

Primljen / Received: 5.8.2019.

Ispravljen / Corrected: 27.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 26.7.2020.

Dostupno online / Available online: 10.12.2020.

Ojačanje spregnutih nosača drvo-beton prednapetom armaturom

Autori:



¹Emir Maslak, dipl.ing.građ.
e_maslak@yahoo.com
Autor za korespondenciju



¹Prof.dr.sc. Dragoslav Stojić, dipl.ing.građ.
dragoslav.stojic@gmail.com



¹Prof.dr.sc. Dragoljub Drenić, dipl.ing.građ.
ddrenic@gaf.ni.ac.rs



²Prof.dr.sc. Esad Mešić, dipl.ing.građ.
esad_mesic@yahoo.com



¹Doc.dr.sc. Radovan Cvetković, dipl.ing.građ.
radovancvetkovic@yahoo.com

¹Sveučilište u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Srbija

²Sveučilište u Sarajevu, Građevinski fakultet, Bosna i Hercegovina

Prethodno priopćenje

Emir Maslak, Dragoslav Stojić, Dragoljub Drenić, Esad Mešić, Radovan Cvetković

Ojačanje spregnutih nosača drvo-beton prednapetom armaturom

Spregnuti nosači drvo-beton vrsta su suvremenih konstrukcija. Nastaju sprežanjem drvenoga i betonskog nosača. Projektiraju se tako da se betonski dio nosača postavlja u tlačnoj, a dio nosača od drveta u vlačnoj zoni. Za sprežanje se mogu upotrijebiti različite vrste moždanika, od mehaničkih (vijci, čavli, perforirane ploče, dijelovi čeličnih profila i dr.), do kemijskih (razne vrste lijepila). U radu je ispitana mogućnost aktivnoga ojačanja takvoga nosača prednapetom armaturom. Prikazan je jedan od načina unošenja vanjske sile prednapinjanja. Priloženi su određeni rezultati ispitivanja ojačanih nosača i upoređeni s istim takvim nosačima, ali bez ojačanja.

Ključne riječi:

spregnuti nosači, drvo-beton, moždanici, aktivno ojačanje, vanjska armatura, prednapinjanje

Research Paper

Emir Maslak, Dragoslav Stojić, Dragoljub Drenić, Esad Mešić, Radovan Cvetković

Strengthening timber-concrete composite girders with prestressed reinforcement

Timber-concrete composite girders are a modern type of structure. They are formed by composite connection of a timber and concrete girder. They are designed in such a way that the concrete part of the girder is placed in the compression zone and the timber part of the girder in the tension zone. Various types of shear connectors are used for establishing this connection: from mechanical ones (bolts, nails, perforated plates, parts of steel sections, etc.) to chemical ones (various types of glue). The possibility of active strengthening of such girders with prestressed reinforcement is investigated in this paper. One possibility of applying external prestressing force is presented. Some strengthened-girder test results are presented and compared with results for similar girders but without strengthening.

Key words:

composite girders, timber-concrete, shear connectors, active strengthening, external reinforcement, prestressing

Vorherige Mitteilung

Emir Maslak, Dragoslav Stojić, Dragoljub Drenić, Esad Mešić, Radovan Cvetković

Bewehrung von Holz-Beton-Verbundträgern mit vorgespannter Bewehrung

Holz-Beton-Verbundträger sind eine Art moderne Konstruktion. Sie werden durch Kopplung eines Holz- und eines Betonträgers gebildet. Sie sind so ausgelegt, dass der Betonteil des Trägers in der Druckzone und ein Teil des Holzträgers in der Zugzone angeordnet ist. Zum Koppeln können verschiedene Arten von Verbindern verwendet werden, von mechanischen (Schrauben, Nägel, Lochplatten, Teile von Stahlprofilen usw.) bis hin zu chemischen (verschiedene Arten von Klebstoffen). In der Arbeit wurde die Möglichkeit einer aktiven Bewehrung eines solchen Trägers mit vorgespannter Bewehrung untersucht. Es wird eine Möglichkeit zum Einbringen der externen Vorspannkraft gezeigt. Bestimmte Testergebnisse von bewehrten Trägern sind beigefügt und werden mit denselben Trägern verglichen, jedoch ohne Bewehrung.

Schlüsselwörter:

Verbundträger, Holz-Beton, Dübel, aktive Bewehrung, Außenbewehrung, Vorspannung

1. Uvod

Spregnuti nosači drvo-beton, nastali su ponajprije iz potrebe za rekonstrukcijom postojećih starih međukatnih konstrukcija od drva, u vremenima poslije velikih ratova, kada je vladala nestašica čelika. Izgradnjom betonske ploče preko drvenih nosača na kojima su prethodno ugrađena mehanička spajala (čavli, vijci, komadi profila i dr.), stvoren je jedan novi nosač koji je, osim povećanja nosivosti, imao i druge značajne pogodnosti:

- preko sloja betona koji je naknadno ugrađen olakšano je izvođenje slojeva koji poboljšavaju zvučnu, termo i hidroizolaciju objekta
- krutost AB ploče dovoljno je velika da izjednači horizontalne pomake u razini međukatne konstrukcije, što značajno poboljšava dinamičke karakteristike objekta u cjelini
- povećana požarna otpornost objekta
- kada drveni dio nosača ostaje vidljiv unutar objekta, zbog svoje "topline" i lijepoga izgleda, ima pozitivan uticaj na interijer.

Iz navedenoga se vidi da se na taj način osim poboljšanja statičkih i dinamičkih karakteristika uz razmjerno laku montažu značajno poboljšavaju parametri vezani za funkcionalnost objekta. Zahvaljujući tako povoljnim karakteristikama spregnutih nosača u posljednje se vrijeme sve češće koriste ne samo kao rješenja prilikom rekonstrukcije i ojačanja postojećih objekata već i u projektiranju novih. Razvoj tehnologije koji je omogućio izradu lijepljenih lameliranih nosača uklonio je ograničenja u pogledu raspona i oblika poprečnoga presjeka, koja su postojala kod nosača od masivnoga drveta, pa je sada moguće projektirati takve nosače sa značajnim rasponima. U visokogradnji, ovisno o namjeni objekta, takvi se nosači mogu upotrebljavati za raspone do 10,0 m pa i više, dok se u mostogradnji nosači raspona od 30,0 do 40,0 m drže ekonomski opravdanim (Evenstad Bridge 5 x 36,0 m, Vihantaslami Bridge 21,0 + 3 x 42,0 + 21,0 m).

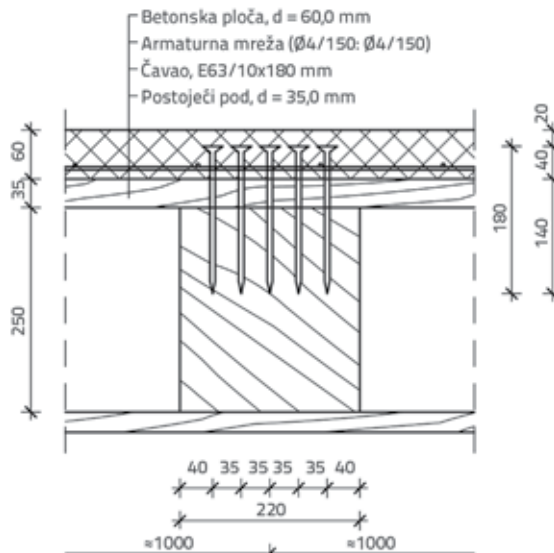
S druge strane, kod prednapetih nosača se još u fazi montaže izazivaju deformacije u određenom elementu (ili cijeloj konstrukciji), kako bi se u fazi eksploatacije osiguralo povoljnije ponašanje. Pogodnost se takvih nosača najviše vidi u tome što projektanti aktivnije sudjeluju u preraspodjeli stanja naprezanja i deformacija no što je to slučaj kod klasičnih nosača.

2. Spregnuti nosači drvo-beton

Kao posljedica povećanoga opsega primjene takvih nosača u graditeljstvu pojavila se potreba da se što bolje prouči njihovo ponašanje u realnim konstrukcijama. Primjena takvoga konstrukcijskog sustava zabilježena je prilikom ojačanja drvene međukatne konstrukcije zgrade "The Good Shepherd" u Bratislavi, 1960. godine [1]. Poprečni presjek ojačanoga nosača prikazan je na slici 1.

Na postojećim drvenim gredama ugrađena su četiri reda čavala preko kojega je ugrađena betonska ploča debljine 6,0 cm. Ispitivanja provedena na tim nosačima pokazala su

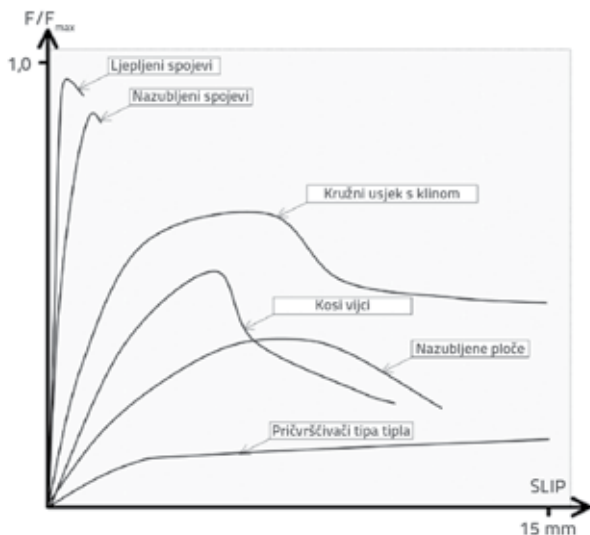
prirast krutosti i nosivosti za približno 4 puta. Nakon toga, pa do današnjih dana, proveden je znatan broj teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, koja su dala mnoge odgovore projektantima i pružili im mogućnost da projektiraju takve konstrukcije u različitim ambijentalnim uvjetima.



Slika 1. Poprečni presjek spregnutoga nosača zgrade "The Good Shepherd" [1] (dimenzije su u mm)

Brojni su čimbenici koji određuju ponašanje tih nosača pod opterećenjem. Ako se izuzmu geometrijske i mehaničke karakteristike konstitutivnih elemenata, najveći utjecaj ima krutost spajala upotrijebljenih za sprezanje. Veza drvenoga i betonskog nosača može se ostvariti na više načina. Najčešće su u upotrebi mehanička spajala koja točkasto povezuju ta dva elementa (čavli, vijci, komadi armaturnih šipki). Ta spajala mogu biti ugrađena vertikalno ili zakošeno. Veza može biti ostvarena i usijecanjem žljebova u drveni dio nosača koji se ispunjavaju betonom pri njegovoj ugradnji. Osim tih spajala u uporabi su i moždanici koji vezu ostvaruju kontinuirano – nazubljene ploče, perforirane ili glatke ploče sa zakrivljenim vrhom itd. U novije vrijeme, zahvaljujući tehnološkom razvitku, za sprezanje tih nosača upotrebljavaju se i ljepila naonošenjem kojih se mogu formirati potpuno spregnuti nosači. Općenito, spajala se mogu klasificirati [2] prema materijalu od kojega su napravljeni (metal, drvo), prema načinu ugradnje uzduž grede (diskretni/kontinuirani, vertikalni/zakošeni), prema načinu ugradnje u drveni dio nosača (lijepljeni/nelijspljeni, prednapeti/neprednapeti). Vrsta upotrijebljenoga moždanika određuje stupanj postignutoga sprezanja, a samim time i odgovor toga nosača na vanjsko opterećenje. Klasifikacija moždanika u funkciji krutosti i stupnja postignutoga sprezanja dana je u [3]. Po toj su klasifikaciji sva spajala svrstana u četiri kategorije (A, B, C i D), pri čemu su u prvoj (A) kategoriji spajala s najmanjom čvrstoćom i duktilnošću, a u posljednjoj (D) kategoriji spajala koja ostvaruju gotovo potpuno sprezanje.

Ponašanje spajala najčešće se definira modulom klizanja. Do tog se podatka najpouzdanije dolazi eksperimentalnim putem (*push out* testom). Opsežna istraživanja o određivanju tog parametra za različite tipove spajala mogu se naći u [4]. Rezultati su prikazani u obliku usporednih dijagrama (slika 2.) na kojima se mogu vidjeti krivulje sila-pomak ispitanih uzoraka. Na slici se jasno može vidjeti da, s gledišta nosivosti, najpovoljnije karakteristike prilikom spajanja ta dva nosača imaju veze nastale lijepljenjem, a najnepovoljnije one ostvarene vijcima. Utjecaj mehaničkih karakteristika betonskoga dijela spregnutoga nosača bio je predmet ispitivanja [5], u kojemu je upotrijebljen beton volumne težine $1,60 \text{ kN/m}^3$ radi smanjenja stalnoga opterećenja na nosaču. Zaključeno je da takav tip betona ima značajan utjecaj na efektivnu krutost na savijanje cijele konstrukcije, što za posljedicu ima to da spajala moraju biti na manjemu razmaku nego što je slučaj kod kompozita od betona normalne volumne težine.



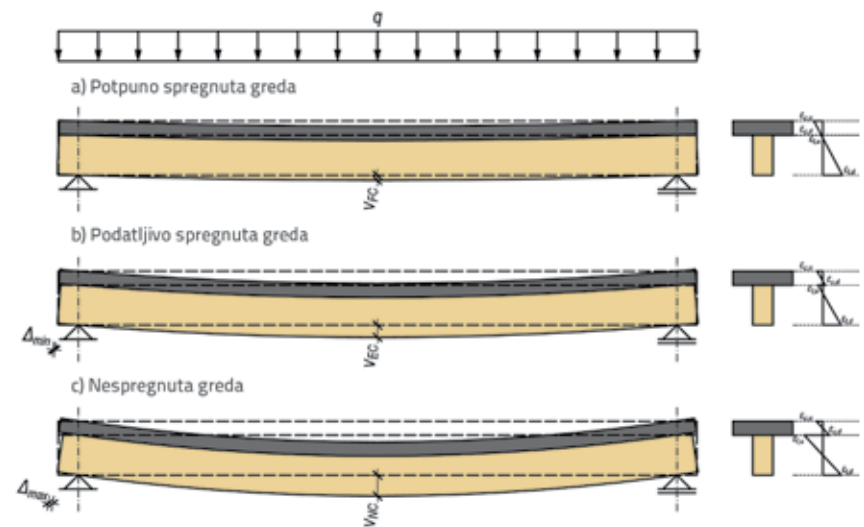
Slika 2 Modul klizanja za različite vrste spajala [4]

Da bi se procijenila nosivost i mehanizmi sloma, proveden je veliki broj ispitivanja na realnim nosačima. Posebnu vrijednost imaju ispitivanja provedena na nosačima koji su prvo bili izloženi dugotrajnom opterećenju, a zatim kratkotrajnim opterećenjem ispitani do loma. Na taj se način može pratiti utjecaj reoloških parametara na ponašanje konstrukcije. Jedno takvo istraživanje prikazano je u [6]. Ispitane grede opterećene su jednoliko raspodijeljenim opterećenjem intenziteta $4,0 \text{ kN/m}$ u trajanju od 5 godina, tijekom kojih su praćeni ambijentalni uvjeti (temperatura, relativna vlažnost zraka), vlažnost u

drvenom dijelu nosača, globalne (progib u sredini nosača, relativni pomaci greda iznad ležajeva) i lokalne (relativne deformacije usporedne s vlaknima i okomite na njih u sredini nosača) deformacije. Nakon toga je proveden test pod kratkotrajnim opterećenjem. Pripremljene su grede radi određivanja položaja neutralne osi opterećene u elastičnom području, nakon čega je provedeno ispitivanje do sloma. Iz ispitanih greda isječeni su dijelovi nosača kako bi se proveo *push-out* test i odredio modul klizanja. Na osnovi dobivenih rezultata, osim usporedbe rezultata dobivenih eksperimentalnim i analitičkim putem, za različite uporabne klase i module klizanja spajala, izvršena je procjena vrijednosti deformacija nakon 50 godina. Skupljanje betona, kao neizbježan dio procesa očvršćivanja, jedan je od nedostataka pri izvedbi tih nosača mokrim postupkom. Istraživanja provedena u [7] imala su za cilj ispitati mogućnost spajanja gotove betonske ploče s drvenim nosačem suhim postupkom. Ispitivanja su izvršena pod statičkim (kratkotrajnim i dugotrajnim) i dinamičkim opterećenjem. Ispitane su grede T presjeka raspona $4,80 \text{ m}$. Upotrijebljene su dvije vrste spreznja. Kod prvog sustava specijalno je oblikovan "U" profili čiji se gornji dio prethodno ugrađuje u betonsku ploču, a drugi se dio, uz pomoć čavala, veže za drvenu gredu. Kod drugog sustava koriste se vijci promjera $20,0 \text{ mm}$ koji se za gotovu betonsku ploču vežu preko metalnih čahura prethodno ugrađenih u nju. Stupanj postignutoga spreznja na ispitanim gredama nije bio na zadovoljavajućoj razini, a varirao je 31% za prvi i 57% za drugi sistem spreznja. Numerička istraživanja u ovom istraživanju preporučuju uporabu drugoga sistema spreznja u kombinaciji sa žljebovima, što može znatno povećati stupanj postignutoga spreznja.

2.1. Teorija elastičnoga spreznja

Prilikom spajanja betonske ploče i drvene grede mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja prikazana na slici 3.



Slika 3. Deformacije nosača ovisno o stupnju spreznja

Kako će se spregnuti nosači pod opterećenjem ponašati, ovisi o stupnju ostvarenoga spreznjanja (*composite efficiency*). Taj parametar se prema [8] može izračunati prema izrazu (1):

$$E = \frac{\Delta_{NC} - \Delta_{PC}}{\Delta_{NC} - \Delta_{FC}} \quad (1)$$

gdje su Δ_{NC} , Δ_{PC} i Δ_{FC} redom progibi nespregnutoga nosača, djelomično (elastično) spregnutoga nosača i potpuno (kruto) spregnutoga nosača.

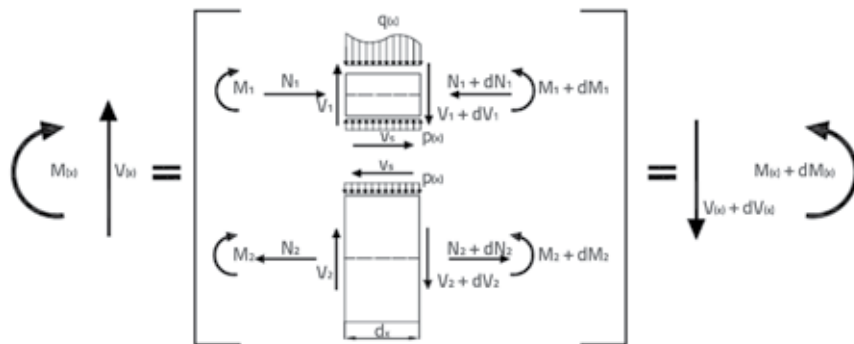
Na slici 3.a. vide se progib i relativna deformacija grede koja je potpuno spregnuta. Kod tih greda, teorijski, nema relativnih pomaka u kontaktnoj ravnini, nego su spajala dovoljno kruta da u potpunosti prihvate posmična naprezanja. Dijagram relativnih deformacija ima jednu neutralnu os i u ravnini spoja vrijednost im je ista. Za realizaciju takvog nosača neophodna je primjena kontinuiranoga spajala ili lijepila. Koeficijent ostvarenoga spreznjanja za taj tip nosača $E \rightarrow 1$.

S druge strane, na slici 3.c. slučaj je nespregnute grede. Kod tog nosača dijagram relativnih deformacija ima dvije neutralne osi i u slučaju savijanja bez uzdužne sile te se neutralne osi nalaze u težištima pojedinih nosača. Krutost spajala na kontaktu betonskoga i drvenog nosača ima zanemarljivo male vrijednosti, pa su relativni pomaci između pojedinih elemenata nosača maksimalni. Za taj tip nosača koeficijent $E \rightarrow 0$.

Spregnuti nosači drvo-beton pokrivaju područje između prethodna dva granična slučaja (slika 3.b.). Dijagram relativnih deformacija za najčešće primjenjivana spajala ima dvije neutralne osi koje su, ovisno od njihovim krutostima, na znatno manjem razmaku no što je to slučaj kod trećega nosača. Relativni pomaci između elemenata postoje, ali su manji nego u nespregnutome nosača.

Kod prvoga se nosača proračun, utemeljen na elastičnoj teoriji, sastoji u tome da se izračunaju geometrijske karakteristike idealiziranoga poprečnog presjeka i da se za tako idealizirani poprečni presjek izračunaju uzdužna naprezanja i relativne deformacije u rubnim vlaknima konstitutivnih elemenata. Kod trećega tipa nosača, koji su najrjeđi u inženjerskoj upotrebi, postupak je takav da se izračuna krutost pojedinih elemenata nosača i da se proporcionalno krutosti pojedinih elemenata izvrši preraspodjela unutarnjih sila: moment - proporcionalno krutosti na savijanje EI , eventualna uzdužna sila - proporcionalno aksijalnoj krutosti EA , dok najveći dio poprečne sile preuzima drveni nosač. Kad je riječ o nosaču na slici 3.b., zbog popustljivosti spajala izrazi koji opisuju stanje naprezanja i deformacija pod proizvoljnim opterećenjem znatno su složeniji. Analitičko rješenje spregnute grede s popustljivim moždanicima, razvijeno s pomoću diferencijalne jednadžbe ravnoteže, može se naći u [9, 10]. Pretpostavke koje su uvedene pri oblikovanju sustava jednadžbi su:

- linearno-elastično ponašanje materijala i spajala



Slika 4. Spregnuta greda s popustljivim moždanicima, uvjeti ravnoteže diferencijalno maloga dijela [11]

- pretpostavka o malim pomacima (teorija prvog reda)
- AB ploča i drvena greda pri deformaciji imaju jednake nagibe elastičnih linija
- vrijedi Bernoullijeva hipoteza o ravnim presjecima
- pretpostavlja se da su spajala ravnomjerno (kontinuirano) raspoređena po spoju
- poprečni presjeci su konstantni po uzdužnoj osi nosača.

Za dane uvjete postavljene su jednadžbe ravnoteže diferencijalno maloga dijela nosača prikazanoga na slici 4.

Analitičko rješenje tog problema svodi se na nehomogenu diferencijalnu jednadžbu četvrtoga stupnja s konstantnim koeficijentima, oblik koje je dan izrazom (2):

$$w^{IV}(x) - \alpha^2 \cdot w''(x) = \alpha^2 \cdot \frac{M(x)}{EI_\infty} + \frac{q(x)}{EI_0} \quad (2)$$

gdje su:

$$\alpha^2 = k \cdot \left(\frac{1}{EA_1} + \frac{1}{EA_2} + \frac{a^2}{EI_0} \right) \quad (3)$$

$$EI_0 = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad (4)$$

$$EI_\infty = EI_0 + \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2} \cdot a^2 \quad (5)$$

Izrazom (4) definirana je krutost na savijanje nespregnute grede, dok izraz (5) daje krutost na savijanje potpuno spregnutoga presjeka. Rješenje u razmjerno dobro opisuje ponašanje tih nosača pod opterećenjem, ali ima i određenih nedostataka. Prvi je nedostatak to što je za malo složenije konstalacije opterećenja rješenje u zatvorenom obliku teško naći. Drugi je nedostatak to što - budući da su i drvo i beton reološki materijali - ti fenomeni nisu obuhvaćeni ovim rješenjem. Aneks B Eurokoda 5 [12] definira dimenzioniranje višedjelnih nosača konstantnoga poprečnog presjeka povezanih mehaničkim spajalima. Taj se postupak oslanja na teoriju elastičnoga spreznjanja uz određena pojednostavnjenja. Da bi se dobilo rješenje u zatvorenome obliku, pretpostavljeno je da opterećenje djeluje u obliku sinusne funkcije. U literaturi se ta metoda proračuna naziva γ -postupak

i sastoji se u proračunu efektivne krutosti na savijanje elastično spregnutoga presjeka. U taj su izraz ugrađeni svi parametri koji su bitni za preraspodjelu sila unutar poprečnoga presjeka nosača: mehaničke karakteristike (modul elastičnosti drvenoga i betonskog dijela poprečnoga presjeka), geometrijske karakteristike (ploština, momenti tromosti) i popustljivost spajala u razini kontakta nosača (modul klizanja). Efektivna krutost na savijanje računa se prema izrazu (6):

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (6)$$

Budući da se u ovom slučaju poprečni presjek sastoji od 2 elementa, parametar i koji se pojavljuje u izrazu (6), biti 2. Ostali čimbenici u jednadžbi (6) su:

- moduli elastičnosti drveta i betona, E
- momenti tromosti drveta i betona, $I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}$ (7)
- ploštine poprečnih presjeka, $A_i = b_i \cdot h_i$ (8)
- $\gamma_2 = 1$
- $\gamma_1 = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 A_1 \cdot s_1}{K_1 \cdot l^2} \right]^{-1}$ (9)

U izrazu (9) se osim modula elastičnosti i ploština pojavljuju:

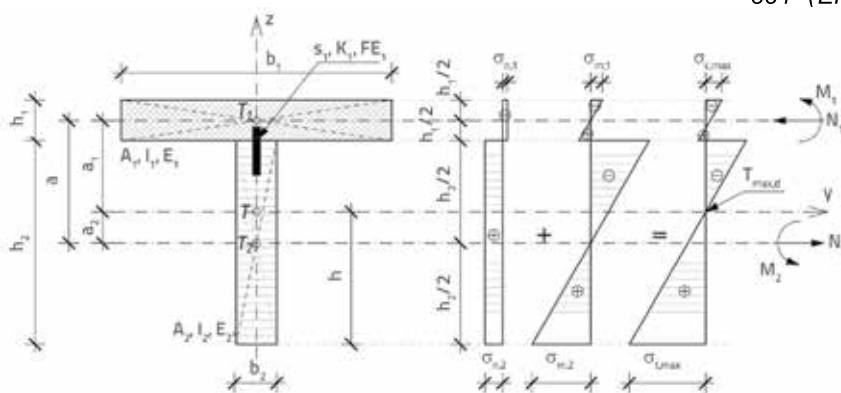
- ekvivalentni razmak spajala (s_1) koji se rabi za sprezanje, i ako u vezi nisu na istome razmaku, mogu se izračunati:

$$s_{eq} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} \quad (10)$$

- modul klizanja upotrijebljenih moždanika u ravni spoja spregnutog nosača (K_1), a dobiva se eksperimentalno ili prema preporukama [12]. Prema prijedlogu [13] za vrijednosti modula klizanja uzima se da je:

$$K_{ser} = \frac{0.40 R_m}{V_{0.40}}, K_u = \frac{0.60 R_m}{V_{0.60}} \text{ ili } K_u = \frac{2}{3} K_{ser}$$

$$a_i = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 A_1 \cdot a}{\gamma_1 \cdot E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad (11)$$



Slika 5. Naprezanja u elastično spregnutom nosaču

Na slici 3. može se vidjeti da je $a = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2}$, odnosno da je $a_2 = a - a_1$. Preraspodjela unutarnjih sila i naprezanja po elementima određuje se (slika 5.):

a) za AB ploču:

$$N_1 = \frac{M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \gamma_1 \cdot a_1 \cdot E_1 \cdot A_1, \text{ a odatle je } \sigma_{n,1} = \frac{N_1}{A_1} \quad (12)$$

$$M_1 = \frac{M_{Ed}}{(EI)_{eff}} E_1 \cdot I_1, \text{ a odatle je } \sigma_{m,1} = \pm \frac{M_1 \cdot h_1}{I_1} \cdot \frac{1}{2} \quad (13)$$

$$\text{i konačno } \sigma_{c,max} = \sigma_{n,1} + \sigma_{m,1}, \text{ uz uvjet da je } \frac{\sigma_{c,max}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (14)$$

b) za drvenu gredu:

$$N_2 = \frac{M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \gamma_2 \cdot a_2 \cdot E_2 \cdot A_2, \text{ a odatle je } \sigma_{n,2} = \frac{N_2}{A_2} \quad (15)$$

$$M_2 = \frac{M_{Ed}}{(EI)_{eff}} E_2 \cdot I_2, \text{ a odatle je } \sigma_{m,2} = \pm \frac{M_2 \cdot h_2}{I_2} \cdot \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$\text{i konačno } \sigma_{t,max} = \sigma_{n,2} + \sigma_{m,2}, \text{ uz uvjet da je } \frac{\sigma_{n,2}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,2}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (17)$$

Kontrola posmičnih naprezanja:

Uz pretpostavku da kompletnu poprečnu silu preuzima drvena greda:

$$\tau_2 = \frac{0.50 \cdot V_{Ed} \cdot E_2 \cdot h_2^2}{(EI)_{eff}}, \text{ uz uvjet da je } \frac{\tau_2}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (18)$$

gdje su M_{Ed} i V_{Ed} granične vrijednosti utjecaja dobivene pomoću odgovarajućih parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Za kontrolu prema graničnom stanju uporabljivosti treba izračunati efektivnu krutost na savijanje uz pomoć modula klizanja K_{ser} . S tako izračunanim modulom klizanja za slučaj jednoliko raspodijeljenoga opterećenja određuje se progib nosača:

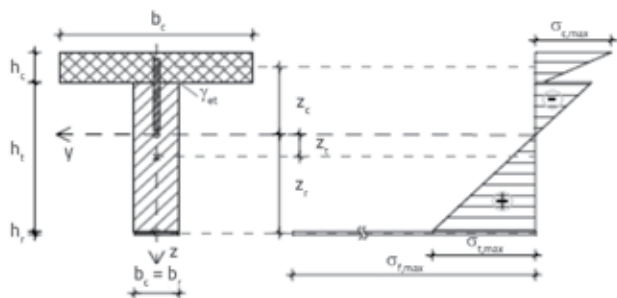
$$v_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{(EI)_{-f,ser}}, \text{ uz uvjet da je } v_{max} \leq v_{dop} \quad (19)$$

Kao što je već rečeno, i beton i drvo su reološki materijali, što znači da su skloni promjeni mehaničkih karakteristika tijekom vremena. Na te promjene utječu razni čimbenici, a najbitniji među njima su trajanje opterećenja, vlažnost zraka, temperatura itd. Da bi se u nekoj mjeri u proračunu obuhvatili ti fenomeni, dokaz nosivosti takvih nosača provodi se u dvije etape. U prvoj se etapi vrši kontrola nosivosti za kratkotrajna opterećenja s mehaničkim karakteristikama materijala koje se dobivaju već utvrđenim

postupcima. U drugoj se etapi provodi dokaz nosivosti nosača s dugotrajnim učincima. Primjena te metode proračuna s numeričkim primjerom može se naći u [14].

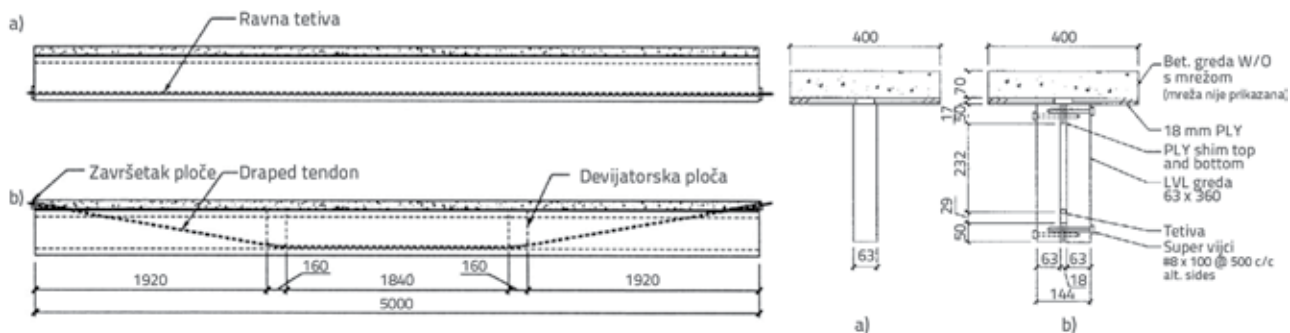
3. Ojačanja spregnutih nosača drvo-beton

Načini ojačanja različitih tipova konstrukcija do današnjih su dana dobro proučeni i dostupni širokom krugu inženjera. Primjena materijala visokih mehaničkih performansi, kao što su karbonska vlakna, taj postupak znatno olakšavaju. Razrađena je tehnologija za njihovu razmjerno laku primjenu, a neznatno povećavaju dimenzije nosivih elemenata i nisu podložne koroziji. Problematikom ojačavanja spregnutih nosača nosača do sada se bavio mali broj istraživača. U radu [15] prikazana je mogućnost ojačanja spregnutoga nosača s pomoću karbonskih vlakana (eng. *carbon fibre reinforced polymers - CFRP*) s prijedlogom za proračun nosivosti koji je u saglasnosti s preporukama danima u [14]. Ojačanje nosača izvršeno je tako da su karbonska vlakna postavljena na donjem, vlačnom, rubu drvene grede, kako je prikazano na slici 6. Ojačanjem vlačne zone drvene grede osim globalnoga povećanja nosivosti dobiva se i duktilniji nosač, budući da krhki slom u drvenim nosačima nastupa na vlačnim vlaknima. Nedostatak je tog postupka to što su ispitivanja koja su provedena na drvenim nosačima ojačanim na opisani način pokazala problem delaminacije drvenoga nosača. Delaminacija značajno prethodi dostizanju kapaciteta nosivosti karbonskoga vlakna.



Slika 6. Model nosača ojačanoga CFRP vlaknima [15]

Mogućnost ojačanja nosača nastalih sprežanjem drvene grede od furnirskih elemenata (LVL nosači) i betona prikazan je u [16]. Ispitana su tri tipa nosači raspona 6,0 m. Prvi tip su spregnute



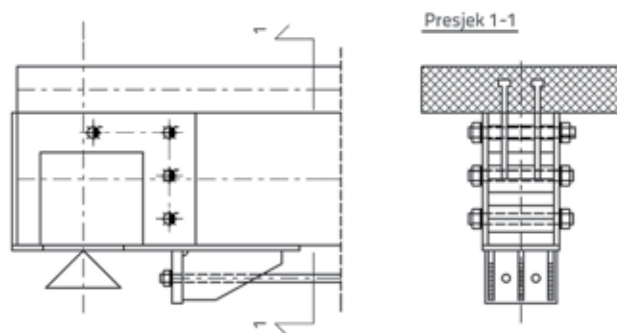
Slika 7. Izgled i dimenzije ispitanih nosača (dimenzije su u mm) [16]

grede od kojih je jedna izvedena "mokrim" postupkom od betona normalne težine, a druga od olakšanoga betona koja je izlivena posebno, a potom s drvenom gredom na licu mjesta povezana. Drugi tip su grede kod kojih je primijenjeno prednapinjanje vanjskom armaturom. U jednoj je gredi pružanje armature poligonalno s dva devijatora, a sidrenje se vrši u betonskoj ploči, dok je u drugoj pružanje pravocrtno, a sidrenje se vrši u drvenoj gredi. Izgled prednapetih nosača, kao i oblik i dimenzije poprečnih presjeka dani su na slici 7.

Osim razlike u poprečnim presjecima i načinu unosa sile prednaprezanja, primijenjeni su i različiti sistemi sprežanja, tako da je kod prednapetoga nosača s poligonalnim pružanjem primijenjen krući sistem sprežanja, a kod nosača s pravocrtnim pružanjem fleksibilniji sustem. Od svih tipova nosača ispitan je po jedan uzorak. Prije statičkoga ispitivanja do sloma provedeno je utvrđivanje dinamičkih karakteristika nosača.

Za razliku od prethodnoga, u ovom je radu ispitana mogućnost ojačanja spregnutoga nosača s pomoću armature koje se nalazi izvan njegovoga poprečnog presjeka. Radi dobivanja pouzdanih rezultata ispitan je ukupno 10 spregnutih nosača, od kojih su 5 samo spregnuti, a drugih 5 su spregnuto-prednapeti.

Poseban problem pri oblikovanju takvoga nosača bio je način uvođenja sile prednapinjanja, a da se izbjegnu učinci popuštanja u vezama za usidrenje armature. Sistem koji je prihvaćen za ispitivanje sastoji se od čeličnoga veznog elementa koji je, na kraju nosača, u obliku kutije (slika 8.).



Slika 8. Konstrukcija za unos sile prednaprezanja

Prednost takvoga sistema za unos sile prednapinjanja u jednostavnosti je njegove primjene. Na slici 8 i slici 11. može se vidjeti da je pružanje vanjske armature pravocrtno,

pa se unos sile prednapinjanja vrši s pomoću običnoga ili moment-ključa. Ta se pogodnost odražava i u mogućnosti naknadnoga povećanja sile u armaturi, jer će do gubitka sile, kako u fazi prednapinjanja, tako i u fazi eksploatacije, sigurno doći. Tlačnu komponentu sprega sile, koji se javlja kao posljedica ekscentričnoga unosa sile u nosač, prenosi čeonu ploču drvene grede, dok vlačnu komponentu, u najvećoj mjeri, prenose vijci.

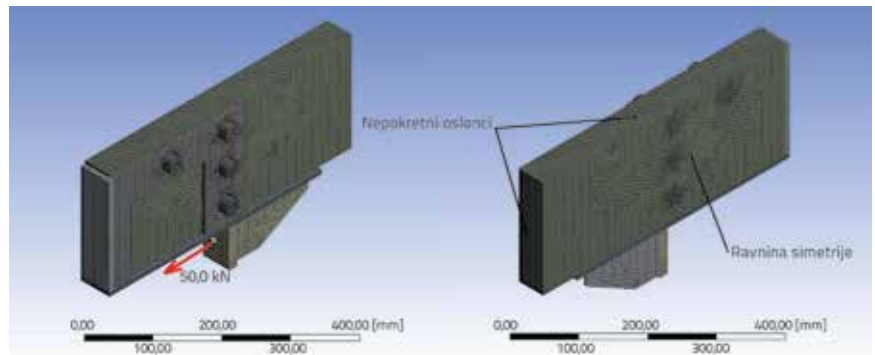
Da bi se sagledalo stanje naprezanja na mjestu unosa sile prednapinjanja u nosač prije samoga ispitivanja, urađena je analiza s pomoću metode konačnih elemenata. Modeliran je samo drveni dio nosača s čeličnim dijelom na koji je nanesena sila intenziteta 50,0 kN, što je bila očekivana sila u jednoj zatezi. Dio nosača koji je modeliran prikazan je sa stvarnom geometrijom s pomoću SOLID elemenata. Veze (drveni nosač – čelična ploča, drveni nosač – vijci i čelična ploča – vijci) modelirane su s pomoću CONTACT i TARGET konačnih elemenata, uz zanemarivanje utjecaja trenja. Posebnu problematiku pri numeričkoj analizi ovih nosača zbog izražene anizotropnosti čini materijalni model drva.

Za pripremnu analizu, koja je provedena na modelu, nije primijenjen složeniji materijalni model, koji bi obuhvatio anizotropiju i post-elastično ponašanje drva, već je prihvaćen izotropni model u linearnom području s modulom elastičnosti od 1100,0 kN/cm². Pri modeliranju ovoga dijela konstrukcije, kako bi se skratilo vrijeme proračuna, upotrijebljeno je svojstvo simetrije, pa je analizirana jedna njezina polovina. Numerički model s generiranom mrežom konačnih elemenata prikazan je na slici 9.

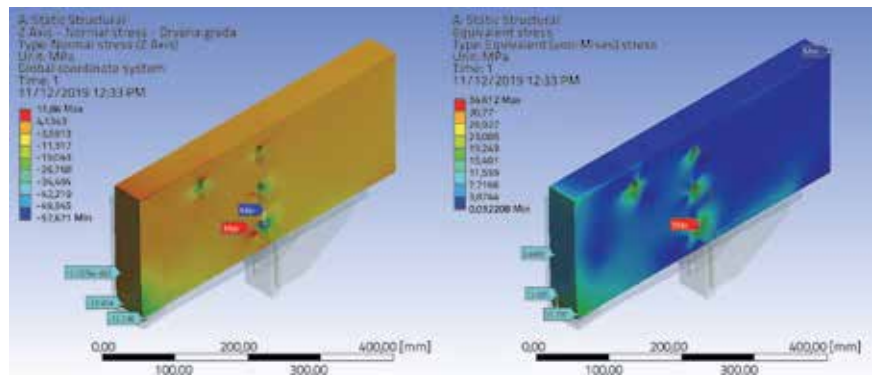
Rezultati proračuna prikazani su na slici 10. na kojoj se mogu vidjeti uzdužna naprezanja na pravcu osi nosača i ekvivalentna (*von-Mises*-ova) naprezanja. Uzdužna naprezanja prikazana su kako bi se u čeonom dijelu drvene grede kvalitativno procijenila i na taj način stekao uvid u vrstu naprezanja (tlak ili vlak). Dobiveni rezultati u velikoj mjeri potvrđuju očekivanja.

4. Eksperimentalna analiza nosača

Eksperimentalnoj analizi nosača o kojima je riječ prethodila je detaljna nelinearna numerička analiza utemeljena na metodi



Slika 9. Numerički model elementa za unos sile prednapinjanja



Slika 10. Rezultati u drvenom dijelu nosača dobiveni primjenom metode konačnih elemenata

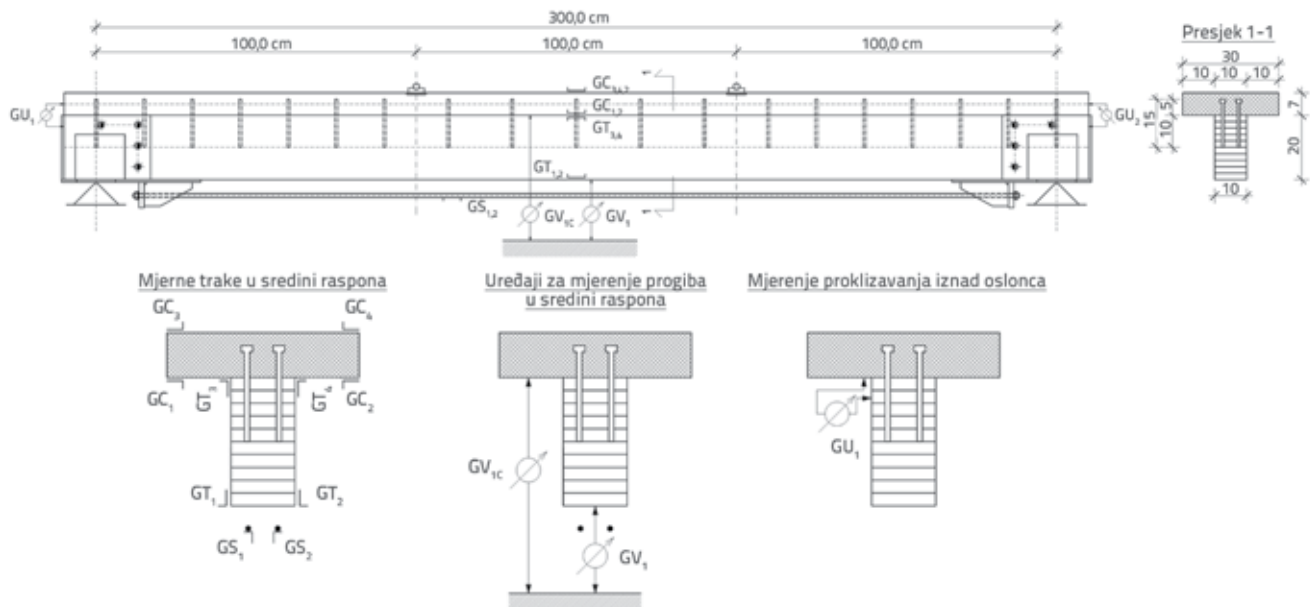
konačnih elemenata (ANSYS Workbench 16.2.). Sagledavanjem ponašanja nosača utvrđeni su parametri na temelju kojih je oblikovan ispitani model.

Eksperimentalno ispitivanje obavljeno u laboratoriji Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskoga Fakulteta Univerziteta u Sarajevu. Ispitano je ponašanje pet spregnutih i pet spregnuto-prednapetih greda prema dispoziciji eksperimenta prikazanoj na slici 11. Kao moždanici upotrijebljeni su vijci bez matice (M8x150,0 mm) u dva reda. Za zajedničke elemente (drvenu gredu i betonsku ploču) raspored je mjernih mjesta na spregnutom nosaču isti.

Vrijednost sile prednapinjanja određena je na neopterećenom nosaču iz uvjeta da se na rubnim vlaknima betonskoga nosača pojave naprezanja koja su približno jednaka vlačnoj čvrstoći betona (0,25 kN/cm²). To znači da bi očekivane relativne deformacije u mjernim trakama GC₃ i GC₄ (slika 11.) trebale biti

$$\varepsilon_1^u \approx \frac{\sigma_c}{E_c} \approx \frac{0,25}{3100,0} \approx 0,0806\% \approx 80,645 \mu D.$$

Nosače pripremljene za ispitivanje prikazuje slika 12.



Slika 11. Dispozicija za ispitivanje ojačanoga nosača s rasporedom mjernih mjesta (dimenzije su u cm)



Slika 12. Nosači pripremljeni za ispitivanje

Nanošenje sile na nosače provedeno je s pomoću hidraulične preše posredovanjem krutoga čeličnog nosača, u skladu s preporukama EN 26891 [12], uz primjenu višekanalnoga mjernog sistema "SPIDER 8". Prirast opterećenja vršen je u koracima od 5,0 kN do sloma. Oznake mjernih mjesta, mjerene veličine i instrumenti upotrijebljeni za njihovo mjerenje dani su u tablici 1.

Tablica 1. Oznake mjernih mjesta na ispitanim gredama

Spregnuto-prednapeti nosači (komada 5)															
Mjerno mjesto	G _{S1}	G _{S2}	G _{T1}	G _{T2}	G _{T3}	G _{T4}	G _{C1}	G _{C2}	G _{C3}	G _{C4}	G _{V1}	G _{V1c}	G _{U1}	G _{U2}	D
Tip uređaja	MT1	MT1	MT2	MT2	MT3	MT3	MT2	MT2	MT2	MT2	PM1	PM2	DM	DM	FM
Spregnuti nosači (komada 5)															
Mjerno mjesto	/		G _{T1}	G _{T2}	G _{T3}	G _{T4}	G _{C1}	G _{C2}	G _{C3}	G _{C4}	G _{V1}	G _{V1c}	G _{U1}	G _{U2}	D
Tip uređaja	/		MT2	MT2	MT3	MT3	MT2	MT2	MT2	MT2	PM1	PM2	DM	DM	FM

MT1 – mjerna traka TML, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, tip FLA-6-11, duljine 6,0 mm i otpora 120 ± 0,30 Ω
MT2 – mjerna traka TML, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, tip PL-60-11, duljine 60,0 mm i otpora 120 ± 0,30 Ω
MT3 – mjerna traka KYOWA, tip KFG-30-120-C1-11, duljine 30,0 mm i otpora 119,80 ± 0,20 Ω
PM1 – linearno promjenjivi diferencijalni transformator (eng. *linear variable displacement transducers* – LVDT) W100
PM2 – linearno promjenjivi diferencijalni transformator (eng. *linear variable displacement transducers* – LVDT) W50
DM – elektronski deflektometar
FM – elektronski dinamometar

Tablica 2. Vrijednosti maksimalne sile i progiba dobivenih ispitivanjem

Greda	F _{max} [kN]	GiV1(max) [mm]	GiV1 (zaostale deformacije) [mm]	Ponašanje elemenata pri graničnom opterećenju				
				Betonski nosač		Drveni nosač		Armatura
				Tlačna zona	Vlačna zona	Tlačna zona	Vlačna zona	
SG1	65,34	23,725	1,303	Bez oštećenja	Pukotine u srednjoj trećini raspona nosača	Bez oštećenja	Krtki slom u rubnim vlaknima nosača	
SG2	70,22	25,456	2,534					
SG3	80,07	30,209	2,250					
SG4	90,18	32,378	2,456					
SG5	75,12	28,769	2,940					
PSG1	131,88	48,463	/	Bez oštećenja	Pukotine u srednjoj trećini raspona nosača	Bez oštećenja	Kontakt*	Bez oštećenja
PSG2	145,08	47,450	8,109				Kontakt*	
PSG3	115,32	30,758	1,088				Krti slom**	
PSG4	126,72	36,334	1,831				Kontakt*	
PSG5	146,64	46,925	4,494				Kontakt*	

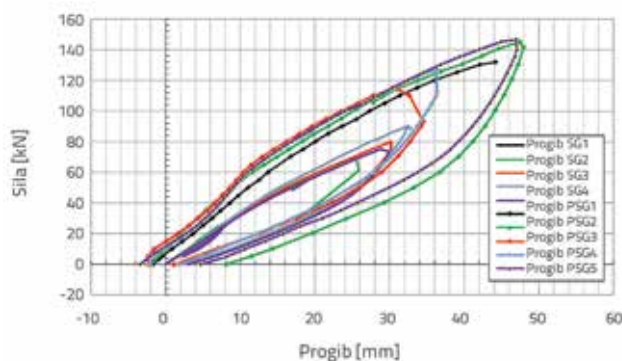
* U trenutku kada je rubno vlakno drvenoga nosača uspostavilo kontakt s vanjskom armaturom prekinuto je nanošenje opterećenja i pristupilo se rasterećenju.
** I ovdje, kao i kod spregnutih nosača, krti slom je nastupio u rubnim vlaknima drvenoga nosača.



Slika 13. Ispitani nosači, spregnuti (SG2) i spregnuto-prednapeti (PSG1)

5. Rezultati ispitivanja

Slika 13. prikazuje karakteristične deformacije i oštećenja maksimalno napregnutih nosača. Maksimalna postignuta sila i odgovarajuće deformacije (progibi i zaostale deformacije) prikazani su u tablici 2. u kojoj su sa SG označeni spregnuti, a s PSG spregnuto-prednapeti nosači. Na slici 14. prikazan je odnos sila-progib na ispitanim spregnutim i spregnuto-prednapetim nosačima.



Slika 14. Odnos sila - progib ispitanih nosača

6. Analiza dobivenih rezultata

Glavni je zadatak provedenoga istraživanja usporedba ponašanja spregnutih nosača bez prednapinjanja i s njim pri kratkotrajnom statičkom opterećenju. Analizom rezultata prikazanih u tablici 2. i slici 14. može se zaključiti da su ukupne karakteristike ojačanoga spregnutog nosača znatno unaprijeđene. U prvom redu, nosivost je bitno povećana. Srednja vrijednosti maksimalnih nanesenih sila na ispitanim nosačima je kod spregnutih nosača oko 76,0 kN, dok je kod spregnuto-prednapetih nosača ta sila oko 133,0 kN, iz čega se vidi da je postignuto ojačanje približno 75 %. Pritom je razlika u progibima nešto veća od 1,0 cm. Imajući u vidu jednostavnost i financijsku prihvatljivost, takvim se načinom ojačanja postiže dobar rezultat. Sve spregnute grede pri maksimalnom su opterećenju pretrpjele iznenadni slom zategnutih vlakana drvenoga nosača, praćen praskom. S druge strane, osim jedne, nijedna ojačana greda nije doživjela slom, već je ispitivanje prekinuto u trenutku kad je donji rub drvene grede ostvario kontakt sa zategom. Greška u drvu (kvrga koja je promijenila pravac vlakana u kritičnom presjeku) uzrokovala je nešto ranije otkazivanje grede PSG3. To znači da ojačani nosači pokazuju značajno duktilno ponašanje. Tome ide u prilog još jedno zapažanje koje se odražava u kasnijoj pojavi pukotina u betonskom dijelu nosača. Nadalje, zaostale su doformacije male (2,0 do 4,0 mm) zahvaljujući utjecaju vanjske armature od visokovrijednog čelika (granica razvlačenja 620,0 MPa).

7. Zaključak

Glavni cilj provedenoga istraživanja, čiji je jedan dio prikazan u ovom radu, bilo je utvrđivanje učinka ojačanja spregnutoga

nosača. Prikazani tip nosača može naći odgovarajuću primjenu u građevinskoj praksi, bilo u ojačavanju postojećih, bilo u projektiranju novih. Treba naglasiti da je ispitivanje nosača ograničeno na kratkotrajno opterećenje, s mehaničkim karakteristikama upotrijebljenih materijala bez reoloških učinaka. Daljnja bi istraživanja trebala obuhvatiti i učinke vezane za dugotrajna opterećenja s utjecajem okoline (vlažnost, temperatura i dr.). Posebnu pazornost treba obratiti na intenzitet sile prednapinjanja u vanjskoj armaturi tijekom vremena. Gubitak sile prednapinjanja pojava je koja je prisutna kod svih nosača ovoga tipa, bez obzira od kojega se materijala izvode. U ovom je radu ispitana jedna varijanta prednapinjanja, za slučaj u kojemu je vanjska armatura pravocrtna, kod kojega

se sustav u potpunosti oslanja na drveni dio nosača. Mogu se projektirati i nosači u kojima bi sidrenje bilo u betonskom dijelu nosača, ali bi u tom slučaju pružanje armature bilo poligonalno, s jednim ili dva devijatora. U tom bi se slučaju odizanje nosača ostvarilo s pomoću skretne sile u devijatoru, koja bi uzrokovala tlačna naprezanja okomito na vlakna u drvenom nosaču. U daljnjim istraživanjima treba ispitati različite tipove prednapinjanja i uz usporedbu dobivenih rezultata vidjeti koji tip ima najbolje performance i s gledišta nosivosti i s gledišta konkretne primjene. Osim toga, za praktičnu primjenu nosača o kojima je riječ treba na osnovi eksperimentalnih istraživanja pojednostavniti proračunski model upotrijebljen u ovom istraživanju uvođenjem relevantnih parametara.

LITERATURA

- [1] Postulka, J.: Strengthening of wooden ceiling constructions, Reports of the Working Commissions, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 46 (1983), pp. 441-447.
- [2] Yeoh, D.E.C.: Behaviour and Design of Timber-Concrete Composite Floor System, Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Department of Civil and Natural Resources Engineering, New Zealand, 2010.
- [3] Ceccotti, A.: Composite concrete-timber structures, Progress in Structural Engineering and Materials, 4 (2002), pp. 264-275.
- [4] Dias, A.M.P.G., Jorge, L.F.C.: The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams, Engineering Structures, 33 (2011), pp. 3033-3042.
- [5] Steinberg, E., Selle, R., Faust, T.: Connectors for timber-lightweight concrete composite structures, Journal of Structural Engineering, 129 (2003) 11, pp. 1538-1545.
- [6] Ceccotti, A., Fragiaco, M., Giordano, S.: Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection, Materials and Structures, 40 (2006), pp. 15-25.
- [7] Lukaszewska, E.: Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors, Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Sweden, 2009.
- [8] Gutkowski, R., Brown, K., Shigidi, A., Natterer, J.: Laboratory tests of composite wood-concrete beams, Construction and Building Materials, 22 (2008) 6, pp. 1059-1066.
- [9] Stevanović, B.: Analysis of Composite Timber-Concrete Structures, Doctoral thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2003.
- [10] Möhler, K.: Über das Tragverhalten von Biergerträgern und Druckstäben mit zusammengezetztgen Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln, Habilitation, Technische Universität Karlsruhe, Germany, 1956.
- [11] Moar, F.: Prefabricated timber-concrete composite system, Master teza, Lunds Universitet, 2012
- [12] EN 1995-1-1, Design of timber structures, Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [13] Ceccotti, A.: Timber-Concrete Composite Structures. In: Blass HJ et al. (ed) Timber Engineering, Step 2, 1995 1st edn. Centrum Hout, The Netherlands.
- [14] Čizmar, D., Vrančić, M.: Analysis of timber-concrete composite girders, GRADEVINAR, 68 (2016) 7, pp. 559-570, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1452.2015>
- [15] Tajnik, M., Dobrila, P., Premrov, M.: Analysis of composite T beam composed of timber, concrete and carbon strip, WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS, 2 (2007) 9, pp. 177-186.
- [16] Deam, B.L., Fragiaco, M., Gross, L.S.: Experimental Behavior of Prestressed LVL-Concrete Composite Beams, Journal of Structural Engineering, 134 (2008), pp 801-809.