

INDIKATIVNE LASTNOSTI ZA RAZVRŠČANJE ŽAGANEGA KONSTRUKCIJSKEGA LESA PO TRDNOSTI

Indicative properties for strength grading of structural sawn timber

Povzetek: V članku so podani začetni rezultati raziskovalnega projekta »Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti«, v okviru katerega smo ovrednotili značilne lastnosti lesa slovenske smreke in jelke na 1074 elementih z različnimi prečnimi prerezi. Prikazane so tudi enostavne nedestruktivne metode za oceno trdnosti ter ovrednotena njihova uspešnost. Na osnovi analize rezultatov preiskav smo ugotovili, da so karakteristična upogibna trdnost, gostota in modul elastičnosti slovenskega žaganega lesa iglavcev (smreka / jelka) v primerjavi z lesom drugih držav, ki sodijo v rastišče »Srednja in vzhodna Evropa«, zadosti visoki, da ga glede na zahteve evropskih standardov lahko razvrstimo v primerljive ali celo višje trdnostne razrede.

Ključne besede: konstrukcijski žagani les, karakteristična upogibna trdnost, trdnostni razredi, optimalno razvrščanje

Abstract: In the article preliminary results of the research project "Strength grading of timber structural elements" are shown, in which characteristic properties of Slovenian spruce and fir timber were assessed on 1074 elements with different cross sections. Simple nondestructive methods for the determination of indicative properties of timber and evaluation of their applicability are presented. On the basis of the research, described in the article, we found out that the characteristic bending strength, density and modulus of elasticity, compared to the countries of the "Central and Eastern Europe" growth area, are high enough to grade our softwood species (spruce / fir) according to European standards into comparable or even higher strength classes.

Key words: structural sawn timber, characteristic bending strength, strength classes, optimum grading

1. UVOD

Z uvajanjem evropskih standardov za razvrščanje masivnega žaganega lesa v trdnostne razrede sta se pojavili dve osnovni vprašanji: kakšne so lastnosti našega konstrukcijskega lesa iglavcev in ali se lahko primerjajo z lastnostmi lesa sosednjih držav, ki se uvrščajo v rastišče »Srednja in vzhodna Evropa«.

Za rešitev obeh problemov smo raziskovalci treh raziskovalnih organizacij: Fakultete za gradbeništvo in geodezijo in Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (obe Univerza v Ljubljani) ter Zavoda za gradbeništvo Slovenije v letu 2009 pričeli z izvajanjem triletnega raziskovalnega projekta »Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti«. V predstavljenem prispevku bomo prikazali osnovne podatke o trdnostnih karakteristikah preiskanih elementov in enostavnih nedestruktivnih metodah za določanje indikativnih lastnosti ter v nadaljevanju optimalno razvrščanje v trdnostne razrede. Detajlnejšo analizo rezultatov bomo naredili, ko bodo na razpolago tudi rezultati strojnega razvrščanja.

* mag., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, e-pošta: jelena.srpcic@zag.si

** dipl. inž. grad., ***dr., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

**** prof. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

2. LASTNOSTI LESA ZA GRADBENE KONSTRUKCIJE

Masivni žagani les, ki se uporablja v nosilnih gradbenih konstrukcijah, mora imeti – kot vsi drugi gradbeni materiali – definirane lastnosti, ki vplivajo na bistvene zahteve za objekte, v katere bo vgrajen. Gre predvsem za mehanske lastnosti (trdnost), pa tudi druge značilnosti (odpornost proti požaru, trajnost), opisane v evropskem standardu SIST EN 14081-1.

Po dogovoru so odločilne mehansko fizikalne lastnosti lesa za konstrukcije tri: upogibna trdnost, gostota ter modul elastičnosti pri statičnem upogibu. Glede na vse tri razvrstimo žagani les po SIST EN 338 v t.i. trdnostne razrede.

Žagani les iglavcev uvrstimo v trdnostni razred, označen s črko C (Coniferous = iglavci), les listavcev pa s črko D (Deciduous = listavci) in številko, ki pomeni karakteristično vrednost upogibne trdnosti v N/mm^2 (na primer C24 pomeni les iglavcev, za katerega velja, da s 95 % verjetnostjo presega upogibno trdnost $24 N/mm^2$). Ob tem mora les zadostiti tudi pogojem za gostoto in modul elastičnosti; na primer: za razred C24 mora biti karakteristična vrednost gostote lesa večja od $350 kg/m^3$, povprečna vrednost elastičnega modula pa večja od $11000 N/mm^2$. Za vsak razred so v standardu razen upogibne trdnosti navedene tudi druge trdnostne in togostne karakteristike, ki so bile ugotovljene s preiskavami lesa iz različnih evropskih rastišč, izvedenimi v skladu z zahtevami standarda SIST EN 384.

Slovenija bi želela kot del srednje Evrope razvrstiti les naših rastišč v iste razrede kot sosednje države, zato je treba nujno poznati njegove karakteristike. Ker preiskave le-teh za slovenski les do sedaj niso bile narejene, smo se odločili, da jih izvedemo v okviru omenjenega projekta. Istočasno smo izvedli tudi postopke vizualnega razvrščanja, da bi ugotovili tudi vpliv determinacijskih lastnosti vizualnega razvrščanja na razvrstitev v trdnostne razrede. Uporabljen je bil standard SIST DIN 4074-1, ki bi ga za vizualno razvrščanje želeli uporabljati tudi v Sloveniji (Šega, 2010).

3. PREGLED STANJA

Razvrščanje lesa po trdnosti temelji na ugotavljanju različnih indikativnih lastnosti, ki vplivajo na trdnost – te so bodisi vizualno ocenjene bodisi izmerjene z različnimi metodami. Medtem ko so v preteklosti za oceno trdnosti uporabljali skoraj izključno vizualno določljive parametre (grče, širino letnic, smer vlaken), so v 60. letih prejšnjega stoletja pričeli raziskovalci določati fizikalne parametre, dobro korelirane s trdnostjo, z različnimi nedestruktivnimi metodami. Prvi pregled postopkov za ugotavljanje

lastnosti lesa za oceno trdnosti je podal Jayne leta 1959: šlo je tako za deformacije pri upogibu kot za vibracijske lastnosti (lastna frekvenca, logaritmični dekrement dušenja). Sledile so študije drugih lastnosti in drugih metod: hitrosti razširjanja vzdolžnega valovanja, povzročenega z udarcem (Galligan, Coutreau, 1965) ter ugotavljanja lastne frekvence in stopnje dušenja pri prečnem vzburjanju (Marrara in sod., 1966). V 70. letih so pričeli z vzburjanjem lesa z ultrazvokom (Gerhards, 1978) – metoda, ki jo je v 80. letih izpopolnil in uporabil v industrijskih napravah Sandoz (1989, 1993). Razen osnovnih meritev so se raziskovalci ukvarjali tudi z vplivi vlažnosti lesa na izmerjene lastnosti (Rebič, Srpčič, 1988), vplivom smeri vlaken in prisotnosti grč (Bostrom, 1998) oziroma drugih lastnosti, ki vplivajo na rezultate (Machado in sod., 1998). Preiskave za določitev frekvenčnega modula elastičnosti pri vzburjanju v prečni smeri so bile izvršene tudi za slovenski les (Gornik Bučar, Bučar, 2009).

Laboratorijske preiskave so vpeljali v industrijsko rabo v 70. letih – stroji za razvrščanje lesa so najprej temeljili na metodi merjenja upogiba oziroma določanja statičnega modula elastičnosti – nekateri se uporabljajo še danes (Metriguard M 7200, Computermatic MK5B). Njihova pomanjkljivost je, da so veliki in dragi. Zato so v 80. in 90. letih pričeli z uvajanjem druge generacije strojev, ki temeljijo na določanju dinamičnega modula elastičnosti z vibracijsko metodo (Dynagrade, Viscan), na določanju gostote oziroma ugotavljanju napak z rentgenskimi žarki (GoldenEye-702) ali na kombinaciji obojega (GoldenEye-706, Combi-Scan). Drugi tip strojev temelji na meritvah dinamičnega modula elastičnosti pri vzburjanju z ultrazvokom (Sylvatest) in kombinaciji z meritvijo gostote (TRIOMATIC). Razen industrijskih naprav z veliko kapaciteto obstajajo tudi manjše priročne naprave (Timbergrader MTG), ki temeljijo na istem principu – vzburjanju lesenega elementa z udarcem, pri čemer sta oddajnik in sprejemnik združena.

4. PREISKAVE ZA DOLOČITEV MEHANSKIH LASTNOSTI

4.1. OPIS VZORCEV IN PREISKAV

V okviru projekta smo določali mehanske lastnosti na 1074 elementih iz slovenskega lesa smreke in jelke, ki se najpogosteje uporablja za gradbene konstrukcije. Vzorci so bili odvzeti iz treh rastišč oziroma regij: Notranjske, Koroške in osrednje Slovenije. Preiskanih je bilo 249 preskušancev s prerezom $40 mm \times 100 mm$, 500 preskušancev s prerezom $50 mm \times 150 mm$ in 251 preskušancev s prerezom $44 mm \times 210 mm$. Po želji ene od sodelujočih žag smo preskusili še 74 preskušancev s prerezom $140 mm \times 140 mm$. Vsi elementi so bili v okviru evropskega projekta GRADEWOOD predhodno preiskani s petimi napravami

za strojno razvrščanje iz Švedske, Nizozemske, Francije, Belgije in Italije¹.

Pred porušnimi preiskavami smo izmerili dimenzije in težo preskušancev, iz katerih smo določili povprečno gostoto lesa ter z uporovnim vlagomerom izmerili vlažnost lesa. Nadalje smo izmerili frekvenčni in ultrazvočni dinamični modul elastičnosti ter na elementih, pripravljenih za preiskavo za določitev upogibne trdnosti, ugotavljali statični modul elastičnosti. Sledile so upogibne preiskave do porušitve, iz porušenih preskušancev pa smo odžagali vzorce brez napak (grč), na katerih smo izmerili gostoto čistega lesa ter gravimetrično izmerili vlažnost lesa.

Pred porušnimi preiskavami so bile na vseh elementih ocenjene karakteristike za vizualno razvrščanje lesa. Rezultati teh meritev so prikazani v prispevku (Šega, 2010). Medtem ko v tem članku obravnavamo meritve na 1074 elementih, so v omenjenem prispevku izloženi elementi, izžagani iz istega hloda, prav tako je izločen les jelke, tako da je število preskušancev za oceno vizualnih karakteristik manjše (984).

4.2. NEDESTRUKTIVNE PREISKAVE ZA OCENO TRDNOSTI

4.2.1. Določanje gostote

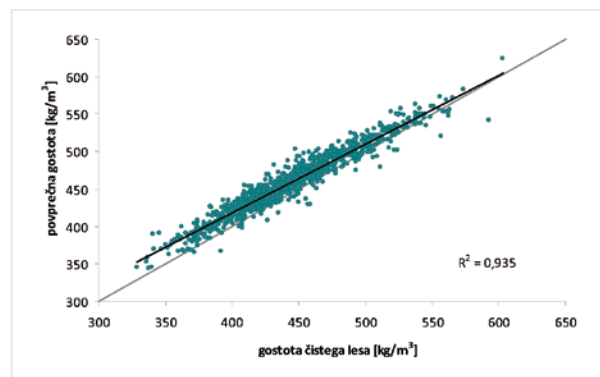
Najenostavnejša metoda za grobo oceno trdnosti lesa je določanje njegove gostote (meritve dimenzij in tehtanje, ugotavljanje z rentgenskimi žarki). V sklopu preiskav smo ugotavljali dve gostoti vzorcev: povprečno gostoto celega elementa ρ_{povp} ter na elementu širine 10 cm brez napak, odvzetem blizu mesta porušitve, gostoto čistega lesa $\rho_{\text{čisti les}}$. Primerjava med obema je prikazana na sliki 1.

Korelacija med obema je pričakovano zelo dobra, pri čemer je gostota čistega lesa nekoliko manjša od povprečne gostote celega elementa (s tanjšo svetlo črto je prikazana idealna zveza).

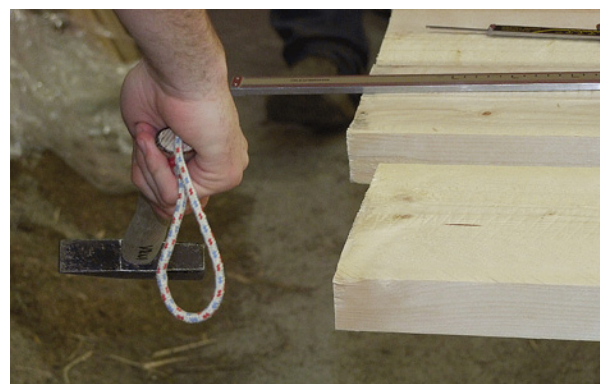
4.2.2. Določanje dinamičnih modulov elastičnosti

V nadaljevanju smo izvedli dve enostavni nedestruktivni meritvi – ugotavljali smo dva dinamična modula elastičnosti: frekvenčnega in ultrazvočnega. Za določitev prvega smo določili lastno frekvenco elementa v vzdolžni smeri ob udarcu, za določitev drugega pa smo merili čas preleta ultrazvoka pri vzbujanju z ultrazvočno napravo.

Frekvenčni modul elastičnosti smo ugotavljali z razmero – enostavno opremo: element smo udarili s klavivom na eni strani (slika 2), na nasprotni pa smo z mikrofonom posneli odziv. Iz posnetega dinamičnega odziva smo s



Slika 1. Razmerje med gostoto lesa celega elementa in gostoto čistega lesa



Slika 2. Določanje frekvenčnega modula elastičnosti (foto: arhiv ZAG)

pomočjo frekvenčne analize določili lastno frekvenco. Izmerili smo tudi gostoto vsakega elementa in določili frekvenčni modul elastičnosti po enačbi:

$$E_{df} = 4 \rho \cdot f^2 \cdot L^2,$$

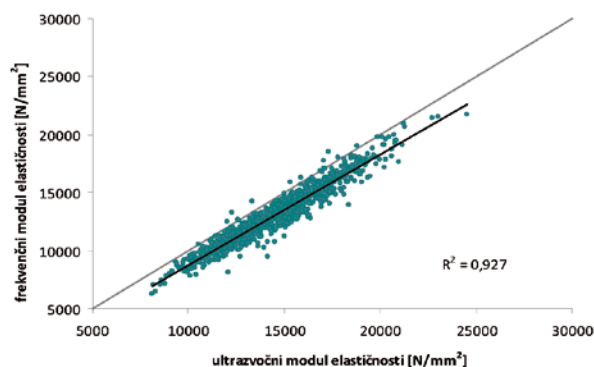
kjer je ρ gostota lesa, f osnovna lastna frekvenca, L pa dolžina vzorca.

Ugotavljanje ultrazvočnega dinamičnega modula elastičnosti je zahtevalo posebno opremo za vzbujanje –

¹ Rezultate le-teh analizirajo naši evropski partnerji in trenutno še niso znani.



Slika 3. Določanje ultrazvočnega modula elastičnosti (foto: arhiv ZAG)



Slika 4. Razmerje med frekvenčnim in ultrazvočnim modulom elastičnosti

uporabljena je bila naprava AU 2000 proizvajalca CEBTP s frekvenco vzburjanja 60 Hz (slika 3). Naprava neposredno prikaže čas preleta ultrazvoka, ultrazvočni modul pa izračunamo po enačbi:

$$E_{d,u} = \rho \cdot v^2,$$

kjer je v hitrost preleta ultrazvoka na elementu dolžine L
 $v = L/t$.

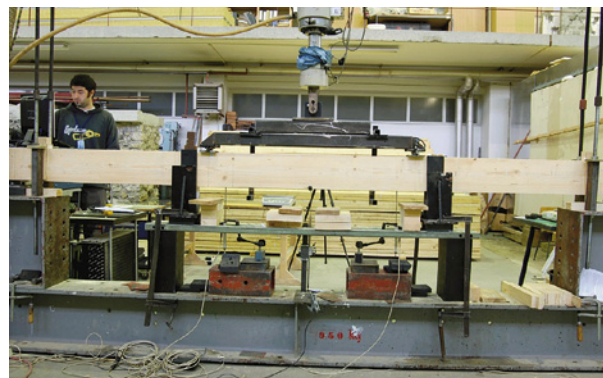
Tudi pri tej metodi je za točnejšo določitev dinamičnega modula elastičnosti treba izmeriti dejansko gostoto vsakega elementa.

Primerjava med obema moduloma je prikazana na sliki 4.

Korelacija med obema moduloma je prav tako dobra – gre za dva dinamična modula, izmerjena v vzdolžni smeri elementa z različnima načinoma vzburjanja. Nekoliko višje vrednosti dobimo z ultrazvočno metodo (idealna zveza je prikazana s svetlejšo črto).

4.2.3. Določanje statičnega modula elastičnosti

Med neporušnimi preiskavami je za razvrščanje lesa zelo primerna preiskava tudi določitev modula elastičnosti pri statičnem upogibu. Preiskava se izvaja po standardu SIST EN 408 s štiri-točkovnim upogibom: vzorci so podprti na razpetini, enaki $18h$ in obremenjeni s koncentriranimi silama na razdalji $6h$, kjer je h višina vzorca. Preiskava se lahko izvaja na položenih ali pokončnih vzorcih, vendar se navadno izvaja skupaj s preiskavo do porušitve, ki pa je predpisana na pokončnih vzorcih. Tako smo tudi mi izvajali preiskavo na pokončnih vzorcih, kot je prikazano na sliki 5.



Slika 5. Vzorec dimenzij 44 mm x 210 mm med upogibno preiskavo (foto: arhiv ZAG)



Slika 6. Detajl porušitve (foto: arhiv ZAG)

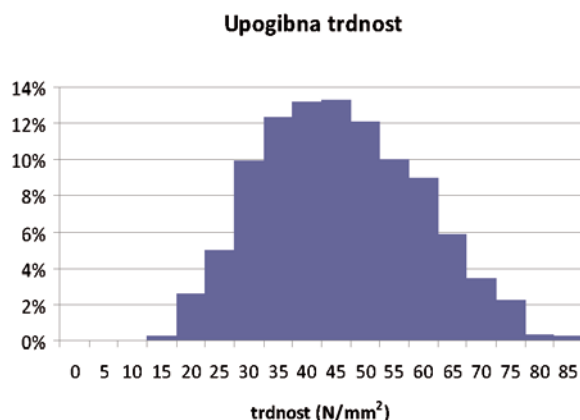
4.3. PREISKAVE DO PORUŠITVE

Najbolj značilna obremenitev lesenih elementov je upogib, zato je za razvrščanje lesa v razrede po trdnosti razen upogibnega modula elastičnosti pomembna še upogibna trdnost. Preiskavo upogibne trdnosti smo izvajali po standardu SIST EN 408 z enako postavitvijo kot je zahtevana za določanje statičnega modula elastičnosti. Zaradi relativno velike višine nekaterih vzorcev v primerjavi s širino je pri obremenjevanju do porušitve prihajalo do bočnega uklona. Te vzorce smo morali bočno podpreti, kot je razvidno tudi iz slike 6, na kateri je prikazan značilni detajl porušitve vzorca.

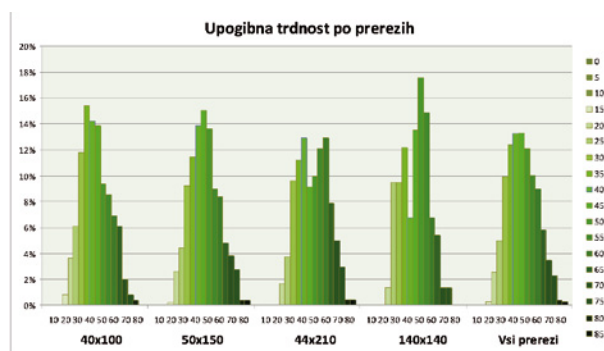
Izmerjene vrednosti trdnosti preiskanih vzorcev so prikazane v obliki histograma na sliki 7, trdnosti posameznih skupin z različnimi prerezi pa na sliki 8. Ugotavljamo, da je porazdelitev zelo odvisna od števila vzorcev v prerezu – medtem ko je pri najmanjši skupini (74 vzorcev s prerezom 140 mm x 140 mm) precej nepravilna, se pri največji skupini (500 elementih s prerezom 50 mm x 150 mm) porazdelitev približuje porazdelitvi celotnega vzorca.

Trdnosti so v skladu z zahtevami SIST EN 384 preračunane na višino 150 mm s faktorjem

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2}$$



Slika 7. Histogram upogibnih trdnosti vseh vzorcev



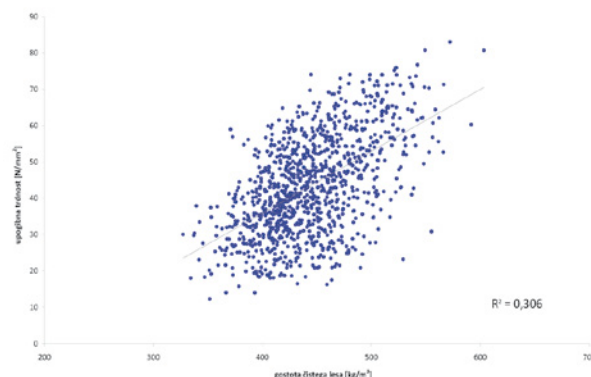
Slika 8. Porazdelitev upogibnih trdnosti po prerezi

5. KORELACIJE MED INDIKATIVNIMI LASTNOSTMI IN TRDNOSTJO

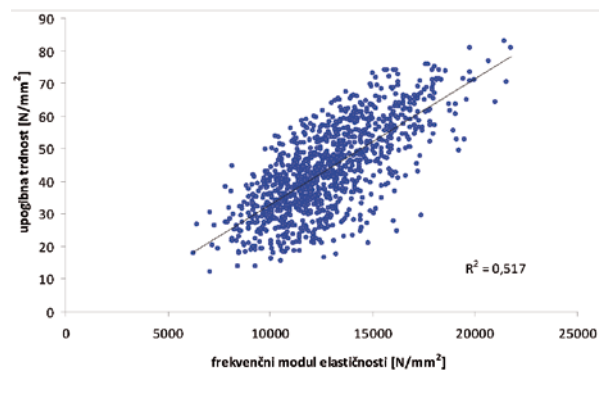
Namen nedestruktivnih preiskav je ugotoviti korelacije med posameznimi indikativnimi lastnostmi (npr. gostoto, statičnim ali dinamičnim modulom elastičnosti) in najpomembnejšo lastnostjo za razvrščanje, upogibno trdnostjo.

Pri preiskavah se je potrdilo dejstvo, da je korelacija med gostoto in upogibno trdnostjo slaba (prikazana je na sliki 9). Gostota sama torej ni najbolj primerna lastnost za oceno upogibne trdnosti, je pa ena od lastnosti, ki določajo trdnostni razred.

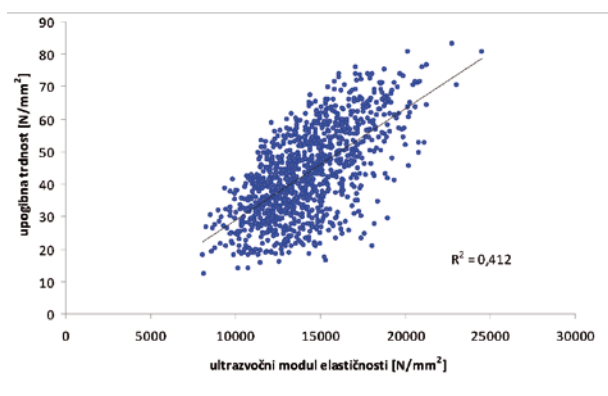
Primernejše rezultate dobimo z meritvami obeh dinamičnih modulov elastičnosti. Nekoliko boljše je korelacija med frekvenčnim modulom elastičnosti in upogibno trdnostjo, prikazana na sliki 10, sprejemljiva pa je tudi korelacija med ultrazvočnim modulom in upogibno trdnostjo (slika 11). Obe meritvi sta razmeroma enostavni in zlasti hitri, pri čemer je pri določitvi frekvenčnega modula potrebna razmeroma enostavna oprema za preiskave (kladivo, mikrofon) in računalnik s programsko opremo za anali-



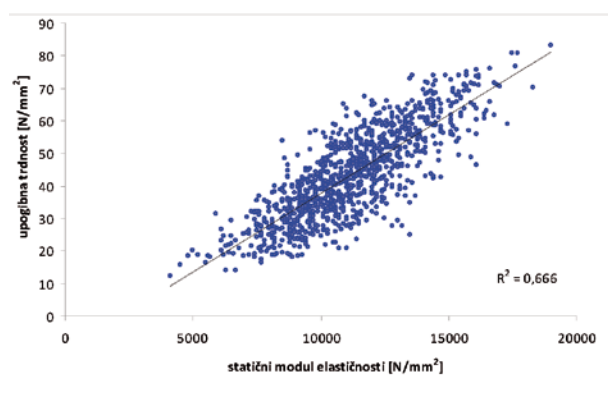
Slika 9. Razmerje med gostoto čistega lesa in upogibno trdnostjo



Slika 10. Razmerje med frekvenčnim modulom elastičnosti in upogibno trdnostjo



Slika 11: Razmerje med ultrazvočnim modulom elastičnosti in upogibno trdnostjo



Slika 12: Razmerje med statičnim modulom elastičnosti in upogibno trdnostjo

Preglednica 2. Značilne lastnosti vzorcev iz lesa slovenske smreke / jelke

Lastnost	Povprečna vrednost	Karakteristična vrednost
gostota		
("čisti" les)	444 kg/m ³	374 kg/m ³
globalni modul elastičnosti	11158 N/mm ²	7618 N/mm ²
upogibna trdnost	43,3 N/mm ²	23,7 N/mm ²

Opombe: Gostota in modul elastičnosti sta preračunana na 12 % vlažnost lesa (povprečna izmerjena vlažnost lesa je bila 12,5 %).

V skladu s SIST EN 384 lahko povprečni globalni modul elastičnosti kot kriterij za razvrstitev v razrede povečamo po enačbi: $E_{\text{čisti upogib}} = 1,3 E_{\text{mer}} - 2690$ in dobimo $E_{\text{čisti upogib}} = 11815 \text{ N/mm}^2$.

Trdnost je normirana na višino 150 mm z upoštevanjem faktorja k_h .

zo rezultatov oz. določitev lastne frekvence. Pri določanju ultrazvočnega modula je potrebna posebna oprema za vzbujanje, ta pa neposredno prikaže čas preleta, zato je izračun modula enostaven.

Kot smo pričakovali, smo dobili najboljšo korelacijo med statičnim modulom in trdnostjo, saj sta obe značilnosti določeni z upogibno preiskavo. Korelacija je prikazana na sliki 12, je pa način meritev (ugotavljanje upogiba) bolj dolgotrajen in zahteva več priprav kot obe preiskavi dinamičnega modula.

Preglednica 1. Korelacijska matrika med indikativnimi lastnostmi

	$\rho_{\text{čisti les}}$	$E_{\text{din,f}}$	$E_{\text{din,uz}}$	E_{stat}	upogibna trdnost
gostota ($\rho_{\text{čisti les}}$)	1	0,806	0,834	0,739	0,553
dinamični frekvenčni modul elastičnosti ($E_{\text{din,f}}$)	0,806	1	0,963	0,904	0,719
dinamični ultrazvočni modul elastičnosti ($E_{\text{din,uz}}$)	0,834	0,963	1	0,868	0,642
statični modul elastičnosti (E_{stat})	0,739	0,904	0,868	1	0,816
upogibna trdnost	0,553	0,719	0,642	0,816	1

Opomba: Vse vrednosti so podane pri dejanski vlažnosti lesa.

V preglednici 1 so podane korelacije (R) med vsemi izmerjenimi indikativnimi lastnostmi: gostoto, obema dinamičnima moduloma elastičnosti in modulom elastičnosti pri statičnem upogibu, ter upogibno trdnostjo, dobljeno s preiskavami do porušitve.

6. RAZVRSTITEV V RAZREDE

6.1. ODLOČILNE LASTNOSTI

Za razvrstitev lesa v trdnostne razrede so odločilne lastnosti karakteristična gostota in karakteristična upogibna trdnost ter povprečni globalni modul elastičnosti. Vse vrednosti določimo po zahtevah standarda SIST EN 384.

Izmerjene oziroma iz vrednotene vrednosti so prikazane v preglednici 2, pri

Preglednica 3. Optimalno razvrščanje pri izbranih kombinacijah trdnostnih razredov

Kombinacija trdnostnih razredov					
	C24	C30-C18	C30-C24-C18	C35-C24-C18	C40-C24-C18
C40					52 %
C35				71 %	
C30		86 %	86 %		
C24	98 %		3 %	14 %	38 %
C18		12 %	7 %	9 %	2 %
ostanek	2 %	2 %	4 %	6 %	8 %

čemer so karakteristične vrednosti preračunane na referenčno vlažnost (12%).

6.2. OPTIMALNO RAZVRŠČANJE

Optimalno razvrščanje pomeni najboljšo razporeditev elementov v trdnostne razrede. Ta naloga ni povsem enostavna, saj moramo optimizacijo izvesti tako, da upoštevamo istočasno vse tri navedene značilnosti: trdnost, modul elastičnosti ter gostoto (Turk in Ranta Maunus, 2003).

Izbrali smo tri razrede, ki pri nas glede na pretvorbo iz JUS U.D0.001 predstavljajo I., II. in III. kakovostni razred: C30, C24 in C18, ter glede na dobre rezultate tudi dva višja razreda C35 in C40. Upoštevali smo pet različnih kombinacij: samo razred C24, C30-C18, C30-C24-C18, C35-C24-C18 in C40-C24-C18.

Kot je razvidno iz preglednice 3, lahko ob izbiri samo enega trdnostnega razreda - C24 (ta se za gradbene konstrukcije največ uporablja) 98 % preiskanih elementov razvrstimo v ta razred. Če želimo razvrstiti les na način, ki smo ga bili navajeni (razredi C30-C24-C18), lahko 86 % elementov razvrstimo v razred C30. Celo če razvrstimo les v razrede C40-C24-C18, je 52 % elementov v najvišjem razredu.

7. SKLEP

Preiskave so pokazale, da ima slovenski les smreke oziroma jelke zelo dobre mehanske lastnosti. Zato pričakujemo, da bomo z dodatnimi analizami rezultatov lahko potrdili, da je les slovenskih iglavcev enakovreden lesu rastišč, ki jih označujejo z oznako CEE (Srednja in vzhodna Evropa). Obenem želimo, da se bodo postopki - zaenkrat samo vizualnega - razvrščanja izvajali v vseh žagarskih obratih, ki proizvajajo les za konstrukcije, ter v vseh obratih za proizvodnjo lesenih konstrukcijskih elementov (elementov iz lepljenega lameliranega lesa, lepljenih opažnih nosilcev).

8. ZAHVALE

Raziskava je potekala v okviru raziskovalnega projekta L2 – 2214 »Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti«, ki so ga sofinancirali Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ter podjetja GG Postojna, d.o.o., GG Slovenj Gradec d.d., Svea Lesna Litija, d.d. in Hoja, d.d.

9. VIRI

- Galligan W. L., Coutreau R. W. (1965)** Measurement of elasticity of lumber with longitudinal stress waves and the piezoelectric effect of wood. V: 2. NDT Symposium, Washington, 223 – 244
- Gerhards C. C. (1978)** Effect of earlywood and latewood on stress-wave measurements parallel to the grain. Wood Science: 169–174
- Gerhards C. C. (1982)** Effects on knots on stress waves in lumber, FPL report 384. Madison, Wisconsin
- Gornik Bučar D., Bučar B. (2009)** Uporaba metode frekvenčnega odziva za določanje modula elastičnosti žaganega lesa. Les, 61, 5-P: 240–245
- Hanhijärvi A., Ranta Maunus A., Turk G. (2005)** Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade project – phase 1. VTT, Espoo, 81
- Jayne B. A. (1959)** Vibrational Properties of Wood. Forest Products Journal: 413–416
- JUS U.D0.001:1983** Projektiranje in izvedba lesenih konstrukcij, Materiali za izdelavo lesenih konstrukcij in tehnične zahteve
- Machado J. S., Sardinha R., Cruz H. (1998)** Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. V: 5th WCTE, Montreaux, Proceedings, zv. 2, 304–311
- Sandoz J. L. (1989)** Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23, 1: 95–108
- Sandoz J. L. (1993)** Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. Wood Science and Technology, 27, 5: 373–380
- Rebić M., Srpić J. (1988)** Correlation between static and dynamic MOE of softwood at various moisture conditions, Colloque Scientifique European, Comportement Mechanique du Bois, Bordeaux
- SIST EN 338:2010** Konstrukcijski les - Trdnostni razredi.
- SIST EN 384:2010** Konstrukcijski les - Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote.
- SIST EN 408:2003** Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti.
- SIST EN 14081-1:2006 in -2:2006** Lesene konstrukcije – Konstrukcijski les s pravokotnim prečnim prerezom razvrščen po trdnosti – 1.del: Splošne zahteve, 2.del: Strojno razvrščanje; dodatne zahteve za začetni preskus proizvoda.
- SIST DIN 4074-1:2009** Razvrščanje lesa po trdnosti - 1. del: Žagani les iglavcev.
- Srpić J. (2009)** Les za gradbene konstrukcije. Gradbenik, 13, 10: 50–53
- Srpić J. (2009)** Kako zagotoviti ustrezno kakovost lesa za gradbene konstrukcije. Lesarski utrip, 1, 1: 22–23
- Srpić J., Plos M., Pazlar T., Turk G. (2010)** Strength grading of Slovenian structural sawn timber. V: The Future of Quality Control for Wood & wood Products – Proceedings of the final conference of COST Action E53. Ridley-Ellis D.J. (Ur.), Moore J.R. (Ur.), Edinburgh Napier University, http://cte.napier.ac.uk/e53/E53_Edinburgh.pdf.
- Šega B. (2010)** Vpliv značilnosti slovenskega smrekovega konstrukcijskega žaganega lesa na njegove mehanske lastnosti in prevedba sortirnih razredov v trdnostne. Les, 62, 10-11, str. 483-489
- Turk G., Ranta Maunus A. (2003)** Analysis of strength grading of sawn timber based on numerical simulation, VTT research notes 2224, Espoo, Finska.