

Primljen / Received: 15.2.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 30.4.2019.

Dostupno online / Available online: 10.3.2020.

# Utjecaj pucanja užadi na ponašanje prednapete sandučaste grede ojačane CFRP-om

## Autori:



Dr.sc. **Azrul A. Mutalib**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Kebangsaan, Malezija  
Fakultet za tehničke znanosti i izgrađeni okoliš  
Zavod za graditeljstvo  
[azrulaam@ukm.edu.my](mailto:azrulaam@ukm.edu.my)  
Autor za korespondenciju



Dr.sc. **Mohamed H. Mussa**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Kebangsaan, Malezija  
Fakultet za tehničke znanosti i izgrađeni okoliš  
Zavod za graditeljstvo  
[eng.mhmussa@siswa.ukm.edu.my](mailto:eng.mhmussa@siswa.ukm.edu.my)



Dr.sc. **Aizat Mohd Taib**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Kebangsaan, Malezija  
Fakultet za tehničke znanosti i izgrađeni okoliš  
Zavod za graditeljstvo  
[amohdtaib@ukm.edu.my](mailto:amohdtaib@ukm.edu.my)

Izvorni znanstveni rad

**Azrul A. Mutalib, Mohamed H. Mussa, Aizat Mohd Taib**

## Utjecaj pucanja užadi na ponašanje prednapete sandučaste grede ojačane CFRP-om

U radu se analizira ponašanje prednapete sandučaste grede ojačane polimerom s ugljičnim vlaknima (CFRP) za slučaj pucanja prednapetih užadi. Tri vanjske prednapete sandučaste grede ispitane su do sloma. Analiza je provedena s naglaskom na nosivost, širinu i obrazac širenja pukotina, te na torzijsku čvrstoću grede. Rezultati pokazuju da primjena CFRP-a dovodi do znatnog smanjenja progiba i do povećanja nosivosti u slučaju pucanja užadi. Pukotine se ne pojavljuju na dnu grede na koju je postavljen CFRP, a bitno je povećana i krutost grede na torziju.

### Ključne riječi:

prednapete sandučaste grede, složeno opterećenje, pucanje užadi, ojačanje CFRP-om, nosivost

Original scientific paper

**Azrul A. Mutalib, Mohamed H. Mussa, Aizat Mohd Taib**

## Behaviour of prestressed box beam strengthened with CFRP under effect of strand snapping

The study aims to evaluate behaviour of a prestressed box beam strengthened with the Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) under the snapping of prestressed strands. Three external prestressed box beams are tested until failure. The evaluation focuses on the load carrying capacity, cracks pattern and width, and torsional capacity of the beam. The results show that the use of CFRP causes significant reduction of beam deflection and an increase of its loading capacity under snapping effects. The cracks do not appear at the bottom of the beam where the CFRP is placed, and the torsion stiffness of the beam increases considerably.

### Key words:

prestressed box beams, combined load, strands snapping, CFRP strengthening, load capacity

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Azrul A. Mutalib, Mohamed H. Mussa, Aizat Mohd Taib**

## Auswirkung von Kabelrissen auf CFK-verstärkte vorgespannte Kastenträger

Die Abhandlung analysiert das Verhalten von kohlefaserverstärkten (CFK) Kastenträgern im Falle eines Risses der vorgespannten Seile. Getestet wurden drei vorgespannte Kastenträger bis zum Bruch. Die Analyse wurde mit Schwerpunkt auf der Tragfähigkeit, der Breite und dem Muster der Rissbreite sowie auf der Torsionsfestigkeit des Trägers durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von CFK zu einer signifikanten Verringerung der Durchbiegung und zur Erhöhung der Tragfähigkeit im Falle eines Kabelrisses führt. Die Risse treten nicht am Boden des Trägers auf, an welcher der CFK angebracht wurde, und auch die Steifigkeit des Trägers auf die Torsion wird erheblich erhöht.

### Schlüsselwörter:

vorgespannte Kastenträger, komplexe Belastung, Kabelriss, Verstärkung durch CFK, Tragfähigkeit

## 1. Uvod

Prvi most s vanjskim prednapinjanjem izgrađen je u mjestu Aue u Saskoj u vremenu od 1935. do 1937. godine i pritom je korištena Dischingerova koncepcija (DRP 727429) [1]. Međutim, nakon Drugog svjetskog rata, razvoj mostovnih konstrukcija uglavnom se temeljio na sustavima unutarnjeg naknadnog napinjanja i to prvenstveno zbog jednostavnosti takvih sustava. Ipak, u Europi, a najviše u Njemačkoj, na nekim se mostovima i dalje koristilo vanjsko prednapinjanje iako je prevladavalo mišljenje da vanjske natege nisu dovoljno otporne na koroziju. Sredinom osamdesetih godina prošlog stoljeća bitno su poboljšani antikorozivni sustavi, pa se metoda vanjskog prednapinjanja nametnula kao alternativa tradicionalnom unutarnjem prednapinjanju, i to u posebnim slučajevima za potrebe ojačanja konstrukcije, te kao opća metoda za povećavanje trajnosti i lakše održavanje mostova. Dobra iskustva u gradnji i održavanju mostova na kojima je provedeno vanjsko prednapinjanje osnovni su razlozi zbog kojih je ta metoda usvojena kao standardni postupak za projektiranje mostova sandučastog poprečnog presjeka.

Do sada je provedeno više studija u kojima je ispitano ponašanje sandučastih greda s vanjskim prednapinjanjem, i to u raznim uvjetima građenja. Tako su Aimin Yuan i dr. [2] ispitali savojnu čvrstoću betonskih sandučastih greda s raznim omjerima broja unutarnjih zatega prema broju vanjskih zatega (6:2, 4:4 i 2:6). Dobiveni rezultati pokazali su da taj omjer bitno utječe na nosivost, duktilnost i način sloma analiziranih greda. S povećanjem broja unutarnjih natega raste nosivost i duktilnost. Zato ti autori preporučuju da odnos ove hibridne zatege ne bude manji od 1:1. Ghallab [3] predlaže pojednostavljenu metodu za proračun graničnog naprezanja vanjskih natega u prednapetim kontinuiranim betonskim gredama. Metoda je uglavnom točnija od ostalih metoda, ali nije pogodna za grede ojačane ravnim nategama. Jednadžbe koje predlažu ASSHTO [4], Naaman i Alkhairi [5] te Aravinthan i dr. [6] pouzdanije su za tu vrstu greda. Osim toga, rezultati koji se postižu primjenom jednadžbi iz dokumenata ACI 318 [7] i Eurokoda 2 [8] prilično su točne za grede ojačane vanjskim nategama unutar visine presjeka. Karayannis i Chalioris [9] navode da su postupci prikazani u dokumentima ACI 318 i Eurokodu 2, temeljeni na dopuštenoj širini pukotine, široko primjenjivi za procjenu potrebne sile djelomičnog prednapinjanja armiranobetonskih greda. Saibabu i dr. [10] su proučavali ciklički i monotono opterećene prednapete sandučaste segmente povezane suhim ili epoksidnim spojevima primjenom segmentnog postupka izvedbe. Postignuti rezultati pokazuju da se sandučasti nosači s epoksidnim spojevima ponašaju bolje od segmentnih sandučastih nosača sa suhim spojevima, i to zbog dodatne vlačne čvrstoće u zoni spoja. Ipak, mostovi sa suhim spojevima češće se koriste u nekim posebnim uvjetima građenja.

Do otkazivanja nosivih elemenata uglavnom dolazi zbog lošeg izvođenja građevinskih radova, neodgovarajućeg projektiranja, korozije armature, nagle ili dugotrajne promjene temperature, te zbog neadekvatnog održavanja ili potpunog

izostanka održavanja [11]. Otkazivanje konstrukcije obično počinje pojavom pukotina, koje se šire kako se s vremenom povećava opterećenje ili negativni utjecaji. Pukotine se otvaraju zbog smanjenja lužnatosti betona, što omogućuje oksidaciju armature. Inženjeri su stoga došli na ideju o "ojačanju" kako bi se omogućilo održavanje i popravljavanje postojećih elemenata konstrukcije, tj. njihovo pravodobno očuvanje, čime se izbjegava rušenje čitave konstrukcije te tako postižu uštede u vremenu i izbjegavaju poteškoće i neugodnosti s kojima bi inače bili suočeni korisnici. Prednosti održavanja ojačavanjem konstrukcije sastoje se u činjenici da se takve radnje mogu obaviti uz razumne troškove (obično je to povoljnije od potpunog rušenja) i u najkraćem mogućem roku, bez nepotrebnih prekida i kašnjenja u odvijanju svakodnevnih aktivnosti korisnika.

Polimerna se vlakna vrlo često koriste za ojačanje sandučastih betonskih greda mostova kada je osnovni cilj sprječavanje korozije, a ona se obično javlja kada se koristi tradicionalna armatura. Drugim riječima, upotrebom polimernih vlakana bitno se smanjuju troškovi održavanja. Sakuraba i dr. [6] analizirali su svojstva čvrstoće i deformacije sandučastih greda ojačanih polimerima armiranim ugljičnim vlaknima (eng. *Carbon Fibre Reinforced Polymer* - CFRP) s različitim načinima lameliranja podvrgnutih opterećenju pri savijanju. Dobiveni rezultati pokazuju da je čvrstoća poboljšana odgovarajućim rasporedom lamela u uzdužnom i dijagonalnom smjeru, a registrirana su tri oblika sloma: vertikalno pucanje na hrptu uzoraka sastavljenih od uzdužnih i poprečnih lamela, odvajanje lamela na hrptu uzoraka s dijagonalnim lamelama, te kombinacija vertikalnog pucanja i odvajanja lamela na hrptu uzoraka s lamelama u svim smjerovima. Također je ustanovljeno da dijagonalne lamele doprinose povećanju krutosti greda na savijanje.

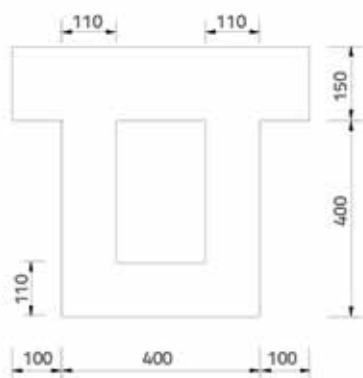
Gautam i Matsumoto [12] navode da se primjenom CFRP-a može poboljšati mehanizam sloma sandučastih greda pri savojnom i osnom opterećenju. Grace i dr. [13] analizirali su savojnu čvrstoću mosta sandučastog poprečnog presjeka za nekoliko tipova CFRP natega. Kao dominantan oblik sloma zabilježeno je gnječenje betona u tlačnom području, neposredno nakon čega je uslijedilo pucanje natega/užadi za prednapinjanje. Kod greda ojačanih CFRP-om zabilježena je veća granična čvrstoća. Xie i dr. [14] proučavali su čvrstoću na zamor armiranobetonskih greda ojačanih prednapetim polimerima armiranim vlaknima (eng. *Fibre Reinforced Polymer* - FRP) pri savijanju u tri točke. Dobiveni rezultati pokazuju da se naprezanje u čeliku i zamor mogu smanjiti ako se koristi prednapeti FRP, te da se primjenom FRP-a može produžiti životni vijek grede. Osim toga, rezultati statičkog ispitivanja pokazuju da je nosivost greda s prednapetim FRP-om očito veća od nosivosti greda koje nisu ojačane FRP-om, s tim da treba napomenuti da je uočeno smanjenje duktilnosti grede. U ovom se radu analiziraju prednapete sandučaste grede podvrgnute ekscentričnom opterećenju i pucanju prednapete žice, te se isto tako prikazuju i rezultati ranijih istraživanja provedenih u ovom području. Ispitane su tri grede: kod prve ne dolazi do pojave pucanja žica, a kod druge do pucanja dolazi pri

pojavi prve pukotine. Treća greda ojačana je CFRP-om nakon pojave prve pukotine. Rezultati su prikazani u vidu nosivosti, obrasca pojave pukotina i njihove širine, torzijske nosivosti te iskazivanjem načina sloma.

## 2. Programi eksperimentalnih ispitivanja

### 2.1. Odabir i projektiranje vanjske prednapete sandučaste grede

Sandučasta greda prikazana na slici 1. projektirana je u skladu s Eurokodom 2 [8] gdje se navodi da se deformacija čitavog elementa treba uzeti u obzir pri proračunu povećanja naprezanja u prednapetom čeliku adhezijski nevezanih kabela pri graničnom stanju nosivosti.



Slika 1. Poprečni presjek sandučaste grede (dimenzije u mm)

Ako se ne provodi detaljan proračun, može se pretpostaviti da povećanje naprezanja od efektivnog prednapinjanja do naprezanja u graničnom stanju nosivosti iznosi  $\Delta\sigma_s$ . U Eurokodu

2 predlaže se vrijednost  $\Delta\sigma_s$  od 100 N/mm<sup>2</sup>, pa naprezanje natege ( $f_{ps}$ ) u graničnom stanju iznosi:

$$f_{ps} = f_{pe} + 100 \leq f_{py} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdje su  $f_{pe}$  i  $f_{py}$  efektivna vrijednost prednapinjanja tj. granica popuštanja prednapetog čelika.

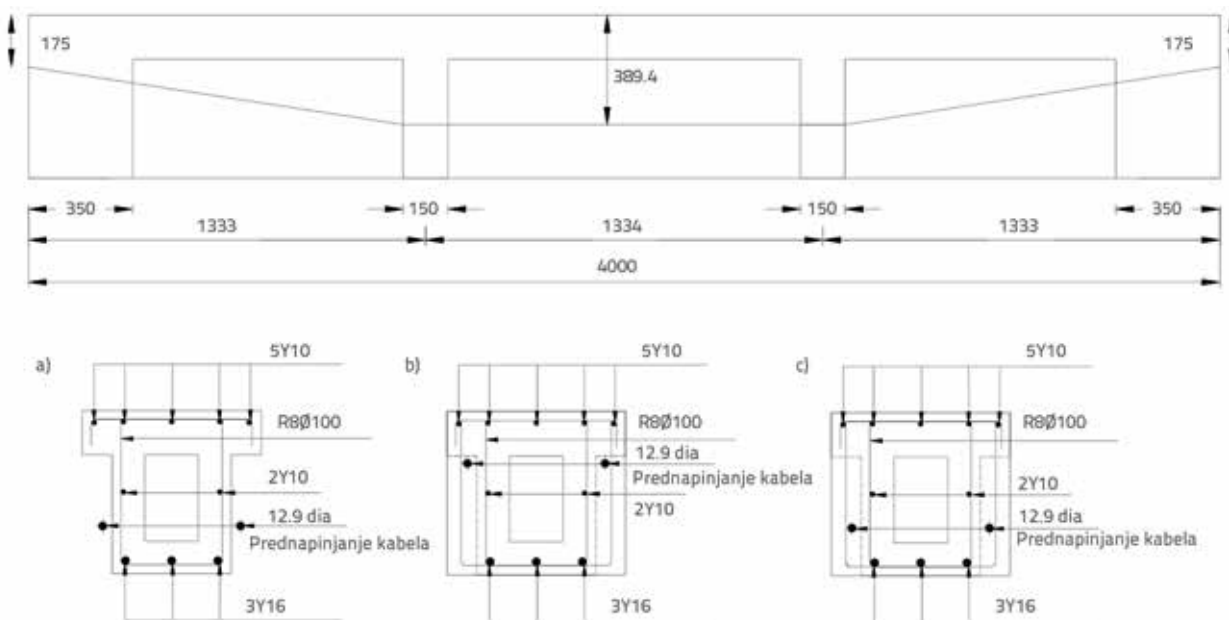
Detalji armiranja prednapetom i nenapetom armaturom prikazani su na slici 2. Svojstva materijala korištenih u ovom radu (beton, natege za prednapinjanje i nenapeta armatura) prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva betona, natega za prednapinjanje i nenapete armature

Materijal	Svojstva	Opis
Beton	Tlačna čvrstoća ( $f_{cu}$ )	50 N/mm <sup>2</sup> pri 28 dana
	Modul elastičnosti ( $E_c$ )	32000 N/mm <sup>2</sup>
Natege	Broj žica	7
	Granica popuštanja ( $f_{py}$ )	1330 N/mm <sup>2</sup>
	Granična čvrstoća ( $f_{pu}$ )	1900 N/mm <sup>2</sup>
	Poissonov koeficijent	0,3
	Modul elastičnosti ( $E_s$ )	190000 N/mm <sup>2</sup>
Armatura	Koeficijent linearne ekspanzije ( $\alpha$ )	$12 \times 10^{-6}$ po °C
	Meki čelik (R)	250 MPa
	Visoka granica popuštanja (Y)	460 MPa

### 2.2. Detalji ojačanja sandučastih greda

U okviru prijašnjih istraživanja utvrđeno je da CFRP djelotvorno povećava čvrstoću sandučastih greda. U ovom se radu koristi robustan sustav povećanja čvrstoće korištenjem CFRP-a (Sika



Slika 2. Detalji armiranja prednapetom i nenapetom armaturom (sve dimenzije iskazane su u "mm"): a) bočni pogled; b) podgled; c) presjek

Carbodur XS514) koji se proizvodi u tvrtki Sika Kimia Sdn. Bhd. Tehničke karakteristike tog sustava prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva CFRP-a

Svojstva	Opis
Širina	50 mm
Debljina	1,4 mm
Ploština poprečnog presjeka	70 mm <sup>2</sup>
Modul elastičnosti (srednja vrijednost)	165000 N/mm <sup>2</sup>
Modul elastičnosti (minimalna vrijednost)	>160000 N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća (minimalna vrijednost)	>2200 N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća pri slomu (srednja vrijednost)	2400 N/mm <sup>2</sup>
Deformacija pri slomu (minimalna vrijednost)	>1,35 %

Kao adhezijski materijal za povezivanje armature korišten je proizvod SIKADUR 30. Tipičan raspon mehaničkih svojstava tog materijala prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva adhezijskog materijala za armaturu

Svojstva	Opis
Izgled	komponenta A = bijela smjesa komponenta B = crna smjesa komponenta A+B = svjetlosiva smjesa komponente A:B = 3:1 (težinski udio)
Omjer smjese	Supstrat i okolina: 10 do 35 °C
Temperatura nanošenja	~ 1,7 kg po litri (komponente A+B)
Gustoća	12800 N/mm <sup>2</sup>
Statički modul elastičnosti	Otkazivanje betona (~15 N/mm <sup>2</sup> )
Posmična čvrstoća	Otkazivanje betona (~ 4 N/mm <sup>2</sup> )
Prianjanje	9 x 10 <sup>-5</sup> po °C (-10 do +40 °C)
Koeficijent toplinskog rastezanja	Supstrat i okolina: 10 to 35 °C

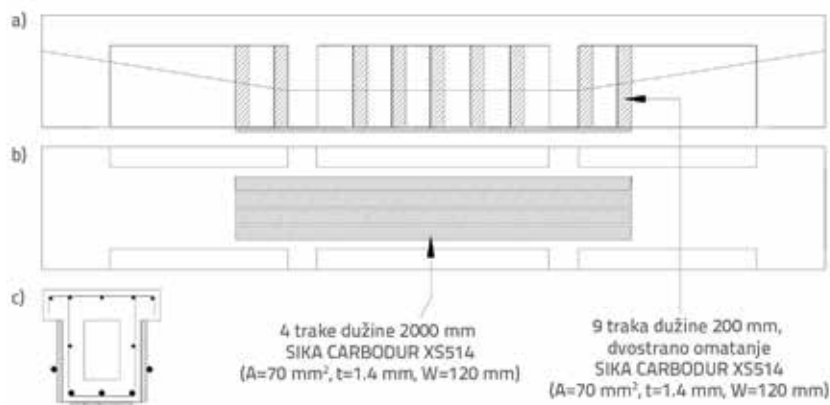
Konfiguracija omatanja za savojno, posmično i torzijsko ojačanje prikazana ne na slici 3. u skladu s proračunom ojačanja sandučaste grede pomoću CFRP-a. Četiri trake *Sika CarboDur XS514*, dužine 2 m, postavljene su na podgled grede, a devet traka *Sika CarboDur XS514* postavljeno je na osnom razmaku od 200 mm. Konfiguracija ovisi o početnom proračunu te o procjeni pozicije na kojoj bi se najvjerojatnije mogle pojaviti pukotine.

### 2.3. Priprema i prednapinjanje sandučastih greda

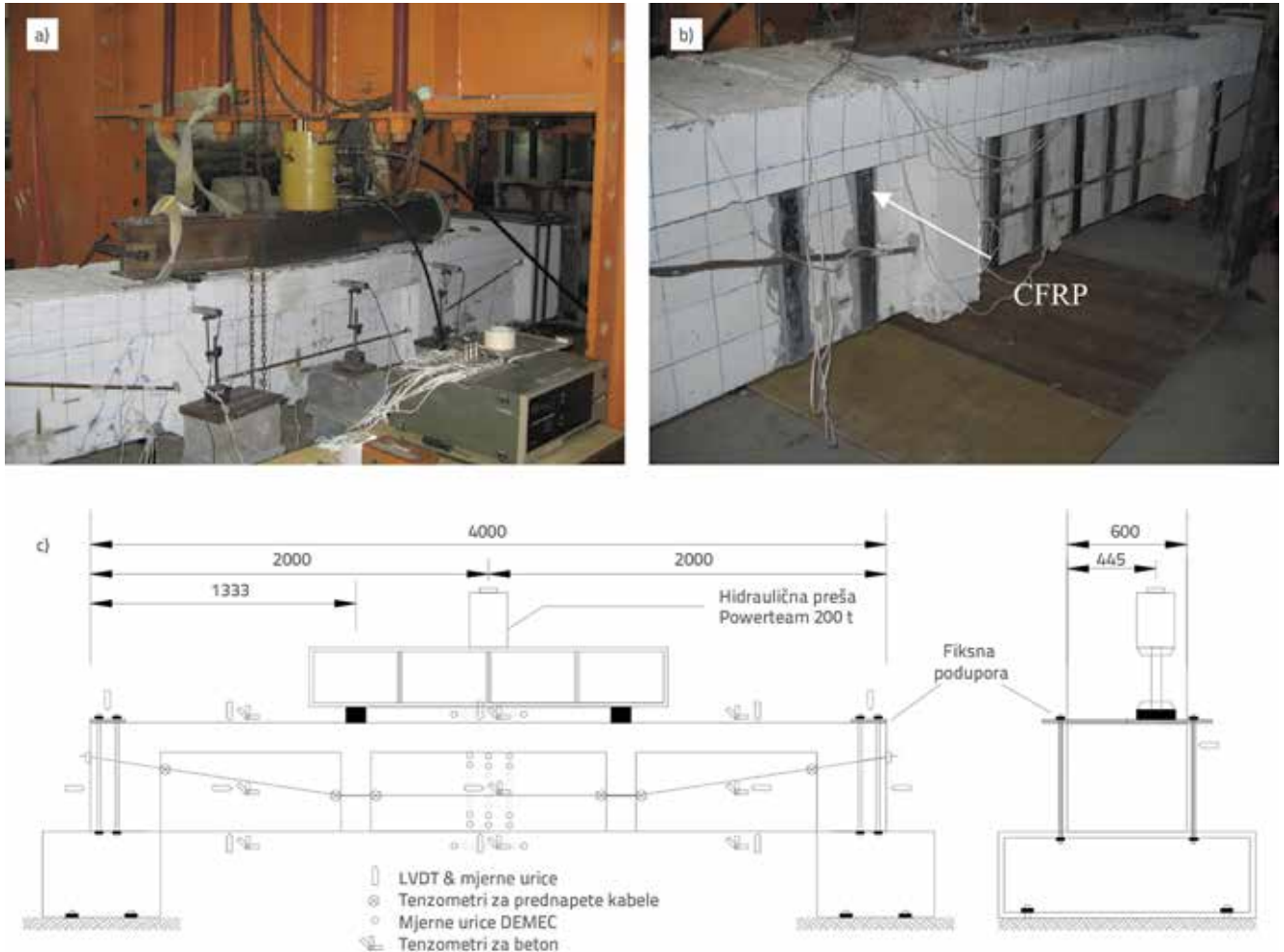
Oplate su izrađene od šperploče, a drvene su ukrute fiksirane na strane oplate kako bi se spriječilo otkazivanje tijekom ulijevanja betona. Armaturni koševi pripremljeni su zasebno, a u sredini grede pričvršćena je polistirenska kutija koja simulira otvor sandučaste grede. Tenzometri dugi 5 mm postavljeni su nakon toga na armaturni koš na mjesta očekivanih maksimalnih deformacija. Svaki armaturni koš zatim je viljuškare postavljenu u oplatu. Transportni beton razreda 50 potreban za izradu greda naručen je od tvrtke HANSON. Beton je ugrađen u oplatu u odgovarajućim slojevima. Čvrstoća betona određena je ispitivanjem kocaka dimenzija 150 x 150 x 150 mm u četiri kontingenta pomoću uređaja ELE za testiranje kocaka. Vrijednosti tlačne čvrstoće mjerene su 7 – 28 dana nakon izvedbe grede. Grede su intenzivno njegovane prva tri dana nakon izvedbe i u tu su svrhu korištene vreće navlažene u vodi. Treći dan nakon ugradnje betona, oplata je skinuta sa stranica uzoraka te je nastavljen proces njegovanja.

Ukupno tri grede prednapete su izvana provlačenjem dva užeta s po sedam žica, promjera 12,9 mm, kroz unaprijed određene otvore u kratkim PVC cijevima kako bi se osigurao jednostavan prolaz svake natege. Natege su usidrene na svakom uzdužnom kraju grede pomoću klinova. Sidreni klin korišten za natege postavljen je izravno na debelu podložnu ploču dimenzija 600 x 550 x 10 mm kako bi se spriječilo gnječenje krajnjeg bloka betona zbog sile prednapinjanja koja se unosi na krajevima. Širina svih skretnika iznosila je 150 mm, a lijevani su monolitno zajedno s ostatkom grede. Na prednapete žice pričvršćeni su tenzometri tipa KYOWA širine 5 mm, i to

na mjestima na kojima su se očekivale najveće deformacije. Cilj je bio izmjeriti početna naprezanja tijekom postupka prednapinjanja. Pomoću izmjerenih deformacija izračunana su naprezanja korištenjem modula elastičnosti od 190 GPa. Dvije hidraulične preše korištene su istovremeno za prednapinjanje natega do 6000 psi (138 kN), što predstavlja 70 % od ukupne maksimalne sile prednapinjanja prije otkazivanja. Napinjanje natega provedeno je u etapama: 0, 3000 i 6000 psi (0, 69, 138 kN). Nakon prednapinjanja očitane su vrijednosti deformacija.



Slika 3. Konfiguracija omatanja CFRP-om: a) bočni pogled; b) podgled; c) presjek



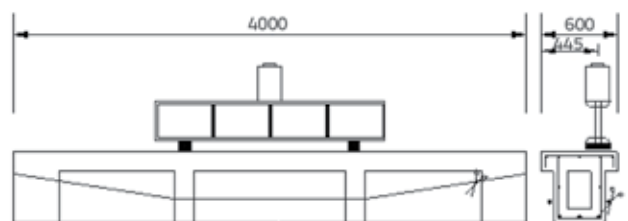
Slika 4. Tipičan postav ispitivanja: a) PB1; b) PB3; c) shematski prikaz

## 2.4. Postupak ispitivanja

Ispitane su tri sandučaste grede s vanjskim prednapinjanjem te su označene kako slijedi: PB1 (kontrolna greda bez pucanja), PB2 (kontrolna greda s pucanjem) i PB3 (greda ojačana CFRP-om pri pucanju). Dužina uzoraka iznosi 4 m, a visina im je 550 mm. Tipičan postav ispitivanja prikazan je na slici 4. Grede su ispitane nanošenjem kombiniranog opterećenja u točku 145 mm od sredine presjeka grede. Za ispitivanje je korištena hidraulična preša ENERPAC kapaciteta 200 tona.

Pri ispitivanju grede PB1, opterećenje je nanošeno postupno te su provedena mjerenja krajnjeg graničnog opterećenja i deformacije betona, nenapete armature i prednapetih žica, širine pukotine i progiba za svaki stupanj opterećenje sve do sloma. Pri ispitivanju grede PB2, uzorak je najprije opterećen, a zatim je nakon pojave prve pukotine provedeno prekidanje prednapetih žica na opterećenoj strani kako bi se izazvala velika torzija (slika 5.). Prekidanje pri pojavi prve pukotine odabrano je zato što prva pukotina upućuje na oštećenje grede te bi se, prema Dicksonu i dr. [15], u toj točki mogla očekivati i gora naprezanja. Ista je greda opterećena i do sloma te su obavljena slična mjerenja. Pri

ispitivanju posljednje grede PB3, uzorak je najprije opterećen te je pri pojavi prve pukotine obavljeno prekidanje žica. Odmah nakon toga komprimiranim su zrakom na površinu betona potisnute trake CFRP-a debljine 2-3 mm.



Slika 5. Postav za prekidanje prednapetih žica

## 3. Rezultati i rasprava

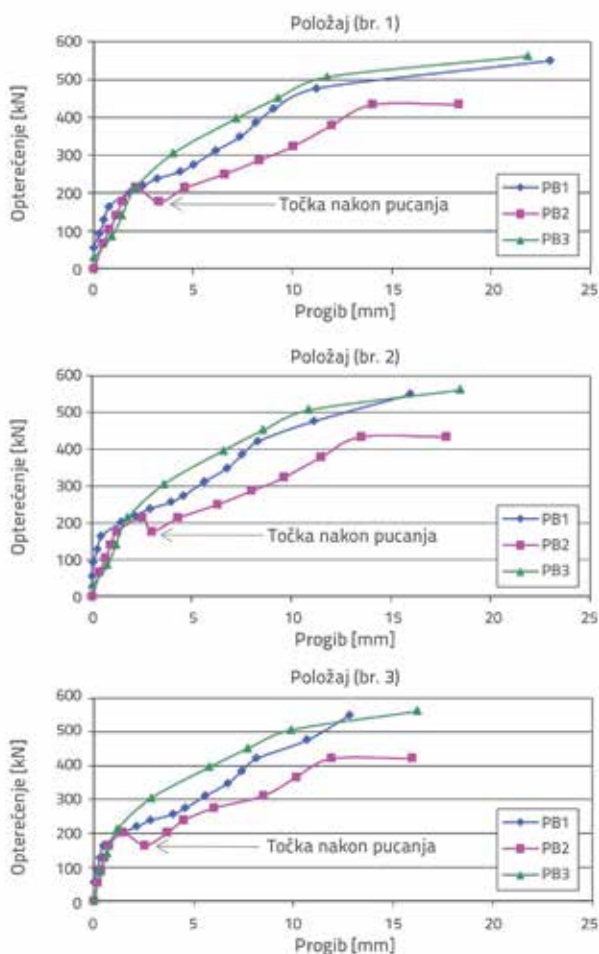
### 3.1. Odnos opterećenje-progib sandučastih greda

Ponašanje analiziranih greda u raznim uvjetima ekscentričnosti opterećenja i prekidanja prednapetih žica opisano je pomoću krivulja opterećenje-progib, a na temelju podataka dobivenih

mjerenjem pomoću mjernih urica i LVDT-a koje su postavljene na podgled grede (slika 6.).



Slika 6. Položaj LVDT-a i mjerne urice: a) podgled; b) presjek



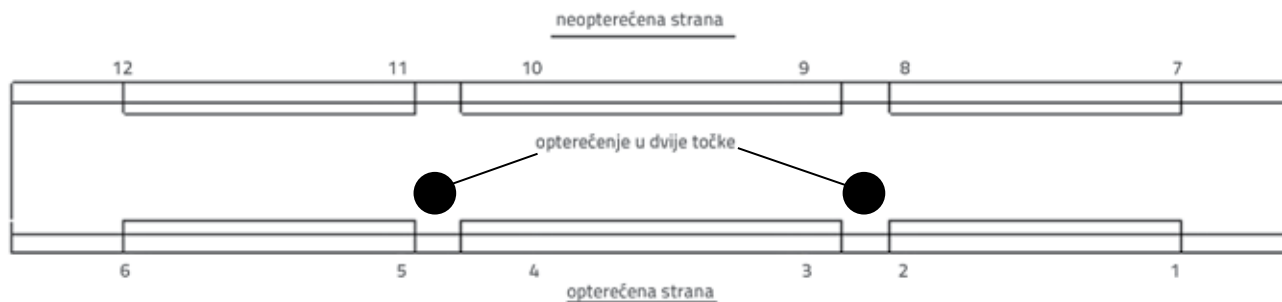
Slika 7. Krivulja opterećenje-progib grede u raznim točkama po širini presjeka

Na slici 7. je vidljivo da od tri analizirana uzorka greda PB3 ima najveću nosivost na sredini, unatoč efektu pucanja koji se jasno vidi kod grede PB2. Takvo se ponašanje objašnjava prisutnošću CFRP trake koja je uvelike povećala čvrstoću sandučaste grede. Što se tiče progiba, grede iskazuju sličnu početnu krutost do opterećenja od 210 kN kada dolazi do pojave prve pukotine. Međutim, nakon jedne trećine krajnjeg graničnog opterećenja, uzorci se počinju različito ponašati. Maksimalni progib uočen na gredi PB2 (kontrolna greda s prekidom), naročito nakon prekidanja, jasno upozorava na efekt pucanja/prekidanja zbog kojeg se bitno smanjuje krutost grede. Ojačanje grede PB3 CFRP trakama pokazuje da se krivulja opterećenje-progib značajno poboljšava u odnosu na gredu PB2. Međutim, maksimalni je progib zabilježen na lokaciji 1 koja se nalazi pored točke pucanja prednapetih žica uslijed torzijskog opterećenja.

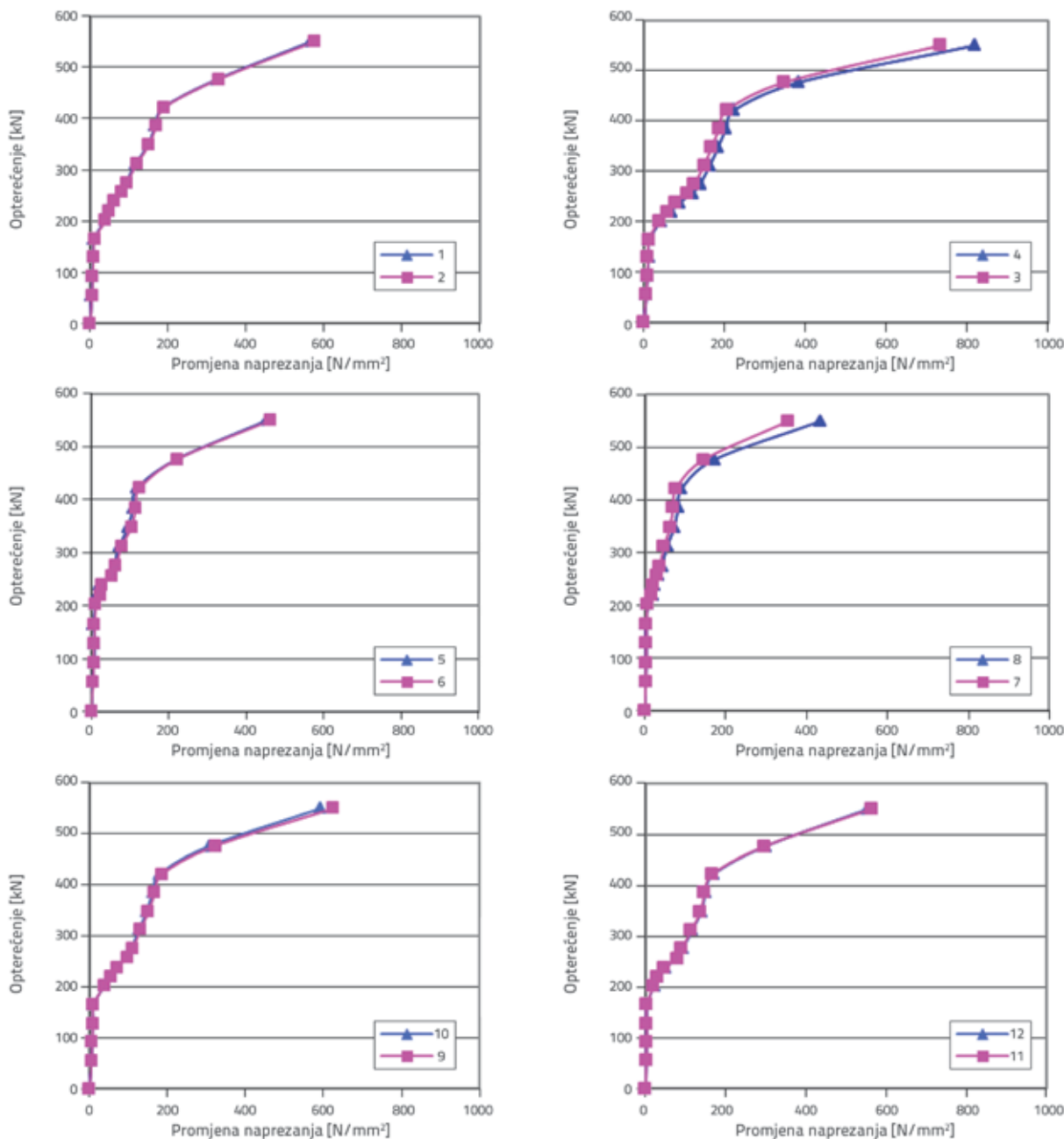
### 3.2. Odnos opterećenja i promjene napreznja natega

Krivulje odnosa između opterećenja i promjene napreznja u nategama ( $\Delta f_p$ ) prikazane su za gredu PB1 u 12 položaja, kao što se to vidi na slici 8. Rezultati pokazuju da je maksimalna promjena napreznja u nategama zabilježena između položaja 3 i 4, gdje je napreznje iznosilo 733 N/mm<sup>2</sup> za položaj 3 tj. 817 N/mm<sup>2</sup> za položaj 4. Utjecaj torzijskog opterećenja na opterećenoj strani doveo je do povećanja napreznja u prednapetim žicama, naročito u položajima od 1 do 6. Prosječna promjena u napreznju grede PB1 iznosila je 561,91 N/mm<sup>2</sup>. Na opterećenoj strani, prosječna promjena napreznja u žici iznosila je 601,5 N/mm<sup>2</sup>, što je za 16 % više od vrijednosti 520,33 N/mm<sup>2</sup> zabilježene na neopterećenoj strani (slika 9.).

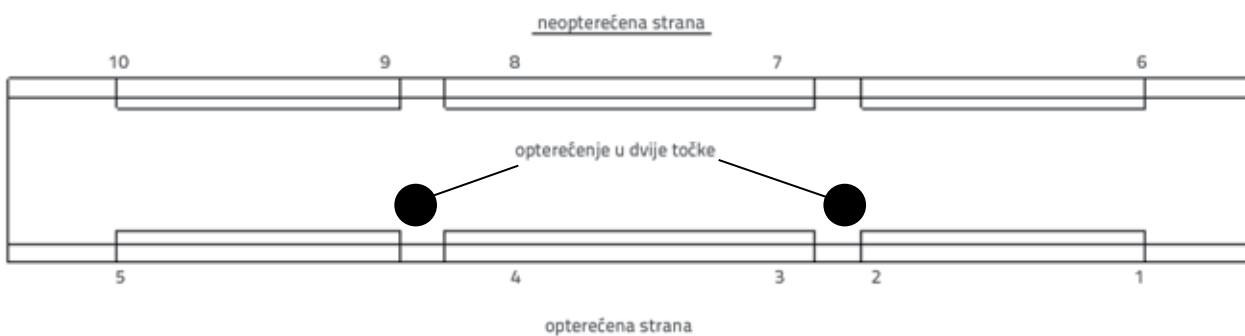
Za gredu PB2, promjena napreznja natega određena je u 10 položaja, kao što se to vidi na slici 10. Utvrđeno je da na gredi PB2 prosječna promjena napreznja iznosi 314,25 N/mm<sup>2</sup>, što je za 78 % niže u odnosu na gredu PB1. Osim toga, maksimalna promjena napreznja, tj. 424,32 N/mm<sup>2</sup>, zabilježena je u položaju 4, a na opterećenoj strani registrirana je za 29 % veća promjena u napreznju natega u odnosu na neopterećenu stranu, kao što se to vidi na slici 11. Naglo smanjenje otpornosti grede PB2 (skokovito ponašanje) zabilježeno je u većini mjernih položaja, naročito u točki koja slijedi neposredno nakon opterećenja od 210 kN zbog efekta pucanja.



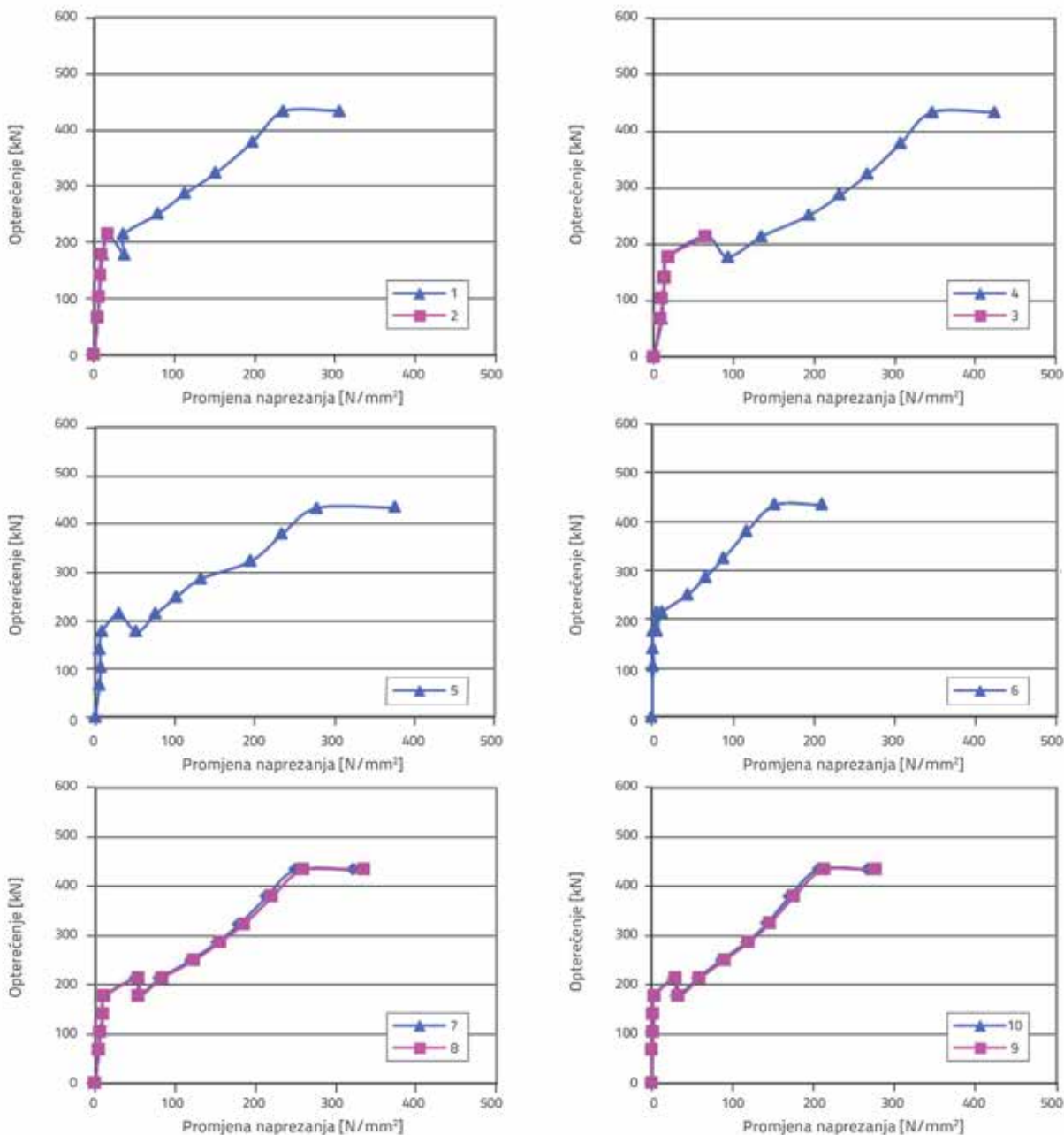
Slika 8. Položaji opterećenja i promjena napreznja natega na gredi PB1



Slika 9. Krivulje odnosa opterećenja i promjene naprezanja na gredi PB1 za razne položaje



Slika 10. Položaji opterećenja i promjena naprezanja natega na gredi PB2

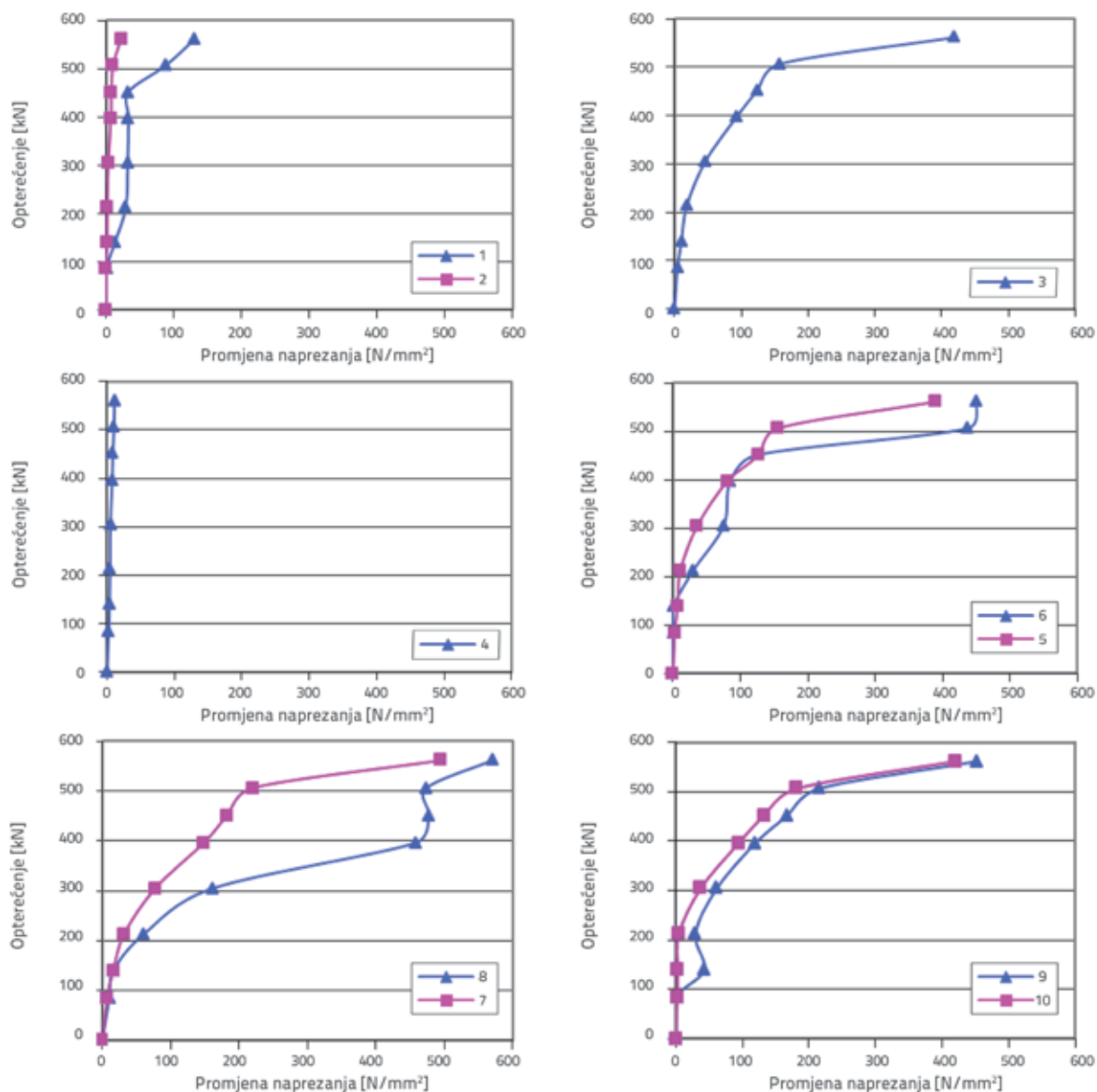


Slika 11. Krivulje odnosa opterećenja i promjene naprezanja na gredi PB2 za razne položaje

Također je analizirana i promjena naprezanja grede PB3 ojačane CFRP-om i to u položajima sličnim onima koji su korišteni za gredu PB2 a opisani su na slici 10. U položaju 8 zabilježena je najveća promjena naprezanja u nategama (570 N/mm<sup>2</sup>). Utjecaj prekidanja/pucanja i torzijskog opterećenja na opterećenoj strani doveo je do povećanja naprezanja u prednapetim žicama, naročito u položajima od 5 do 10. Prosječna promjena naprezanja iznosila je 456,14 N/mm<sup>2</sup> na gredi PB3, što je za 19 % manje u odnosu na gredu PB1, tj. za 45 % više u odnosu na gredu PB2. Ta

činjenica bitno naglašava važnost primjene CFRP-a u sandučastoj gredi. Osim toga, prosječna promjena naprezanja u nategama na opterećenoj strani iznosila je 275,14 N/mm<sup>2</sup>, što je za 40 % niže od promjene na neopterećenoj strani, gdje je takva promjena iznosila 462,33 N/mm<sup>2</sup> (slika 12.). Na nekim se krivuljama može uočiti lokalno popuštanje. Tome je uzrok vibriranje signala na mjernom uređaju tijekom ispitivanja. Osim toga, neka se očitavanja nisu mogla u potpunosti obaviti u ostalim položajima zbog oštećenja mjernih uređaja.





Slika 12. Krivulje odnosa opterećenja i promjene naprezanja na gredi PB3 za razne položaje

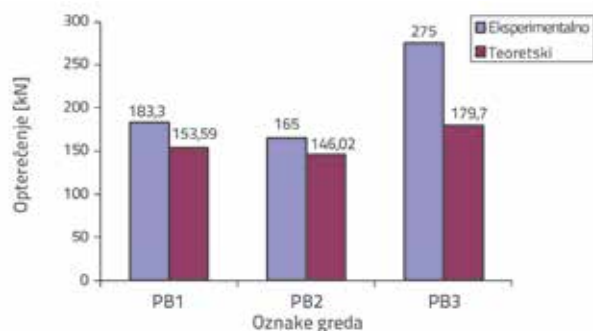
### 3.3. Opterećenja pri raspucavanju i načini popuštanja

Rezultati ispitivanja početnog raspucavanja na gredama PB1, PB2 i PB3 uspoređeni su s predviđanjima prema empirijskoj formuli iskazanoj u Eurokodu 2, kako je to prikazano u tablici 4. i na slici 13. [8]. Ti rezultati pokazuju dobru podudarnost s empirijskim rezultatima iz Eurokoda 2. Osim toga, spomenuti rezultati dokazuju da se primjenom CFRP-a bitno povećava otpornost sandučaste grede na pucanje/prekidanje, s tim da je opterećenje pri pojavi prvih pukotina na gredi PB3 bilo veće od odgovarajućeg opterećenja na gredama PB1 (50,03 %) i PB2 (66,67 %). U slučaju grede PB1, početna pojava pukotina kod 183,3 kN bila je iskazana u obliku vlasastih pukotina na obje strane grede, a naročito u srednjoj trećini analizirane zone.

Pukotine su postale sve vidljivije a očito povećanje uočeno je pri opterećenju od 476,7 kN kada su pukotine varirale od 1 do 2 mm, s trendom kontinuiranog širenja. Pri krajnjem graničnom opterećenju od 550 kN, širina pukotina varirala je od 5 do 10 mm, pri čemu je ova potonja vrijednost maksimalna širina zabilježena u ispitivanju. Najšira pukotina od 10 mm pojavila se na neopterećenoj strani (daleko od točke opterećenja) i prostirala se sve do vrha te je prolazila kroz pojasnicu. Najšire pukotine obično su se javljale u srednjoj trećini grede, dok su na drugoj, opterećenoj strani zabilježene pukotine širine od 0,5 do 1,5 mm. Osim toga, uočeno je i nekoliko posmičnih i torzijskim dijagonalnih pukotina, naročito na opterećenoj strani (blizu točke opterećenja). Za većinu posmičnih pukotina na neopterećenoj strani zabilježen je gotovo ravan vertikalni uzlazni trend širenja.

Tablica 4. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih (Eurokod 2) rezultata za pojavu pukotina nakon nanošenja opterećenja

Naziv grede	Eurokod 2 [kN]	Eksperimentalno ispitivanje [kN]	Razlika [%]
PB1	153,59	183,30	19
PB2	146,02	165,00	13
PB3	179,70	275,00	53



Slika 13. Eksperimentalni i teoretski rezultati opterećenja pri pojavi prve pukotine

Na gredi PB2, prve su se pukotine (širine manje od 1 mm) pojavile pri opterećenju od 165 kN. Nekoliko se pukotina pojavilo pri opterećenju od 201,7 kN u srednjoj trećini grede u blizini skretnika. Pukotine na neopterećenoj strani grede – kako u sredini tako i nakon skretnika – uglavnom su bile savojnog tipa, a nastajale su na dnu i postupno su se širile prema gore da bi se zatim granale prema pojasnici. Na opterećenoj strani, pukotine u srednjoj trećini zapravo su bile kombinacija posmičnih i torzijskih pukotina koje su se pojavile pod kutom u odnosu na os grede. Nekoliko malih pukotina, uglavnom savojnog tipa, te nekoliko kosih pukotina na pojasnici, pojavilo se neposredno nakon pucanja žice pri opterećenju od 201,7 kN. Nakon pucanja žica, postojeće su se pukotine produžile i počele se širiti prema gore. Većina pukotina nastala je na opterećenoj strani. Nekoliko pukotina pojavilo se na pojasnici pri opterećenju od 434 kN. Širina svih tih pukotina iznosila je otprilike 1 mm, što nije bio slučaj kod kontrolne grede bez pucanja.

Prve pukotine pojavile su se pri opterećenju od 275 kN na opterećenoj strani grede PB3 nakon nanošenja CFRP-a, što upućuje na efekt torzije. Dodatne pukotine pojavile su se nakon skretnika pri povećanju opterećenja na 366,7 kN. Ovakvu pukotinu pojavile su se na obje strane i bile su uglavnom savojnog tipa, kako u sredini tako i nakon skretnika, dok su na opterećenoj strani nakon skretnika pukotine bile kose i širile se prema pojasnici. Maksimalna širina pukotine na središnjem dijelu opterećene strane iznosila je 10 mm, ali je širina bila veća i varirala je od 13 mm do 4 mm u lijevom i desnom polju opterećene strane.

Na dnu grede na koju je položen CFRP nije bilo pukotina na prostoru na koji je položen CFRP.

To upućuje na čvrstoću CFRP-a i na njegov znatan doprinos otpornosti na savijanje, čak i u slučaju pucanja prednapetih

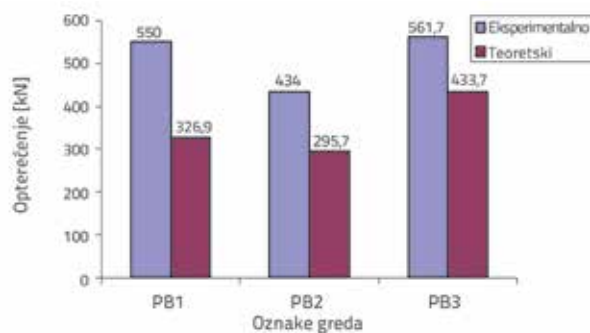
žica. Širina pukotine na dnu CFRP-a izvan područja ojačanog CFRP-om iznosila je 20 mm, a do popuštanja je došlo zbog odvajanja betona zajedno s CFRP-om. Nije uočeno otkazivanje niti odljepljivanje CFRP trake.

### 3.4. Opterećenje pri slomu

Eksperimentalno određena krajnja granična opterećenja uspoređena su s rezultatima prema Eurokodu 2 [8], kako je to prikazano u tablici 5. i na slici 14. Ustanovljena je dobra podudarnost između eksperimentalnih i empirijskih rezultata s maksimalnim razlikama od 1,68 %, što je zabilježeno kod grede PB1. Jasno se može uočiti da se krajnja granična nosivost oštećene grede mogla ponovno uspostaviti kod sandučaste grede ojačane CFRP-om. Krajnja granična nosivost grede PB3 bila je veća od krajnje granične nosivosti grede PB1 i PB2 i to za 2,13 % tj. 29,42 %. Osim toga, rezultati pokazuju da se pri pucanju žice granična nosivost grede PB2 smanjuje za 21,1 % u odnosu na gredu PB1.

Tablica 5. Usporedba graničnih opterećenja dobivenih eksperimentalno i prema Eurokodu 2

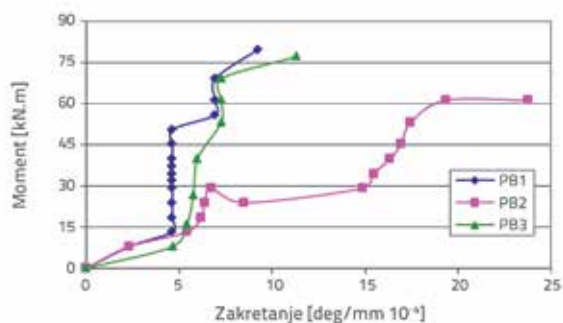
Naziv grede	Eurokod 2 [kN]	Eksperimentalno ispitivanje [kN]	Razlika [%]
PB1	326,9	550,0	68
PB2	295,7	434,0	47
PB3	433,7	561,7	30



Slika 14. Eksperimentalne i teoretske vrijednosti krajnjega graničnog opterećenja

### 3.5. Odnos momenta torzije i uvijanja kod sandučastih greda

Prije pojave pukotina, krivulje torzijski moment-uvijanje bile su gotovo identične kod svih greda, kao što se to vidi na slici 15. Nakon pucanja, torzijska se krutost bitno smanjila kod grede PB2. Međutim, nakon pucanja je zabilježeno veće uvijanje kod grede PB2 zbog oslobađanja većih sila u prednapetim žicama, pri čemu krutost sloma raste s porastom čvrstoće betona. Torzijska krutost pod utjecajem pucanja može se poboljšati primjenom CFRP-a kako je to prikazano za odnos momenta torzije i uvijanja kod grede PB3. Uvijanje je kod grede PB3 bilo izraženije od uvijanja kod grede PB1, što se može objasniti efektom pucanja.



Slika 15. Krivulja torzijski moment-uvijanje za sandučaste grede

#### 4. Zaključak

Rezultati se mogu sažeti na sljedeći način:

- Krivulje opterećenje – progib pokazuju da se progib sandučaste grede uzrokovan pucanjem prednapetih kabela bitno smanjuje kada se koristi CFRP.
- Prosječna promjena u naprezanju grede ojačane CFRP-om iznosila je 456,14 N/mm<sup>2</sup>, što je za 19 % niže od grede PB1, tj. za 45 % više od grede PB2. Osim toga, prosječna promjena naprezanja u nategama na opterećenoj strani grede PB3 iznosila je 275,14 N/mm<sup>2</sup>, što je za 40 % niže u usporedbi s neopterećenom stranom, gdje je zabilježena vrijednost od 462,33 N/mm<sup>2</sup>.
- CFRP traka bitno povećava otpornost sandučaste grede na utjecaj pucanja, pa je tako opterećenje pri pojavi prve

pukotine na gredi pod utjecajem pucanja bilo za 50,03 % veće nego kod grede PB1, tj. za 66,67 % veće nego kod grede PB2.

- Kod grede ojačane CFRP-om pukotine su se prvi put pojavile pri opterećenju od 275 kN, dok su se pukotine na gredi PB1 pojavile pri opterećenju od 183,3 kN a na gredi PB2 pri opterećenju od 165 kN. Pukotine nisu zabilježene na dnu grede kada je korišteno ojačanje CFRP-om. Međutim, pukotine su se pojavile izvan zone u kojoj je položen CFRP, i to na obje strane blizu oslonaca; to pokazuje da je CFRP vrlo djelotvorna metoda u smislu poboljšanja savojne čvrstoće, čak i u slučaju pucanja prednapetih žica.
- Pucanje može umanjiti krajnju graničnu nosivost sandučaste grede; međutim, kod grede ojačane CFRP-om (PB3) zabilježeno je krajnje granično opterećenje koje je za 2,13 % veće u odnosu na gredu PB1.
- Primjenom CFRP-a bitno se povećava torzijska krutost sandučaste grede te se na minimum svodi uvijanje u slučaju efekta pucanja.

#### Zahvale

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori koja im je dodijeljena za ovo istraživanje kroz Sveučilišnu potporu istraživačkog rada (GUP-2018-029) te kroz Sustav potpore za fundamentalna istraživanja (FRGS/1/2015/ TK01/UKM/02/4).

#### LITERATURA

- [1] Espion, B., Kurrer, K.E., Lorenz, W., Wetz, V.: Early Applications of Prestressing to Bridges and Footbridges in Brussels Area. 3<sup>rd</sup> International Conference on Construction History, Brussel, pp. 535-541, 2009.
- [2] Yuan, A., Dai, H., Sun, D., Cai, J.: Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending. *Engineering Structures*, 48 (2013), pp. 623-634.
- [3] Ghallab, A.: Calculating ultimate tendon stress in externally prestressed continuous concrete beams using simplified formulas. *Engineering Structures*, 46 (2013), pp. 417-430.
- [4] AASHTO, Bridge design specifications. 1998, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- [5] Naaman, A.E., Alkhairi, F.M.: Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons: Part 2 - proposed methodology. *Structural Journal*, 88 (1992) 6, pp. 683-692.
- [6] Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Nitsu, T., Chen, A.: Flexural behavior of externally prestressed beams with large eccentricities. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 20 (1999), pp. 165-170.
- [7] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05). American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, 2005.
- [8] CEN., Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. BS EN 1992-1-1, 2004.
- [9] Karayannis, C.G., Chalioris, C.E.: Design of partially prestressed concrete beams based on the cracking control provisions. *Engineering structures*, 48 (2013), pp. 402-416.
- [10] Saibabu, S., Srinivas, V., Sasmal, S., Lakshmanan, N., Iyer, N.R.: Performance evaluation of dry and epoxy jointed segmental prestressed box girders under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 38 (2013), pp. 931-940.
- [11] Wouters, J., Kesner, K., Poston, R.: Tendon corrosion in precast segmental bridges. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 1654 (1999), pp. 128-132.
- [12] Bishnu, P., Takashi, M.: Failure mechanism of empty and concrete-filled CFRP box beams, *Composite Structure*, 89 (2009) 1.
- [13] Grace, N.F., Enomoto, T., Sachidanandan, S., Puravankara, S.: Use of CFRP/CFCC reinforcement in prestressed concrete box-beam bridges, *ACI structural journal*, 103 (2006) 1, pp. 123-132.
- [14] Xie, J., P. Huang, Guo, Y.: Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed fiber reinforced polymer, *Construction and Building Materials*, 27 (2012) 1, pp. 149-157.
- [15] Dickson, T., Tabatabai, H., Whiting, D.: Corrosion assessment of a 34-year-old precast post-tensioned concrete girder, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, 38 (1993) 6.