

# Numeričko modeliranje betona ojačanog čeličnim vlaknima

---

**Smolčić, Željko; Ožbolt, Joško**

**Conference presentation / Izlaganje na skupu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:150199>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**



image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

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



image not found or type unknown

## NUMERIČKO MODELIRANJE BETONA OJAČANOG ČELIČNIM VLAKNIMA

Smolčić, Ž. i Ožbolt, J.

**Sažetak:** U radu je prikazana eksperimentalna i 3D nelinearna numerička analiza betona armiranog čeličnim vlaknima s kukama. Eksperimentalna analiza provedena je savijanjem zarezanih greda uz kontrolu pomaka s različitim volumnim udjelima vlakana ( $V_f=0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$  i  $1.5\%$ ). Numerička analiza betona armiranog vlaknima provedena je na mezo nivou. Beton armiran vlaknima modeliran je kao kompozit koji se sastoji od: betona, vlakana i veza između betona i vlakana ("interface"). Beton je modeliran mikroravninskim modelom betona korištenjem 3D konačnih elemenata. Čelična vlakna su modelirana 1D štapnim konačnim elementima, koja su slučajno generirana u prostoru. Veza između betona i vlakana ("interface") modelirana je diskretnim bond elementima. Cilj provedene studije je dobivanje efektivne veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakna koja može realno simulirati ponašanje betonskih greda armiranih različitim volumnim udjelima vlakana. Rezultati studije pokazuju da predloženi model može realno predvidjeti otpornost i duktilnost greda armiranih vlaknima. Pokazano je da se porastom volumnog udjela vlakana smanjuje čvrstoća bonda i kapacitet prokliznuća vlakana. Na osnovu eksperimenta čupanja pojedinačnog vlakana, eksperimenta savijanja obične grede s zarezom i numeričke analize provedene na mezo nivou predložena je efektivna veza posmično naprezanje-prokliznuće vlakna za različite volumnske udjele vlakana u betonu.

**Ključne riječi:** Beton, čelična vlakna, mikroravninski model, posmično naprezanje-prokliznuće.

### 1 UVOD

U radu se koristi mezo modeliranje betona koje daje bolji uvid u stvarno ponašanje betona armiranog vlaknima. Beton armiran vlaknima promatra se kao kompozit koji se sastoji od tri faze: cementne matrice (beton), vlakana i veze između cementne matrice i vlakana ("interface"). Nelinearna 3D numerička analiza provedena je pomoću programa MASA, koji koristi mikroravninski model betona [2]. U programu MASA može se modelirati i armatura, kao i veza beton-armatura koja je moguća preko diskretnih bond elemenata [1]. Problem slučajnog položaja i orijentacije vlakana u prostoru riješen je pomoću programa Mathcad. Kalibracija parametara mikroravninskog modela betona i parametara diskretnog bond modela dobivena je usporedbom eksperimentalno dobivenih rezultata na betonskim gredama sa i bez vlakana. Za različite volumne udjele vlakana u betonu provedena je parametarska analiza utjecaja bond modela na nosivost grede u svrhu formuliranja zavisnosti između bond modela i volumnog udjela vlakana.

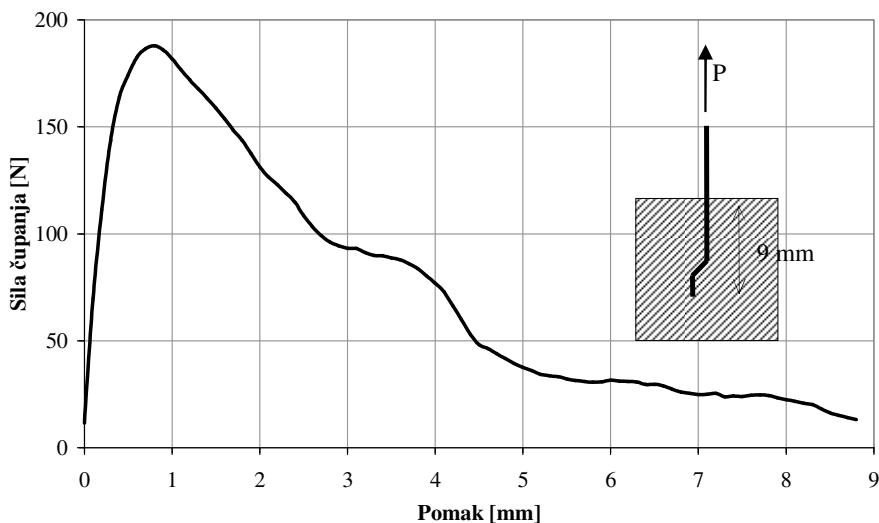
## 2 EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Eksperiment ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće betona proveden je s tri različite mješavine betona bez vlakana. U tablici 1 dane su srednje vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće betona za sve tri mješavine betona.

Tab. 1. Tlačne i vlačne čvrstoće mješavina

mješavina	tlačna čvrstoća $f_c$ [MPa]	vlačna čvrstoća cijepanjem $f_t$ [MPa]
M1	60.94	3.96
M2	74.47	4.38
M3	71.88	4.20

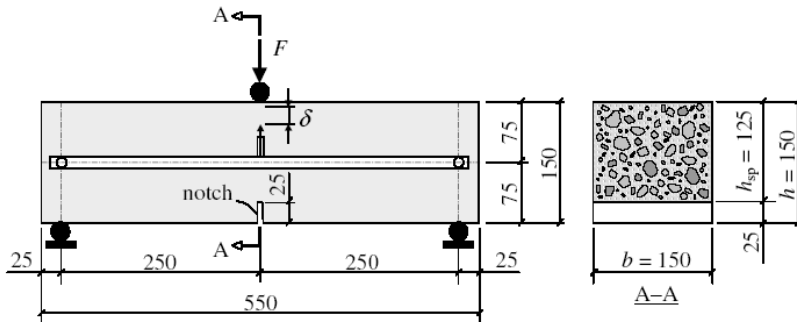
Korištena su čelična vlakna s kukama Dramix RC 65/35 BN, duljina vlakna je  $l_f=35$  mm, promjer vlakna  $d_f=0.55$  mm, omjer duljine i promjera vlakna je  $(l_f/d_f)=65$ . Eksperiment čupanja pojedinačnog vlakna proveden je na betonskim prizmama  $40 \times 40 \times 160$  mm i to s tri različite mješavine betona. Čelična vlakna usidrena su u sredinu betonske prizme s duljinom sidrenja koja iznosi četvrtinu duljine vlakana ( $l_e=l_f/4=35/4 \approx 9$  mm), čelično vlakno je pod kutem od  $90^\circ$  s obzirom na površinu betonske prizme. Na Sl. 1 prikazana je srednja vrijednost sile čupanja za sve tri mješavine betona.



Sl. 1. Eksperimentalni rezultati čupanja pojedinačnog vlakna

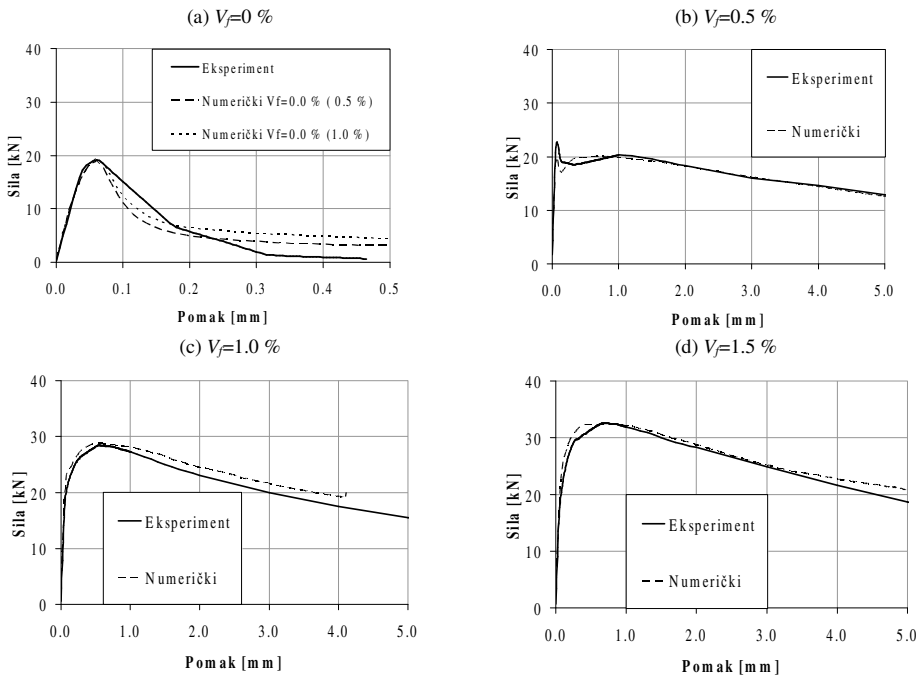
Statičko ispitivanje greda na savijanje pod kontrolom pomaka provedeno je na gredama kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija  $b \times h=150 \times 150$  mm i duljine  $L=550$  mm, statičkog sustava prosta greda raspona  $l=500$  mm (Sl. 2), a prema preporukama RILEM-a za konstrukcije od betona armiranog vlaknima TC 162-TDF [3]. Zarez na sredini grede izvodi se nakon 28 dana pomoću mokrog rezanja. Širina zarez u sredini

raspona je 5 mm, dok je duljina zareza 25 mm. Dakle, visina grede na mjestu zareza  $h_{sp}=125$  mm. Pri eksperimentu se kontinuirano mjeri sila i pomak neposredno ispod zareza na gredi.



Sl.2. Uzorak za eksperiment statičkog ispitivanja grede na savijanje pod kontrolom pomak [3]

Na Sl. 3 prikazani su eksperimentalno dobiveni dijagrami sila-pomak grede izrađenih od betona mješavine M2 za različite volumne udjele vlakana ( $V_f=0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$  i  $1.5\%$ ). Za beton bez vlakana ( $V_f=0\%$ ) prikazan je pomak do 0.5 mm, dok je za betone s vlaknima ( $V_f=0.5\%$ ,  $V_f=1.0\%$  i  $V_f=1.5\%$ ) prikazan pomak do 5.0 mm. Vidljivo je da s porastom volumnog udjela vlakana raste maksimalna sila sloma (nosivost) i duktilnost grede.



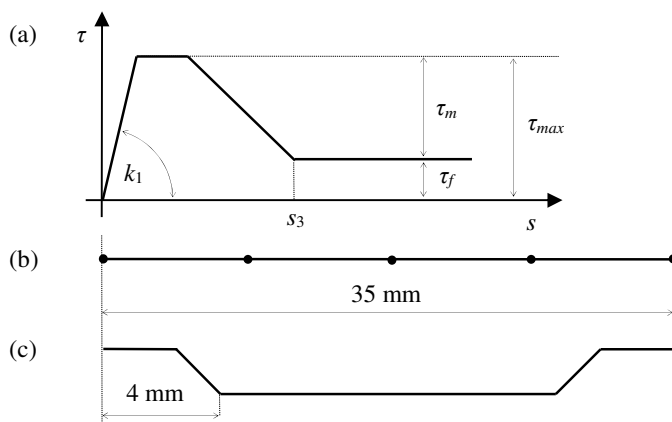
Sl. 3. Usporedba eksperimentalno dobivenog dijagrama (srednja vrijednost) sila-pomak sredine grede i dijagrama sila-pomak sredine grede dobivenog numeričkim proračunom u programu MASA za beton mješavine M2

### 3 NUMERIČKA ANALIZA

Da bi se smanjila veličina modela i vrijeme proračuna, vlakna su generirana samo u središnjih 150 mm grede. Korištenjem programa Mathcad 2001i za svako vlakno se generira: jedinični vektor smjera vlakna kao slučajna varijabla i težište vlakna kao slučajna varijabla, nakon toga generiraju se čvorovi i štapni konačni elementi za svako vlakno. Svako vlakno je modelirano s četiri štapna konačna elementa i pet čvorova (Sl. 4b). Za definirane štapne konačne elemente vlakana u programu FEMAP 10 mogu se izgenerirati betonski tetraedralni konačni elementi i diskretni bond elementi.

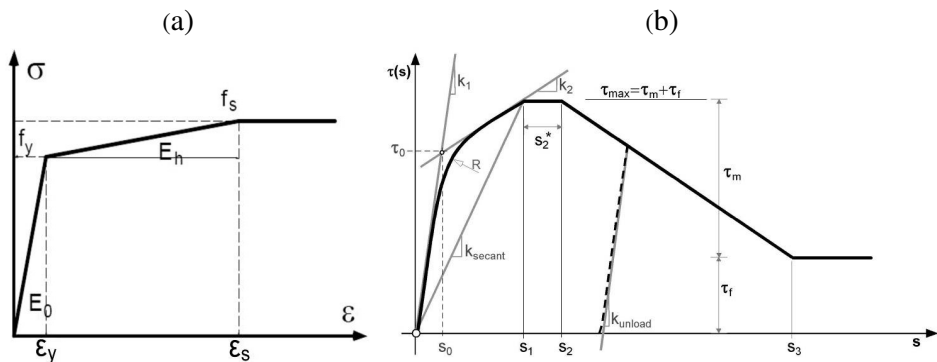
Kao konstitutivni zakon ponašanja betona korišten je tzv. mikroravninski model betona [2]. S fizikalnog motrišta u mikroravninskom modelu mikroravnine predstavljaju smjerove mogućih oštećenja ili osjetljiva mjesta u strukturi betona.

Parametri mikroravninskog modela dobiveni su kalibracijom betonske grede bez vlakana opterećene pri kontroli pomaka, na način da se je uspoređivao eksperimentalno dobiveni dijagram sila-pomak sredine grede i dijagram sila-pomak sredine grede dobiven numeričkim proračunom u programu MASA (Sl. 3a).



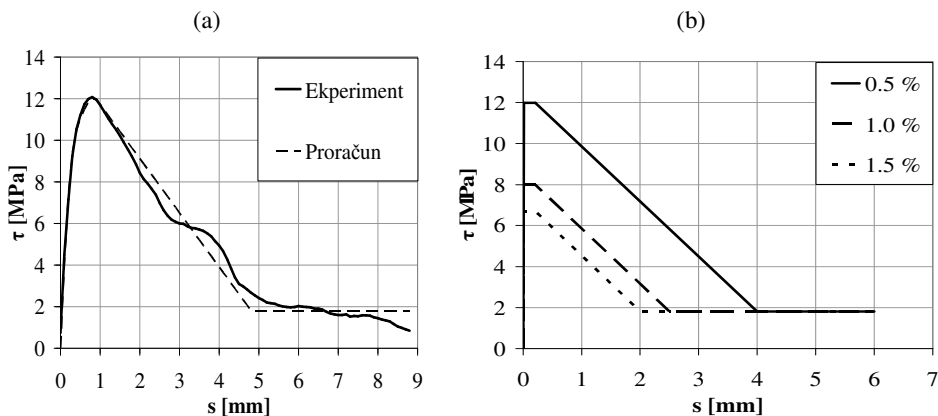
Sl. 4. Način modeliranja vlakna: (a) veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakna ( $\tau$ - $s$ ), (b) štapni konačni elementi i čvorovi vlakna i (c) stvarni oblik vlakna

Mehaničke osobine čeličnih vlakana su: modul elastičnosti  $E_s=210$  GPa, Poissonov omjer  $\nu_s=0.33$ , granica popuštanja  $f_y=1.211$  GPa, vlačna čvrstoća  $f_s=1.345$  GPa, modul ojačanja  $E_h=14.56$  GPa i granična deformacije  $\epsilon_s=0.05$  (Sl. 5a). Veza posmično naprezanje-prokliznuće vlakna ( $\tau$ - $s$ ) dobivena je iz eksperimenta čupanja pojedinačnog vlakna (Sl. 1), tako da je sila čupanja podijeljena s oplošjem vlakna u kontaktu s betonom ( $d_f l_e \cdot \pi$ ). Prikaz veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakna ( $\tau$ - $s$ ) dobivene iz eksperimenta čupanja pojedinačnog vlakna dana je na Sl. 6a.



Sl. 5. Konstitutivni modeli za: (a) vlakno i (b) vezu posmično naprezanje-prokliznuće vlakna

Parametri veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakna dobiveni su minimiziranjem greške između eksperimentalno dobivene veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakana i konstitutivnog zakona prikazanog na Sl. 5b. Dobiveni su parametri diskretnog bond modela:  $\tau_m=10.17$  MPa,  $\tau_r=1.83$  MPa,  $k_{secant}=17.129$  MPa/mm,  $k_1=41.808$  MPa/mm,  $k_2=2.707$  MPa/mm,  $s_2^*=0.2$  mm,  $s_3=4.8$  mm i  $R=3.039$ . Usporedba između eksperimentalno dobivene veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakana i konstitutivnog zakona prikazana je na Sl. 6a.



Sl. 6. Veze efektivnog posmičnog naprezanje-prokliznuće vlakna ( $\tau$ - $s$ ) dobivena: (a) iz eksperimenta čupanja jednog vlakna i (b) kalibracijom numeričkog modela s testovima na gredama

Usporedba eksperimentalne i numerička analiza provedena na gredi s volumnim udjelom vlakana 0.5 % i paramterima diskretnog bond modela (Sl. 6a) pokazuje da se greda ponaša previše krto. Postoje dva razloga za takvo neslaganje eksperimenta s numeričkim proračunom: (i) veza posmično naprezanje-prokliznuće vlakana za pojedninačno vlaknao ne uzima u obzir interakciju između vlakakana i (ii) u kritičnome presjeku grede vlakna su opterećena (čupanje) u smjeru koji se u principu ne podudara s njezinim smjerom.

Kalibracijom veličina ( $\tau_{max}$  i  $s_3$ ) dobiveni su optimalni parametri veze posmično naprezanje-prokliznuće vlakana za sva tri volumna udjela vlakana i dani su u tablici 2 i Sl. 6b. Pri tome je korištena pojednostavljena veza posmično naprezanja-prokliznuće vlakna (Sl. 4a), kod koje se uzima da je  $k_1=k_2=k_{secant}$  kako bi se pojednostavio postupak kalibracije.

Eksperimentalne i numeričke krivulje sila-pomak za grede s volumnim udjelom vlakana od 0% do 1.5% dane su na Sl. 3. Poklapanje između eksperimenta i numeričke analize je vrlo dobro i to za cijelo područje nakon dostizanja nosivosti.

Tab. 2. Parametri diskretnog bond modela za sve modele

volumni udio vlakana	parametri modela					
	$\tau_m$ [MPa]	$\tau_f$ [MPa]	$k_{secant}$ [MPa/mm]	$k_1$ [MPa/mm]	$s_2^*$ [mm]	$s_3$ [mm]
0.5 %	10.17	1.83	1200	1200	0.20	4.00
1.0 %	6.17	1.83	1200	1200	0.20	2.50
1.5 %	4.89	1.83	1200	1200	0.20	2.00

## 4 ZAKLJUČAK

Provedena analiza pokazala je da predloženi mezo model može realno predvidjeti otpornost i duktilnost greda armiranih čeličnim vlaknima s kukama za različiti volumenski udio vlakana. U budućnosti bi predloženi model trebalo verificirati i s vlaknima drugačijeg oblika i materijala. Zanimljiva bi bila i verifikacija mezo modela pri cikličkom opterećenju.

### Literatura:

- [1] Ožbolt, J., Lettow, S. & Kožar I., “Discrete Bond Element for 3D Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures” In Balázs-Bartos-Cairns-Borosnyói (eds), Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium: Bond in Concrete - from research to standards. Budapest: University of Technology and Economics., 2002.
- [2] Ožbolt, J., Li, Y.J. & Kožar, I., “Microplane Model for Concrete with Relaxed Kinematic Constraint”, International Journal of Solids and Structures, Vol.38, 2001, str. 2683-2711.
- [3] Vandewalle, L. “RILEM TC162-TDF: Test and desig methods for steel fiber reinforced concrete: Bending test final Recommendation”, Materials and Structures, Vol.35, 2002, str. 579-582.

### Autori:

Željko Smolčić, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku, Radmile Matejčić 3 Rijeka, tel. 051/265-946, e-mail: [zeljko.smolcic@gradri.hr](mailto:zeljko.smolcic@gradri.hr), web stranica:

<https://portal.uniri.hr/portfelj/zeljko.smolcic@gradri.hr>

Joško Ožbolt, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Zavod za računalno modeliranje materijala i konstrukcija, Radmile Matejčić 3 Rijeka, tel. 051/265-992, e-mail: [josko.ozbolt@gradri.hr](mailto:josko.ozbolt@gradri.hr), web stranica:

<https://portal.uniri.hr/portfelj/josko.ozbolt@gradri.hr>