ANALIZA I MODELIRANJE SPREGNUTIH SISTEMA DRVO–BETON: PRIMENA NA PRORAČUN MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE PREMA EN

ANALYSIS AND MODELLING COMPOSITE TIMBER-CONCRETE SYSTEMS: DESIGN OF BRIDGE STRUCTURE ACCORDING TO EN

Dragan MANOJLOVIĆ
Tatjana KOČETOV MIŠULIĆ

PREGLEDNI RAD
REVIEW PAPER
UDK: 624.21.011.1
doi:10.5937/grmk1604047M

1 UVOD

Primena adekvatnog građevinskog materijala na odgovarajućem mestu u konstrukciji jedan je od postulata savremenog građevinskog konstrukterstva i optimalnog projektovanja. Ideja konstrukcijskog spreznja u širem smislu (u odnosu na kompozitno sadejstvo u užem smislu - spreznje istih vrsta materijala u različitim tehnološkim fazama ili starostima) tj. zajedničkog rada dva ili više različitih materijala s ciljem što boljeg iskorišćenja njihovih mehaničko-fizičkih i drugih svojstava na nivou preseka, elementa i sklopa, najšire je razvijena i ima najveću primenu kod spregnutih sistema beton–čelik.

Spregnute konstrukcije drvo–beton primenjuju se u inženjerskoj praksi oko 80 godina, prešavši put od intuitivnog inženjerskog rešenja problema ojačanja drvenih mostova u šumskim predelima Severne Amerike do potpuno prefabrikovanih hibridnih sklopova drvo–beton za suhu ugradnju u današnjoj Evropi.

Razvojni put spregnutih sistema drvo–beton bio je uvek praćen ekstenzivnim teorijsko-eksperimentalnim istraživanjima [45], čiji su rezultati uspešno primenjivani u praksi tj. na tržištu, ali su do današnjih dana u nedovoljnoj meri rezultovali konsekvantnim i detaljnim građevinskim propisima za široku inženjersku upotrebu.

1 INTRODUCTION

The use of an adequate construction material in the appropriate position in the structure is one of the basic principles in modern and optimal structural design. The idea of structural composite action in wider sense (relative to composite action in a narrow meaning – when composite action is achieved with the same type of materials in different technological phases or ages), i.e. the idea of composite action of two or more different materials with the aim to take advantages of mechanical, physical and other properties of each material on the cross-sectional, element or assembly's level, is highly developed and has huge application in the field of composite steel-concrete structures.

Timber-concrete composite (TCC) structures are in use in civil engineering practice over 80 years and went through the intuitive problem solution for strengthening timber bridges in rural zones of North America to the fully prefabricated hybrid assemblies for dry building in today's Europe.

The development path of timber-concrete composites was always followed by extensive theoretical and experimental research [45], whose results were successfully implemented in practice, i.e. on the market, but up to now they still fail to result in modern and detailed designer's codes for wider engineering application.

Dragan Manojlović, MSc, dig, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, e-mail: manojlovic.dragan@uns.ac.rs
Tatjana Kočetov Mišulić, PhD, dig, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, e-mail: tanya@uns.ac.rs

Dragan Manojlovic, MSc Civ.Eng., Department for Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,
e-mail: manojlovic.dragan@uns.ac.rs
Tatjana Kocetov Misulic, PhD Civ.Eng., Department for Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, e-mail: tanya@uns.ac.rs

Konstrukcije drvo–beton nalaze svoju primenu u visokogradnji i mostogradnji, bilo kao novoprojektovani sistemi ili kao metod za sanaciju i revitalizaciju postojećih objekata.

Prednosti ovog kompozitnog sistema kod međuspratnih konstrukcija novoprojektovanih i revitalizovanih objekata ogledaju se:

- u odnosu na čisto drvene tavanice u značajnom povećanju nosivosti i krutosti tj. smanjenju deformacija i vibracija, poboljšanju protivpožarne otpornosti, unapređivanju akustičnih barijera, kao i povećanju termalne mase sklopa, uz unapređivanje seizmičkog ponašanja usled poboljšanog učinka dijafragme;

- u odnosu na čisto betonsku tavanicu u smanjenju ukupne mase i opterećenja na temelje, što vodi poboljšanom seizmičkom ponašanju, u bržem i efikasnijem izvođenju s drvenim gredama i pločama (zarobljena oplata), kao i ekonomičnijoj i ekološki prihvatljivijoj gradnji (smanjena emisija CO₂).

Prednosti u mostogradnji direktne su i lako prepoznatljive: sprezanje s betonom drvenim mostovima daje novu dimenziju primene i upotrebljivosti za drumski saobraćaj, čime se stimuliše izgradnja ovih održivih i atraktivnih objekata [21], [35], naročito u nordijskim zemljama.

Oblašću sprezanja drvo–beton u našoj zemlji teorijski i eksperimentalno najšire se bavi prof. dr B. Stevanović, postizući zapažene rezultate u svetskoj naučnoj javnosti [41], [42]. Praktičnom primenom rezultata svojih istraživanja izveo je uspešne sanacije i ojačanja mnogobrojnih objekata u Srbiji. Istraživački potencijal i praktična primenljivost teme stimulisali su mlađe istraživače da problematiku prošire na primenu lakih betona za sprezanje s drvetom, kao i na vibracije međuspratnih konstrukcija izazvane dejstvom ljudske navale, Lj. Kozarić [26]. Visokociklični zamor, kao i kombinacija prirodne atezije i štapastih spojnih sredstava takođe su jedno od bitnih istraživanja sprovedenih u poslednje vreme, R. Cvetković, [5].

I pored istaknutih pojedinaca u ovoj oblasti, može se zaključiti da se inženjeri u Srbiji relativno retko odlučuju za ovaj efikasan metod sanacije postojećih drvenih tavanica u praksi, kao i da ga retko primenjuju pri projektovanju novih objekata. Razlozi su višestruki, ali se generalno mogu sumirati u dve kategorije:

- nedostatak i/ili nedorečenost propisa i standarda u ovoj oblasti, uz pozivanje na eksperimente u svakom netipičnom slučaju i pri upotrebi drugog sredstva i/ili načina sprezanja;

- softverski paketi na tržištu svojim bibliotekama direktno ne podržavaju sprezanje drvo–beton. Opravdana potreba svakog savremenog inženjera je da u potpunosti modelira konstrukciju, pri čemu, u nedostatku jasnih zahteva standarda, nailazi na mnogobrojne nedoumice i nesigurnosti oko prihvatljivog nivoa pojednostavljenja tj. aproksimacije problema.

U očekivanju novih evropskih propisa za sprezanje drvo–beton (EN 1995-3), cilj ovog rada je da se, preko opsežnog pregleda postojećih standarda i pratećih istraživanja, pruži jedan konsekvantan uvid u stanje u oblasti, pruže preporuke za upotrebu i ilustruje primena sprezanja drvo–beton na primeru novoprojektovane mostovske LLD konstrukcije sa spregnutom betonskom kolovoznom pločom.

TCC systems can be successfully applied in buildings and bridges, as newly designed structures or method for rehabilitation and strengthening of existing ones.

The advantages of TCC systems in newly designed floor structures are reflecting in:

- Significant increase of bearing capacity and stiffness - reduction of deformation and vibrations, improvement of fire resistance and acoustic barriers, increase of thermal mass, upgrading the seismic performance by improved diaphragm action (related to timber floors);

- Reduction of total mass and loads on foundations that leads to improved seismic behaviour, in faster and more efficient construction with timber beams and timber based boards (formwork), as well as in economic and ecological building - reduction of CO₂ emission (related to concrete floors).

The advantages in bridge building are direct and easily recognizable: composite action with concrete adds timber bridges a new dimension when used as road bridges that stimulates the construction of these sustainable and attractive structures [21], [35], especially in Nordic countries.

In our country the notable theoretical and experimental results in the field of TCC structures are achieved by Prof dr B.Stevanovic, that are recognized in worldwide science [41], [42]. In practical application of his work he made successful rehabilitations of numerous old buildings in Serbia. The research potential and possibility of practical estimation stimulated the younger researchers to expand the problem of application of light concrete in TCC and study vibrations caused by action of human rush impact, Lj. Kozarić [26]. The highcyclic fatigue, as well as combination of natural adhesion and dowel fasteners in timber-concrete connection is also one of important recently conducted research, R. Cvetković, [5].

Besides the recognizable individuals in the field of TCC, it could be concluded that majority of civil engineers in Serbia very rarely decide to apply this efficient method of rehabilitation of old timber floors in practice, as well as to use it in design of new structures. The reasons are multiple, and generally could be summarized in two categories:

- Lack of / or understatement of codes, that always reference to experimental work in every untypical case if different fasteners of way of coupling are used;

- Software packages that are present at the market fail to directly support TCC with their libraries. The reasonable need of each modern structural engineer is to fully model a structure, whereby, in the circumstances of lack of clear code requirements, he faced with numerous confusions and confirms about acceptable level of problem approximation.

In anticipation of new European code for TCC structures (EN 1995-3), the objective of this paper is to provide a comprehensive review of available standards provisions and recent conclusions from literature that might have practical consequences in design. The key issues are highlighted and illustrated on the example of glulam composite arch bridge structure with concrete deck, designed according the Eurocodes.

2 SPREGNUTI SISTEMI DRVO-BETON

2.1 Podela, tipovi i sredstva za sprezanje u sistemu drvo-beton

Spregnute konstrukcije drvo-beton spadaju u grupu heterogeno spregnutih nosača i mogu se izvoditi kao T-grede (kao nosači međuspratnih tavanica), slika 1a, ili kao spregnute ploče (uglavnom za mostovske konstrukcije) slika 1b,c [29]. U spregnutim pločama [47] se za ostvarivanje zajedničkog dejstva drveta i betona dominantno koristi prirodna athezija i trenje, a kod T-greda mehanička spojna sredstva i ređe – lepljenje.

Slika 1. Tipovi spregnutih nosača: a) greda T-preseka, b) drvena ploča od dasaka i c) drvena ploča od CLT [29]
Figure 1. Types of TCC girders: a) "T" beam, b) solid timber notched slab, c) CLT slab [29]

U našoj zemlji se za sprezanje međuspratnih nosača tj greda „T” preseka, prevashodno koriste štapasta spojna sredstva (ekseri, zavrtnjevi, vijci, trnovi i šipke), koji se ugrađuju vertikalno ili koso, slika 2, [26], te kao najšire primenjivani, predstavljaju predmet razmatranja u ovom radu.

Slika 2. Uobičajena spojna sredstva i način aplikacije u spregnutim nosačima drvo-beton „T” preseka [26]
Figure 2. Commonly used dowel type fasteners and their application in timber-concrete "T" beams in Serbia [26]

2.2 Elastično sprezanje sistema drvo-beton

Stepen zajedničkog sadejstva drveta i betona u spregnutim konstrukcijama varira od punog (krutog), koji se najčešće ostvaruje lepljenjem ili kontinualnim mehaničkim trakama, preko delimičnog (elastičnog), koji se najčešće ostvaruje diskretnim mehaničkim spojnim sredstvima, do nezavisnog ponašanja dva materijala kada nema sprezanja ili je neadekvatno izvedeno, slika 3, [31]. Elastično (delimično) sprezanje je od praktičnog značaja za većinu konstrukcija tipa drvo-beton, a izbor spojnih sredstava, način i položaj njihove ugradnje, utiče na/određuje nivo sprezanja preko tzv. modula pomerljivosti veze (spojnog sredstva).

2 TIMBER-CONCRETE COMPOSITE SYSTEMS

2.1 Classification, types and coupling means in TCC

Composite timber-concrete structures are classified as hetero composite girders that could be constructing as "T" beams (girders of floor structures), figure 1a, or as composite slabs (mostly for bridge structures), figure 1b,c [29]. In TCC slabs [47], the composite action between timber and concrete is dominantly achieved by natural adhesion and friction, while in "T" beams the mechanical fasteners or gluing are used.

In our country for coupling the floor girders - "T" beams, the dowel type fasteners are mainly used (nails, bolts, screws, dowels and rods). Their application could be in vertical or inclined position, figure 2, [26], so, as widely used, they are the subject of consideration in this paper.

2.2 Elastic coupling in timber-concrete system

The degree of composite action in timber-concrete composite systems could vary from full (rigid) that could be mainly achieved by gluing or by continual mechanical strips, through partial (elastic) that could be mainly achieved by application of discrete mechanical dowel type fasteners, until independent behaviour of two materials is achieved when there is no composite action or the coupling is inadequately reached, figure 3, [31]. Elastic (partial) composite behaviour has the practical meaning for most of timber-concrete structures, where the choice of fasteners type, the way and position of their application, has dominant influence / determine the degree of composite action through so called „slip“ modulus of connection (fasteners).

Slika 3. Kruto i elastično sprezanje drvo–beton [31]
Figure 3. Rigid and elastic action in TCC beams [31]

Iako se štapasta spojna sredstva smatraju najmanje krutim u domenu delimičnog sprezanja, ona su u širokoj upotrebi kod nas zbog male cene, jednostavne ugradnje i zadovoljavajućeg učinka u prenosu smicanja u odnosu na namenu, te su predmet analize u ovom radu.

2.3 Metode proračuna sprezanja drvo–beton

Za proračun spregnutog sistema drvo–beton dominantno se koristi tzv. **gama metod** [3], koji je uz odgovarajuće dopune uvršten u Aneksu B Evrokoda 5 (EC5), [15], ali za veze drvo–drvo i ploče na bazi drveta. Uz male modifikacije, ovaj proračun se može primeniti i na spregnute nosače drvo–beton [42]. Postupak je prvi primenio Mohler (1956), razmatrajući problem pomerljivosti veze drvenih elemenata spojenih mehaničkim spojnim sredstvima. Postupak se bazira na rešavanju diferencijalne jednačine četvrtog stepena, jednačina (1), po pomeranjima za prostu gredu s konstantnom krutošću spoja duž raspona, na koju deluje spoljašnje opterećenje $q(x)$ koje se može razviti po sinusnoj funkciji $q=q_0 \cdot \sin(\pi \cdot x/l)$, zato što za ovakvo opterećenje postoji jednostavno rešenje u zatvorenom obliku.

Usvojeno je da se „γ – postupak” može primeniti i na druge vrste opterećenja jer je uticaj razlike između tačnog rešenja diferencijalne jednačine i „γ – postupka” na napone mnogo manji u poređenju sa uticajem koji ima varijacija modula elastičnosti ili modula pomerljivosti veze. Dakle, u nedostatku konkretnih rezultata ispitivanja, ovaj pojednostavljen postupak je na strani sigurnosti i daje validne rezultate za spregnute sisteme drvo–beton.

Jednačine (2–6) koje definišu proračun razvijene su za sistem drvo–drvo, ali se mogu primeniti za sistem drvo–beton, u slučajevima kada betonska ploča direktno naleže na gornju površinu drvene grede, slika 4a.

Although the dowel type fasteners are recognized as the most elastic ones in domain of partial composite behaviour, they are widely used in our country because of low cost, simple application and satisfactory effects in shear transmission comparing with functional demands, so they are subject of analysis in this paper.

2.3 Design methods for timber-concrete composites

The design method that is dominantly used in calculation of TCC systems is so called “gamma” method [3], which is included in Annex B of Eurocode 5 [15], but as the procedure for calculation of timber-to-timber and timber - wood based panels’ connections. With little modifications, this design procedure could be applied on TCC systems as well [42]. The method is initially derived by Mohler (1956), who considered the problem of slip in connections realized with mechanical fasteners. The procedure is based on solving differential equation of fourth degree, equation (1), for simple supported beam with constant and continual connection stiffness along the beam length; under an applied load $q(x)$ that could be presented through sinusoidal function $q=q_0 \cdot \sin(\pi \cdot x/l)$.

$$w'''' - \alpha^2 w'' = \frac{\alpha^2 M_x}{(EI)_\infty} - \frac{M''_x}{(EI)_0} \quad (1)$$

It is adopted that „γ – method” could be applied for other types of loading as well, because variation of slip at member interface has greater influences on stressess than differences between exact and aproximative solutions of differential equation. Therefore, this simplified procedure is on the safe side and gives comperable results for timber-concrete composite systems.

Equations (2-6) represent the basis of the method, introducing a reduction factor known as the shear coefficient “γ”, to measure the degree of interaction contributed by the concrete slab. Equations are derived for timber-to-timber system, but they are applicable in cases when concrete slab directly lays over the top of the timber beam, figure 4a.

Slika 4. „T” grede drvo–beton: (a) presek bez oplata i (b) presek sa oplatom; raspodela napona savijanja sa unutrašnjim silama

Figure 4. „T” timber-concrete beams: (a) cross section without formwork and (b) cross section with formwork, distribution of bending stresses with internal forces

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s}{K_i \cdot L^2}} \quad (2)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot (\gamma \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2)} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (5)$$

$$EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + \gamma \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + E_2 \cdot I_2 + E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 \quad (6)$$

gde je:

γ_1, γ_2 – koeficijent redukcije koji uzima u obzir popustljivost veze drvo–beton;

E_1, E_2 – modul elastičnosti betona, odnosno drveta;

A_1, A_2 – bruto površina betonskog dela preseka, odnosno drvenog dela preseka;

s – rastojanje između moždanika duž nosača;

K_i – modul pomerljivosti spoja između drveta i betona;

$(K_{ser}$ – modul pomerljivosti za granično stanje nosivosti, odnosno

K_u – modul pomerljivosti za granično stanje upotrebljivosti);

L – raspon nosača;

a_1, a_2 – rastojanje težišta betonskog, odnosno drvenog dela preseka od težišta spregnutog preseka;

h_1, h_2 – visina betonskog, odnosno drvenog dela preseka;

E_{ef} – efektivna krutost na savijanje spregnutog preseka.

U slučajevima postojanja oplate kao međusloja kroz koji prolazi moždanik, slika 4b, rastojanje težišta betonskog, odnosno drvenog dela preseka od težišta spregnutog preseka data je modifikovanim jednačinama (7–8), dok su ostale jednačine ostale nepromenjene. Sistem s postojanjem oplata jedna je od realnih okolnosti prilikom izvođenja spregnutog sistema drvo–beton, i kao takav je bio predmet istraživanja u više istraživačkih projekata [19,20].

Where is:

γ_1, γ_2 – gamma factor (introduces the slip of fasteners in shear plane) for concrete and timber, respectively,

E_1, E_2 – mean value of Young's modulus of elasticity for concrete and timber, respectively,

A_1, A_2 – cross section area of concrete/timber element, respectively,

s – spacing fasteners at shear plane,

K_i – slip modulus of fasteners at shear plane between timber and concrete

$(K_{ser}$ – slip modulus for serviceability limit states, K_u – instantaneous slip modulus for ultimate limit states),

L – span of the beam,

a_1, a_2 – distance between centreline of concrete/timber element and neutral axis of TC composite section,

h_1, h_2 – depth of cross section of concrete and timber element, respectively,

E_{ef} – the effective bending stiffness of TC composite beam.

In cases where formwork exists like one interlayer, figure 4b, distances between centreline of concrete/timber element and neutral axis of TCC section are given by modified equations (7-8), while the other equations stay unchanged. System where formwork exists is the real circumstance in the construction process of TCC system, and was the research subject in several investigation [19,20].

$$a_2 = \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2 + 2 \cdot t)}{2 \cdot (\gamma \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2)} \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} + t - a_2 \quad (8)$$

gde je:

t – debljina sloja oplata

Naponi u spregnutom preseku, slika 4 (a,b) računaju se prema izrazima (9–14):

Where is:

t – interposed plank thickness.

Stress distribution in TCC section, figure 4(a,b) could be calculated according to the expressions (9-14):

Normalni naponi:

Normal stresses:

$$\sigma_1(x) = -\frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1}{(EI)_{ef}} \cdot M(x) \quad (9)$$

$$\sigma_{m,1}(x) = \mp \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1}{(EI)_{ef}} \cdot M(x) \quad (10)$$

$$\sigma_2(x) = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2}{(EI)_{ef}} \cdot M(x) \quad (11)$$

$$\sigma_{m,2}(x) = \mp \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2}{(EI)_{ef}} \cdot M(x) \quad (12)$$

Maksimalan smičući napon:

Max shear stress:

$$\tau_{2,max}(x) = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2^2}{(EI)_{ef}} \cdot V(x) \quad (13)$$

Opterećenje spojnog sredstva:

Force on single fastener:

$$F(x) = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s}{(EI)_{ef}} \cdot V(x) \quad (14)$$

3 FAKTORI BITNI ZA PRORAČUN KOMPOZITA DRVO–BETON

3.1 Modul pomerljivosti veze drvo–beton

Krutost veze drvo–beton, odnosno popustljivost spojnih sredstava za sprežanje uvodi se u „gama“ postupak preko γ koeficijenta, a definiše se pomoću vrednosti modula pomerljivosti K . Modul pomerljivosti jednog spojnog sredstva određuje se na osnovu eksperimentalnih ispitivanja, a predstavlja odnos sile i pomeranja, definišući krutost spoja silom kojom treba opteretiti vezu da bi relativno pomeranje u njoj bilo jedinično, odnosno:

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (15)$$

gde je:

K – modul pomerljivosti veze;

P – sila;

δ – pomeranje.

Where is

K – slip modulus,

P – force,

δ – displacement.

3 ESSENTIAL FACTORS AFFECTING TCC DESIGN

3.1 Slip modulus in timber-concrete connections

A stiffness of timber-concrete connection i.e. interface member slip due to mechanical fasteners is introduced into “gamma” method through γ shear coefficient which is defined by the value of slip modulus K . Slip modulus of fastener is usually determined on the basis of experimental tests, and it is given by force/displacement ratio, defining the connection stiffness by force that has to be applied in order to get unitary displacement:

Na osnovu mnogobrojnih eksperimentalnih istraživanja ponašanja spoja drvo–beton, s različitim spojnim sredstvima a pod standardizovanim protokolom opterećenja (npr. SRPS EN 26891 [40]), evidentno je da dijagram P - δ nije linearan, pa samim tim ni modul pomerljivosti nije konstantan, slika 5.

Slika 5. (P - δ) dijagrami za različite načine ostvarivanja veze u sistemima drvo–beton [31]
Figure 5. (P - δ) diagrams for different connection means in TCC [31]

Modul pomerljivosti može se definisati kao sekantni ili tangentni u odnosu na određeni nivo opterećenja ili u odnosu na usvojenu veličinu pomeranja u vezi, slika 6. Inženjerima koji rade u praksi, ukoliko su dostupna eksperimentalna ispitivanja, modul pomerljivosti K_{ser} za dokaz upotrebljivosti treba odrediti kao sekantni za nivo opterećenja $0.4F_{est}$, dok modul pomerljivosti K_u za dokaz nosivosti treba odrediti kao sekantni za nivo opterećenja $0.6F_{est}$, [2], [3], [40]. U nedostatku eksperimentalnih ispitivanja moguće je koristiti predložene izraze definisane u EC5 [15], ukoliko je reč o već ispitanim spojnim sredstvima.

Evrokod 5 [15], definiše vrednosti modula pomerljivosti K_{ser} u spojnjoj ravni po opterećenom spojnem sredstvu – za štapasta i patentirana spojna sredstva, za veze drvo–drvo i ploča na bazi drveta–drvo preko analitičkih izraza datih u Tabeli 1. U izrazima figuriše zapreminska masa drveta ρ_m u $[\text{kg}/\text{m}^3]$ i prečnik spojnog sredstva d (d_c) u $[\text{mm}]$. Izrazi su jednostavni za primenu, ali ograničeni za vertikalno postavljena spojna sredstva, kao i sisteme gde je kontakt drvo–beton direktno ostvaren.

On the basis of numerous experimental researches about TC interface stiffness with different fasteners and under the standardized loading conditions (for example SRPS EN 26891 [40]), it is evident that P - δ diagram is not linear so the value of slip modulus is not constant also, figure 5.

Slika 6. Definicija modula pomerljivosti na dijagramima sila-pomeranje (P - δ) [31]
Figure 6. Slip modulus definition on (P - δ) diagrams according EN standards [31]

Slip modulus could be defined as secant or tangent in relation to certain load level or adopted connection's displacement, figure 6. Important facts for engineers working in practice are: if experimental results are available – slip modulus K_{ser} for serviceability limit states (SLS) has to be determined as secant for load level of $0.4F_{est}$, while slip modulus K_u for ultimate limit states (ULS) has to be determined for load level of $0.6F_{est}$, [2], [3], [40]. If there are no experimental results, it is possible to use expressions suggested in EC5 [15] when fasteners are not new at the market.

Eurocodes 5 [15], defines the values for slip modulus K_{ser} for fasteners and connectors in interface shear plane for timber-to-timber and wood-based-panels-to-timber connections according to the expressions given in table 1, that are based on wood density ρ_m $[\text{kg}/\text{m}^3]$ and fastener's diameter d (d_c) $[\text{mm}]$. The expressions are easy to use, but limited to vertical application of dowel type fasteners and for system without presence of formwork.

Tabela 1. Vrednosti modula pomerljivosti K_{ser} za štapasta i patentirana spojna sredstva (u N/mm) za veze drvo-drvo i ploča na bazi drveta-drvo [15]

Table 1. Values of K_{ser} for fasteners and connectors (in N/mm) in timber-to-timber and wood-based panel-to-timber connections [15]

Tip spojnog sredstva	K_{ser}	Fastener types
Trnovi Zavrtnji sa zazorom ili bez njega (neobrađeni ili obrađeni)* Ekseri (bušeni)	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23}$	Dowels Screws and Bolts (with or without clearance)* Nails (with pre-drilling)
Ekseri (zabijani)	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d^{0.8}}{30}$	Nails (without pre-drilling)
Sponke	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d^{0.8}}{80}$	Staples
Prstenasti moždanici tip A (EN 912) Pločasti moždanici tip B (EN 912)	$\rho_m \cdot \frac{d_c}{2}$	Split-ring connectors type A (EN 912) Shear-plate connectors type B (EN 912)
Pločasti moždanici sa zupcima: -tip C1 - C9 (EN 912) -tip C10 - C11 (EN 912)	$1.5 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4}$ $\rho_m \cdot \frac{d_c}{2}$	Toothed-plate connectors: - types C1 - C9 (EN 912) - types C10 - C11 (EN 912)
* Zazor treba dodati odvojeno na deformaciju spoja / The clearance should be added separately to the deformation		

Ukoliko je određen modul pomerljivosti za granično stanje upotrebljivosti K_{ser} prema izrazima iz tabele 1, za određivanje modula pomerljivosti za granično stanje nosivosti K_u , prema članu 2.2.2(2) Evrokoda 5, treba uzeti sledeći izraz:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (16)$$

gde je:

K_{ser} – modul pomerljivosti za granično stanje upotrebljivosti, dat u tabeli 1.

Where is:

K_{ser} – the slip modulus for serviceability limit states, presented in Table 1.

Slika 7. Pomeranje spojnog sredstva u spregnutom preseku: a) drvo-drvo, b) drvo-beton [31]
Figure 7. Fastener's slip in composite cross-section: a) timber-timber, b) timber-concrete [31]

Kako veza drvo-beton nije razmatrana u EC5, daje se konzervativna preporuka za određivanje modula pomerljivosti K_{ser} na način da se udvostruči vrednost data u tabeli 1, gde se za ρ_m uzima zapreminska masa drveta, slika 7. Preporučene vrednosti modula pomerljivosti K_{ser} koje predlaže EC 5, mogu se koristiti

Timber-concrete connections are not particularly considered in EC5, so for these two materials the conservative recommendation is given in a way that suggested values in table 1 for K_{ser} has to be doubled, figure 7. These suggested values could be applied only in cases when dowel type fastener is loaded

samo u slučaju kada je spojno sredstvo opterećeno upravno na svoju osu, tj. kada je spojno sredstvo postavljeno upravno na drvena vlakna a opterećenje deluje paralelno smičućoj ravni između dva elementa. Takođe, preporučene vrednosti modula pomerljivosti K_{ser} , odnose se **na spoj bez prisustva međusloja oplata**. Ukoliko je spojno sredstvo postavljeno pod bilo kojim drugim uglom u odnosu na drvena vlakna i/ili s prisustvom međusloja u spoju, vrednost modula pomerljivosti spojnog sredstva K_{ser} potrebno je odrediti eksperimentalnim ispitivanjima, što u praksi predstavlja problem za inženjere.

U spregnutim konstrukcijama drvo–beton često se može naći upotreba oplata koja se postavlja prilikom izlivanja sveže betonske mešavine, slika 8. Ovaj slučaj je vrlo čest kod ojačanja, sanacije i rekonstrukcije starih drvenih tavanica [19], kao i kod mostovskih konstrukcija gde je postavljanje skele u vodi neizvodljivo.

perpendicular to own axis i.e. when fastener is applied perpendicular to grain direction, while load is acting parallel to shear plane between members. Also, suggested values are applicable only in cases when formwork is absent. If dowel fasteners are applied in inclined positions to the grain direction and/ or the formwork is present, the value of slip modulus K_{ser} is necessary to obtain by tests, what could be quite a problem for engineers in practice.

It is very common situation in practice that formwork is necessary for outpouring a fresh concrete mass, figure 8, especially in retrofitting or rehabilitation of old timber floors [19], or in building of timber bridge structures when putting up scaffolding in water is impossible.

Slika 8. Spregnuta konstrukcija drvo–beton (a) bez prisustva oplata (b) s prisustvom oplata [19]
Figure 8. Timber-concrete composite structure: (a) without formwork, (b) with formwork [19]

Na slici 8-a), oplata je postavljena tako da je betonska ploča u direktnom kontaktu s drvenom gredom, te se može smatrati da prisustvo oplata na krutost veze, tj. na modul pomerljivosti K_{ser} nema značajnog uticaja. U slučaju gde je oplata međusloj u spregnutom spoju, slika 8-b), prisustvo oplata ima znatan uticaj na modul pomerljivosti K_{ser} . Problematika određivanja modula pomerljivosti spojnog sredstva u slučaju postojanja oplata u spregnutoj konstrukciji veoma je kompleksna, te zavisi od mnogobrojnih promenljivih, gde su neke od njih debljina oplata t , prečnik spojnog sredstva d , mehaničke karakteristike materijala (drvo, beton, spojno sredstvo) i tako dalje. U ovom radu analiza će biti ograničena samo na štapasta spojna sredstva – trnove, što je od relevantnog značaja u široj praksi.

Za uzimanje u obzir uticaja oplata na veličinu modula pomerljivosti spojnog sredstva može se primeniti tzv. Gelfi model [19]. Teoretska podloga ovog modela, za

In figure 8a), the formwork is positioned in such a way that concrete slab has direct contact with timber beam, so there is no influence of interlayer on connection stiffness i.e. on slip modulus K_{ser} . In case where the formwork is placed as one interlayer, figure 8b), its presence has significant influence on K_{ser} value. The problem of valuation of slip modulus in TC system with formwork interlayer is very complex, and dependent from several variables, such as formwork thickness t , fastener's diameter d , mechanical properties of constitutive materials (timber, concrete and fastener), etc. The analysis in this paper is limited on cases of dowels as fasteners, because they are significant for Serbian engineering practice.

For taking into account the presence of formwork and its effects on dowels slip modulus, the so called "Gelfi" model could be applied [19]. The theoretical background is based on beam model under the

određivanje modula pomerljivosti, jeste model grede na elastičnoj Vinklerovoj podlozi, slika 9-b). Smatra se da su delovi trna oslonjeni na elastičnu Vinklerovu podlogu u betonu i drvetu, dok je deo trna na mestu međusloja slobodan, jer se smatra da krutost međusloja oplata zanemariva. Krutost podloge drveta određuje se eksperimentalnim ispitivanjima. Nagib krivih predstavlja krutost Vinklerove podloge u drvetu k_w , gde ona približno iznosi 1300 N/mm^2 , pri čemu prečnik trna ne utiče značajno na vrednost krutosti podloge. Krutost podloge u betonu k_c , [20], predstavljena je preko odnosa $k_c = E_c/\beta$, gde je E_c modul elastičnosti betona, a koeficijent $\beta = 2.5-3.3$ je u funkciji odnosa prečnika i međusobnog razmaka trnova.

Winkler's elastic foundation, figure 9b). It is considered that dowel parts are supported on elastic foundation in concrete and timber, while the dowel part in interlayer is considered as free, because the stiffness of formwork is negligible. Winkler elastic stiffness of timber as foundation is determined experimentally and approximately its value is about $k_w = 1300 \text{ N/mm}^2$, where the dowel diameter has insignificant influence on timber foundation stiffness. Concrete stiffness foundation k_c , [20] is enclosed through ratio $k_c = E_c/\beta$, where E_c is the modulus of elasticity of concrete, while coefficient $\beta = 2.5-3.3$ is in function of ratio of fastener diameter and mutual distance of dowels.

Slika 9. Spojno sredstvo (trn) kao greda na elastičnoj podlozi [20]
Figure 9. Fastener (dowel) as a beam on the elastic foundation [20]

Rešenje teorijske analize, u pojednostavljenoj formi za potrebe prakse sa zanemarivom razlikom u odnosu na tačno, dato je sledećim izrazom:

The theoretical problem solution, in simplified form with neglect differences and suitable for use in everyday practice, is given by the following expression:

$$K_{ser} = \frac{12 \cdot E_s \cdot I_s}{\ell^{*3}} \quad (17)$$

gde je:

E_s – modul elastičnosti trna;

I_s – moment inercije trna;

ℓ – idealna dužina trna, predstavljena na slici 9-d), i data izrazom (18).

where is:

E_s – Young's modulus of elasticity of the dowel,

I_s – second area moment of the dowel section,

ℓ – ideal length of dowel, presented in Figure 9d), and given by the expression (18).

$$\ell^* \cong 17.3 - 0.000572 \cdot k_c - 0.00894 \cdot k_w + 0.880 \cdot t + 4.34 \cdot d \quad (18)$$

gde je:

t – debljina međusloja;

d – prečnik trna.

Za parametre k_c , k_w , t i d dati su intervali u kojima oni variraju [20]:

$7000 < k_c < 14000 \text{ N/mm}^2$, $1000 < k_w < 1400 \text{ N/mm}^2$, $12 < d < 20 \text{ mm}$, $0 < t < 50 \text{ mm}$.

Poredeći vrednosti modula pomerljivosti koje propisuje EC5, tabela 1, s predloženim modelom prema Gelfiju, slika 10 (levo), sa dijagrama se vidi da su vrednosti prema Evrokodu 5 veoma konzervativne i nisu na strani sigurnosti, ukoliko postoji prisustvo oplata. Posmatrajući krive prema Evrokodu 5, vidi se da su vrednosti modula pomerljivosti konstantne bez obzira na debljinu međusloja, dok kod krivih prema Gelfiju, modul

where is

t – interposed plank thickness,

d – dowel's diameter.

For parameters k_c , k_w , t and d , the variation intervals are given [20]:

$7000 < k_c < 14000 \text{ N/mm}^2$, $1000 < k_w < 1400 \text{ N/mm}^2$, $12 < d < 20 \text{ mm}$, $0 < t < 50 \text{ mm}$.

Comparing the slip modulus values according to the EC5, table 1, with suggested "Gelfi" model, figure 10 (left), the obvious conclusion is that values suggested by EC5 are conservative and not on the safe side when the formwork is present. The curves derived from EC5 suggestions show that slip modulus has the constant value independently from interlayer thickness, while the Gelfi's curves show that slip modulus is falling down with

pomerljivosti opada s debljinom međusloja. Isti zaključak može se izvesti i za nosivost, slika 10 (desno). Za određenu debljinu međusloja i isti prečnik trna, presek krivih prema EC5 i Gelfiju daju iste vrednosti modula pomerljivosti, te samo u tom slučaju spregnuta konstrukcija sračunata s modulima pomerljivosti prema Evrokodu i Gelfiju pokazaće realno (isto) ponašanje spregnutog sistema drvo–beton.

Slika 10. Uticaj prisustva oplata (debljina - t) na vrednost: a) modula pomerljivosti i b) nosivosti spojnih sredstava, u spregnutoj konstrukciji drvo-beton [31]
Figure 10. Influence of the presence of formwork (thickness - t) in TCC structure on the value of: a) slip modulus and b) fastener's bearing capacity [31]

3.2 Nosivost trnova prema Evrokodu 5

Nosivost spojnog sredstva određena je preko tri parametra: pritiska po omotaču rupe drvenog preseka f_h , momenta tečenja M_y spojnog sredstva i efektom prijanjanja F_{ax} odnosno čupanja („rope effect“). Nosivost trnova, kao i spomenuti parametri, određuju se saglasno standardima EN 1380 [39], EN 383 [37] i EN 409 [38].

Karakteristična vrednost pritiska po omotaču rupe drvenog preseka za trnove prečnika do 30 mm u zavisnosti od ugla α u odnosu na vlakna, data je izrazom predloženim u Evrokodu 5 (za veze ostvarene trnovima):

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (19)$$

gde je:

where is:

$$k_{90} = \begin{cases} 1.35 + 0.15 \cdot d & \text{za meko drvo} & / \text{for softwoods} \\ 1.30 + 0.15 \cdot d & \text{za LVL} & / \text{for LVL} \\ 0.90 + 0.15 \cdot d_z & \text{za tvrdo drvo} & / \text{for hardwoods} \end{cases} \quad (20)$$

$$f_{h,0,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (21)$$

$f_{h,0,k}$ – karakteristična vrednost čvrstoća na pritisak po omotaču rupe paralelno vlaknima, u $[N/mm^2]$;

k_{90} – popravni koeficijent u zavisnosti od vrste drveta (meko i tvrdo drvo, LVL);

α – ugao između opterećenja i vlakna;

d – prečnik zavrtnja, u $[mm]$;

ρ_k – karakteristična vrednost zapreminske mase drveta, u $[kg/m^3]$.

increase of formwork thickness. The similar conclusion is possible to derive for fastener's bearing capacity, figure 10 (right). Only for particular thickness of formwork and the same dowel diameter, the intersection of EC straight lines and Gelfi's curves indicates the real (same) solution of TCC.

3.2 Bearing capacity of dowels according to Eurocode 5

A bearing capacity of dowel type fasteners is mainly determined by three parameters: embedment strength of timber f_h , fastener's modulus of plasticity M_y and rope effect of applied dowels F_{ax} , that could be experimentally tested by standards EN 1380 [39], EN 383 [37] and EN 409 [38].

The characteristic value of timber embedment strength for dowels of diameter up to 30 mm in relation of inclination angle due to grain direction is given by expression suggested in EC5, equation 19:

$f_{h,0,k}$ – the characteristic embedment strength parallel to grain, in $[N/mm^2]$;

k_{90} – corrective coefficient depending on the type of wood (softwood, hardwood and LVL),

α – the angle of the load to the grain,

d – the dowel diameter, in $[mm]$,

ρ_k – the characteristic timber density, in $[kg/m^3]$.

Za trnove treba koristiti sledeću vrednost za moment tečenja:

$$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2.6} \quad (22)$$

gde je:

$M_{y,Rk}$ – karakteristična vrednost momenta tečenja spojnog sredstva, u [Nmm];

$f_{u,k}$ – karakteristična vrednost čvrstoće na zatezanje spojnog sredstva, u [Nmm].

Kada je spojno sredstvo u vezi opterećeno na smicanje, mogu nastati različiti tipovi loma, koji zavise od uzajamne veze između pritiska po omotaču rupe, momenta tečenja spojnog sredstva i debljine drvenih elemenata. Johansen (1949) je prvi izložio ovu teoriju (Johansenova teorija tečenja) za određivanje nosivosti spojnih sredstava, načelno identifikujući tri osnovna moguća tipa loma koja mogu nastati u vezi: kruto spojno sredstvo i gnječenje drveta, formiranje jednog ili dva plastična zglobova unutar spojnog sredstva, slika 11. Prvi tip loma I nastaje u drvetu prekoračenjem pritiska po omotaču rupe, te nema pojave plastičnih zglobova u spojnom sredstvu, slika 11 (a,b,c). Drugi tip loma II određen je pojavom jednog plastičnog zgloba, ako postoji dovoljno deo element takav da se spojno sredstvo savija unutar njega, slika 11 (d,e). Treći tip loma III nastaje takođe plastifikacijom spojnog sredstva uz formiranje dva zglobova i jedan je od poželjnijih tipova loma iz aspekta duktilnosti spojnog sredstva, slika 11(f).

The dowel's moment of plasticity M_y is given by equation 22:

where is:

$M_{y,Rk}$ – the characteristic value for the yield moment, in [Nmm],

$f_{u,k}$ – the characteristic tensile strength, u [Nmm].

When dowel type fasteners are subjected in shear, different failure modes, depending on mutual relation between the wood characteristic embedment strength, fastener's yield moment and thickness of timber element, could occur. Johansson (1949) was the first one who dealt with fasteners bearing capacity in relation with possible failure modes („Johansen yield theory“), identifying three general failure modes: very stiff fastener and crushing wood grains, formation of one or two plastic hinges in fastener with slight crushing of timber. Mode I occurs in timber when timber embedment strength is exceeded and there is no plastic hinges in dowels, figure 11 (a,b,c). Mode II is determined by appearance of one plastic hinge in enough tick element, figure 11 (d,e). Mode III occurs when two plastic hinges appear what usually happens when all the parameters are balanced, figure 11 (f). From the aspect of fastener's ductility, the third type is the most favourable one.

Slika 11. Mogući tipovi loma u vezi drvo–drvo, jednosečne veze [31]
Figure 11. Failure modes for timber and panel connections, single shear [31]

U zavisnosti od tipa loma, Evrokod 5 daje izraze za proračun nosivosti na osnovu Johansenovih jednačina, a za veze drvo–drvo i čelik–drvo. Kako EC 5 ne sadrži proračun nosivosti spojnih sredstava za veze drvo–beton, na osnovu rezultata različitih istraživanja mogu se koristiti predloženi izrazi za veze čelik–drvo, primenom izraza za debele čelične ploče (izrazi 23a, b, c), slika 12.

Eurocodes gives expressions for lateral bearing capacity of dowel type fasteners according to Johanson's equations for timber-to-timber and steel-to-timber joints. In the lack of adequate particular expressions for timber-to-concrete joints, the expressions given for thick metal plates-to-timber joints could be applied (equations 23a, b, c), figure 12.

Slika 12. Mogući tipovi loma u vezi drvo–beton, jednosečne veze [31]
Figure 12. Failure modes for timber-concrete connections, single shear [31]

Karakteristična nosivost trnova u spojnoj ravni po spojnom sredstvu, u jednosečnim vezama, predstavlja najmanju vrednost dobijenu iz sledećih izraza:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d & (a) \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \\ 2.3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \end{cases} \quad (23)$$

gde je:

$F_{v,Rk}$ – karakteristična nosivost spojnog sredstva u spojnoj ravni;

$f_{h,k}$ – karakteristična vrednost čvrstoća na pritisak po omotaču rupe drveta;

t_1 – debljina bočnog drveta ili dubina zabijanja, u zavisnosti od toga šta je manje;

$F_{ax,Rk}$ – karakteristična vrednost nosivosti na čupanje spojnog sredstva.

U izrazima 23(b) i 23(c), prvi deo izraza je nosivost prema Johansenovoj teoriji tečenja, dok je drugi deo izraza $F_{ax,Rk}/4$ doprinos efekta prijanjanja („rope effect“). Doprinos nosivosti usled efekta prijanjanja kod trnova, prema EC 5, ograničen je procentom u odnosu na Johansenov deo i iznosi 0%, te se izraz (23) pojednostavljuje:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d & (a) \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] & (b) \\ 2.3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} & (c) \end{cases} \quad (24)$$

Konačno, proračunsku vrednost nosivosti $F_{v,Rd}$ spojnih sredstava, za granično stanje nosivosti (GSN), treba izračunati kao:

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad (25)$$

gde je:

$F_{v,Rk}$ – karakteristična vrednost nosivosti;

γ_M – parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala, tabela 2.3 u poglav. 2.4.1 EC5;

k_{mod} – korekcionni koeficijent kojim se uzimaju u obzir uticaj trajanja opterećenja i vlažnosti, tabele 3.1 i 3.2 u poglavlju 3.1.3 EC5.

The characteristic lateral bearing capacity of dowels in single shear per fastener per shear plane are the minimum value obtained from the following equations:

where:

$F_{v,Rk}$ – is the characteristic load-carrying capacity per shear plane per fastener,

$f_{h,k}$ – is the characteristic embedment strength in the timber member,

t_1 – is smaller thickness of the timber side member or the penetration depth,

$F_{ax,Rk}$ – is the characteristic withdrawal capacity of the fastener.

In expressions 23(b) and 23(c), the first part represents the bearing capacity according to Johansen theory, while the second part of the expression $F_{ax,Rk}/4$ is so called "rope effect". The rope effect contribution for dowel type fasteners is limited to 0%, so the expression (23) is simplified:

Finally, the design bearing capacity $F_{v,Rd}$ for ultimate limit state (ULS) should be calculated as:

where:

$F_{v,Rk}$ – is the characteristic load-carrying capacity per shear plane per fastener,

γ_M – is the partial factor for a material property, table 2.3 in section 2.4.1 EC5,

k_{mod} – is a modification factor taking into account the effect of the duration of load and moisture content, table 3.1 and 3.2 in section 3.1.3 EC5.

3.3 Uticaj dimenzija poprečnih preseka i raspona na krutost spregnute konstrukcije

Prilikom oblikovanja drvenog i betonskog elementa u spregnutoj konstrukciji „T” preseka mora se voditi računa i o dimenzijama poprečnih preseka. Osim od krutosti spojnih sredstva tj. modula pomerljivosti, krutost spregnute konstrukcije drvo–beton bitno zavisi i od

3.3 Influence of cross-section dimensions and span on TCC bending stiffness

Adequate shaping timber and concrete members in “T” composite beams and choice of elements’ proportions is of great importance. Besides fastener’s stiffness i.e. slip modulus, effective bending stiffness of TCC significantly depends on ratio of cross-sectional

odnosa dimenzija poprečnih preseka elemenata [30]. Van der Linden, [43] je sproveo analize i dokazao je da sprežanje veoma tanke betonske ploče s visokom drvenom gredom, kao i sprežanjem veoma niske drvene grede s debelom betonskom pločom, ne vodi efikasnom sprežanju ova dva materijala u spregnutom sistemu.

Na dijagramu, slika 13, prikazano je da za određen odnos širina spregnutih elemenata $n \cdot b_o / b_t$, postoji poseban odnos visina h_o / h_t koji će generisati maksimalnu krutost spregnute konstrukcije, ukoliko se posmatra kruto spregnuta konstrukcija [46]. Pravilnim izborom odnosa dimenzija može se postići maksimalna krutost EI_{max} koja je četiri puta veća u odnosu na nespregnutu konstrukciju EI_{min} .

Slika 13. Veza između odnosa dimenzija elemenata i efektivne krutosti u kruto spregnutoj konstrukciji drvo-beton [46]

Figure 13. Relation between dimensional proportion and effective bending stiffness of TCC structure in the case of rigid coupling [46]

Zaključak o poželjnom odnosu dimenzija važi i u slučaju elastično spregnutih konstrukcija. S dijagrama, slika 14, za elastično spregnute sisteme gde je dat raspon L , razmak spojnih sredstava s i odnos širina spregnutih elemenata $n \cdot b_o / b_t$, može se primetiti da je odnos visina koji daje optimalnu efektivnu krutost elastično spregnute konstrukcije približno konstantan bez obzira na vrednost modula pomerljivosti. Takođe, veza između modula pomerljivosti spojnih sredstava i efikasnosti kompozitnog dejstva nije linearna. Za analizirane različite raspone (4m, 6m i 8m), efikasnost kompozitnog dejstva znatno raste u granicama od 10 do 300 kN/mm. Iznad ove granice, povećanje modula pomerljivosti ne vodi daljem porastu kompozitnog sadejstva, dok je ispod ove granice kompozitno dejstvo skoro neprimetno [46].

Može se konstatovati da odnos dimenzija poprečnih preseka u elastično spregnutim konstrukcijama presudno utiče na efektivnu krutost spregnutog sistema. Takođe, kako modul pomerljivosti K bitno utiče na efektivnu krutost, slika 14, može se doći do maksimalnog odnosa $(EI_{eff}/EI_{min})_{max}$ koji je u vezi sa efikasnošću kompozitnog dejstva η , (izraz 26), slika 15.

$$\left(\frac{EI_{eff}}{EI_{min}} \right) = 1 + 3 \cdot \eta \quad (26)$$

dimensions [30]. Van der Linden, [43] analyzed and proved that very thin concrete slab with high timber beam, as well as thick concrete slab with timber beam less than average height, fails to lead to efficient composite action in TCC system.

On diagrams, figure 13, it is shown that for specific widths ratio of composite members $n \cdot b_o / b_t$, there is a particular heights ratio h_o / h_t for which the max effective stiffness will be generated in the case of rigid coupling [46]. With adequate choice of dimensional proportions maximal bending stiffness EI_{max} can be achieved which can be even four times greater than stiffness of EI_{min} for structures with zero composite action.

Slika 14. Uticaj promene modula pomerljivosti na odnos visina h_o/h_t elemenata u elastično spregnutom sistemu drvo-beton [46]

Figure 14. Influence of the slip modulus variation on heights ratio h_o/h_t in the case of elastic coupling [46]

The conclusion about desirable dimensional proportions is also valid in the case of elastic coupling. From diagrams, figure 14, where the beam span is L , fastener spacing is s and widths ratio is $n \cdot b_o / b_t$, it can be noticed that heights ratio h_o/h_t that provides optimal effective stiffness, is rather constant in the case of elastic coupling, regardless of the slip modulus values. For analyzed spans (4m, 6m, and 8m), the effectiveness of composite action significantly arise between 10-300 kN/mm. Above that value, the increase of slip modulus fails to lead to further increase of composite action, while below the tested limits the composite action is insignificant [46].

It can be concluded that dimensional proportions have crucial impact on effective bending stiffness of TCC systems with partial composite action. As the slip modulus K also affects effective stiffness, figure 14, it is possible to find maximum ratio $(EI_{eff}/EI_{min})_{max}$ related to efficiency of composite action η , (expression 26), figure 15.

gde je:

η – efikasnost kompozitnog dejstva, Lukaszewska [27];

E_{eff} – efektivna krutost elastično spregnute konstrukcije;

E_{min} – krutost nespregnute konstrukcije.

Slika 15. Maksimalan odnos efektivnih krutosti u zavisnosti od efikasnosti kompozitnog dejstva [34]

Figure 15. Max ratio of effective stiffnesses in correlation of coupling effectiveness [34]

U zavisnosti od odnosa $n \cdot b_c / b_t$, primenom izraza 27, slika 15, [34], može se doći do optimalnog odnosa h_c / h_t , pri kome će se generisati maksimalna krutost spregnute konstrukcije sa odnosom $(E_{eff}/E_{min})_{max}$.

$$\frac{h_c}{h_t} = \frac{1}{\sqrt{n \cdot \frac{b_c}{b_t}}} \quad (27)$$

gde je:

h_c – debljina betonske ploče;

h_t – visina drvene grede;

b_c – efektivna širina betonske ploče;

b_t – širina drvene grede;

n – odnos modula elastičnosti betona i drveta, E_c/E_t .

Takođe, treba obratiti posebnu pažnju i na raspon spregnutog nosača L koji utiče na efektivnu krutost spregnute konstrukcije. Ukoliko se posmatra zavisnost između raspona L i efikasnosti kompozitnog dejstva η , može se primetiti da za raspone manje od 2m uticaj povećanja modula pomerljivosti na krutost spregnute konstrukcije nema velikog značaja, slika 16. S druge strane gledano, s manjom vrednošću modula pomerljivosti mogu se postići isti procenti kompozitnog dejstva usvajajući veći raspon nosača, slika 16, [34].

3.4 Efektivna širina betonske ploče

Efektivna (sadejstvjuća) širina betonske ploče u spregnutom preseku drvo–beton zavisi od

where:

η – is degree of composite action, Lukaszewska [27],

E_{eff} – is the bending stiffness for partial composite action,

E_{min} – is the bending stiffness for perfect composite action.

Slika 16. Veza između raspona L i efikasnosti kompozitnog dejstva η u zavisnosti od modula pomerljivosti spojnih sredstava K [34]

Figure 16. Correlation between span L and effectiveness of composite action η on the basis of connector's slip modulus K [34]

The optimal ratio h_c / h_t , that generates maximum stiffness of composite structure with $(E_{eff}/E_{min})_{max}$, is possible to determine on the basis of the ratio $n \cdot b_c / b_t$ and by application of expression 27, figure 15, [34]:

where is:

h_c – depth of concrete slab,

h_t – depth of timber beam,

b_c – effective width of concrete slab,

b_t – width of timber beam,

n – ratio of the Young's modulus of elasticity of concrete and timber, E_c/E_t .

The particular attention should be paid on beam span L that affects effective stiffness of TCC. Considering the mutual relation between span L and the degree of composite action η , it can be noticed that for spans less than 2m, the increase of slip modulus have insignificant influence on effective bending stiffness, figure 16. At the other hand, it is possible to achieve the same level of composite action with lower slip modulus, adopting larger beam spans for structure, figure 16, [34].

3.4 Effective width of concrete slab

Effective (co-acting) width of concrete slab in TCC cross-section depends on unequal normal stress

neravnomernog rasporeda normalnih napona po širini betonske ploče. Ovi naponi se u armirano- betonsku ploču unose pri nastanku smičućih sila na kontaktu između drveta i betona primenom moždanika [41], a sadejstvujuća (efektivna) širina ploče b_{ef} određuje se iz uslova (28):

$$b_{ef} \cdot \max \sigma_x = 2 \cdot \int_0^{b/2} \sigma_x \cdot d_y \quad (28)$$

Istraživanje Natterer i Hoeft [33], bilo je fokusirano na analizu ponašanja spregnutih grednih sistema drvo–beton izloženih najčešćim slučajevima opterećenja (koncentrisano opterećenje, ravnomerno raspodeljeno i sinusoidno opterećenje). Autori su razvili i predložili postupak za određivanje efektivne širine koja se bazira na definiciji faktora redukcije. Koristeći teorijski pristup problemu u pogledu povezanosti normalne sile/napona sa širinom betonske ploče, a za prostu gredu s različitim vrstama opterećenja, dobijena je definicija odgovarajućeg faktora redukcije širine betonske ploče. Poznajući značaj uticaja vrste opterećenja na efektivnu širinu betonske ploče, faktor redukcije određen je za koncentrisano i raspodeljeno opterećenje, a za tipove unutrašnjih sila kojima je spregnut presek izložen, tj. faktor redukcije određen je na osnovu normalnog napona usled aksijalne sile i napona savijanja usled momenta [36]. Jednačinama (29–32), dati su izrazi za određivanje faktora redukcije širine betonske ploče.

Faktor redukcije širine betonske ploče pri dejstvu u momentu savijanja:

$$\text{za raspodeljeno opterećenje} \quad \beta_{MG,r} = 1 \quad \text{for uniformly distributed loading} \quad (29)$$

$$\text{za koncentrisano opterećenje} \quad \beta_{MG,k} = \left[1 - 0.25 \cdot \left(\frac{b}{L} \right) \right] \quad \text{for point load at mid-span} \quad (30)$$

Faktor redukcije širine betonske ploče pri dejstvu aksijalne sile:

Reduction factors of the effective width due to normal stresses:

$$\text{za raspodeljeno opterećenje} \quad \beta_{NG,r} = \left[1 - 1.4 \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^2 \right] \quad \text{for uniformly distributed loading} \quad (31)$$

$$\text{za koncentrisano opterećenje} \quad \beta_{NG,k} = \left[1 - 1.4 \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^2 - 0.8 \cdot \left(\frac{b}{L} \right) \right] \quad \text{for point load at mid-pan} \quad (32)$$

gde je:

b – međusoban razmak drvenih nosača;

L – raspon nosača.

Konačno, efektivna širina betonske ploče u spregnutoj konstrukciji drvo–beton, može se odrediti na osnovu izraza (32 i 33), koji zavisi od tipa opterećenja (ravnomerno raspodeljeno ili koncentrisano opterećenje).

Where is:

b – mutual spacing of wooden beams,

L – span of the beam.

Finally, the effective concrete slab width in TCC system can be calculated according to expressions (32 and 33), that depend on loading type (uniformly distributed or point concentric load).

$$\text{za raspodeljeno opterećenje} \quad b_{ef,r} = b \cdot \beta_{MG,r} \cdot \beta_{NG,r} \quad \text{for uniformly distributed loading} \quad (33)$$

$$\text{za koncentrisano opterećenje} \quad b_{ef,k} = b \cdot \beta_{MG,k} \cdot \beta_{NG,k} \quad \text{for point load at mid-pan} \quad (34)$$

4 MODELIRANJE SPREGNUTE KONSTRUKCIJE DRVO-BETON

Zbog kompleksnosti problema, nedostatka eksperimentalnih podataka i njihove generalizacije kroz standarde, nije moguće efikasno i uopšteno formulisati i modelirati spregnute sisteme drvo-beton [29]. Broj programa za strukturalnu analizu i proračun konstrukcija danas je gotovo nesaglediv. Neki od najrasprostranjenijih na domaćem tržištu jesu Tower, AxisVM, SAP2000 i drugi, ali ovi softverski paketi uglavnom ne poseduju posebne biblioteke s relevantnim podacima za modeliranje spoja drvo-beton, te se uvrštavanje bitnih parametara sprovodi „ručno“ to jest na osnovu (oskudnih i često nedorečenih) podataka datih u standardima. Budući da u EC5 nema podataka za module pomerljivosti koso / unakrsno postavljenih štapastih spojnih sredstava (iako postoje izrazi za proračun njihove nosivosti), modeliranje ovakvih spojeva nije sigurno za široku inženjersku praksu bez eksperimentalnih ispitivanja. Na osnovu postojećih izraza, moguće je efikasno modeliranje vertikalno postavljenih štapastih spojnih sredstava.

U slučajevima kada program ne poseduje bazu elemenata za modeliranje spregnutih konstrukcija jedan od efikasnih načina je modeliranje putem Virandel nosača, slika 17. Sistem Virandel nosača može se jednostavno primeniti na spregnute konstrukcije drvo-beton sa spojem ostvarenim putem vertikalno postavljenih moždanika zato što je ovakvo modeliranje direktno oponašanje realnog sistema, a kako u EC5 postoje predloženi (konzervativni) izrazi za module pomerljivosti, posledično su rezultati analize spregnutog nosača (Virandel) veoma bliski rezultatima klasičnog proračuna (γ -metod). Ovaj sistem se zasniva na postojanju vertikala koje povezuju dva elementa istih ili različitih fizičko-mehaničkih karakteristika, gde vertikale u ovom smislu predstavljaju mehanička spojna sredstva sa određenom krutošću na savijanje pri pomeranju. Krutost vertikala $[EI]$ predstavljena je preko modula pomerljivosti spojnih sredstava za sprezanje K , kako je prikazano na slici 17.

Slika 17. Virandel model za spregnute sisteme drvo-beton [3]
Figure 17. Virandel's model for timber-concrete composite systems [3]

Na ovaj način se uvodi pomeranje (klizanje) u spoju između dva elementa, tj. popustljivost veze drvo-beton. Virandel nosač se formira tako što se sistemske ose elemenata povezuju vertikalama određene krutosti, koje su kruto vezane za elemente spregnute konstrukcije (drvo, beton) [28]. Preko izraza za krutost vertikale $[EI]$, slika 17, može se doći do „zamenjujućeg“ poprečnog preseka vertikale ukoliko je poznat modul pomerljivosti

4 MODELLING TIMBER-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURE

Problem formulation and modelling TCC system is a difficult task due to its complexity and lack of generalized experimental data, especially when there is no consequent structural codes [29]. The number of available software packages for structural analysis is immense. Some of mostly widespread software on domestic market is Tower, AxisVM, SAP2000, etc., but these packages fail to contain particular libraries with relevant data for TCC modelling i.e. they are not particularly developed for this purpose. Therefore, relevant mechanical, physical and slip properties are usually inserted by "hand" and on the basis of poor and half-done code requirements. Data about slip modulus of dowel type fasteners in inclined / crossed position do not exist in EC5 (despite expressions for bearing capacity), so modelling of this type of timber-concrete connection in this moment is unclear and on the safe side without experimental results. Modelling vertically positioned dowel type fasteners with existing code's provision is efficient and could be done through several options.

Modelling TCC system is possible through the application of Virandel's model, figure 17. This model is easy to use for TCC with vertically positioned dowels because it directly imitates the behaviour of real system. When EC5 suggested (conservative) expressions for slip modulus are applied, the analysis leads to classic design given by " γ " method. Virandel's model is based on verticals that connect two members of similar or opposite physical and mechanical properties. The verticals represent mechanical dowel fasteners with stiffness $[EI]$ defined through slip modulus for particular fastener type K , as it is shown in figure 17.

In this way the interface deformation (slip) between two members is introduced into the model. Virandel's girder is formed in a way that centrelines of both members are linked by verticals of certain stiffness that are fixed in composite members (timber, concrete) [28]. Through the expression for verticals' stiffness $[EI]$, figure 17, it is possible to obtain the value of "substituting" cross-section of verticals if dowel's slip modulus K is

spojnog sredstva K . Ako se usvoji kružni poprečni presek vertikale, prečnik d „zamenjujućeg“ preseka dat je preko izraza (35), čime su određeni svi elementi potrebni za modeliranje spregnute konstrukcije drvo–beton.

$$d = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot K \cdot r^2}{3 \cdot \pi \cdot E}} \quad (35)$$

U određenim programima gde postoje tzv. „link“ elementi, moguće je direktnije definisati i modelirati vezu drvo–beton. Link-elementi su elementi veze, koji su implementirani u softvere za strukturalnu analizu, i služe za modeliranje veze između dva čvora ili dve linije preko jednog interfejsa (veza za prenos sile i pomeranja) [25]. Element veze (link-element) ima šest komponenti krutosti, tri translacije i tri rotacije, koje mogu da imaju i nelinearno ponašanje. Položaj mesta spoja unutar elementa veze određuje se pri definisanju link-elementa, pri čemu se jedan čvor smatra referentnim. Ukoliko je vrednost komponente krutosti nula, odgovarajuća sila ili moment se ne prenosi sa čvora na čvor. U npr. SAP2000, postoji link-element za vezu između dva čvora, gde je moguće definisati vezu kao nelinearnu, plastičnu i tako dalje, čime se preciznije određuje ponašanje spoja, ali što je opet, u nedostatku eksperimentalnih ispitivanja ili bližih odredaba standarda, neadekvatno za svakodnevnu praksu. Krutost link-elementa definisana je kao i modul pomerljivosti, tj. sila kojom treba opteretiti vezu da bi relativno pomeranje u njoj bilo jedinično. Svaki link-element predstavlja spojno sredstvo u spregnutoj konstrukciji kojim se povezuju sistemske ose elemenata.

Na slici 18 slikovito je prikazano modeliranje spregnute grede primenom link-elementa, gde su elementi konstrukcije (drvo, beton) povezani elementima veze (link-elementima) na mestima gde se nalaze spojna sredstva. Komponenta translatorne krutosti link-elementa u pravcu paralelnom smičućoj ravni, jednaka je modulu pomerljivosti spojnih sredstava K [N/mm].

Modeliranje složenijim postupcima, npr. pločastim elementima i elastičnim oprugama, jeste sofisticiraniji pristup problemu, veoma primenljiv i poželjan u istraživačkom pristupu, radi formiranja modela za realno prikazivanje eksperimentalnih merenja [29].

known. In the case of circular cross-section, the diameter d of “substituting” cross-section is given by expression (35), thereby all necessary data for modelling are determined.

In certain software where “link” elements exist, it is possible to define and model timber-concrete connection in a more direct way. “Link” elements are implemented in structural software in order to model and connect each set of joints between the beam and the plate as links between two nodes or two lines through unique interface, [25]. “Link” elements have 6 stiffness components, 3 translations and 3 rotations that may have a nonlinear behaviour. A good way to connect all the links is to generate grid members or to draw the first one as referent and then copy it along the length of the member. If any of stiffness components is zero, the corresponding force or moment fails to transfer from node to node. In some software, e.g. SAP2000, there is a “link” element between two joints in which it is possible to define nonlinear, plastic etc. behaviour what leads to more precise definition of partial composite behaviour. At the other hand, such modelling is suitable for research activities, when experimental data are available, but makes a lot of problems in everyday practice and it is inadequate when there is no clear code provisions. The stiffness of “link” element could be simply defined as slip modulus i.e. each link element represents dowel fastener in a structure with partial composite behaviour, connecting the centrelines of composite members.

Modelling composite behaviour of TCC system by “link” elements is shown in figure 18, where timber and concrete members are linked at distances of real fasteners. The translator stiffness component of link element in direction parallel to shear plane is equal to slip modulus of fasteners K [N/mm].

Besides the modelling methods of timber-concrete composite behaviour that have both - advantages of being fast to model and limitation in application and accuracy, there are numerous sophisticated procedures that are convenient in theoretical research and suitable for real presentation of experimental work [29].

Slika 18. Primer spregnute konstrukcije drvo–beton modelirane link-elementom [46]

Figure 18. Modeling of TCC structure by “link” elements, example [46]

5 PRORAČUN MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE OD LLD SA SPREGNUTOM BETONSKOM KOLOVOZ-NOM PLOČOM PREMA EN STANDARDIMA

5.1 Projektni zadatak i preliminarne analize

Radi ilustracije pregleda teorijskih saznanja iz standarda i pratećih istraživanja spregnutih sistema drvo–beton, projektovana je i proračunata prema evropskim normama konstrukcija lučnog mosta od LLD sa spregnutom betonskom kolovoznom pločom [31]. Kao idejna osnova za izvođenje sistema, izabrana je realna i već izvedena konstrukcija drvenog mosta „Montmorency South Forest Bridge” (Kvebek, Kanada), slika 19, koja je modifikovana tako da se umesto drvene usvoji betonska spregnuta kolovozna ploča. Konačna širina mosta, raspon, kao i raspored i broj drvenih elemenata noseće konstrukcije (lukovi i grede), određeni su na osnovu relevantnih kombinacija analiziranih opterećenja za usvojenu lokaciju (Užice, Srbija).

*Slika 19. Idejna osnova projekta: „Montmorency South Forest Bridge” Kvebek, Kanada [24]
Figure 19. Idea for bridge project: "Montmorency South Forest Bridge" Kvebek, Kanada [24]*

Konstrukcija drumskog mosta je ukupne dužine 40m i širine 9.5m, formirana od lučnih nosača (luk na dva zgloba) raspona 35m koji obrazuju oslonačku konstrukciju, kao i betonske ploče koja se spreže s podužnim grednim nosačima putem mehaničkih spojnih sredstava (trnovi $\Phi 22\text{mm}$) koja predstavlja kolovoznu konstrukciju mosta. Za izlivanje betonske ploče predviđena je zarobljena oplata u vidu OSB ploča, koje se postavljaju na podužne grede. Poprečne grede predstavljaju oslonce podužnoj gredi koja ima statički sistem kontinualnog nosača na četiri polja. Most je namenjen za drumski saobraćaj s dve kolovozne trake, dok su za prelazak pešaka predviđene dve pešačke staze. Kako bi se obezbedio siguran saobraćaj pešaka od drumskih vozila, kolovozne trake su odvojene od pešačkih staza putem odbojnih ograda. Elementi drvene konstrukcije su od lameliranog lepljenog drveta, zaštićeni premazima zbog uslova u kojima se mostovska

5 DESIGN OF GLULAM BRIDGE STRUCTURE WITH CONCRETE CARRIAGEWAY DECK ACCORDING TO EN

5.1 Design task and preliminary analysis

In order to illustrate the theoretical issues from structural building codes and accompanying research, the design project of glulam arch bridge structure with composite concrete carriageway deck was done according to European codes [31].

As idea for structural solution of the bridge, the "Montmorency south forest bridge" Québec, was adopted, figure 19, which was modified with concrete deck instead the existing wooden one.

The final bridge width, span as well as disposition and number of structural elements (arches and beams) are iteratively determined on the basis of relevant load combination for chosen location (Užice, Srbija).

The total length of bridge structure is 40m, while the width of bridge deck is 9,5m. Composite TC bridge deck structure (superstructure continuous glulam beams with concrete slab mutually coupled by dowels $\Phi 22\text{mm}$) is supported by two-hinge arches with span of 35m. For concrete slab construction, the trapped formwork made of OSB boards is foreseen. Transversal beams are supports for longitudinal continuous beams on 4 spans. The bridge is designed as road bridge with two traffic lines and two separated by fences pavements for pedestrians. Structural members are made from chemically protected glulam, due to predicted exploitation conditions.

konstrukcija nalazi.

Na slici 20, prikazana su tri varijantna rešenja proistekla iz analize koja obuhvata položaj korisnog opterećenja, racionalnog izbora broja i dispozicije elemenata, kao i iterativne analize [22, 23, 24] usled dejstava koja deluju na most prema EN.

The three variant solutions of the bridge disposition and number of structural members are shown in figure 20. The variants are results of iterative analysis where the vehicle load positions and all relevant load combinations according to EN were considered [22, 23, 24] in order to rationalize the bridge structure.

MODEL 1

MODEL 2

MODEL 3

Slika 20. Preliminarna rešenja: varijante rešenja spregnutog mosta drvo—beton na osnovu statičke i dinamičke analize [24]

Figure 20. Preliminary design: Variants of glulam-concrete bridge disposition due to preliminary static and dynamic analysis [24]

Model 1 predstavlja konstrukciju mosta koju formiraju 22 lučna (luk na dva zgloba) i 21 gredni nosač (kontinualni sistem nosača na četiri polja). U Modelu 2 i 3 izvršena je redukcija broja lučnih i grednih elemenata, gde je broj lučnih nosača 16 i 20, dok je broj podužnih greda 11 i 10 respektivno. Varijantno rešenje, Model 2, predstavlja racionalan izbor konstrukcije mosta, kako u izboru broja i rasporeda drvenih elemenata tako i u svim ostalim aspektima ponašanja konstrukcije pod dejstvima koja deluju na most. Za dalju analizu i proračun usvojeno je drugo varijantno rešenje – Model 2.

5.2 Analiza dejstava i kombinacije prema EN

Za izabrani model sprovedena je analiza opterećenja prema EN 1991 [7, 8, 9, 10] (sopstvena težina, korisno opterećenje – model LM1 – kombinacije gr1 i gr2, dejstvo vetra – opšta metoda, konstrukcija nije osetljiva na dinamičku pobudu, sneg) i prema EN 1998-1 [17] i 1998-2 [18] – seizmičko dejstvo preko modalne spektralne analize i linearne elastične vremenske analize. Kombinacije dejstava formirane su za GSN i GSU, [6], [1], [44], za sve merodavne faze – proračunske situacije za mostove [13], [14], [16].

Za drvenu konstrukciju od lameliranog lepljenog drveta LLD usvojena je klasa drveta GL28h. Za betonsku kolovoznu ploču, kao i za sve ostale betonske elemente konstrukcije mosta, usvojena je klasa betona C35/45. Usvojen čelik za armiranje betonskih elemenata, kao i proizvodnju trnova (moždanika) jeste B500.

5.3 Modeliranje spregnute konstrukcije s prisustvom oplate

Konstrukcija je modelirana u softverskom paketu za strukturalnu analizu konstrukcija, SAP 2000 v14.2.4 [4]. Konstrukcija spregnutog mosta tipa drvo–beton prostorno je modelirana primenom površinskih i linijskih elemenata. Kolovozna spregnuta konstrukcija (gornji stroj mosta), armirano-betonska ploča spregnuta s podužnim gredama primenom mehaničkih spojnih sredstava modelirana je primenom površinskih i linijskih elemenata. Oslonačka konstrukcija (donji stroj mosta), lučni nosači statičkog sistema na dva zgloba modelirani su linijskim elementima. Na slici 21 prikazan je prostorni model konstrukcije spregnutog mosta.

Model 1 is a bridge structure formed by 22 glulam two-hinge arches as substructure and 21 glulam longitudinal continuous beams with concrete composite deck as superstructure. In Models 2 and 3 the number of structural elements is reduced, so the number of arches is 16 and 20, while the number of longitudinal beams is 11 and 10 respectively. The variant solution Model 2 represents the rational choice in structural design considering number and disposition of structural elements, as well as total structural behaviour under the proposed bridge actions. The model 2 is adopted for further analysis.

5.2 Analysis of actions and load combination according to EN

For adopted model, the analysis of actions according to EN 1991 [7, 8, 9, 10] (self-weight, imposed traffic load – model LM1, with combinations gr1 and gr2, wind action – general method, when structure is insensitive to dynamic induces, snow) as well as analysis of seismic action according to 1998-1 [17] and 1998-2 [18] (seismic action through modal spectral analysis and linear elastic time analysis) were made. The combinations of actions are made for ULS and SLS, [6],[1],[44], for each relevant construction phases – design situations for bridges [13],[14],[16].

For timber glulam structure, the adopted material is the strength class GL28h. Concrete carriageway slabs, as well as all other concrete parts of the bridge, are designed in concrete class C35/45. Reinforcement steel and steel for dowel type fasteners is B500.

5.3 Modelling composite action with presence of formwork

The bridge structure was modelled in structural software package SAP 2000 v14.2.4 [4], as a spatial structural model using shell and beam elements. Carriageway composite RC deck-slab coupled with longitudinal glulam beams with mechanical fasteners (bridge superstructure) is modelled with shell and beam elements. Supporting structure – glulam two-hinge arches (bridge substructure) is modelled by beam elements. The spatial model of bridge structure is presented in isometric view in figure 21.

Slika 21. Isometric view of bridge structural model [31]
Slika 21. Izometrijski prikaz modela konstrukcije mosta [31]

Sprezanje drveta i betona, primenom opisanog principa Virandel nosača, modelirano je linijskim elementima sa zamenjujućim prečnikom. Trnovi su postavljeni u dva reda na međusobnom rastojanju $e=20\text{cm}$ celom dužinom mosta. Trnovi postavljeni u paru modelirani su zamenjujućim trnom s modulom pomerljivosti $K_{ZAM}=2 \cdot K_i$. Modul pomerljivosti spojnih sredstava određen je „Gelfijevim“ modelom, gde je uzeto u obzir postojanje oplata debljine $d=24\text{mm}$. Napravljena su dva modela konstrukcije mosta jer su vrednosti modula pomerljivosti za svako granično stanje različite, a samim tim i zamenjujući prečnici. U Tabeli 2 prikazane su glavne pozicije mostovske konstrukcije s podužnim i poprečnim presecima.

Tabela 2. Oznake pozicija i dimenzije elemenata konstrukcije mosta, s presecima [31]
Table 2. Labels of elements, basic dimensions and cross-sections of the bridge structure [31]

Pozicije Positions	Element	b	h	D
		cm	cm	cm
POS POPG	Poprečna greda Transversal beam	2x20	30	-
POS PODG	Podužna greda Longitudinal beam	20	120	-
POS LN	Lučni nosač Arch beam	20	120	-
POS T	Trn Dowel	-	-	2.2
POS PL	AB ploča RC slab	-	20	-

5.4 Statički uticaji, dimenzionisanje, provera spojnih sredstava i GSN / GSU u elementima

U tabelama 3–4 dati su statički uticaji po pozicijama LLD elemenata. Za elemente sprežanja – trnove u tabeli 5 prikazane su maksimalne i minimalne vrednosti smičućih sila za najopterećeniji zamenjujući trn (POS T) za sve merodavne kombinacije dejstava, [31].

Za proveru graničnog stanja upotrebljivosti (GSU) određene su merodavne kombinacije dejstava, te je sproveden statički proračun za konstrukciju spregnutog mosta. Za elemente konstrukcije mosta (lučni nosači i kolovozna konstrukcija) prikazane su vrednosti pomeranja za sve merodavne kombinacije dejstava, tabela 6. Maksimalna deformacija se ograničava u intervalu od $L/400$ do $L/500$ za karakteristično saobraćajno opterećenje. Analizom rezultata utvrđeno je da su deformacije u granicama dopuštenih vrednosti. Za granična stanja nosivosti, GSN, provera napona po pozicijama u odnosu na usvojene dimenzije ukazuje na iskorišćenost preseka od max 75% za lučne nosače, i od 80% za podužne grede.

The modelling of composite timber-concrete partial behaviour was made using the Virandel's girder, with substituting dowel diameter. Dowel fasteners are positioned into two lines with constant mutual distances of $e=20\text{cm}$ along the bridge span. Pairs of dowels are modelled with substituting dowel with slip modulus $K_{ZAM}=2 \cdot K_i$. Slip modulus was determined according to the "Gelfi" model, taking into account the presence of formwork of thickness $d=24\text{mm}$. One model was made for each limit state, because slip modulus are different, as well as substituting dowels' diameters. In table 2 the main positions and labels of bridge structural elements are presented, together with transversal and longitudinal cross-sections.

5.4 Effects on structure, dimensioning, dowel's check and ULS/SLS in elements

In tables 3–4 the actions' effects - internal forces in glulam elements are given. The maximum and minimum shear forces values in fasteners for substituting dowel (POS T) for all relevant load combinations are given in table 5, [31].

Relevant actions combinations were made for checking SLS and adequate static analysis was performed. In table 6 the max deformations due to relevant action combinations are given for main structural members (arch girders and composite carriageway deck). Maximum deflections are limited between intervals $L/400$ - $L/500$ for characteristic imposed traffic load. Analyzed deflections are among permissible limits. For checking ULS i.e. checking of stress distribution in cross-sections of main structural positions indicates the stress level of 70% for arches and about 80% for longitudinal beams.

Tabela 3. Statički uticaji za merodavne kombinacije dejstava u lučnim nosačima [31]
Table 3. Internal forces for relevant combination of actions in arch girders [31]

Merodavna kombinacija POS LN Relevant combination of actions POS LN		<i>N</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
		[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
G+d _G +A _{Ed} (RS)	max N	18.2	8.7	2.6	1.0	3.1	42.1
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min N	-617.9	-55.6	-0.3	-0.1	-0.6	-56.9
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max T2	-346.4	59.0	0.3	1.6	1.0	127.5
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min T2	-581.6	-71.8	-0.2	-2.5	-1.0	30.5
1.35·(G+d _G)+1.5·F _{w,x1}	max T3	-368.3	-36.1	6.6	0.2	-12.6	123.4
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min T3	-538.2	-59.6	-6.2	-0.9	-15.6	-38.1
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max M1	-319.4	-27.9	0.1	3.9	3.4	230.8
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min M1	-514.3	-61.8	-0.3	-3.9	-2.3	74.8
G+d _G +A _{Ed} (RS)	max M2	17.7	9.2	6.2	0.9	15.6	212.0
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min M2	-538.2	-59.6	-6.3	-1.2	-15.0	-38.1
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max M3	-339.2	-30.9	0.3	1.5	1.1	249.0
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min M3	-580.0	-38.5	-0.5	-0.4	-0.3	-77.9

Tabela 4. Statički uticaji za merodavne kombinacije dejstava u podužnim gredama [31]
Table 4. Internal forces for relevant combination of actions in longitudinal beams [31]

Merodavna kombinacija POS PODG Relevant combination of actions POS PODG		<i>N</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
		[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max N	330.0	130.5	2.4	0.2	2.2	313.8
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min N	-381.7	-182.1	-89.7	-1.4	-16.5	-17.2
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max T2	213.4	239.0	3.3	0.3	1.7	137.7
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min T2	-118.2	-234.1	-3.5	-0.3	-0.6	-91.5
G+d _G +A _{Ed} (RS)	max T3	182.8	38.2	96.8	1.4	17.0	12.7
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min T3	-216.9	-81.1	-96.8	-1.4	-17.0	-5.9
G+d _G +A _{Ed} (RS)	max M1	166.5	-4.8	3.3	3.6	29.0	20.4
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min M1	-181.1	-28.0	-3.3	-3.6	-28.3	3.5
G+d _G +A _{Ed} (RS)	max M2	174.3	-2.1	28.8	3.1	30.3	22.1
G+d _G +A _{Ed} (RS)	min M2	-198.5	-33.8	-28.8	-3.1	-30.3	-4.0
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	max M3	330.0	130.5	2.4	0.2	2.2	313.8
[1.35·(G+d _G)+1.35·gr1a+1.5·0.6·F _{w,x2}]	min M3	-43.6	-174.3	-14.4	-1.0	-7.4	-160.7

Tabela 5. Max i min vrednosti smičućih sila u „zamenjujućem” trnu [31]
Table 5. Max and min values of shear forces in "substituting" dowel [31]

Merodavna kombinacija POS T Relevant combination POS T	max T [kN]	min T [kN]
1.35·G+1.5·F _{w,x1}	3.81	-5.57
G+A _{Ed} (RS)	10.71	-18.23
1.35·G+1.35·(gr1a)+1.5·(0.6·F _{w,x2})	15.21	-15.89
1.35·G+1.35·(gr2)	11.44	-11.03

Tabela 6 – Maksimalna pomeranja elemenata konstrukcije spregnutog mosta [31]
Table 6 – Max deformations of main structural elements in composite bridge [31]

Element	Merodavne kombinacije dejstava Relevant Combinations of Actions	u_z [cm]
Lučni nosač Arch structure	$G+F_{w,x1}$	0.68
	$G+(gr1a)+F_{w,x2}$	1.20
	$G+(gr2)$	0.98
Kolovozna konstrukcija (AB ploča + podužne grede) Carriageway deck (RC deck + longitudinal beams)	$G+F_{w,x1}$	0.75
	$G+(gr1a)+F_{w,x2}$	1.48
	$G+(gr2)$	1.21

Proračun betonskog preseka sproveden je u svemu prema EN 1992 [11, 12]. Potrebne površine armature za gornju i donju zonu kolovozne ploče za dva upravna pravca, određene u SAP 2000. Merodavna kombinacija za dimenzionisanje kolovozne ploče jeste kombinacija 4. $[1.35 \cdot G + 1.35 \cdot (gr1a) + 1.5 \cdot (0.6 \cdot F_{w,x2})]$. Površina podužne zategnute armature ne treba da bude manja od $A_{s,min} = 0.0013 \cdot b \cdot d$, niti veća od $A_{s,max} = 0.04 \cdot A_c$. Kako je potrebna površina armature dobijena proračunom manja od minimalne preporučene, usvaja se armiranje obe zone kolovozne ploče u dva ortogonalna pravca armaturom $\Phi 16/15$.

Sprezanje podužnih greda s betonskom kolovoznom pločom ostvareno je primenom trnova od glatkog čelika (B500), prečnika $\Phi = 22\text{mm}$ i dužine $l = 300\text{mm}$. Minimalni razmaci i minimalna rastojanja trnova od ivica i krajeva je u svemu prema EN 1995-1 [15]. Trnovi raspoređeni u dva reda i postavljeni upravno na smičuću ravan, nalaze se na jednakom međurastojanju $e = 20\text{cm}$ po celoj dužini podužne grede za sprezanje s betonskom pločom.

Za proračunske vrednosti svojstva materijala, kao i za proračunske nosivosti usvojen je parcijalni koeficijent sigurnosti za veze $\gamma_M = 1.30$. Vrednost korekcionog koeficijenta k_{mod} kojim se uzima u obzir trajanje opterećenja i vlažnost drveta u eksploatacionim uslovima iznosi $k_{mod} = 0.7$. Karakteristična vrednost čvrstoće na zatezanje $f_{u,k}$ za trnove od glatkog čelika od materijala B500 iznosi $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$. Za lamelirano lepljeno drvo klase GL28h, karakteristična vrednost zapreminske mase drveta je $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$.

Karakteristična vrednost pritiska po omotaču rupe drvenog preseka za usvojene trnove prečnika $\Phi = 22\text{mm}$ iznosi:

$$f_{h,0,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot 0.22) \cdot 410 = 26.22 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična vrednost momenta tečenja je:

$$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot 500 \cdot 22^{2.6} = 463863.5 \text{ Nmm}$$

Karakteristične nosivosti trnova u spojnoj ravni po jednom spojnom sredstvu iznose:

Calculations of concrete sections were performed according to EN 1992 [11,12]. The necessary reinforcement quantities for upper and lower zones in two orthogonal directions are determined by SAP 2000. The relevant combination for dimensioning the slab-deck is combination 4. $[1.35 \cdot G + 1.35 \cdot (gr1a) + 1.5 \cdot (0.6 \cdot F_{w,x2})]$. The area of tensioned reinforcement should not be less than $A_{s,min} = 0.0013 \cdot b \cdot d$, nor greater than $A_{s,max} = 0.04 \cdot A_c$. The calculated area of reinforcement is less than minimum suggested, so the reinforcement of $\Phi 16/15$ is adopted for both zones of slab-deck in two orthogonal directions.

Composite action between longitudinal glulam beams and concrete deck is realized by smooth steel (B500) dowels with diameter $\Phi = 22\text{mm}$ and with length $l = 300\text{mm}$. Minimum spacing and edge distances are adopted according to EN 1995-1 [15] recommendations. Pairs of dowels for coupling concrete slab are applied vertically across the shear plane at the constant distance of $e = 20\text{cm}$ along the longitudinal beams.

Partial coefficient for material properties and bearing capacities of dowels is adopted as suggested value for connections $\gamma_M = 1.30$. Modification factor for load duration and exploitation class is $k_{mod} = 0.7$. Characteristic strength value for dowels is $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$. Characteristic density for glulam GL28h is $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$.

Characteristic embedment strength of glulam GL28h and dowels $\Phi = 22\text{mm}$ is:

$$f_{h,0,k} = 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot 0.22) \cdot 410 = 26.22 \text{ N/mm}^2$$

Characteristic value of yield moment for dowels $\Phi = 22\text{mm}$ is:

$$M_{y,Rk} = 0.3 \cdot 500 \cdot 22^{2.6} = 463863.5 \text{ Nmm}$$

Characteristic bearing capacity for dowels $\Phi = 22\text{mm}$ is:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 26.22 \cdot 200 \cdot 22 \\ 26.22 \cdot 200 \cdot 22 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 463863.5}{26.22 \cdot 200^2 \cdot 22}} - 1 \right] \\ 2.3 \cdot \sqrt{463863.5 \cdot 26.22 \cdot 22} \end{cases} = \min \begin{cases} 115.4 \text{ kN} \\ 51.0 \text{ kN} \\ 37.6 \text{ kN} \end{cases}$$

Proračunska vrednost nosivosti $F_{v,Rd}$ za jedno spojno sredstvo iznosi:

$$F_{v,Rd} = 0.7 \cdot \frac{37.6}{1.3} = 20.25 \text{ kN}$$

Proračunska vrednost smičuće sile u trnu određena je statičkom analizom modela konstrukcije mosta koji je modeliran putem Virandel sistema. Ovaj način modeliranja spregnute konstrukcije omogućava očitavanje smičuće sile za svaki trn zasebno. Merodavna kombinacija dejstava koja daje maksimalnu silu u zamenjujućem trnu jeste kombinacija 3. [G+A_{Ed}(RS)]. Maksimalna proračunska vrednost smičuće sile u trnu za merodavnu kombinaciju iznosi $F_{v,Ed} = F_{v,Ed,ZAM}/2 = 18.23/2 = 9.12 \text{ kN}$.

U praksi, postavljanje trnova u drvenu gredu s minimalnim rastojanjem između redova izbegava se zbog precizne ugradnje spojnih sredstava na licu mesta (gradilištu). Jedan od načina jeste postavljanje trnova u dva smaknuta reda radi izbegavanja minimalnih rastojanja kao i mogućnost precizne ugradnje u drveni presek.

Načini za povećanje krutosti spoja sa elastičnim vertikalnim moždanicima – trnovima, može se tražiti i u njihovoj kombinaciji s pravljenim žljebovima u drvetu na kontaktu s betonom. Domaća eksperimentalna istraživanja [5] pokazuju da se očuvanjem ekvidistantnog rastojanja među vertikalnim moždanicima i pravljenjem žljebova na mestu svakog drugog, modul pomerljivosti može višestruko povećati, te se može postići značajna efikasnost sprežanja. Rezultati sličnih ispitivanja širom sveta, primenom spojnih sredstava i prirodne athezije u žljebovima, ukazuju na povećanje krutosti spoja od 50 do 300% [27], [35].

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su osnovni principi projektovanja i proračuna spregnutih sistema tipa drvo–beton s naglaskom na odredbe EN (Evrokodova) za projektovanje konstrukcija, kao i na rezultate pratećih eksperimentalno-teorijskih istraživanja u oblasti spregnutih konstrukcija koja su od velikog značaja za širenje baze znanja, kao i unapređivanja postojećih normi.

U očekivanju posebnih normi za projektovanje spregnutih sistema drvo–beton, a u nedostatku specifičnih eksperimentalnih istraživanja, treba posredne i konzervativne preporuke sadržane u postojećim standardima smatrati za polaznu osnovu za izračunavanje modula pomerljivosti, pri čemu se mora voditi računa da su one date za vertikalno postavljena spojna sredstva i ne podrazumevaju prisustvo oplata u preseku. Osim modula pomerljivosti, pravilan raspored i odnos dimenzija spregnutih elementa značajno utiče na efikasnost kompozitnog dejstva, kao i na celokupnu krutost sistema.

U ilustrativnom primeru, komparativna analiza seizmičkog dejstva na konstrukciju mosta pokazala je da

Designed bearing capacity $F_{v,Rd}$ for dowels $\Phi=22\text{mm}$ is:

$$F_{v,Rd} = 0.7 \cdot \frac{37.6}{1.3} = 20.25 \text{ kN}$$

Relevant shear forces in dowels $\Phi=22\text{mm}$ are determined through static analysis on Virandel system. The relevant load combination that gives max effect in substituting dowel is combination 3. [G+A_{Ed}(RS)]. Max calculated shear force in dowel for combination 3 is: $F_{v,Ed} = F_{v,Ed,ZAM}/2 = 18.23/2 = 9.12 \text{ kN}$.

Application of dowels with minimum spacing and edge distances could provoke practical difficulties at the site. The possible problem can be overcome with alternating rows that allow more precise application of dowels into the timber beam.

In the case when vertical elastic dowels are applied, the possibility for increasing connection stiffness can be found in their combination with notches in timber, when natural adhesion with concrete increases the total stiffness. Domestic experimental research [5] show that keeping the equidistant spacing among vertical dowels and having notches on the place of every second one, the slip modulus can multiply and composite degree could significantly arise. The results of similar worldwide investigation about combined application of fasteners and notches – natural adhesion, indicate that connection stiffness can be increased from 50 till 300% [27], [35].

6 CONCLUSION

The basic principles of analysis and design of timber-concrete composite systems are presented in this paper. The highlights are given on the recommendations of Eurocodes for structural design and on the results of accompanying theoretical and experimental research that have great importance on enlargement of knowledge basis and improvement of existing codes.

In anticipation of particular codes for designing timber-concrete composites, it is very helpful to use indirect and conservative recommendations from existing codes, especially when there is lack of experimental data. They have to be considered as basis for calculation of essential parameter for TCC design – slip modulus. Important thing is that these recommendations are limited on vertically applied fasteners with direct contact between timber and concrete (no formwork in the cross-section). Besides the slip modulus, correct disposition and choice of members' proportions have also dominant influence on degree of composite action and overall effective stiffness.

In illustrative example, the comparative seismic analysis has shown that for arch bridge structures with

se za sisteme gde se spregnuta kolovozna konstrukcija oslanja sa gornje strane na lučne nosače može primeniti uprošćena analiza seizmičkog dejstva putem elastičnih spektara odgovora za dva ortogonalna pravca. Pravilnim rasporedom elemenata u dispoziciji mosta može se dobiti racionalnija konstrukcija.

Savremeni tehnološki napredak u proizvodnji elemenata drvenih konstrukcija izazvao je povećanje interesovanja za drvene mostove širom sveta. Izgradnja spregnutih mostova tipa drvo–beton u poslednjih par decenija postala je trend u zemljama širom sveta, ne samo zbog svoje konstrukcijske efikasnosti i konkurentne cene, već i zbog povoljnog uticaja na životnu sredinu. Cilj ovog rada je da u praksi približi inženjerima ovaj tip sprezanja, te da prikaže analizu i proračun spregnutih konstrukcija tipa drvo–beton prema evropskim normama s primenom na konstrukcije drumskih mostova.

ZAHVALNOST: Ovaj rad je proistekao iz istraživačkog projekta TR 36043 „Razvoj i primena sveobuhvatnog pristupa u projektovanju novih i proceni sigurnosti postojećih konstrukcija u cilju smanjenja seizmičkog rizika u Srbiji” koji je finansiralo Ministarstvo nauke Republike Srbije.

upper position of carriageway deck, the simplified elastic response spectra analysis for two orthogonal directions could be applied. Through seismic analysis, the correct disposition of elements was achieved that led to more rational structure.

Progress in modern technology of timber elements prefabrication provokes arising worldwide interest for timber bridges. Building TCC bridges in last few decades has become trendy in the world for two reasons: structural efficiency with low costs, and favourable impact on environment. The aim of the paper is to present this type of composite structures to civil engineers through analysis and design of one arch bridge structure according to Eurocodes.

ACKNOWLEDGEMENT: This paper is supported by the research project TR 36043 "Development and application of a comprehensive approach to the design of new and safety assessment of existing structures for seismic risk reduction in Serbia", financed by the Ministry of Science of Serbia.

7 LITERATURA REFERENCE

- [1] Calgaro J-A., Tschumi M., Gulvanessian H.: Designers' guide to Eurocode 1: Actions on bridges EN 1991-2, EN1991-1-1, --3 to -1-7 and EN1990 Annex A2, Thomas Telford, 2010, 256 p.
- [2] Ceccotti A.: Timber-Concrete Composite Structures, Timber Engineering-Step 2, chapter E13/1-E13/12, Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- [3] Ceccotti A.: Composite concrete–timber structures, Progress Structural Engineering and Material (4), 2002, pp. 264–275.
- [4] Computers and Structures Inc. (CSI), SAP2000, structural analysis program, Version 14.2.4. Berkeley, California, USA, 2014.
- [5] Cvetković R., Stojić D., Stevanović B., Ranković S., Marković N., Conić S.: Računska analiza nekih metoda sprezanja drveta i betona, 8. Simpozijum DGKS, Zlatibor, Srbija, 2016, pp. 517–526.
- [6] Evrokod 0 - Osnove projektovanja konstrukcija, EN 1990:2002, Beograd, 2006.
- [7] Evrokod 1 (1) - Dejstva na konstrukcije – Deo 1-1: Opšta dejstva – Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade, SRPS EN 1991-1-1:2002, Beograd, 2009.
- [8] Evrokod 1 (2) - Dejstva na konstrukcije – Deo 2: Saobraćajno opterećenje na mostovima, SRPS EN 1991-2:2012, 2012.
- [9] Evrokod 1 (3) - Dejstva na konstrukcije – Deo 1-3: Opšta dejstva – Opterećenja snegom, SRPS EN 1991-1-3:2003, Beograd, 2009.
- [10] Evrokod 1 (4) - Dejstva na konstrukcije – Deo 1-4: Opšta dejstva – Dejstva vetra, SRPS EN 1991-1-4:2005, Beograd, 2009.
- [11] Evrokod 2 (1) - Projektovanje betonskih konstrukcija – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, SRPS EN 1992-1-1:2004, Beograd, 2006.
- [12] Evrokod 2 (2) - Projektovanje betonskih konstrukcija - Betonski mostovi – Pravila projektovanja i konstruisanja, SRPS EN 1992-2:2014, 2014.
- [13] Evrokod 4 (1) - Projektovanje spregnutih konstrukcija od čelika i betona – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, SRPS EN 1994-1-1:2004, Beograd, 2006.
- [14] Evrokod 4 (2) - Projektovanje spregnutih konstrukcija od čelika i betona – Deo 2: Opšta pravila i pravila za mostove, SRPS EN 1994-2:2012, 2012.
- [15] Evrokod 5 (1) – Proračun drvenih konstrukcija – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, SRPS EN 1995-1-1:2004, Beograd, 2009.
- [16] Evrokod 5 (2) - Projektovanje drvenih konstrukcija – Deo 2: Mostovi, SRPS EN 1995-2:2012, 2012.
- [17] Evrokod 8 (1) - Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade, SRPS EN 1998-1:2004, Beograd, 2009.
- [18] Evrokod 8 (2) - Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 2: Mostovi, SRPS EN 1991-2:2012, 2012.
- [19] Gelfi P., Giuriani E.: Behaviour of stud connectors in wood-concrete composite beams, Transactions on the Built Environment vol 39, WIT Press, 1999, pp. 565–578.
- [20] Gelfi P., Giuriani E., Marini A.: Stud Shear Connection Design for Composite Concrete Slab and Wood Beams, Journal of Structural Engineering-ASCE, vol. 128 n. 12, 2002, pp. 1544–1550.
- [21] João Nuno Amado R.: Pontes com estrutura mista madeira-betão e seu potencial de aplicação, Tese de doutoramento, Coimbra, 2014, 320 p.

- [22] Kočetov Mišulić T., Manojlović D.: Analysis of wind action on arch glulam timber bridges with composite concrete deck according to EN 1991-1-4 and EN 1995-2, 16. International Symposium MASE, Ohrid: MASE - Macedonian Association of Structural Engineers, Faculty of Civil Engineering, 2015, pp. 421–430.
- [23] Kočetov Mišulić T., Manojlović D., Rašeta A.: Seismic analysis of composite glulam-concrete arch bridge according EN 1998:1&2, Šesti internacionalni naučno-stručni skup građevinarstvo –nauka i praksa, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet u Podgorici, Žabljak, 2016, str. 537–544.
- [24] Kočetov Mišulić T., Manojlović D.: Comparative seismic analysis of three composite glulam-concrete arch bridges, Zbornik radova međunarodne konferencije „Peto međunarodno naučno-stručno savetovanje Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija”, Sremski Karlovci, 28–30. jun 2016. godine, pp.353–362.
- [25] Kovačević D., Budak I., Antić A., Kosec B.: Special finite elements: theoretical background and application, Tehnički vjesnik Vol. 18 No.4, 2011, pp.649–655.
- [26] Kozarić Lj.: Vibracije izazvane ljudskim delovanjem kod spregnutih međuspratnih konstrukcija tipa drvo – laki beton, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Subotica, Univerzitet u Novom Sadu, 2016, Subotica, 112 str.
- [27] Lukaszewska, E.: Development of prefabricated timber-concrete composite floors, PhD thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2009.
- [28] Manojlović D., Kočetov Mišulić T.: Slip modulus in wood-concrete composites: Practical estimation for modelling, International Conference Proc.: Contemporary achievements in civil engineering, FCE Subotica, Serbia, 2015, pp. 253–259.
- [29] Manojlović D.: Modeliranje spregnutih konstrukcija drvo–beton, Seminarski rad – Metod konačnih elemenata, Srbija, 2016, 33 str.
- [30] Manojlović D., Kočetov Mišulić T.: Rational choice of elements' proportions in timber - concrete composite systems, 8. Simpozijum DGKS, Zlatibor, Srbija, 2016, pp. 527–536.
- [31] Manojlović D.: Modeliranje i proračun mostovske konstrukcije od LLD sa spregnutom betonskom kolovoznom pločom, Master rad, UNS, FTN, DGG, Novi Sad, 2016, 187 str.
- [32] Marković Z.: Presek stanja i primena evrokodova u Srbiji od EN 1990 do EN 1999, Prezentacija, Beograd, 2015, 26 p.
- [33] Natterer J., Hoefft M.: Zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, Forschungsbericht CERS Nr. 1345, IBOIS, EPFL, Lausanne, Schweiz, 1987.
- [34] Ricardo de C. Alvim, Pedro Afonso de Oliveira Almeida: Estudo Paramétrico da Rigidez Efetiva dos Pisos Mistos de Madeira-Concreto, V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003, pp. 1–15.
- [35] Rodrigues J., Providência P., Dias A.: Use of composite timber-concrete bridges solutions in Portugal, International Conference on Timber Bridges, Lillehammer, Norway, 2010, pp. 67-78.
- [36] Sandra Raquel de Sousa Monteiro: Load distribution on timber-concrete composite floors, PhD Thesis, Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra, Coimbra, 2015, 566 p.
- [37] SRPS EN 383 - Drvene konstrukcije – Metode ispitivanja – Određivanje čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe i modula pomerljivosti za štapasta spojna sredstva, 2012.
- [38] SRPS EN 409 - Drvene konstrukcije – Metode ispitivanja – Određivanje momenta tečenja za štapasta spojna sredstva, 2012.
- [39] SRPS EN 1380 - Drvene konstrukcije – Metode ispitivanja – Nosivost eksera, zavrtnja za drvo, trnova i zavrtnja, 2012.
- [40] SRPS EN 26891 – Drvene konstrukcije – Spojevi ostvareni mehaničkim spojnim sredstvima – Opšti principi za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava, 2012.
- [41] Stevanović B.: Analiza spregnutih nosača od drveta i betona, Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1994, Beograd, 119 str.
- [42] Stevanović B.: Eksperimentalna i teorijska analiza spregnutih nosača drvo-beton izvedenih mehaničkim spojnim sredstvima, Materijali i konstrukcije 47, 2004, str. 29–46.
- [43] Van der Linden M.L.R.: Timber-concrete composite floor systems, PhD Thesis, Delft University Press, The Netherlands, 1999.
- [44] Vayas I., Liopoulos A.: Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2014, 585 p.
- [45] Yeoh D., Fragiaco M., De Franceschi M., Boon K.H.: State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures : Literature Review, Journal of Structural Engineering, Vol 137, No.10, October 2011, ASCE, pp.1085-1095.
- [46] Zhang C.: Analysis of the Timber-Concrete Composite Systems with Ductile Connection, Master Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada, 2013, 98p.
- [47] Kozarić Lj., Prokić A., Bešević M.: Unakrsno lamelirani drveni elementi u savremenim drvenim konstrukcijama zgrada - primena i proračun, Građevinski materijali i konstrukcije 58/4, 2015, str. 51-69.

REZIME

ANALIZA I MODELIRANJE SPREGNUTIH SISTEMA DRVO–BETON: PRIMENA NA PRORAČUN MOSTOVSKJE KONSTRUKCIJE PREMA EN

*Dragan MANOJLOVIĆ
Tatjana KOČETOV MIŠULIĆ*

Spregnute konstrukcije drvo–beton primenjuju se u inženjerskoj praksi oko 80 godina, prešavši put od intuitivnog inženjerskog rešenja problema do potpuno prefabrikovanih hibridnih sklopova za suhu ugradnju. Razvojni put spregnutih sistema drvo–beton bio je uvek praćen ekstenzivnim teorijsko-eksperimentalnim istraživanjima, čiji su rezultati uspešno primenjivani u praksi tj. na tržištu, ali do sada nisu rezultovali modernim standardima za projektovanje. U očekivanju novih evropskih propisa za sprezanje drvo–beton, cilj ovog rada je da se, putem opsežnog pregleda postojećih EN standarda i pratećih istraživanja, pruži jedan konsekvantan uvid u trenutno stanje u oblasti, daju preporuke za upotrebu i ilustruje primena sprezanja drvo–beton na primeru novoprojektovane mostovske LLD konstrukcije sa spregnutom betonskom kolovoznom pločom prema Evrokodovima.

Ključne reči: spregnute konstrukcije, drvo, beton, štapasta spojna sredstva, modul pomerljivosti, odnos dimenzija, modeliranje, Evrokodovi, lučni most

SUMMARY

ANALYSIS AND MODELING OF COMPOSITE TIMBER-CONCRETE SYSTEMS: DESIGN OF BRIDGE STRUCTURE ACCORDING EN

*Dragan MANOJLOVIC
Tatjana KOCETOV MISULIC*

Timber-concrete composite structures are already applied more than 80 years in engineering practice, went through the intuitive problem solution to the fully prefabricated hybrid assemblies for dry building. The development path of timber-concrete composites was always followed by extensive theoretical and experimental research, whose results were successfully implemented in practice, i.e. on the market, but till present didn't result in modern designer's code. In expectation of new european codes for timber-concrete composites, the objective of the paper is to provide a comprehensive review of available standards provisions and recent conclusions from literature. The key issues for practical design are highlighted and illustrated on the example of glulam composite arch bridge structure with concrete deck, according the Eurocodes.

Key words: Composite structures, Timber, Concrete, Dowels, Slip modulus, Dimensional proportions, FE modeling, Eurocodes, arch bridge structure