

UDK: 630*812.7

Оригинални научни рад

<https://doi.org/10.2298/GSF2124125Z>

СВОЈСТВА ДРВЕТА ЦРВЕНОГ ХРАСТА (*QUERCUS RUBRAL.*) ОДРЕЂЕНА ФРАКТОМЕТРИЈСКИМ МЕРЕЊИМА - ПРЕЛИМИНАРНИ РЕЗУЛТАТИ

дипл. инж. Ивана Живановић, истраживач сарадник, Институт за шумарство, Србија

др Филип Јовановић, научни сарадник, Институт за шумарство, Србија

дипл. инж. Ненад Шурјанац, Истраживач приправник, Институт за шумарство, Србија

др Небојша Тодоровић, ванредни професор, Шумарски факултет, Универзитет у Београду, Србија

др Горан Милић, редовни професор, Шумарски факултет, Универзитет у Београду, Србија

Извод: У овом раду приказани су прелиминарни резултати основних својстава дрвета црвеног храста (*Quercus rubra* L.) као и зависност између својстава извртака добијених на дубећем стаблу и испитиваних својстава. На стаблу су извађени извртци пречника 5 mm на којима су, коришћењем фрактометра, одређени: чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима, радијална чврстоћа на савијање и угао лома. Коришћењем дескриптивне статистике и вишеструке регресије утврђена је зависност између фрактометријских параметара и основних физичко-механичких својстава дрвета одређених деструктивним методама: густине дрвета, чврстоће на притисак паралелно са влаканцима и савојних својстава (чврстоћа на савијање и модул еластичности при савијању). Добијене вредности испитиваних својстава црвеног храста се налазе у границама литературних података. Статистичка анализа је показала да се радијална чврстоћа на савијање не може користити као поуздан фрактометријски параметар у процени квалитета дрвета. Са друге стране, добијени резултати сугеришу да се однос између друга два параметра (чврстоће на притисак паралелно са влаканцима и угла лома) и својстава дрвета црвеног храста може успешно описати коришћењем модела вишеструке регресионе једначине (коэффициент детерминације је био у интервалу од 0,945 до 0,990).

Кључне речи: црвени храст, фрактометар, својства дрвета, мултиваријациони регресиони модели

УВОД

Црвени северни храст (*Quercus rubra* L., Fagaceae) је врста лишћара, унета у Европу из Северне Америке 1691. године (Gubka и Špišak 2010). У Србији тренутно постоје мање површине под овом врстом, а значајније састојине налазе се у околини града Београда (Lazarević 2020). Квалитет дрвета северног црвеног храста до сада није испитиван на овим просторима, па

би било од научног и практичног значаја проучити својства ове отпорне и брзорастуће врсте, која представља веома квалитетан материјал за обраду у дрвној индустрији (Vansteenkiste *et al.* 2005). Са смањењем квалитетних шумских ресурса, дрвни материјал би требало користити много смисленије и ефикасније за производе од дрвета као што је намештај (Hu *et al.* 2021).

Северни црвени храст је показао изузетне резултате у ксеромезофилним и ксеротермофилним стаништима храста. То је врста која боље подноси аридност од храста китњака (*Quercus petrea* L.), а мање је захтевна када је у питању плодност земљишта. Лако се прилагођава различитим климатским условима и добро подноси ниске температуре. Висока виталност, као и отпорност на штеточине, суше, мразеве, ветроломе и снежне сметове чине ову врсту веома погодном за уношење у шуме са посебном наменом у храстовом подручју (Isajev *et al.* 2006). Према Шошкићу и Поповићу (2002) својства дрвета северног црвеног храста су веома слична домаћим врстама из рода *Quercus* L. у Србији.

Особине дрвета су углавном одређене његовом структуром, биолошким и органским пореклом, али и условима коришћења и његове експлоатације. Један од основних циљева праксе и теорије је што боље коришћење дрвних сировина, па је резултат тога развој великог броја недеструктивних и полудеструктивних метода за анализу квалитета дрвета у свим фазама експлоатације. Већина ових метода одређује својства дрвета на индиректан начин; стога су конструисани одговарајући уређаји за одређивање карактеристика анализираних материјала на основу отпора бушења (Shagapov *et al.* 2020), брзине звука (Ваг *et al.* 2012), апсорпције зрачења (Dupleix *et al.* 2012) итд. Помоћу статистичких метода, мерени параметри се трансформишу у тражена својства дрвета. Коначно, проверава се тачност примењене методе, успостављањем корелације између својстава дрвета утврђених недеструктивном методом и оних измерених експериментално.

Фрактометар је уређај за мерење чврстоће дрвета на лом и чврстоће на савијање или притисак (Rinn *et al.* 1996) на извртку узетом Преслеровим сврдлом са одређеног дела стабла. Чврстоћа дрвета на притисак је добар показатељ квалитета и стања дрвног ткива (Chiu *et al.* 2006; Rinn *et al.* 1996). Бројне студије сугеришу да се услед разградње дрвета дејством патогена, радијална чврстоћа смањује на исти начин као и лонгитудинална чврстоћа (Matthesk *et al.* 1995; Gruber и Hagermann 2000). Tang *et al.* (2005) наводе високу корелацију између

чврстоће на савијање и притисне чврстоће паралелно са влаканицима. Matsumoto *et al.* (2010) су закључили да се фрактометар може применити за процену својстава дубећег дрвета на основу високог коефицијента детерминације између чврстоће на притисак и густине. Коначно, Ishiguri је објавио бројне радове о коришћењу фрактометра за анализу својстава дрвета (нпр. Ishiguri *et al.* 2011), а у резултатима својих студија наглашава да се механичка својства дрвета могу предвидети коришћењем овог инструмента. Конкретно, Matheny и Clark (1999) су процењивали момент лома и угао лома извртка из доњег дела стабла ове, и 24 друге врсте, користећи фрактометар. Аутори наводе да резултати варирају у зависности од сегмента извртка и положаја стабла. Такође, примећене су велике варијације у резултатима између различитих локација, па су сугерисали да би фактори станишта могли бити разлози таквих разлика. Исти аутори наводе да фактори као што су клима, земљиште, релативна влажност, изложеност ветру, претходно оптерећење снегом и ледом, као и прираст могу бити извор(и) таквих варијација. Они су закључили да у процени губитка чврстоће повезаног са разградњом, резултате фрактометра треба упоредити са вредностима добијеним из здравих узорака исте врсте дрвета.

Бројне студије су потврдиле зависност између резултата фрактометријске анализе и својстава дрвета (Schvarze *et al.* 1995; Gruber и Hagermann (2000); Tang *et al.* 2005; Matsumoto *et al.* 2008). Експерименти су урађени на букви, јели, тополи и дуглазији, а добијене су једначине које су имале средње до јаке коефицијенте детерминације (R^2).

На бази свега наведеног, циљ рада је да се испита зависност између параметара добијених фрактометарском анализом и основних физичких и механичких својстава дрвета северног црвеног храста. Добијени резултати би допринели интензивнијем коришћењу полудеструктивних метода у процени својстава дрвета као и бољем утврђивању квалитета дрвета у дубећим стаблима ове алохтоне врсте која се одлично прилагодила климатским условима Србије. Стога смо покушали да одговоримо на питања који су фрактометарски параметри у корела-

цији са којим механичким својствима дрвета северног црвеног храста и колико ефикасно и прецизно резултирајуће једначине предвиђају проучаване варијабле.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ РАДА

Припрема узорака и методе испитивања

Узорци црвеног храста у овим истраживањима су узети из састојине која се налази у Липовичкој шуми и Београду, Србија (лат. 44.697165, дужина 20.356815). Област је мапирана беспилотним ваздушним системом (дроном) DJI Phantom 4 Pro.

Северни црвени храст на овим просторима стар је око 60 година, а расте у мешовитој шуми са белим бором (*Pinus sylvestris* L.). Пре вађења извртака извршен је визуелни преглед стабла. Након визуелног прегледа стабла, изврци су извађени Преслеровим сврдлом са јед-



Слика 1. Фрактометар (IML Fractometer II) - уређај за мерење својстава извртака

ног дрвета на две висине 1,4 m и 4,4 m и сва четири кардинална правца. Помоћу фрактометра (слика 1) на извртцима пречника 5 mm су одређени: чврстоћа на притисак паралелнио са влаканцима, радијална чврстоћа на савијање и угао лома. Вредности наведених својстава су мерена од коре ка сржи.

За утврђивање физичко-механичких својстава дрвета из табала су искројени трупчићи дужине 400 mm из којих су касније изрезане по четири радијалне даске. Из радијалних даска је изрезано укупно 41 узорак димензија 20x20x320 mm који су груписани према висини стабла и анатомском правцу. Пре тестирања, сви узорци су кондиционирани на $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ и релативној влажности од $60\pm 5\%$ током три недеље. На кондиционираним узорцима су одређени чврстоћа на савијање (MOR) и модул еластичности при савијању (MOE). Из поломљених савојних узорака изрезани су узорци димензија на 20x20x40 mm на којим је одређена влажност, густина дрвета и чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима. Испитивање свих наведених својстава вршена су према стандарду СРПС ИСО 13061.

Статистичка анализа

За поређење својстава дрвета утврђених стандардном деструктивном методом и оних утврђених фрактометром, добијени нумерички подаци обрађени су дескриптивним и мултиваријантним статистичким методама. У изради модела учествовале су вредности добијених својстава дрвета и вредности својстава извртака исте старости. Добијени подаци су коришћени за израчунавање средњих вредности свих варијабли и за одређивање просечне стандардне девијације и коефицијента варијације за сваку средњу вредност. Проучаване су и посматране варијабле упоређивањем њихових минималних и максималних вредности. У циљу потпунијег откривања и описа односа између својстава дрвета и фрактометријских мерења, коришћена је "stepwise" вишеструка регресија. Пошто је константа искључена из модела вишеструке регресије, модел је додатно унапређен. Као и у претходним корацима, прилагођени

коэффициент детерминације је изабран у односу на конвенционални као мера прикладности модела.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У Табели 1. су приказани резултати дескриптивне статистике за чврстоћу на притисак паралелно са влаканицима (σF), радијалну чврстоћу на савијање (δsF) и угао лома (BaF) одређене фрактометром, као и за густину дрвета у просушеном стању влажности (WD), чврстоћу на притисак паралелно са влаканицима (H_p), модул еластичности при савијању (MOE) и чврстоћу на савијање (MOR) добијене стандардним, деструктивним методама. Просечана влажност током испитивања износила је 11%.

Просечна вредност притисне чврстоће паралелно са влаканицима мерена фрактометром износила је $57,5 \text{ N/mm}^2$ са коэффициентом варијације 11%. Радијална чврстоћа на савијање у просеку је износила $19,3 \text{ N/mm}^2$, са коэффициентом варијације 17%. Matheny и Clark (1999) наводе да је средња вредност угла лома за дрво црвеног храста $16,70^\circ$, што је мање од $21,5^\circ$ добијене у овом истраживању. Разлог се може наћи у различитој влажности испитиваних узорка као и утицају структуре прстена прираста односно учешћа зоне касног дрвета. У поређењу са осталим анализираним својстви-

ма дрвета, густина дрвета имала је најмањи коэффициент варијације (4%), а просечну вредност од $0,724 \text{ kg/m}^3$. Ове вредности су у опсегу резултата приказаних у литератури (Vansteenkiste, 2005; Genet *et al.*, 2013; Zeidler и Boruvka, 2016; Uzcategui *et al.*, 2020).

Вредности притисне чврстоће паралелно са влаканицима кретале су се од 53,2 до $75,8 \text{ N/mm}^2$, са просечном вредношћу од $64,4 \text{ N/mm}^2$ и коэффициентом варијације од 9%. Ове вредности су веома блиске онима које су добијене у истраживању Uzcategui *et al.* (2020) за северни црвени храст у југоисточном делу САД. Међу анализираним својствима дрвета, MOE је имао највећи коэффициент варијације (21%). Средња вредност MOE ($7381,5 \text{ N/mm}^2$) била је нешто нижа од оне коју наводе Uzcategui *et al.* (2020). Са друге стране, MOR има средњу вредност ($102,2 \text{ N/mm}^2$) блиску оној коју приказују Uzcategui *et al.* (2020). На пример, Vansteenkiste (2005) наводи просечну вредност од 12500 N/mm^2 за MOE и 99 N/mm^2 за MOR док су Vang *et al.* (2008) добили 9810 N/mm^2 за MOE и $62,1 \text{ N/mm}^2$ за MOR . Резултати добијени у нашем истраживању најсличнији су онима које су представили Uzcategui *et al.* (2020). Може се претпоставити да су разлог томе слични климатски услови због сличног географског положаја испитиваних стабала. Са друге стране ако упоредимо добијене податке са вредностима за најважније индустријске

Табела 1. Дескриптивна статистика за својства дрвета северног црвеног храста у Србији утврђених помоћу стандардних метода и путем фрактометра

Метод	Својство дрвета	Број мерења	Средња вредност	Станд. девијација	Коеф. варијације %	Мин.	Макс.
F	σF (N/mm^2)	41	57,5	6,3	11	49,6	69,9
F	δsF (N/mm^2)	41	19,3	3,2	17	12,5	23,3
F	BaF ($^\circ$)	41	21,5	3,0	14	17,0	27,0
SD	WD (g/cm^3)	41	0,724	0,03	4	0,670	0,780
SD	H_p (N/mm^2)	41	64,4	5,7	9	53,2	75,8
SD	MOR (N/mm^2)	41	102,2	14,4	14	73,4	127,3
SD	MOE (N/mm^2)	41	7381,5	1573,6	21	4829,96	9795,76

Напомена: F – фрактометар; SD – стандардне методе;

Табела 2. Модели вишеструке регресионе једначине и прилагођени коефицијент детерминације за својства дрвета тестирана помоћу фрактометријских мерења

Својства дрвета	Мултиваријантни регресиони модел (Stepwise метод)	Коефицијент детерминације (R ²)	Стандардна грешка процене
Густина дрвета (WD)	$y_{WD} = 0,00516174 \cdot \sigma F + 0,0184555 \cdot \text{Ba} F$	0.983	0.09
Чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима (H _p)	$y_{H_p} = 0,459408 \cdot \sigma F + 1,63198 \cdot \text{Ba} F$	0.976	11.6
Чврстоћа на савијање (MOR)	$y_{MOR} = 0,700873 \cdot \sigma F + 2,63503 \cdot \text{Ba} F$	0.968	17.9
Модул еластичности при савијању (MOE)	$y_{MOE} = 45,7621 \cdot \sigma F + 199,099 \cdot \text{Ba} F$	0.948	1655.2

домаће врсте дрвета из рода *Quercus*, храста китњака и лужњака, можемо констатовати да су вредности чврстоће блиске онима које приказује Шошкић (2006), док густина и MOE црвеног храста мало одступају. Исти аутор наводи да својства појединих врста дрвећа у оквиру истог рода зависе од много фактора па су такве варијације и очекиване.

Тестови вишеструке регресије су резултирали са четири успешна модела за свако проучавано својство дрвета (табела 2). Генерално, добијене велике вредности показују да се појединачна, као и комбинација фрактометријских мерења, могу успешно користити у процени истраживаних својстава дрвета. Највећа вредност коефицијента детерминације добијена је код процене густине дрвета, а најмања код одређивања MOE.

Чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима и угао лома извртак су статистички одређени као важне варијабле које могу утицати на процену својстава дрвета. Њихов утицај је позитиван, док се радијална чврстоћа на савијање показала као параметар који статистички није значајан. Ова констатација се поклапа са резултатима које приказују Matsumoto *et al.* (2010). Tang *et al.* (2016) су, са друге стране истакли, да су најбољи показатељи чврстоће стабала, одређени коришћењем фрактометра, чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима и радијална чврстоћа на савијање. Исти аутори су истакли резултате који показују да постоји зависност између ова два својства и да њихов

однос зависи од врсте дрвета. Добијене вредности R² у овом раду указују да су модели веома успешни у описивању података, међутим, и даље је неопходно посматрати то у пракси пре него што се донесу коначни закључци. Дакле, треба у резултатима будућих истраживања наћи одговор на питање ефикасности и прецизности предвидљивости модела.

ЗАКЉУЧАК

У раду су испитивана основна својства дрвета црвеног храста (густина дрвета, чврстоћа на притисак паралелно са влаканцима и савојна својства) као и однос између фрактометријских мерења добијених на извртку (чврстоће на притисак паралелно са влаканцима, радијалне чврстоће на савијање и угла лома) и наведених физичко-механичких својстава дрвета. Добијени резултати показују да се вредности истраживаних својстава налазе у интервалу литературних података за ову врсту дрвета. Утврђене вредности чврстоће су сличне подацима које се наводе за храст китњак и лужњак, док просечне вредности густине и модула еластичности одступају, али не значајно. Статистичка анализа је показала да се радијална чврстоћа на савијање не може користити као поуздан параметар у процени квалитета дрвета, док је код односа између чврстоће на притисак и угла лома и својстава дрвета северног црвеног храста добијена вишеструка регресиона зависност са ко-

ефицијентом детерминације који је био у интервалу од 0,945 до 0,990. Примарна предност добијених модела је могућност предвиђања квалитета дрвета пре обарања стабала, што би могло позитивно да утиче на оптимално искоришћење и даљу употребу дрвета. Приказани резултати указују на то који параметри измерени на дубећем стаблу дају најбољу слику о квалитету дрвета.

Узимајући у обзир веома оскудну литературу у Србији о својствима дрвета црвеног храста ова истраживања доприносе познавању варијабилности физичко-механичких својстава дрвета ове интродуковане врсте храста као и однос између својстава и фрактометарских мерења успостављених на дубећем стаблу.

PROPERTIES OF THE NORTHERN RED OAK (*QUERCUS RUBRAL.*) WOOD DETERMINED BY FRACTOMETRIC MEASUREMENTS – PRELIMINARY RESULTS

B.Sc. Ivana Živanović, Research assistant, Institute of Forestry, Belgrade, Serbia

Dr. Filip Jovanović, Research Associate Institute for forestry Belgrade, Serbia

B.Sc. Nenad Šurjanac, Research trainee, Institute of Forestry, Belgrade, Serbia

Dr. Nebojša Todorović, Associate professor, University of Belgrade – Faculty of Forestry, Belgrade, Serbia

Dr. Goran Milić, Full Professor, Faculty of Forestry, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Abstract: This study presents preliminary results of the basic properties of the northern red oak wood as well as the relationship between the properties of the core samples obtained on the live tree and the tested properties. The core samples 5 mm in diameter were extracted from the tree and used for determining the fractometer properties: compressive strength parallel to grain, radial bending strength and braking angle. Using descriptive statistics and multiple regression, the relationship between fractometric parameters and basic physical and mechanical properties of wood determined by destructive methods (wood density, compressive strength in parallel with fibers and bending properties (bending strength and modulus of elasticity). The obtained values of the examined properties of northern red oak are within the limits of the literature data. Statistical analysis has shown that radial bending strength cannot be used as a reliable fractometric parameter in assessing wood quality. On the other hand, the obtained results suggest that the relationship between the other two parameters (compressive strength parallel to grain and fracture angle) and the properties of the northern red oak wood can be successfully described using the multiple regression models (coefficient of determination ranged from 0.945 to 0.990).

Keywords: *Quercus rubra* L., fractometer, wood properties, multiple regression models.

INTRODUCTION

The northern red oak (*Quercus rubra* L., Fagaceae) is a broadleaved tree species, introduced to Europe from North America in 1691 (Gubka and Špišák 2010). In Serbia, there are presently only small areas under this tree species, but significant stands exist in the vicinity of the

city of Belgrade (Lazarević 2020). The quality of wood of the northern red oak has not been tested in this region so far, so it would be of scientific and practical importance to study the properties of wood of this extremely resistant and fast-growing oak species, which is a very high-quality

material for processing in the wood industry (Vansteenkiste *et al.*, 2005). With the decrease of qualified forestry resources, wood materials should be used more scientifically and efficiently in wood products like furniture (Hu *et al.*, 2021).

The northern red oak has shown exceptional results in xeromesophilic and xerothermophilic oak habitats. It is a species that tolerates aridity better than sessile oak (*Quercus petraea* L.), and has fewer demands on soil fertility. It also easily adapts to different climatic conditions and tolerates low temperatures well. High vitality, as well as resistance to pests, drought, frost, windbreaks and snowbreaks, make this species very suitable for introduction into special-purpose oak forests (Isajev *et al.*, 2006). According to Šoškić and Popović (2002), wood properties of the northern red oak are very similar with (or in some cases even better than) those of the domestic species of the genus *Quercus* L. in Serbia.

Wood properties are mainly determined by its structure, biological and organic origin, but also by the conditions of the wood usage and exploitation. One of the main goals of practice and theory is to make the best use of wood raw materials, so the result of that is a development of a large number of non-destructive and semi-destructive methods for analyzing the quality of wood in all phases of its exploitation. Most methods indirectly determine the properties of wood; therefore, suitable devices have been constructed to determine the characteristics of the material analyzed based on the drilling resistance (Sharapov *et al.*, 2020), sound propagation or velocity (Baar *et al.*, 2012), radiation absorption (Dupleix *et al.*, 2012), etc. Using statistical methods, the measured parameters are transformed into the required properties of wood. Finally, the accuracy of the method used is checked by establishing a correlation between the properties of wood, determined by the non-destructive method and those measured experimentally (Todorović, 2014).

The fractometer is a device for measuring the wood fracture strength and bending or compression strength (Rinn *et al.*, 1996) on a core sample taken with an increment borer from a certain part of the tree or branch being examined. The compressive strength of wood is a good indicator of quality and initial decomposition (Chiu *et al.*,

2006; Rinn *et al.*, 1996). Numerous studies suggest that radial strength decreases in the same way as longitudinal strength because of decay action (e.g., Mattheck *et al.*, 1995; Gruber and Hagermann, 2000; Tang *et al.*, 2005). For instance, Tang *et al.* (2005) accomplished high and positive correlations between radial bending strength and longitudinal compressive strength. Matsumoto *et al.* (2010) concluded that fractometer could be applied for live tree properties assessment due to the high coefficient of determination between the compressive strength and density. Finally, Ishiguri reviewed more than a dozen articles on using fractometer for analyzing wood properties (e.g. Ishiguri *et al.* 2011), and the results of the study emphasized that mechanical properties of wood could be predicted with this instrument. Still, there is only one available research in which core samples of the northern red oak were tested using a fractometer. Specifically, Matheny and Clark (1999) evaluated the fracture moment and fracture angle of core samples from the lower trunk of northern red oak and 24 other species using a fractometer. The authors have found that the results varied by core segment, and position of the tree. Also, there was major variation in the results due to location, so they suggested that habitat factors could be the reasons for such differences. Factors such as climate, soil, available moisture, exposure to wind, past loading by snow and ice, and growth rate could be the source(s) of such variation (Matheny and Clark 1999). They concluded that in evaluating the strength loss associated with decay, fractometer results should be compared to the values obtained from clear samples of the same tree.

Some studies have already confirmed relationships between the results of fractometry analysis and properties of wood (Schwarze *et al.*, 1995; Gruber and Hagermann, 2000; Tang *et al.*, 2005; Matsumoto *et al.*, 2008). The experiments were done on beech, fir, poplar and Douglas-fir and the resultant equations had medium to high coefficients of determination (r^2).

Based on all of the above, the goal of this paper is to examine the relationship between the fractometry measurements and the mechanical properties of the northern red oak wood. The obtained results would contribute to more intensive

use of semi-destructive methods in assessing the properties of wood as well as better determination of wood quality in live trees of this non-native species that has adapted well to the climatic conditions of Serbia. Therefore, we will attempt to answer the questions of which fractometric parameters correlate well with mechanical properties of northern red oak wood and how efficiently and precisely the resulting equations predict the studied variables.

MATERIALS AND METHODS

Specimen preparation and testing methods

Samples of northern red oak in these studies were taken from stands located in the Lipovica forest and Belgrade, Serbia (lat. 44.697165, long. 20.356815). The area has been mapped by the unmanned aerial system (drone) DJI Phantom 4 Pro.

Northern red oaks in this area are about 60 years old, and they are growing in a mixed forest with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). A visual tree inspection was conducted before core sampling. Following visual inspection, core samples were extracted with an increment borer, from one tree on two heights (1.4 m and 4.4 m) and all four cardinal directions. Using a fractometer (Figure 1) on the core samples with a diameter of 5 mm, the following properties were determined: compressive strength parallel to the fibers, radial bending strength and fracture angle. The values of these properties were measured from the bark to the pith.

To determine the physical and mechanical properties of wood, logs 400 mm long were cut from trees, from which four radial planks were sawn. A total of 25 samples measuring 20x20x320 mm were cut from radial planks, grouped according to the height of the tree and the anatomical direction. Before testing, all samples were conditioned at $21 \pm 2^\circ\text{C}$ and relative humidity of $60 \pm 5\%$ for three weeks. Bending strength (MOR) and bending modulus (MOE) were determined on conditioned samples. Samples of dimensions 20x20x40 mm were cut from the broken bending samples, on which the moisture content (MC),



Figure 1. IML Fractometer 2 – a device for measuring the properties of the core samples

wood density and compressive strength parallel to grain were determined. Testing of all these properties was performed according to the standard SRPS ISO 13061.

Statistical analyses

To compare the properties of wood determined by the standard destructive method and those determined using a fractometer, the obtained numerical data were analysed by descriptive and multivariate statistical methods.

In the development of the models, the values of the obtained properties of wood and the values of the properties of the same age core samples were used. The obtained data were used to calculate the mean values of all variables and to determine the average standard deviation and coefficient of variation for each mean value. Variables were also analysed by comparing their minimum and maximum values. To fully describe the relationship between wood properties and fractomet-

ric measurements, “stepwise” multiple regression was used. The model was further improved by excluding the constant from the multiple regression model. As in the previous steps, the adjusted coefficient of determination was chosen instead of the conventional one as a measure of the suitability of the model.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1. presents descriptive statistics for compressive strength parallel to grain (σF), radial bending strength ($\delta s F$) and breaking angle ($Ba F$) determined using fractometer, as well as wood density (WD), compressive strength parallel to grain (H_p), modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) obtained by standard, destructive method. The average MC during the examination was 11 %.

The average value for compression parallel to grain measured with fractometer was 57.5 N/mm² with a coefficient of variation of 11 %. Radial bending strength measured with fractometer was on average 19.3 N/mm², with a coefficient of variation of 17%. In Matheny and Clark (1999), the mean value for breaking angle was 16.70°, which is lower than 21.5° obtained in our research. The reason can be found in different MC of the tested samples, as well as in the influence of the structure of the growth ring, i.e. the participation of the latewood zone. In comparison to the other analyzed wood properties, wood density had the

lowest coefficient of variation (4%), and a mean value of 0.724 kg/m³. These values are in the range with the measurements given in the literature (e.g., Vansteenkiste, 2005; Genet *et al.*, 2013; Zeidler and Boruvka, 2016; Uzcategui *et al.*, 2020).

The values of compression parallel to grain ranged from 53.2 to 75.8 N/mm², with a mean value of 64.43 N/mm² and a coefficient of variation of 9%. These values are very close to those obtained by Uzcategui *et al.*, (2020) for the northern red oak in the southeastern part of the USA. Among the analyzed wood properties, MOE had the highest coefficient of variation (21%). Still, the mean value (7381.5 N/mm²) was slightly lower than those given in the literature (Uzcategui *et al.*, 2020). On the other hand, MOR showed a mean value (102.2 N/mm²) close to those given in the same paper. For example, Vansteenkiste (2005) obtained 12.500 N/mm² for MOE and 99 N/mm² for MOR, while Wang *et al.* (2008) obtained 9810 N/mm² for MOE and 62.1 N/mm² for MOR. The results obtained in our investigation are the most similar to those reported by Uzcategui *et al.* (2020). It can be assumed that the reasons for this are similar climate conditions due to the similar geographical position of the trees examined. On the other hand, if we compare the obtained data with the values for the most important industrial domestic species of *Quercus*, sessile oak and pedunculate oak, we can conclude that the strength values are close to those shown by Šoškić (2006), while the density and MOE of northern red oak

Table 1. Descriptive statistics of wood properties of the northern red oak in Serbia determined with the standard destructive (SD) method and by using fractometer (F)

Method	Wood property	Count	Average	Standard deviation	Coeff. of variation %	Minimum	Maximum
F	σF (N/mm ²)	41	57,5	6,3	11	49,6	69,9
F	$\delta s F$ (N/mm ²)	41	19,3	3,2	17	12,5	23,3
F	Ba F(°)	41	21,5	3,0	14	17,0	27,0
SD	WD(g/mm ³)	41	0,724	0,03	4	0,670	0,780
SD	H_p (N/mm ²)	41	64,4	5,7	9	53,2	75,8
SD	MOR(N/mm ²)axial	41	102,23	14,4	14	73,4	127,3
SD	MOE(N/mm ²)	41	7381,50	1573,6	21	4829,9	9795,7

Note: F – fractometer; SD – standard methods;

Table 2. Multiple regression equation model and adjusted coefficient of determination for wood properties tested with standard methods and fractometer

Wood Property	Multiple Regression Equation Model (Stepwise method; Constant excluded)	Adjusted Coefficient of Determination (adjusted r^2)	Standard Error of Estimate
Density (WD)	$y_{WD} = 0,00516174 \cdot \sigma F + 0,0184555 \cdot Ba F$	0.983	0.09
Compression parallel to grain (Hp)	$y_{Hp} = 0,459408 \cdot \sigma F + 1,63198 \cdot Ba F$	0.976	11.6
Modulus of rupture (MOR)	$y_{MOR} = 0,700873 \cdot \sigma F + 2,63503 \cdot Ba F$	0.968	17.9
Modulus of elasticity (MOE)	$y_{MOE} = 45,7621 \cdot \sigma F + 199,099 \cdot Ba F$	0.948	1655.2

deviate slightly. The same author states that the properties of certain species of trees within the same genus depend on many factors, so such variations are expected.

Multiple regression tests resulted in four successful models for each wood property (Table 2). In general, the obtained high values show that individual, as well as a combination of fractometric measurements, can be successfully used in the assessment of the investigated properties of wood. The highest value of the coefficient of determination was obtained when estimating the density of wood, and the lowest when determining the MOE.

The compressive strength parallel to grain and the fracture angle of the core samples were statistically determined as important variables that can influence the assessment of wood properties. Their influence is positive, while radial bending strength proved to be a parameter that is not statistically significant. This finding coincides with the results presented by Matsumoto *et al.* (2010). On the other hand, Tang *et al.* (2016) pointed out that the best indicators of tree strength determined using a fractometer are compressive strength parallel to the fibers and bending strength. The same authors reported that there is a dependence between these two properties and that their relationship depends on the wood species. The obtained values of r^2 in this paper indicate that the models are very successful in describing the data: however, it is still necessary to observe this in practice (and on much more samples) before reaching final conclusions. Therefore,

the results of future researches should answer the question of the efficiency and accuracy of the models.

CONCLUSION

The paper examines the basic properties of the northern red oak wood (wood density, compressive strength in parallel to grain and bending properties) as well as the relationship between fractometric measurements obtained on the core sample (compressive strength parallel to grain, radial bending strength and fracture angle) and physical and mechanical properties of wood.

The obtained results show that the values of the investigated properties are within literature data for this tree species. The determined strength values are similar to the previously reported data for sessile and pedunculate oak, while the average values of density and modulus of elasticity deviate, but not significantly. Statistical analysis showed that radial bending strength cannot be used as a reliable parameter in assessing wood quality, while the relationship between compressive strength and fracture angle and properties of northern red oak wood was found, with a coefficient of determination from 0.945 to 0.990. The primary advantage of the obtained models is the ability to predict the quality of wood before cutting trees, which could positively affect the optimal yield and further processing of wood. The presented results indicate which parameters

measured on the live tree give the best picture of the quality of wood.

Considering the very scarce literature in Serbia on the properties of the northern red oak wood, the research contributes to the knowledge of the variability of physical and mechanical properties of wood of this introduced oak species, as well as the relationship between properties and fractometric measurements established on oak trees.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Chiu C.M., Wang S.Y., Lin, C.J., Yang, T.H., Jane, M.C.(2006): Application of the fractometer for crushing strength: juvenile-mature wood demarcation in Taiwan (Taiwan cryptomerioids). *Journal of wood science* 52(1): 9-14.
- Ganesan S.K., Hamid M. A.(2010): Survey of wood strength properties of urban trees in Singapore using the Fractometer II, *Journal of tropical forest science* 22(1): 97–105.
- Gantz C.H.(2002): Evaluating the efficiency of the resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species. MSc Thesis. North Carolina State University. Raleigh. (manuscript)
- Genet A., Auty D., Achim A., Bernier M., Pothier D., Cogliastro A.(2013): Consequences of faster growth for wood density in northern red oak (*Quercus rubra* Liebl.). *Forestry*86(1): 99-110.
- Green D.W., McDonald K.A. (2007): Investigation of the mechanical properties of red oak 2 by 4's. *Wood and fiber science* 25(1): 35-45.
- Gruber V.F., Hagermann H.(2000): Comparison of the bending solidities of European beech, black poplar, Norway spruce and Douglas fir using DIN 52186 and Fractometer I methods, *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 171: 137-144.
- Gubka K., Špišák J. (2010): Prirodzená obnovaduba červeného (*Q. rubra* L.) navýskumných plochách Smerovce (LS Šahy). In Knott R., Peňáz J., Vaněk P. (eds). *Pěstování lesů v nížších vegetačních stupních*. Brno, Mendel University in Brno 30–34.
- Hu W., Chen B., Zhang T.(2021): Experimental and numerical studies on mechanical behaviors of beech wood under compressive and tensile states. *WOOD RESEARCH* 66(1):27-37.
- Isajev V., Vukin M., Ivetić V. (2006): Unošenje drugih vrsta drveća u hrastove šume sa posebnom namenom u Srbiji. *Šumarstvo* 58(3): 29-46.
- Ishiguri F., Matsumoto K., Kuwano M., Ohno H., Kameyama Y., Iizuka K., Yoshizawa N. (2011): Relationship between compressive strength of core samples measured by Fractometer and compressive properties of full size short columns in sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). *Bulletin of the Utsunomiya University Forests*, (47) 35-40.
- Lazarević V. (2020): Forestry in the Republic of Serbia in 2019. Statistical Office of the Republic of Serbia. Belgrade
- Lin C. J., Wang S. Y., Lin F. C., Chiu C. M. (2003): Effect of moisture content on the drill resistance value in Taiwan plantation wood, *Wood Fiber Sci* 35:234–238.
- Matheny N. P., Clark J. C., Attewell D., Hillery K., Graham A. W., Posner G. (1999): Assessment of fracture moment and fracture angle in 25 tree species in the United States using the Fractometer, *Journal of Arboriculture* 25:18–23.
- Matsumoto, K. Ishiguri F., Iizuka K., Yokota S., Yoshizawa N.(2008): Evaluation of bending and compression strength of wood using fractometer. *Wood Industry* (Japan).
- Matsumoto K., Ishiguri F., Wahyudi I., Takashima Y., Shimizu K., Iizuka K., Yoshizawa N., (2010): Application of fractometer for wood property evaluation in five Indonesian plantation species, *Bulletin of the Utsunomiya University Forests* 46: 1-6.
- Mattheck C. G., Breloer H., Bethge K. A., Albrecht W.A., Zipse A.W., (1995): Use of the fractometer to determine the strength of wood with incipient decay. *Journal of Arboriculture* 21: 105-112.
- 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. *Holzforchung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood* 50(4): 303-311.
- SRPS ISO 13061, (2018): Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination

- of density for physical and mechanical tests
Amendment 1
- Schwarze F.W. M.R., Lonsdale D., Mattheck C. (1995): Detectability of wood decay caused by *Ustulina deusta* in comparison with other tree-decay fungi, *Eur. J. For. Path.*, 25: 327–341.
- Šoškić B., Govedar Z., Todorović N., Petrović D. (2007): Osnovna fizička svojstva drveta smrče (*Picea abies* Karst.) iz kultura. *Glasnik Šumarskog fakulteta* 96: 97-110.
- Šoškić B., Popović Z. (2002): *Svojstva drveta*. Šumarski fakultet, Beograd. 181 pp.
- Tang A.M.C., Liao W.H. Chu, L.M. (2016): Evaluating wood strength properties of subtropical urban trees using fractometer II, *Journal of Tropical Forest Science* 28: 249–259.
- Toong W., Ratnasingam J., Roslan M.K.M., Halis R. (2014): The prediction of wood properties from anatomical characteristics: The case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources*9(3) : 5184-5197.
- Uzategui M.G.C., Seale R.D., França F.J.N.(2020): Physical and mechanical properties of clear wood from Red oak and White oak. *BioResources*15(3): 4960-4971.
- Vansteenkiste D., De Boever L., Van Acker J. (2005): Alternative processing solutions for red oak (*Quercus rubra*) from converted forests in Flanders, Belgium. In : *Proceedings of the COST Action E44 Conference on Broad Spectrum Utilization of Wood at BOKU Vienna, Austria, June 14-15, 2005* (pp. 13-26). Universität für Bodenkultur Wien.

