

*primljen: 04.08.2024.**Izvorni naučni rad**korigovan: 09.04.2025.*

UDK:624.016

prihvaćen: 14.04.2025.<https://doi.org/10.62683/NiP28.5>

ANALIZA SPREGNUTIH SISTEMA TIPRA DRVO-BETON U SVRHU EFIKASNOG UPRAVLJANJA ODRŽAVANJEM

Nikola Velimirović¹

Rezime: Predviđanje deterioracije igra važnu ulogu u efikasnom upravljanju građevinskim konstrukcijama u smislu njihovog održavanja i eventualne popravke. Spregnuti sistem tipa drvo-beton se formira tako što se drvena greda povezuje sa betonskom pločom koristeći različite tipove spojnih sredstava. Na ovaj način se postiže iskorišćenje najboljih mehaničkih karakteristika oba materijala. Predviđanje eksploatacionog veka spregnutih konstrukcija tipa drvo-beton zahteva procenu različitih faktora koji mogu uticati na njihovu trajnost i promenu karakteristika tokom vremena. Izbor vrsta materijala je ključan za postizanje trajnosti konstrukcije. U ovom radu, posebna pažnja je posvećena dugotrajnom ponašanju ovog spregnutog sistema, što je kompleksan problem jer drvo i beton imaju različito reološko ponašanje i različito reaguju na spoljašnje uticaje. Zbog toga je sprovedena parametarska analiza kako bi se bolje sagledalo njegovo ponašanje tokom eksploatacionog veka i identifikovala najuticajnija svojstva materijala koja utiču na promenu maksimalnog ugiba nosača, koji je glavni kriterijum za ocenu graničnog stanja upotrebljivosti.

Ključne reči: spregnuti sistem tipa drvo-beton, deterioracija, upravljanje održavanja, eksploatacioni vek, parametarska analiza

ANALYSIS OF TIMBER-CONCRETE COMPOSITE SYSTEMS FOR EFFICIENT MAINTENANCE MANAGEMENT

Abstract: Deterioration prediction plays an important role in the efficient management of structures in terms of their maintenance and potential repairs. A timber-concrete composite system is formed by connecting a timber beam with a concrete slab using various types of fasteners. This method utilizes the best mechanical characteristics of both materials. Predicting the service life of timber-concrete composite structures requires assessing various factors that can affect their durability and changes in characteristics over time. The choice of materials is crucial for achieving durability of the structure. This paper focuses on the long-term behavior of this composite system, which is a complex problem because timber and concrete have different rheological behaviors and react differently to environmental influences. Therefore, a parametric analysis was conducted to better understand its behavior over its service life and to identify the most influential material properties affecting the change in the maximum deflection of the beam, which is the main criterion for assessing the serviceability limit state.

Key words: Timber-concrete Composite System, Deterioration, Maintenance Management, Service Life, Parametric Analysis

¹ Dr, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, nikola.velimirovic@gaf.ni.ac.rs
ORCID 0000-0002-6298-8216

1 UVOD

Sve izvedene konstrukcije moraju biti sigurne za upotrebu tokom njihovog eksploatacionog veka. Predviđanje deterioracije ima glavnu ulogu u efikasnom upravljanju građevinskim konstrukcijama u smislu potrebnog održavanja, popravke ili eventualne zamene pojedinih elemenata konstrukcije. Tokom proteklih decenija urađeno je značajno istraživanje u domenu predviđanja vremenski zavisnih karakteristika konstrukcija koje deterioriraju. Većina njih je imala za cilj poboljšanje tačnosti modela koji mogu predvideti stanje konstrukcije tokom vremena. Proces predviđanja performansi konstrukcija može se posmatrati kao najznačajniji deo upravljanja eksploatacionim ciklusom konstrukcija i infrastrukture. Kratak pregled nedavnih dostignuća u oblasti upravljanja eksploatacionim ciklusom infrastrukturnih sistema prikazan je u [1].

Spregnuti konstruktivni sistem tipa drvo-beton formira se na taj način što se drvena greda povezuje sa betonskom pločom na njoj, koristeći različite tipove spojnih sredstava. Ovakvom vrstom sprežavanja ova dva materijala postiže se iskorišćenje njihovih najboljih mehaničkih karakteristika, jer je poznato da drvo ima relativno veliku čvrstoću na zatezanje, dok beton ima veliku čvrstoću na pritisak. Ova vrsta konstruktivnog sistema se uspešno primenjuje kod izgradnje konstrukcije mostova, kao i kod izvođenja stambenih, poslovnih i drugih objekata [2]. Takođe, često se koriste i kod sanacije i ojačanja starih međuspratnih drvenih konstrukcija. Na ovaj način se otvaraju vrata novog tržišta za drvene konstrukcije i samim tim se povećava njihov ukupan udeo u građevinskoj industriji [3]. Prednost ovako formiranog spregnutog sistema u odnosu na klasičnu betonsku ploču kod izgradnje međuspratnih konstrukcija je u tome da ima manju sopstvenu težinu, samim tim i ukupna težina ovako izvedene konstrukcije je smanjena, što za posledicu ima povoljnije ponašanje u seizmičkim uslovima. Takođe, ako bismo ih uporedili sa klasičnim drvenim međuspratnim konstrukcijama, imaju značajno povećanu krutost, unapređena termička i akustična svojstva, smanjene vibracije kao i veću vatrootpornost.

Predviđanje eksploatacionog veka spregnutih konstrukcija tipa drvo-beton zahteva procenu različitih faktora koji mogu uticati na njihovu trajnost i promenu karakteristika tokom vremena. Izbor samih vrsta materijala ključan je za ostvarivanje trajnosti konstrukcije. Drvo je veoma osetljivo na uticaj vlage,

što može izazvati truljenje i propadanje lignina, koji voda ispire. Da bi se sprečilo prodiranje vode i očuvalo drvo, neophodno je sprovesti mere zaštite od vlage kao što su impregnacija, vodootporne membrane i adekvatna ventilacija. Sa druge strane, betonska ploča može postati izdržljivija primenom zaštitnih premaza. Redovni pregledi i održavanje su od vitalnog značaja za identifikaciju i rešavanje potencijalnih problema u ranoj fazi. Uticaji spoljašnje sredine poput temperature, vlažnosti i izloženosti UV zracima takođe mogu uticati na trajnost ovakve vrste konstrukcija. Održavanje ovih uslova u prihvatljivim granicama može pomoći u produženju eksploatacionog veka konstrukcije. Dakle, trajnost ove vrste spregnutog sistema značajno varira u zavisnosti od specifičnih uslova, uključujući upotrebu, održavanje i faktore spoljašnje sredine.

Analitički modeli za sračunavanje naprezanja i deformacija spregnutih konstrukcija tipa drvo-beton razvijeni su najpre za spregnute konstrukcije sa delimičnim sprežanjem između dva spregnuta drvena elementa i kao takvi zatim primenjeni na spregnuti sistem drvo-beton. Danas je opšte prihvaćen proračunski model γ -metod, dat u Aneksu B - Evrokoda 5 [4], kojim se zasad vrši dimenzionisanje ovih spregnutih sistema. Osnovna zamerka ovog proračunskog modela je ta da nisu svi relevantni činitelji uzeti u obzir, pre svega oni nastali usled dugotrajnog opterećenja i promene uticaja spoljašnje sredine. Poslednjih godina su sprovedena značajna istraživanja na ovu temu i neka od njih su izložena u dostupnim preglednim radovima [5,6].

2 PONAŠANJE SPREGNUTIH SISTEMA TIP A DRVO-BETON USLED DUGOTRAJNOG OPTEREĆENJA

Ponašanje spregnutih sistema tipa drvo-beton usled dugotrajnog opterećenja predstavlja veoma složen problem. Ono ne zavisi samo od dugotrajnog opterećenja, već i od reološkog ponašanja konstitutivnih materijala ovog spregnutog sistema. Varijacija uticaja spoljašnje sredine, tj. temperature i relativne vlažnosti vazduha, značajno utiče na ponašanje drveta, betona i spojnih sredstava. Reološka svojstva materijala kao što su tečenje, odnosno neprekidno povećanje deformacija uzorka izloženog dugotrajnom konstantnom opterećenju, skupljanje, bubrenje i ostala reološka svojstva karakteristišu i komponentalne materijale spregnutog sistema tipa drvo-beton. Posledica toga je i promenljivost raspodele napona i dilatacija unutar sistema što

uzrokuje povećanje deformacija tokom vremena. Važno je napomenuti da drvo i beton imaju različito ponašanje tokom vremena i da različito deluju na promenljive uticaje spoljašnje sredine tako da to u mnogome otežava opisivanje ponašanja spregnutog sistema usled dugotrajnog opterećenja. Karakteristična reološka svojstva betona su tečenje, skupljanje i termičke dilatacije. Pored viskoelastičnog tečenja, za drvo je karakteristično i mehano-sorpciono tečenje, tj. tečenje pod stalnim opterećenjem usled promene sadržaja vlage u drvetu, zatim skupljanje, odnosno bubrenje kao i termičke dilatacije, dok je za sistem spojnih sredstava karakteristično viskoelastično tečenje i mehano-sorpciono tečenje. Kao posledica mehaničke veze između drvene grede i betonske ploče imamo to da se dilatacije u komponentalnim elementima ne mogu slobodno odvijati i da su one na neki način ograničene fleksibilnošću sistema veze [7].

Najupotrebljivanija metoda za proračun dugotrajnog ponašanja spregnutih konstrukcija tipa drvo beton je metoda efektivnog modula (Effective Modulus Method) koju je predložio Ceccotti [8]. Analiza efekata uticaja dugotrajnog opterećenja, kao i uticaja tečenja materijala uzeta je u obzir zamenjujući module elastičnosti drveta i betona, kao i modul popustljivost spojnog sredstva sa efektivnim modulom elastičnosti betona $E_{c,eff}$, efektivnim modulom elastičnosti drveta $E_{t,eff}$ i efektivnim modulom popustljivosti spojnog sredstva K_{eff} :

$$\begin{aligned} E_{c,eff}(t) &= \frac{E_c(t_0)}{1 + \varphi_c(t, t_0)}, \\ E_{t,eff}(t) &= \frac{E_t}{1 + \varphi_t(t, t_0)}, \\ K_{eff}(t) &= \frac{K}{1 + \varphi_f(t, t_0)}, \end{aligned} \quad (1)$$

gde je t trenutno vreme, t_0 vreme nanošenja opterećenja, a $\varphi_c(t, t_0)$, $\varphi_t(t, t_0)$ i $\varphi_f(t, t_0)$ su koeficijenti tečenja za beton, drvo i spojno sredstvo.

2.1 TEČENJE BETONA

Određivanje koeficijenta tečenja betona vršeno je na osnovu CEB/FIP Model Code koji je uvršten u Evrokod 2 [9]. Koeficijent tečenja betona ima sledeći oblik:

$$\varphi_c(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (2)$$

gde je t sadašnji trenutak u danima, a t_0 vreme nanošenja opterećenja, gde se obično pretpostavlja da je opterećenje naneto nakon 28 dana. U prethodnom izrazu egzistira nominalni koeficijent tečenja φ_0 :

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0). \quad (3)$$

Parametar φ_{RH} prikazuje uticaj relativne vlažnosti na nominalni koeficijent tečenja i ima sledeći oblik u zavisnosti da li je f_{cm} manje ili veće od 35 MPa:

$$\begin{aligned} \varphi_{RH} &= 1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \\ \varphi_{RH} &= \left[1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \end{aligned} \quad (4)$$

gde je f_{cm} čvrstoća betona na pritisak nakon 28 dana od betoniranja.

Parametar $\beta(f_{cm})$ pokazuje uticaj čvrstoće betona na nominalni koeficijent tečenja i dat je na sledeći način:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (5)$$

Takođe, parametar $\beta(t_0)$ pokazuje uticaj starenja betona pod opterećenjem na nominalni koeficijent tečenja:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \quad (6)$$

Koeficijent β_H zavisi od relativne vlažnosti i nominalne veličine betonskog dela i ima sledeći oblik u zavisnosti da li je f_{cm} manje ili veće od 35 MPa:

$$\begin{aligned} \beta_H &= 1,5 \cdot [1 + (0,012 RH)^{18}] h_0 \\ &+ 250 \leq 1500, \\ \beta_H &= 1,5 \cdot [1 + (0,012 RH)^{18}] h_0 \\ &+ 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Pored nominalnog koeficijenta tečenja φ_0 , koeficijent tečenja betona zavisi i od koeficijenta $\beta_c(t - t_0)$ koji opisuje razvoj tečenja u toku vremena nakon nanošenja opterećenja:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} \quad (8)$$

2.2 TEČENJE DRVETA

Prema metodi efektivnog modula, tečenje drveta se uzima u obzir koristeći koeficijent deformacije za drvo k_{def} koji je tabelarno dat u Evrokodu 5 [4] za različite eksploatacione klase. Međutim, za kompleksnije opisivanje reološkog ponašanja drveta postoje više različitih modela [10,11,12,13], među kojima je Torattiev reološki model najprihvaćeniji i biće primenjen u ovom radu.

Na osnovu Torattievog modela, koeficijent tečenja drveta je dat na sledeći način:

$$\varphi_t(t, t_0) = \varphi_{tc}(t, t_0) + \varphi_{tms}(t, t_0) \quad (9)$$

gde su $\varphi_{tc}(t, t_0)$ i $\varphi_{tms}(t, t_0)$ delovi koeficijenta tečenja drveta koji opisuju viskoelastično tečenje i mehano-sorpciono tečenje, dok je t_i trenutak nanošenja opterećenja, a t sadašnji trenutak

$$\varphi_{tc}(t, t_i) = \left(\frac{t - t_i}{t_d} \right)^m, \quad (10)$$

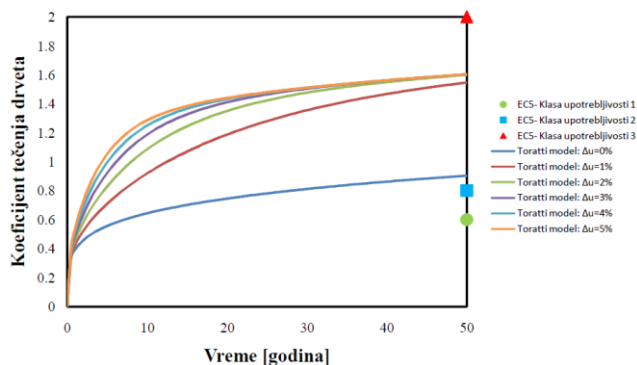
$$\varphi_{tms}(t, t_i) = j_t^\infty \left[1 - e^{-c_t \frac{2\Delta u}{\Delta t} (t - t_i)} \right].$$

Pošto vlažnost drveta nije ista u svim tačkama poprečnog preseka, obično se posmatra prosečna vlažnost drvenog preseka u_{aver} , odnosno efektivna vrednost prosečne vlažnosti drveta Δu tokom posmatranog perioda Δt . To zapravo predstavlja razliku između njene maksimalne i minimalne vrednosti, $\Delta u = u_{aver, max} - u_{aver, min}$. Ostali parametri prisutni u ovim izrazima predstavljaju parametre materijala. U konkretnom slučaju vrednosti parametara materijala su: $j_t^\infty = 0.7$, $c_t = 2.5$, $m = 0.21$, $t_d = 29500$ dana. Sadržaj vlage u drvetu je u ravnoteži sa relativnom vlažnošću spoljašnje sredine [11] i može se aproksimirati sledećim izrazom:

$$u_{eq} = 0.01 \cdot RH$$

$$/(-0.00084823 \cdot RH^2 + 0.11665 \cdot RH + 0.38522). \quad (11)$$

Na slici 1 je prikazana uporedna analiza koeficijenta tečenja drveta na osnovu Torattievog modela i korekcionog koeficijenta za drvo k_{def} kojim se uzima u obzir efekat tečenja drveta, a koji se primenjuje u metodi efektivnog modula.



Slika 1 – Dijagram razvoja koeficijenta tečenja drveta tokom vremena

Sa prikazanog dijagrama se može videti, a na osnovu primenjenog Torattievog reološkog modela,

da varijacija sadržaja vlage u drvetu utiče na povećanje koeficijenta tečenja drveta, ali i da je njegova konačna vrednost na kraju pretpostavljenog eksploatacionog veka od 50 godina nezavisna od efektivne vrednosti prosečne vlažnosti drveta Δu veće od 2%. Eksperimentalna istraživanja su utvrdila da Torattiev model daje vrednosti koeficijenta tečenja drveta približnije eksperimentalnim tako da se one uglavnom koriste kao merodavne.

2.3 TEČENJE SPOJNIH SREDSTAVA

U nedostatku eksperimentalnih podataka, koeficijent tečenja spojnih sredstava može biti dobijen dupliranjem koeficijenta tečenja drveta dobijenog na osnovu Evrokoda 5 [4]

$$\varphi_f(t, t_0) = 2 \cdot \varphi_t(t, t_0). \quad (12)$$

Međutim, na osnovu sprovedenih eksperimentalnih istraživanja [7,14] na spregnutim nosačima sa sličnom vrstom spojnog sredstva kao što mi posmatramo, preporučeno je da vrednost koeficijenta tečenja spojnog sredstva bude jednak koeficijentu tečenja drveta

$$\varphi_f(t, t_0) = \varphi_t(t, t_0). \quad (13)$$

2.4 REOLOŠKE POJAVE ZANEMARENE METODOM EFEKTIVNOG MODULA

Na osnovu različitih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja koja su sprovedena poslednjih godina, uvidelo se da najzastupljeniji pristup za proračun dugotrajnog ponašanja spregnutih konstrukcija tipa drvo-beton, metoda efektivnog modula, ima određene nedostatke što je i predstavljeno od strane različitih autora [15,7,16,17]. Ovaj pristup zanemaruje efekte reoloških pojava kao što su skupljanje betona i neelastične dilatacije betona i drveta usled varijacije temperature i relativne vlažnosti vazduha spoljašnje sredine. Stoga se preporučuje uračunavanje svih dugotrajnih reoloških efekata koji se javljaju u konstitutivnim materijalima kada se zahteva kompleksnija analiza dugotrajnog ponašanja ovog spregnutog sistema. U okviru ovog rada, za uračunavanje ovih reoloških pojava primenjen je pristup predložen u radu [17]. Shodno različitim eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima ustanovljena je podela na tri različita uticaja koja utiču na raspodelu napona i dilatacija u spregnutom nosaču tipa drvo-beton:

- stalno i korisno opterećenje
- skupljanje betona
- varijacija uticaja spoljašnje sredine

Predloženi pristup superponira efekte dugotrajnog ponašanja spregnutog sistema tipa drvo-beton usled ovih različitih uticaja:

$$S = S(q) + S(\varepsilon_{cs}) + S(\varepsilon_u) + S(\varepsilon_T) \quad (14)$$

gde veličina S predstavlja generisani efekat (ugib, klizanje, smičuću silu ili napone u drvetu ili betonu), q - stalno i korisno opterećenje, ε_{cs} - dilatacije skupljanja betona, ε_u - neelastične dilatacije usled varijacije relativne vlažnosti vazduha i ε_T - neelastične dilatacije usled varijacije spoljašnje temperature.

2.4.1 Uticaj skupljanja betona

Skupljanje betona predstavlja reološku pojavu smanjenja zapremine betona tokom očvršćavanja, a donekle i nakon toga. Proračun dilatacija skupljanja betona data je na osnovu CEB-FIP Model Code i uvršćen je u Evrokod 2 [9]. Na osnovu ovog modela, dilatacija skupljanja betona (ε_{cs}) sastoji se od dve komponentalne dilatacije: dilatacija skupljanja usled sušenja (ε_{cd}) i sopstvena (autogena) dilatacija skupljanja (ε_{ca})

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (15)$$

Dilatacija skupljanja usled sušenja se odvija sporo, jer je funkcija migracije vode kroz očvršli beton. Sa druge strane, sopstvena dilatacija skupljanja betona se odvija u toku očvršćavanja betona, pa se njen najveći deo obavi prvih dana nakon betoniranja.

Razvijanje dilatacija skupljanja betona usled sušenja (ε_{cd}) dato je sledećim izrazom:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (16)$$

Prilikom proračuna koeficijenta $\beta_{ds}(t, t_s)$ pretpostavljeno je da je vreme nege betona (t_s) jednako vremenu nanošenja spoljašnjeg opterećenja (t_0)

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad (17)$$

Nominalna neredukovana vrednost dilatacija ($\varepsilon_{cd,0}$) skupljanja betona usled sušenja data je sledećim izrazom:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (18)$$

gde je $f_{cm0} = 10$ MPa, $RH_0 = 100\%$,

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (19)$$

Sa druge strane, sopstvena dilatacija skupljanja betona (ε_{ca}) data je na sledeći način:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (20)$$

gde je :

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}, \quad (21)$$

odnosno:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}). \quad (22)$$

Uticaj dilatacija skupljanja betona na ugib u sredini raspona spregnutog nosača tipa drvo beton uzet je u obzir na osnovu sledećeg izraza:

$$\delta_{cs} = \frac{\gamma_{t-c} \cdot \varepsilon_{cs} \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c}{(EI)_{eff}} \cdot \frac{l^2}{8}. \quad (23)$$

2.4.2 Varijacija uticaja spoljašnje sredine

Komponentalni materijali spregnutog sistema tipa drvo-beton deterioriraju različitim tempom tokom eksploatacionog veka konstrukcije. Različiti reološki efekti komponentalnih materijala razvijaju se u različitim periodima eksploatacionog veka.

Uticaj neelastičnih dilatacija usled promene sadržaja vlage u drvetu na ugib u sredini raspona spregnutog nosača dat je izrazom:

$$\delta_u = \frac{\alpha_{t,u} \cdot \Delta u \cdot E_t \cdot A_t \cdot a_t}{(EI)_{eff}} \cdot \frac{l^2}{8}. \quad (24)$$

Uticaj neelastičnih dilatacija usled varijacije spoljašnje temperature na na ugib u sredini raspona spregnutog nosača dat je izrazom:

$$\delta_T = \frac{\gamma_{t-c} \cdot (\alpha_{c,T} - \alpha_{t,T}) \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c}{(EI)_{eff}} \cdot \frac{l^2}{8}, \quad (25)$$

gde je ΔT efektivna vrednost spoljašnje temperature.

3 PARAMETARSKA ANALIZA

U cilju što boljeg sagledavanja ponašanja spregnutog nosača tipa drvo-beton pod konstantnim eksploatacionim opterećenjem, izvršena je sveobuhvatna parametarska analiza kako bi se identifikovala najuticajnija svojstva konstitutivnih materijala koja utiču na promenu maksimalnog ugiba spregnutog nosača, što predstavlja glavni kriterijum za ocenu graničnog stanja upotrebljivosti. Ova analiza je sprovedena za slučaj spregnutog nosača drvo-beton raspona 4,2 m, a za korisno opterećenje od 3 kN/m². Drvene grede izrađene su od monolitnog drveta dimenzija 100/200 mm. Betonska ploča je visine 60 mm i širine 800 mm. Sprezanje drveta i betona je ostvareno pomoću trnova od čelične glatke armature $\phi 20/150$ mm, ugrađenih u prethodno izbušene rupe u drvetu i premazane epoksi smolom.

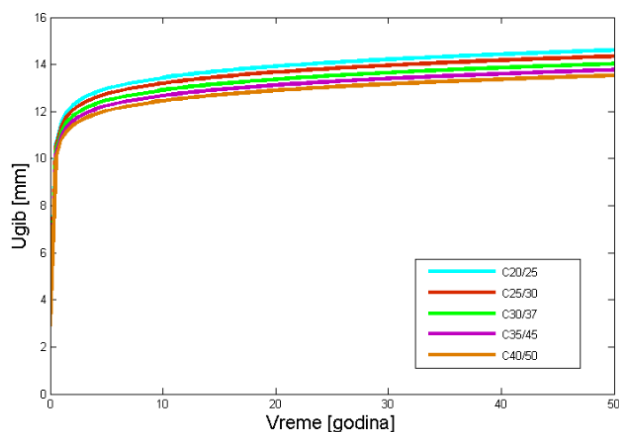
3.1 UTICAJ ČVRSTOĆE BETONA

Uticaj čvrstoće betona na promenu maksimalnog ugiba spregnutog nosača tipa drvo-beton ispitan je pod konstantnim spoljašnjim uticajima, pri čemu je pretpostavljeno da je drvena greda izrađena od drveta klase C27.

Tabela 1- Uticaj čvrstoće betona na ugib u sredini spregnutog nosača na kraju eksploatacionog veka

	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
E_{cm} [GPa]	30	31	33	34	35
f_{cm} [MPa]	28	33	38	43	48
Ugib [mm]	14,60	14,35	14,03	13,77	13,53

Na osnovu rezultata sprovedene parametarske analize prikazane u tabeli 1, može se zaključiti da koristeći beton klase C40/50 dolazi do smanjenja maksimalnog ugiba spregnutog nosača na kraju pretpostavljenog eksploatacionog veka od 50 god. za 7,4% u odnosu slučaj primene betona klase C20/25. To ne predstavlja neko značajno umanjeno, tako da se kod ovakvih spregnutih elemenata slobodno može koristiti beton niže klase čvrstoće. Na slici 2 prikazan je trend priraštaja ugiba spregnutog nosača tokom vremena za različite klase betona.



Slika 2 – Uticaj čvrstoće betona na promenu ugiba spregnutog nosača

3.2 UTICAJ ČVRSTOĆE DRVETA

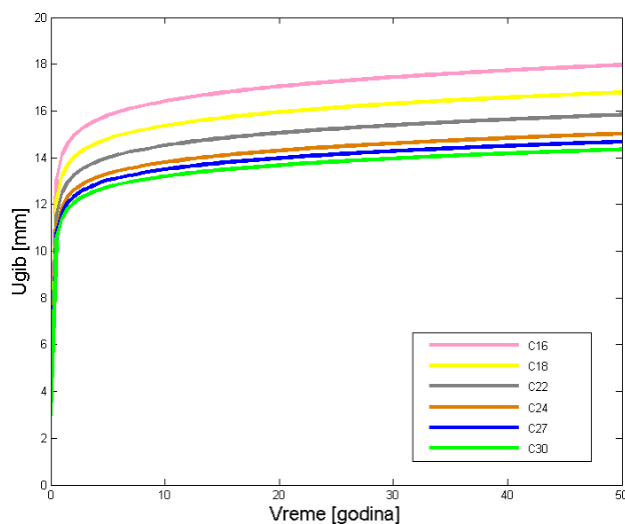
Uticaj čvrstoće drveta na maksimalni ugib spregnutog nosača drvo-beton ispitan je pod konstantnim spoljašnjim uticajima za različite klase čvrstoće drveta, pri čemu je pretpostavljeno da je beton klase C25/30. Analizirajući rezultate prikazane

u tabeli 2, možemo da vidimo da se sa povećanjem čvrstoće drveta od klase C16 do klase C30, maksimalni ugib posmatranog spregnutog nosača na kraju eksploatacionog veka smanjio za 20,1%, što pokazuje da čvrstoća drveta ima veći uticaj na maksimalni ugib spregnutog nosača drvo-beton u odnosu na čvrstoću betona.

Tabela 2- Uticaj čvrstoće drveta na ugib u sredini spregnutog nosača na kraju eksploatacionog veka

	C16	C18	C22	C24	C27	C30
$E_{0,mean}$ [GPa]	8	9	10	11	11.5	12
ρ [kN/m ³]	3,7	3,8	4,1	4,2	4,5	4,6
Ugib [mm]	17,97	16,79	15,83	15,02	14,68	14,35

Na slici 3 je prikazan dijagram očekivanog ugiba u sredini spregnutog nosača tokom vremena za različite klase čvrstoće drveta.

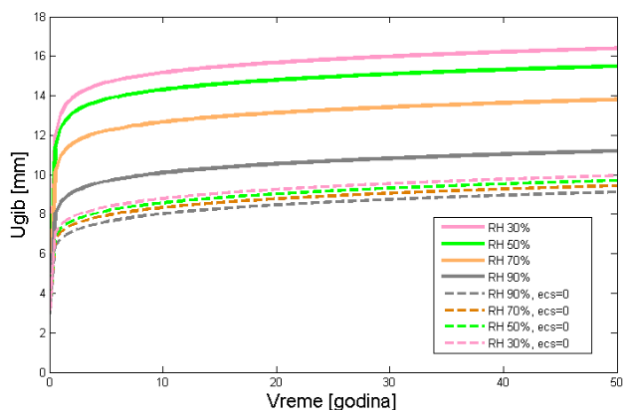


Slika 3 – Uticaj čvrstoće drveta na promenu ugiba spregnutog nosača

3.3 UTICAJ SKUPLJANJA BETONA

Usled sprežavanja drvenog i betonskog elementa, slobodno odvijanje reološkog procesa skupljanja betona je sprečeno što dovodi do povećanja ukupnih deformacija u spregnutom nosaču drvo-beton. Na skupljanje betona najveći efekat ima relativna vlažnost vazduha spoljašnje sredine. U ovoj analizi je izvršen proračun ugiba u sredini raspona spregnutog nosača tokom vremena za različite vrednosti relativne vlažnosti vazduha. Pri tome je urađena uporedna

analiza kada se u proračun ugiba uzima u obzir skupljanje betona i kada je ono zanemareno (slika 4).



Slika 4 – Uticaj skupljanja betona na promenu ugiba spregnutog nosača

Iz sprovedene analize čiji su rezultati prikazani u tabeli 3, može se videti da usled niže relativne vlažnosti vazduha nastaju veće deformacije usled skupljanja betona što prouzrokuje i povećanje ugiba spregnutog nosača. Može se zaključiti da se uticaj skupljanja betona nikako ne sme zanemariti, kao što je to slučaj u proračunu na osnovu metode efektivnog modula, jer je njegov doprinos ukupnom ugibu u nekim slučajevima skoro 40%.

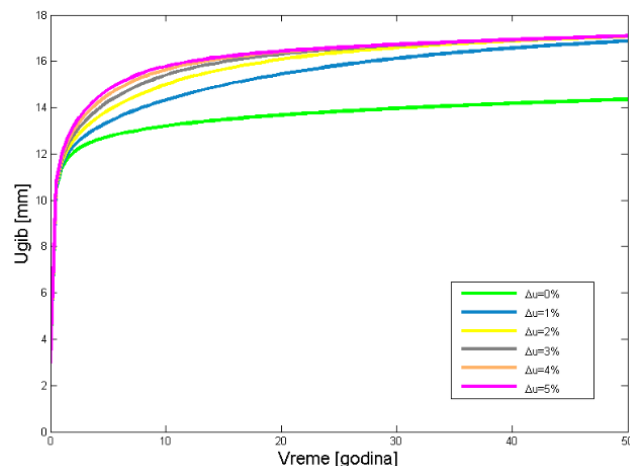
Tabela 3- Uticaj skupljanja betona na ugib spregnutog nosača na kraju eksploatacionog veka

RH [%]	30		50		70		90	
	$\epsilon_{cs}=0$		$\epsilon_{cs}=0$		$\epsilon_{cs}=0$		$\epsilon_{cs}=0$	
Ugib [mm]	16,4	9,95	15,5	9,71	13,8	9,44	11,2	9,13

3.4 UTICAJ MEHANO-SORPCIONOG TEČENJA

Tečenje drveta je reološka pojava koja nije najjasnije definisana u važećem standardu Evrokod 5. Na osnovu metode efektivnog modula, prilikom opisivanja dugotrajnog ponašanja spregnutog sistema drvo-beton, efekat tečenja drveta se uzima u obzir pomoću konačnog korekcionog koeficijenta modula elastičnosti drveta na kraju eksploatacionog veka k_{def} . Međutim, na ovaj način se zanemaruje uticaj mehano-sorpcionog tečenja koje često uzrokuje veće

deformacije nego viskoelastično tečenje. Sa druge strane Torattiev reološki model daje vremenski zavistan koeficijent tečenja koji jasno uzima u obzir uticaj mehano-sorpcionog tečenja jer postoji direktna zavisnost koeficijenta tečenja od efektivne vrednosti prosečne vlažnosti drveta Δu . Sprovedena parametarska analiza pokazuje uticaj mehano-sorpcionog tečenja na promenu maksimalnog ugiba spregnutog nosača tokom vremena, što je i prikazano na slici 5.



Slika 5 – Uticaj mehano-sorpcionog tečenja na promenu ugiba spregnutog nosača

Analizirajući rezultate ove parametarske analize prikazane u tabeli 4, može se zaključiti da se uračunavanjem uticaja mehano-sorpcionog tečenja maksimalni ugib spregnutog nosača povećava do 16% u odnosu na slučaj kada je on zanemaren. Takođe, uočljivo je da bez obzira na različiti tempo povećanja ugiba tokom vremena, maksimalni ugib na kraju pretpostavljenog eksploatacionog veka je isti za sve slučajeve gde je efektivna vrednost prosečne vlažnosti drveta Δu veća od 2%.

Tabela 4- Uticaj mehano-sorpcionog tečenja na ugib u sredini spregnutog nosača na kraju eksploatacionog veka

Δu	0%	1%	2%	3%	4%	5%
Ugib [mm]	14,35	16,87	17,07	17,09	17,09	17,09

4 ZAKLJUČAK

U cilju efikasnog upravljanja održavanjem spregnutih sistema tipa drvo-beton od izuzetne važnosti je predvideti njihovo ponašanje tokom eksploatacionog veka. Najupotrebljivija metoda za proračun ove vrste spregnutih sistema usled

dugotrajnog opterećenja jeste metoda efektivnog modula. Međutim, ovaj pristup ima određena ograničenja, jer zanemaruje efekte reoloških pojava kao što su skupljanje betona i neelastične dilatacije betona i drveta usled varijacije temperature i relativne vlažnosti vazduha spoljašnje sredine. U cilju što boljeg sagledavanja ponašanja spregnutog nosača drvo-beton pod konstantnim eksploatacionim opterećenjem, u okviru ovog rada je izvršena sveobuhvatna parametarska analiza kako bi se identifikovala najuticajnija svojstva konstitutivnih materijala koja utiču na promenu maksimalnog ugiba spregnutog nosača, što predstavlja glavni kriterijuma za ocenu graničnog stanja upotrebljivosti. Na osnovu sprovedene analize, može se zaključiti da se kod ovakvih spregnutih sistema slobodno može koristiti beton niže klase čvrstoće. Sa druge strane, čvrstoća drveta ima veći uticaj na maksimalni ugib spregnutog nosača drvo-beton u odnosu na čvrstoću betona. Takođe, iz rezultata sprovedene analize može se videti da usled niže relativne vlažnosti vazduha nastaju veće deformacije usled skupljanja betona što prouzrokuje i povećanje ugiba spregnutog nosača. Može se zaključiti da se uticaj skupljanja betona nikako ne sme zanemariti. Tečenje drveta je reološka pojava koja nije najjasnije definisana u važećem standardu Evrokod 5, jer se tečenje drveta uzima u obzir pomoću konačnog redukcionog koeficijenta modula elastičnosti drveta na kraju eksploatacionog veka i na ovaj način se zanemaruje uticaj mehano-sorpcionog tečenja koje često uzrokuje veće deformacije nego viskoelastično tečenje. Analizirajući rezultate sprovedene parametarske analize, može se zaključiti da se uračunavanjem uticaja mehano-sorpcionog tečenja, maksimalni ugib spregnutog nosača povećava do 16% u odnosu na slučaj kada je on zanemaren.

ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, Ugovorom o finansiranju naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu, Univerziteta u Nišu - Evidencioni broj: 451-03-137/2025-03/ 200095 od 04.02.2025. god.

LITERATURA

- [1] Frangopol M. Dan, Soliman Mohamed: **Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions.** *Struct. Infrastruct. Eng.*, Vol. 12 (1), 1-20, 2016.
- [2] Dias A., Skinner J., Crews Keith, Tannert, Thomas: **Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction.** *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 74(3), 443–451, 2016.
- [3] Knauf Marcus: **Market potentials for timber-concrete composites in Germany's building construction sector.** *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 75(4), 639– 649, 2017.
- [4] CEN: **Eurocode 5 - Design of timber structures - part 1-1: General rules and rules for buildings.** Brussels, Belgium, 2004.
- [5] Khorsandnia Nima, Valipour R. Hamid, Shrestha Rijun, Crews Keith: **Review on Long-term Behaviour of Timber-Concrete Composite Floors.** *Materials to Structures: Advancement through Innovation –Samali, Attard & Song (Eds), Taylor & Francis Group*, London, 2013.
- [6] Stepinac Mislav, Rajčić Vlatka, Barbalić Jure: **Influence of long term load on timber-concrete composite systems.** *Građevinar*, Vol. 67(3), 235–246, 2015.
- [7] Fragiaco Massimo: **Long-Term Behavior of Timber-Concrete Composite Beams. II: Numerical Analysis and Simplified Evaluation.** *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132(1), 23–33, 2006.
- [8] Ceccotti Ario: **Composite concrete-timber structures.** *Prog. Struct. Eng. Mater.*, Vol. 4(3), 264–275, 2002.
- [9] CEN: **Eurocode 2 - Design of concrete structures - part 1-1: General rules and rules for buildings.** Brussels, Belgium, 2004.
- [10] Hanhijarvi A.: **Modelling of creep deformation mechanisms in wood, Ph.D. thesis.** *Technical Research Centre of Finland, VTT Publications, Espoo (SF): Helsinki University of Technology*, 1995.
- [11] Toratti T.: **Creep of timber beams in variable environment, Ph.D. thesis.** *Laboratory of Structural Engineering and Building Physics: Helsinki University of Technology, Finland*, 1992.
- [12] Becker P.: **Modellierung des zeit- und feuchteabhängigen Materialverhaltens zur Untersuchung des Langzeitverhaltens von Druckstaben aus Holz, Ph.D. thesis.** *Bauhaus-Universität Weimar*, 2002.
- [13] Martensson Annika: **Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations, Ph.D thesis.** *Lunds Universitet, Sweden*, 1992.
- [14] Bonamini G., Ceccotti A., Uzielli L.: **Short- and long-term experimental tests on antique larch and oak wood-concrete composite elements.** *Proceedings of C.T.E. Conference, Bologna, Italy*, 241-251, 1990.
- [15] Fragiaco Massimo, Ceccotti Ario: **A simplified approach for long-term evaluation of timberconcrete composite beams.** *Proceedings of*

The 8th World Conference on Timber engineering, Lahti, Finland, Vol. 2, 537-542, 2004.

- [16] Carvalho Jorge, Luís Filipe, Schanzlin Jörg, Lopes Sérgio Manuel Rodrigues, Cruz Helena, Kuhlmann, Ulrike: **Time-dependent behaviour of timber lightweight concrete composite floors.** *Engineering Structures*, Vol. 32(12), 3966–3973, 2010.
- [17] Kanócz Jan, Bajzecerova Viktoria, Šteller, Štefan: **Timber – concrete composite elements with various composite connections Part 1 : Screwed connection.** *Wood research*, Vol. 58(4), 555–570, 2013.