

Potpuno održivi elementi drvenih konstrukcija od tvrdog drva

Jelena Galić¹, Vlatka Rajčić²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, jelena.galic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vlatka.rajcic@grad.unizg.hr

Sažetak

U ovom radu istražuje se mogućnost uporabe trnova od tvrdog drva u potpuno održivim konstrukcijskim elementima od tvrdog drva, bez primjene metalnih spojnih sredstava i sintetskih adheziva. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje na 100 uzoraka trnova različitog promjera, duljine i površinske obrade s konačnim ciljem određivanja momenta plastifikacije. Rezultati pokazuju povećanje nosivosti i duktilnosti s porastom promjera trnova te povoljnije ponašanje narebrenih trnova u odnosu na glatke, što potvrđuje njihov potencijal za primjenu u održivim drvenim konstrukcijama.

Ključne riječi: tvrdo drvo, drveni trnovi, DLT; moment plastifikacije, duktilnost, spojevi, potpuna održivost

Fully sustainable structural elements made of hard-wood timber

Abstract

This paper examines the viability of hardwood dowels as structural connectors in fully sustainable all-timber structural assemblies, precluding the use of metal fasteners or synthetic adhesives. An experimental study was carried out on 100 dowel specimens varying in diameter, embedment length and surface treatment, with the primary objective of establishing the yield moment capacity. The results indicate an increase in load-bearing capacity and ductility with increasing dowel diameter, while threaded (ribbed) dowels exhibited more favorable behavior compared to smooth dowels, confirming their potential for application in sustainable timber structures.

Key words: hardwood, timber dowels, DLT; yield moment capacity, ductility, joints, fully sustainable

1 Uvod

Procjenjuje se da je više od 35% ukupno generiranog otpada u Europi povezano s građevinskom industrijom, što ukazuje na potrebu za promjenom postojećih pristupa projektiranju i gradnji [1]. U cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova i potrošnje primarnih sirovina, građevinski sektor sve se više usmjerava prema održivim konceptima projektiranja i gradnje, pri čemu kružna ekonomija i njezina načela postaju temelj suvremenih strategija razvoja. Izvorno 3R načela (reduce, reuse, recycle) proširena su na 5R okvir (reduce, reuse, recycle, recovery, remanufacturing), čime se naglašava produženje životnog vijeka materijala i komponenti izvan samog recikliranja [1], [2].

Drvo kao građevni materijal ima izrazite prednosti u odnosu na materijale poput čelika i betona, prvenstveno zbog obnovljivosti, mogućnosti pohrane ugljika i znatno manjeg ekološkog otiska [3]. Istraživanja pokazuju da drvene konstrukcije zahtijevaju višestruko manju količinu energije za proizvodnju u odnosu na armiranobetonske i čelične sustave [4]. Razvoj inženjerskih drvenih proizvoda omogućio je primjenu drva u sve zahtjevnijim konstrukcijskim sustavima, uključujući višekatnice i građevine velikih raspona [5].

Međutim, konvencionalni sustavi, poput križno lameliranog drva (CLT), u velikoj se mjeri oslanjaju na sintetske adhezive i metalna spojna sredstva, što ograničava mogućnost recikliranja i ponovne uporabe takvih konstrukcijskih elemenata te smanjuje njihovu ukupnu održivost kroz životni ciklus [6]. Kao odgovor na navedene nedostatke razvijaju se potpuno (održivi) drveni sustavi, u kojima se elementi povezuju drvenim spojnim sredstvima, poput trnova ili tradicionalnih tesarskih spojeva [7].

Linijski i plošni elementi dobiveni spajanjem lamela uz pomoć drvenih trnova nazivaju se DLT (dowel laminated timber) elementi. Takvi elementi već su komercijalno dostupni, ali su i dalje predmet intenzivnih istraživanja zbog potrebe za optimizacijom mehaničkih svojstava i ekonomskom isplativosti [7]. Mehanička svojstva takvih sustava ovise o različitim čimbenicima, kao što su vrsta i dimenzije lamela/trnova, raspored trnova te smjer opterećenja [7].

U sklopu ovog istraživanja provest će se eksperimentalna i numerička analiza linijskih i plošnih elemenata od tvrdog drva povezanih drvenim spojnim sredstvima, uz variranje parametara kao što su tip, promjer, razmak i orijentacija trnova. Poseban naglasak bit će stavljen na određivanje nosivosti, krutosti i trajnosti elemenata, kao i na utjecaj vlage na njihovo ponašanje. Dobiveni rezultati usporedit će se s prethodno provedenim ispitivanjima elemenata od mekog drva, čime će se omogućiti sustavna evaluacija prednosti i ograničenja primjene tvrdog drva u potpuno održivim konstrukcijskim sustavima.

Osim mehaničkih svojstava, analizirat će se i održivost promatranih sustava pri-

mjenom analize životnog ciklusa (LCA), uzimajući u obzir emisije CO₂, potrošnju energije, trajnost i mogućnost ponovne uporabe [3], [8]. Cilj istraživanja je razvoj znanstveno utemeljenih smjernica za projektiranje potpuno održivih drvenih konstrukcijskih elemenata koji integriraju visoke mehaničke performanse s mogućnošću demontaže i ponovne uporabe, u skladu s principima kružne ekonomije.

2 Tvrdog drvo

Tvrdog drvo kao obnovljiv i ekološki prihvatljiv resurs dobiva sve veću pozornost u području nosivih drvenih konstrukcija. Dosadašnji razvoj masivnih drvenih sustava – ponajprije križno lameliranog drva (CLT) i lameliranog lijepljenog drva (glulam) – u velikoj je mjeri bio oslonjen na meko drvo, a konstrukcijsko-razredne vrste poput smreke, bora i jele najčešće se primjenjuju zbog svoje dostupnosti, ujednačenih mehaničkih svojstava i nižih troškova prerade [9]. Međutim, rastuća potražnja za masivnim drvenim materijalima te ograničenost resursa četinjača u pojedinim europskim regijama potiču istraživanje alternativnih vrsta drva, uključujući listače [10].

Iz tehničke perspektive, listače predstavljaju znatno heterogeniju skupinu drvnih vrsta koje u većini slučajeva pokazuju višu gustoću, u rasponu od približno 550 do 950 kg/m³ za listače sjeverne hemisfere poput bukve, hrasta, kestena, jasena i određenih vrsta eukaliptusa. Povećana gustoća rezultira značajno poboljšanim mehaničkim svojstvima, odnosno većom čvrstoćom i krutošću materijala [10].

Unatoč navedenim prednostima, primjena tvrdog drva u inženjerskim drvenim proizvodima još je uvijek ograničena. Jedan od glavnih razloga je taj što se tehnologija obrade mekogog drva mora u potpunosti zamijeniti tehnologijom prilagođenom obradi tvrdoga drva. Poseban izazov predstavlja razvoj potpuno održivih sustava bez uporabe metalnih spojnih sredstava i sintetskih adheziva.

Korištenje trnova od tvrdog drva za povezivanje linijskih i plošnih elemenata predstavlja jedno od mogućih rješenja za razvoj takvih sustava. Primjenom drvenih spojnih sredstava omogućuje se bolja mogućnost demontaže, recikliranja i ponovne uporabe konstrukcijskih elemenata u skladu s principima kružne ekonomije [7]. Istovremeno, povećana gustoća tvrdog drva može pozitivno utjecati na nosivost i deformabilnost spojeva.

Ovaj rad usmjeren je na ispitivanje ponašanja elemenata izrađenih u potpunosti od tvrdog drva, dok će se usporedba njihovih mehaničkih svojstava s prethodno ispitanim sustavima od mekogog drva provesti u sklopu daljnjih faza istraživanja. Primarni cilj istraživanja je ispitati izvedivost i učinkovitost tehnika lameliranja trnovima, kako bi se razvili linijski i plošni elementi visokih mehaničkih performansi i poboljšane održivosti.

3 Ispitivanje trnova od tvrdog drva za određivanja momenta plastifikacije

3.1 Priprema uzoraka

Uzorci za ispitivanje izrađeni su u skladu s normom EN 408:2010+A1:2012 [11]. Izrađeno je ukupno 100 uzoraka (10 serija po 10 uzoraka) koji se razlikuju po promjeru, duljini i vrsti završne obrade. Karakteristike uzoraka prikazane su u Tablici 1. Duljine uzoraka ovise o promjeru pojedine serije.

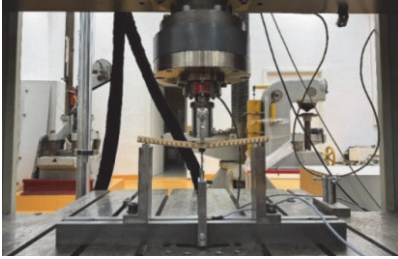
Tablica 1. Karakteristike ispitanih uzoraka i parametri ispitivanja

OZNAKA	BROJ KOMADA	ZAVRŠNA OBRADA	PROMJER [mm]	DULJINA [mm]	PROSJEČNA MASA [g]	PROSJEČAN VOLUMEN [cm ³]	PROSJEČNA GUSTOĆA [kg/m ³]	BRZINA NANOŠENJA OPTEREĆENJA [mm/min]
G-OP-408-10	10	glatki	10	210	11,83	16,49	717,26	1,80
N-OP-408-10	10	narebreni	10	210	11,28	16,49	683,91	1,80
G-OP-408-12	10	glatki	12	252	19,04	28,50	668,06	2,16
N-OP-408-12	10	narebreni	12	252	18,07	28,50	634,02	2,16
G-OP-408-14	10	glatki	14	294	32,07	45,26	708,61	2,52
N-OP-408-14	10	narebreni	14	294	31,57	45,26	697,56	2,52
G-OP-408-16	10	glatki	16	336	46,94	67,56	694,82	2,88
N-OP-408-16	10	narebreni	16	336	46,61	67,56	689,94	2,88
G-OP-408-20	10	glatki	20	420	95,31	131,95	722,34	3,60
N-OP-408-20	10	narebreni	20	420	94,74	131,95	718,02	3,60

3.2 Proces ispitivanja

Norma EN 408:2010+A1:2012 [11] predviđa provođenje testa na savijanje u četiri točke, dok se u provedenom istraživanju provodi ispitivanje na savijanje u tri točke, pri čemu su i dalje zadovoljeni uvjeti dimenzija uzoraka i brzine nanošenja opterećenja koji su zadani u spomenutoj normi. Cilj promjene načina opterećivanja je usporedba dobivenih rezultata nakon što se provede ispitivanje na savijanje u četiri točke te utvrđivanje razlike u dobivenim vrijednostima ovisno o načinu opterećivanja.

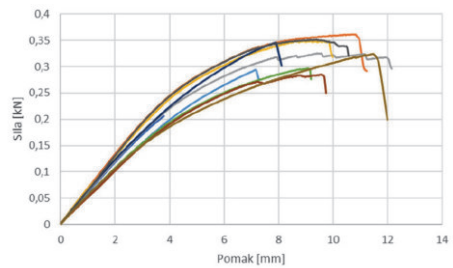
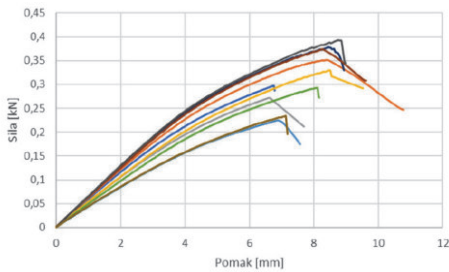
Uzorci su prilikom ispitivanja bili oslonjeni na dva mjesta pomoću metalnih oslonaca. Opterećenje je nanoseno preko zaobljene čelične pločice u sredini raspona. Na taj način dobiven je statički sustav u kojem drveni trn otkazuje pri dosezanju momenta loma. Opterećenje je nanoseno konstantnom brzinom koja ovisi o promjeru trna, a brzine za svaki pojedini tip uzorka prikazane su u tablici 1.



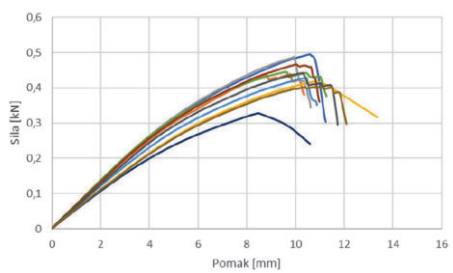
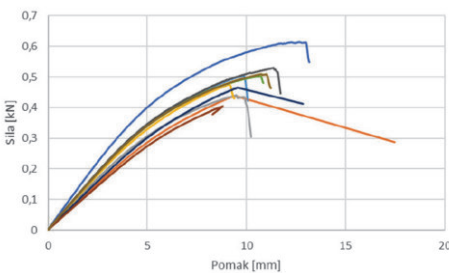
Slika 1. Princip nanošenja opterećenja na uzorak

3.3 Rezultati ispitivanja

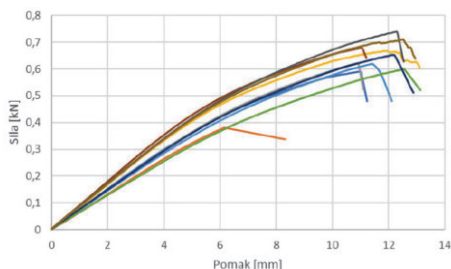
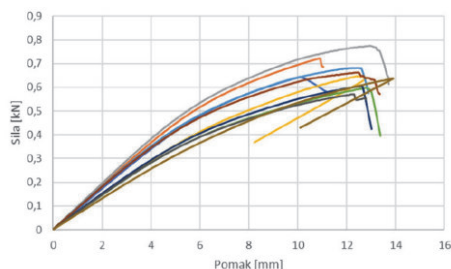
Obradom podataka generiranih uslijed ispitivanja dobivene su krivulje koje prikazuju odnos sile [kN] i pomaka [mm]. Za svaki pojedini uzorak iz serije prikazana je zasebna krivulja, kako bi se u daljnjim koracima ispitivanja mogli dobiti eksperimentalni parametri koji će se uspoređivati s proračunskim parametrima.



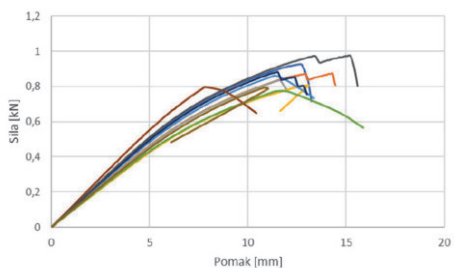
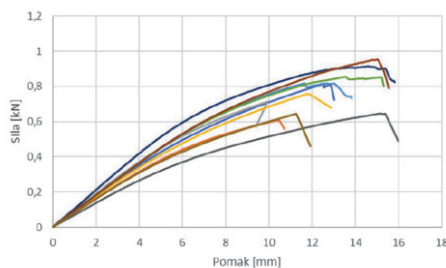
Slika 2. i Slika 3. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-10 (lijevo) i za N-OP-408-10 (desno)



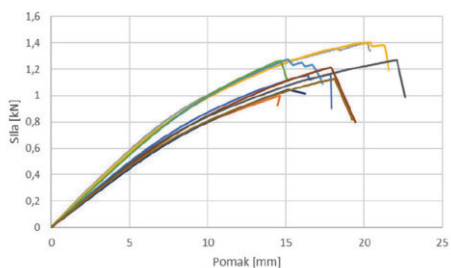
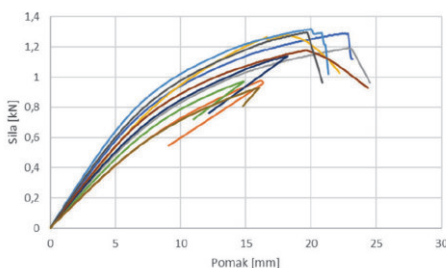
Slika 4. i Slika 5. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-12 (lijevo) i za N-OP-408-12 (desno)



Slika 6. i Slika 7. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-14 (lijevo) i za N-OP-408-14 (desno)



Slika 8. i Slika 9. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-16 (lijevo) i za N-OP-408-16 (desno)



Slika 10. i Slika 11. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-20 (lijevo) i za N-OP-408-20 (desno)

4 Zaključak

Provedeno ispitivanje pokazalo je očekivano ponašanje trnova u pogledu krutosti i maksimalne sile pri dosezanju loma, odnosno momenta plastifikacije. Dosezanje momenta plastifikacije jedan je od dva tipa otkaza u spojevima. Drugi tip otkaza, pritisak po omotaču rupe tvrdog drva, također će se ispitati u kasnijim fazama istraživanja.

Na prikazanim grafovima vidljivo je da je većina trnova pokazala relativno nagli otkaz pri dosezanju maksimalne sile. Određeni postotak (približno 11% ispitanih uzoraka) ponašao se potpuno krto. U višereznom spoju, kada je nekoliko lamela

povezano trnom, očekuje se veći stupanj plastičnog ponašanja samoga trna.

Drveni trnovi imaju znatno manju duktilnost u odnosu na čelične trnove. S porastom promjera trnova, nosivost očekivano raste, uz neznatna odstupanja. Trnovi većeg promjera pokazuju veću duktilnost. Također, trnovi glatke površine imali su u prosjeku krtije lomove u odnosu na naborane trnove istoga promjera. Mogući uzrok tome je činjenica da se pri proizvodnji naboranih trnova koristi drvena građa minimalne zakrivljenosti (radi lakše obrade), što za posljedicu ima bolja mehanička svojstva.

Zaključuje se da su naborani trnovi primjereniji za korištenje u smislu mehaničkih svojstava i postizanja tražene duktilnosti sustava te zbog njihove površine koja osigurava bolju povezanost elemenata.

Nakon provođenja testa na savijanje u četiri točke bit će moguće definirati razliku u nosivosti ovisno o obliku opterećenja.

Konačno, proračunati moment plastifikacije trnova od tvrdog drva bit će jedan od parametara za formiranje baze podataka i parametarsku analizu krutosti i deformabilnosti te kapaciteta nosivosti trnovima lameliranih stupova, greda, zidova i ploča.

Literatura

- [1] European Commission. Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels: European Commission; 2020.
- [2] Finamore M, Oltean-Dumbrava C. Circular economy in construction – findings from a literature review. *Heliyon*. 2024;10(15):e34647.
- [3] Ramage MH, Burridge H, Busse-Wicher M, Fereday G, Reynolds T, Shah DU, Wu G, et al. The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68:333–359.
- [4] Sathre R, O'Connor J. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*. 2010;13(2):104–114.
- [5] Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016;74(3):331–351.
- [6] Sotayo A, Bradley D, Bather M, Oudjene M, El-Houjeiry I, Guan Z. Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated timber using compressed wood dowels. *Construction and Building Materials*. 2020;251:118990.

- [7] Sotayo A, Bradley D, Bather M, Sareh P, Oudjene M, El-Houjeiry I, Harte AM, et al. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*. 2020;1:100004.
- [8] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:394–416.
- [9] Cornick J, Rogers L, Wheeler K. Increasing mass timber consumption in the U.S. and sustainable timber supply. *Sustainability*. 2022;14(1):381.
- [10] Aicher S, Christian Z, Dill-Langer G. Hardwood glulams – emerging timber products of superior mechanical properties. U: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*; 2014 Aug 10–14; Quebec City, Canada.
- [11] European Committee for Standardization. EN 408:2010+A1:2012: Timber Structures – Structural Timber and Glued Laminated Timber – Determination of Some Physical and Mechanical Properties. Brussels: CEN; 2012.