

Primljen / Received: 25.8.2014.

Ispravljen / Corrected: 11.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 21.3.2015.

Dostupno online / Available online: 10.6.2015.

# Ponašanje slojevito mikroarmiranih betonskih greda izloženih cikličkom opterećenju

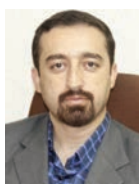
## Autori:



**Maysam Ghasemi Naghibdehi**, dipl.ing.građ.  
Tehničko sveučilište Babol Noshirvani  
Građevinski fakultet  
[ghasemi891.maysam@gmail.com](mailto:ghasemi891.maysam@gmail.com)



Izv.prof.dr.sc. **Morteza Naghipour**, dipl.ing.građ.  
Tehničko sveučilište Babol Noshirvani  
Građevinski fakultet  
[m-naghi@nit.ac.ir](mailto:m-naghi@nit.ac.ir)



Izv.prof.dr.sc. **Mahmood Rabiee**, dipl.ing.stroj.  
Tehničko sveučilište Babol Noshirvani  
Strojarski fakultet  
[rabiee@nit.ac.ir](mailto:rabiee@nit.ac.ir)

Izvorni znanstveni rad

**Maysam Ghasemi Naghibdehi, Morteza Naghipour, Mahmood Rabiee**

## Ponašanje slojevito mikroarmiranih betonskih greda izloženih cikličkom opterećenju

Tijekom zadnjih deset godina primjenjuje se slojevito mikroarmiranje kao nova metoda za proizvodnju armiranobetonskih elemenata. U radu su prikazani rezultati ispitivanja svojstava slojevito mikroarmiranih betonskih greda izloženih djelovanju cikličnog opterećenja. Za pripremu uzoraka primijenjena su čelična i polipropilenska vlakna. Betonske grede s potpunim kompozitnim djelovanjem ojačane su sa 0,5 do 2 % čeličnih vlakana, a slojevito mikroarmirane grede sadrže 1,3 % čeličnih vlakana. Dobiveni rezultati pokazuju da se primjenom slojevitog mikroarmiranja betona povećava disipacija energije uslijed cikličkog opterećenja.

### Ključne riječi:

slojevito mikroarmiranje betonske grede, potpuno armirani poprečni presjek, ciklično opterećenje

Original scientific paper

**Maysam Ghasemi Naghibdehi, Morteza Naghipour, Mahmood Rabiee**

## Behaviour of functionally graded reinforced-concrete beams under cyclic loading

Over the past decade, the functional grading has been applied as a new method for the manufacturing of reinforced-concrete elements. The objective of this investigation is to evaluate performance of the functionally graded reinforced-concrete beams exposed to cyclic loading. The steel and polypropylene fibres are used for the preparation of samples. Concrete beams with full composite action are strengthened with 0.5 to 2 % of steel fibres, and functionally graded RC beams contain 1.3 % of steel fibres. The use of the functionally graded method to reinforce concrete increases the dissipated energy due to the applied cyclic loading.

### Key words:

functionally graded RC beams, fully reinforced cross-section, cyclic loading

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Maysam Ghasemi Naghibdehi, Morteza Naghipour, Mahmood Rabiee**

## Verhalten von geschichtet faserverstärkten Betonbalken unter zyklischer Belastung

In den letzten zehn Jahren wird geschichtete Faserverstärkung als neue Methode zur Herstellung von Stahlbetonelementen angewandt. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, die Eigenschaften von geschichtet faserverstärkten Betonbalken unter zyklischer Belastung zu erfragen. Zur Vorbereitung der Proben wurden Stahl- und Polypropylenfasern angewandt. Betonbalken mit voller Verbundwirkung sind mit 0,5 bis 2 % Stahlfasern verstärkt und geschichtet verstärkte Balken umfassen 1,3 % Stahlfasern. Die Resultate zeigen, dass durch eine geschichtete Faserverstärkung des Betons die Dissipationsenergie infolge zyklischer Belastung ansteigt.

### Schlüsselwörter:

geschichtet faserverstärkte Stahlbetonbalken, vollständig bewehrter Querschnitt, zyklische Belastung

## 1. Uvod

U prošlom desetljeću provedena su mnoga istraživanja armiranobetonskih elemenata s ugrađenim vlaknima radi postizanja boljih svojstava betona. Mikroarmirani betonski kompoziti (eng. *Fiber-Reinforced Composites* - FRC) proizvode se jer imaju veću čvrstoću i krutost (cilj je gradnja laganih konstrukcija koje su čvrste i krute). U polimere se često dodaje staklo ili čelična vlakna. Vlakna su dostupna u tri osnovna oblika:

- duga vlakna - ravna i obično položena paralelno jedno pokraj drugih
- sjeckana vlakna - obično su kratka i raspoređena nasumično (staklo-plastika)
- mreža vlakana - od tkanine, omogućuju čvrstoću u više smjerova.

Nekada se cement ojačan vlaknima pripremao s azbestom u Hatschekovu procesu. S obzirom na prednosti azbesta, poput visoke čvrstoće vlakana, visoke fizičke i kemijske otpornosti, nezapaljivosti, otpornosti na vremenske uvjete i isplativosti, upotrebljavan je kao građevni materijal u prošlom stoljeću, no zbog negativnog utjecaja na zdravlje ljudi, njegova proizvodnja je ukinuta [1-3]. Da bi se dobila prikladna zamjena za azbest, proizvedeno je mnogo vrsta sintetičkih vlakana. Najpoznatija su organska vlakna poput akrila, polivinila (PVA), polietilena (PE), polipropilena (PP), prirodne celuloze te anorganska vlakna (staklo i karbon) [4]. S obzirom na vrste materijala, vlakna se (ona u proizvodnji betona) klasificiraju u osnovne grupe [5]:

- čelična vlakna različitih oblika i veličine te mikro vlakna
- staklena vlakna, u cement se dodaju samo vlakna otporna na lužine
- sintetička vlakna od različitih materijala: polipropilen, polietilen i poliolefin, polivinil i dr.
- ugljična i poliakrilna vlakna.

Parametri koji utječu na mehanička svojstva cementa jesu vrsta, geometrija i orijentacija te volumni udio vlakana u prostornoj matrici [6]. Korištenje vlakana kao dodatak cementu omogućuje veću mehaničku čvrstoću [7]. Kako bi se ustanovio učinak ojačanja konstrukcijskih elemenata različitim vlaknima, elementi su ispitani na savijanje, tlak, izvijanje te na djelovanje običnog i cikličkog opterećenja. U istraživanjima su korišteni elementi s potpuno ojačanim poprečnim presjekom, od različitih vrsta i količina vlakana ispitani na savijanje, izvijanja, tlak te na djelovanje cikličkog i udarnog opterećenja.

Novi pristup u armiranju betona razvijen je 2008. godine, a ispitivanja su pokazala da se armiranjem betona u različitim slojevima s različitim vlaknima u gredama i pločama postiže bolja otpornost na savijanje pod utjecajem jednolikog opterećenja [8]. Iskhakov i suradnici ispitivali su inovativni materijal kao zamjenu prilikom popravaka betonskih konstrukcija [9]. Upotrijebili su dvije vrste materijala u gredi, a obični beton i beton visokih uporabnih svojstava ugrađeni su na donji i gornji sloj grede. Cilj je tog istraživanja bio postići optimalnu količinu vlakana s

najvećim Poissonovim koeficijentom i žilavosti elemenata [9]. Njihovi eksperimentalni rezultati pokazuju da debljina sloja treba biti ista kao i debljina tlačne zone grede [9].

Vlakna su raspoređena nasumično u elementu. Sloj od mikroarmiranog betona može biti u cijelom presjeku elementa ili u jednom dijelu (ili dva sloja) kompozitnog elementa [10]. Kombinacija betona normalne čvrstoće i betona visokih uporabnih svojstava s čeličnim vlaknima u dvoslojnom kompozitnom elementu predstavlja učinkovito i isplativo rješenje. Štoviše, ta se metoda može predložiti kao nova metoda pri naknadnoj ugradnji konstrukcijskih elemenata [11].

Ghasemi Naghibdehi i suradnici proveli su eksperimentalna i numerička ispitivanja na utjecaj ojačanja čeličnim vlaknima ili polipropilenskim vlaknima (ili njihovom kombinacijom) u poprečnom presjeku u dva odvojena sloja. U njihovom ispitivanju pripremljene grede ojačane su s 0,5 %, 1 % i 2 % čeličnih i polipropilenskih vlakana.

Ojačane grede s jednom ili dvije vrste vlakana ispitane su na savijanje. Rezultati su pokazali da ojačanje cijelog poprečnog presjeka elementa čeličnim vlaknima (potpuno kompozitno djelovanje) može povećati nosivost grede, u usporedbi s elementom pripremljenim slojevitim polaganjem betona.

Najbolja otpornost na savijanje postignuta je primjenom jedne vrste ojačanja duž cijelog poprečnog presjeka, tj. s 2 % čeličnih vlakana. Kod gređa s dva sloja, najbolja svojstva su postignuta u uzorku s 1 % čeličnih vlakana [12, 13].

Rezultati prijašnjih ispitivanja te metode armiranja dobiveni su na osnovi ispitivanja gređa pod utjecajem jednolikog opterećenja, ali takvo ispitivanje nije provedeno za ciklička opterećenja. Zbog toga se provodi eksperimentalno ispitivanje ponašanja armiranobetonske grede. Upotrijebljene su različite frakcije čeličnih vlakana da bi se bolje prikazala svojstva grede sa slojevitim mikroarmiranjem u usporedbi s gredom s potpunim kompozitnim djelovanjem, izloženih cikličkom opterećenju. Ispitivanje se sastoji od dvije faze. U prvoj se fazi ispituje obični i armirani beton na tlak, razdvajanje, vlačna čvrstoća i smicanje. U drugoj fazi, nakon što su ispitana mehanička svojstva betona, ispitano je ponašanje višeslojne ploče s različitim vrstama vlakana i frakcijama te rasporedom slojeva pod utjecajem cikličkog opterećenja.

## 2. Plan eksperimentalnog ispitivanja

U prvoj fazi eksperimentalnog ispitivanja provedena su ispitivanja na vlačno i tlačno savijanje kako bi se odredila mehanička svojstva betonskih slojeva s polipropilenskim i čeličnim vlaknima. Ispitivanja su provedena na klasično mikroarmiranoj betonskoj gredi i slojevitoj mikroarmiranoj gredi s vlaknima. Nakon određivanja mehaničkih svojstava armiranih betona, obje grede su ispitane na smicanje te na djelovanje cikličkog opterećenja. U ovom istraživanju betonske su grede ojačane polipropilenskim i čeličnim vlaknima. Polipropilenska vlakna su dodana u omjerima 0,25 % (2,3 kg/m<sup>3</sup>), 0,5 % (4,6 kg/m<sup>3</sup>), 0,65 % (5,98 kg/m<sup>3</sup>), 0,75 % (6,9 kg/m<sup>3</sup>) i 1 % (9,2 kg/m<sup>3</sup>), a

udio čeličnih vlakana u betonu iznosio je 0,5 % (39,5 kg/m<sup>3</sup>), 1 % (79 kg/m<sup>3</sup>), 1,3 % (102,7 kg/m<sup>3</sup>), 1,5 % (118,5 kg/m<sup>3</sup>) i 2 % (158 kg/m<sup>3</sup>).

## 2.1. Materijali

Za mješavinu betona visokih uporabnih svojstava upotrijebljen je pucolanski cement 42.5R (tip 2), silikatni pijesak s dvije vrste frakcija, silikatna prašina, voda i polikarboksilatni superplastifikator. Sastav mješavine prikazan je u tablici 1. Polikarboksilatni superplastifikator pripada novoj generaciji kemijskih dodataka, koji se dodaje u manjem udjelu (0,15 - 0,3 % količine cementa). Taj superplastifikator omogućuje smanjenje količine vode do 40 %, zbog svoje kemijske strukture koja omogućuje dobru disperziju čestica. Mješavina se sastoji od dvije komponente:

1. paste, poput cementa i vapna
2. kamenih materijala, poput pijeska, krupnih agregata i vlakana.

Tablica 1. Sastav mješavine betona

Sastav mješavine		Udio u mješavini [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement		967
Silikatna prašina		251
Silikatni pijesak	0,5-0,9 mm	405
	0,2-0,5 mm	270
Voda		365,4
Superplastifikator		12,18

Da bi se procijenila kvaliteta mješavine svježeg betona, vizualnim pregledom su izmjerene vrijednosti rasprostiranja

Tablica 3. Svojstva uzoraka za ispitivanja

Uzorak	Udio vlakana [%]	Vrsta vlakana	Metoda armiranja	Broj slojeva	Debljina slojeva [mm]
Obični beton	---	---	---	---	100
PP 0.25	0,25	Polipropilenska	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
PP 0.5	0,5	Polipropilenska	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
PP 0.65	0,65	Polipropilenska	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
PP 0.75	0,75	Polipropilenska	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
PP 1	1	Polipropilenska	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
Beton ojačan polipropilenskim vlaknima	0,65 (ekvivalent)	Polipropilenska	Slojevito mikroarmiranje	5	20
ST 0.5	0,5	Čelična	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
ST 1	1	Čelična	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
ST 1.3	1,3	Čelična	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
ST 1.5	1,5	Čelična	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
ST 2	2	Čelična	Potpuno armirani poprečni presjek	1	100
Beton ojačan čeličnim vlaknima	1,3 (ekvivalent)	Čelična	Slojevito mikroarmiranje	5	20

slijeganjem i segregacije (za pastu). Za dobivanje mješavine koja je prikazana u tablici 1., cementna pasta je pomiješana kamenim materijalima, a potom je provedeno ispitivanje rasprostiranja slijeganjem. Primijenjene su dvije vrste vlakana, a njihova mehanička svojstva su prikazana u tablici 2. i na slici 1. Armirani beton s različitim vlaknima pripremljen je sa sljedećim materijalima:

1. sitni agregat
2. cement
3. voda + 40 % superplastifikator
4. 60 % superplastifikator
5. vlakna.

Da bi se ispunio cilj ispitivanja, za armiranje 26 uzoraka greda upotrijebljene su različite vrste i količin vlakana s rasporedom slojeva. Uzorci greda za potrebe ispitivanja su opisani u tablici 3.

Tablica 2. Svojstva čeličnih i polipropilenskih vlakana

Vlakna	L/D	Youngov modul [GPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]
Čelična	45	200	1100
Polipropilenska (PP)	461	5	600

Žilavost i tehnološki aspekti laboratorijskih ispitivanja dvoslojnih greda, koje se sastoje od betona visokih uporabnih svojstava s dodatkom vlakana u tlačnoj zoni i betona normalne čvrstoće bez vlakana u vlačnoj zoni, opisani su detaljno u literaturi [12, 14]. Za izradu slojevito mikroarmiranih greda (eng. *functionally graded reinforced concrete* - FGRC), razmatrane su grede s pet slojeva mikroarmiranja, pripremljena su 3 drvena kalupa za

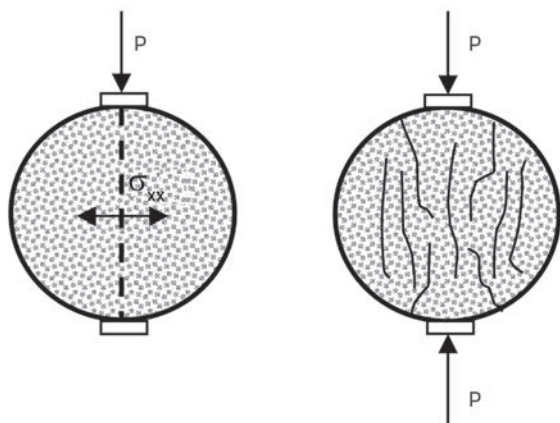


Slika 1. Vrsta vlakana: a) čelična; b) polipropilenska

izradu uzoraka. Dimenzije kalupa su: 20 mm (debljina) x 400 mm (duljina) x 100 mm (širina). Dvije oplate debljine 20 mm pričvršćene su sa svake strane (za kontrolu jednolike debljine svakog sloja) te je svježi beton ugrađen u kalup. Nakon 45 minuta (metodom pokušaja i pogrešaka), prvi sloj može podnijeti težinu gornjeg sloja, a onda se polažu slojevi jedan po jedan do petog sloja.

## 2.2. Tlačna i vlačna čvrstoća

U prvoj fazi istraživanja provedena su ispitivanja na uzorcima mikroarmiranog betona kako bi se odredila vlačna i tlačna čvrstoća. Mješavine su ugrađene u kocke dimenzija 100 x 100 x 100 mm, nakon čega je ispitivan utjecaj čeličnih i polipropilenskih vlakana na čvrstoću betona. U ispitivanju vlačne čvrstoće upotrijebljena su tri valjka promjera 150 mm i visine 300 mm. Nastale pukotine su prikazane na slici 2. Primijenjena sila u tom ispitivanju iznosila je 0,016 N/mm<sup>2</sup>, prema propisima ASTM C496 [15].



Slika 2. Shematski prikaz ispitivanja vlačne čvrstoće i nastale pukotine

Vlačna čvrstoća je izračunana iz izraza (1):

$$\sigma_{xx} = \frac{2P}{\pi D} \tag{1}$$

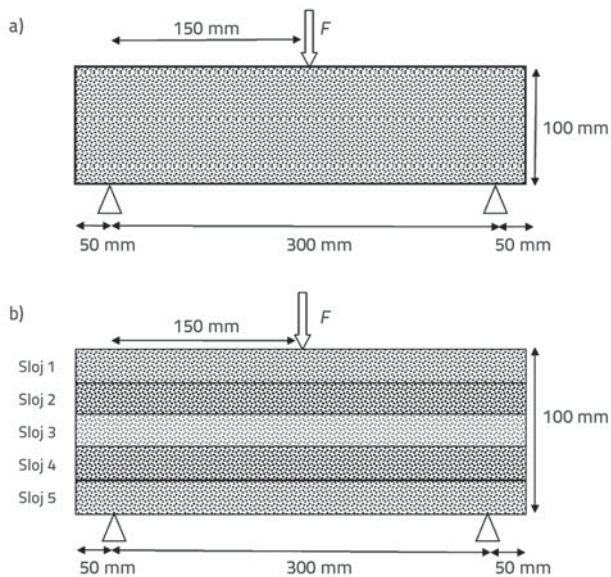
gdje  $D$  označava promjer valjka, a  $P$  je vrijednost opterećenja.

## 2.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje s jednom koncentriranom silom u sredini raspona

Ghasemi Naghibdehi i suradnici pokazali su da učinkovitost ojačanja, primjenom metode slojevitog ojačanja betona vlaknima (slojevito mikroarmiranje), značajno ovisi o vrsti vlakana, njihovoj količini i rasporedu slojeva [12, 13]. Ojačanjem betona na taj način omogućen je odabir rasporeda slojeva, vrste vlakana, veličina frakcije s obzirom na primjenu betona. Kod cikličkog opterećenja, konstrukcijski element je izložen pozitivnim i negativnim momentima. Ojačanje povećava svojstva običnog betona pri pojavi pukotina i omogućuje bolju žilavost. Povećana žilavost proizlazi iz sposobnosti vlakana da prenose vlačna naprezanja preko napuknutog dijela, što utječe na smanjenje širenja pukotine. S druge strane, ojačanje običnog betona omogućuje bolju sposobnost u prenošenju vlačnih sila preko pukotina. Ovo svojstvo je učinkovitije kada su vlakna smještena u vlačnoj zoni cijelog poprečnog presjeka. S obzirom na to, ojačani slojevi s istom količinom i vrstom vlakana postavljeni su simetrično u kompozitnim gredama uslijed djelovanja posmičnog i cikličkog opterećenja. Detalji mikroarmirane grede s potpunim kompozitnim djelovanjem i slojevito mikroarmirane grede (eng. *functionally graded reinforced concrete* - FGRC) prikazani su na slici 3. i u tablici 4.

Tablica 4. Udio vlakana u slojevito armiranoj betonskoj gredi

Vrsta vlakna \ Slojevi	Sloj 1	Sloj 2	Sloj 3	Sloj 4	Sloj 5
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Polipropilenska	2	1	0,5	1	2
Čelična	1	0,5	0,25	0,5	1



Slika 3. Shematski prikaz betona ojačanog vlaknima: a) mikroarmirana betonska greda s potpunim kompozitnim djelovanjem, b) slojevito mikroarmirana betonska greda

Da bi se procijenilo ponašanje greda prilikom savijanja, ispitano je 13 greda dimenzija  $100 \times 100 \times 400$  mm pod utjecajem koncentrirane sile u sredini raspona, pri brzini od 0,5 mm/min. Prema prethodnim istraživanjima [13], veći broj slojeva manje debljine u gredi utječe na povećanje otpornosti na savijanje. Manja debljina slojeva betona omogućuje da se vlakna ravnomjerno raspodijele u betonskom sloju. Smanjenjem debljine betonskog sloja, vlakna su orijentirana prema ravni sloja, a to pridonosi poboljšanju posmičnih svojstava. Čelična vlakna duga su 36 mm, a polipropilenska 12 mm, a s obzirom na raspored vlakana u betonskom sloju, odabrana debljina sloja iznosi 20 mm.

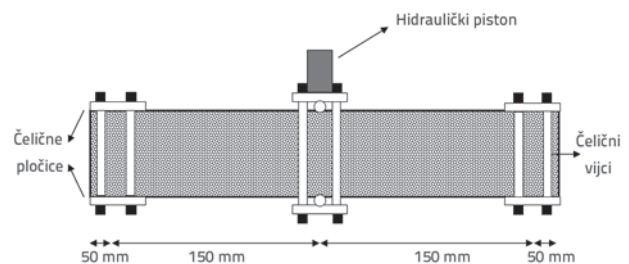
Simetrična armatura u slojevima je postavljena zbog cikličkog opterećenja. S druge strane, gornji i donji sloj su izloženi vlačnom i tlačnom naprezanju. Stoga je simetrično ojačanje grede u slojevima napravljeno s obje vrste vlakana. Greda s betonskim slojevima ojačanim na spomenuti način može se u proračunu promatrati kao kompozitni armiranobetonski element. Koncept metode slojevitog mikroarmiranja betona se sastoji od stvaranja stabilnih prijelaza u mikrostrukтури materijala te ugradnje betonskih slojeva koja zadovoljava projektirane uvjete.

S obzirom na to, postoji nekoliko prijelaznih zona među slojevima (eng. *interfacial transition zones* - ITZ). Svojstva prijelaznih zona različita su između svakog sloja zbog različitih frakcija vlakana. Posmična naprezanja između slojeva se prenose prijelaznim zonama. Kada su grede izložene cikličkom opterećenju, maksimalno posmično naprezanje se prenosi kroz prijelazne zone od gornjeg prema donjem betonskom sloju. Zbog toga je polaganje većeg broja slojeva u gredi bolje rješenje, jer se na taj način smanjuju

posmična naprezanja u prijelaznim zonama, a konstrukcijski element ima bolja kompozitna svojstva. Prema tome, zaključeno je da je kompozitno djelovanje betonskih slojeva prisutno do dostizanja graničnog stanja (eng. *Ultimate Limit State* - ULS), što znači da su slojevi dobro povezani. Da bi se postigla simetričnost potrebna su najmanje tri sloja, ali se pretpostavlja da ta tri sloja rezultiraju distribucijom posmičnih naprezanja među slojevima s velikim gradijentom. Zbog toga je u ovom istraživanju pripremljen betonski element s pet slojeva.

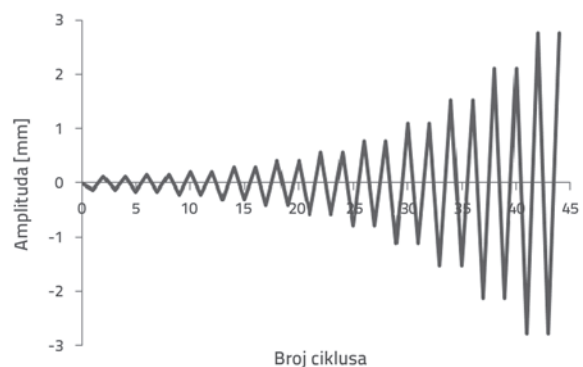
## 2.4. Postupak ispitivanja

Na slici 3. je detaljno prikazan postupak ispitivanja čvrstoće na savijanje jednom koncentriranom silom u sredini raspona. Dakle, kako bi se mogli usporediti rezultati, slične postavke su upotrijebljene za ispitivanje cikličkim opterećenjem [16]. Hidraulički piston je postavljen uz pomoć čeličnih vijaka, a grede su pričvršćene da se ne bi prevrnule tijekom ispitivanja na cikličko opterećenje. Shematski prikaz postavki ovakvog ispitivanja je prikazan na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz postavki za cikličko ispitivanje

Frekvencija cikličkog opterećenja prikazana je na slici 5. Cikličko opterećenje je postignuto pomoću 44 uzastopna opterećenja hidrauličkim pistonom. Kontrola pomaka je provedena na sredini raspona grede, a brzina je iznosila 0,5 mm/min. Hidraulički piston je postavljen na sredinu raspona kako bi se postiglo cikličko opterećenje, kao što je prikazano na slici 4.



Slika 5. Primijenjeno cikličko opterećenje

Tablica 5. Vlačne i tlačne čvrstoće uzoraka

Oznaka uzoraka s obzirom na udio vlakana		Tlačna čvrstoća [MPa]				Vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]		
		Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Prosječna vrijednost	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosječna vrijednost
Polipropilenska vlakna (PP)	PP 0.25	108,80	101,10	102,20	104,03	5,39	4,45	4,92
	PP 0.5	97,60	100,60	100,70	99,63	5,12	4,55	4,83
	PP 0.65	83,50	84,70	85,70	84,63	4,47	3,25	3,86
	PP 0.75	77,80	75,10	78,60	77,16	4,22	4,48	4,35
	PP 1	52,90	64,60	68,80	62,10	4,43	3,64	4,03
Čelična vlakna (ST)	ST 0.5	97	95	89,50	93,83	7,19	6,10	6,64
	ST 1	98,5	83,8	103	95,10	6,85	6,92	6,88
	ST 1.3	77,60	83,70	88,40	83,23	7,88	8,15	8,01
	ST 1.5	88,10	93,60	74,80	85,50	7,40	7,40	7,40
	ST 2	92,80	100,70	94,20	95,90	8,30	9,19	8,74
CUN - bez vlakana		92,20	85,40	85	87,53	2,53	2,67	2,60

### 3. Rezultati i diskusija

#### 3.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

Ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće provedeno je na betonskim uzorcima kockastog i valjkastog oblika. Izmjerene čvrstoće su prikazane u tablici 5.

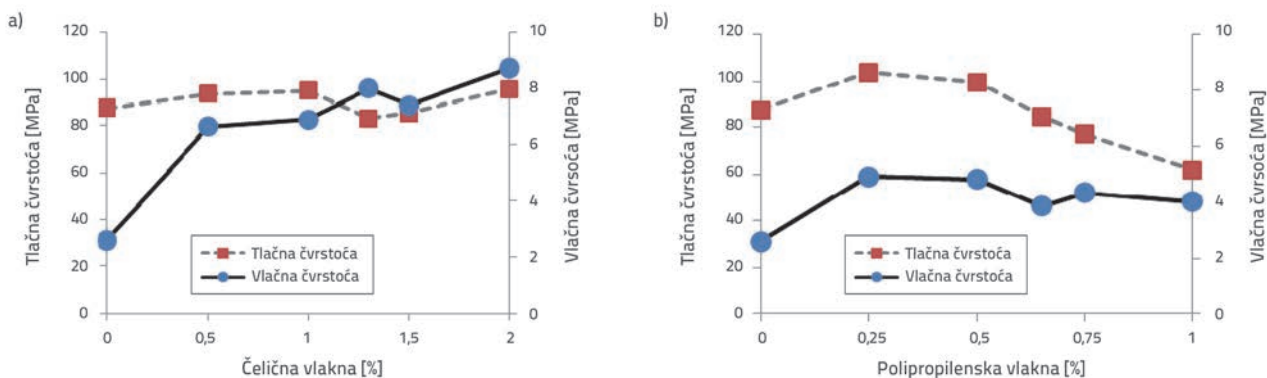
Prema rezultatima iz tablice 5. i slike 6., dodavanjem različitih vrsta vlakana u betonsku mješavinu, ostvaruju se različiti rezultati. Primjerice, upotrebom čeličnih vlakana za armiranje običnog betona s 2 % (158 kg/m<sup>3</sup>) vlakana, dobiva se maksimalna tlačna i vlačna čvrstoća, dok se u slučaju polipropilenskih vlakana najveća tlačna i vlačna čvrstoća ostvaruje s 0,25 % (2,3 kg/m<sup>3</sup>) polipropilenskih vlakana.

Udio od 2 % (158 kg/m<sup>3</sup>) vlakana može biti prevelik, a uzimajući u obzir ulogu vlakana koja povećavaju vlačna svojstva običnog betona, može se zaključiti da je ojačanje običnog betona s udjelom čeličnih vlakana 1,3 % (102,7 kg/m<sup>3</sup>) optimalan izbor. Prema rezultatima prikazanim na slici 6.a, primjenom 2 % (158 kg/m<sup>3</sup>) vlakana, tlačna čvrstoća je povećana 9,56 %, a vlačna

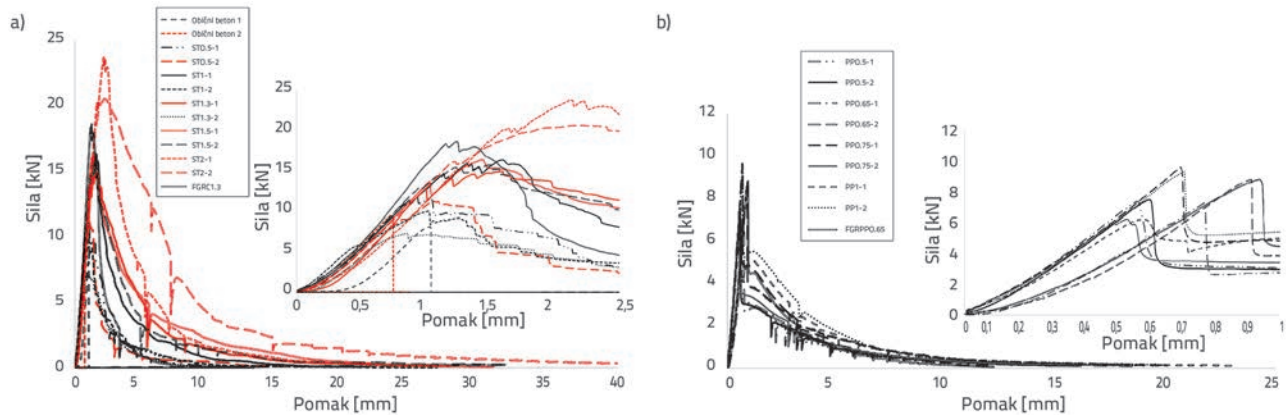
čvrstoća je 3,36 puta veća nego u običnom betonu. Štoviše, dodavanjem 0,25 % (2,3 kg/m<sup>3</sup>) polipropilenskih vlakana u betonu dobiva se maksimalna vrijednost vlačne čvrstoće, koja je 1,86 puta veća nego u običnom betonu. Primjena dviju vrsta vlakana je učinkovitija u povećanju vlačne čvrstoće, ali ne i kod tlačne čvrstoće.

#### 3.2. Ispitivanje ponašanja pri savijanju uz pomoć ispitivanja s jednom koncentriranom silom u sredini raspona

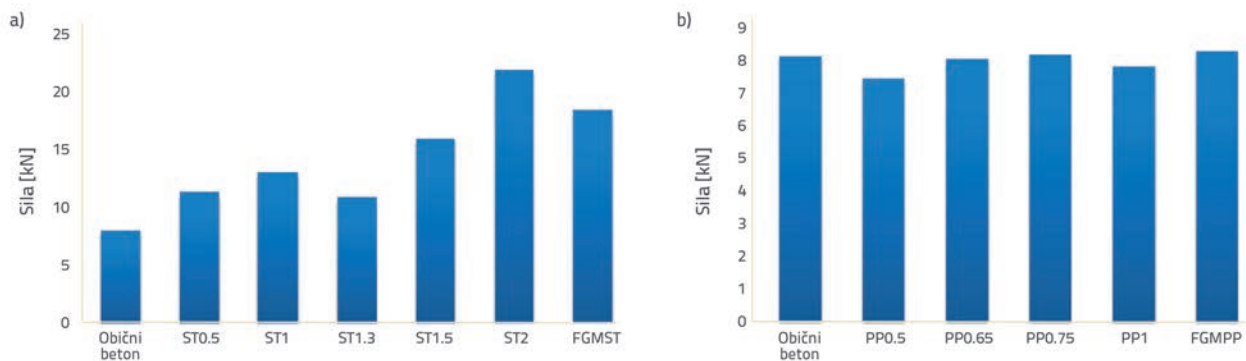
Kompozitne grede bile su izložene djelovanju koncentrirane sile u sredini raspona, a dijagrami sila-pomak i naprezanje-pomak prikazani su na slici 7. Prema dobivenim rezultatima, primjena čeličnih vlakana poboljšava nosivost i svojstva grede nakon pucanja mikroarmiranog betona, dok slojevito armirane grede i grede s potpunim kompozitnim djelovanjem, sa 0,65 % (5,98 kg/m<sup>3</sup>) vlakana te 0,75 % (6,9 kg/m<sup>3</sup>) vlakana mogu povećati maksimalnu nosivost u odnosu na obični beton. To se događa zbog jake veze između vlakana i prostorne matrice. Prema rezultatima može se zaključiti da postoji jaka veza između



Slika 6. Djelovanje vlakana na tlačnu i vlačnu čvrstoću: a) čelična vlakna, b) polipropilenska vlakna



Slika 7. a) dijagram sila-pomak greda s čeličnim vlaknima, b) dijagram sila-pomak greda s polipropilenskim vlaknima; c) ponašanje greda s čeličnim vlaknima uslijed savijanja; d) ponašanje greda s polipropilenskim vlaknima uslijed savijanja



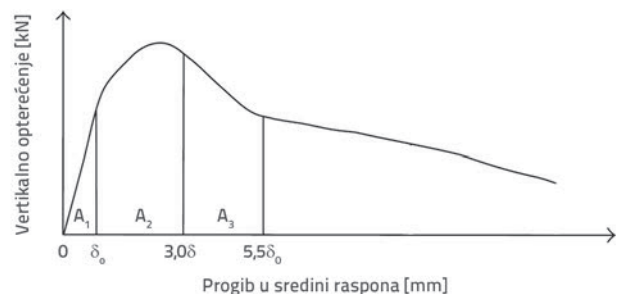
Slika 8. Maksimalna vrijednost opterećenja u mikroarmiranoj gredi s dodatkom: vlakana: a) čeličnih (0,5 do 2%); b) polipropilenskih (0,5 do 1 %); (FGMST - slojevito mikroarmiranje s čeličnim vlaknima, FGMP - slojevito mikroarmiranje s polipropilenskim vlaknima)

vlakana i prostorne matrice, iako se čini da je upravo ta veza dovela do pucanja vlakana i da nema poboljšanja svojstava nakon sloma.

Treba napomenuti da je zbog svojstava čeličnih vlakana, poput duljine, većeg Youngova modula i vlačne čvrstoće, veza vlakana i matrice čvrsta, pa neće doći do sloma vlakana. Dakle, beton ojačan čeličnim vlaknima ima bolja post-pukotinska svojstva za razliku od betona ojačanog polipropilenskim vlaknima. Čelična vlakna omogućuju i veću nosivost elementa, ali to ne vrijedi i za polipropilenska vlakna. Dosadašnja istraživanja pokazala su da kompozitno mikroarmiranje betona značajnije utječe na povećanje sposobnosti preuzimanja opterećenja negoli mikroarmiranje betona u dva sloja s različitim vlaknima. Najbolje ponašanje prilikom savijanja dobiveno je kompozitnim armiranjem cijelog presjeka s 2 % (158 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana. Upotrebom slojevitog mikroarmiranja moguće je postići jednaka mehanička svojstva kao s potpuno jednolikim armiranjem većom količinom vlakana. Ponašanje slojevito mikroarmiranih greda prije svega ovisi o vrsti i količini vlakana te o položaju mikroarmiranih slojeva.

Kao što se vidi na slici 8, slojevito armirane grede s dodatkom 1,3 % (102,7 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana imaju 1,67 puta veću nosivost

u odnosu na grede s potpuno armiranim poprečnim presjekom s istom količinom čeličnih vlakana. Armiranobetonske grede s 0,65 % (5,98 kg/m<sup>3</sup>) polipropilenskih vlakana imaju 2,85 % veću nosivost od greda s potpuno armiranim presjekom. Savojna žilavost greda izračunata je u skladu s normom ASTM C1018 [17].



Slika 9. Dijagram savojne žilavosti prema ASTM [17]

Kod pojave prve pukotine, progib uzorka na sredini grede definira se kao  $\delta_0$ . Indeksi savojne žilavosti  $I_5$  i  $I_{10}$  mogu se izračunati kako slijedi:

$$I_5 = \frac{(A_1 + A_2)}{A_1} \quad (1)$$

Tablica 6. Savojna žilavost greda

Uzorak	Savojna žilavost i indeksi prema ASTM C1018 [17]				
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>
ST 0.5-1	2,42	5,51	1,88	3,27	4,05
ST 0.5-2	2,4	4,23	1,27	2,76	3,29
ST 1-1	3,28	10,58	3,77	4,22	5,37
ST 1-2	2,73	4,53	1,94	2,66	3,37
ST 1.3-1	2,11	10,98	7,4	6,20	9,71
ST 1.3-2	0,6	3,48	2,25	6,80	10,55
ST 1.5-1	2,64	10,95	6,03	5,14	7,43
ST 1.5-2	4	11,65	4,74	3,91	5,09
ST 2-1	6,71	21,58	6,89	4,21	5,24
ST 2-2	3,96	21,07	18,44	6,32	10,97
FGRC 1.3	4,08	8,19	1,39	3,00	3,34
PP 0.25-1	0,74	0,77	0,6	2,04	2,85
PP 0.25-2	1,02	0,95	0,75	1,93	2,66
PP 0.5-1	0,80	1,55	1,41	2,93	4,70
PP 0.5-2	0,81	1,53	1,3	2,88	4,49
PP 0.65-1	1,01	1,82	1,41	2,80	4,19
PP 0.65-2	1,40	2,70	1,86	2,92	4,25
PP 0.75-1	1,34	2,62	1,9	2,95	4,37
PP 0.75-2	0,72	1,55	1,49	3,15	5,22
PP 1-1	0,65	2,3	2,19	4,53	7,90
PP 1-2	1,34	3,25	2,6	3,42	5,36
FGPP 0.65	1,68	2,94	1,47	2,75	3,62

ST - čelična vlakna, PP - polipropilenska vlakna, FGRCST - slojevito mikroarmirana greda s čeličnim vlaknima, FGRCPP - slojevito mikroarmirana greda s polipropilenskim vlaknima

$$I_{10} = \frac{(A_1 + A_2 + A_3)}{A_1} \quad (2)$$

Više vrijednosti I<sub>5</sub> i I<sub>10</sub> pokazuju da je savojna žilavost betona puno povoljnija. Savojna žilavost greda izračunata je i prikazana u tablici 6. Općenito uzevši, armatura betona s vlaknima dovodi do povećanja savojne žilavosti.

### 3.3. Ispitivanje na cikličko opterećenje

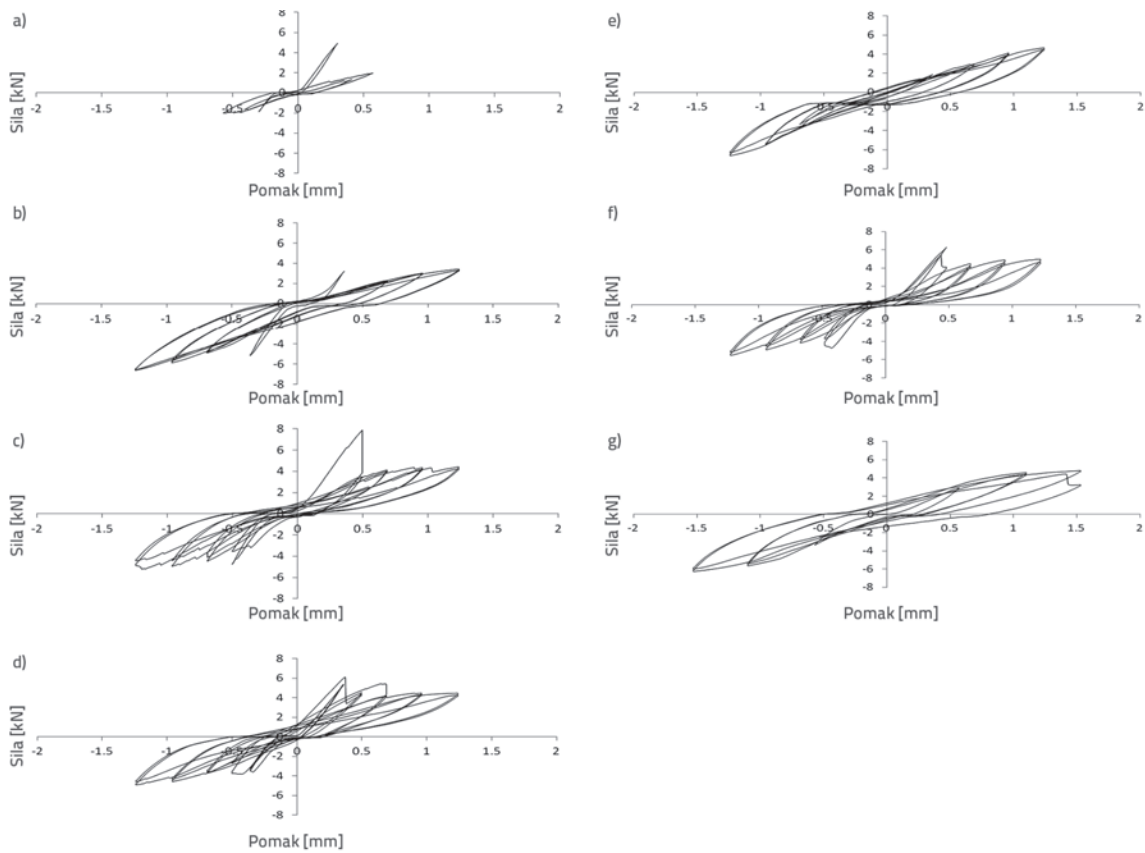
Trinaest greda ispitano je na djelovanje cikličkog opterećenja. Izmjereni pomaci su prikazani na slikama 10. i 11. Prema dobivenim rezultatima, na ponašanje ispitanih greda značajno utječe vrsta vlakana, količina vlakana te vrsta ojačanja (grede s potpunim kompozitnim djelovanjem ili slojevito armirane grede). Štoviše, zapaženo je da je netom prije pojave pukotina u gredama njihovo ponašanje uslijed djelovanja cikličkog opterećenja slično. Radi boljega prikaza ponašanja greda uslijed cikličkog opterećenja, na slikama 12.a i 12.b prikazane su gornje vrijednosti krivulje histereze za betonske grede ojačane čeličnim, odnosno polipropilenskim vlaknima.

Prema dobivenim rezultatima koji su prikazani na slici 12., čelična vlakna u betonu apsorbiraju više energije uslijed djelovanja cikličkog

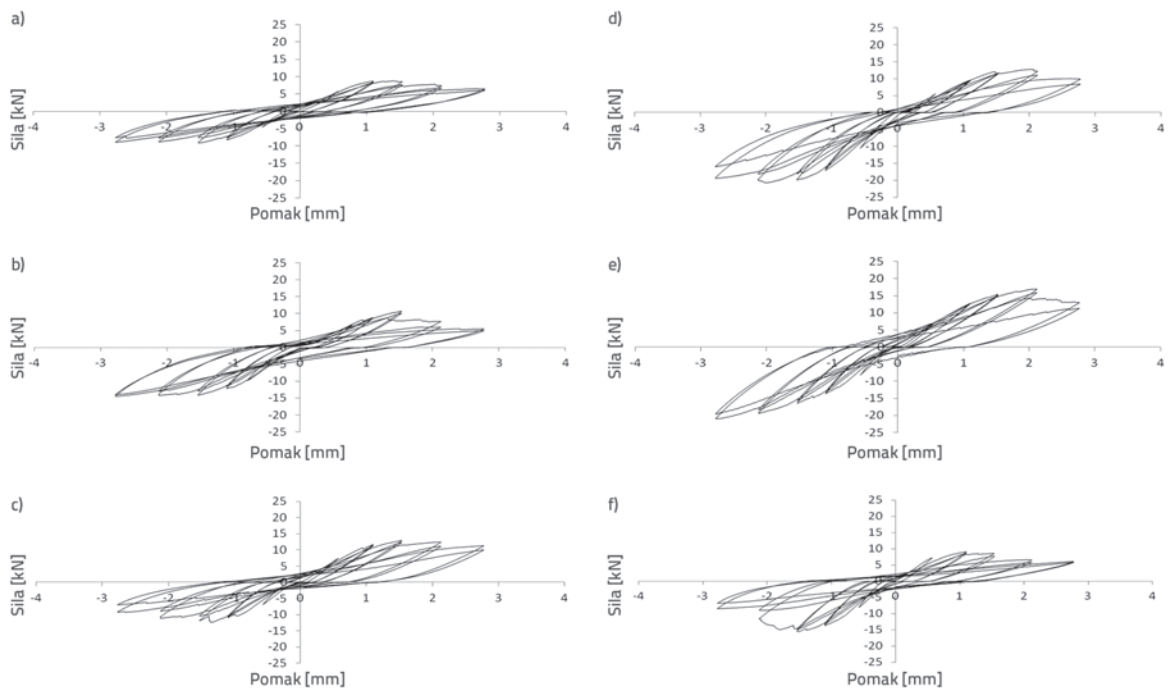
opterećenja negoli polipropilenska vlakna. Razlog tome su veze između vlakana i prostorne matrice. Dakle, mikroarmirani beton s čeličnim vlaknima apsorbira više energije od betona ojačanog polipropilenskim vlaknima. Treba napomenuti da povećanje volumnog udjela čeličnih vlakana neće nužno povećati apsorpciju energije. Primjerice, greda ojačana s 2% (158 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana apsorbira manje energije nego betonska greda s 1,5% (118,5 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana. Rezultati su pokazali da mikroarmirane grede s najboljima posmičnim svojstvima uslijed djelovanja jednolikog opterećenja nemaju nužno najbolja svojstva dok su izložene cikličkom opterećenju. S druge strane, najbolja posmična svojstva su ostvarena u gredi s potpunim kompozitnim djelovanjem, kad je dodano 2% (158 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana, a najbolja otpornost na cikličko opterećenje ostvarena je u gredi s dodatkom 1,5% (118,5 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana. To se također odnosi i na grede ojačane polipropilenskim vlaknima, gdje povećanje količine PP vlakana ne utječe samo na otpornost grede na cikličko ponašanje, nego ponekad uzrokuje slabija svojstva grede.

Prema dobivenim rezultatima, svojstva slojevito armirane grede izložene cikličkom opterećenju s 1,3% (102,7 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana su bolja od svojstava grede s potpunim kompozitnim djelovanjem kad je dodano 1,3% (102,7 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana.

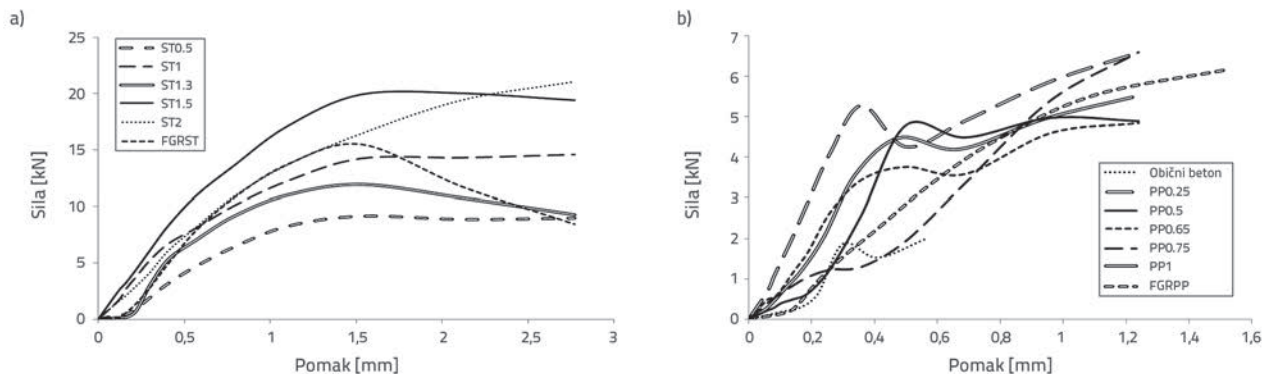




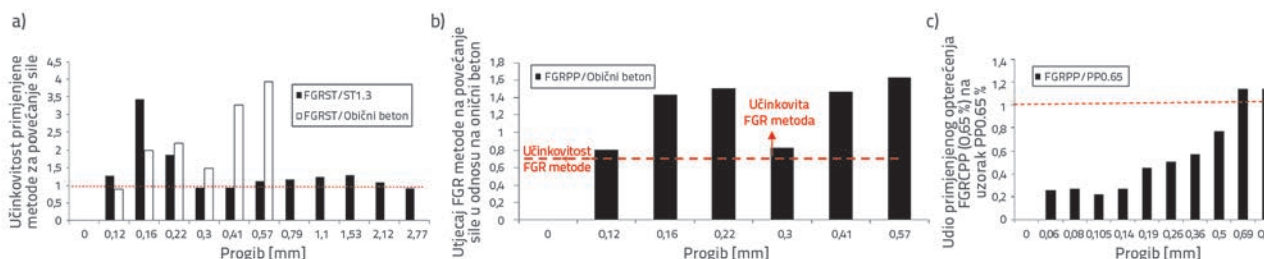
Slika 10. Vrijednosti pomaka grede na krivulji histerenze uslijed djelovanja cikličkog opterećenja: a) obični beton; b) PP 0.25; c) PP 0.5; d) PP 0.65; e) PP 0.75; f) PP 1; g) FGRCPP; (PP - polipropilenska vlakna, FGRCPP - slojevito mikroarmiranje s polipropilenskim vlaknima)



Slika 11. Vrijednosti pomaka grede na krivulji histerenze uslijed djelovanja cikličkog opterećenja: a) ST 0.5; b) ST 1; c) ST 1.3; d) ST 1.5; e) ST 2; f) FGRCST; (ST - čelična vlakna, FGRCST - slojevito mikroarmiranje s čeličnim vlaknima)



Slika 12. Dijagram sila-pomak mikroarmiranih greda s vlaknima: a) čeličnim (ST), b) polipropilenskim (PP)



Slika 13. Utjecaj slojevitog mikroarmiranja betonskih greda (FGR) s čeličnim (ST) i polipropilenskim (PP) vlaknima na nosivost u odnosu na: a) obični beton i greda s potpunim kompozitnim djelovanjem - s dodatkom čeličnih vlakana, b) obični beton, c) greda s potpunim kompozitnim djelovanjem - s dodatkom polipropilenskih vlakana

S druge strane, vlakna su povećala nosivost slojevito armirane grede s istom količinom čeličnih vlakana kao kod greda s potpunim kompozitnim djelovanjem.

Primjena metode slojevitog ojačavanja običnog betona polipropilenskim vlaknima može povećati nosivost grede uslijed cikličkog opterećenja, ali to ne vrijedi za greda s potpunim kompozitnim djelovanjem, čije su vrijednosti pomaka veće od 0,69 mm. Vrijednost maksimalne i minimalne sile koje utječu na pojavu pukotina u mikroarmiranom betonu s čeličnim vlaknima su 17,1 kN i 5,3 kN (za uzorke ST1.5 i ST1.3). Zanimljivo je da 0,2 % odstupanja u volumnom udjelu vlakana može biti razlog da minimalna sila utječe na pojavu prve pukotine, odnosno da se prve pukotine pojavljuju zbog djelovanja maksimalne sile. Maksimalna i minimalna sila koje uzrokuju pojavu pukotina u gredama ojačanim polipropilenskim vlaknima iznose 5,28 kN i 1,22 kN (u uzorcima PPO.25 i PPO.75). Slojevito armirane betonske grede čeličnim vlaknima imaju 47,7 % bolja svojstva nego grede s potpunim kompozitnim djelovanjem. Slojevitim armiranjem betonske grede s dodatkom polipropilenskih vlakana (FGRPP) smanjila se vrijednost sile koja uzrokuje pojavu pukotina u gredi za 4,7 %.

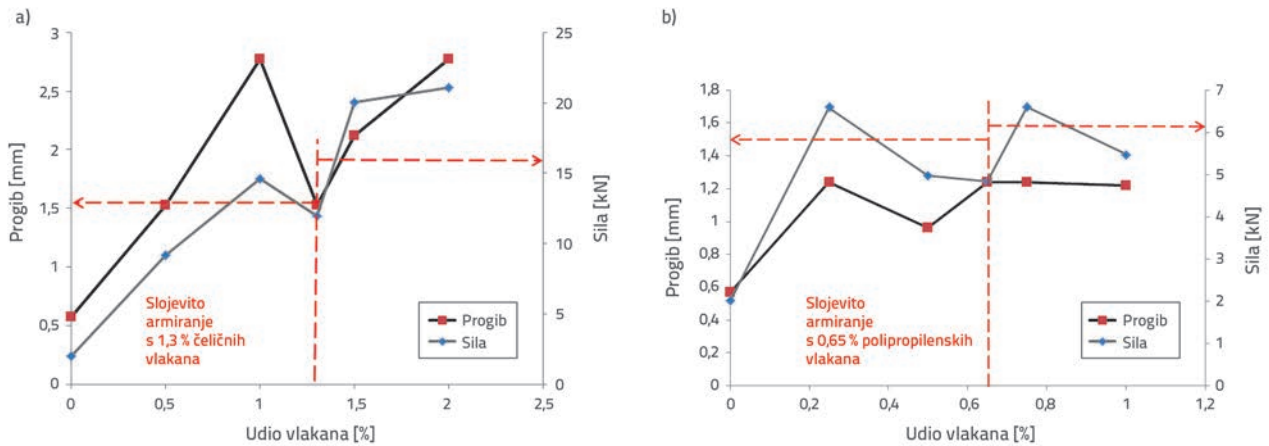
Da bi se bolje razumjelo djelovanje vlakana primjenom metode slojevitog mikroarmiranja na nosivost grede izložene cikličkom opterećenju, uzorci FGRC, ST1.3 i PPO.65 izloženi su opterećenju, a rezultati su prikazani na slici 13.

Prema rezultatima na slici 13.a, metoda za slojevito armiranje grede čeličnim vlaknima značajno povećava nosivost grede u odnosu na greda s potpunim kompozitnim djelovanjem (za 0,22

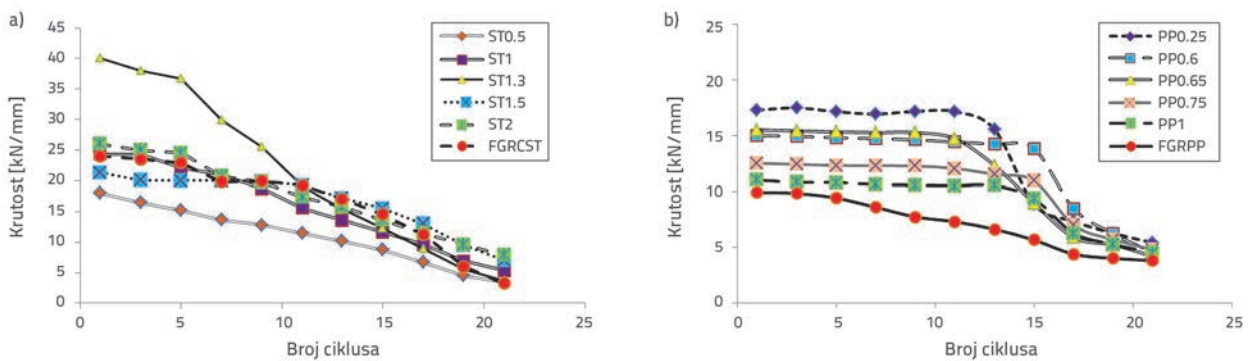
mm). Ipak, daljnjim povećanjem pomaka, taj prirast je manji. Osim toga, slojeviti mikroarmirani beton ima veću nosivost od običnog betona kod pomaka čije su vrijednosti između 0,16 mm i 0,57 mm, ali kod većih pomaka, greda od običnog betona se lomi. Na slici 13. promjenjivo ponašanje greda mjerilo se postavljanjem opterećenja na slojevito mikroarmiranu greda s polipropilenskim vlaknima i greda od običnog betona, ali nije bilo jasnijih i preciznih rezultata. Na slici 13.c, povećanjem pomaka, bolja svojstva pokazuje slojevito mikroarmirana greda negoli greda s potpunim kompozitnim djelovanjem, a najveća razlika se očituje kod pomaka od 1,24 mm.

Najveće izmjereno opterećenje i pomak grede izložene cikličkom opterećenju prikazani su na slici 14. Prema slici 14.a slojevito mikroarmirana betonska greda ojačana sa 1,3 % (102,7 kg/m<sup>3</sup>) čeličnih vlakana ima 29,77 % veću nosivost od grede s potpunim kompozitnim djelovanjem. Primjenom polipropilenskih vlakana u slojevitom mikroarmiranju, povećava se vrijednost maksimalnog opterećenja i pomaka u usporedbi s gredom s potpunim kompozitnim djelovanjem, kad je dodano 0,65 % (5,98 kg/m<sup>3</sup>) polipropilenskih vlakana. Maksimalno opterećenje povećano je 27,49 %, a pomak 23,38 %.

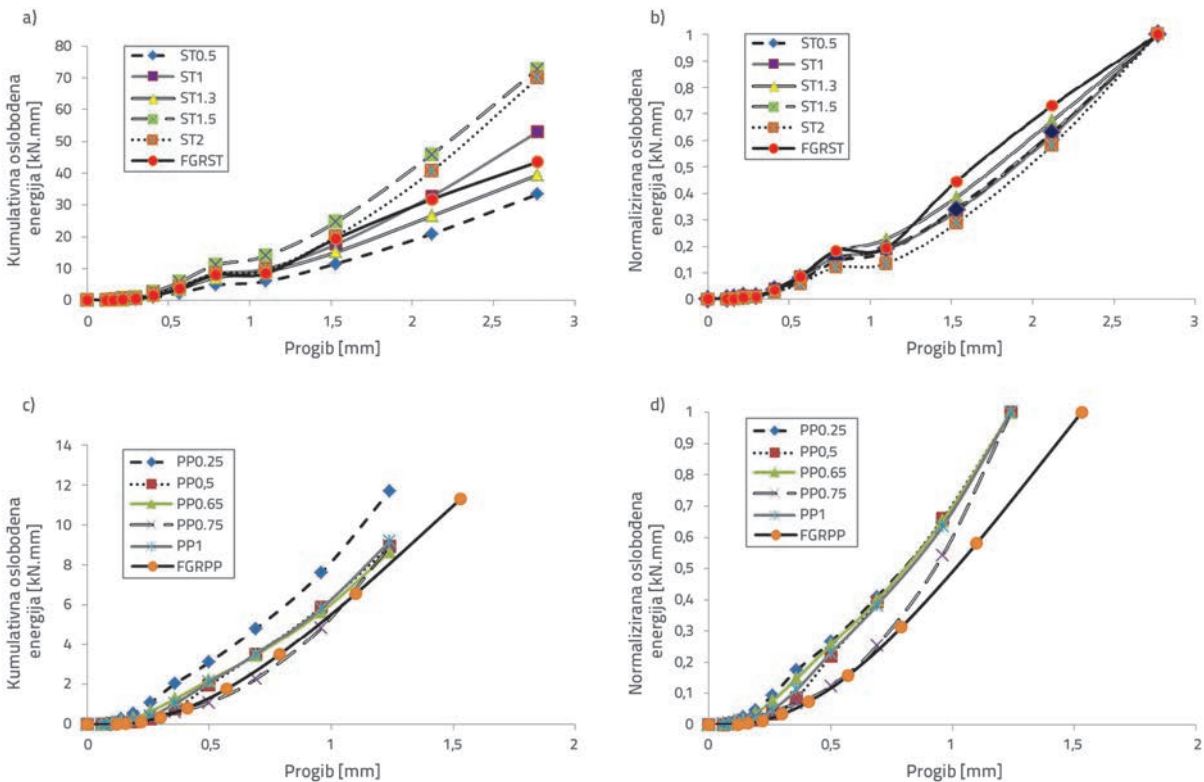
Smanjenje krutosti na slici 15. procijenjeno je pomoću sekante krutosti, koja prikazuje mjeru za smanjenje krutosti u uzorcima. Slika 15. prikazuje smanjenje krutosti za ojačane grede. Može se zaključiti kako greda ST1.5 ima najnižu početnu krutost od svih greda koje su ojačane čeličnim vlaknima. Također, vidljivo je naglo smanjenje vrijednosti sekante krutosti dok su krutosti ostalih uzoraka slične. Čelična vlakna značajno utječu na početnu



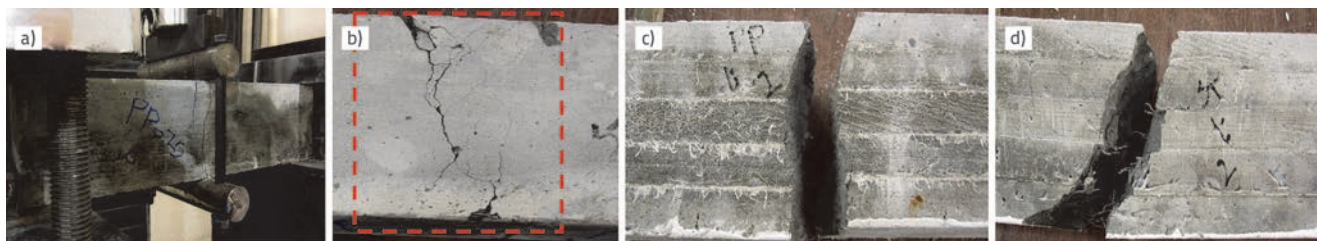
Slika 14. Maksimalno izmjereno opterećenje i progib mikroarmirane grede s dodatkom: a) čeličnih vlakana, b) polipropilenskih vlakana



Slika 15. Varijacije krutosti grede ojačanih: a) čeličnim vlaknima; b) polipropilenskim vlaknima



Slika 16. a) Kapacitet disipacije energije grede ojačanih polipropilenskim vlaknima; b) Kapacitet normalizirane disipacije energije za gredu ojačanu čeličnim vlaknima; c) Kapacitet disipacije energije za gredu ojačanu polipropilenskim vlaknima; d) Kapacitet normalizirane disipacije energije grede ojačanih čeličnim vlaknima



Slika 17. a) Oštećena grede PP0.25, izložena cikličkom opterećenju; b) Višestruke pukotine u betonu ojačanom čeličnim vlaknima; c) Greda FGRPP nakon sloma; d) Greda FGRST nakon sloma (FGRPP - slojevito mikroarmiranje s polipropilenskim vlaknima, FGRST - slojevito mikroarmiranje s čeličnim vlaknima)

krutost ojačanih greda i omogućuju stabilno smanjenje krutosti do točke sloma. Ovaj doprinos je možda povezan s vezom među čeličnim vlaknima i prostornom matricom. Štoviše, to može utjecati na kontrolu mikropukotina i većih pukotina. Primjenom polipropilenskih vlakana u matrici, naglo opada vrijednost krutosti u uzorku. To se događa zbog čvrste veze između polipropilenskih vlakana u matrici pa dolazi do pucanja polipropilenskih vlakana te se naglo smanjuje krutost grede.

Primjenom metode slojevitog mikroarmiranja čeličnim vlaknima, vrijednosti krutosti se smanjuju, ali se to ne odnosi na gredu s potpunim kompozitnim djelovanjem. Krutost je smanjena u uzorku FGRCST (slojevito mikroarmiranje s čeličnim vlaknima) u usporedbi s uzorkom ST1.3 uslijed cikličkog opterećenja. Nadalje, metodom slojevitog armiranja polipropilenskim vlaknima postignuta je najniža vrijednost krutosti, ali vrijednost krutosti je lagano smanjena s niskim gradijentom. Kumulativna disipacija energije uzorka tijekom svakog ciklusa prikazana je na slici 16. Kapacitet disipacije energije može biti važan pokazatelj seizmičkih svojstava konstrukcije. Konstrukcije mogu podnijeti jaka podrhtavanja tla kada konstrukcijski elementi imaju zadovoljavajuću sposobnost disipacije seizmičke energije. Uzrok velike disipacije energije su neelastične deformacije u kritičnim presjecima konstrukcije, zbog čega dijelovi konstrukcijskih elemenata i spojevi trebaju imati dobru žilavost, [18]. Kapacitet disipacije energije se može procijeniti na području krivulje progiba za svaki ciklus. Kumulativna oslobođena energija u uzorcima je izračunana kao zbroj energije koja se oslobađa zbog uzastopnih pomaka grede tijekom ispitivanja, a prikazana je na slici 16. Najveći kapacitet apsorbaranja energije imala je betonska greda ojačana čeličnim vlaknima ST1.5. Međutim, greda ST1 s 1 % ( $79 \text{ kg/m}^3$ ) čeličnih vlakana može postići veću nosivost nego greda FGRST sa ST1.3 s većim volumnim udjelom vlakana. Da bi se postigla bolja interpretacija apsorbarane energije u svakom ciklusu, normalizirana oslobođena energija svakog ciklusa je prikazana na slici 16. Prema rezultatima koji su dobiveni za svaki ciklus, primjena metode slojevitog mikroarmiranja čeličnim vlaknima omogućila je postizanje najviše normalizirane apsorbarane energije za progib veći od 1,1 mm.

S obzirom na to, zaključeno je da slojevito mikroarmirane grede imaju veliki potencijal, te da ih se može zamijeniti za grede s potpunim kompozitnim djelovanjem od čeličnih vlakana kao konstrukcijski element otporan na seizmičke utjecaje.

Kumulativna disipacija energije greda ojačanih polipropilenskim vlaknima metodom slojevitog armiranja manja je od energije u gredama s potpunim kompozitnim djelovanjem. Nadalje, normalizirana disipacija energije u svakom ciklusu je potvrdila činjenicu da metoda slojevitog mikroarmiranja polipropilenskim vlaknima nije rezultirala poboljšanjem svojstava grede izložene cikličkom opterećenju.

### 3.4. Vrste sloma grede

Različite vrste i količina vlakana te slojevi armiranog betona mogu utjecati na različite oblike loma grede. Tijekom ispitivanja nastali su različiti oblici loma na promatranim uzorcima. Neke vrste loma prikazane su na slici 17. Treba spomenuti da su slojevi grede kod slojevitog mikroarmiranja imali ujednačeno ponašanje, a tijekom ispitivanja nije uočeno klizanje. Ujednačeno ponašanje slojeva do graničnog stanja upućuje na čvrste veze među slojevima, a pukotine uslijed savijanja pojavile su se na ploči, bez ikakvih promjena u srednjem sloju [11, 13]. Treba napomenuti da su zaključci doneseni na temelju vizualnog promatranja.

## 4. Zaključak

Prethodna istraživanja su pokazala veliki potencijal slojevito mikroarmiranih betona ojačanih vlaknima tijekom ispitivanja na djelovanje jednolikog opterećenja. S obzirom na to, ovo je istraživanje provedeno kako bi se ispitala žilavost slojevito armiranih greda izloženih cikličkom opterećenju, a zaključeno je sljedeće:

1. Najbolja svojstva betonskih greda ojačanih čeličnim i polipropilenskim vlaknima postignuta su s volumenskim udjelom od 1,5 % ( $118,5 \text{ kg/m}^3$ ) i 0,25 % ( $2,3 \text{ kg/m}^3$ ) vlakana te u gredi potpunim kompozitnim djelovanjem.
2. Slojevito mikroarmirana greda ojačana s 1,3 % ( $102,7 \text{ kg/m}^3$ ) čeličnih vlakana pokazala je bolja svojstva uslijed djelovanja cikličkog opterećenja negoli greda s potpunim kompozitnim djelovanjem iako je također ojačana s 1,3 % ( $102,7 \text{ kg/m}^3$ ) vlakana. Slojevito armirana greda s dodatkom od 0,65 % ( $5,98 \text{ kg/m}^3$ ) polipropilenskih vlakana nije pokazala poboljšanja uslijed cikličkog opterećenja, štoviše, njena su svojstva bila čak i lošija nego prije dodavanja vlakana.

3. Ovo istraživanje potvrđuje prethodne spoznaje koje se odnose na količinu vlakana, vrstu vlakana te poziciju betonskih slojeva s obzirom na dobivene rezultate ispitivanja mikroarmiranog betona [9-13].
4. Čelična vlakna značajno utječu na krutost mikroarmiranih uzoraka i omogućuju stabilno smanjenje krutosti do točke sloma. Primjenom polipropilenskih vlakana u matrici se smanjuje krutost. Razlog pojave ovog fenomena povezan je

s čvrstim vezama polipropilenskih vlakana i matrice u kojoj vlakna pucaju i uzrokuju smanjenje krutosti.

5. Prema dobivenim rezultatima, metoda slojevitog mikroarmiranja betona povećava disipaciju energije uslijed cikličkog opterećenja, ali se to ne odnosi na gredu s potpunim kompozitnim djelovanjem. Dakle, primjena ove metode s čeličnim vlaknima može povećati stabilnost konstrukcijskih elemenata u seizmičkim uvjetima.

## LITERATURA

- [1] Pye, A.M.: A Review of asbestos substitute materials industrial applications, *Journal of Hazard Material*, Vol. 3, pp. 125-147, 1979., [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894\(79\)80001-1](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894(79)80001-1)
- [2] Bentur, A., Mindess, S.: *Fibre reinforced cementitious composites*, 2nd edn. UK: Taylor and Francis, 2006.
- [3] Coutts, R.S.P.: A review of Australian research into natural fibre cement composites, *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 518-526, 2005., <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.003>
- [4] Bezerra, E.M., Joaquim, A.P., Savastano, Jr H.: Some properties of fibre cement composites with selected fibres, *Habitacoes Infra-Estrutura de Interesse Social*, Brazil, October 29 to November 3, 2004.
- [5] Brandt, A.M.: Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Journal of Composite Structures*, Vol. 86, pp. 3-9, 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>
- [6] Zollo, R.F.: Fibre-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 107-122, 1997., [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)
- [7] Reinhardt, H.W., Naaman, A.E.: *High performance fibre reinforced cement composites*, France: RILEM Publications, 1999.
- [8] Shen, B., Hubler, M., Paulino, H.G., Struble, J.L.: Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties, *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 663-673, 2008., <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.002>
- [9] Ishkakov, I., Ribakov, Y., Holschemacher, K., Mueller, T.: High performance repairing of reinforced concrete structures, *Journal of Materials and Design*, Vol. 44, pp. 216-222, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.041>
- [10] Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y.: Effects of steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete, *Journal of Materials and Design*, Vol. 31, pp. 2604-2615, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>
- [11] Iskhakov, I., Ribakov, Y.: A design method for two-layer beams consisting of normal fibered high strength concrete, *Journal of Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1672-1677, 2007., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.03.017>
- [12] Ghasemi, N.M., Sharbatdar, M.K., Mastali, M.: Repairing reinforced concrete slabs using composite layers, *Journal of Materials and Design*, Vol. 58, pp. 136-144, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.015>
- [13] Ghasemi, N.M., Mastali, M., Sharbatdar, M.K., Ghasemi, N.M.: Flexural performance of functionally graded RC cross section with steel and PP fibers, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 66, pp. 219-233, 2014., <http://dx.doi.org/10.1680/mac.13.00248>
- [14] Holschemacher, K., Iskhakov, I., Ribakov, Y., Mueller, T.: Laboratory Tests of Two-Layer Beams Consisting of Normal and Fibered High Strength Concrete: Ductility and Technological Aspects, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 19, pp. 513-522, 2014., <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2011.556840>
- [15] ASTM C496 / C496M, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [16] FEMA 461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, Quasi-Static Cyclic Testing, 2007
- [17] ASTM C1018: Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. 1998
- [18] Ganesan, N., Indira, P.V., Sabeena, M.V.: Behavior of hybrid fiber reinforced concrete beam-column joints under reverse cyclic loads, *Journal of Materials and Design*, Vol. 54, pp. 686-693, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.076>