

OVISNOST GUSTOĆE[®] PROSTORNOG DRVA NEKIH AUTOKTONIH VRSTA DRVEĆA O RAZDOBLJU PRIRODNOG SUŠENJA

THE DEPENDENCE OF STOCKWOOD DENSITY OF SOME AUTOCHTHONOUS TREES ON THE PERIOD OF NATURAL DRYING

Juraj ZELIĆ*, Krešimir MEĐUGORAC**

SAŽETAK: Prostorno drvo (ogrijev, celulozno drvo, drvo za kemijsku preradu, sitno tehničko drvo) se u šumarstvo zaprima, evidentira i knjiži u materijalnim evidencijama u volumnoj mjeri (m^3 , prm). U komercijalnom poslovanju realizira se osim volumne mjere po gustoći.

U praksi dolazi do vremenskog pomaka između sječe i izrade i realizacije prostornog drva te veće ili manje razlike u finansijskom rezultatu.

Osim razlike u finansijskom rezultatu, nerijetko se događa da se u šumarskoj materijalnoj evidenciji drvnih sortimenata obavlja retrogradno zaduživanje ili razduživanje mesta sječe i izrade (šuma) ili skladišta drvnog materijala po "odvagi", a da se nije prilikom preračunavanja uzeo faktor gubljenja (sušenja) na volumnoj masi u ovisnosti o vremenu prirodnog sušenja.

U radu se utvrđuju promjene na gustoći prostornog drveta nekih autoktonih vrsta drveća (hrast kitnjak, bukva, grab, breza bijela topola) različitih dužina, u ovisnosti s dužinom trajanja prirodnog sušenja.

Mjerenja tijekom zime, proljeća i ljeta, 140 dana sušenja u prirodnim okolišnim uvjetima, obrađena su matematičko-statističkom metodom. Matematičke funkcije su eksponencijalnog (logaritamskog) oblika.

Izravnati podaci prezentirani su odgovarajućim grafikonima.

Također je statističko-matematičkom metodom (analiza varijance, F – test, t – test, test homogenosti) utvrđena signifikantnost razlike između ponasanja ispitivanog obilježja (opadanje gustoće) između pojedinih dužina sortimenata pojedinih vrsta drveća.

Na temelju mjerenih podataka izračunate su matematičke funkcije, koje se daju u obliku prethodnih informativnih rezultata šumarskoj operativi na verificiranje i daljnje istraživanje.

Ključne riječi: prirodno sušenje prostornog drva, gustoća drva, trend opadanja gustoće drva, dužine sortimenata, razdoblje sušenja.

^{*} U radu je upotrijebljen izraz gustoća prema novom sustavu fizikalnih veličina i mjernih jedinica (vidi, K. Ražnjević, Fizikalne veličine i mjerne jedinice međunarodnog sustava (SI), Nakladni zavod Znanje, Zagreb, 1985.). U svakidašnjoj upotrebi, još uvijek, rabi se pojam volumna težina, odnosno volumna masa.

U Cjeniku glavnih šumske proizvoda, Hrvatske šume, 1997. godine za isti pojam se upotrebljava riječ "gustoća" (glava II, stavak 3.0.), te se npr. određuje da je "gustoća" bukve u svježem stanju ($0,82 - 1,07 - 1,27 \text{ t/m}^3$).

^{**} Mr.sc. Juraj Zelić, dipl. ing. šum., "Hrvatske šume", UŠ Požega, Milke Trnine 2, 34 000 Požega

^{**} Krešimir Medugorac, dipl. ing. šum., "Hrvatske šume", UŠ Požega, Milke Trnine 2, 34 000 Požega

UVODNE NPOMENE – Introduction

Jedno od osnovnih fizikalnih svojstava drva je poroznost, to jest ukupan volumen drva nije popunjeno drvnim tvari nego se sastoji od drvnih stijenki i pora. Pore, a djelomično i stijenke, popunjene su tekućinom (vodom) u kojoj su otopljeni mineralni tvari i produkti asimilacije. Za života stabla porama (traheje, traheide, intermicelarni prostori) obavljaju se ascendentni i descendenti tokovi anorganskih i organskih tvari potrebnih za rast, prirast i razvoj stabla.

Sjećom stabla prestaje funkcija provođenja tekućine u drvu, te se voda u prirodnim uvjetima izlučuje iz drva do određene razine. Naš interes je utvrditi za prostorno drvo nekih autoktonih bjelogoričnih vrsta drveća (ogrijev, celulozno drvo, sitno tehničko drvo) tempo prirodnog sušenja u određenom razdoblju, dakle gubljenje vode od sirovog, provelog, do prosušenog stanja drva u prirodnim uvjetima.

Sadržaj vode u drvu je različit za pojedine vrste drveća, no vrijedi za sve opće pravilo po kojemu je težina sirovog drva veća što je veći udio vode. Voda u drvu može biti **slobodna**, a nalazi se u porama i šupljinama stanica drva, dok se **vezana voda** nalazi u stijenkama drva, intermicelarnim prostorima. **Provelo dryo** izgubi svu slobodnu vodu, a **prosušeno i suho** drvo izgubi slobodnu i dio vezane vode. U odnosu s okolišnim uvjetima i relativnom vlagom zraka, prosušenost oscilira oko **higroskopske ravnoteže drva**.

Sadržaj vode provelog ("stanje zasićenosti žice") drva kreće se od 22-40 % (prosjek 28 %), sadržaj vode u "zrakosuhom" drvu kreće se od 12-18 %, a u "sobosuhom" drvu od 8-12 %. Standardno suho drvo je ono koje je sušeno na umjetan način pri temperaturi od 101 do 105 °C do konstantne mase, a sadržaj vlage mu je oko 0 %.

Granica između slobodne i vezane vode zove se točka zasićenosti žice (vlakanaca).

Gustoća drva je u obrnutom razmjeru s poroznošću drva, to jest što je veća gustoća drva, to je manji volumen pora i obratno.

Zato od gustoće drva valja lučiti **specifičnu gustoću drvene tvari**, koja je za sve vrste drveća približno jednaka (u prosjeku 1,5 g/cm³).

Higroskopska ravnoteža drva ovisi o adsorpciji i desorpciji vezane vode. Vezana voda može biti kao **konstitucijska voda**, koja je u vezi s organskom prirodom staničnih stijenki drva i ne može se odstraniti bez promjene kemijskog sastava drva. Unutar stanične stijenke drva može biti **površinski vezana voda i kapilarno kondenzirana voda**.

Površinski vezana voda vezana je na dio hidroksilnih skupina (OH) lančane molekule celuloze, u obliku filma debljine najmanje jedne molekule, a može se odstraniti fizikalnim putem.

Kapilarno kondenzirana voda smještena je u šupljinicama između kristalita amorfnih područja stanične stijenke. Šupljinice se popunjavaju adsorpcijom vlage kapilarnim silama do razine ravnoteže, s relativnim pritiskom vodene pare u zraku. Kapilarno kondenzirana voda može se također odstraniti fizikalnim putem. Adsorpcija (upijanje vlage iz zraka) zapravo započinje u trenutku kada je sadržaj vode u staničnim stijenkama drva manji od onoga koji odgovara stanju higroskopske ravnoteže. Ako je sadržaj vode u drvu veći od onoga koji odgovara stanju higroskopske ravnoteže, drvo isparuje (desorbira) vodu.

Procesi adsorpcije i desorpcije vode mijenjaju se ovisno o vanjskim uvjetima (vlažnost zraka, zračni pritisak, temperatura, strujanje zraka) te je u skladu s tim gustoća jedinice drva promjenjiva veličina.

Za kretanje vode u drvu ili **difuziju** značajno je da je najjače u smjeru vlakanaca drva, a okomito na taj smjer (radijalno i tangencijalno) znatno manje. Difuzija u smjeru vlakanaca drva je 10 do 15 puta veća u odnosu na okomit smjer vlakanaca. Kod sušenja drva ipak je značajan čimbenik površina izložena sušenju (primjerice, plašt drva dužine jednog metra u odnosu na čone strane istog promjera).

Osim vrste drveća, na gustoću znatno utječu grada drva, dio stabla, stanište, položaj u sastojini, tip šume, starost stabla, kemijski sastav (odnos lignina i celuloze), rano i kasno drvo, širina goda, debљina kore i dr.

U literaturi se za gustoću drva upotrebljava i pojam nominalne gustoće drva, a predstavlja masu apsolutno suhog drva u jedinici sirovog volumena drva. Nominalna gustoća drva je uvijek manja od volumne gustoće standardno suhog drva.

Prirodnim sušenjem prostornog drva gubi se i voda sadržana u kori do prosječno 50 % gustoće kore u sirovom stanju. Gustoća sirove kore je zbog većeg udjela vode veća od istog volumena sirovog drva. Volumen kore, njegovo postotno sudjelovanje u volumenu stabla i tzv. faktor kore različiti su za pojedine vrste drveća. Kora štiti drvo od naglog isušivanja te djeluje kao djelomičan izolator od vanjskih utjecaja.

Budući se prostorno drvo isporučuje volumno i težinski s korom, to je faktor kore od važnog utjecaja na komercijalno poslovanje.

SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA – Research aim

Svrha određivanja gustoće drva u odnosu na vrijeme prirodnog sušenja prostornog drva autoktonih vrsta hrasta kitnjaka, bukve, graba, breze i bijele topole je povezivanje volumne mjere, po kojoj se izrađuju prostorno drvo i težinske mjere, gustoće po kojoj se djelomično obavlja prodaja prostornog drva.

U operativnom šumarstvu se drvo za kemijsku preradu (celulozno drvo) zaprima i evidentira u materijalnom knjigovodstvu po volumenu (m^3 , prm), a uglavnom realizira (prodaje) po masi (t, kg). Od sječe i izrade prostornog drva, u uobičajenoj dužini od 1 m, 2 m i iznad 2 m, do prodaje katkada prođe i po nekoliko mje-

seci. Budući je trgovačkim uzancama i ugovorima između proizvođača prostornog drva i kupca unaprijed utvrđena prosječna masa (gustoća) za jedinicu volumena (npr. 1000 kg/m^3), bez obzira na proteklo vrijeme od sječe do isporuke drva, za proizvođača nastaje "gubitak zbog usuha", ako je to razdoblje duže².

Cilj istraživanja je da se pokuša iznaći metoda i način izračunavanja (matematički model) i za operativnu primjenljive tablice gustoće (kg/m^3) nekih autoktonih vrsta drveća (hrast kitnjak, bukva, grab, breza, bijela topola) u ovisnosti protoka vremena (broja dana) od sirovog, provelog do просушеног drva.

METODA ISTRAŽIVANJA – Research method

Opis rada

Istraživanje je obavljeno na 5 domaćih vrsta drveća: hrast kitnjak, bukva, grab, breza i bijela topola. Sortiment prostornog drva u oblom s korom izrađen je u dužini 20, 100 i 200 cm. Promjer odabranog sortimenta kretao se između 15 i 20 cm.

Volumen izražen u dm^3 izračunat je stereometrijski po formuli valjka ($V = r^2\pi l$), te su mase svakog pojedinog komada preračunate u kg/dm^3 . Zbog operativno prihvatljivije mjere koja se iskazuje u kg/m^3 dobiveni podaci su množeni s 1000.

Za dobivanje veće točnosti volumena komada stereometrijskim putem mjerjen je opseg s korom komada na tri mesta (početku, sredini i kraju) dužine. Točnost mjeri je 1 cm.

Vaganje svakog pojedinog komada po vrsti drva obavljeno je elektronskom vagom točnosti do 0,10 kg. Ritam vaganja određen je ravnomjerno, svakih 7 dana.

Prvo vaganje obavljeno je u sirovom stanju (odmah

nakon sječe i izrade) 1. veljače 2000. godine, a zadnje vaganje nakon 140 dana, 25. srpnja 2000. godine.

Drvni sortimenti iz zimske sječe ostavljeni su pod utjecajem vanjskih uvjeta sve dane mjerjenja, a zahvaćeno je mjerjenjem razdoblje zime, proljeća i ljeta, da-kle različitih vremenskih i temperaturnih uvjeta.

Matematičko-statistička obrada izmjerениh podataka obavljena je u tri smjera:

- Tablice volumnih masa po vrsti drveta, dužini sortimenta i vremenu prirodnog sušenja
- Tablice po izravnatim matematičkim funkcijama (teoretski trendovi prirodnog sušenja prostornog drva, apsolutne i relativne izravnate vrijednosti)
- Signifikantnost razlika ispitivanog obilježja (opadanje volumne mase) u ovisnosti o dužini komada sortimenta (analiza varijance, F – test, t – test, test homogenosti)

Za dobijanje naprijed navedenih ciljeva određena je i potrebna točnost mjerjenja postavljenog pokusa.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA – Research results

a) Tablice gustoće po vrsti drveta, dužini sortimenta i vremenu prirodnog sušenja

Rezultate mjerjenja prikazuju tablice 1. U tablici 1. vidljive su mase mjerjenih komada sortimenta prostornog drveta po vrstama, dani mjerjenja, dimenzije komada i opaske. Zapaža se da je volumna masa (gustoća drva) bila pored ostalog, uvjetovana vremenskim prilikama (kiša, vlaga zraka, temperatura...) te se događalo da je masa komada (gustoća) zbog kiše, odnosno pri-

manja vode bila ponekad veća od težine utvrđene prethodnim vaganjem istog komada.

b) Tablice po izravnatim matematičkim funkcijama (teoretski trendovi prirodnog sušenja prostornog drva, apsolutne i relativne izravnate vrijednosti)

Izravnavanje mjerjenih podataka obavljeno je eksponencijalnom (logaritamskom) matematičkom funkcijom oblika $Y_c = A B^X$ ($\log Y_c = \log A + X \log B$). Iz-

² Cjenik glavnih šumskega proizvoda, "Hrvatske šume", Zagreb, 1997, glava II, stavak 3.0.

erenje gustoće drva za hrast, bukvu, grab, brezu i bijelu topolu
 nsity of stockwood for oak, beech, hombeam, birch and white poplar

ani senja Day	Hrast (oak)			Bukva (beech)			Grab (hombeam)			Breza (birch)			Bijela topola (white poplar)			
	Dužina (cm)			Dužina (cm)			Dužina (cm)			Dužina (cm)			Dužina (cm)			
	20	100	200	20	100	200	20	100	200	20	100	200	20	100	200	
Gustoća - density (kg / m ³)																
2 000 godina																
1	978.67	963.28	995.05	1083.93	1048.18	1079.67	1039.12	1025.31	1059.88	871.34	888.44	853.45	628.61	649.19	65	
7	936.12	938.37	985.85	993.60	1016.23	1075.93	947.44	988.69	1055.47	770.02	880.84	844.80	582.62	630.17	62	
14	936.12	938.37	990.45	933.38	1009.84	1068.46	916.87	983.46	1046.63	770.02	873.25	844.80	597.95	632.89	63	
21	936.12	950.82	1016.51	903.27	990.66	1060.99	855.75	973.00	1053.26	729.49	888.44	850.56	613.28	668.20	65	
28	936.12	946.67	993.52	933.38	984.27	1049.78	855.75	962.53	1022.34	688.96	865.66	830.38	597.95	635.61	64	
35	895.70	930.06	975.12	897.25	965.10	1046.04	855.75	941.61	1017.93	697.07	858.06	827.50	570.35	605.73	62	
42	872.30	917.61	959.79	858.11	933.14	1027.37	794.62	925.92	1000.26	678.83	765.42	815.96	521.29	578.56	62	
49	882.93	930.06	967.45	873.16	913.97	1012.42	825.19	910.22	995.85	682.88	763.90	815.96	544.29	581.28	61	
56	863.79	925.91	967.45	858.11	901.18	997.48	809.90	904.99	987.02	676.81	764.66	801.55	544.29	551.40	61	
63	840.38	892.69	949.05	843.05	894.79	993.74	794.62	889.30	978.18	648.44	762.38	795.78	518.22	551.40	59	
70	829.74	876.09	935.25	837.03	869.23	982.53	773.23	878.84	973.77	624.12	761.63	781.36	472.23	513.37	57	
77	819.11	884.39	939.85	812.94	869.23	975.06	794.62	884.07	956.10	648.44	760.11	778.48	505.96	522.88	59	
84	823.36	867.78	919.92	843.05	850.05	956.38	764.06	852.68	953.89	607.91	751.75	772.72	475.29	499.79	56	
91	808.47	867.78	919.92	828.00	850.05	956.38	764.06	842.22	949.48	607.91	751.75	758.30	459.96	480.78	54	
98	776.56	855.33	906.12	779.82	824.49	911.55	745.72	826.52	934.02	597.78	744.16	729.47	436.96	456.33	52	
05	765.92	851.17	896.92	812.94	818.10	930.23	736.55	821.29	925.19	597.78	736.57	741.00	433.90	448.18	51	
12	744.64	826.26	893.86	752.73	798.92	915.29	696.82	800.37	911.94	577.51	706.19	732.35	410.90	434.60	49	
19	748.90	826.26	878.53	767.78	786.14	900.35	724.33	800.37	900.90	563.33	706.19	729.47	406.30	429.17	49	
26	748.90	822.11	873.93	818.97	773.36	896.61	718.22	784.67	894.28	607.91	691.01	723.70	459.96	423.74	49	
33	744.64	822.11	875.46	812.94	792.53	881.67	733.50	789.91	889.86	597.78	698.60	723.70	452.30	437.32	50	
40	744.64	809.65	863.19	812.94	773.36	889.14	733.50	779.44	885.44	587.65	691.01	715.05	436.96	415.59	48	
	53.54,56	53.54,58	58.62,72	45.46,46	44.44,45	39.41,43	45.45,46	49.49,49	49.52,59	54.56,57	40.41,41	42.43,55	62.62,68	67.68,69	58.	
	54.33	55.00	64.00	45.67	44.33	41.00	45.33	49.00	53.33	55.67	40.67	46.67	64.00	68.00	59	
	17.3025	17.5159	20.382166	14.5446	14.117834	13.0573248	14.43631	15.60509554	16.98408	17.7293	12.952229	14.8631	20.38217	21.6561	18.	
	8.65127	8.75796	10.19108	7.27229	7.05892	6.52866	7.21815	7.80255	8.49204	8.86465	6.47611	7.43153	10.19108	10.828	9.3	
	4.70024	24.0844	65.22293	3.32126	15.64609	26.7675159	3.271989	19.11624204	45.28804	4.93495	13.169179	34.6829	6.522293	36.8153	55	
	00.)	978.67	963.28	995.05	1083.93	1048.19	1079.67	1039.12	1025.31	1059.88	871.34	888.44	853.45	628.61	649.19	65

Tablica 2. Matematičke funkcije izravnatih gustoća drva

Table 2 Equation of density and drying period (days) by logarithm and exponential function

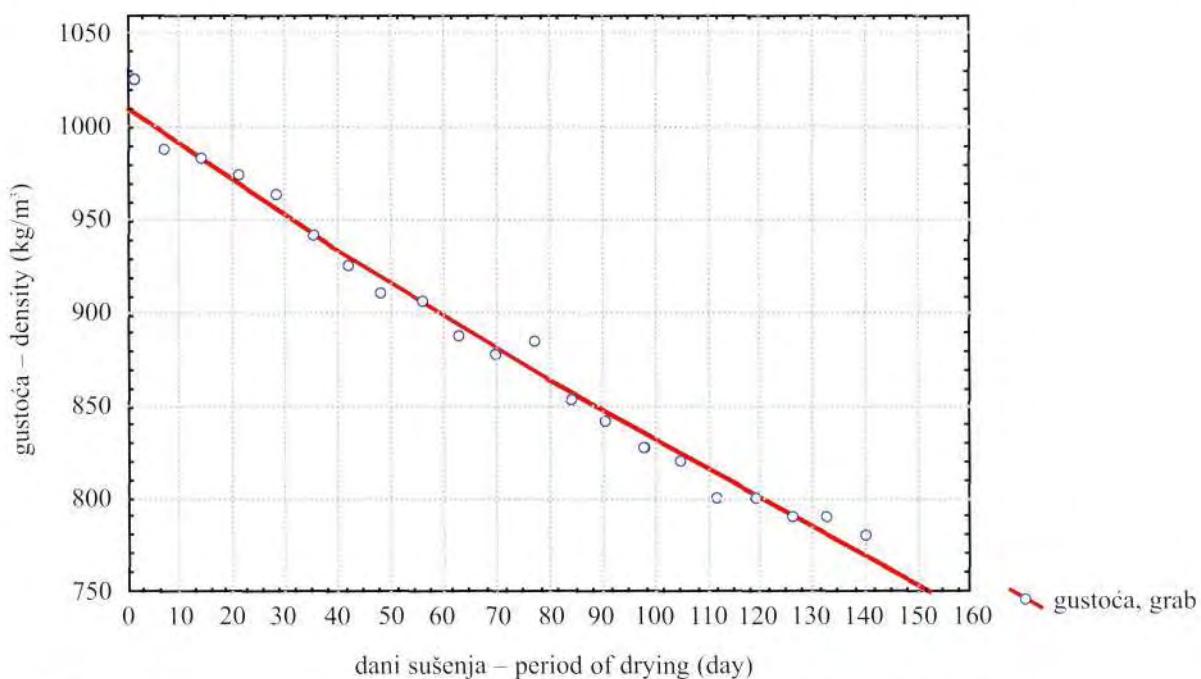
 Y_c = zavisna varijabla (izravnata gustoća drva)

X = nezavisna varijabla (period sušenja – dana)

Vrsta drveta	Dužina cm	Logaritamska funkcija	Eksponencijalna funkcija
hrast kitnjak(oak)	20*	$\log Y_c = 2,98564 - 0,000903 X$	$Y_c = 967,48 * (-1,002081)^X$
	100	$\log Y_c = 2,98664 - 0,000557 X$	$Y_c = 969,71 * (-1,001283)^X$
	200	$\log Y_c = 3,00679 - 0,000498 X$	$Y_c = 1015,76 * (-1,001147)^X$
bukva (beech)	20	$\log Y_c = 2,98554 - 0,000752 X$	$Y_c = 967,25 * (-1,001733)^X$
	100	$\log Y_c = 3,014267 - 0,000965 X$	$Y_c = 1033,38 * (-1,002224)^X$
	200	$\log Y_c = 3,039351 - 0,000691 X$	$Y_c = 1094,84 * (-1,001592)^X$
grab (hornbeam)	20	$\log Y_c = 2,967725 - 0,000926 X$	$Y_c = 928,38 * (-1,002134)^X$
	100	$\log Y_c = 3,004062 - 0,000847 X$	$Y_c = 1009,40 * (-1,001952)^X$
	200	$\log Y_c = 3,029019 - 0,000605 X$	$Y_c = 1069,10 * (-1,001394)^X$
breza (birch)	20	$\log Y_c = 2,889112 - 0,001041 X$	$Y_c = 774,661 * (-1,00240)^X$
	100	$\log Y_c = 2,951336 - 0,000896 X$	$Y_c = 893,99 * (-1,002065)^X$
	200	$\log Y_c = 2,937311 - 0,000621 X$	$Y_c = 865,59 * (-1,001431)^X$
bijela topola (poplar)	20	$\log Y_c = 2,792601 - 0,001295 X$	$Y_c = 625,187 * (-1,00299)^X$
	100	$\log Y_c = 2,835877 - 0,001661 X$	$Y_c = 685,29 * (-1,003832)^X$
	200	$\log Y_c = 2,829672 - 0,001015 X$	$Y_c = 675,57 * (-1,002340)^X$

20* – pored logaritamske, odnosno eksponencijalne funkcije probno, je obavljen izravnjivanje jednadžbom parabole

$$Y_c = 864,90 + 2,59295 X - 0,030891 X^2, \text{ no izravnanje ne odgovara trendu pada težine}$$

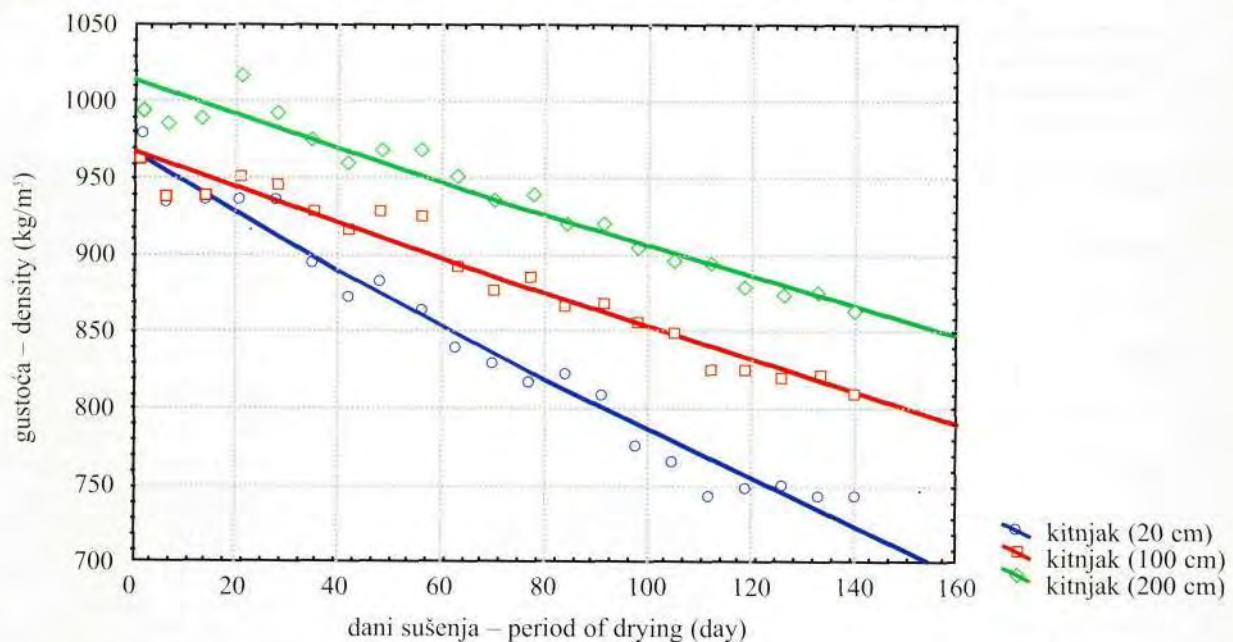
Grafikon 1. Ovisnost gustoće drva graba (100 cm) o danima sušenja. $Y(\text{grab}) = 1009,961 \cdot \exp(-0,002 \cdot x)$

ravnjanje matematičkom funkcijom parabole drugog stupnja nije zadovoljavajuće³. Izravnanje je rađeno i polinomnom funkcijom višeg reda (petog reda), no

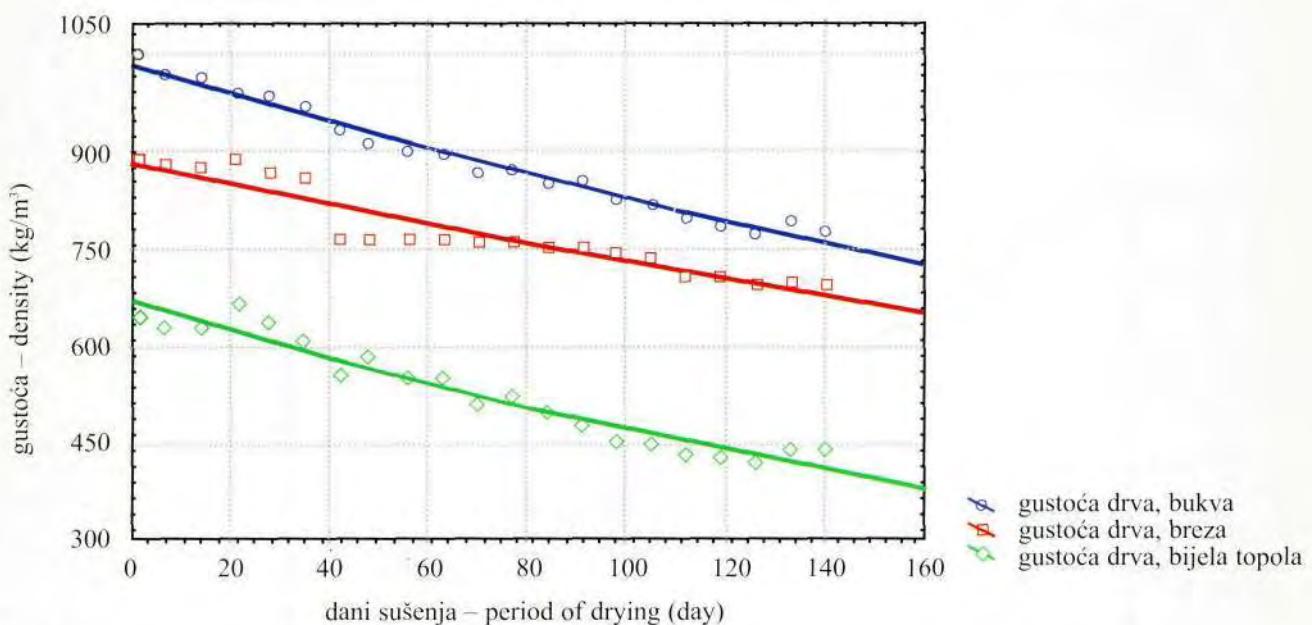
došlo se do zaključka da bi za izravnanje bila dovoljna i linearna funkcija oblika $Y_c = A + B X$, na što ukazuje i koeficijent korelacije, R i koeficijent determinacije R^2 .

³ Izravnanje podataka obavljeno je i matematičkom funkcijom parabole drugog stupnja:

$Y_c = a + b X + c X^2$ ($Y_c = 8884,90 + 2,59295 X - 0,030891 X^2$, za grab dužine 100 cm), no ovaj oblik nije zadovoljio trend pada volumnih masa prostornog drva različitih dužina, te je za izravnanje podataka primijenjena eksponencijalna funkcija.



Grafikon 2. Ovisnost gustoće drva kitnjaka (20, 100, 200 cm) o danima sušenja.

$$Y(\text{kit. } 20) = 966,827 \cdot \exp(-0,002 \cdot x) + \text{eps}, Y(\text{kit. } 100) = 966,094 \cdot \exp(-0,001 \cdot x) + \text{eps}, Y(\text{kit. } 200) = 1013,918 \cdot \exp(-0,001 \cdot x) + \text{eps},$$


Grafikon 3. Ovisnost gustoće drva bukve, breze i bijele topole o danima sušenja.

$$Y(\text{bukve}) = 1033,606 \cdot \exp(-0,002 \cdot x) + \text{eps}, Y(\text{breza}) = 884,361 \cdot \exp(-0,002 \cdot x) + \text{eps}, Y(\text{b. topola}) = 671,505 \cdot \exp(-0,004 \cdot x) + \text{eps}$$

Računanjem koeficijenta korelacije $R = -0,994$ i koeficijenta determinacije $R^2 = 0,988$, pokazuje se vrlo jaka veza između gustoće drva (Y) i ovisnosti o dana sušenja (X).

Izravnate mjerene veličine za grab dužine 100 cm, pokazuju grafikon 1. Matematičke funkcije po vrstama drveta i dužini sortimenta prostornog drveta prikazane su u tablici 2. i grafikonu 2., za hrast kitnjak.

Ako bi npr. primjenili izračunatu matematičku funkciju za prostorno drvo hrasta kitnjaka dužine 100 cm ($\log Y_c = 2,98664 - 0,000557 X$) da se izračuna vrijeme (dani) potrebno da se drvo osuši do nominalne gustoće drva (570 kg), tada bi X – dana iznosio 415, dakle oko 14 mjeseci, a za standardno suho drvo (660 kg) točno 300 dana (oko 10 mjeseci).

U komercijalnom poslovanju pod suhim (prosušenim) drvom smatra se prostorno drvo sušeno u prirodnim uvjetima iznad 6 mjeseci (183 dana). Prema takvim uvjetima gustoća prostornog drva hrasta kitnjaka dužine 100 cm iznosila bi oko 767 kg/m^3 .

Prostorno drvo dužine 100 cm isporučuje se kao cijepano i kao oblo. Budući se cijepano drvo suši brže nego oblo drvo, gustoća će drva za isto vrijeme biti manja. Za slučaj procjene gustoće prostornog cijepanog drva hrasta kitnjaka dužine 100 cm, mogla bi se približno primijeniti matematička funkcija izračunata za prostorno drvo dužine 20 cm.

Iako je površina izložena sušenju 5 komada prostornog drva, dužine 20 cm i promjera 15 cm ($1766,25 \text{ cm}^3$) manja od površine izložene sušenju dviju cijepanica (polovica) dužine 100 cm, promjera od 15 cm ($3057,70 \text{ cm}^3$), brzina sušenja bila bi približno istovjetna, jer se drvo brže suši u longitudinalnom nego u radijalnom smjeru.

Za cijepano drvo hrasta kitnjaka dužine 100 cm težina će po matematičkoj funkciji $\log Y_c = 2,98564 - 0,000903 X$, nakon 183 dana iznositi oko 660 kg/m^3 , dakle kao za standardno suho drvo.

Pomoću matematičkih funkcija iz tablice 2. može se izraditi tablice za ispitivane vrste drveća u kojima se za određeni broj dana prirodnog sušenja izračuna pripadajuća gustoća drva. Tako se npr. može izračunati da je u sirovom stanju najveća gustoća bukve, a najmanja bijele topole. Grab u sirovom stanju približno je iste gustoće kao bukva, breza je manje gustoće (lakša) od graba i hrasta kitnjaka, a veće gustoće (teža) od topole.

Ako se izračunate apsolutne vrijednosti gustoće označi sa 100, mogu se izračunati relativne vrijednosti u tabličnom obliku, koje za pojedine vrste drveća pokazuju trend relativnog opadanja gustoće po dužini sortimenta i vrsti drva. Tako se može izračunati da relativno najsporije na gustoći gubi hrast kitnjak, a najbrže bijela topola. Na grafikonu 3. prikazane su apsolutne vrijednosti trenda pada gustoće za bukvu, brezu i bijelu topolu i dužinu komada 100 cm.

Uvažavajući da je gustoća drvene tvari približno jednaka za sve vrste drveća ($1,5 \text{ g/cm}^3$), razliku u gustoći sirovog pa i gustoći standardno suhog drva možemo tumačiti razlikom u stupnju poroznosti između pojedinih vrsta drveća. Tako bi se za bukvu moglo zaključiti da je relativno male poroznosti i veće gustoće, dok je bijela topola veće poroznosti i manje gustoće drva.

Gubljenjem vode drvo postaje lakše, jer umjesto vode u pore drva ulazi zrak, s neznatnom volumnom masom.

c) Signifikantnost razlika ispitivanog obilježja (opadanje gustoće drva) u ovisnosti o dužini komada sortimenta (analiza varijance, F – test, t – test, test homogenosti)

Varianca u matematičko-statističkoj obradi istraživanih vrijednosti obilježja neke pojave kvadratno je odstupanje od srednje vrijednosti (aritmetičke sredine). Pomoću varijance mjeri se vjerojatnost, odnosno signifikantnost neke srednje vrijednosti obilježja, tj. da li se izračunata srednja vrijednost obilježja razlikuje od neke druge pojave iz istog skupa obilježja.

U našem primjeru cilj je bio da se utvrdi da li se brzina sušenja^a (trend pada gustoće drva) razlikuje za prostorno drvo dužine 20, 100 i 200 cm. Također bi bilo važno utvrditi da li se izračunata zakonitost pada gustoće prostornog drva od 200 cm mogla primijeniti za sve druge dužine iznad 200 cm (višemetrica).

Analiza varijance (po Fischeru, tablice po Snedecoru) za testiranje razlike kvadratnog odstupanja srednjih vrijednosti između grupa obilježja (dužine 20, 100, 200 cm) i unutar grupa obilježja za hrast kitnjak pokazuje da na razini signifikantnosti 5 % postoji razlika između i unutar grupa obilježja. No, na razini signifikantnosti 1 % ove razlike nisu vjerodostojne.

Traženjem uzroka u razlikama između pojedinih grupa utvrđeno je da već u startu postoje apsolutne razlike u volumnoj masi prostornog drva hrasta kitnjaka za isti volumen. To pokazuju izračunati parametri A za sva tri slučaja ($A_{20} = 967,48$, $A_{100} = 969,71$, $A_{200} = 1015,76$). Uzroci razlike težina istog volumena objašnjeni su prethodno (građa drva, dio stabla, stanište, položaj u sastojini, tip šume, starost stabla, kemijski sastav, odnos lignina i celuloze, rano i kasno drvo, širina goda, debljina kore i dr.).

Analizom varijance pokazuje se da postoje razlike između srednjih vrijednosti obilježja (trend pada gustoće drva) po dužinama sortimenta prostornog drva bukve, breze i bijele topole (tablica 3).

Na temelju analize varijance, F – testa i testa homogenosti pokazalo se da je potrebno obaviti testiranje razlike srednjih vrijednosti skupova obilježja pomoću t – testa. T – test je učinjen za sve vrste drveća osim za bukvu, kod koje je ustanovljeno analizom varijance da ne postoje signifikantne razlike srednjih vrijednosti

^a Brzina sušenja drva je odnos između količine vlage drva i gubljenja vode u kg po m^3 površine izložene sušenju u jedinici vremena (sat). Trend brzine sušenja je u prvom dijelu konstantan (do 80 % vlage drva), te dalje slijedi trend pada po logaritamskoj funkciji, sve do apsolutno suhog drva. Naš pojam "brzine sušenja" je trend pada gustoće drva u odnosu na tijek vremena.

O brzini sušenja vidi: Šumarska enciklopedija, JLZ, "Miroslav Krleža", Zagreb, 1987, str. 302.

skupa između i unutar grupa obilježja (dužine 20, 100, 200 cm).

Testom homogenosti potvrđeno je da su jedino značajno signifikantne razlike između srednjih vrijednosti obilježja pada gustoće drva kod hrasta kitnjaka (tablica 3).

Obavljeno je testiranje za hrast kitnjak ($t - \text{test}$) između dviju srednjih vrijednosti obilježja. Testirani su parovi obilježja na razini signifikantnosti 5% ($t = 1,96$) i 1% ($t = 2,58$) i to Y_{a200} , Y_{a20} i Y_{a100} , te Y_{a100} i Y_{a200} , (tablica 3).

Rezultati dobiveni $t - \text{test}$ om za hrast kitnjak pokazuju da postoje signifikantne razlike za sve srednje vrijednosti obilježja na razini signifikantnosti 5% (tablica 3). Isto tako za razlike između dužina prostornog drva i brzine sušenja postoje za razinu signifikantnosti 1%, osim za par, Y_{a20} i Y_{a200} .

I ovim testiranjem nije bilo moguće dokazati da li je ipak razlika između brzine sušenja, odnosno pada gustoće drva između dužina prostornog drveta hrasta kitnjaka od 100 i 200 cm toliko signifikantna, da ukazuje na signifikantnost razlika i većih dužina od 200 cm.

Test homogenosti varijanci (Barlettov test) grupa obilježja izravnatih srednjih vrijednosti pokazuje signifikantne razlike na razini 5%, tj. da vrijednosti ne pripadaju istom skupu, no za razinu 1% signifikantne razlike nisu vjerodostojne. Grafikon broj 2 pokazuje trend pada gustoće po dužini sortimenta prostornog drva hrasta kitnjaka.

Da bi se izbjegao početni utjecaj u razlikama gustoće drva za isti volumen prostornog drva različitih dužina, izravnati podaci eksponencijalnom funkcijom preračunati su u relativne veličine (gustoća drva u sirovom stanju = 100).

Analizom varijance kvadratnih odstupanja od srednjih vrijednosti obilježja između i unutar grupa prikazanih u relativnom iznosu došlo se do realnijeg zaključka o razlikama između grupa obilježja.

Analiza varijance po relativnim veličinama pokazuje signifikantne razlike na razini 5%, no ne vjerodostojne i na razini 1%. Tek je $T - \text{test}$ pokazao da između srednjih vrijednosti dužina prostornog drva hrasta kitnjaka od 100 i 200 cm nema signifikantnih razlika na razini 5% niti na razini 1% signifikantnosti. To po-

Tablica 3. Analiza varijance, F – test, t – test, test homogenosti (prema relativnim vrijednostima obilježja)

Table 3 Analysis of variance, F – test, t – test and test of homogeneity

Redni broj	Matematičko - statističke veličine	Vrsta drveća				
		hrast kitnjak	bukva	grab	breza	bijela topola
	Aritmetička sredina, varijanca, F test, t – test, test homogenosti Razina signifikantnosti razlika obilježja između grupa (vjerojatnost 95 % i 99 %)					
1.	Y_a aritmetička sredina grupe	90.38	88.32	88.46	87.68	81.80
2.	δ_Y^2 20 varijanca grupe dužine 20 cm	58.40	42.42	61.00	74.42	106.62
3.	δ_Y^2 100 varijanca grupe dužine 100 cm	24.27	65.44	52.28	57.62	157.48
4.	δ_Y^2 200 varijanca grupe dužine 200 cm	19.73	35.81	28.18	29.56	70.07
5.	δ_1^2 varijanca unutar grupe	119.99	278.32	115.05	188.53	389.95
6.	δ_2^2 varijanca između grupe	188.32	77.71	108.85	171.16	317.12
7.	F (Fischer) odnos varijanci između grupe i unutar grupe (δ_2^2 / δ_1^2 za $F_{0,05} = 3,55$, za $F_{0,01} = 6,01$ Test signifikantnosti razlika (-) (-) (-) (-) (-))	1.57	0.28	0.95	0.91	0.81
8.	F (Barlett) odnos najveće i najmanje varijance grupe za $F_{0,05} = 2,12$, za $F_{0,01} = 2,94$ Test homogenosti skupa	2.96	1.83	2.16	2.51	2.24
(*)	(*) (-) (*) (-) (*) (-) (*) (-)					
9.	$Y_{a20} - Y_{a100}$ razlika aritmetičke sredine grupe dužine 20 cm	(- 4,70)	(+ 2,81)	(+ 0,96)	(- 1,87)	(+ 4,24)
10.	$Y_{a20} - Y_{a200}$ razlika aritmetičke sredine grupe dužine 100 cm	(- 5,56)	(- 0,87)	(- 2,16)	(- 5,78)	(- 3,52)
11.	$Y_{a100} - Y_{a200}$ razlika aritmetičke sredine grupe dužine 200 cm	(- 0,86)	(- 3,68)	(- 3,32)	(- 2,75)	(- 7,76)
12.	se ($Y_{a20} - Y_{a100}$) standardna greška razlika aritmetičkih sredina (20 - 100) signifikantna razlika između grupe na razini 5% (t = 1,96) signifikantna razlika između grupe na razini 1% (t = 2,58)	1.99		2.32	2.19	3.55
(*)	(*) (-) (-) (-) (-) (-))					
13.	se ($Y_{a20} - Y_{a200}$) standardna greška razlika aritmetičkih sredina (20 - 200) signifikantna razlika između grupe na razini 5% (t = 1,96) signifikantna razlika između grupe na razini 1% (t = 2,58)	1.93		2.06	2.23	2.90
(***)	(***) (-) (-) (-) (-) (-))					
14.	se ($Y_{a100} - Y_{a200}$) standardna greška razlika aritmetičkih sredina (100 - 200) signifikantna razlika između grupe na razini 5% (t = 1,96) signifikantna razlika između grupe na razini 1% (t = 2,58)	1.46		1.96	2.49	3.29
(-)	(-) (-) (-) (-) (-) (-))					
15.	(*) signifikantna razlika između grupe na razini 5% (t = 1,96)					
16.	(**) signifikantna razlika između grupe na razini 1% (t = 2,58)					
17.	(***) signifikantna razlika između grupe na razini manjoj od 1%					
18.	(-) nema signifikantne razlike na razini 5%, niti na razini 1%					

kazuje i grafikon 2, na kojem se vidi odstupanje trenda pada vrijednosti obilježja između 100 i 200 cm dužine sortimenta prostornog drva.

Prema gornjem rezultatu moglo bi se ukazati da eventualno postoji zakonitost po kojoj se dovoljno točnim može primijeniti matematička funkcija izračunata za dužinu 200 cm, $Y_c = 1015,76 * (-1,001147)^x$, i za sve sortimente prostornog drva hrasta kitnjaka iznad 200 cm dužine (višemetrica).

Obavljen je testiranje i za ostale vrste drveća (grab, breza i bijela topola), jer je testom homogenosti potvrđena razlika srednjih vrijednosti obilježja na razini 5 % signifikantnosti (tablica 3).

Analizom varijance za bukvu nije utvrđena razlika ispitivanog obilježja (brzina sušenja) između ispitivanih grupa, niti unutar grupa. Zbog toga nije bilo potrebno ispitivanje razlika t – testom (tablica 3).

I test homogenosti (Barlletov test) potvrdio je da je razlika između grupa nevjerodstojna, te bi se moglo uzeti da se gustoća drva uvjetovana prirodnim sušenjem može izračunati po matematičkim funkcijama prikazanim u tablici 2. Za višemetarsko drvo bukve mogli bi se uvjetno koristiti podaci, kao oni izračunati za gustoću prostornog drva dužine 200 cm.

Iz tablice 3 vidljivo je da analizom varijance nisu utvrđene signifikantne razlike između srednjih vrijednosti brzine sušenja za grab, brezu i bijelu topolu i između različitih dužina (20, 100 i 200 cm). Tek je testom homogenosti utvrđeno da postoji razlika na razini 5 % signifikantnosti. T – testom potvrđena je takva razlika kod breze između dužina 20 i 200 cm. Ostale razlike nisu signifikantne.

DISKUSIJA O REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI

Discussion and conclusions

Diskusija o rezultatima istraživanja

Provedena mjerena gustoće drva hrasta kitnjaka, bukve, graba, breze i bijele topole potvrđuju znatne oscilacije o različitim gustoćama uzorka iste vrste drveća, ovisno o stanišnim i drugim uvjetima, no prosječne izmjerene vrijednosti gustoće drva su orientacijski blizu onima koje se koriste u šumarskoj operativi.

Utvrđeno je da tijekom procesa prirodnog sušenja vanjski uvjeti znatno usporavaju, zaustavljaju i pospješuju tijek prirodnog sušenja.

Donekle je ukazano na potrebu za daljim ispitivanjem pretpostavke da nema signifikantnih razlika u gubljenju na gustoći sortimenata prostornog drva od 100, 200 i iznad 200 cm dužine uslijed prirodnog sušenja.

Iznimno je potvrđeno samo za hrast kitnjak i brezu da postoji signifikantna razlika u brzini prirodnog sušenja između sortimenata prostornog drva dužine od 20 i 200 cm. Takvu razliku moglo bi se, kao pretpostavku, pripisati utjecaju debljine i boje kore navedenih vrsta drveća na tijek prirodnog sušenja. Kora kod hrasta djeluje kao znatan toplinski izolator, te bi kod kraćeg komada moglo doći do znatnog utjecaja na brže isušivanje po longitudinalnom nego radijalno-tangencijalnom smjeru. Kod breze na brzinu isušivanja, osim longitudinalnog smjera, znatan utjecaj imala bi eventualno bijela boja kore, koja usporava provođenje toplinskog zračenja.

Gubljenjem vode drveni sortimenti postaju lakši za manipulaciju, utovar i prijevoz te traže manji utrošak energije za istu volumnu mjeru.

Odabirom eksponencijalne, odnosno logaritamske matematičke funkcije za izravnavanje vrijednosti mjerjenih varijabli (gustoća drva, razdoblje sušenja) i njenim grafičkim prikazom uočena je gotovo linearna zakonitost pada gustoće drva u protjecanju vremena sušenja. Veličina parametra (-B) pokazuje brži ili sporiji trend pada volumne težine u odnosu na razdoblje (dana) sušenja. Što je (-B) veći, to je trend sušenja brži. Parametar B je recipročna vrijednost rasta (u pozitivnom smjeru), a predstavlja vrijednost tangensa kuta što ga tangenta na krivulju zatvara s osi X (grafikon 2, dužina 20 cm).

Za brže i jednostavnije, a za operativu dovoljno točne podatke, moglo bi se za izjednačenje mjerjenih veličina upotrijebiti linearnu funkciju oblika $Y_c = a + bX$.

Primjena navedenih matematičkih funkcija u tablici 2 vrlo je jednostavna. Praktički je dovoljno imati jednu "odvagu" kamiona ili vagona natovarenog prostornim drvom i poznato vrijeme od sječe do vaganja (broj dana). Pomoću početnog stanja lako se projektira gustoća drva na sirovo stanje, odnosno prošušeno stanje drvnih sortimenata prostornog drva odredene vrste. Iz gustoće drva (volumne mase) računa se volumen (m^3) prostornog drva koji služi za evidentiranje zaliha na određeni dan.

Zaključci

Gustoća prostornog drva domaćih vrsta drveća (hrast kitnjak, bukva, grab, breza i bijela topola) znatno se razlikuju u sirovom stanju, a trend gubljenja na

gustoći prirodnim sušenjem do stupnja prosušenosti ili suhog drva, različit je po vrsti drva i dužini sortimenta.

Od ispitivanih vrsta, a prema postavljenoj metodi, najsporije gubljenje gustoće drva pokazuje hrast kitnjak, a najbrže bijela topola. Razlike u gubljenju na gustoći prostornog drva ovise i o dužini komada.

Razlike trenda gubljenja na gustoći drva prirodnim sušenjem pokazuju se u apsolutnom iznosu za sve vrste drveća i tri ispitivane dužine (20, 100, 200 cm), no sig-

nifikantna razlika pokazuje se između dužina 20 i 200 cm samo za hrast kitnjak i brezu.

Trend gubljenja na gustoći drva za dužine drvnih sortimenata iznad 200 cm (višemetrica) je uvjetno istovjetan, kao i za drvne sortimente od 200 cm.

Predočene matematičke funkcije potrebno je verificirati u operativnom šumarstvu, te nastaviti metodološki vjerodostojnija istraživanja, koja će na stručnoj i znanstvenoj razini poslužiti postavljenom cilju.

LITERATURA

- Cijeniku Glavnih šumskih proizvoda, Hrvatske šume, 1997.
- Petz, B. 1997: Osnovne statističke metode za nematematičare, "Naklada Slap", Jastrebarsko, 1997.
- Ražnjević, K. 1985: Fizikalne veličine i mjerne jedinice međunarodnog sustava (SI), Nakladni zavod Znanje, Zagreb 1985.
- Serdar, V. 1966: Udžbenik statistike, Školska knjiga, Zagreb 1966.
- Šumarska enciklopedija, (I - II), Zagreb, 1969 i (I - III), JLZ, Zagreb 1987.

SUMMARY: The article presents the modes of stockwood density for some autochthonous trees (sessile oak, beech, hornbeam, birch and white poplar) of various lengths and their dependence on the period of natural drying.

The original weighing during winter, spring and summer, as well as 140 days of drying in natural environmental conditions have a significant influence on the density of stockwood.

The research results are presented with mathematical functions (logarithm function) and with graphs.

Key words: natural drying of stockwood, density, trend of density decrease, length of assortment, drying period.