

Primljen / Received: 27.8.2018.

Ispravljen / Corrected: 5.11.2018.

Prihvaćen / Accepted: 16.1.2019.

Dostupno online / Available online: 10.3.2019.

Učinci prilagodbi dinamičkog E-modula drva na referentne sadržaje vlage i temperaturu u razredbi malobrojnih uzoraka

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Adriana Bjelanović**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
adriana.bjelanovic@gradri.uniri.hr



Tomislav Franković, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
tomislav.frankovic@gradri.uniri.hr



Izv.prof.dr.sc. **Ivana Štimac Grandić**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
istimac@gradri.uniri.hr

Pregledni rad

Adriana Bjelanović, Tomislav Franković, Ivana Štimac Grandić

Učinci prilagodbi dinamičkog E-modula drva na referentne sadržaje vlage i temperaturu u razredbi malobrojnih uzoraka

Izvedene su matematičke ovisnosti rezultata nerazornih (NDT) i razornih (DT) testova triju setova s po šest greda od mekog i tvrdog konstrukcijskog drva. Uspostavljene su vrlo jake korelacije modula elastičnosti (E-modula) određenih nerazorno, iz dinamičkih ultrazvučnih testova izravnog valovanja i statičkih testova na savijanje, te korelacije E-modula s čvrstoćama na savijanje. Učinci prilagodbe rezultata NDT na referentne vrijednosti udjela vlage i temperature te statističko značenje parametara izvedenih regresija vrednovani su sa stajališta primjene u početnoj razredbi malobrojnih uzoraka.

Ključne riječi:

konstrukcijsko drvo, kombinirani testovi, referentni sadržaj vlage, ultrazvučno izravno valovanje

Subject review

Adriana Bjelanović, Tomislav Franković, Ivana Štimac Grandić

Adjustments of dynamic MoE on referent moisture content of wood and temperature in grading of small-sized samples

Mathematical dependences are derived for non-destructive testing (NDT) and destructive testing (DT) of three timber sets, each with six beams made of soft and hard structural timber. Very strong correlations were established between elastic moduli (e-moduli) determined by non-destructive testing, from dynamic ultrasound testing with direct propagation and static testing to bending action, and the correlation of e-moduli with bending strengths. The effects of adjustment of NDT results to reference values of moisture content and temperature, and statistical significance of regression parameters, were evaluated from the standpoint of use in the initial classification of small-sized samples.

Key words:

structural timber, combined tests, referent moisture content, direct ultrasound propagation

Übersichtsarbeit

Adriana Bjelanović, Tomislav Franković, Ivana Štimac Grandić

Auswirkungen der Anpassung des dynamischen E-Moduls des Holzes an die Referenzfeuchteanteile und die Temperatur bei der Einstufung einer kleineren Anzahl an Proben

Durchgeführt wurden mathematische Abhängigkeiten des Ergebnisses zerstörungsfreier (NDT) und zerstörender (DT) Tests dreier Sets von jeweils sechs Balken aus weichem und hartem Bauholz. Es wurden sehr starke Korrelationen des Elastizitätsmoduls (E-Modul) festgestellt, die zerstörungsfrei bestimmt wurden, aus dynamischen Ultraschalltests der direkten Wellen und statische Tests auf Verbiegen, wie auch die Korrelation des E-Moduls mit Biegefestigkeiten. Die Auswirkungen der Anpassung der Ergebnisse des NDT auf die Referenzwerte des Feuchteanteils und der Temperatur sowie die statistische Bedeutung der Parameter, die aus der Regression ermittelt wurden, wurden vom Standpunkt der Anwendung in der Anfangseinstufung der kleinen Anzahl an Proben bewertet.

Schlüsselwörter:

Bauholz, kombinierte Tests, referent Feuchtigkeitsgehalt, direkte Ultraschallwelle

1. Uvod

Drvo je nehomogeni i anizotropni materijal prirodnog podrijetla, osjetljiv na utjecaje okruženja. Zbog značenja ovih svojstava za primjenu drva u graditeljstvu, važno je pouzdano odrediti mehanička svojstva i gustoću elemenata postojećih konstrukcija i novih drvnih proizvoda [1]. Nerazorni testovi (eng. *non-destructive testing* - NDT) se desetljećima istražuju, evaluiraju i unapređuju [2-4] za primjenu u ocjeni kvalitete drvnih proizvoda [5, 6] i stanja ugrađenih elemenata [7-13], te uspješno kombiniraju, međusobno i s razornim testovima (eng. *destructive testing* - DT) [12-16]. Zbog prevladavajuće posredne naravi, rezultati su češće polazišta u određivanju nekog svojstva nego krajnja informacija o njemu, a primjena NDT u ocjeni stanja konstrukcija ima i dodatne izazove (uzorkovanje i propadanje materijala). Sve veći interes za drvenu gradnju nameće i zahtjeve na osiguranje kvalitete proizvodnje i pouzdanost razredbe zasnovane na kombiniranoj primjeni NDT [17, 18] i dokaznih DT s normiranim postupcima uzorkovanja, provedbe testova i tumačenja rezultata [19], te izračuna karakterističnih i srednjih vrijednosti [20, 21]. Strojnoj razredbi prethodi vizualni pregled, parametri se podešavaju prema rezultatima dokaznih DT dijela serije, a vrijednosti svojstava za deklarirani razred čvrstoće niže su od onih za glavninu serije. Na djelotvornost sustava razredbe utječu točnost mjerenja te značenje i potencijal mjerenog svojstva u predviđanju čvrstoća [22-28]. Dva su područja zato ključna za poboljšanje rezultata razredbe: pouzdanost predviđanja čvrstoće mjerenjem drugih svojstava (tablica 1.) i točnost mjerenja tih indikatora [29, 30].

Nedavna istraživanja bave se i mogućom normizacijom NDT i NDE, što zahtijeva ispunjavanje niza preduvjeta poput kompilacije rezultata brojnih studija (različite tehnike, područje i ciljevi istraživanja), izrade baza podataka o rezultatima i prijedloga faktora prilagodbe zbog ujednačavanja bazi podataka, te standardizacije matematičkih modela korelacije rezultata [13, 31, 32]. Iz novijih istraživanja većeg broja velikih uzoraka mogu se prepoznati smjernice za normizaciju NDT i potreba definiranja faktora prilagodbe mjerenih parametara na referentne vrijednosti sadržaja vlage, temperature, dimenzija presjeka i uzoraka, utjecaje položaja senzora, kuta nagiba vlakana i anomalija rasta, tj. utjecajnih parametara na rezultate akustičnih testova [22, 26, 27] spojive s rezultatima DT [33-42].

Ovaj rad rezultat je preliminarnog istraživanja provedenog na malobrojnim uzorcima drvenih smrekovih greda i hrastovih

gredica, s pretpostavkom da će prilagodbe dinamičkih parametara testa izravnog ultrazvučnog valovanja na referentne vrijednosti poboljšati točnost rezultata razredbe početnog tipa. Faktori prilagodbe brzine osnog valovanja i dinamičkog E -modula za samostalne učinke odstupanja izmjerenih sadržaja vlage drva i temperature od referentnih vrijednosti preuzeti su iz literature. S pretpostavkom da se može primijeniti zbog malih razlika između izmjerenih i referentnih vrijednosti, predložen je pojednostavnjeni izraz za kombinirani učinak ovih odstupanja na brzinu osnog valovanja.

Tablica 1. Korelacije parametara razredbe u ocjeni potencijala predviđanja čvrstoća [23]

| Parametar razredbe | Korelacija s čvrstoćom na savijanje te čvrstoćama osnog vlaka i osnog tlaka | | |
|------------------------------|---|-----------|-----------|
| | f_m | $f_{t,o}$ | $f_{c,o}$ |
| Kvrge | 0,5 | 0,6 | 0,4 |
| Nagib vlakana | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| Gustoća | 0,5 | 0,5 | 0,6 |
| Širina goda | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| Kvrge + širina goda | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| Kvrge + gustoća | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 |
| Modul elastičnosti, E | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 |
| Modul elastičnosti + gustoća | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 | 0,7 - 0,8 |
| Modul elastičnosti + kvрге | > 0,8 | > 0,8 | > 0,8 |

Izvedeni su modeli regresije (za ovisnosti dinamičkih i statičkih E -modula i rezultata NDT-a s rezultatima DT na savijanje) te ocijenjeni na osnovi uspostavljenih korelacija i statističkog značenja. Prikladnost primijenjenih NDT i djelotvornost prilagođenih rezultata u predviđanju čvrstoće na savijanje ocijenjeni su u postupku razredbe, a karakteristične vrijednosti korigirane zbog malog broja uzoraka.

2. Materijali i metode

2.1. Uzorci i setovi uzoraka

Uzorci od mekog i tvrdog konstrukcijskog drva su na osnovi početnog vizualnog pregleda grupirani prema kvaliteti, botaničkoj



Slika 1. Uzorci od mekog drva smreke i tvrdog drva hrasta grupirani u setove za faze testiranja od 1 do 4: a) smrekove grede, prvi set uzoraka; b) smrekove grede, treći set uzoraka; c) hrastove gredice, drugi set uzoraka

Tablica 2. Eksperimentalni program – bitni podaci, ishodi ispitivanja i izračunana svojstva

| Tip testa, faza i ispitna tehnika | | Primijenjene norme | Ishodi ispitivanja – izračunana svojstva | |
|-----------------------------------|-----|--|---|--|
| NDT | 0 | Vizualni pregled | EN 1912:2012 [40] EN 14081-1:2005 [15] | Kvalitativna ocjena nepravilnosti rasta ¹⁾ , presjeka ¹⁾ i oblika ¹⁾ |
| NDT | 1-1 | Geometrijske izmjere i vaganje | EN 384:2015 [18] EN 14358:2013 [17] | Dimenzije (b , h , L); masa (m) – gustoća, korigirana i referenta gustoća (ρ), (ρ_{corr}), (ρ_{12}) ²⁾ |
| NDT | 1-2 | Higroskopski test | EN 13183-2:2002 [41] | Sadržaj vlage (u %) i temperatura (T) ²⁾ |
| NDT | 2 | Ultrazvučno izravno (uzdužno) valovanje | – | Vrijeme propagacije vala (t) – srednja brzina vala (v_{mean}) i dinamički E-moduli (E_{dyn}) ³⁾ |
| NDT | 3 | Statički test na savijanje (dokazno opterećenje) | EN 408:2010 + A1:2011 [16] | Progib i pomaci na osloncima – statički E-modul ($E_{m,0}$) ³⁾ |
| DT | 4 | Razorni test savijanjem u četiri točke | | Lomna sila (F_L) – čvrstoća na savijanje ($f_{m,0}$) ³⁾ |

¹⁾ Ocjenjivanje nedostataka u rastu (prisutnost kvrga, pukotina i nepravilnosti vlakana, promjena boje i reakcijskog drva), svojstava presjeka (širine godova), obliku (savijenost, vitoperenje, izbočivanje) i dr.
²⁾ tablica 2.
³⁾ tablica 3.

vrsti i prosječnim dimenzijama (slika 1.): smrekove grede duljine $L = 1600$ mm i presjeka $b/h = 100/100$ mm u setove I. i III., a hrastove gredice s $L = 650$ mm i $b/h = 40/40$ mm u II. set. Presjeci širine b i visine h , te normirani osni rasponi ($l = 18h \pm 6h$) [16] uzoraka prilagođeni su provedbi statičkih testova faza 3 i 4.

2.2. Eksperimentalni program, postupci i rezultati kombiniranih testova

Eksperimentalni program (tablica 1.) proveden je u četiri faze kojima je prethodio početni vizualni pregled (faza 0). Uzorci mekog drva početno su vizualno razvrstani u razrede čvrstoće iznad C18 (gornji razred čvrstoće drva niske kvalitete) i prema kvalitativnim kriterijima (tablica 2.) razvrstani u setove I. i III. visoke i niske kvalitete, dok je kvaliteta hrastovih gredica ocijenjena prosječnom (slika 1.).



Slika 2. Provedba testova faza 1-1 i 1-2 (tablica 2)

Uzorci su tijekom tri tjedna prije ispitivanja u laboratorijima za konstrukcije i materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci kondicionirani u prostorima vlažnosti do 65 %. Izmjereni su im sadržaji vlage između 9,5 % i 13,5 % (tablica 3.), a temperature od 21° do 27°. Na uzorcima nisu uočene pukotine, promjene boje, reakcijsko drvo ni mehanička oštećenja. Uzorci trećeg seta imaju izraženije kvрге, a na dva su uočeni manji problemi geometrije presjeka na krajevima ili vrlo blage promjene nagiba vlakana ($\leq 3^\circ$) izvan područja kvrgavosti. Na hrastovim uzorcima su veća odstupanja nagiba vlakana, ali u srednjoj trećini ne prelaze 10°. Utjecaj zamijećenih anomalija na rezultate nije predmet ovog rada. Svi grupirani uzorci su nakon ND testova (tablica

2.) ispitani do loma, a rezultati navedeni u tablicama 2. i 3. Na osnovi tri mjerjenja (slika 3.) dimenzija (pri krajevima i u sredini) i masa izračunane su gustoće uzoraka, ρ_u . Zbog testa vaganjem, korigirane su faktorima $k = 1,05$ za meko drvo te $k = 1,0$ za tvrdo, a vrijednosti $\rho_{u,corr}$ izračunane iz izraza (1) [18]. Sadržaji vlage u izmjereni su elektrootpornim vlagomjerom (AB Brookhuis Micro-Electronics BV točnosti očitavanja 0,1 %, s digitalnom korekcijom za botaničku vrstu). Referentne gustoće, ρ_{ref} prilagođene referentnoj vrijednosti $u < 28$ %, s faktorom prilagodbe 0,0042 bliskim korekciji od 0,5 % (prema normi ISO 3131) za svako 1 % - tno odstupanje stvarnog od referentnog sadržaja vlage $u = 12$ %, izračunane su iz izraza (2) [45].

$$\rho_{u,corr} = \rho_u / k \quad (1)$$

$$\rho_{ref} = \frac{\rho_{u,corr}}{1 + 0,0042(u - 12)} \quad (2)$$

Metoda zasnovana na brzini valovanja često se rabi u razredbi drvnih proizvoda, a teorijska je podloga [46] unaprijeđena za industrijsku te terensku primjenu [4, 25, 47]. Manja brzina širenja vala upućuje na unutrašnje anomalije i veći sadržaj vlage. Za test izravnog ultrazvučnog valovanja (faza 2) korišten je prijenosni SylvaTest Trio uređaj (pobuda frekvencijom od 22 kHz). Piezoelektrični pretvornici tupog vrha u čelne su presjeke uzoraka zabijani u 10 mm duge udubine izbušene u težištu i trećinama visina (slika 4.). Iz registriranih vremena prolaska vala između pretvornika, t_r , srednja brzina v_{mean} izračunana je na osnovi tri mjerjenja (tablica 1.). Odgovarajuća referentna vrijednost v_{ref} (tablica 4.) jest srednja brzina korigirana faktorima $k_u = 0,0062$ [45] i $k_T = 0,01$ [16] zbog učinaka sadržaja vlage u i temperature T iz tablice 2. U ovom se istraživanju ocjenjuje i prikladnost izraza (3) koji pojednostavnjeno uzima u obzir njihov zajednički učinak.

$$v_{ref} = \frac{v_{mean}}{1 - 0,0062(u - 12)} \cdot \frac{1}{1 + 0,01(T - 20)} \quad (3)$$

Tablica 3. Rezultati testova faze 1 i izračunane gustoće

| Uzorci | Faza 1-1 | | | Faza 1-2 | | Gustoće | | | |
|---------------|----------|--------|--------|----------|--------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|
| | b [mm] | h [mm] | m [g] | u [%] | T [°C] | ρ_u [kg/m ³] | $\rho_{u,corr}$ [kg/m ³] | ρ_{ref} [kg/m ³] | |
| L = 1600 [mm] | I.-1 | 92,76 | 93,32 | 6525,0 | 9,70 | 27 | 471,11 | 448,68 | 452,99 |
| | I.-2 | 92,33 | 93,90 | 6430,0 | 10,30 | 27 | 463,54 | 441,46 | 444,64 |
| | I.-3 | 92,66 | 93,64 | 6125,0 | 10,10 | 27 | 441,20 | 420,19 | 423,57 |
| | I.-4 | 93,08 | 93,65 | 6040,0 | 9,90 | 27 | 433,06 | 412,44 | 416,17 |
| | I.-5 | 92,91 | 93,29 | 6370,0 | 10,40 | 27 | 459,33 | 437,45 | 440,48 |
| | I.-6 | 93,20 | 93,36 | 6200,0 | 9,70 | 27 | 445,34 | 424,14 | 428,27 |
| L = 650 [mm] | II.-1 | 40,66 | 41,54 | 755,0 | 13,10 | 22 | 687,70 | 687,70 | 684,54 |
| | II.-2 | 40,43 | 40,57 | 830,0 | 13,43 | 22 | 778,50 | 778,50 | 773,84 |
| | II.-3 | 40,28 | 40,59 | 750,0 | 11,97 | 22 | 705,73 | 705,73 | 705,83 |
| | II.-4 | 40,46 | 41,22 | 810,0 | 11,53 | 22 | 747,20 | 747,20 | 748,67 |
| | II.-5 | 40,42 | 40,44 | 680,0 | 11,30 | 22 | 640,01 | 640,01 | 641,90 |
| | II.-6 | 40,45 | 41,45 | 739,6 | 10,80 | 22 | 678,64 | 678,64 | 682,08 |
| L = 1600 [mm] | III.-1 | 96,51 | 99,87 | 5610,0 | 11,10 | 21 | 363,78 | 346,45 | 347,77 |
| | III.-2 | 97,38 | 100,21 | 6650,0 | 12,00 | 21 | 425,91 | 405,63 | 405,63 |
| | III.-3 | 97,19 | 99,70 | 6045,0 | 10,80 | 21 | 389,91 | 371,34 | 373,22 |
| | III.-4 | 97,52 | 100,25 | 6675,0 | 12,00 | 21 | 426,73 | 406,41 | 406,41 |
| | III.-5 | 98,53 | 99,38 | 6330,0 | 11,10 | 21 | 404,03 | 384,79 | 386,25 |
| | III.-6 | 97,52 | 97,67 | 6995,0 | 11,50 | 21 | 459,00 | 437,14 | 438,06 |

Dinamički E-moduli (tablica 4.) izračunani su iz izraza od (5) do (7), s prilagodbama brzine vala i/ili gustoće na referentne $u = 12\%$ i $T = 20^\circ\text{C}$, te izravno, iz izraza (8), s faktorom $k_{ref} = 0,078$ za prilagodbu na referentni u [45]. Izrazi su prilagodbe teorijskog dinamičkog E-modula iz izraza (4) [46], gdje su $\rho_u = \rho$ i $v_{mean} = v$, izračunane srednje gustoće uzoraka i brzine vala.

$$E_{dyn} = \rho_u \cdot v_{mean}^2 \tag{4}$$

$$E_{dyn,pre} = \rho_{ref} \cdot v_{mean}^2 \tag{5}$$

$$E_{dyn,vref} = \rho_{u,corr} \cdot v_{ref}^2 \tag{6}$$

$$E_{dyn,pre,vref} = \rho_{ref} \cdot v_{ref}^2 \tag{7}$$

$$E_{dyn,ref} = \frac{\rho_{u,corr} \cdot v_{mean}^2}{1 - 0,0078 (u - 12)} \tag{8}$$

U statičkim NDT 3 faze, uzorci su na osnim rasponima $l = 1500\text{ mm}$ (16h, za grede) i $l = 600\text{ mm}$ (15h, za gredice) oslanjani na čelične pločice. Na simetrične ovjese (prethodno su vagane posude i lanci, te ovjesi) jednakih masa, razmaknute za $a = 6h$ postupno su dodavani utezi (slika 4.) od 20 kg i 5 kg do 2 x 265 kg (za grede) i 2 x 41,5 kg (za gredice), tj. do približno 25% procijenjene

lomne sile greda i oko 10% za gredice. Mikrouzora (Mitutoyo 2052) izmjereni su pomaci (w_A i w_C na osloncima te w_B u sredini) za neopterećene uzorke, faze opterećivanja (osam za grede i četiri, za gredice) te fazu rasterećenja (slika 3.). Statički modul elastičnosti, $E_{m,0}$ izračunan je prema izrazu (9) [19], iz razlike pomaka $w_2 - w_1$ zbog prirasta opterećenja $F_2 - F_1$ na



Slika 3. Oprema i provedba testova, nerazorni testovi: a) ultrazvučni test osnog valovanja (faza 2); b) statički test na savijanje (faza 3)



Slika 4. Razorni testovi na savijanje (faza 4) i oblici loma

Tablica 4. Rezultati testova faza od 2 do 4 i izračunani E-moduli i čvrstoće na savijanje, $f_{m,0}$

| Uzorak | v_{mean} | v_{ref} | E_{dyn} | $E_{dyn,ref}$ | $E_{dyn,ref}$ | $E_{dyn,ref,vref}$ | $E_{dyn,ref}$ | $E_{m,0}$ | $E_{m,0,ref}$ | $F_{m,0}$ | $f_{m,0}$ |
|--------|------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|----------------------|
| | | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | | (11) |
| | [μm/s] | | [kN/mm ²] | | | | | | | [kN] | [N/mm ²] |
| I.-1 | 5948,0 | 5899,2 | 16,67 | 16,03 | 15,61 | 15,76 | 15,60 | 13,17 | 12,87 | 21,73 | 37,93 |
| I.-2 | 5619,3 | 5592,0 | 14,64 | 14,04 | 13,80 | 13,90 | 13,76 | 11,16 | 10,97 | 17,73 | 30,59 |
| I.-3 | 5978,0 | 5941,8 | 15,77 | 15,14 | 14,83 | 14,95 | 14,80 | 13,36 | 13,10 | 22,32 | 38,66 |
| I.-4 | 5760,0 | 5717,2 | 14,37 | 13,81 | 13,48 | 13,60 | 13,46 | 11,75 | 11,50 | 19,11 | 32,94 |
| I.-5 | 5978,0 | 5951,2 | 16,41 | 15,74 | 15,49 | 15,60 | 15,44 | 13,68 | 13,46 | 22,06 | 38,47 |
| I.-6 | 5771,3 | 5722,8 | 14,83 | 14,27 | 13,89 | 14,03 | 13,88 | 11,86 | 11,59 | 19,32 | 33,53 |
| II.-1 | 4632,7 | 4670,5 | 14,76 | 14,69 | 15,00 | 14,93 | 14,89 | 13,57 | 13,72 | 7,65 | 57,35 |
| II.-2 | 4412,7 | 4457,6 | 15,16 | 15,07 | 15,47 | 15,38 | 15,33 | 13,25 | 13,44 | 7,23 | 58,14 |
| II.-3 | 4876,0 | 4882,4 | 16,78 | 16,78 | 16,82 | 16,83 | 16,77 | 15,39 | 15,38 | 7,93 | 63,91 |
| II.-4 | 4756,7 | 4750,5 | 16,91 | 16,94 | 16,86 | 16,90 | 16,85 | 15,61 | 15,54 | 8,42 | 64,81 |
| II.-5 | 4660,7 | 4648,2 | 13,90 | 13,94 | 13,83 | 13,87 | 13,83 | 13,75 | 13,66 | 7,04 | 57,11 |
| II.-6 | 4938,0 | 4910,1 | 16,55 | 16,63 | 16,36 | 16,44 | 16,39 | 15,92 | 15,73 | 8,88 | 67,30 |
| III.-1 | 5788,7 | 5761,9 | 12,19 | 11,65 | 11,50 | 11,55 | 11,53 | 11,17 | 11,07 | 22,03 | 30,92 |
| III.-2 | 5680,7 | 5684,9 | 13,74 | 13,09 | 13,11 | 13,11 | 13,09 | 11,05 | 11,05 | 22,19 | 30,59 |
| III.-3 | 5264,7 | 5231,0 | 10,81 | 10,34 | 10,16 | 10,21 | 10,20 | 8,56 | 8,46 | 15,76 | 22,07 |
| III.-4 | 5416,7 | 5420,7 | 12,52 | 11,92 | 11,94 | 11,94 | 11,92 | 9,85 | 9,85 | 20,02 | 27,53 |
| III.-5 | 5456,7 | 5431,4 | 12,03 | 11,50 | 11,35 | 11,39 | 11,38 | 9,39 | 9,31 | 18,30 | 25,50 |
| III.-6 | 5473,3 | 5461,1 | 13,75 | 13,12 | 13,04 | 13,06 | 13,05 | 10,71 | 10,66 | 20,21 | 29,79 |

regresijskom pravcu, s pomacima w_1 i w_2 izračunanim kao razlika izmjerenih pomaka ($w_B - (w_A + w_C)/2$), a referentni $E_{m,0,ref}$ za $u = 12$ % iz izraza (10) [21].

$$E_{m,0} = \frac{3a \cdot I^2 - 4a^3}{4 \cdot bh^3} \cdot \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (9)$$

$$E_{m,0,ref} = E_{m,0} \cdot [1 + 0,01(u - 12)] \quad (10)$$

U razornom testu na savijanje (faza 4) s kontroliranim prirastom sile, uzorci raspona l simetrično su opterećeni na razmaku a . Slom se razvio u vlačnoj zoni (slika 4.) s pojavom pukotina u području kvrga. Test je proveden bez vanjskih mjerača pomaka pa su rezultati testa samo lomne sile uzoraka $F_{m,0}$, a čvrstoće na savijanje izračunane iz izraza (11) [19].

$$f_{m,0} = \frac{3F_{m,0} \cdot a}{bh^2} \quad (11)$$

Vjerojatni uzrok malih razlika između v_{ref} i v_{mean} jesu uski rasponi izmjerenih vrijednosti u (0,7 % i 1,2 % za prvi i treći set, a 2,63 % za drugi), te srednje vrijednosti bliske referentnima (odstupanja od 1,99 % i 0,58 % za prvi i treći, a 0,02 % za drugi set), dok temperature T odstupaju za najviše 7 % i najmanje 1 % od referentnih (tablice 2. i 5.). Približan predloženi izraz (3) za v_{ref} može se smatrati zadovoljavajućim za ovu razinu istraživanja i zato jer su učinci odstupanja T od referentne manji od onih za

u [22, -36]. Na primjer, primjenom izraza (3), srednje vrijednosti populacija u i T smanjuju vrijednost v_{mean} za 16,81 % za prvi set, a 4,43 % za treći set (s udjelima učinaka odstupanja u , 11 %, tj. 3,47 %), dok je smanjenje od 1,84 % za drugi set zanemarivo. Rezultati primjene izraza (3) na odstupanja srednjih vrijednosti E -modula prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Statistička raspodjela rezultata testova faze 1-2 i 2

| Set uzoraka | u [%] | T [°C] | v_{mean} [μm/s] | v_{ref} [μm/s] |
|-------------|---------|----------|-------------------|------------------|
| I. | min | 9,70 | 5619,33 | 5591,55 |
| | mean | 10,01 | | 5842,44 |
| | max | 10,40 | | 5978,00 |
| | St.dev | 0,29 | 0,00 | 148,00 |
| | CoV | 2,62 % | 0,00 % | 2,31 % |
| II. | min | 10,80 | 4412,67 | 4457,63 |
| | mean | 12,02 | | 4712,78 |
| | max | 13,43 | | 4938,00 |
| | St.dev | 1,04 | 0,00 | 188,94 |
| | CoV | 7,90 % | 0,00 % | 3,66 % |
| III. | min | 10,80 | 5264,67 | 5230,96 |
| | mean | 11,42 | | 5513,44 |
| | max | 12,00 | | 5788,67 |
| | St.dev | 0,50 | 0,00 | 189,63 |
| | CoV | 4,03 % | 0,00 % | 3,14 % |

Tablica 6. Omjeri srednjih vrijednosti populacija E -modula*, **

| Omjeri srednjih vrijednosti populacija, γ_{mean} [%] | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Set | (5)/(4) | (6)/(4) | (7)/(4) | (8)/(4) | (9)/(4) | (10)/(4) |
| I. | -3,96 | -6,01 | -5,22 | -6,22 | -19,09 | -20,70 |
| II. | -0,0 | +0,31 | +0,79 | -0,0 | -6,97 | -7,00 |
| III. | -4,54 | -5,25 | -6,80 | -5,17 | -19,06 | -19,52 |
| Set | (4)/(10) | (5)/(10) | (6)/(10) | (7)/(10) | (8)/(10) | (9)/(10) |
| I. | +26,10 | +21,11 | +18,53 | +19,52 | +18,26 | +2,03 |
| II. | +6,28 | +6,29 | +6,61 | +7,12 | +6,29 | +0,02 |
| III. | +25,16 | +19,48 | +18,59 | +16,64 | +18,69 | +0,56 |

* Za populacije E -modula izračunane iz izraza od (5) do (9) i modula E_{dyn} te $E_{m,0,ref}$ iz izraza (4) i (10)
 ** vidjeti tablicu 7
 Napomena: negativni postotci upućuju na razmatranu vrijednost manju od usporedne.

3. Ocjena izvedenih modela regresije i primjene u razredbi malog broja uzoraka

3.1. Izvedeni modeli regresije i učinci prilagodbi na referentne sadržaj vlage i temperaturu drva

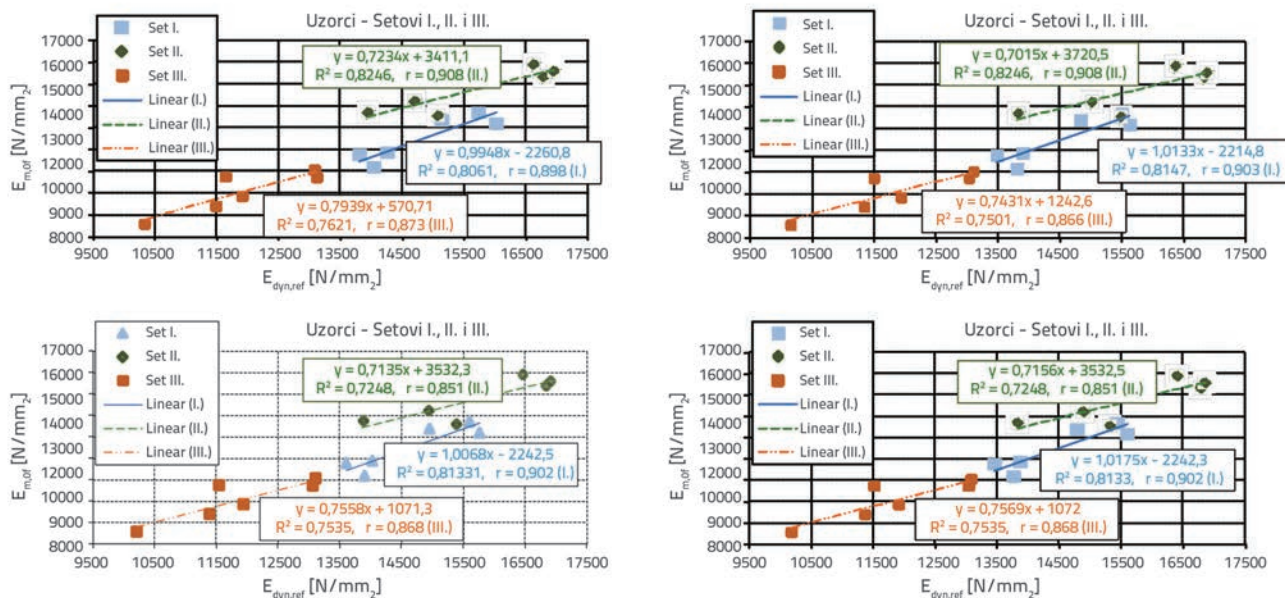
U mnogim istraživanjima provedenim na velikom broju uzoraka (različitih dimenzija, botaničkih vrsta i podrijetla) dokazana je prikladnost modela linearne regresije za međuovisnost mehaničkih svojstava [7, 15, 23, 25, 28, 30, 33,

47-50], a zbog pobuda različitim frekvencijama, vrednovani i učinci primjene različitih akustičnih testova (mjerenje brzine vala ili vlastite frekvencije) na dinamičke E -module velikih uzoraka [5, 29, 45].

U središtu pozornosti ovog istraživanja jesu vrednovanje modela regresije izvedenih za malobrojne setove uzoraka greda i gredica (slike od 2. do 4.) i učinci prilagođenih vrijednosti u i T na rezultate (tablice od 4. do 6.). Jakosti korelacija dinamičkih E -modula (slike od 5. do 7.) ocijenjene su i po kriteriju značenja referentne brzine v_{ref} izdvojenog indikatora regresije (tablica 7.), a statističke analize ANOVA (Excel) provedene su za 75-postotni interval i 95-postotnu razinu pouzdanosti ($\alpha = 0,05$) [20, 51, 52]. Kvalitativno, rezultati analiza potvrđuju prikladnost uzoraka jer vrijednosti F -testa > 1 i $sig.F < F$ (mjere varijabilnosti u potvrdi modela) upućuju na vezu koeficijentata korelacije rs promjenama parametra regresije [53, 54]. Kvantitativna ocjena preciznije pokazuje:

- bolje statističko značenje brzine v_{ref} od brzina v_{mean} za sve setove uzoraka i statistički značaj regresije
- prihvatljivost linearne veze brzina i statičkih E -modula, te čvrstoća jer su sve P -vrijednosti $< \alpha$
- vrlo jake korelacije i P -vrijednosti $< \alpha$ za prvi set potvrđuju pretpostavke o linearnosti regresija brzina i dinamičkih E -modula, dok s P -vrijednostima $> \alpha$, linearnost manjkavo opisuju vezu parametara za drugi i treći set, slabije kvalitete
- jednakost korelacija i statističkih značenja modela regresije modula $E_{dyn,ref,vref}$ i $E_{dyn,ref}$

Vrlo jake korelacije ($r > 0,85$) sa statičkim E -modulima i čvrstoćom potvrđuju djelotvornost primijenjene NDT (tablica 7., slike od 5. do 8.), te mjerljive učinke prilagodbi prema izrazima od (1) do (8) u postupku početne razredbe (tablice 6. i 8.).

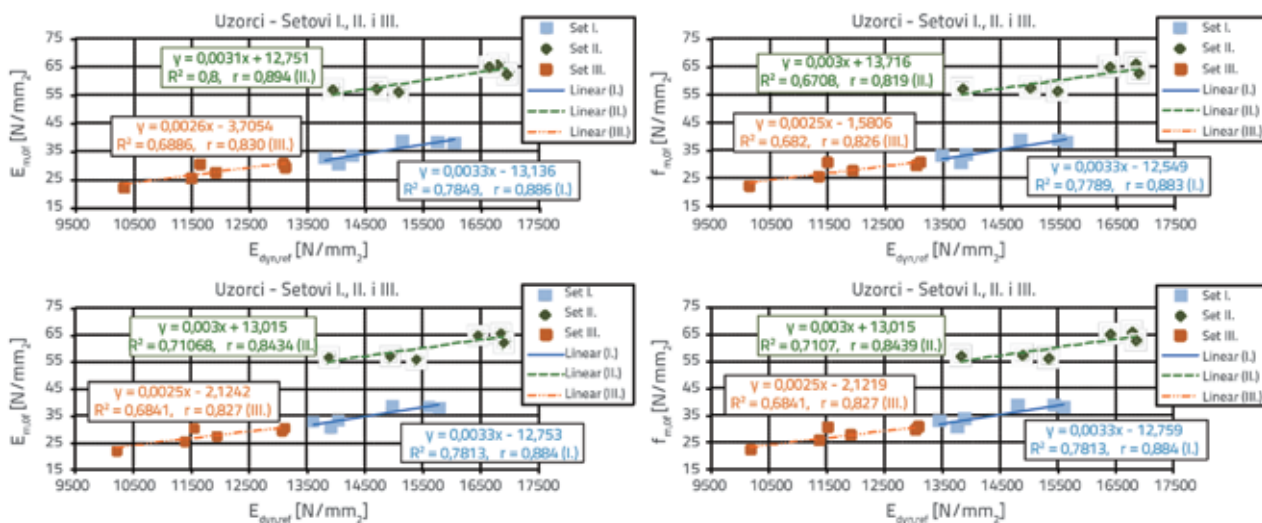


Slika 5. Regresije dinamičkih i statičkih E -modula

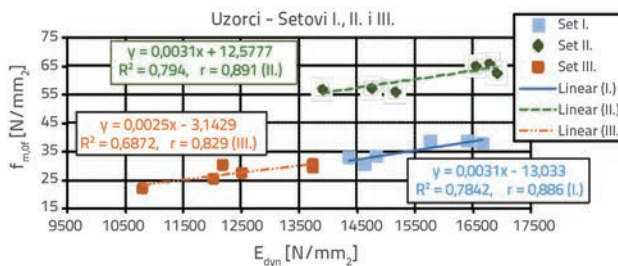
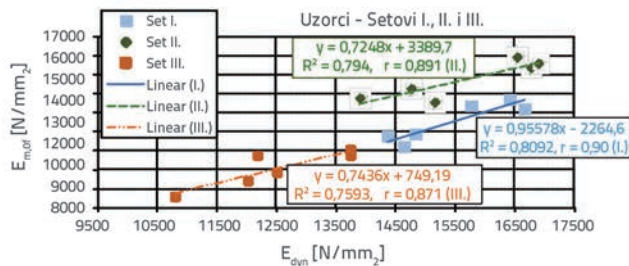
Tablica 7. Ocjene modela regresija E-modula i čvrstoća na savijanje s korigiranom brzinom vala

| Set | Regresijski model $y = a \cdot x + b$ | Koeff. determinacije* R^2 | | Koeff. korelacije* r | | Značaj modela regresije* sig.F (P-value) $F > 1$ | |
|------|---|-----------------------------|---------|------------------------|---------|---|-----------------|
| I. | $E_{dyn} = 5,678v_{ref} - 17510$ | 0,743 | (0,735) | 0,862 | (0,857) | 0,027 (0,029) | 11,54 (11,09) |
| | $E_{dyn,ref} = 5,444v_{ref} - 16758$ | 0,742 | (0,737) | 0,862 | (0,858) | 0,027 (0,029) | 11,53 (11,20) |
| | $E_{dyn,vref} = 5,365v_{ref} - 16618$ | 0,740 | (0,726) | 0,860 | (0,852) | 0,028 (0,031) | 11,40 (10,62) |
| | $E_{dyn,pref,vref} = 5,4v_{ref} - 16700$ | 0,742 | (0,730) | 0,861 | (0,854) | 0,028 (0,030) | 11,48 (10,81) |
| | $E_{dyn,ref} = 5,343v_{ref} - 16525$ | 0,742 | (0,730) | 0,861 | (0,854) | 0,028 (0,030) | 11,48 (10,81) |
| | $E_{m,0} = 6,947v_{ref} - 27823$ | 0,985 | (0,969) | 0,992 | (0,984) | 0,000 (0,000) | 260,62 (125,08) |
| | $E_{m,0,ref} = 6,836v_{ref} - 27426$ | 0,978 | (0,958) | 0,989 | (0,979) | 0,000 (0,001) | 176,92 (90,24) |
| | $f_{m,0} = 0,023v_{ref} - 99,441$ | 0,993 | (0,992) | 0,996 | (0,996) | 0,000 (0,000) | 559,48 (474,36) |
| II. | $E_{dyn} = 4,940v_{ref} - 7641$ | 0,441 | (0,409) | 0,664 | (0,639) | 0,150 (0,172) | 3,15 (2,76) |
| | $E_{dyn,ref} = 5,237v_{ref} - 9042,6$ | 0,475 | (0,447) | 0,689 | (0,669) | 0,130 (0,146) | 3,62 (3,24) |
| | $E_{dyn,vref} = 4,098v_{ref} - 3618,6$ | 0,331 | (0,290) | 0,575 | (0,539) | 0,232 (0,270) | 1,98 (1,63) |
| | $E_{dyn,pref,vref} = 4,398v_{ref} - 5033,6$ | 0,371 | (0,332) | 0,609 | (0,576) | 0,200 (0,231) | 2,36 (1,99) |
| | $E_{dyn,ref} = 4,385v_{ref} - 5021,1$ | 0,371 | (0,332) | 0,609 | (0,576) | 0,199 (0,231) | 2,36 (1,99) |
| | $E_{m,0} = 5,3974v_{ref} - 10711$ | 0,795 | (0,785) | 0,891 | (0,886) | 0,017 (0,019) | 15,46 (14,62) |
| | $E_{m,0,ref} = 4,742v_{ref} - 7632,9$ | 0,742 | (0,713) | 0,861 | (0,844) | 0,028 (0,035) | 11,50 (9,92) |
| | $f_{m,0} = 0,0238v_{ref} - 51,561$ | 0,837 | (0,814) | 0,915 | (0,902) | 0,011 (0,014) | 20,53 (17,56) |
| III. | $E_{dyn} = 3,124v_{ref} - 4671,8$ | 0,291 | (0,237) | 0,539 | (0,487) | 0,269 (0,327) | 1,641 (1,25) |
| | $E_{dyn,ref} = 2,924v_{ref} - 4237,1$ | 0,293 | (0,240) | 0,541 | (0,541) | 0,267 (0,324) | 1,658 (1,26) |
| | $E_{dyn,vref} = 3,074v_{ref} - 5052,2$ | 0,285 | (0,230) | 0,534 | (0,480) | 0,275 (0,336) | 1,593 (1,19) |
| | $E_{dyn,pref,vref} = 3,041v_{ref} - 4843,2$ | 0,287 | (0,232) | 0,536 | (0,482) | 0,273 (0,333) | 1,610 (1,21) |
| | $E_{dyn,ref} = 3,037v_{ref} - 4836,9$ | 0,287 | (0,232) | 0,536 | (0,482) | 0,273 (0,333) | 1,610 (1,21) |
| | $E_{m,0} = 4,2543v_{ref} - 13343$ | 0,741 | (0,691) | 0,861 | (0,831) | 0,028 (0,041) | 11,44 (8,95) |
| | $E_{m,0,ref} = 4,3061v_{ref} - 13685$ | 0,724 | (0,669) | 0,851 | (0,818) | 0,032 (0,047) | 10,48 (8,09) |
| | $f_{m,0} = 0,0159v_{ref} - 59,508$ | 0,791 | (0,746) | 0,889 | (0,864) | 0,018 (0,028) | 14,97 (11,26) |

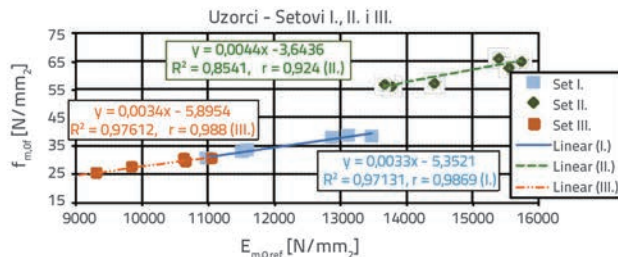
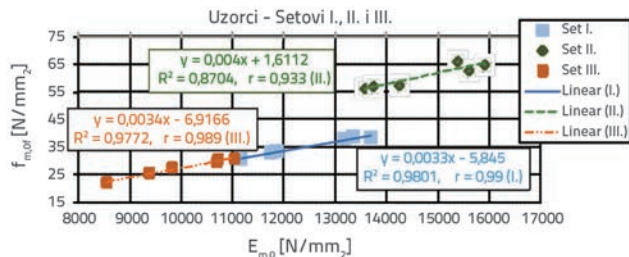
* Vrijednosti u zagradama dane su za regresije s brzinom v_{mean} . Koeff. korelacija v_{ref} s v_{mean} za I., II. i III. set su: $r = 0,998$, $r = 0,994$ i $r = 0,997$.



Slika 6. Regresije teorijskog E-modula sa statičkim E-modulom i čvrstoćom na savijanje



Slika 7. Regresije dinamičkih E-modula s čvrstoćom na savijanje



Slika 8. Regresijski modeli i parametri regresije statičkih E-modula s čvrstoćom na savijanje

3.2. Učinci prilagodbi na primjenu u razredbi malobrojnih uzoraka u razrede čvrstoće

Za razredbu početnog tipa primijenjen je parametarski izračun srednjih i karakterističnih vrijednosti svojstava setova s $n < 40$ uzoraka, za 95-postotnu razinu pouzdanosti i interval povjerenja $\gamma = 75\%$, te odgovarajućim faktorima utjecaja broja uzoraka, $k_{s(n)}$ [51, 52] prema izrazu (12) [20].

$$k_{s(n)} = \begin{cases} \frac{0,78}{n^{0,53}} = 0,302 & \text{za } E_{mean,k} \\ \begin{cases} 6,5n + 6 \\ 3,7n - 3 \end{cases} = 2,344 & \text{za } f_{m,k} \text{ i } \rho_k \end{cases} \quad (12)$$

$$m_k = \begin{cases} y_{mean} - k_{s(n)} s_y & \text{za } E_{mean,k} \text{ i } \rho_k \\ \exp(y_{mean} - k_{s(n)} s_y) & \text{za } f_{m,k} \end{cases} \quad (13)$$

Tablica 8. Razredba uzoraka i dodijeljeni razredi čvrstoće prema normi EN 338:2105

| Parametar razredbe** | $\rho_{u,corr}$ | ρ_{ref} | E_{dyn} | $E_{dyn,ref}$ | $E_{dyn,vref}$ | $E_{dyn,ref,vref}$ | $E_{dyn,ref}$ | $E_{m,0}$ | $E_{m,0,ref}$ | $f_{m,0}$ | |
|----------------------|----------------------|--------------|-----------|-----------------------|----------------|--------------------|------------------------|-----------|---------------|------------|----------------------|
| | (1) | (2) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | |
| | [kg/m ³] | | | [kN/mm ²] | | | | | | | [N/mm ²] |
| I. | y_{mean} | 434,4 | 430,7 | 15,45 | 14,84 | 14,52 | 14,64 | 14,49 | 12,50 | 12,25 | 3,56* |
| | s_y | 21,7 | 21,5 | 0,97 | 0,93 | 0,92 | 0,93 | 0,92 | 1,03 | 1,02 | 0,10* |
| | m_k | 383,5 | 380,3 | <u>15,15</u> | 14,55 | 14,24 | <u>14,36</u> | 14,21 | 12,19 | 11,94 < 12 | 27,94 |
| | CoV [%] | 2,95 | 2,93 | 5,74 | 5,73 | 5,78 | 5,73 | 5,77 | 7,54 | 7,60 | 8,88 |
| | Razred | C30 | C30 | <u>C45</u> | C40 | C40 | <u>C40</u> | C40 | C30 | <u>C27</u> | <u>C27</u> |
| II. | y_{mean} | 706,3 | 706,1 | 15,68 | 15,68 | 15,72 | 15,80 | 15,68 | 14,58 | 14,58 | 4,12* |
| | s_y | 49,8 | 48,1 | 1,24 | 1,27 | 1,19 | 1,51 | 1,20 | 1,18 | 1,07 | 0,07* |
| | m_k | 589,6 | 593,4 | <u>15,30</u> | 15,29 | 15,36 | <u>15,35</u> | 15,31 | 14,45 | 14,47 | 51,29 |
| | CoV [%] | 6,43 | 6,22 | 7,25 | 7,40 | 6,91 | 7,01 | 7,01 | 6,26 | 5,70 | 6,54 |
| | Razred | D45 | D45 | <u>D50</u> | D50 | D50 | <u>D50</u> | D50 | D50 | <u>D50</u> | <u>D50</u> |
| III. | y_{mean} | 392,0 | 392,9 | 12,51 | 11,94 | 11,85 | 11,66 | 11,86 | 10,15 | 10,10 | 3,32* |
| | s_y | 31,6 | 31,2 | 1,12 | 1,05 | 1,12 | 1,30 | 1,10 | 1,07 | 1,09 | 0,13* |
| | m_k | 318,0 | 319,9 | <u>12,17</u> | 11,62 | 11,51 | <u>11,26 < 11,5</u> | 11,53 | 9,76 | 9,70 | 20,37 |
| | CoV [%] | 7,35 | 7,24 | 8,19 | 8,05 | 8,60 | 8,45 | 8,45 | 8,70 | 8,96 | 11,0 |
| | Razred | C18 | C18 | <u>C30</u> | C27 | C27 | <u>C24</u> | C27 | C20 | <u>C20</u> | <u>C20</u> |

* za log-normalnu raspodjelu, ** podcrtavanjem su istaknute različitosti rezultata – dodjela razreda čvrstoće prema m_k izabranog svojstva

Tablica 9. Omjeri karakterističnih i srednjih vrijednosti populacija E-modula

| Usporedni referentni modul $E_{m,0,ref}$ | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| m_k | (4)/(10) | (5)/(10) | (6)/(10) | (7)/(10) | (8)/(10) | (9)/(10) |
| I. | +26,9% | +21,9% | +19,3% | +20,3% | +19,0% | +2,0% |
| II. | +5,7% | +5,7% | +6,2% | +6,0% | +5,8% | -0,2% |
| III. | +25,5% | +19,9% | +18,7% | +16,2% | +18,9% | +0,7% |
| Usporedni teorijski modul E_{dyn} | | | | | | |
| m_k | (5)/(4) | (6)/(4) | (7)/(4) | (8)/(4) | (9)/(4) | (10)/(4) |
| I. | -4,0% | -6,0% | -5,2% | -6,2% | -19,6% | -21,2% |
| II. | +0,0% | +0,4% | +0,3% | +0,1% | -5,6% | -5,4% |
| III. | -4,5% | -5,4% | -7,4% | -5,3% | -19,8% | -20,3% |

Karakteristične vrijednosti m_k određene su iz izraza (13) [20], za srednje vrijednosti homogenih populacija, v_{mean} , te standardne devijacije, $s_v \geq 0,05$ (za $f_{m,k}$) i $s_v \geq 0,05v_{mean}$ (za $E_{mean,k}$ i ρ_k). Iz grafova regresija (slike od 5. do 8.) vidljivo je zanemarivo odstupanje točaka od pravca između prvog i trećeg kvartila. Provjere karaktera raspodjele (dijagramom vjerojatnosti ili drugim statističkim metodama) zato nisu provedene, a usvojene su normalna raspodjela svojstava gustoće i krutosti te log-normalna za čvrstoće [1].

3.3. Razmatranje izvedenih regresija i učinaka primjene prilagodbi u početnom tipu razredbe

Rezultati prikupljeni iz literature upućuju na slične, no ne i jedinstvene parametre regresije koji ovise o primijenjenoj NDT, brojnosti, vrsti, veličini i tipu uzoraka. Istraživanja metodom brzine ultrazvučnog valovanja na velikim i brojnim uzorcima poznatih gustoća pokazuju da su najbolje korelacije između dinamičkih i statičkih E-modula, sa 0,84 – 0,91 za četiri vrste četinjača [30], 0,93 za borove grede [47], te 0,87 za uzorke od jele i smreke [48], a dinamički E-moduli između 15 % i 35 % veći od statičkih [45, 47, 49, 50]. Navedeni podaci usporedivi su s rezultatima provedenog istraživanja (tablice 6. i 9.).

Zbog vrlo jakih korelacija, bliskih navedenim izvorima, potencijali dinamičkih E-modula za predviđanja statičkog E-modula i čvrstoća na savijanje (slike od 5. do 7.) mogu se ocijeniti visokima, a linearne regresije prikladnima (P -vrijednosti znatno su manje od granične, $\alpha = 0,05$). Iako su jakosti korelacija za sva četiri izvedena modela regresije slične (slika 5.), te bliske onima za teorijski E-modul, E_{dyn} (slika 6.), najviši su koeficijenti korelacije ($r = 0,903$ i $r = 0,902$, za regresije s modulima $E_{dyn,vref}$ i $E_{dyn,ref}$), za uzorke prvoga seta, gdje su razlike između referentnih i izmjerenih vrijednosti u i T najveće, varijacije gustoće najmanje (tablice 5. i 9.), a statističko značenje brzine v_{ref} najbolji (tablica 6.). Za druge su setove najbolje korelacije statičkog E-modula s modulom $E_{dyn,pref}$ ($r = 0,908$, za II., a $r = 0,873$, za III. set), a najslabije s modulom $E_{dyn,vref}$ ($r = 0,825$ i $r = 0,866$), dok su jakosti regresije s modulima E_{dyn} $r = 0,891$ i $r = 0,871$ (slika 6.). Za oba su seta,

srednje vrijednosti populacija v_{mean} i v_{ref} (tablica 5.) bliske, varijacije gustoća veće, odstupanja srednjih vrijednosti populacija u i T od referentnih zanemariva, a statističko značenje brzina valovanja slabi (tablica 7.). Koeficijenti korelacija za izvedene regresije statičkog E-modula i čvrstoće (slike 5. i 7.) s dinamičkim E-modulima $E_{dyn,pref,vref}$ i $E_{dyn,ref}$ izjednačeni za sve setove, potvrđuju da se kombinirane prilagodbe mogu opisati jednom linearnom funkcijom.

Učinci prilagodbi mogu se ocijeniti zadovoljavajućim za primjenu u razredbi početnog tipa (tablice 8. i 9.). Za prvi i treći set su vrijednosti m_k za dinamičke E-module iz izraza od (5) do (8) manje od usporednih za teorijske module, E_{dyn} iz izraza (4), dodijeljeni razredi čvrstoće manje precijenjeni, a zanemarivi učinci prilagodbi za drugi set, spojivi s podacima iz tablica 4. i 5. Najmanje su razlike između m_k za populacije $E_{dyn,pref}$ i E_{dyn} , pa prilagodbe brzine valovanja treba smatrati značenijima od onih za gustoću velikih uzoraka koju su (čak i kad varira malo) istraživanja označila lošijim indikatorom od E-modula, s $0,3 < r < 0,7$ [15, 23, 29, 48, 49].

Statički E-modul pokazao se najboljim indikatorom čvrstoće na savijanje (slika 8., tablice 8. i 9.) jer su koeficijenti korelacija ($r = 0,99$, za prvi i treći set, a $r = 0,93$, za drugi) viši od onih za regresije s prilagođenim dinamičkim E-modulima (slika 7.), te s modulom E_{dyn} (slika 7.), gdje su $r_{max} = 0,89$ za prvi i drugi, a $r_{min} = 0,83$ za treći set. Razlike jakosti korelacija s $E_{dyn,ref}$ i E_{dyn} su zanemarive. Rezultati su usporedivi s podacima iz literature [15, 29, 48, 49], s $r > 0,8$ za dinamičke, a $r > 0,9$ za statičke E-module.

4. Zaključak

Iako je ovo istraživanje provedeno na malom broju uzoraka, a odstupanja su izmjerenih rezultata testova faza 1 i 2 (tablice 4. i 5.) od referentnih vrijednosti mala, može se uočiti sljedeće:

- gustoća, brzine ultrazvučnih valova i dinamički E-moduli jesu osjetljivi na učinke sadržaja vlage u i temperature T čijom se prilagodbom na referentne, poboljšavaju ishodi NDT (tablice 6. i 7.)
- primarnu svrhu prilagodbe imaju u postupku razredbe, a učinci su vidljivi čak i za relativno mala odstupanja razmatranih parametara u i T od referentnih vrijednosti (tablice 8. i 9.)
- za metodu zasnovanu na brzini osnog valovanja, dinamički E-moduli mogu se odrediti primjenom funkcija prilagodbe gustoće ili brzine, te kombinacijom, ali i kao prosječna prilagođena vrijednost, prema izrazima (5) do (8)
- kombinirani učinci prilagodbe gustoće uzoraka i brzine valovanja na dinamički E-modul, $E_{dyn,pref,vref}$ mogu se opisati jednom linearnom funkcijom, $E_{dyn,ref}$ (slike 5. do 7.)
- mogu se uspostaviti linearni modeli regresije kombinirano određenih mehaničkih svojstava (tablica 8.)
- kriterij jakosti korelacije u ocjeni modela regresije (tablica 7., slike 5. do 7.) treba dopuniti provjerom statističkog značenja parametra regresije (potvrda veze varijabli i mjere varijabilnosti)

- mogu se uspostaviti linearni modeli regresije statičkih E -modula, $E_{m,0}$ i čvrstoća na savijanje, $f_{m,0}$ s brzinama valovanja (tablica 7.)
- referentna brzina v_{ref} određena iz pojednostavnjenog izraza (3), pouzdaniji je parametar izvedenih regresija s $E_{m,0}$ i $f_{m,0}$ od srednje brzine v_{mean} (tablica 7.).

Ocjene statističkog značenja referentne brzine v_{ref} i jakosti korelacija (tablica 7., poglavlja 3.1 i 3.3) upućuju na moguća poboljšanja reprezentativnosti rezultata i smjernice budućih istraživanja:

- provjere prikladnosti izraza (3) za veća odstupanja parametara u i T od referentnih vrijednosti, te naznake granica područja primjene pojednostavnjenja
- korekcija brzine osnovnog valovanja za dodatni utjecaj devijacije nagiba vlakana
- uspostavljanje modela višestrukih regresija koji bi obuhvatili utjecaje prisutnosti kvrga
- uspostavljanje modela višestrukih regresija uzimanjem u obzir utjecaja gustoće te zaključke izvoditi iz rezultata testova na većem broju uzoraka odabranih na temelju detaljnog

vizualnog pregleda, a za određivanje statičkog E -modula primijeniti i druge raspoložive tehnike.

Ishodi provedenog istraživanja upućuju na visok potencijal dinamičkih E -modula određenih ovom metodom u predviđanju mehaničkih svojstava i smislenost primjene prilagođenih vrijednosti u postupku razredbe. Ocjenom učinka prilagodbi na setovima različite kvalitete i botaničke vrste, uočena su i ograničenja primijenjenog pristupa i analiziranih parametara, te navedena kao moguća smjernice za poboljšanja.

Zahvala

Autori zahvaljuju Sveučilištu u Rijeci na financijskim potporama znanstvenih projekata *Ocjena stanja i ojačanje građevinskih konstrukcija* te *Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija* koji obuhvaćaju ovo istraživanje. Laboratorijska ispitivanja su provedena na opremi nabavljenoj u sklopu projekta *Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci* (RC.2.2.06-0001) koji su sufinancirali Europski fond za regionalni razvoj i Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH.

LITERATURA

- [1] JCSS Probabilistic Model Code, Part 3: Resistance models – 3.5 Properties of timber, Joint Committee on Structural Safety, 2006, <http://www.jcss.byg.dtu.dk/publications>, 10.6.2017.
- [2] Bucur, V.: *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer, 2003.
- [3] Brashaw, B.K., Bucur, V., Divos, F., Gonçalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R.F., Potter, S., Ross, R.J., Wang, X., Yin, Y.: ND testing and evaluation of wood: a worldwide research update, *FOREST PRODUCTS J.*, 59 (2009) 3, pp. 7-14.
- [4] Ross, R.J.: *ND evaluation of wood*, Second edition, Gen. Tech. Report FPL-GTR-238. Madison, WI., USDA, Forest Service, Forest Prod. Lab., pp. 169, 2015.
- [5] Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., Turk, G.: Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques, Report of the Combigrade-project – Phase 1, ESPOO 2005. VTT PUBLICATIONS, 568, <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2005/P568.pdf>, 13.7.2017.
- [6] Beall, F.C.: Industrial applications and opportunities for NDE of structural wood members, *MADERAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 9 (2007) 2, pp. 127-134, <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2007000200003>.
- [7] Ross, R.J., Pellerin, R.F.: ND testing for assessing wood members in structures – A review, Gen. tech. report FPL- GTR-70, Madison, WI., USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 39, 1994.
- [8] Kasal, B., Ronald, W.A.: Advances in situ evaluation of timber structures. *PROGRESS IN STRUCTURAL ENGINEERING AND MATERIALS*, 6 (2004) 2, pp. 94–103, <https://doi.org/10.1002/pse.170>.
- [9] Kasal, B., Tannert, T.: *In situ evaluation of structural timber*. Springer, 2010.
- [10] Dietch, P., Köhler, J.: *Assessment of timber structures*, Shaker Verlag, 2010.
- [11] Piazza, M., Riggio, M.: Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures, *Journal of Building Appraisal*, 3 (2008) 4, pp. 267-296, <https://doi.org/10.1057/jba.2008.4>
- [12] Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Inspection and condition assessment of existing timber structures, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017), 9, pp. 861-873, <https://doi.org/10.14256/JCE.1994.2017>
- [13] Riggio, M., D'Ayala, D., Parisc, M.A., Tardinic, C.: Assessment of heritage timber structures: Review of standards, guidelines and procedures, *J. OF CULTURAL HERITAGE*, 31 (2018), pp. 220-235, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.007>
- [14] Rajčić, V., Bjelanović, A.: Razredba drvne građe, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 10, pp. 779-784.
- [15] Faggiano, B., Grippa, M.R., Calderoni, B.: Non-destructive tests and bending tests on chestnut structural timber, *ADVANCED MATERIALS RESEARCH*, 778 (2013), pp. 167-174, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.167>
- [16] Machado, J.S., Riggio, M., Descamps, T. (eds): Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members, COST FP1101 Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber, State of art report, Mons: Université de Mons, 2015.
- [17] EN 338: Structural timber – Strength classes, CEN, Brussels, 2015.
- [18] EN 14081-1: Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section – Part 1: General requirements, CEN, Brussels, 2005, <https://doi.org/10.3403/30040180> (published 31/03/2006)

- [19] EN 408+FprA1: Structural timber – Determination of some physical and mechanical properties, CEN, Brussels, 2010.
- [20] EN 14358: Timber structures – Calculation characteristic 5-percentile and mean values for the purpose of initial type testing and factory production control, CEN, Brussels, 2013.
- [21] EN 384: Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density, CEN, Brussels, 2015.
- [22] Bucur, V., Böhnke, I.: Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood, *ULTRASONICS*, 32 (1994), 5, pp. 385–390, [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(94)90109-0).
- [23] Gloss, P.: Strength grading (Lecture 6), STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints, STEP/EUROFORTECH, 1st Ed., Centrum Hout, Netherlands, pp. A6 (1-A6/8), 1995.
- [24] Divos, F., Tanaka, T.: Lumber strength estimation by multiple regression, *HOLZFORSCHUNG*, 51 (1997) 5, pp. 467–471, <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.5.467>.
- [25] Sandoz, J.L.: Grading of construction timber by ultrasound, *WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 23 (1989) 1, pp. 95–108, <https://doi.org/10.1007/BF00350611>
- [26] Beall, F.C.: Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties, *WOOD SC. AND TECH.*, 36 (2002), pp. 197–212, <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>.
- [27] Bucur, V.: Acoustic of wood, 2nd Edition. Springer, pp. 393, 2006.
- [28] Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfin, J.I.: Structural Tali timber: Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods, *HOLZ ALS ROH-UND WERKSTOFF* 64 (2006) 5, pp. 357–362, <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0100-5>
- [29] Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A.: Development of strength grading of timber using combined measurement techniques, Report of the Combigrade-project – Phase 2, ESPOO 2008, VTT PUBL., 686, <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P686.pdf>, 13.7.2017.
- [30] Wang, S.Y., Chen, J.H., Tsai, M.J., Lin, C.J., Yang, T.H.: Grading of softwood lumber using ND techniques, *J. OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, 208 (2008) 1–3, pp. 149–158, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.105.
- [31] Ferreira, G.C., Gonçalves, R., Favalli, R.S., Bertoldo, C.: Adequacy of standards of wood grading using ultrasound to the standard of structural design, 18th Int. ND Testing and Evaluation of Wood Symp., Madison, pp. 404–409, 2013.
- [32] Íñiguez-González, G., Arriaga, F., Esteban, M., Llana, D.F.: Reference conditions and modification factors for the standardization of ND variables used in the evaluation of existing timber structures, *CONST. AND BUILDING MATERIALS*, 101 (2015) 2, pp. 1166–1171, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.128
- [33] Sandoz, J.L.: MC and temperature effect on ultrasound timber grading, *WOOD SC. AND TECH.*, 27 (1993) 5, pp. 373–380, <https://doi.org/10.1007/BF00192223>.
- [34] Kang, H., Booker, R.E.: Variation of stress wave velocity with MC and temperature, *WOOD SC. AND TECH.*, 36 (2002) 1, pp. 41–54, <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0129-x>.
- [35] Green, D.W., Evans, J.W.: The immediate effect of temperature on the MoE of green and dry lumber, *WOOD AND FIBER SCIENCE*, 40 (2008) 3, pp. 374–383.
- [36] Moreno-Chan, J., Walker, J.C., Raymond, C.A.: Effects of MC and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiata pine sapwood boards, *WOOD SC. AND TECH.*, 45 (2010) 4, pp. 609–626, <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0350-6>.
- [37] Divos, F., Denes, L., Íñiguez, G.: Effect of cross-sectional change of a board specimen on stress wave velocity determination, *HOLZFORSCHUNG*, 59 (2005), 2, pp. 230–231, <https://doi.org/10.1515/HF.2005.036>.
- [38] Oliveira, F. G. R., Miller, K. P., Candian, M., Sales, A.: Effect of the size of the specimen on ultrasonic velocity, *REVISTA ÁRVORE*, 30 (2006) 1, pp. 141–145, <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100017>
- [39] Wang, S.Y.: Stress wave E-rating of structural timber - Size and MC effects, 18th Int. ND Testing and Evaluation of Wood Symp., Madison, pp. 38–46, 2013.
- [40] Baño, V., Arriaga, F., Soilán, A., Guaita, M.: Prediction of bending load capacity of timber beams by FEM simulation of knots and grain deviation, *BIOSYSTEMS ENG.*, 109 (2011), pp. 241–249, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.008>.
- [41] Maderebner, R., Anton Kraler, A., Beikircher, W.K., Flach, M.: Influence on measuring results by knottiness of ultrasound measurements of bending stress-section spruce wood beams, *WCTE*, Auckland, pp: 83–91, 2012.
- [42] Arriaga, F., Llana, D.F., Martinez, R., Esteban, M., Íñiguez G.: Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber, *HOLZFORSCHUNG*, 71 (2017) 9, pp. 713–723, doi: 10.1515/hf-2016-0214
- [43] EN 1912: Structural Timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species, CEN, Brussels, 2012.
- [44] EN 13183-2: Moisture content of a piece of sawn timber – Part 1: Estimation by electrical resistance method, CEN, Brussels, 2002.
- [45] Unterwieser, H., Schickhofer, G.: Influence of MC of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency – and ultrasonic runtime measurement, *EUR. J. WOOD PROD.*, 69 (2010), pp. 171–181, doi: 10.1007/s00107-010-0417-y.
- [46] Bodig, J., Jayne, B.A.: Mechanics of Wood and Wood Composites, Van Nostrand Reinhold, pp. 712, 1982.
- [47] Íñiguez, G.: Grading by ND Techniques and Assessment of the Mechanical Properties of Large Cross-Section Coniferous Sawn Timber for Structural Use, PhD Dissertation, Univ. Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes, Madrid, Spain, pp. 223, 2007., www.oa.upme/415, 16.7.2017.
- [48] Pazlar, T., Srpčič, J., Turk, G., Plos, M.: ND tests for strength grading of Slovenian structural sawn timber, 17th Int. ND T. and E. of Wood Symp., Sopron, pp. 231–238, 2011.
- [49] Rohanová, A., Lagaña, R., Babiak, M.: Comparison of ND methods of quality estimation of the construction spruce wood grown in Slovakia, 17th Int. ND T. and E. of Wood Symp., Sopron, pp. 239–246, 2011.
- [50] Widmann, R.: Grading of thermally modified beech, 17th Int. ND T. and E. of Wood Symp., Sopron, pp. 293–298, 2011.
- [51] Natrella, M.G.: Experimental Statistics, National Bureau of Standards Handbook, 91, U.S. Government Printing Office, 1963.
- [52] Guttman, I.: Statistical Tolerance Regions: Classical and Bayesian, Darien, CT, Hafner Publishing Co., 1970.
- [53] Faraway, J.J.: Practical regression and ANOVA Using R, online book, 2002, <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf>, 20.5.2017.
- [54] Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K.: Probability & statistics for engineers and scientists, 8th ed., Pearson Education Inc., 2007.