

GOSTOTA LESA - METODE DOLOČANJA IN POMEN PRI RAZVOJU GOZDNO LESNEGA BIOGOSPODARSTVA

WOOD DENSITY - DETERMINATION METHODS AND IMPORTANCE IN THE DEVELOPMENT OF THE FOREST-BASED BIOECONOMY

Domen ARNIČ¹, Miha HUMAR², Davor KRŽIŠNIK³, Luka KRAJNC⁴, Peter PRISLAN⁵

(1) Gozdarski inštitut Slovenije, domen.arnic@gozdis.si

(2) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, miha.humar@bf.uni-lj.si

(3) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, davor.krzisnik@bf.uni-lj.si

(4) Gozdarski inštitut Slovenije, luka.krajnc@gozdis.si

(5) Gozdarski inštitut Slovenije, peter.prislan@gozdis.si

IZVLEČEK

Gostota lesa je fizikalna lastnost, ki je enostavno določljiva in nakazuje na številne druge lastnosti lesa in s tem tudi na njegovo uporabnost v lesno-predelovalni industriji, gradbeništvu ali energetiki. Ker je odvisna od vlažnosti ter poroznosti, se v stroki pojavljajo različne definicije gostot lesa, med katerimi je največkrat uporabljena gostota lesa v absolutno suhem stanju. Namen prispevka je predstavitev različnih načinov določanja gostote lesa ter pomen hitrega in natančnega določanja tega parametra kakovosti pri razvoju gozdno lesnega biogospodarstva. V stroki obstaja več neposrednih in posrednih metod določanja gostote; najbolj običajen in razširjen je volumetrični pristop, sledi postopek ocenjevanja gostote s penetrometrom, rezistografom, visokofrekvenčno denzitometrijo, rentgenskimi žarki, infrardečo spektroskopijo ter mikrovalovi. Les je surovina, ki ji bo v prihodnosti pomen še naraščal, saj je ključna za razvoj trajnostnega biogospodarstva. Natančno in pravočasno določanje gostote lesa bo omogočalo ustrezno razporejanje in usmerjanje tokov te surovine med posameznimi konvencionalnimi in novimi sektorji (področji rabe) in posledično bolj učinkovito in trajnostno rabo.

Ključne besede: lastnosti lesa, gostota lesa, rezistograf, penetrometer, rentgenska denzitometrija, visokofrekvenčna denzitometrija, gozdno lesno biogospodarstvo

ABSTRACT

Wood density is an important physical property that can be easily measured and is closely related to many other wood properties. Furthermore, wood density is a good indicator of the usability and applicability of wood in the wood processing, construction and energy industries. Because it is strongly dependent on moisture content and porosity, there are various definitions of wood density in the literature, among which the density measured on the basis of dry matter and volume is the most commonly used. The aim of this paper is to present different methods for wood density determination and the importance of collecting such data for the development of the forest-based bioeconomy. In practice, there are several direct and indirect methods of density measurement; in addition to the most basic volumetric approach, the density of wood can be measured by penetrometer, resistograph, high frequency densitometry, X-rays, near infrared spectroscopy and microwaves. Wood will continue to grow in importance, as it is one of the key raw materials for the transition to a sustainable bioeconomy. The accurate and timely determination of wood density allows for the appropriate distribution and direction of flows of this raw material between individual conventional and new sectors (areas of use) and thus its more efficient and sustainable use.

Key words: wood properties, wood density, resistograph, penetrometer, X-ray densitometry, high frequency densitometry, forest-based bioeconomy

GDK 812.31--01(045)=163.6

DOI 10.20315/ASetL.124.1



Prispelo / Received: 6. 10. 2020

Sprejeto / Accepted: 16. 12. 2020

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Gostota lesa je fizikalna lastnost, ki je v splošnem definirana kot masa vzorca na enoto prostornine pri določeni vlažnosti (ISO-13061-2, 2014) in spada med glavne kazalnike uporabnosti lesa, saj je tesno povezana s številnimi drugimi mehanskimi in fizikalnimi lastnostmi lesa (Gorišek in sod., 2009; Ross, 2010). Gostota lesa je poleg anatomske in kemijske zgradbe

odvisna od njegove vlažnosti, zato jo vedno podajamo ob izmerjeni lesni vlažnosti. Standard ISO-13061-2 (2014) v delu »Določanje gostote lesa pri fizikalnih in mehanskih testih« navaja tri vrste gostote: (1) gostoto lesa v absolutno suhem stanju, (2) gostoto lesa pri določeni vlažnosti, ter (3) osnovno gostoto lesa. Predvsem v angleški literaturi se za les kot porožen material navajata nominalna gostota in relativna gostota (Torelli, 1998; Gorišek in sod., 2009; Ross, 2010).

Preglednica 1: Vrste izražanja gostote lesa (kot poroznega materiala), formule njihovega izračuna in njihove definicije (Gorišek in sod., 2009; ISO-13061-2, 2014)**Table 1:** Types of expression of wood density (as a porous material), formulas for calculation and definitions (Gorišek et al., 2009; ISO-13061-2, 2014)

Gostota	Formula	Definicija
Gostote pri določeni vlažnosti	$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Razmerje med maso lesa pri določeni vlažnosti (m_u) in njegovim volumnom pri isti vlažnosti (V_u)
Gostota v absolutno suhem stanju	$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Razmerje med maso lesa (m_0) in njegovim volumnom (V_0) pri vlažnosti 0 %
Nominalna gostota lesa	$R_u = \frac{m_0}{V_u} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Razmerje med maso v absolutno suhem stanju in volumnom pri poljubni vlažnosti u
Osnovna gostota	$R_0 = \frac{m_0}{V_{maks.}} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Razmerje med maso v absolutno suhem stanju in maksimalnim volumnom; tj. pri vlažnosti nad nasičenostjo celičnih sten.
Relativna gostota	$d_u = \frac{R_u}{\rho_{H_2O}}$	Razmerje med nominalno gostoto lesa R_u in gostoto vode pri 4 °C.

Pri gostoti lesa pri določeni vlažnosti meritve mase ter prostornine lesa opravimo pri isti vlažnosti (ISO-13061-2, 2014). Gostota lesa pri absolutno suhem stanju je definirana kot razmerje med maso in prostornino absolutno suhega lesa (ISO-13061-2, 2014). Nominalna gostota je razmerje med maso lesa, izmerjeno v absolutno suhem stanju, in prostornino pri določeni vlažnosti (Gorišek in sod., 2009). Kadar vlažnost preseže nasičenost celičnih sten (med 25 in 40 %) in je volumen maksimalen (Gorišek in sod., 2009; Meyer in Brischke, 2015; Zelinka in sod., 2015), govorimo o osnovni gostoti (ISO-13061-2, 2014). Relativna gostota lesa ponažarja razmerje med nominalno gostoto lesa in gostoto vode pri 4 °C (Gorišek in sod., 2009) (preglednica 1).

Gostota lesa je neposredno povezana tudi z njegovo poroznostjo. Upoštevajoč dejstvo, da je gostota celičnih sten približno konstantna, je povezava med poroznostjo in gostoto zelo tesna. Poroznost je definirana z deležem prostornine vzorca, ki ga v lesu zasedajo pore (Plötze in Niemz, 2010). Podobno kot gostota je tudi poroznost pomemben kazalnik za druge lastnosti lesa, kot so: prepustnost plinov, absorpcija kapljev, impregnabilnost, prevodnost toplote, natezna in upogibna trdnost itd. (Plötze in Niemz, 2010). Poleg poroznosti gostoto lesa opredeljuje tudi gostota lesne substance ali gostota celičnih sten (ang. skeletal density) (Brewer in sod., 2014; Zelenka in sod., 2019), kjer maso vzorca izražamo glede na enoto volumna celičnih sten - torej, volumen brez upoštevanja por v lesu (Brewer in sod., 2014). Na gostoto lesne substance kot tudi na gostoto lesa kot poroznega materiala najbolj vplivajo anatomska zgradba lesa, kemična zgradba lesa, vsebnost mineralnih snovi, vsebnost ekstraktivov itd. (Torelli, 1998; Gorišek in sod., 2009).

Gostota lesne substance v absolutno suhem stanju dosega okoli 1500 kg/m³ (Torelli, 1998; Plötze in Niemz, 2010), kar je najvišja vrednost gostote, ki bi jo les lahko teoretično dosegel (Chave in sod., 2009). Gostota lesa kot poroznega materiala pri različnih lesnih vrstah variira na zelo širokem intervalu; od 110 kg/m³ (balsa - *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.)) do več kot 1300 kg/m³ (gvajak - *Guaiacum officinale* L.) (Patten in sod., 2010). Pri pogostejših vrstah v Sloveniji gostote lesa značilno nihajo tudi znotraj vrste, npr. pri smrekovem lesu 400–780 kg/m³, bukovini 490–880 kg/m³, hrastovini 540–600 kg/m³, macesnovini 500–560 kg/m³ (Plötze in Niemz, 2010; Ross, 2010; Čufar in sod., 2017). Variiranje gostot znotraj vrste je posledica različnih ekoloških razmer, kot so: razlike v rastiščnih razmerah (Mäkinen in sod., 2002), podnebne spremembe (van der Maaten-Theunissen in sod., 2013), ki povzročajo razlike v anatomski zgradbi lesa (Preston in sod., 2006), in nenazadnje fenotipska prilagoditev in drugo. Gostota lesa variira tudi znotraj drevesa tako po višini (Jyske in sod., 2008) kot tudi po prirastnih plasteh oz. branikah. Za iglavce je značilen negativen odnos med gostoto in širino branike (t.j. za les z ožjimi letnimi prirastnimi plastmi je značilna večja gostota) (Bouriaud in sod., 2005). Obraten odnos kot pri iglavcih je značilen predvsem za venčastoporozne vrste, kjer gostota lesa narašča s širino letnega prirastka (Bergès in sod., 2008). V primeru difuzno poroznih drevesnih vrst povezava med gostoto in letnim prirastkom ni značilna (Bouriaud in sod., 2004).

Poznavanje variabilnosti gostote lesa (tako časovno kot prostorsko) je ključno z vidika (1) povečanja učinkovitosti izrabe materiala po načelih krožnega gospodarstva, in (2) zaradi povezave med gostoto lesa

in vsebnostjo ogljika v luči ponora CO₂ in prilagajanju podnebnim spremembam (Chave in sod., 2009; Hurmekoski in sod., 2018a). Z natančnim poznavanjem prostorske in časovne variabilnosti gostote lesa različnih drevesnih vrst lahko natančneje opredeljujemo in napovedujemo njegovo rabo (Walker, 2006; Čufar in sod., 2017). Podrobneje, gostota lesa iglavcev vpliva na donos celuloze v papirniški industriji (Dutilleul in sod., 1998; Mäkinen in sod., 2002; Walker, 2006); značilna je tudi povezava z modulom elastičnosti lesa in upogibno trdnostjo, ki narekuje uporabnost lesa v modernem gradbeništvu (Krajnc in sod., 2019; Tony in sod., 2019).

Namen pričujočega prispevka je: (1) Predstavitev hitrih in učinkovitih metod za posredno in neposredno določanje gostote lesa, ki so potencialno uporabne v gozdarstvu ali lesno predelovalni industriji za ocenjevanje kakovosti lesa; t.j. volumetrični pristop določanja gostote lesa, ocenjevanje gostote lesa s penetrometrom, ocenjevanje gostote lesa na podlagi merjenja mehanske odpornosti pri vrtnanju v les, določanje gostote lesa na podlagi visokofrekvenčne denzitometrije ter določanje gostote lesa na podlagi presevanja lesa z rentgenskimi žarki in ocena gostote lesa z infrardečo spektroskopijo in mikrovalovi; (2) uporabno vrednost izbranih metod ter pomembnost poznavanja variabilnosti gostote lesa v praksi bomo predstavili v kontekstu razvoja gozdno lesnega biogospodarstva.

2 POSREDNE IN NEPOSREDNE METODE DOLOČANJA GOSTOTE LESA

2 INDIRECT AND DIRECT METHODS FOR MEASURING WOOD DENSITY

Posredne in neposredne metode določanja gostote lesa se v splošnem delijo glede na način določanja gostote in njihovo področje uporabe, npr. lesarstvu, papirništvu, arboristiki in drugod. V primeru neposrednih metod gostoto natančno določimo na podlagi volumna in teže (npr. določanje gostote s piknometrom).



Slika 1: Naprava piknometar GeoPyc (a) za določanje gostote lesa kot poroznega materiala in piknometar AccuPyc (b) s sistemom za izpodrivanje zraka

Pri posrednih metodah o gostoti sklepamo na podlagi korelacije med izmerjeno vrednostjo (npr. uporou vrtnanja pri rezistografu) in dejansko gostoto. V lesarstvu določanje in poznavanje gostote lesa bistveno pripomore k napovedovanju uporabnosti lesa (Gorišek in sod., 2009; Čufar in sod., 2017). V arboristiki se pogosto uporabljajo pol-destruktivne metode določanja ali ocenjevanja gostot na stoječih drevesih z namenom ugotavljanja stopnje razkroja lesa v notranjosti debla, na podlagi česar sklepajo o stabilnosti drevesa (Ross, 2015). V zadnjih desetletjih so raziskave variabilnosti gostote lesa postale pomemben del dendro-klimatoloških študij, kar omogoča podrobnejše razumevanje odziva dreves na podnebne spremembe, posredno iz takšnih rezultatov lahko sklepamo o vplivu podnebnih sprememb na uporabnost lesa (Zhang, 1997; van der Maaten in sod., 2012).

2.1 Volumetrični pristop določanja gostote lesa

2.1 Volumetric approach to wood density determination

Volumetrične metode določanja gostote, ki delujejo na principu tehtanja (določanja mase) in merjenja prostornine, so osnovne in najstarejše metode določanja gostote snovi (Barnett in Jeronimidis, 2003). Standard ISO-13061-2 (2014) opredeljuje uporabo merilnih naprav, ki zelo natančno ($\pm 0,2-0,3\%$) izmerijo (a) dimenzije vzorca oz. prostornino, (b) maso vzorca, in (c) vlažnost lesa. Pri vzorcih z nepravilno obliko standard določa izmero volumna z izpodrivanjem vode ali drugih snovi (po Arhimedovem zakonu). V preteklosti so pogosto uporabljali živo srebro, ki omogoča natančno izmero prostornine vzorca (Martinčič, 2010).

Danes se za natančno določanje gostote uporabljajo piknometri (ang. envelope density analyser / sand pycnometer), ki za določanje volumna uporabljajo različne medije. Za primer, naprava GeoPyc (Micromeritics, Norcross, ZDA) omogoča natančno izmero volumna s

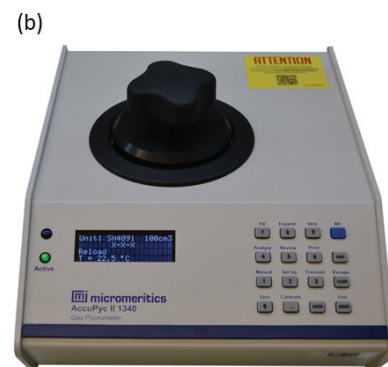


Fig. 1: GeoPyc pycnometer device (a) for determination of wood density and AccuPyc pycnometer (b) with air displacement system

suhim, sipkim medijem iz mešanice zelo majhnih delcev grafita in keramičnih mikrosfer (Micrometrics, 2016). Sistem je avtomatsko voden in v primeru predhodno vnesene mase vzorca izračuna tudi gostoto lesa (slika 1a). Sistem je najbolj primeren za določanje gostote lesa v absolutno suhem stanju, kjer se vlažnost vzorca zaradi uporabe nadtlaka ne spreminja. Omejitve metode je velikost vzorca, ki je omejena z velikostjo uporabljenega cilindra (0,5 do 25 cm³) (Micrometrics, 2016).

Podrobnejše analize omogočajo piknometri s sistemom za izpodrivanje zraka (slika 1b), ki s prepihanjem vzorca (npr. helijem ali dušikom) natančno določijo poroznost materialov (Micrometrics, 2014). V primeru lesa poroznost ponazarja prostornino lumnov prevodnih elementov v lesu, npr. trahej v primeru listavcev oz. traheid v primeru lesa iglavcev. Ko predhodno izmerjenemu volumnu vzorca odštejemo poroznost, dobimo volumen lesne substance, ki v nadaljevanju omogoča izračun gostote lesne substance.

2.2 Ocenjevanje gostote lesa s penetrometrom

2.2 Estimation of wood density with a penetrometer

Metoda ocenjevanja gostote lesa s penetrometrom je manj destruktivna, učinkovita in robustna metoda ocenjevanja gostote lesa (Mäkipää in Linkosalo, 2011). V našem primeru smo povzeli način merjenja penetrometra Pilodyn (slika 2), ki deluje po principu penetriranja 2 ali 2,5 mm jeklene igle v les. Naprava prek vzmeti na iglo prenese konstantno silo, ki povzroči penetracijo v les. Globina prodiranja igle, dolge 40 mm, je odvisna predvsem od gostote vzorca, drevesne vrste, dolžine in geometrije lesnih vlaken ter anatomske orientacije lesa (Mäkipää in Linkosalo, 2011).

Gostoto pri tej metodi določimo na podlagi visoke korelacije med globino penetracije in gostoto lesa (Micko in sod., 1982; Gao in sod., 2017). Sprva je bil penetrometer razvit za določanje stanja lesenih telefonskih drogov, v nadaljevanju so ga uporabljali tudi za določanje gostote in zaznavanje razkroja lesa v stoječih drevesih (Micko in sod., 1982; Chen in sod., 2015) ter za hitro oceno kakovosti lesa stoječih dreves v plantažnih nasadih (Wu in sod., 2010). Prednost te metode je hitrost merjenja, saj meritev na posameznem drevesu traja približno eno minuto. Pomanjkljivost metode je točkovno določanje pri globini penetracije med 0 in 40 mm, naprava ima tudi razmeroma šibko resolucijo zaznavanja sprememb gostot in relativno velik vpliv vlažnosti lesa na globino penetriranja igle (Mäkipää in Linkosalo, 2011; Gao in sod., 2017; Fundova in sod., 2018; Llana in sod., 2018;).

2.3 Ocenjevanje gostote lesa z merjenjem mehanske odpornosti pri vrtanju v les

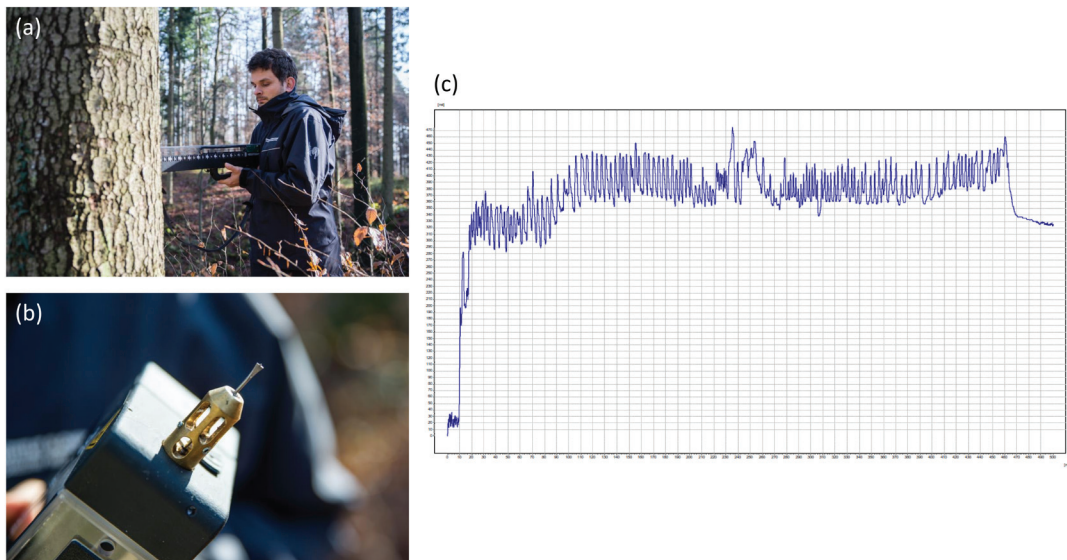
2.3 Estimation of wood density by measuring mechanical resistance when drilling

Gostoto lesa lahko ocenjujemo tudi z napravami za merjenje mehanske odpornosti med vrtanjem v les, npr. Resistograph (Rinntech, Heidelberg, Nemčija, slika 3a) (Rinn in sod., 1996; Gao in sod., 2017; Sharapov in sod., 2019). Vrtanje poteka z jekleno iglo debeline 1–1,5 mm, ki je na delu, namenjenemu vrtanju v les, sploščena na 3 mm in geometrijsko preoblikovana v ploščati sveder (slika 3b). Naprava med vrtanjem vzdržuje konstantno število vrtljajev (1000 rpm ± 1 %) in v odvisnosti od gostote lesa različno dolžinsko napreduje. Pri vrstah z višjo gostoto naprava opravi vrtanje z natančnostjo merjenja meritve na 0,01 mm na dolžini okoli 70 mm v minuti, pri vrstah z nižjo gostoto tudi



Slika 2: Primer penetrometra Pilodyn proizvajalca Hylec

Fig. 2: Example of the Pilodyn penetrometer from Hylec



Slika 3: Uporaba rezistografa (a), sploščitev jeklene igle v ploščati sveder (b) in rezistografski gostotni profil (c)

Fig. 3: Use of a Resistograph (a), flattening of a steel needle in a flat drill (b) and resistograph density profile (c)

do 1000 mm v minuti (Rinn in sod., 1996). Znanstvena različica naprave zaradi relativno velike ločljivosti in natančnosti merjenja (zaznavanje meritev na 1/100 mm) omogoča tudi spremljanje trendov gostote in priraščanja tako na letni kot tudi sezonski ravni, pri čemer se lahko spremljajo npr. lastnosti ranega in kasnega lesa in druge rastne posebnosti (Rinn in sod., 1996).

Vrednost, ki jo naprava za merjenje mehanske odpornosti izmeri, ponazarja rezistografsko gostoto lesa (slika 3c). Le ta zadošča za zelo natančno prepoznavanje razkroja lesa, variabilnosti gostote po preseku debla ter posledično oceno kakovosti lesa (Rinn in sod., 1996; Ceraldi in sod., 2001; Wang in Allison, 2008; Rinn, 2012). Za podrobnejše analize dejanskih gostot so v sklopu preteklih raziskav za različne vrste že razvili modele pretvorbe rezistografskih gostot v gostoto absolutno suhega lesa (Sharapov in sod., 2019). Posledično se rezistograf lahko uporablja tudi v dendroklimatologiji, z namenom analize vpliva podnebnih sprememb na lastnosti lesa (Oliveira in sod., 2017; Sharapov in sod., 2019).

2.4 Ocenjevanje gostote lesa z visokofrekvenčno denzitometrijo

2.4 Estimation of wood density by high-frequency densitometry

Visokofrekvenčna denzitometrija (slika 4) je metoda določanja gostote lesa na podlagi mikro-elektrodnega sistema, nameščenega na konici jeklenega cilindra, ki med merjenjem drsi po površini vzorca (npr. prečnega prereza izvrtka) (Schinker in sod., 2003). Ključna dela naprave sta dve vzporedno postavljeni elektrodi (slika 4): prva je namenjena oddaji konstantnega viso-

kofrekvenčnega signala, druga sprejemu povratnega signala med drsenjem po površini vzorca (Schinker in sod., 2003). Elektromagnetno polje z napetostjo, ki jo proizvaja visokofrekvenčni generator, se na vzorec prenese prek oddajne elektrode, pri čemer na sprejemno elektrodo iz vzorca vrne manjši del napetosti, ki kaže na lokalno relativno dielektrično konstanto (LRDK), katere vrednosti se beležijo z 0,12 mm natančnostjo (Schinker in sod., 2003). Trend LRDK zelo natančno pojasnjuje trend gostote lesa, kar so dokazali z rentgenskim slikanjem istih vzorcev (Schinker in sod., 2003; Wassenberg in sod., 2015). Pretvorniki vrednosti LRDK so dostopni za več drevesnih vrst (Wassenberg in sod., 2014).

Visokofrekvenčna denzitometrija omogoča natančno izdelavo gostotnih profilov in analizo variabilnosti gostote med leti (branikami) ter znotraj letne prirastne plasti (razlike med ranim in kasnim lesom) (Wassenberg in sod., 2014; Wassenberg in sod., 2015). Tudi pri tej metodi se vrednost gostote ocenjuje posredno prek zveze (korelacije) med LRDK in gostoto lesa. Podatki visokofrekvenčne denzitometrije so ključni pri dendroklimatoloških raziskavah za ocenjevanje vpliva okoljskih dejavnikov na gostoto lesa v letnih prirastkih (van der Maaten in sod., 2012; van der Maaten-Theunissen in sod., 2013).

2.5 Določanje gostote lesa na podlagi rentgenskih žarkov

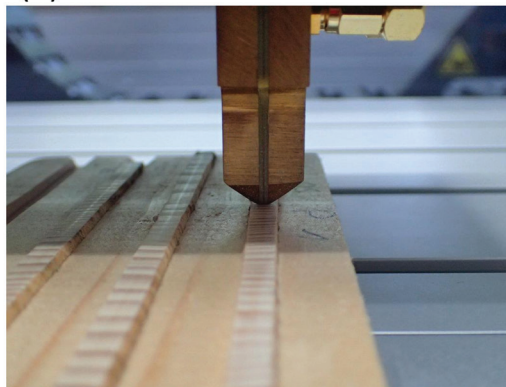
2.5 Determination of wood density on the basis of x-rays

Denzitometrično določevanje variabilnosti gostote v vzorcu lesa poteka tudi z različnimi metodami, ki te-

(a)



(b)



Slika 4: Določanje gostote lesa na podlagi visokofrekvenčne denzitometrije (a), in vzporedno postavljene elektrodi na konici jeklenega cilindra, prek katerega potekajo meritve gostote lesa (b) (Arbortools, 2017; TUM, 2018)

Fig. 4: Determination of wood density on the basis of high-frequency densitometry (a) and parallel electrodes placed on the tip of a steel cylinder through which wood density measurements are made (b) (Arbortools, 2017; TUM, 2018)

meljijo na merjenju absorpcije različnih oblik radiacije (ionizirajočega sevanja), t.j. rentgenskih- (Lindgren, 1991), gama- (Macedo in sod., 2002) ali beta žarkov (Cameron in sod., 1959). V nadaljevanju predstavljamo danes največkrat uporabljeni način določanja z rentgenskimi žarki (Jacquin in sod., 2017).

Rentgenska radiografija (ang. X-ray radiography) je metoda prek katere pridobimo projekcijo objekta na podlagi prehajanja rentgenskih žarkov skozi objekt. Prek digitalnega detektorja se ustvari slika z različno intenzivnostjo sivin. Njena intenzivnost je odvisna od kemijske sestave, atomskega števila ter količine atomov, ki so se pojavili na poti rentgenskega žarka, med oddajnikom in detektorjem. Izračun temelji na Beer-Lambertovem zakonu, po katerem je razlika med količino oddanih in sprejetih rentgenskih žarkov odvisna od absorpcijskega koeficienta, dolžine poti rentgenskih žarkov skozi vzorec ter gostote lesa (Lindgren, 1991; Bergsten in sod., 2001). Pri lesu sta anatomski sestava in absorpcijski koeficient znotraj iste vrste razmeroma konstantna, posledično so intenzitete sivin rentgenske radiografije ob konstantni debelini vzorca bolj ali manj odvisne od gostote (Lindgren, 1991; Bergsten in sod., 2001; Jacquin in sod., 2017).

Računalniška tomografija ponazarja metodo določanja gostote lesa, pri kateri prek hkratne uporabe več rentgenov z različnih zornih kotov ali vrtečega se rentgena in detektorja okoli vzorca pridobimo (1) 2D projekcijo preseka objekta na natančno določeni točki, ali (2) 3D projekcijo celotnega objekta. Vrednosti gostote lesa se določajo na enak način kot pri rentgenski radiografiji, tj. na podlagi razlike med oddano in sprejeto količino rentgenskih žarkov, absorpcijskim koeficientom materiala ter dolžino prehoda rentgenskih žarkov

skozi vzorec. Projekcija gostot v 2D oz. 3D prostoru je rezultat preseka rentgenskega snemanja z različnih zornih kotov (Lindgren, 1991; Jacobs in sod., 1995; Jacquin in sod., 2017).

Rentgenska radiografija za vzorce dolžine 10 cm in širine 2 cm traja nekaj minut, medtem ko tomografija potrebuje zgolj nekaj sekund zaradi uporabe večjega števila rentgenskih senzorjev. Resolucija določanja gostote je pri obeh med 0,4 in 200 μm , pri čemer so rentgenske naprave z najboljšo resolucijo večinoma namenjene medicini (Jacquin in sod., 2017).

Določanje gostot lesa na podlagi rentgenskih žarkov zaradi zelo visoke natančnosti določanja gostot se uporablja tudi kot referenčna metoda za umerjanje drugih pristopov določanja gostote lesa znotraj bravnice, tj. visokofrekvenčne denzitometrije (Schinker in sod., 2003) in merilnikov mehanske odpornosti med vrtnanjem v les (Rinn in sod., 1996). Prednost omenjene metode je poleg natančnosti določanja gostote tudi možnost ovrednotenja lesno anatomskih posebnosti (Evans in sod., 2000). Metoda določanja gostote lesa na podlagi rentgenskih žarkov je bistveno dražja od drugih metod. Na področju lesarstva in gozdarstva se tehnologijo rentgenskih žarkov uporablja za določanje kakovosti lesa, dendro-klimatologijo ter za določanje gostote lesnih kompozitov (Jacquin in sod., 2017).

2.6 Ocena gostote lesa z infrardečo spektroskopijo in mikrovalovi

2.6 Wood density evaluation with infrared spectroscopy and microwaves

V industriji sta, poleg zgoraj naštetih, za določanje gostote potencialno uporabni še infrardeča spektro-

skopija (IR spektroskopija) in metoda z uporabo mikrovalov.

IR spektroskopska tehnika (ang. near infrared spectroscopy - NIRS) se v splošnem uporablja za analizo različnih materialov, kot so kmetijski proizvodi, polimeri, farmacevtski proizvodi, tekstil in nenazadnje tudi les (Tsuchikawa in Kobori, 2015). NIRS omogoča hitro določanje nekaterih kemijskih in fizikalnih lastnosti in temelji na merjenju absorpcije infrardečega sevanja ob različnih valovnih dolžinah (Tsuchikawa in Kobori, 2015). Glede na kemijsko sestavo vzorca se ob izpostavljenosti sevanju določeni deli IR spektra absorbirajo, preostanek infrardečega spektra pa se zabeleži na detektorju. Na podlagi analize absorbiranega dela IR-valovanja se določi delež lignina, ogljikovih hidratov, proteinov, lipidov ter drugih komponent (Nuopponen in sod., 2006). Metoda se na področju rabe lesa večinoma uporablja pri: (1) analizah kemijske sestave lesa, (2) ugotavljanju razkroja lesa zaradi fizikalnih, kemijskih ali mikrobioloških vplivov, (3) analizah lastnosti lesnih vlaken, (4) analizah mehanskih lastnosti lesa, (5) analizah donosa celuloze v papirništvu, (6) napovedovanju donosov pri biorafinerizaciji lesa, ter drugo (Naumann in sod., 2007; Tsuchikawa in Kobori, 2015). Metoda je posredno uporabna tudi za določanje gostote lesa. Le ta se določa s pomočjo kemometrije (ang. chemometrics), in sicer na podlagi zveze med gostoto in glavnimi tremi kemičnimi komponentami lesa (lignin, celuloza in hemiceluloza) (Via in sod., 2005; Tsuchikawa in Kobori, 2015). Vrednosti modelirane gostote kažejo na visoko korelacijo z dejanskimi vrednostmi gostote lesa v absolutno suhem stanju ($R^2 =$ med 0,7 in 0,95) (Via in sod., 2005; Nuopponen in sod., 2006; Tsuchikawa in Kobori, 2015). Uporaba tehnologije NIRS v zadnjih desetletjih narašča predvsem na področju učinkovite predelave lesa (Tsuchikawa in Kobori, 2015).

Določanje gostote lesa z mikrovalovi temelji na merjenju zmanjšanja jakosti elektromagnetnega valovanja pri prehajanju mikrovalov skozi vzorec lesa (Aichholzer in sod., 2013). Naprava je sestavljena iz oddajnika in sprejemnika mikrovalovnega signala, vezanih na vektorski analizator omrežja, med katera postavimo vzorec lesa. Gostota lesa se izračuna na podlagi spremembe jakosti mikrovalov med oddajnikom in sprejemnikom, širino vzorca, anatomsko orinetacijo vzorca lesa ter dielektričnimi lastnostmi lesa, ki so vrstno specifične (Torgovnikov, 1993; Aichholzer in sod., 2013; Aichholzer in sod., 2017;). Naprava omogoča ocenjevanje gostote lesa le na ravni celotnega vzorca, uporablja pa se tudi za določanje vsebnosti vode (Aichholzer in sod., 2013).

3 POMEN GOSTOTE LESA V RAZVOJU GOZDNO-LESNEGA BIOGOSPODARSTVA

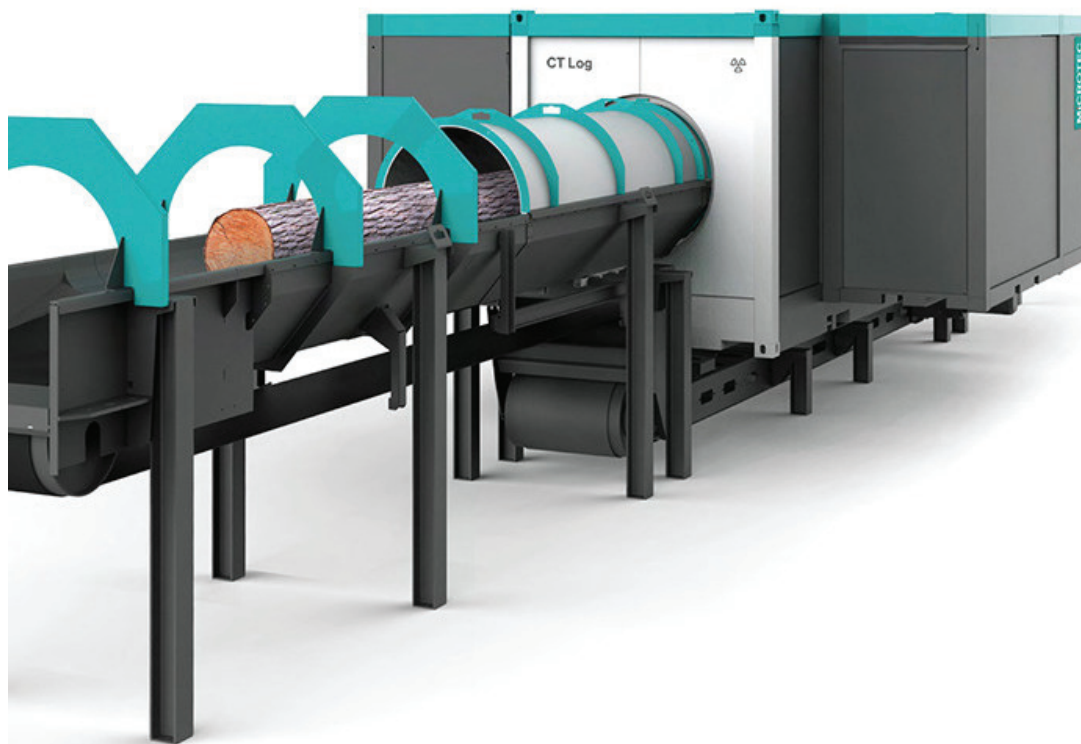
3 THE IMPORTANCE OF WOOD DENSITY IN THE DEVELOPMENT OF THE FOREST-BASED BIOECONOMY

Smernice za razvoj evropskega gozdarskega in lesno predelovalnega sektorja spodbujajo optimizacijo proizvodnih procesov, ki bodo skladni z načeli kaskadne rabe virov in krožnega biogospodarstva (Carus in Dammer, 2018; Hurmekoski in sod., 2018a). Za učinkovito izrabo lesa glede na njegovo kakovost je ključen podatek o gostoti lesa ter njeni prostorski variabilnosti (Ross, 2010). Gostota lesa je namreč v tesni korelaciji tako z modulom elastičnosti lesa kot tudi z njegovo upogibno trdnostjo in posledično kaže na lastnosti in uporabnost lesa tako v lesno predelovalni industriji kot tudi gradbeništvu (Hurmekoski in sod., 2018b; Krajnc in sod., 2019).

V kontekstu učinkovitosti izrabe ali proizvodnje v žagarski industriji je gostota lesa tudi ena izmed lastnosti, ki jih merijo s sodobnimi napravami za rentgensko snemanje žaganih elementov ali hlodov (Microtec, 2019). Poleg gostote zajemajo tudi (1) prisotnost in lokacijo stržena, (2) grče, (3) razpoke, (4) smolne žepe, (5) prisotnost razkrojenega lesa, (6) jedrovino, (7) reakcijski les, ter (8) morebitne tujke v lesu, in drugo. Podatki o gostoti žaganih elementov se uporabljajo pri razvrščanju v kakovostne razrede, računalniška tomografija hlodov služi kot osnova za algoritme računalniškega krojenja hlodov na primarne lesne proizvode (Microtec, 2019). Metoda omogoča optimizacijo razreza hlodovine z izkoristki, višjimi od 11 % (v primeru lesa boljše kakovosti), do 25 % (pri lesu slabše kakovosti) (Stängle in sod., 2014; Breinig in sod., 2015).

Gostota lesa se tudi v papirni industriji pojavlja kot kazalnik donosa celuloze (Lönnerberg, 2009), pri čemer se pojavljajo različni podatki o uporabnosti te metode v primeru iglavcev in listavcev. V primeru iglavcev osnovna gostota lesa močno korelira z donosom v papirniški industriji ($r > 0,8$) (Cown in McConchie, 1980; Lönnerberg, 2009), obenem ta povezava v primeru listavcev ni značilna (Costa e Silva in sod., 2008; Santos in sod., 2012).

V povezavi z nadgradnjami papirniške industrije v prihodnosti je les tudi obnovljiv vir za proizvodnjo biopolimernih materialov, kot so biokemikalije, bioplastika, biogoriva, biotekstil in drugo (de Jong in sod., 2012; Alam in Christopher, 2017; Hurmekoski in sod., 2018a). Proizvodnja teh v prvi fazi temelji na kemijskem razklopu lesa v biorafinerijah, kjer les razgradijo na osnovne gradnike (celulozo, hemicelulozo in lignin)



Slika 5: CT Log, naprava za rentgensko snemanje hlovov z modulom optimizacije razreza hlovovine in s tem povečanjem učinkovitosti izrabe lesa (Microtec, 2019)

(de Jong in sod., 2012). Iz celuloze v nadaljevanju prek encimatske hidrolize pridobivajo glukozo. Glukozo lahko v postopkih fermentacije pretvorijo v biopolimerne materiale (Kitak, 2015). Odnosi med gostoto lesa in donosom celulozne pulpe se glede na študije v tujini razlikujejo. Panayotov in sod. (2016) v svoji raziskavi klonov robinije (*Robinia pseudoacacia* L.) poudarjajo, da imajo kloni z nižjimi gostotami lesa višji donos celuloze, medtem ko Raymond in Schimleck (2002) v raziskavi evkaliptusa (*Eucalyptus globulus* Labill.) nista našla značilnih povezav med gostoto in vsebnostjo celuloze. Podobno so za trepetliko (*Populus tremuloides* Michx.) dokazali tudi Mansfield in Weineisen (2007), kjer opozarjajo, da je donos celulozne pulpe bolj kot od gostote lesa odvisen od vsebnosti lignina. Torej, gostota kot kazalnik kemijske strukture lesa in kazalnik potenciala v biorafinerijski industriji velja le za nekatere drevesne vrste (Cown in McConchie, 1980; Raymond in Schimleck, 2002; Mansfield in Weineisen, 2007; Panayotov in sod., 2016).

Ključno vlogo gostota lesa opravlja v primeru rabe lesa v energetske namene, kjer je donos oz. pridobljena energija poleg gostote odvisna predvsem od kalorične vrednosti lesa. Kalorične vrednosti (ang. high heating value) pogostejših drevesnih vrst v Sloveniji so za bukev 19–20, smreko 20–20,5, bor 21,5–22 in hrast 19–

Fig. 5: CT Log, a device for X-ray scanning of logs with a module for optimizing the sawing of logs and thus increasing the efficiency of wood utilization (Microtec, 2019)

19,5 MJ/kg (Demirbaş in Demirbaş, 2004; Nhuchhen in Abdul Salam, 2012). O upoštevanju njihovih povprečnih gostot v absolutno suhem stanju, in sicer za bukev 680 kg/m³, hrast 720 kg/m³, smreko 410 kg/m³ in bor 460 kg/m³, je donos energije glede na volumen višji pri vrstah z višjo gostoto (Ross, 2010).

Gostota lesa je ključen podatek v modernem gradbeništvu, saj je dober kazalec za druge lastnosti, kot so trdnost, trdota in elastičnost (Ramage in sod., 2017). V nekaterih državah je s sprostitvijo administrativnih ovir za uporabo v gradnjah večnadstropnih objektov les postal eden pomembnejših konstrukcijskih materialov (Toppinen in sod., 2018). Razmerja med modulom elastičnosti in trdnostjo na enoto mase predstavljajo mnoge možnosti za uporabo lesa v gradbeništvu. Z razvojem novih tehnologij, predvsem na področju gradbenih kompozitov (tj. križno lepljen les, lameliran lepljen les, slojnat furnirni les, leseni I nosilci, zgoščevanje lesa), bo postalo učinkovito določanje/ocenjevanje lastnosti in posledično kakovosti lesa še bolj pomembno (Ramage in sod., 2017).

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Gostota lesa je ključna lastnost, ki omogoča načrtovanje smotrne rabe lesa kot materiala v različnih panogah od gradbeništvu do biorafinerijske in ener-

getske industrije (Cown in McConchie, 1980; Demirbaş in Demirbaş, 2004; Krajnc in sod., 2019). Hkrati se uporablja tudi kot kazalnik drugih lastnosti lesa (mehanika trdnost, modul elastičnosti, anatomija lesa) in s tem predstavlja pomembno področje, ki vpliva na razvoj gozdno lesnega biogospodarstva tako v Sloveniji kot tudi drugod po svetu. Gostota lesa se lahko meri/ocenjuje na več različnih načinov, najosnovnejši način predstavlja volumetrični način določanja (piknometar), sledijo hitre/učinkovite metode, prek katerih lahko sklepamo o gostotah (penetrometar, rezistograf), in nazadnje tehnološko bolj razvite ter dražje metode (visokofrekvenčna denzitometrija, rentgenska denzitometrija, IR-spectroscopija in uporaba mikrovalov). Zbiranje podatkov o gostoti bo omogočalo učinkovito usmerjanje surovine med klasičnimi področji rabe lesa (gozdarstvo, lesarstvo, papirništvo) in novimi področji rabe (biorafinerije, tekstilna industrija, kemijska industrija, in druge) (Trung in Leblon, 2011; Karp in sod., 2015, Kumar in sod., 2020).

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Wood density is a physical property of wood that is relatively easy to measure and correlates relatively well with many other wood properties. Wood density is therefore often used to assess the use of wood in the wood processing, construction and energy industries (Gorišek in sod., 2009; Ross, 2010; Nhuchhen in Abdul Salam, 2012). Due to the strong correlation between wood density and moisture content, different expressions of wood density are common: (1) density at a given moisture content, (2) density of oven-dried wood, (3) nominal density, (4) basic density and (5) specific gravity (Gorišek in sod., 2009; ISO -13061-2, 2014). Wood density can be determined volumetrically by measuring the mass and volume of wood at certain moisture contents (ISO -13061-2, 2014). Indirect methods are also used in forestry and the wood processing industry to estimate wood density. The wood density of standing trees can be determined with a penetrometer or resistograph, but these methods suffer from lower accuracy and lower comparability with volumetric methods. The intra- and inter-annual variability of wood density can be determined with high-frequency densitometry and X-rays. These methods have high accuracy, but their operation costs are high. While near-infrared spectroscopy and microwaves are mostly used for other purposes (i.e. to determine the chemical composition of wood, wood decay, moisture content), they can also be used to determine wood density.

The development of the bioeconomy in the future is based on the efficient and intelligent use of wood as renewable raw material. Information about its properties, such as density, will enable more efficient use and production in traditional industries (Trung in Leblon, 2011; Kumar in sod., 2020). Furthermore, it will also enable the entry of wood as a raw material into a much broader field of application (pharmaceuticals, textile industry, biorefinery) (Hurmekoski in sod., 2018a).

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENTS

Delo je bilo financirano s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), programa Gozdna biologija, ekologija in tehnologija P4-0107, program za usposabljanje mladih raziskovalcev (Domen Arnič) ter projekta J4-2541 in V4-2017.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Aichholzer A., Arthaber H., Schuberth C., Mayer H. 2013. Non-destructive evaluation of grain angle, moisture content and density of spruce with microwaves. *European Journal of Wood and Wood products*, 71, 6: 779–786.
- Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H., Arthaber H. 2017. Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz. *European Journal of Wood and Wood products*, 76, 1: 89–103.
- Alam M.N., Christopher L.P. 2017. A novel, cost-effective and eco-friendly method for preparation of textile fibers from cellulosic pulps. *Carbohydrate Polymers*, 173: 253–258.
- Arbortools. 2017. Lignostation. <https://www.arbortools/product/lignostation/> (1. 10. 2020)
- Barnett J.R., Jeronimidis G. 2003. *Wood quality and its biological basis*. Oxford (UK), Blackwell Publishing: 225 str.
- Bergès L., Nepveu G., Franc A. 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, 255, 3: 567–579.
- Bergsten U., Lindeberg J., Rindby A., Evans R. 2001. Batch measurements of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensitometry. *Wood Science and Technology*, 35, 5: 435–452.
- Bouriaud O., Bréda N., Le Moguédec G., Nepveu G. 2004. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees*, 18, 3: 264–276.
- Bouriaud O., Leban J.-M., Bert D., Deleuze C. 2005. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, 25, 6: 651–660.
- Breinig L., Broman O., Brüchert F., Becker G. 2015. Optimization potential for perception-oriented appearance classification by simulated sawing of computed tomography-scanned logs of Norway spruce. *Wood Material Science & Engineering*, 10, 4: 319–334.
- Brewer C.E., Chuang V.J., Masiello C.A., Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L.E., Panzacchi P., Zygourakis K., Davies C.A. 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66: 176–185.
- Cameron J.F., Berry P.F., Phillips E.W.J. 1959. The determination of wood density using beta rays. *Holzforschung*, 13, 3: 78–84.

- Carus M., Dammer L. 2018. The circular bioeconomy - concepts, opportunities, and limitations. *Industrial Biotechnology*, 14, 2: 83–91.
- Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E. 2001. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Materials and Structures*, 34, 1: 59–64.
- Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S.L., Swenson N.G., Zanne A.E. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12, 4: 351–66.
- Chen Z.-Q., Karlsson B., Lundqvist S.-O., García Gil M.R., Olsson L., Wu H.X. 2015. Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Annals of Forest Science*, 72, 4: 499–508.
- Costa e Silva J., Borralho N.M.G., Araújo J.A., Vaillancourt R.E., Potts B.M. 2008. Genetic parameters for growth, wood density and pulp yield in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes*, 5, 2: 291–305.
- Cown D.J., McConchie D.L. 1980. Wood property variations in an old-crop stand of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 10, 3: 508–520.
- Čufar K., Gorišek Ž., Merela M., Kropivšek J., Gornik Bučar D., Straže A. 2017. Lastnosti bukovine in njena raba. *Les*, 1: 27–39.
- de Jong E., Higson A., Walsh P., Wellisch M. 2012. Bio-based chemicals value added products from biorefineries. Wageningen, Netherlands, IEA Bioenergy: 36 str.
- Demirbağ A., Demirbağ A.H. 2004. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 22, 2: 135–143.
- Dutilleul P., Herman M., Avella-Shaw T. 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 1: 56–68.
- Evans R., Stringer S., Kibblewhite R.P. 2000. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita Journal*, 53: 450–457.
- Fundova I., Funda T., Wu H.X. 2018. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using resistograph and Pilodyn. *PLoS One*, 13, 9: 1–16.
- Gao S., Wang X., Wiemann M.C., Brashaw B.K., Ross R.J., Wang L. 2017. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 74, 2: 1–13.
- Gorišek Ž., Oven P., Čufar K. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Hurmekoski E., Jonsson R., Korhonen J., Jänis J., Mäkinen M., Leskinen P., Hetemäki L. 2018a. Diversification of the forest industries: role of new wood-based products. *Canadian Journal of Forest Research*, 48, 12: 1417–1432.
- Hurmekoski E., Pykäläinen J., Hetemäki L. 2018b. Long-term targets for green building: explorative Delphi backcasting study on wood-frame multi-story construction in Finland. *Journal of Cleaner Production*, 172: 3644–3654.
- ISO-13061-2. 2014. Physical and mechanical properties of wood - test methods for small wood specimens Part 2: determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, ISO copyright Office.
- Jacobs P., Sevens E., Kunnen M. 1995. Principles of computerised X-ray tomography and applications to building materials. *Science of The Total Environment*, 167, 1: 161–170.
- Jacquin P., Longuetaud F., Leban J.-M., Mothe F. 2017. X-ray microdensitometry of wood: a review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*, 42: 42–50.
- Jyske T., Mäkinen H., Saranpää P. 2008. Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica*, 42, 3: 439–455.
- Karp A., Beale M.H., Beaudoin F., Eastmond P.J., Neal A.L., Shield I.F., Townsend B.J., Dobermann A. 2015. Growing innovations for the bioeconomy. *Nature Plants*, 1, 12: 1–3.
- Kitak M. 2015. Encimska razgradnja odpadnega mulja papirne industrije: magistrsko delo. (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo). Maribor, samozaložba: 42 str.
- Krajnc L., Farrelly N., Harte A.M. 2019. Relationships between wood properties of small clear specimens and structural-sized boards in three softwood species. *Holzforchung*, 73, 11: 987–996.
- Kumar A., Adamopoulos S., Jones D., Amiandamhen S.O. 2020. Forest biomass availability and utilization potential in Sweden: a review. *Waste and Biomass Valorization*, 12: 65–80.
- Lindgren L.O. 1991. Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density. *Wood Science and Technology*, 25, 5: 341–349.
- Llana D.F., Hermoso E., Bobadilla I., Iñiguez-Gonzalez G. 2018. Influence of moisture content on the results of penetration and withdrawal resistance measurements on softwoods. *Holzforchung*, 72, 7: 549–555.
- Lönnberg B. 2009. Mechanical pulping. Helsinki, Paperi ja Puu Oy: 549 str.
- Macedo A., Vaz C.M.P., Pereira J.C.D., Naime J.M., Cruvinel P.E., Crestana S. 2002. Wood density determination by X- and gamma-ray tomography. *Holzforchung*, 56, 5: 535–540.
- Mäkinen H., Saranpää P., Linder S. 2002. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 2: 185–194.
- Mäkipää R., Linkosalo T. 2011. A non-destructive field method for measuring wood density of decaying logs. *Silva Fennica*, 45, 5: 1135–1142.
- Mansfield S.D., Weineisen H. 2007. Wood fiber quality and kraft pulping efficiencies of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) clones. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 27, 3–4: 135–151.
- Martinčič A. 2010. Variabilnost gostote lesa debla, vej in korenin jelk s snežniškega območja: diplomsko delo - visokošolski strokovni študij. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za lesarstvo). Ljubljana, samozaložba: 48 str.
- Meyer L., Brischke C. 2015. Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103: 23–29.
- Micko M.M., Wang E.I.C., Taylor F.W., Yanchuk A.D. 1982. Determination of wood specific gravity in standing white spruce using a Pilodyn tester. *The Forestry Chronicle*, 58, 4: 178–180.
- Micrometrics. 2014. AccuPyc II 1340 - Gas displacement pycnometry system. Norcross, USA, Micrometrics: 6 str.
- Micrometrics. 2016. GeoPyc - 1365 Enevelope density analyser. Norcross, USA, Micrometrics: 4str.
- Microtec. 2019. CT Log: computed tomography for the sawmill of the future. <https://microtec.eu/assets/products/ctlog/MT-CT-Log.pdf> (1. 10. 2020)
- Naumann A., Peddireddi S., Kües U., Polle A. 2007. Fourier transform infrared microscopy in wood analysis. V: Wood production, wood technology, and biotechnological impacts. Kües U. (ur.). Göttingen, Universiti of Göttingen: 179–196.
- Nhuchhen D.R., Abdul Salam P. 2012. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: a new approach. *Fuel*, 99: 55–63.
- Nuopponen M.H., Birch G.M., Sykes R.J., Lee S.J., Stewart D. 2006. Estimation of wood density and chemical composition by means of diffuse reflectance mid-infrared fourier transform (DRIFT-MIR) spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 1: 34–40.
- Oliveira J.T.d.S., Wang X., Vidaurre G.B. 2017. Assessing specific gravity of young *Eucalyptus* plantation trees using a resistance drilling technique. *Holzforchung*, 71, 2: 137–145.

- Panayotov P., Valchev I., Kalmukov K., Panayotov M., Petrin S., Yavorov N. 2016. Black locust wood - perspective raw material for production of chemical pulp and glucose. *Forestry Ideas*, 21, 2: 307–316.
- Patten A.M., Vassão D.G., Wolcott M.P., Davin L.B., Lewis N.G. 2010. Trees: a remarkable biochemical bounty. V: Comprehensive natural products II. Liu H.-W., Mander L. (ur.). Oxford, Elsevier: 1173–1296.
- Plötze M., Niemz P. 2010. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. *European Journal of Wood and Wood products*, 69, 4: 649–657.
- Preston K.A., Cornwell W.K., Denoyer J.L. 2006. Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. *New Phytologist*, 170, 4: 807–818.
- Ramage M.H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P.F., Scherman O. 2017. The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68: 333–359.
- Raymond C.A., Schimleck L.R. 2002. Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 1: 170–176.
- Rinn F. 2012. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie*, 53, 3: 24–29.
- Rinn F., Schweingruber F.-H., Schär E. 1996. Resistograph and X-ray density charts of wood. Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, 50, 4: 303–311.
- Ross R.J. 2010. Wood handbook: wood as an engineering material. Centennial ed. (General technical report FPL:GTR-190). Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 508 str.
- Ross R.J. 2015. Nondestructive evaluation of wood. 2nd ed. (General Technical Report FPL-GTR-238). Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 169 str.
- Santos A., Anjos O., Amaral M.E., Gil N., Pereira H., Simões R. 2012. Influence on pulping yield and pulp properties of wood density of *Acacia melanoxylon*. *Journal of Wood Science*, 58, 6: 479–486.
- Schinker M.G., Hansen N., Spiecker H. 2003. High-frequency densitometry—a new method for the rapid evaluation of wood density variations. *IAWA Journal*, 24, 3: 231–239.
- Sharapov E., Brischke C., Miltitz H., Smirnova E. 2019. Prediction of modulus of elasticity in static bending and density of wood at different moisture contents and feed rates by drilling resistance measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 5: 833–842.
- Stängle S.M., Brüchert F., Heikkilä A., Usenius T., Usenius A., Sauter U.H. 2014. Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. *Annals of Forest Science*, 72, 1: 57–65.
- Tony F., Thibaut F., Guillaume G., Julie B., Robert S. 2019. Modelling wood density and modulus of elasticity in white spruce plantations in Eastern Québec. *The Forestry Chronicle*, 95, 3: 196–206.
- Toppinen A., Röhr A., Pätäri S., Lähtinen K., Toivonen R. 2018. The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy - a Delphi study from Finland and Sweden. *Journal of Forest Economics*, 31: 3–10.
- Torelli N. 1998. Gostota in relativna gostota lesa. *Les*, 50, 3: 52–54.
- Torgovnikov G. 1993. Dielectric properties of wood and wood-based materials. Berlin, Springer: 196 str.
- Trung T., Leblon B. 2011. The role of sensors in the new forest products industry and forest bioeconomy. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 11: 2097–2099.
- Tsuchikawa S., Kobori H. 2015. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61, 3: 213–220.
- TUM. 2018. Technical University of Munich: The Hearth of Li- gnostation. <https://www.tum.de/en/studies/studineews/issue-062016/show/article/34896/> (1. 10. 2020)
- van der Maaten-Theunissen M., Boden S., van der Maaten E. 2013. Wood density variations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) under contrasting climate conditions in southwestern Germany. *Annals of Forest Research*, 56, 1: 91–103.
- van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Spiecker H. 2012. Temporally resolved intra-annual wood density variations in European beech (*Fagus sylvatica* L.) as affected by climate and aspect. *Annals of Forest Research*, 55, 1: 113–124.
- Via B., So C.L., Shupe T., Stine M., Groom L. 2005. Ability of near infrared spectroscopy to monitor air-dry density distribution and variation of wood. *Wood and Fiber Science*, 37: 394–402.
- Walker J.C.F. 2006. Primary wood processing. 2nd ed. Dordrecht, Springer: 596 str.
- Wang X., Allison R.B. 2008. Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34, 1: 1–4.
- Wassenberg M., Montwé D., Kahle H.-P., Spiecker H. 2014. Exploring high frequency densitometry calibration functions for different tree species. *Dendrochronologia*, 32, 3: 273–281.
- Wassenberg M., Schinker M., Spiecker H. 2015. Technical aspects of applying high frequency densitometry: probe-sample contact, sample surface preparation and integration width of different dielectric probes. *Dendrochronologia*, 34: 10–18.
- Wu S.-j., Xu J.-m., Li G.-y., Risto V., Lu Z.-h., Li B.-q., Wang W. 2010. Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 21, 1: 68–72.
- Zelenka T., Slovák V., Lhotka M., Hotová G. 2019. Alternative determination of the skeletal density of solids using a manometric gas physisorption apparatus: a systematic and methodological study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 290: 1–7.
- Zelinka S.L., Glass S.V., Jakes J.E., Stone D.S. 2015. A solution thermodynamics definition of the fiber saturation point and the derivation of a wood-water phase (state) diagram. *Wood Science and Technology*, 50, 3: 443–462.
- Zhang S.Y. 1997. Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: implications in dendroclimatology. *Wood Science and Technology*, 31, 1: 63–72.

