

Primljen / Received: 30.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 28.4.2015.

Prihvaćen / Accepted: 31.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2016.

# Utjecaj polimera armiranih staklenim vlaknima na čvrstoću greda od geopolimernoga betona

## Autori:



Prof.dr.sc. **Kumutha Rathinam**, dipl.ing.grad.  
Institut za tehnologiju Sethu  
Odjel za građevinarstvo  
Tamil Nadu, Indija  
[kumuthar@yahoo.co.in](mailto:kumuthar@yahoo.co.in)



Izv.prof.dr.sc. **Basanth B. Koattaiveedu Mohanram**  
Fakultet za informacijsku tehnologiju K.L.N  
Odjel za građevinarstvo  
Tamil Nadu, Indija  
[basanth\\_71@yahoo.com](mailto:basanth_71@yahoo.com)



Prof.dr.sc. **Vijai Kanagarajan**, dipl.ing.grad.  
Institut za tehnologiju Sethu  
Odjel za građevinarstvo  
Tamil Nadu, Indija  
[vijai\\_me@yahoo.co.in](mailto:vijai_me@yahoo.co.in)

Prethodno priopćenje

**Kumutha Rathinam, Basanth Babu Koattaiveedu Mohanram, Vijai Kanagarajan**

## Utjecaj polimera armiranih staklenim vlaknima na čvrstoću greda od geopolimernoga betona

U radu je opisano eksperimentalno ispitivanje učinkovitosti vanjskog omota od polimera armiranog staklenim vlaknima (eng. *Glass Fibre Reinforced Polymer* - GFRP) na ojačanje greda od betona armiranog geopolimerom. Provedena su ispitivanja savijanjem do sloma kako bi se u potpunosti uvid u savojna svojstva greda ojačanih GFRP-om, kao i ostala svojstva, poput odnosa sila-progib, sila-krutost, žilavost i oblici sloma. Rezultati ispitivanja pokazali su da grede ojačane GFRP-om imaju veću nosivost, minimalan progib, povećanu žilavost te bolje apsorbiraju energiju, a sva navedena svojstva ovise o broju slojeva kojima su grede obložene.

### Ključne riječi:

geopolimer, GFRP, ojačanje, savojna svojstva, vanjsko omatanje

Preliminary note

**Kumutha Rathinam, Basanth Babu Koattaiveedu Mohanram, Vijai Kanagarajan**

## Geopolymer concrete beam strengthening with glass fibre reinforced polymer

The experimental evaluation of effectiveness of the externally bonded Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) in the strengthening of the geopolymer reinforced concrete beams is presented in the paper. Bending tests were conducted until failure to enable full understanding of flexural behaviour of the GFRP strengthened beams, and other characteristics such as the load-deflection behaviour, load-stiffness behaviour, ductility, and failure modes. Test results show that GFRP strengthened beams exhibit a higher load bearing capacity, minimum deflection, enhanced ductility, and better energy absorption characteristics, and that all these properties are dependent on the number of wrapping layers used.

### Key words:

geopolymer, GFRP fabrics, strengthening, flexural behaviour, external wrapping

Vorherige Mitteilung

**Kumutha Rathinam, Basanth Babu Koattaiveedu Mohanram, Vijai Kanagarajan**

## Einfluss von glasfaserverstärkten Polymeren auf die Festigkeit von Trägern aus Geopolymerbeton

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit von Ummantelungen mit faserverstärkten Polymeren bei der Verstärkung von Trägern aus mit Geopolymer armiertem Beton beschrieben. Biegeversuche bis zum Bruch wurden durchgeführt, um die Biegeeigenschaften, das Verhältnis Kraft-Durchbiegung, Kraft-Steifigkeit, sowie Robustheit und Versagensformen bei mit GFRP verstärkten Trägern vollkommen zu erfassen. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die verstärkten Träger eine größere Tragfähigkeit, eine minimale Durchbiegung und eine erhöhte Robustheit vorweisen, sowie mehr Energie absorbieren. Alle aufgeführten Eigenschaften hängen von der Anzahl der Ummantelungsschichten ab.

### Schlüsselwörter:

Geopolymer, GFRP, Verstärkung, Biegeeigenschaften, Ummantelung

## 1. Uvod

Brzo propadanje konstrukcija jedan je od glavnih izazova s kojim se susreću projektanti diljem svijeta. Zahtjevi za povećanjem nosivosti mnogih postojećih zgrada koje su izgrađene za posebnu namjenu doveli su do rekonstrukcija ili nadogradnje. S obzirom na to, postojeće konstrukcije treba ponovno ispitati te se pretpostavlja da će biti potrebno zadovoljiti strože zahtjeve armiranja. Sa socioekonomskog stajališta, obnova oštećenih betonskih konstrukcija je skup proces koji zahtijeva visoke troškove [1]. Mijenjanje društvenih potreba, stroži zahtjevi za projektiranje, viši zahtjevi sigurnosti te propadanje postojeće armiranobetonske infrastrukture pridonose stalnom rastu u zahtjevima za armiranje [2]. Drugi razlozi propadanja armiranobetonskih elemenata odnose se na koroziju armature, ljuštenje betona, itd., a nastaju zbog dotrajlosti i izloženosti različitim utjecajima iz okoliša. Iako je do danas razvijeno mnogo materijala i metoda za obnovu i rekonstrukciju takvih elemenata, vrlo je važno da je postupak obnove prilagođen namjeni i zahtjevima konstrukcije. Najčešće primjenjivane konvencionalne tehnike za ojačanje betonskih konstrukcija jesu prednapinjanje, prskanje betonom, lijepljenje ploča itd., ali su dugotrajne i zahtijevaju intenzivan rad i kvalificiranu radnu snagu.

Kompozitni materijali već su dulje u upotrebi, ali njihova primjena u građevinarstvu, uz uporabu naprednih tehnologija, još je u razvoju. Globalna građevinska industrija nastoji prihvatiti jedinstvenu terminologiju za kompozitne materijale za ojačanje u obliku polimerske matrice. Upotreba vanjskih obložnih plahti od vlaknima armiranog polimera (eng. *Fiber-reinforced polymer - FRP*) učinkovit je alat za ojačanje i obnovu armiranobetonskih konstrukcija. Mnoga eksperimentalna ispitivanja dokazala su da ojačanje betona vlaknima armiranim polimerom povećava njegovu čvrstoću na savijanje.

S druge strane, proces proizvodnje cementa zahtijeva veliku količinu energije i uzrokuje emisiju štetnih plinova, poput ugljičnog dioksida,  $\text{CO}_2$ . Svjetska cementna industrija proizvede oko 2,8 milijardi kubika štetnih plinova na godišnjoj razini [3-4]. Budući da je konvencionalni armirani beton manje trajan u određenim okolišnim uvjetima, geopolimerna tehnologija o kojoj je pisao Davidovits [17], primjenjuje se kao vezivno sredstvo u običnom portland cementu (eng. *Ordinary Portland Cement - OPC*). Alkalna aktivacija letećeg pepela polimerizacijom u prisutnosti otopine natrijevog hidroksida i natrijevog silikata, rezultira geopolimernim betonom. Svojstva geopolimernih materijala izloženih kiselim otopinama bolja su od svojstava običnog portland cementa [5]. Slično kao i kod konvencionalnog armiranog betona, geopolimerni beton prikladan je za primjenu na konstrukcijama, a smjernice za projektiranje u sadašnjim propisima i normama mogu se primijeniti za pripremu elemenata geopolimerom ojačanog betona s dodatkom letećeg pepela [6]. Očigledno je da se metode ojačanja koje se koriste za konvencionalni beton mogu primijeniti i za geopolimerni beton. Ovaj rad prikazuje rezultate eksperimentalnog ispitivanja geopolimernih betonskih greda armiranih staklenim vlaknima.

## 2. Eksperimentalno ispitivanje

### 2.1. Primijenjeni materijali

#### 2.1.1. Leteći pepeo

Leteći pepeo s niskim udjelom kalcija (ASTM razred F) prikupljen je iz indijske termoelektrane Mettur (Tamil Nadu, Indija) te je upotrijebljen kao temeljni materijal za pripremu geopolimernog betona. Specifična težina letećeg pepela je 2,46. Kemijski sastav letećeg pepela prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Kemijska svojstva letećeg pepela

Svojstva		Rezultati ispitivanja [mas. %]
1.	Gubitak žarenjem	0,72
2.	Silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ )	60,24
3.	Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) + željezni oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	35,34
4.	Željezni oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	7,84
5.	Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	27,50
6.	Kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ )	0,59
7.	Magnezijev oksid ( $\text{MgO}$ )	0,85
8.	Ukupno sumpor, kao sumporov trioksid ( $\text{SO}_3$ )	0,03
9.	Natrijev oksid ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,00
10.	Kalijev oksid ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0,02
11.	Sumpor (S)	0,00
12.	Netopivi ostatak	90,61

#### 2.1.2. Agregati

U ovom istraživanju upotrijebljeni su sitni i krupni agregati koji se koriste u industriji betona. Sitni agregat prosijava se kroz sito otvora 4,75 mm kako bi se uklonile sve strane tvari. Specifična težina i modul finoće sitnog agregata iznose 2,66, odnosno 2,69. Maksimalna veličina zrna upotrijebljenog agregata je 12 mm, specifična težina je 2,96, a modul finoće iznosi 5,30.

#### 2.1.3. Alkalne otopine

Otopina natrijeva hidroksida pomiješana je s otopinom natrijevog silikata, a upotrijebljena je kao alkalni aktivator za geopolimerizaciju. U ovom istraživanju upotrijebljen je natrijev hidroksid, na tržištu dostupan u obliku ljuski. Natrijev silikat dostupan je kao tekućina pa je upotrijebljen u tom obliku.

#### 2.1.4. Granulirana troska

Granulirana troska (eng. *Ground granulated blastfurnace slag - GGBS*) otpadni je materijal koji se dobije nakon obrade željeza. Troska upotrijebljena u ovom istraživanju dobivena je iz tvornice

M/s QualityPolytech, Mangalore u Indiji. Njezina specifična težina je 3,11. Kemijska svojstva granulirane troske prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Kemijska svojstva granulirane troske

Svojstva		Rezultati ispitivanja [mas. %]
1.	Gubitak žarenjem	0,62
2.	Netopivi ostatak	0,32
3.	Količina magnezija	8,15
4.	Sulfidni sumpor	0,59
5.	Količina sulfita	0,41
6.	CaO	34,86
7.	SiO <sub>2</sub>	32,78
8.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,40
9.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,10
10.	Mangan	0,08
11.	Kemijski spojevi	
	CaO+MgO+SiO <sub>2</sub>	75,79
	CaO+MgO/SiO <sub>2</sub>	1,31
	CaO/SiO <sub>2</sub>	1,06

### 2.1.5. Voda i superplastifikator

U istraživanju je upotrijebljena destilirana voda. Superplastifikator Conplast SP 430 ne sadrži klor, superplastificira mješavinu, pripremljen je na bazi sulfoniranih naftalen-formaldehidnih polimera, proizveden je u Fosroc Chemicals Pvt Ltd. u Indiji, a u ovom istraživanju primijenjen je kako bi se poboljšala obradljivost betona. Dostupan je u obliku smeđe otopine koja se odmah rasprši u vodi.

### 2.1.6. Polimeri armirani staklenim vlaknima

U ispitivanju su korištena jednosmjerna vlakna E-stakla *Woven Rovings*, u skladu s normom IS 11273 (14), komercijalnog naziva *Binani*, proizvođača *Goa Glass Fibre Limited* u Indiji. Debljina vlakana je 0,6 mm, a gustoća je 610 gm/m<sup>2</sup>. Vlakna E-stakla mogu se oblikovati u bilo koji željeni oblik. Poliesterska smola za opću primjenu upotrijebljena je kao prijanjajuće sredstvo kako bi se osiguralo dovoljno prijanjanje između GFRP (*eng. Glass Fibre Reinforced Polymer - GFRP*) plahti i greda od geopolimernog betona. Taj trodjeljni sustav sadrži smolu, akcelerator i katalizator. Prema uputama proizvođača, sadržaj akceleratora i katalizatora iznosi 1,5 % ukupne težine smole.

Tablica 3. Sastav mješavine geopolimernog betona

Oznaka mješavine	Leteći pepeo [kg/m <sup>3</sup> ]	Granulirana troska [kg/m <sup>3</sup> ]	NaOH [kg/m <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Sitni agregat [kg/m <sup>3</sup> ]	Krupni agregat [kg/m <sup>3</sup> ]	Voda [kg/m <sup>3</sup> ]	Superplastifikator [kg/m <sup>3</sup> ]
F90G10	394,30	39,43	45,10	112,60	554,40	1293,40	39,43	11,83

## 2.2 Određivanje omjera mješavine geopolimernog betona

U pripremi običnog portland cementa omjer je krupnog i sitnog agregata 75 - 80 % težine, a u projektiranom betonu odabran je prosječni omjer od 77 %. Udio sitnog agregata iznosi 30 % ukupne količine agregata [7], što je utvrđeno na temelju literature u kojoj se navodi da je prosječna gustoća geopolimernog betona s letećim pepelom istovjetna gustoći betona s običnim portland cementom (2400 kg/m<sup>3</sup>). Kombinirana mješavina alkalne tekućine i letećeg pepela može se odrediti kada je poznata gustoća betona. Omjer alkalne tekućine i letećeg pepela je 0,4. Na temelju te pretpostavke utvrđena je masa alkalne tekućine. Omjer otopine natrijevog silikata i natrijevog hidroksida iznosi 2,5, na osnovi kojega su određene mase tih dviju otopina. Da bi se dobio beton dobre obradljivosti, mješavini betona dodana je dodatna destilirana voda (uz vodu za pripremu alkalnih otopina) u iznosu od 10 % i superplastifikator Conplast 430 u iznosu 3 % težine letećeg pepela. Destilirana voda upotrijebljena je kako bi se izbjeglo djelovanje nepoznatih onečišćivača u običnoj vodi [8].

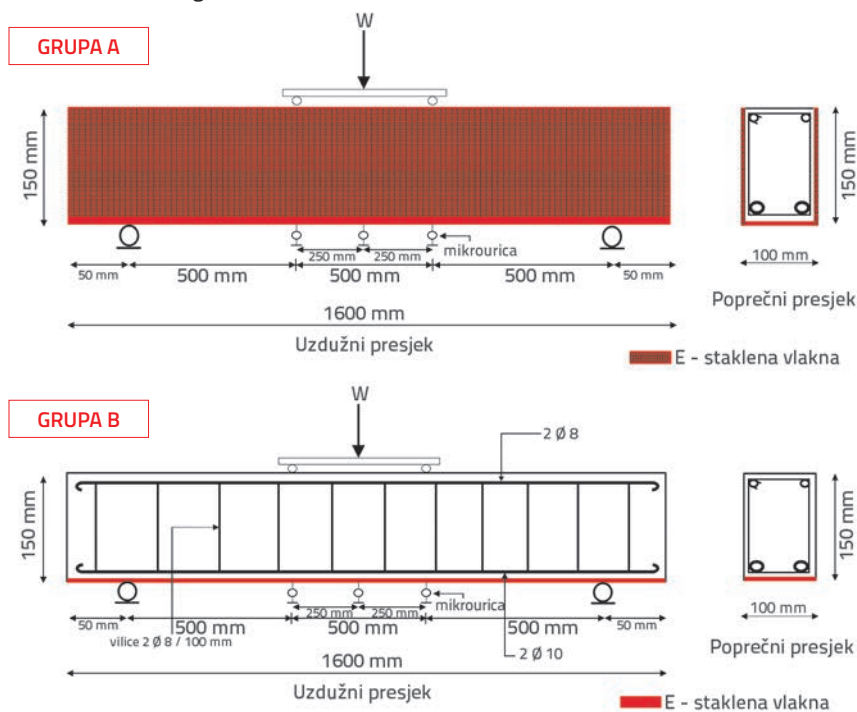
Da bi se izbjeglo slijeganje betona i brzo stvrdnjavanje [9], 10 % granulirane troske dodano je letećem pepelu, a projektirana mješavina ima oznaku F90G10. Sastav mješavine geopolimernog betona prikazan je u tablici 3.

## 2.3. Priprema i ugradnja geopolimernog betona

480 grama natrijevog hidroksida u obliku ljsuki 12-molarnom udjelu (12M) treba otopiti u jednoj litri destilirane vode. Metodom pokušaja i pogrešaka, zaključeno je da se 300 g otopine NaOH može dobiti kada 120 g NaOH ljsuki pomiješamo u staklenki od 250 ml. Na temelju toga, otopina natrijevog hidroksida potrebne količine pripremljena je i miješana s otopinom natrijevog silikata dan prije ugradnje betona [10]. Vrijeme njegovanja omogućava krutinama da se u otopini potpuno rastope, a u tom vremenu moguće je prije uporabe otkriti i ukloniti otopinu s nezadovoljavajućim svojstvima. Miješanje suhih materijala provedeno je u miješalici kapaciteta 0,062 m<sup>3</sup>. Nakon toga su dodani lužnata otopina, potrebna dodatna voda i superplastifikator. Mješavina svježeg geopolimernog betona ugrađena je u 3 sloja u kalup za greda. Prije ugradnje kalup je premazan uljem. Svaki sloj betona vibriran je 15 sekundi uz pomoć mehaničkog vibratora. Nakon cjelokupnog zbijanja, gornja površina poravnana je glatkom lopaticom. Kalupi su ostavljeni na sobnoj temperaturi radi stvrdnjavanja.

### 2.4. Karakteristike uzoraka

Sedam betonskih elemenata ispitivano je savijanjem do sloma. Betonske grede podijeljene su u dvije grupe: grupu A i grupu B, prema načinu oblaganja grede polimerom armiranim staklenim vlaknima (GFRP). U grupi A su tri grede koje su obložene u obliku slova U, s jednim, dva i tri sloja. Grupa B sastoji se od preostale tri grede omotane vanjskim GFRP plahtama u jednom, dva i tri sloja na donjim ploham. Jedna greda je kontrolna, bez vanjskog ojačanja od GFRP slojeva. Uz grede su pripremljene i 3 betonske kocke, dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm, tri valjka promjera 150 mm, visine 300 mm i tri prizme dimenzija 500 mm x 100 mm x 100 mm te su ispitivane da bi se ocijenila tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje geopolimernog betona. Vlačna čvrstoća pri pucanju betona određena je na betonskim valjcima koji su ispitani u skladu s normom IS: 5816-1999 [16]. Radi jednostavnijeg označavanja, grede sa "U" omotom od vlakana nazvane su U1, U2 i U3, a grede omotane samo na donjoj plohi nose nazive S1, S2 i S3 (prema jednom, dva ili tri sloja vlakana). Greda bez ojačanja od GFRP-a nazvana je kontrolna greda, a zajednička je za obje grupe. Debljina svakog sloja vlakana iznosi 0,6 mm. Geometrija greda prikazana je na slici 1. Grede su ojačane dvjema rebrastim armaturnim šipkama koje su izrađene od čelika s visokom granicom tečenja promjera 10 mm u donjoj zoni, dvjema šipkama promjera 8 mm u gornjoj zoni, te vilicama promjera 8 mm koje su postavljene na razmaku od 100 mm. Sve su grede ispitivane savijanjem u četiri točke s osloncima na udaljenosti od 1,5 m. Opterećenja su nanosena na udaljenosti 500 mm od svakog oslonca.



Slika 1. Prikaz uzoraka za ispitivanje: a) grede grupe A, uzdužni profil i poprečni presjek; b) grede grupe B, bočni pogled i poprečni presjek

### 2.5. Ojačanje geopolimernih betonskih greda

Površina betona bila je hrapava, a vakuumskim čišćenjem su s površine odstranjene čestice i prašina. Trokomponentna poliesterska smola koja omogućuje lijepljenje pripremljena je prema uputama proizvođača te je nanosena na površinu betona pomoću kista. Miješanje smole je provedeno u plastičnoj posudi kako bi se izbjeglo lijepljenje smole za stijenke [11]. Prvi sloj vlakana nanosen je ručno i pritisnut na prijanjajuće sredstvo kako bi se oslobodili mjehurići zraka i uklonio višak smole. Dodatni slojevi GFRP-a nanoseni su na isti način na vlažno ljepilo. Potom je uzorak njegovan na sobnoj temperaturi najmanje 7 dana. Slojevi GFRP-a na donjem dijelu postavljeni su na način da su grede bile okrenute naopako. Tijekom cijelog procesa trebalo je imati zaštitnu opremu, a obvezno zaštitne rukavice, jer korištena vlakna mogu izazvati svrbež.



Slika 2. Postavke ispitivanja

### 2.6. Postavke ispitivanja

Grede su ispitivane kontrolom sile na univerzalnoj stroju za ispitivanje, kapaciteta 1000 kN. Svi uzorci su ispitivani do sloma, savijanjem u četiri točke na jednostavnoj oslonjenoj gredi raspona 1500 mm. Oba kraja grede imaju oslobođenu rotaciju i translaciju. Radi mjerenja progiba (defleksije), postavljene su tri mikrourice, i to jedna u sredini, a ostale dvije ispod točaka opterećenja. Opterećenje je nanošeno u inkrementima od 1 kN sve do popuštanja vlačne armature. Manje opterećenje od 2 kN nanoseno je na početku ispitivanja, kako bi se provjerilo pravilno nalijeganje greda na valjke i ispravnost uređaja. Ponovno je pokusno opterećenje polako nanoseno te je greda ispitivana do sloma nanošenjem opterećenja u inkrementima. Tijekom ispitivanja pažljivo su zabilježeni progibi na sredini raspona pri svakom prirastu opterećenja, opterećenje pri pojavi prve pukotine i krajnje opterećenje. Postavke ispitivanja prikazane su na slici 2.

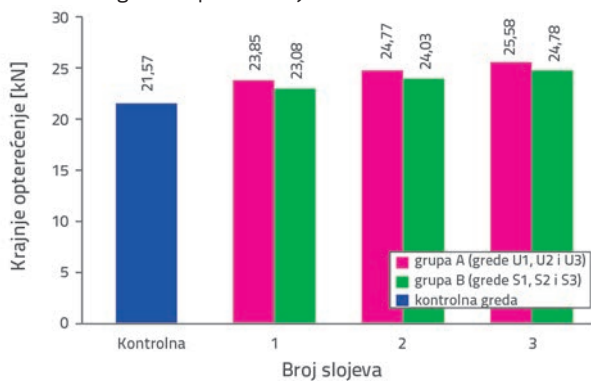
### 3. Rezultati i rasprava

#### 3.1. Mehanička svojstva

Nakon 28 dana njegovanja, prosječna tlačna čvrstoća iznosila je 22,66 N/mm<sup>2</sup>, vlačna čvrstoća je bila 2,76 N/mm<sup>2</sup>, a čvrstoća geopolimernog betona na savijanje bila je 5,56 N/mm<sup>2</sup>.

#### 3.2. Pojava prve pukotine i granično opterećenje

Rezultati ispitivanja pokazuju vrijednost opterećenja pri kojoj se pojavljuje prva pukotina, progib kod granice popuštanja i progib pri otkazivanju grede, a prikazani su u tablici 4. Opterećenje pri pojavi prve pukotine iznosilo je 6,80 kN za kontrolnu gredu, dok se kod greda U1, U2, U3, S1, S2 i S3 prva pukotina javlja pri opterećenju od 8,25 kN (U1), 8,90 kN (U2), 9,78 kN (U3), 7,40 kN (S1), 8,10 kN (S2) i 8,80 kN (S3). Može se zaključiti da se je u svim gredama pojavila prva pukotina kasnije, negoli kod kontrolne grede. Poboľjšanje nosivosti greda U1, U2 i U3 iznosilo je 10,57 %, 14,83 % i 18,60 % u odnosu na nosivost kontrolne grede. Slično i za grede u B grupi, povećanje krajnjeg opterećenja iznosilo je 7 % kod greda s jednim slojem, 11,40 % s dva sloja i 15 % za grede s tri sloja ojačanja, u usporedbi s neojačanom gredom. Može se primijetiti da u obje grupe, grede sa 3 sloja GFRP vlakana dosežu veću maksimalnu nosivost u usporedbi s drugim gredama, što upućuje na to da se granična nosivost grede povećava s većim brojem slojeva GFRP. Usporedba krajnjeg opterećenja svih greda s kontrolnom gredom prikazana je na slici 3.



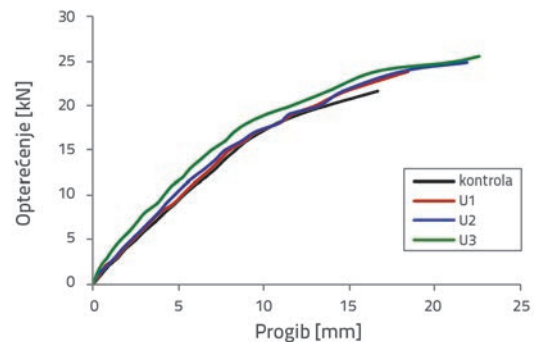
Slika 3. Utjecaj broja slojeva ojačanja na nosivost grede

Tablica 4. Rezultati ispitivanja

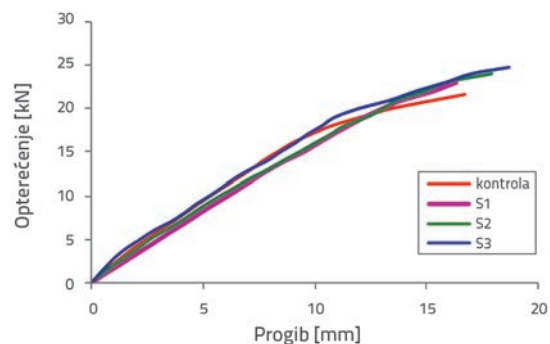
Oznaka grede	Opterećenje pri pojavi prve pukotine [kN]	Progib pri pojavi prve pukotine [mm]	Krajnje opterećenje [kN]	Progib pri graničnom opterećenju [mm]	Krutost pri graničnom opterećenju kontrolne grede [kN/mm]
Kontrolna	6,80	3,52	21,57	16,67	1,29
U1	8,25	4,07	23,85	18,40	1,46
U2	8,90	4,23	24,77	21,80	1,48
U3	9,78	4,10	25,58	22,53	1,58
S1	7,40	4,49	23,08	16,30	1,48
S2	8,10	4,60	24,03	17,92	1,50
S3	8,80	4,62	24,78	18,68	1,54

#### 3.3. Odnos opterećenja i progiba

Na slici 4. prikazan je odnos sile i progiba greda u grupi A u odnosu na kontrolnu gredu, a slika 5. prikazuje odnos sile (ili opterećenja) i progiba greda u grupi B u usporedbi s kontrolnom gredom.



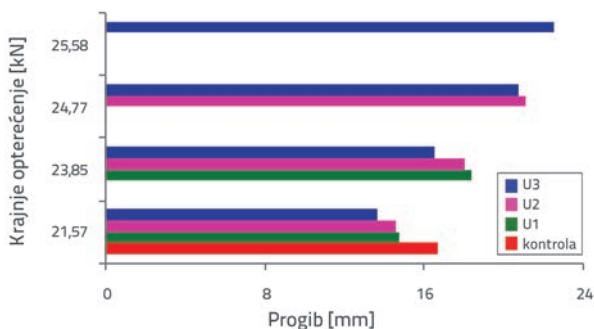
Slika 4. Odnos sila-progib (grede u grupi A)



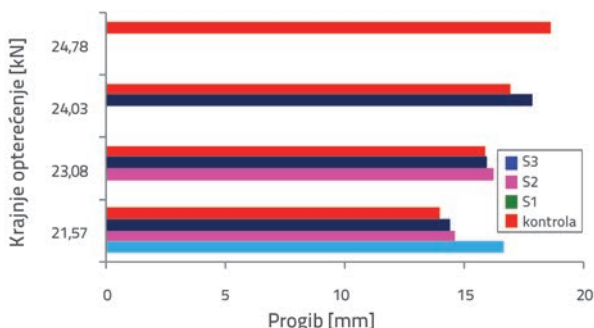
Slika 5. Odnos sila-progib (grede u grupi B)

Kod greda U3 zabilježen je najveći progib od svih ispitivanih greda. Vrijednost najvećeg progiba bila je 22,53 mm, što je 35,15 % veća vrijednost od progiba kontrolne grede (16,67 mm). S druge strane, grede S1 imala je najmanji progib od 16,30 mm, što je 2,22 % manje od progiba kontrolne grede. Osim grede S1, sve ojačane grede imale su veće progibe od kontrolne grede pri krajnjem opterećenju, što pokazuje da se žilavost greda povećala zbog prisutnosti GFRP slojeva. Uspoređen je odnos progiba

ojačanih greda sa silom koja odgovara graničnom opterećenju kontrolne grede te je utvrđeno da se progib U1 smanjio za 11,33 %, U2 za 12.6 %, a U3 za 18 %. Slično i u grupi B, pri opterećenju koje odgovara krajnjem opterećenju kontrolne grede, progib grede S1 smanjen je za 12,3 %, S2 je smanjen za 12,9 % i S3 za 13,9 %. Vrijednosti progiba svake grede uspoređene su pri krajnjem opterećenju drugih greda, kao što je prikazano na slikama 6. i 7. U svim slučajevima ojačanih greda može se vidjeti da se s povećanjem broja GFRP slojeva značajno smanjuje progib u usporedbi s progibom kontrolne grede pri krajnjem opterećenju.



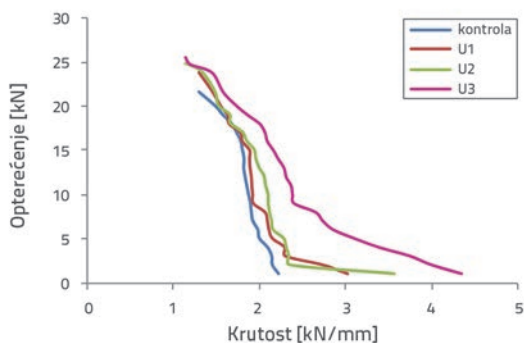
Slika 6. Usporedba progiba pri krajnjem opterećenju (grede u grupi A)



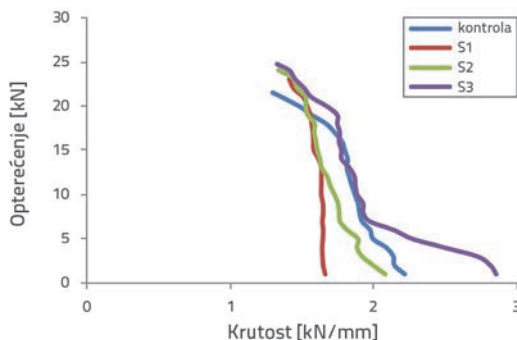
Slika 7. Usporedba progiba pri krajnjem opterećenju, grede u grupi B

### 3.4. Svojstva odnosa opterećenje - krutost

Krivulje opterećenje-krutost za grede u grupama A i B prikazane su na slikama 8. i 9.

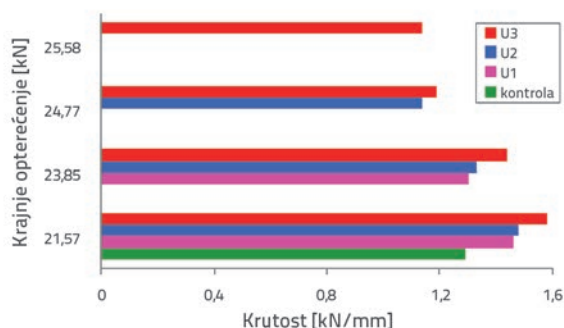


Slika 8. Dijagram ovisnosti opterećenja i krutosti (grede u grupi A)

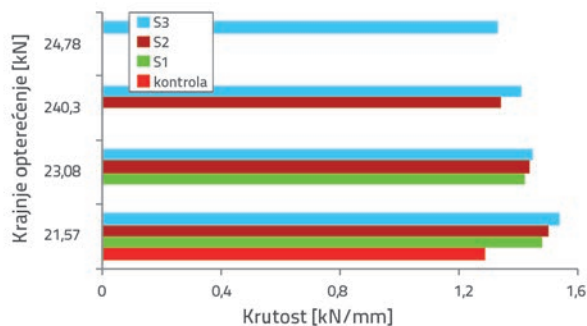


Slika 9. Dijagram ovisnosti opterećenja i krutosti (grede u grupi B)

Greda U3 imala je najveću krutost od svih ojačanih greda pri krajnjem opterećenju kontrolne grede. Njezina krutost povećana je za 22,50 % u usporedbi s krutošću kontrolne grede. Slično, ojačanim gredama U1 i U2 krutost se povećala za 13,17 % i 14,73 % u usporedbi s krutošću kontrolne grede. U grupi B, povećanje krutosti grede iznosilo je 14,72 %, 15,50 % i 16,27 % u odnosu na krutost kontrolne grede. Možemo zaključiti da je svim ojačanim gredama, u grupama A i B, povećana krutost u odnosu na kontrolnu gredu. Usporedba krutosti svih greda pri krajnjem opterećenju kontrolne grede prikazana je na slikama 10. i 11.



Slika 10. Usporedba krutosti za grede u grupi A

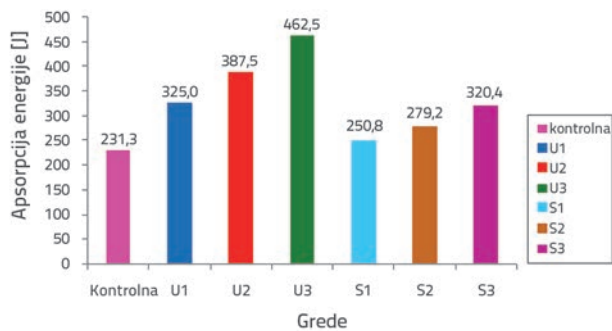


Slika 11. Usporedba krutosti za grede u grupi B

### 3.5. Svojstva apsorpcije energije

Za sve ispitivane grede apsorpcija energije dobivena je računanjem površine ispod krivulje sila-progib, a odgovarajuće vrijednosti izražene su u džulima (J). Usporedba kapaciteta

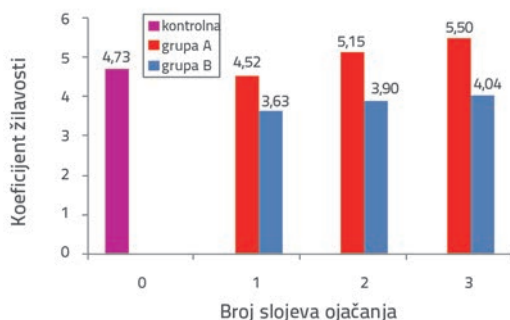
apsorpcije energije svih greda prikazana je na slici 12. Apsorpcija energije kontrolne grede bila je 231.3 J, dok je ta vrijednost za gredu U1 bila 40,54 % veća, za U2 67,56 %, a za U3 100 % veća u odnosu na kontrolnu gredu. Slično tomu, apsorpcija energije greda S1, S2 i S3 bila je 8,43 %, 20,72 % i 38,55 % veća nego u kontrolnoj gredi. Od svih ispitanih greda, greda U3 imala je najveću apsorpciju energije u usporedbi s kontrolnom gredom. Pri usporedbi grupa A i B, treba istaknuti da su grede omotane s 3 GFRP sloja imale bolja svojstva apsorpcije energije.



Slika 12. Usporedba greda s obzirom na apsorpciju energije

### 3.6. Žilavost

Žilavost grede može se definirati kao otpornost grede na neelastičnu deformaciju bez gubitka nosivosti prije sloma. Obično se računa za konvencionalne armiranobetonske konstrukcije kao odnos zakrivljenosti, progiba ili rotacije pri krajnjem opterećenju do progiba pri popuštanju čelika [12]. Koeficijent žilavosti je omjer progiba pri graničnom opterećenju i progiba pri popuštanju. Usporedba koeficijenata žilavosti prikazana je na slici 13.



Slika 13. Usporedba koeficijenata žilavosti

Kontrolna greda ima koeficijent žilavosti 4,73. Grede u grupi A imaju indeks žilavosti 4,52, 5,15 i 5,50 (za grede s jednim, dva i tri sloja GFRP-a). Grede U2 i U3 imaju veću žilavost u odnosu na kontrolnu gredu, dok je greda U1 imala manji koeficijent žilavosti (4,52), što pokazuje kako jedan sloj GFRP-a nije dovoljan da se postigne zadovoljavajuća žilavost tog elementa. Slični rezultati ostvareni su i u grupi B, gdje su grede imale manji koeficijent žilavosti (3,63, 3,90 i 4,04), unatoč činjenici da su imale veću nosivost u odnosu na kontrolnu gredu. Međutim, koeficijent

žilavosti povećava se s većim brojem slojeva ojačanja. Razlog tomu može biti ranije popuštanje armature na sredini raspona grede [13]. Sve grede ojačane s tri strane (takozvani "U" omot) imaju zadovoljavajuću žilavost.

### 3.7. Oblici sloma greda

Sve grede ispitivane su do sloma kako bi se mogao razumjeti utjecaj vlakana E-stakla na savojno ponašanje geopolimernih betonskih greda. Do sloma kontrolne grede došlo je uslijed savijanja, a lom je bio duktilan. Za sve grede u grupi A lom se dogodio između točaka opterećenja, u tlačnoj zoni. Lom je bio povezan s odvajanjem plahti staklenih vlakana na rubovima grede uz iznenadan glasan zvuk loma. Nakon sloma, greda praktički više nije mogla podnijeti nikakvo opterećenje. Savojne pukotine koje su se pojavile uslijed pucanja plahti vlakana zabilježene su kod greda iz grupe A, dok su se kod greda grupe B savojne pukotine širile od dna grede. Pucanje plahti moglo se dogoditi zbog nevidljivih pukotina (zbog U omota) koje su se pojavile ranije. U grupi B oblik je pukotina na gredama bio gotovo isti kao na kontrolnoj gredi.



Slika 14. Slom greda iz grupe A



Slika 15. Slom greda iz grupe B

Slom grede s jednim slojem staklenih vlakana (S1) dogodio se na spoju betona i premaza jer je tijekom odvajanja omota na njemu uočen trag betona. Grede S2 i S3 imale su lom u vlačnoj zoni PASV plahte lijevo od točki u kojima je nanoseno opterećenje te između njih. Lom plahti od staklenih vlakana bio je trenutačan i bučan. To upućuje na ubrzano oslobađanje energije i gubitak nosivosti grede, a lom je popraćen pucanjem betona na gornjim stranama grede. Na drugim stranama, plahta od staklenih vlakana ostala je neoštećena. U oba slučaja, primjerice za grupu A i B, zapaženo je da su se plahte odvojile od betonskih greda. Slika 14. prikazuje oblik sloma greda u grupi A, a slika 15. prikazuje oblik sloma greda iz grupe B.

#### 4. Zaključak

Na temelju eksperimentalnog ispitivanja koje je opisano u ovom radu zaključeno je sljedeće:

- U slučaju greda omotanih s tri strane, s povećanjem broja GFRP slojeva povećava se granična nosivost, krutost, žilavost i apsorpcija energije u odnosu na gredu koja nema niti jedan omot GFRP-a. Grede ojačane GFRP plahnama na donjoj plohi pokazale su veću graničnu nosivost, krutost i apsorpciju energije, ali njihova žilavost nije bila zadovoljavajuća, što su pokazale niske vrijednosti koeficijenta žilavosti.
- Pri istoj vrijednosti opterećenja, sve ojačane grede imale su manje progibe na sredini raspona u odnosu na kontrolnu gredu.
- Iznenadno odvajanje GFRP plahta bio je glavni oblik sloma svih ispitivanih ojačanih greda. Povećanje broja slojeva nije spriječilo takav oblik sloma. Pukotine koje su se pojavile manje su i jednolikije raspoređene na ispitivanim gredama iz obje grupe u odnosu na kontrolnu gredu.
- Iako postoje brojna istraživanja koja su proučavala utjecaj GFRP omota na ponašanje konstrukcijskih armiranobetonskih elemenata, još nije provedeno istraživanje koje se odnosi na konstrukcijsko ponašanje geopolimernog armiranog betona ojačanog GFRP-om pri različitim načinima omatanja. Međutim, ovim radom pokazana je inicijativa za istraživanje učinkovitosti upotrebe kompozitnih materijala za ojačanje betonskih elemenata bez uporabe cementa. Potrebno je provesti daljnja istraživanja kako bi se pronašao prikladan način omatanja betonskih elemenata kompozitnim materijalima i kako bi se povećala učinkovitost geopolimernog betona.

#### Zahvala

Autori zahvaljuju Znanstveno istraživačkom odboru Odjela za znanstvenu tehnologiju (SERB) u Novom Delhiju što je podržavau ovaj projekt mladih istraživača s voditeljicom projekta dr. R. Kumuthom na čelu.

#### LITERATURA

- [1] Bruhwiler, E.: Rehabilitation and strengthening of concrete structures using Ultra High Performance fibre reinforced concrete, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting – III*, Taylor and Francis, 2012.
- [2] Godat A., Neale K.W., Labossière P.: Numerical modeling of FRP shear-strengthened reinforced concrete beams, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*, 11 (2007) 6, pp. 640-649.
- [3] McCaffrey, R.: Climate Change and the Cement Industry, *Global Cem Lime Magazine* (Environmental Special Issue) (2002), pp. 15-19.
- [4] Vora, P.R., Dave, U.V.: Parametric studies on Compressive strength of geopolymer concrete, *Procedia Engineering* 51 (2013), pp. 210-219, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.030>
- [5] Bakharev, T.: Resistance of geopolymer materials to acid attack, *Journal of Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 4, pp. 658-670.
- [6] Rangan B.V., Sumajouw, D., Wallah, S., Hardjito, D.: Studies on reinforced low-calcium fly ash-based geopolymer concrete beams and columns, *31<sup>st</sup> Conference on our world in concrete & structures*, pp. 16-17, August 2006, Singapore.
- [7] Vijai, K., Kumutha, R., Vishnuram, B.G.: Experimental Investigations on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 13 (2012) 1, pp. 89-96.
- [8] Vasconcelos, E., Fernandes, S., Barroso de Aguiar, J.L., Pacheco-Torgal, F.: Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP, *Journal of Construction and Building Materials*, 25 (2011) 8, pp. 3213-3221.
- [9] Vijai, K., Kumutha, R., Vishnuram, B.G.: Effect of inclusion of steel fibers on the properties of geopolymer concrete composites, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 13 (2012) 3, pp. 377-385.
- [10] Alomayri, T., Shaikh, F.U.A., Low, I.M.: Characterization of cotton fibre reinforced geopolymer composites, *Journal of Composites: Part B: Engineering*, 50 (2013), pp.1-6, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.01.013>
- [11] Puranik, P.R., Vasavada, D.A., Patel, V.R.: Use of Woven Fabrics for strengthening of Reinforced Concrete Beams, *Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (2014) 3, pp. 52-58.
- [12] Grace, N.F., Sayed, G.A., Soliman, A.K., Saleh, K.R.: Strengthening Reinforced Concrete Beams using Fiber Reinforced Polymer (FRP) laminates, *ACI Structural Journal*, pp. 865-874, 1999.
- [13] El-Refai, S.A., Ashour, A.F., Garrity, S.W.: Sagging and Hogging strengthening of continuous reinforced concrete beams using carbon fibre-reinforced polymer sheets, *ACI Structural Journal*, pp. 446-453, August 2003.
- [14] IS: 11273-1992 (Reaffirmed – 2003) : Woven Roving Fabrics of 'E' glass fibre – Specification, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi, February 1992.
- [15] IS: 516-1959 (Reaffirmed – 2004) : Methods of Test for Splitting Tensile Strength of Concrete Cylinders, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi, December 1959.
- [16] IS: 5816-1999 (Reaffirmed – 2004): Splitting Tensile Strength of Concrete – Method of Test, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi, July 1999.
- [17] Davidovits, J.: Geopolymer Cement – a review, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, January 2013.