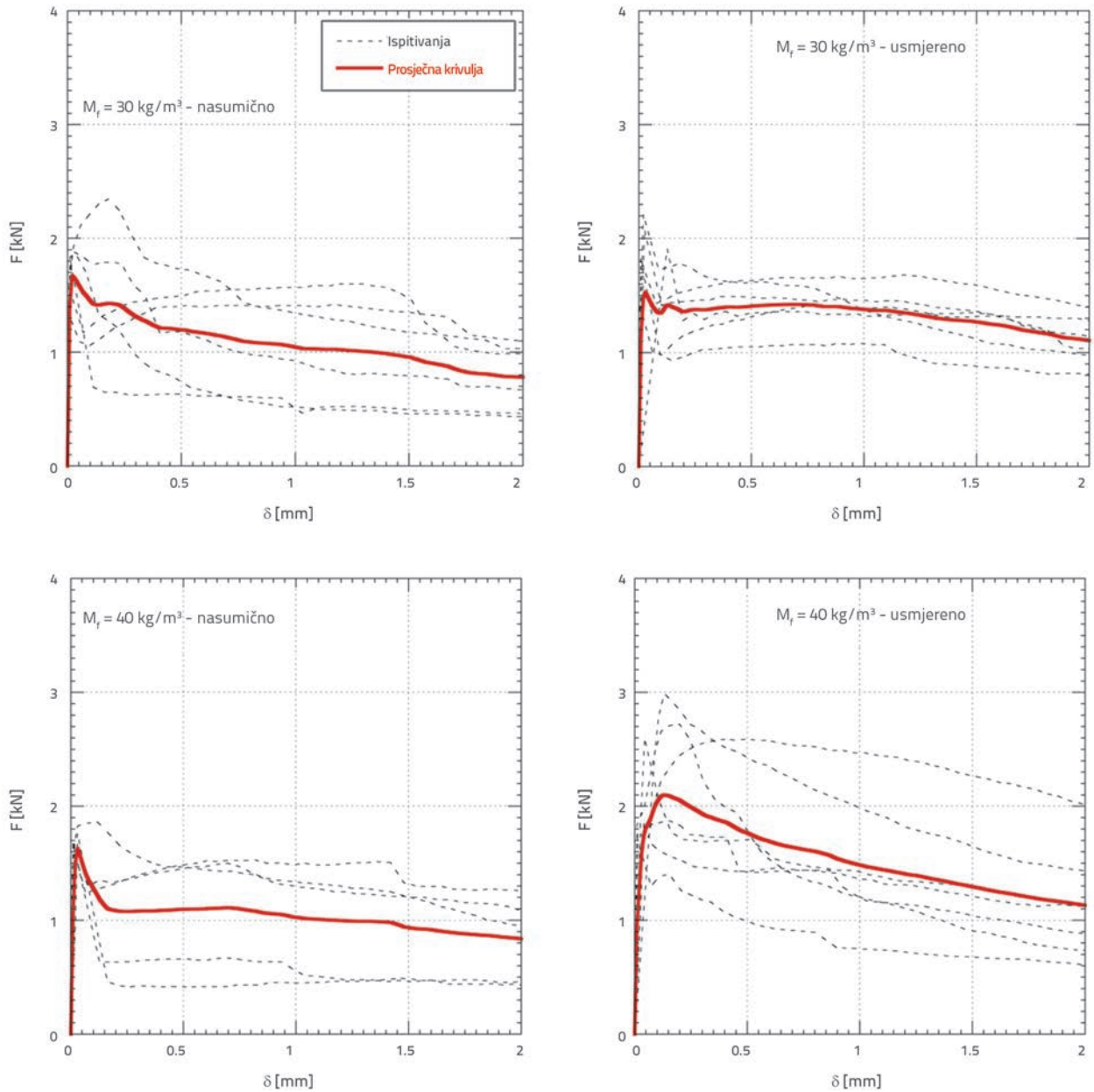
Može se zaključiti da je u svim uzorcima koji imaju početnu pukotinu, energija disipacije koncentrirana u jednom plastičnom zglobu. Primjerice, slika 12. prikazuje naprezanja u horizontalnom smjeru za 4 različite vrijednosti sile na uzorcima s nasumično raspoređenim vlaknima, čiji je udio u uzorku 40 kg/m³. Krivulja progiba (do 2 mm) prikazana je na slici 13., a maksimalne sile F_u za uzorak s udjelom vlakana od 30 i 40 kg/m³ prikazane su na slici 14. i u tablici 2.



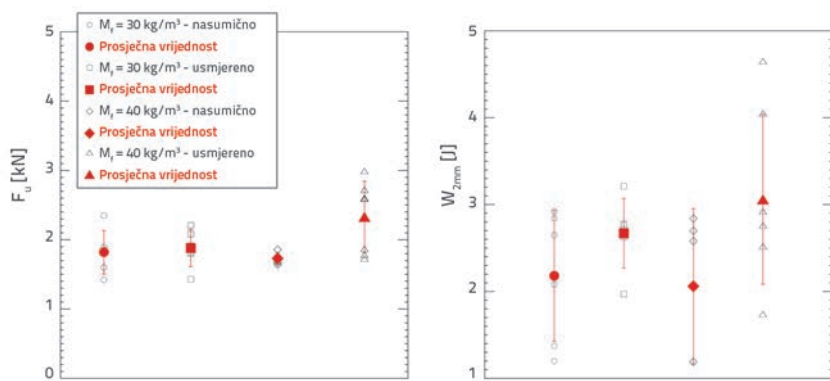
Slika 12. Vlačna naprezanja u smjeru x za 4 različita opterećenja, određena ICS sustavom na uzorcima s udjelom od 40 kg/m³ nasumično raspoređenih čeličnih vlakana

Tablica 2. Ispitivani uzorci - granična opterećenja i disipacija energije do progiba na sredini raspona od 2 mm

| Uzorci | F_u [kN] | W_{2mm} [J] |
|--------|----------------|----------------|
| 30-RD | 1,82 (+/-0,31) | 2,18 (+/-0,75) |
| 30-OR | 1,88 (+/-0,27) | 2,67 (+/-0,40) |
| 40-RD | 1,73 (+/-0,09) | 2,06 (+/-0,89) |
| 40-OR | 2,33 (+/-0,52) | 2,33 (+/-0,98) |



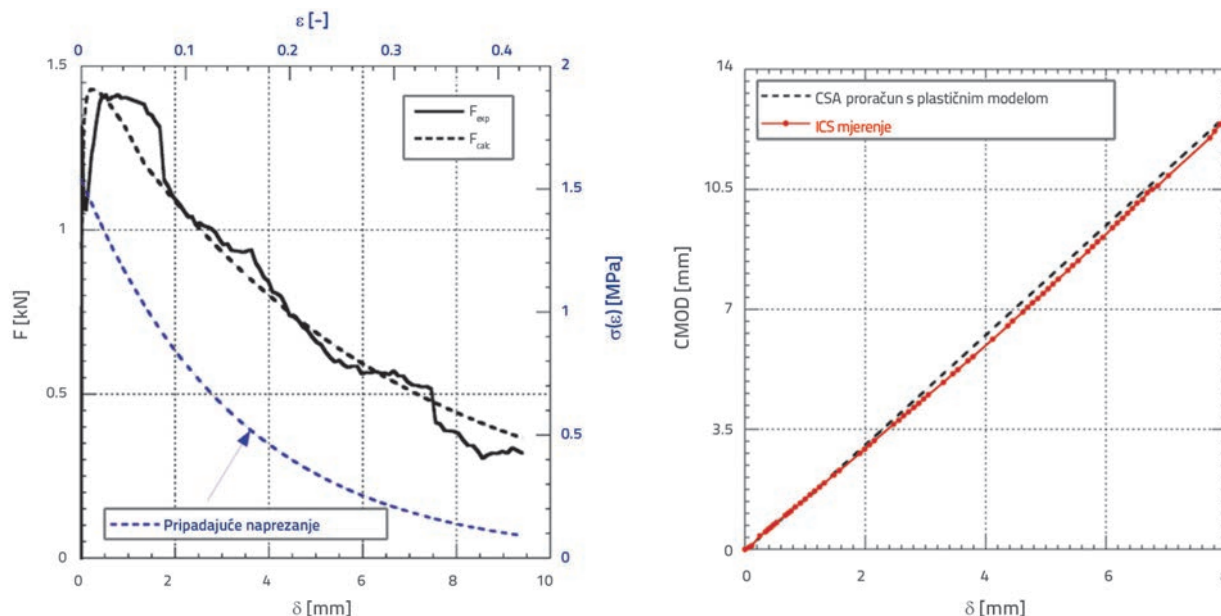
Slika 13. Krivulja "sila - progib" na sredini raspona za oba volumna udjela vlakana u uzorku i za obje vrste orijentacije vlakana



Slika 14. Granične sile F_u i disipacija energije W_{2mm} koje uzrokuju progib od 2 mm na sredini raspona za oba volumna udjela vlakana u uzorku i obje vrste orijentacije vlakana

3.2. Eksperimentalna i numerička usporedba CMOD-a

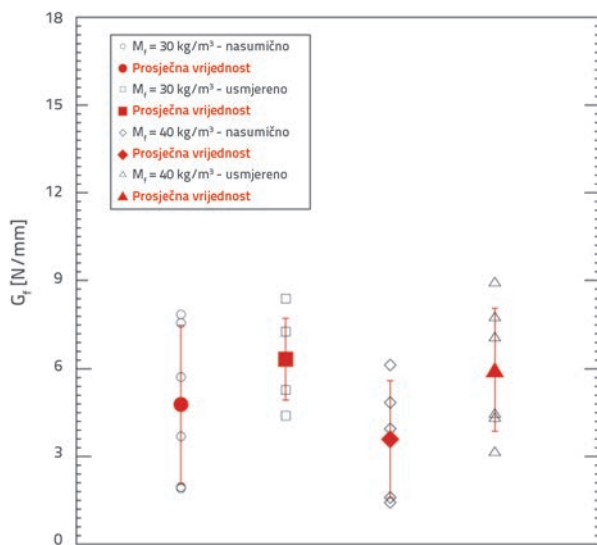
Na slici 15. je prikazana usporedba numeričke i eksperimentalne krivulje sile i progiba ($F - \delta$ krivulje) zajedno s pripadajućim vlačnim naprezanjima, za uzorak s volumnim udjelom vlakana 30 kg/m^3 i slobodnom orijentacijom vlakana. CMOD (vidjeti poglavlje 2.5) uspoređen je s eksperimentalnim ICS mjerenjima.



Slika 15. Eksperimentalni i numerički rezultati (lijevo) i usporedba dobivenih i izmjerenih CMOD-a s progibom čija se vrijednost povećava (desno)

3.3. Energija loma

Dobivene vrijednosti energije loma za sve ispitivane uzorke prikazane su na slici 16.



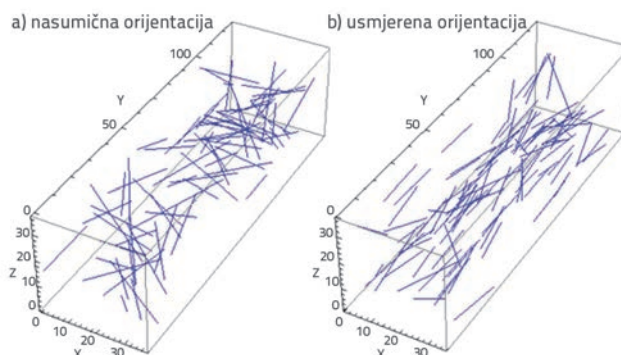
Slika 16. Energija loma G_f za sve uzorke

3.4. Volumni udio i orijentacija vlakana u presjeku s pukotinama

Na slici 17. može se vidjeti raspodjela i orijentacija vlakana u uzorku sa 40 kg/m³ čeličnih vlakana. Usmjerena vlakna su gotovo paralelna s horizontalnom osi, za razliku od nasumične orijentacije.

Na slici 18. je prikazan ukupan broj vlakana u presjeku s pukotinama i pripadajući prosječni kut vlakana (prosječni kut

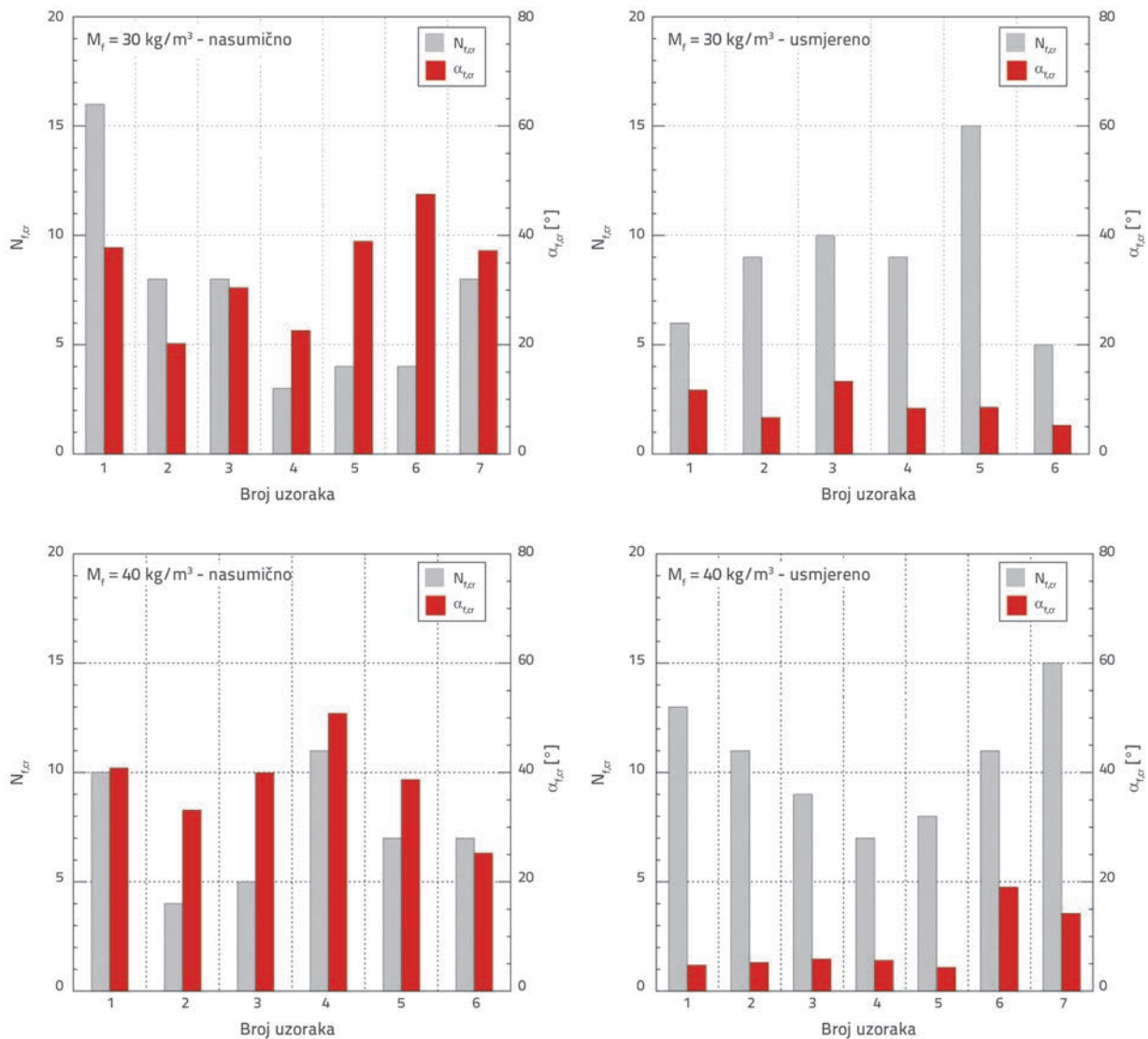
po uzorku) s obzirom na horizontalnu os. Prosječne vrijednosti svake serije ispitivanja su prikazane u tablici 3.



Slika 17. Trodimenzionalni prikaz uzorka u programu Mathematica sa 40 kg/m³ čeličnih vlakana: a) nasumično raspoređena vlakna, b) usmjerena vlakna

Tablica 3. Prosječne vrijednosti nekoliko serija ispitivanja vlakana te kuta orijentacije vlakana u presjeku s pukotinama

| Uzorci | $N_{f,cr,avg}$ (\pm s.d.) | $\alpha_{f,cr,avg}$ |
|--------|------------------------------|---------------------|
| 30-RD | 8 (\pm 4.4) | 35,3 |
| 30-OR | 9 (\pm 3.5) | 9 |
| 40-RD | 6,8 (\pm 2.7) | 37,6 |
| 40-OR | 10,6 (\pm 2.2) | 8,4 |

Slika 18. Broj vlakana $N_{f,cr}$ i prosječni kut vlakana $\alpha_{f,cr}$ u presjeku s pukotinama

3.5. Rasprava

Utjecaj usmjerenih vlakana na vlačnu čvrstoću uzoraka nije značajan u slučaju manjeg volumnog udjela vlakana u uzorku (30 kg/m^3), što nije slučaj kod uzoraka s većim volumnim udjelom (40 kg/m^3). Povećanje vrijednosti granične sile sa 1,73 (nasumična orijentacija vlakana) na 2,33 kN (usmjerena vlakna) može se vidjeti na slici 14.a. Kada se uzme u obzir standardna devijacija, relativna razlika u vrijednostima je mala.

Analiza dijagrama sila-progib, prikazanog na slici 13., može se zaključiti sljedeće: prvo, iz vizualnog pregleda može se vidjeti da je odgovor svih uzoraka pseudoduktilan s povećanom nosivosti u uzorku 40-OR (veći volumni udio vlakana i usmjerena orijentacija vlakana), što znači da su takvi uzorci otporniji na pojavu prve pukotine.

Drugo, iz detaljnije analize krivulje sila - progib nakon loma, može se procijeniti utjecaj usmjerenih vlakana u uzorku. Iz kategorije

uzoraka s volumnim udjelom vlakana od 30 kg/m^3 (slike 13.a i 13.b), prisilni pad s vrha krivulje opterećenja je manji kod usmjerenih vlakana nego u uzorku s nasumično raspoređenim vlaknima, što rezultira progibom na sredini raspona od 1 mm. Slični rezultati su se pokazali na uzorku volumnog udjela vlakana od 40 kg/m^3 (slike 13.c i 13.d). Iz gotovo identičnih vrijednosti progiba može se zaključiti da su sile veće u uzorku s usmjerenim vlaknima, koja služe kao premoštenje pukotina.

Kvantitativno gledajući, taj fenomen se može bolje objasniti disipacijom energije W , odnosno površinom ispod krivulje sila - progib. Vrijednosti $W_{2\text{mm}}$ za progib od 2 mm su navedene na slici 14.b i u tablici 2. U oba volumna udjela vlakana u uzorku, usmjerena vlakna vode prema većoj disipaciji energije u presjeku pukotine. Primjerice, prosječno poboljšanje od 22 i 50 % je zabilježeno u uzorku sa 30 i 40 kg/m^3 vlakana. Slični zaključci se mogu donijeti i za vrijednosti energije loma. Za obje vrste uzoraka s različitim volumnim udjelom vlakana veća je vrijednost energije loma

zabilježena u uzorku s usmjerenim vlaknima. Budući da je energija loma definirana kao površina ispod krivulje, to je logična posljedica veće učinkovitosti usmjerenih vlakana s obzirom na smjer naprezanja. Iznenaduje što se usporedbom između dviju volumnih frakcija s nasumično raspoređenim vlaknima nije pokazala nikakva razlika. Iznenaduje također i to da su rezultati ispitivanja uzoraka s udjelom vlakana od 40 kg/m^3 pokazali manju disipaciju energije u odnosu na uzorke sa 30 kg/m^3 vlakana. To je kontradiktorno s obzirom na općenite informacije o disipaciji energije u stanju kada se pukotine povećavaju s povećanim volumnim udjelom vlakana u uzorku, prema [2-10]. Slično tome, veći volumni udio vlakana u uzorku (40 kg/m^3) za nasumična i usmjerena vlakna utječe na manju vrijednost energije loma u odnosu na niži volumni udio vlakana u uzorku (30 kg/m^3). Prosječni broj vlakana u poprečnom presjeku se treba povećavati s većim volumnim udjelom vlakana u uzorku. Međutim, slika 18. i tablica 3. pokazuju da se prosječni broj vlakana u poprečnom presjeku ne povećava kada je veći volumni udio vlakana u uzorku. Za nasumičnu orijentaciju vlakana, uzorci sa 40 kg/m^3 vlakana su pokazali manji broj vlakana u presjeku nego uzorci koji imaju 30 kg/m^3 vlakana. To je glavni razlog za iznenadujuće niske vrijednosti disipacije energije i energije loma. Smatra se da zbog manjih dimenzija oplate i geometrije vlakana nije bila moguća homogena raspodjela vlakana u kalupu i da su male dimenzije oplate za uzorke glavni razlog zašto nije napravljeno dodatno ispitivanje savijanjem s prikladnijom veličinom greda.

Usmjerena vlakna s volumnim udjelom od 30 kg/m^3 u uzorku ne povećavaju značajno broj vlakana u presjeku pukotine (8 do 9 vlakana). Veća disipacija energije (tablica 3.) i energija loma (slika 16.) u tom su slučaju pod većim utjecajem vlakana, koja su bolje orijentirana u smjeru naprezanja. To se može vidjeti u tablici 3., s očito manjim prosječnim kutom vlakana s obzirom na središnju os uzorka za usmjerena vlakna (relativno smanjenje je 73 %, dok $\alpha_{f,cr,avg}$ iznosi od 35,3 do 9). S druge strane, u uzorku s udjelom vlakana od 40 kg/m^3 , više vlakana je smješteno u presjeku pukotine (u slučaju kada su vlakna usmjerena). U tom slučaju, povećanje iznosi 56 % (sa 6,8 na 10,6 vlakana). Veću vrijednost disipacije energije i energije loma uzrokuje manji prosječni kut vlakana i veći broj vlakana u uzorku. U budućim istraživanjima moglo bi na rezultate ispitivanja utjecati ovo: manji broj vlakana u presjeku, potencijalna koncentracija vlakana u gornjem ili donjem dijelu presjeka kao i duljina aktivne veze vlakana (kraći dijelovi vlakana koji su se uslijed loma izvukli iz morta u pukotini). Dodatna ispitivanja s većim uzorcima, ali istim dimenzijama vlakana mogla bi poboljšati rezultate.

Primjenom ICS sustava može se dobiti veći broj informacija u odnosu na druge alate, poput LVDT transformatora. U ovom slučaju može se direktno procijeniti točan položaj pukotine kao i smjer njenog širenja. Nadalje, tijekom ispitivanja savijanjem, CMOD se može jednostavno odrediti kontrolom položaja pukotine i određivanjem promjene duljine između dva kraja pukotine. Primjenom numeričkog modela opisanog u poglavlju 2.5. i literaturi [4] dobivene CMOD vrijednosti odgovaraju eksperimentalnim mjerenjima.

Može se zaključiti da su standardne devijacije različitih parametara visoke za sve udjele vlakana u uzorku i obje vrste

orijentacije vlakana. Sva su ispitivanja zaustavljena kada je vrijednost progiba bila manja od vrijednosti pri kojoj dolazi do sloma uzorka, a to je bilo nužno kako bi se modelirao preostali dio krivulje. Da su ispitivanja nastavljena, veće vrijednosti progiba dale bi jasniji odgovor u smislu točnih vrijednosti energije loma, kao i veće povjerenje u primijenjenu računalnu tehniku za modeliranje dijela odgovora koji nedostaje. Ukratko, može se zaključiti da prezentirani rezultati pokazuju vidljivo poboljšanje u smislu disipacije energije i energije loma u slučaju vlakana koja se usmjeravaju uz pomoć magnetskog polja. Međutim, neusklađeni (raspršeni) rezultati ne dopuštaju donositi konačne zaključke. Prednost ovog ispitivanja je određivanje optimalne orijentacija vlakana koja su usmjerena prema magnetskom polju. Autori smatraju da ta zapažanja mogu biti temelj za buduću primjenu mikroarmiranog betona u konstrukcijama.

4. Zaključak

Na temelju predstavljenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Tehnika kojom su se usmjeravala vlakna u mortu vrlo je jednostavna za manje uzorke, a u ovom istraživanju njena je izvodljivost dokazana. Za predgotovljene betonske elemente treba razviti prikladan magnetski uređaj.
- Procjena položaja vlakana i njihova orijentacija je dugotrajna i nije ju moguće primijeniti na uzorke većih dimenzija, pogotovo zbog velikog broja vlakana u njima. Može se koristiti tehnika temeljena na računalnoj tomografiji, koja je navedena u literaturi.
- Uočena je nedosljednost rezultata s obzirom na manju disipaciju energije i manju energiju loma u uzorcima s većim brojem vlakana, no zapaženo je značajno poboljšanje u usmjeravanju vlakana uz pomoć magnetskog polja. Eksperimentalni rezultati su pokazali bolje ponašanje uzoraka opterećenih savijanjem i nakon pojave pukotina u uzorcima s usmjerenim vlaknima. Budući da beton ojačan vlaknima treba imati veću nosivost, ta je prednost u istraživanju dokazana, ali je treba detaljnije ispitati.
- ICS sustavom se precizno određuje ponašanje elementa u uvjetima pomaka (i naprezanja) kao i položaj, orijentacija i širina pukotine, stoga su njegove prednosti s obzirom na LVDT osjetilima očite.

Buduća eksperimentalna ispitivanja na uzorcima s usmjerenim vlaknima trebala bi biti provedena na uzorcima većih dimenzija kako bi se pokazala prednost korištenja tehnike usmjeravanja vlakana i njena potencijalna primjena za proizvodnju predgotovljenih betonskih proizvoda.

Zahvala

Ovo istraživanje je jednim dijelom financirala Slovenska agencija za istraživanje, pod oznakom P2-0273. Autori zahvaljuju na potpori profesoru J. Sena-Cruzu (ISISE, Sveučilište Minho (Portugal)) na vrijednim komentarima koji su poboljšali kvalitetu ovog rada te izv.prof.dr. Samu Begušu na mjerenju magnetskog polja. Također zahvaljuju i osoblju u Klinici za pulmologiju u Ljubljani na ustupanju rendgenske opreme.

LITERATURA

- [1] Naaman, A.E.: Development and evolution of tensile strain-hardening FRC composites, 7th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Chennai (India), 2008.
- [2] Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., Ribeiro, A.F., Antunes, J.A.B.: Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 38 (2005) 275, pp. 47-56, <http://dx.doi.org/10.1617/14058>
- [3] Yazici, S., Inan, G., Tabak, V.: Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 6, pp. 1250-1253, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>
- [4] Michels, J., Christen, R., Waldmann, D.: Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 98 (2013) 1, pp. 326-349, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.11.004>
- [5] Soulioti, D., Barkoula, N.M., Paipetis, A., Matikas, T.E., Shiotani, T., Aggelis, D.G.: Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 12, pp. 3532-3536, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.042>
- [6] Soulioti, D.V., Barkoula, N.M., Paipetis, A., Matikas, T.E.: Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete, *Strain* 47 (SUPPL. 1):e535-e541, 2011, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>
- [7] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R.N.: Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, *Composites Part B, Engineering*, 41 (2005) 1, pp. 17-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.09.002>
- [8] Caggiano, A., Cremona, M., Faella, C., Lima, C., Martinelli, E.: Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers, *Construction and Building Materials*, 37 (2012), pp. 832-840, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.060>
- [9] Köksal, F., Sahin, Y., Gencel, O., Yiğit, T.: Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes, *Engineering Fracture Mechanics*, 107 (2013), pp. 29-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.04.018>
- [10] Balaguru, P., Narahar, R., Patel, M.: Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 89 (1992) 6, pp. 541-546
- [11] Hughes, B.P., Fattuhi, N.I.: Workability of steel-fibre-reinforced concrete, *Magazine of Concrete Research*, 28 (1976) 96, pp. 157-161, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.1976.28.96.157>
- [12] Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E.: Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures, *Construction and Building Materials*, 35 (2012), pp. 676-686, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.135>
- [13] Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M.: Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (2010) 1, pp. 1-9, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000001](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000001)
- [14] Dupont, D., Vandewalle, L.: Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 3, pp. 391-398, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005>
- [15] Laranjeira, F., Aguado, A., Molins, C., Grünwald, S., Walraven, J., Cavalaro, S.: Framework to predict the orientation of fibers in FRC, A novel philosophy, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012) 6, pp. 752-768, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.013>
- [16] Laranjeira, F., Grünwald, S., Walraven, J., Blom, C., Molins, C., Aguado, A.: Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (2011) 6, pp. 1093-1111, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9686-5>
- [17] Soroushian, P., Lee, C.D.: Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 87 (1990) 5, pp. 433-439.
- [18] Barragán, B.E., Gettu, R., Martín, M.A., Zerbino, R.L.: Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - A parametric study, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003) 7, pp. 767-777, [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00096-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00096-3)
- [19] US Patent 6740282B1 USPN: Method and device for magnetskic alignment of fibres, 2004.
- [20] Robins, P.J., Austin, S.A., Jones, P.A.: Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete, *Magazine of Concrete Research*, 55 (2003) 5, pp. 225-235, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2003.55.3.225>
- [21] CinkarnaCelje, <http://www.cinkarna.si/en/products/>, 2014.
- [22] KrampeHarex, www.krampeharex.com, 2014.
- [23] Schnell, J., Schladitz, K., Schuler, F.: Direction Analysis of Fibres in Concrete on Basis of Computed Tomography, *Beton- und Stahlbetonbau*, 105 (2010) 2, pp. 72-77, <http://dx.doi.org/10.1002/best.200900055>
- [24] Wuest, J., Denarié, E., Brühwiler, E., Tamarit, L., Kocher, M., Gallucci, E.: Tomography analysis of fiber distribution and orientation in ultra high-performance fiberreinforced composites with high-fiber dosages, *Experimental Techniques*, 33 (2009) 5, pp. 50-55, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2008.00420.x>
- [25] Czaderski, C., Soudki, K., Motavalli, M.: Front and side view image correlation measurements on FRP to concrete pull-off bond tests, *Journal of Composites for Construction* 14 (2010) 4, pp. 451-463, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000106](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000106)
- [26] Michels, J., Czaderski, C., El-Hacha, R., Brönnimann, R., Motavalli, M.: Temporary bond strength of partly cured epoxy adhesive for anchoring prestressed CFRP strips on concrete, *Composite Structures*, 94 (2012) 9, pp. 2667-2676, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.04.008>
- [27] Denneman, E., Wu, R., Kearsley, E.P., Visser, A.T.: Discrete fracture in high performance fibre reinforced concrete materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (2011) 10, pp. 2235-2245
- [28] Bazant, Z.P., Planas, J.: *Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials*, CRC Press, 1997.
- [29] Elices, M., Guinea, G.V., Planas, J.: Measurement of the fracture energy using three-point bend tests, Part 3-influence of cutting the P- δ tail, *Materials and Structures*, 25 (1992) 6, pp. 327-334, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472591>
- [30] Elices, M., Guinea, G.V., Planas, J.: On the measurement of concrete fracture energy using three-point bend tests, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 30 (1997) 200, pp. 375-376, <http://dx.doi.org/10.1007/bf02480689>
- [31] DBV: *Merkblatt Stahlfaserbeton*, 2001.
- [32] Barr, B.I.G., Lee, M.K., De Place Hansen, E.J., Dupont, D., Erdem, E., Schaeerlaekens, S., Schnütgen, B., Stang, H., Vandewalle, L.: Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test, Part 1 - Test method evaluation, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36 (2003) 263, pp. 609-620, <http://dx.doi.org/10.1007/bf02483281>
- [33] CNR: *Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures*, Italy, 2007.