

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ШУМАРСКОГ ФАКУЛТЕТА

ВЕЋУ ОДСЕКА ЗА ТЕХНОЛОГИЈЕ ДРВЕТА

ОВДЕ

Предмет: Извештај Комисије о оцени израђене докторске дисертације кандидаткиње Иване М. Живановић

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. Орган који је именовао (изабрао) комисију и датум:
Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Шумарског факултета број 01-2/130 од 14.07.2021. године, усвојена је научна заснованост теме докторске дисертације кандидаткиње дипл. инж. Иване Живановић под насловом: „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“. За ментора је одређен: др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду – Шумарског факултета. На основу поднетог рукописа докторске дисертације, Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Шумарског факултета, број 01-2/91 од 16.07.2025. године, образована је Комисија за оцену израђене дисертације.

2. Састав комисије (уз навођење уже научне области и датума последњег избора у звање за сваког члана)

- 1) др Горан Милић, редовни професор, научна област: Биотехничке науке, ужа научна област: Примарна прерада дрвета, Универзитет у Београду, Шумарски факултет (изабран: 12.5.2021.)
- 2) др Бранко Стајић, редовни професор, научна област: Биотехничке науке, ужа научна област: Планирање газдовања шумама, Универзитет у Београду, Шумарски факултет (изабран: 12.5.2021.)
- 3) др Душан Јокановић, ванредни професор, научна област: Биотехничке науке, ужа научна област: Семенарство, расадничарство и пошумљавање, Универзитет у Београду, Шумарски факултет (изабран: 9.11.2021.)
- 4) др Алеш Страже, ванредни професор, научна област: Наука о дрвету и лигноцелулозним композитима у технологији дрвета, Универзитет у Љубљани, Биотехнички факултет (изабран: 31.1.2022.)
- 5) др Макс Мерела, ванредни професор, научна област: Наука о дрвету и лигноцелулозним композитима у технологији дрвета, Универзитет у Љубљани, Биотехнички факултет (изабран: 20.6.2022.)

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме: Ивана, Миомир, Живановић
2. Датум и место рођења, општина, држава: 17.12.1977. године, Београд, Република Србија
3. Датум одбране, место и назив дипломског рада: 02.07.2003, Београд, „Високофреквентно вакуумско сушење дрвета“, Универзитет у Београду - Шумарски факултет

III УВОД

Хронологија одобравања и израде дисертације:

- Кандидаткиња, дипл. инж. шумарства за прераду дрвета, Ивана М. Живановић, уписала је докторске студије школске 2017/18. године
- Одлуком Наставно-научног већа Шумарског факултета, број 01-2/130 од 14.07.2021. године, за ментора докторске дисертације, под називом „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“ одређен је др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарског факултета.
- Одлуком Наставно-научног већа Шумарског факултета, број 01-2/102 од 22.07.2020. године, образована је Комисија за одбрану пројекта докторске дисертације под називом: „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“ у саставу:
др Небојша Тодоровић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,
др Горан Милић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,
др Ранко Попадић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета;
- Пројекат докторске дисертације под називом: „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“, кандидаткиња је одбранила 21.09.2020. године пред комисијом у саставу:
др Небојша Тодоровић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,
др Горан Милић, ред. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,
др Ранко Попадић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета;
- Одлуком Наставно-научног већа Шумарског факултета, 01-2/130 од 14.07.2021. године, усвојена је научна заснованост теме докторске дисертације под називом „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“. За ментора је предложен: др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду – Шумарског факултета
- Одлуком Већа научних области биотехничких наука број 03-7774/1 од 22.07.2021. године, дата је сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Шумарског факултета о прихватању теме докторске дисертације под називом „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“. За ментора је одређен: др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду – Шумарског факултета

– Одлуком Наставно-научног већа Шумарског факултета, број 01-2/91 од 26.05.2021. године, образована је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом: „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“, у саставу:

др Небојша Тодоровић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,

др Драгица Вилотић, ред. проф. Универзитет у Београду, Шумарског факултета,

др Ранко Попадић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,

др Бранко Стајић, ванр. проф. Универзитета у Београду, Шумарског факултета,

др Алеш Страже, ванредни професор, Универзитет у Љубљани, Биотехнички факултет

3.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада ужој научној области Примарна прерада дрвета у оквиру дисциплине Технологије дрвета, област Биотехничке науке. За ментора докторске дисертације именован је др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду – Шумарског факултета, Ужа научна област Примарна прерада дрвета (изабран 12.06.2018. године) др Небојша Тодоровић, редовни професор Универзитета у Београду – Шумарског факултета поседује следеће компетенције за вођење докторске дисертације:

Todorović, N., Popović, Z., Milić, G. (2015). Estimation of quality of thermally modified beech wood with red heartwood by FT-NIR spectroscopy, *Wood Science and Technology*, Vol. 49, br. 3, str. 527-549. (M21a)

Todorović N., Popović Z., Milić G., Veizović M., Popadić R. (2022): Quality evaluation of heat-treated sessile oak (*Quercus petraea* L.) wood by colour and FT-NIR spectroscopy, *Wood Material Science & Engineering*, published online Nov 2020; DOI: 10.1080/17480272.2020.1847188 (M21a)

Josifovski, A., Todorović, N., Milošević, J., Veizović, M., Pantelić, F., Aškrabić, M., Vasov, M., Rajčić, A. (2023). An Approach to In Situ Evaluation of Timber Structures Based on Equalization of Non-Destructive and Mechanical Test Parameters, *Buildings*, Vol. 13, br. 6, (M21)

Rančić, M.; Popović, M., Milić, G., Todorović, N., Veizović M., Gavrilović-Grmuša, I., (2024): The effect of the beech wood steaming condensate on curing behaviour of urea-formaldehyde adhesive, *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 82, br. 6, str. 2137-2153 (M21)

Milić, G., Rančić M., Todorović, N., Živanović, N., Orčić, D., Simin, N. (2024): Walnut wood steaming chemical profile and antioxidant activity of the condensate to assess the potential application, *Wood Science and Technology*, Vol. 58, br. 4, str. 1605-1628. (M21a)

Према бази Google Scholar, др Небојша Тодоровић, редовни професор, има 339 хетероцитата и Хиршов индекс 8.

IV ОПИС ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација под насловом „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“ садржи укупно 230 страна, од чега је 152 стране текста, 26 страна литературе и 52 стране прилога. Докторска дисертација садржи 97 табела и 90 слика. Списак релевантне литературе, везане за област истраживања, садржи 226 литературна извора. На почетку текста докторске дисертације, налазе се кључне документационе информације и резиме на српском и енглеском језику, са кључним речима. Текст је подељен у девет поглавља, са припадајућим потпоглављима, која су структурирана тако да представљају посебне, али логички повезане целине:

1. УВОД (1–5 стр.)
2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА (6–8 стр.)
3. ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА (9–31 стр.)
4. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА (32–33 стр.)
5. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА (34–58)
6. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА (59–139 стр.)
7. ЗАКЉУЧЦИ (140–148 стр.)
8. БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА (149–151)
9. ЛИТЕРАТУРА (152–177 стр.)
10. ПРИЛОЗИ (178–230)

После деветог поглавља, дате су потребне изјаве кандидата о ауторству, истовестности штампане и дигиталне верзије рада, као и овлашћење о начину коришћења. Дисертација је написана ћириличним писмом, у складу са Упутством за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду.

Кратак приказ појединачних поглавља:

Наслов докторске дисертације је јасно конципиран и одговара дефинисаном предмету и постављеним циљевима истраживања. Наслов истиче тематику и садржај дисертације.

1. УВОД

У првом поглављу детаљно је приказан род *Quercus* L. (Fagaceae), са посебним нагласком на црвени храст (*Quercus rubra* L.), врсту која је у Европу унета крајем XVII века и која је данас присутна у мањем обиму у Србији, али са значајним потенцијалом за пошумљавање и дрвну индустрију. Кандидаткиња истиче еколошке и биолошке предности ове врсте, као што су висока виталност, отпорност на абиотичке и биотичке факторе и добра прилагодљивост различитим стаништима, али и могућност индустријске употребе због повољних технолошких својстава.

У тексту је наглашен значај испитивања својстава дрвета црвеног храста у нашим условима, с обзиром на то да је у Србији овој теми до сада посвећена веома мала пажња. Кандидаткиња указује на значај квалитетних података о густини, чврстоћи и другим физичко-механичким својствима дрвета, који представљају основу за рационално коришћење сировине и планирање производње материјала са додатом вредношћу.

Посебан акценат у овом поглављу дат је на развоју и примени недеструктивних метода испитивања дрвета. Након кратког осврта на традиционалне методе (визуелно оцењивање, машинско класификовање и мерење влажности), приказан је историјат и класификација недеструктивних техника са освртом на релевантну литературу. Кандидаткиња посебно истиче акустичне методе као један од најефикаснијих приступа за повезивање динамичког модула еластичности са физичким и механичким својствима дрвета, као и примену фрактометра, који омогућава добијање вредних података о притисној и савојној чврстоћи.

Увод објашњава потребу за недеструктивним и полудеструктивним методама процене квалитета дрвета у условима теренског рада; довољно је информативан, са јасним прелазом на предмет и циљеве истраживања.

2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

У другом поглављу кандидаткиња прецизно дефинише предмет и циљ истраживања, као и методе које су коришћене. Истраживање је усмерено на црвени храст (*Quercus rubra* L.), интродуковану врсту пореклом из Северне Америке, која се последњих деценија узгаја у Србији у виду плантаже и мешовитих састојина. Као истраживачки локалитети одабрани су Бруске шуме, Степин и Дебели лог, са по три репрезентативна стабла, што укупно чини девет стабала на којима је спроведена анализа.

Кандидаткиња као главни циљ рада наводи испитивање физичко-механичких и анатомских својстава дрвета црвеног храста, као и могућности њихове процене применом савремених недеструктивних (акустични томограф – АТ) и полудеструктивних метода (фрактометар – FR). При томе, посматране варијабле обухватају брзину звука у различитим правцима (радијалном, тангенцијалном и укупну просечну), затим густину, притисну и савојну чврстоћу, модул еластичности, као и низ анатомских показатеља (ширину година, удео касног дрвета, димензије влакана и њихову бројност).

Посебна пажња у овом поглављу посвећена је практичном и научном значају теме. Кандидаткиња наглашава да црвени храст, захваљујући брзом расту, прилагодљивости и добрим технолошким својствима, представља врсту са великим потенцијалом за широку индустријску примену – од производње намештаја и фурнира, до конструктивних елемената и железничких прагова. Указује се и на значај његове примене у Србији, где постоји изражен недостатак квалитетне сировине домаћих храстова (*Q. robur* L.; *Q. petraea* L.). У том контексту, развој поузданих модела за теренску процену квалитета дрвета пре сече може бити од великог значаја за шумарску праксу и примарну прераду дрвета.

3. ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА

У литературном прегледу представљена су досадашња сазнања о црвеном храсту и методама процене својстава дрвета. Поглавље је довољно обухватно за потребе дисертације и логички структурирано у три целине: од ширег контекста распрострањености и значаја врсте, преко њених својстава, до технолошких могућности за процену квалитета.

Кандидаткиња указује да је црвени храст (*Quercus rubra* L.) у Европу унет као декоративна врста, али да је због брзог раста и адаптабилности врло брзо нашао значајно место у шумарству. Данас се узгаја на преко 350.000 ha у различитим европским земљама, а посебно велике површине налазе се у Украјини, Француској, Немачкој, Пољској, Мађарској, Словенији и Бугарској. У Србији су његове састојине присутне на више локалитета: Авала, Шупља стена, Степин лог, подручја Колубаре, као и у околини Ниша, Крушевца, Крагујевца и Алексадровца. Истакнуто је да се ова врста све више користи као замена за домаће храстове који показују симптоме сушења и смањеног прираста. Такође је наглашен њен економски потенцијал за дрвну индустрију, јер задовољава захтеве тржишта за квалитетном сировином.

У другом потпоглављу приказана су досадашња истраживања својстава црвеног храста. Показано је да се она у великој мери могу поредити са својствима домаћих врста храста, уз неке предности у погледу бржег раста и отпорности на неповољне услове. Кандидаткиња наводи радове који су обухватили мерење густине, притисне и савојне чврстоће, модула еластичности и других параметара, али и анатомске показатеље као што су ширина годова, удео касног дрвета и карактеристике влакана. Ови подаци представљају основу за разумевање технолошког потенцијала врсте, посебно у индустрији намештаја, фурнира, шперплоча и конструктивних елемената.

У трећем потпоглављу дат је систематичан приказ метода које омогућавају процену квалитета дрвета без класичних лабораторијских анализа. Посебно је наглашен развој акустичних метода које користе брзину звука као показатељ динамичког модула еластичности, густине и могућих оштећења дрвета. Кандидаткиња приказује и развој полудеструктивних метода, са посебним освртом на примену фрактометра, уређаја који омогућава добијање вредности притисне и савојне чврстоће извртка као индикатора квалитета дрвета.

4. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Циљеви истраживања могуће је квантификовати и обухватају:

1. Утврђивање анатомских, физичких и механичких својстава дрвета црвеног храста, као алохтоне врсте у Србији;
2. Одређивање зависности између параметара добијених помоћу фрактометра и анализираних физичко-механичких својстава дрвета црвеног храста;
3. Одређивање зависности између брзине провођења звука и анализираних физичко-механичких својстава дрвета црвеног храста;
4. Развијање статистичких модела за полудеструктивну и недеструктивну процену својстава дрвета у дубећим стаблима црвеног храста.

На основу претходних сазнања, релевантне литературе и резултата прелиминарних мерења, постављене су следеће хипотезе:

X1: Постоји статистички значајна линеарна зависност између брзине звучних таласа у радијалном и тангенцијалном правцу и савојне чврстоће дрвета црвеног храста.

X2: Постоји статистички значајна корелација између вредности притисне чврстоће добијене фрактометром и лабораторијски одређене притисне чврстоће за узорке црвеног храста.

X3: Модел засновани на подацима са фрактометра објашњавају већу варијансу модула еластичности дрвета црвеног храста у поређењу са моделима заснованим на акустичној томографији.

X4: Удаљеност брзине звука од средњих вредности (V_r и V_t) значајно се разликује у зависности од удаљености од сржи (јувенилно/зрело дрво) и повезана је са дужином и бројем дрвних влакана.

X5: Комбиновани модели који укључују варијабле из фрактометрије (σ_r , угао лома, савојна чврстоћа) и акустичне томографије (B_r , B_t) имају виши степен поузданости у процени квалитета дрвета (изражен кроз MOR, MOE и густину), него модели базирани само на једној групи предиктора ($R^2_{\text{комбиновани}} > R^2_{\text{појединачни}}$).

5. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Ово поглавље обухвата:

- Опис истраживаног материјала и локалитета,
- Лабораторијско утврђивање физичко-механичких и анатомских својстава,
- Примену метода недеструктивног и полудеструктивног испитивања,
- Статистичку обраду података и моделовање.

Истраживања су спроведена на девет стабала црвеног храста, старости преко 40 година, која потичу са три локалитета у Србији: Бруске шуме, Степин луг и Дебели луг. Са сваког локалитета одабрана су по три репрезентативна стабла, што је омогућило упоредну анализу у различитим условима станишта.

Кандидаткиња је прецизно дефинисала критеријуме за избор стабала и описала услове средине, чиме је створена добра основа за валидност резултата.

Из изабраних стабала црвеног храста, са две висине (1,3 и 4 m), изрезани су трупчићи дужине 50 cm и котурови дебљине 10 cm. Параметри акустичног томографа као и фрактометра су такође одређени измерени на 1,3 и 4 m. Укупно је припремљено 18 котурова и припремљено преко 750 узорака за испитивање анатомских и физичко-механичких својстава дрвета.

За узимање инкрементних извртака из стабала, пречника 5 mm, који су затим коришћени у фрактометријским испитивањима и анализама својстава дрвета, коришћено је Pressler-ово сврдло.

Физичко-механичка својства дрвета су одређена коришћењем СРПС ЕН стандарда. Истражена је густина као најважније физичко својство дрвета, а затим и основна механичка својства: чврстоћа на притисак паралелно са влакнима, чврстоћа на савијање (*modulus of rupture* - MOR) и модул еластичности при савијању (*modulus of elasticity* - MOE). Поред физичко-механичких својстава одређене су основне анатомске карактеристике: ширина прстена прираста, учешће касног дрвета, димензије дрвних влакана (дужина и дебљина ћелијског зида), као и број влакана по јединици површине.

При одређивању својстава дрвета коришћени су: кљунасто помично мерило за прецизно одређивање димензија, електронска вага високе прецизности за утврђивање масе, универзалне машине за испитивање механичких својстава дрвета и сушнице за сушење узорака.

Светлосни микроскоп са системом за дигитално снимање, микротом за припрему танких резова, као и софтвер за морфометријске анализе (*ImageJ*, *Leica LAS*) су коришћени за утврђивање микроскопске грађе дрвета.

Лабораторијски добијени подаци су служили и за верификацију и поређење са резултатима добијеним у процени својстава дрвета коришћењем акустичног томографа и фрактометра.

Акустични томограф (AT), као недеструктивни алат, коришћен је за снимање попречног пресека стабала и мерење брзине звука у различитим правцима – радијалном (V_r), тангенцијалном (V_t) и просечној вредности у целом пресеку (V_d/V_g).

Фрактометар (FR) је примењен као полудеструктивна метода и то стандардизованим поступцима. На извртцима су одређени притисна чврстоћа паралелно са влакнима (σ_p), савојна чврстоћа (MOR) и угао лома при савијању. Ови

параметри су касније упоређивани са подацима добијеним лабораторијским испитивањима.

Резултати мерења основних анатомских и физико-механичких својстава обрађени су применом дескриптивних и униваријантних статистичких метода. Значајност статистичких разлика између средњих вредности на различитим локалитетима, као и у оквиру истог локалитета (по стаблима), утврђена је анализом варијансе (ANOVA) и post-hoc Фишеровим тестом најмањих значајних разлика (LSD), или применом Студентовог t-теста (за средње вредности по трупчићу). За поређење својстава дрвета добијених стандардним деструктивним методама и оних утврђених применом фрактометра и акустичног томографа, примењене су дескриптивна и мултиваријантна статистичка анализа.

Пре спровођења анализе вишеструке регресије, варијабле су тестиране на нормалност и колинеарност, чиме је потврђено да је за даљу обраду података могуће применити мултиваријантне методе. Коефицијент детерминације, стандардна грешка предвиђања и однос перформанси према девијацији (RPD, *ratio of performance to deviation*) израчунати су и коришћени за поређење модела, док је за процену тачности предиктивног модела коришћен резидуални предиктивни интерквartilни опсег (RPIQ, *ratio of performance to interquartile distance*)

Комисија сматра да су примењени методи и поступци приказани детаљно, да су адекватни предмету рада и да омогућавају поновљивост. Избор наведене опреме омогућио је да се истраживање ослони на методе које су признате у европској и светској пракси процене својстава дрвета. Комбинацијом Arbotom®-а и Fractometer II-а обезбеђени су подаци недеструктивног и полудеструктивног мерења, док је лабораторијска анализа обезбедила референтне податке за верификацију.

6. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА ДИСКУСИЈА

Кандидаткиња је у овом поглављу приказала свеобухватне резултате физичко-механичких и анатомских својстава, као и параметре утврђене недеструктивном и полудеструктивном методом на узорцима црвеног храста са три различита локалитета у Србији. Резултати су критички упоређени како по локалитетима и појединачним стаблима, тако и са подацима из релевантне литературе, што је омогућило целокупну дискусију о потенцијалу ове врсте за употребу у домаћој дрвној индустрији, али и о могућностима процене њеног квалитета у теренским условима.

Добијени резултати показују да се црвени храст у Србији одликује добрим физичко-механичким и анатомским својствима која га сврставају у квалитетне лишћарске врсте дрвета. Вредности густине и механичких својстава блиске су подацима из литературе, док су анатомски показатељи (ширина година, удео касног дрвета, димензије влакана) у оквиру распона карактеристичних за врсте из рода *Quercus*.

Примена недеструктивне (акустични томограф) и полудеструктивне (фрактометар) методе показала је релативно добру усклађеност са класичним лабораторијским мерењима. То указује да се ове методе могу успешно користити за брзу процену квалитета дрвета пре обарања стабала, чиме се повећава ефикасност планирања и експлоатације.

Посебно је значајно што црвени храст у нашим условима достиже вредности својстава које га сврставају у групу комерцијално интересантних врста, чиме може да делимично ублажи дефицит у сировини домаћих врста храстова.

6.1 Анализа макроскопских и микроскопских својства дрвета црвеног храста

Анализа анатомских параметара потврдила је прстенасто-порозну структуру дрвета са следећим својствима:

- Ширина прстенова прираста стабала у јувенилној зони износи у просеку од 2,48 до 3,37 mm по локалитетима, док је у зони зрелог дрвета ширина прстена статистички значајно већа и креће се од 2,86 до 5,60 mm.
- учешће зоне касног дрвета у просеку износи од 63,34% до 71,93 %, док површинско учешће срчевине просечно износи 92,50 % без значајне разлике између локалитета,
- дужина влакана у просеку износи од 1,10 до 1,91 mm за јувенилно, односно од 1,18 до 1,32 mm за зрело дрво, док је њихов број сличан код дрвета из Бруских шума и Дебелог Луга (у просеку 2061 влакно/mm² односно 1974 влакна/mm², респективно). Статистички значајно мањи број је утврђен код црвеног храста из Степиног луга - 1779 влакана/mm².

6.2 Анализа основних физичких и механичких својстава дрвета црвеног храста

Добијене вредности својстава су приближне литературним подацима о дрвету црвеног храста са подручја Европе и Америке.

- Лабораторијски је утврђено да густина, у апсолутно сувом стању влажности, износи по локалитетима просечно од 678 до 724 kg/m³ и да је најмања забележена код дрвета црвеног храста са подручја Степин луг. Варијабилност густине је ниска до умерена (CV=5,98-8,39%).

- Притисна чврстоћа паралелно с влакнима узоркованих стабала црвеног храста на истраживаним локалитетима је у просеку износила 58,92 МПа за Бруске шуме, 63,64 МПа за Дебели Луг и 56,53 МПа за Степин луг, а укупно гледано за сва три локалитета она у просеку износи 60,26 МПа.

- Савојна својства дрвета (модул еластичности и чврстоћа на савијање) су просечно најмање код дрвета са локалитета Бруске шуме (МОЕ - 9578,5 МПа; MOR - 118,4 МПа) и Степин Луг (МОЕ - 10825,2 МПа; MOR - 125,6 МПа), док је просечена вредност на локалитету Дебели Луг нешто већа и износи 11103,1 МПа за модул еластичности односно 131,81 МПа за чврстоћу на савијање.

Кандидаткиња је посебно анализирила варијабилност између стабала унутар истог локалитета. У Бруским шумама стабла су показала уједначене вредности густине и механичких параметара, што указује на хомогеније станишне услове. У Степином лугу примећене су значајне разлике између стабала, где су поједина стабла имала веома широке годове и нижу густину, док су друга показала већи удео касног дрвета и вишу чврстоћу. Оваква хетерогеност може се објаснити микростанишним условима и конкуренцијом међу стаблима. Просечне вредности за стабла у Дебелом лугу су углавном између вредности преостала два локалитета, али уз изражене разлике међу стаблима, што потврђује закључак да индивидуалне карактеристике значајно утичу на квалитет дрвета.

Добијене вредности својстава дрвета црвеног храста указују на приближну вредност квалитета и области употребе у оквиру граница утврђених за домаће најзаступљеније индустријске врсте из рода *Quercus* (*Q. petraea* L. – храст китњак и *Q. robur* L. – храст лужњак). Поређењем утврђених података о својствима дрвета са других шумских подручја у Европи (Redei et al., 2010; Nicolescu et al., 2018) може се закључити да дрво црвеног храста у Србији достиже сличне вредности квалитета, али са нешто већом варијабилношћу између локалитета. Ова варијабилност, наглашена и унутар истог локалитета, указује на значај индивидуалних карактеристика стабала и локалних станишних услова за квалитет дрвета.

6.3 Анализа својстава дрвета црвеног храста мерена фрактометром

Параметри добијени мерењем помоћу фрактометра износе у просеку од 33,02 до 37,83 МПа за притисну чврстоћу извртка, од 8,5 до 10,0 МПа за савојну чврстоћу у радијалном правцу и од 15,63 до 18,06° за угао лома при савијању.

Показало се да су резултати фрактометра у доброј корелацији са лабораторијским тестовима чврстоће и модула еластичности и потврђују налазе Rinn et al. (1996) и Chiu et al. (2006), који истичу применљивост фрактометра у процени механичких својстава стабала у теренским условима.

6.4 Анализа акустичних својстава дрвета црвеног храста утврђених применом акустичног томографа

Средња вредност брзине звука у радијалном правцу износи од 1193 до 2025 m/s, док се у тангенцијалном правцу креће од 1215 до 2225 m/s. Ови резултати корелирају са већим вредностима густине и уделом касног дрвета, што је у складу са запажањима *Auty et al.* (2008), који истичу да акустична својства добро одражавају анатомску структуру дрвета.

Вредности динамичког модула еластичности (MOE_d) се налазе у интервалу од 1358,37 до 3606,07 МПа. Ови резултати показују везу са вредностима густине и уделом касног дрвета у прстену прираста, што је такође у складу са запажањима *Auty et al.* (2008).

На основу спроведених анализа изведени су регресиони модели који описују зависност између резултата добијених акустичним томографом и фрактометром с једне стране, и лабораторијских вредности физичко-механичких својстава, с друге стране.

6.5 Утврђене корелације између својстава дрвета и параметара добијених помоћу фрактометра (FR):

Статистичком анализом утврђено је да су чврстоћа на притисак паралелно с влакнима и угао лома извртка важне варијабле на основу којих се могу проценити својства дрвета, док је за аксијалну чврстоћу на савијање показано да није значајна варијабла. Ови резултати се поклапају са налазима *Matsumoto et al.* (2010). С друге стране, *Tang et al.* (2016) наводе да су најбољи показатељи чврстоће дрвета одређени фрактометром: чврстоћа на притисак паралелно с влакнима и чврстоћа на савијање. Исти аутори истакли су зависност између ова два својства као и зависност њиховог односа од врсте дрвета.

Приказани резултати указују на то који параметри мерени на живом стаблу дају најпоузданију слику о квалитету дрвета. Узимајући у обзир веома оскудну литературу у Србији о својствима дрвета црвеног храста, ово истраживање доприноси познавању варијабилности физичко-механичких својстава дрвета ове интродуковане врсте храста, као и разумевању повезаности механичких својстава дрвета и фрактометријских мерења спроведених на стаблима храста.

6.6 Утврђене корелације између својстава дрвета и параметара добијених помоћу акустичног томографа

Анатомска својства показала су добре корелације на локалитетима Бруске шуме и Степин луг, док у Дебелом лугу није утврђена значајна повезаност. Најбоље корелације између средње брзине звука и механичких својстава дрвета добијене су на локалитету Бруске шуме. За узорке из Дебелог луга утврђена је умерено значајна повезаност између густине и средње брзине звука, док за механичка својства нису установљене значајне корелације. На локалитету Степин луг, корелације између свих анализираних својстава дрвета и брзине звука дају умерене до јаке вредности.

6.7. Поређење добијених модела применом фрактометра и акустичног томографа

Резултати указују да су модели базирани на фрактометријским мерењима у целини показали боље предиктивне перформансе у односу на моделе засноване на брзини звука. Коефицијенти детерминације за фрактометар крећу се између 0,93 и 0,96, док су код акустичних метода вредности у распону од 0,81 до 0,85. Најбоље слагање постигнуто је у предикцији чврстоће на савијање и то како применом фрактометра ($r^2 = 0,96$; RPIQ = 3,41; RPD = 3,45) тако и коришћењем звучних таласа ($r^2 = 0,85$; RPIQ = 2,18; RPD = 2,23), што потврђује високу осетљивост ових метода за процену онаведеног механичког својства. Комисија наглашава да су наведене вредности r^2 пре свега оријентационе, јер потичу из истог скупа података и ограниченог, хијерархијски организованог узорка.

Модул еластичности показао је нешто слабију предиктивну моћ, али је и даље у границама прихватљивости за прелиминарне процене. Дужина дрвних влакана и процентуално учешће касне зоне имају солидне RPIQ вредности (2.73 и 2.34), што указује на њихову поузданост у предикцији анатомских карактеристика дрвета.

Комбиновањем брзине звука у радијалном правцу и притисне чврстоће извртка добијен је најпоузданији модел за предвиђање модула еластичности при савијању. Ови резултати су у складу са истраживањима *Ishiguri et al.* (2012) и *Li et al.* (2016), који су такође утврдили да акустичне методе у комбинацији са полудеструктивним мерењима дају најбоље предиктивне исходе. Овај резултат указује да је интеграција више метода најбољи приступ за процену механичких својстава у теренским условима.

На основу свих добијених резултата може се закључити да је црвени храст у условима Србије врста са својствима упоредивим са традиционално коришћеним домаћим храстовима. Примена недеструктивних и полудеструктивних метода омогућава поуздану (у смислу скрининга) и практичну процену квалитета дрвета у теренским условима, што представља значајан допринос унапређењу методологије процене дрвне сировине у Србији, са потенцијалом примене и на друге врсте тврдых лишћара.

С обзиром да је предвиђање рађено на нивоу стабла, уз ограничен број стабала, при преношењу модела на друга стабла и локалитете треба очекивати шире интервале поузданости. Узорковање на две висине стабла обезбеђује основу за прелиминарну идентификацију својстава која се могу поузданије процењивати недеструктивним и полудеструктивним методама. Уочена хетерогеност унутар и између стабала, као и између локалитета, с једне стране налаже опрез при генерализацији, али с друге стране обухвата шири спектар услова и тако доприноси процени међустабалне варијабилности и потенцијалној преносивости резултата.

Добијени модели показују да је могуће развити једноставне, али употребљиве алате за предвиђање квалитета дрвета црвеног храста уз следеће практичне импликације:

- За оперативни скрининг квалитета на терену: акустични томограф, уз основну калибрацију на локалним условима омогућава брзу сегментацију стабала или делова стабла/дебла према ризику и квалитету;
- Фрактометар, као полудеструктивна метода, представља корисну допуну, јер чврстоћа извртка и угао лома дају додатну информацију о локалној отпорности и деформабилности,
- За предвиђање квалитета производа за дрвну индустрију (нпр. одређивање класа квалитета) потребна је додатна валидација и мерења у аксијалном правцу (аксијални таласи).

Апликативност резултата је од посебне важности, јер омогућава да се већ у састојини, пре сече, изврши селекција стабала погодних за производњу квалитетних производа. На тај начин:

- шумарска пракса добија могућност рационалнијег управљања засадима црвеног храста,
- дрвна индустрија стиче поузданију основу за планирање производње, а
- наука потврђује валидност интеграције акустичних и механичких метода у процени својстава дрвета.

7. ЗАКЉУЧЦИ

Кандидаткиња је у докторској дисертацији приказала обимна и систематска истраживања својстава дрвета црвеног храста (*Quercus rubra* L.) гајеног у неким шумским састојинама у Србији. Применом класичних лабораторијских метода, анатомских анализа, као и теренских недеструктивних/полудеструктивних техника (акустичка томографија и фрактометрија), добијени су свеобухватни резултати који омогућавају детаљну процену квалитета ове врсте.

Резултати показују да црвени храст у Србији достиже вредности својстава који су упоредиви са онима у централноевропским земљама, при чему су уочене одређене разлике између локалитета и стабала унутар локалитета. Претпоставка је да су ове разлике резултат микростанишних услова и индивидуалних карактеристика. Акустична мерења (средње брзине у попречном пресеку) показују корисне везе пре свега са густином и МОЕ, док су везе са MOR и притиском чврстоћом варијабилније; фрактометријски параметри (чврстоћа на притисак извртка, угао лома) показали су потенцијал за процену појединих механичких својстава. Развијени су регресиони модели који омогућавају орјентациону процену својстава на основу теренских параметара; назначена је њихова примена превасходно у сврху брзог скрининга.

Научни допринос дисертације има и изразиту практичну вредност, јер указују на потенцијал црвеног храста као перспективне врсте за домаћу дрвну индустрију. Добијени резултати могу послужити као основа за планирање узгојних мера, као и за развој система за брзу и ефикасну процену квалитета дрвета у шумарској пракси.

Сагледано у целини, закључци су формулисани у складу са постављеним циљевима и обимом истраживања. Комисија оцењује да је најадекватније говорити о апликативном доприносу и моделима употребљивим за оперативни скрининг, уз препоруку да се за потребе шире примене спроведу независне валидације и проширење узорка.

8. БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

Добијени резултати у овом истраживању отварају бројна нова питања, па је оправдано разматрати правце даљих истраживања која би допунила и проширила постојеће знање, како о овој врсти, тако и о примењеним методама процене квалитета дрвета у дубећим стаблима. Кандидаткиња је поставила четири правца будућих експерименталних испитивања, а који се односе на:

- истраживања друге врсте дрвећа,
- снимање стабала током дужег временског периода и прикупљање података помоћу фрактометра и акустичног томографа,
- утврђивање корелације између акустичних и фрактометријских мерења са другим анатомским карактеристикама дрвета, и
- унапређење методолошких и статистичких приступа.

На крају, дипл. инж. Ивана Живановић истиче и да би будућа истраживања требало повезати са потребама индустрије намештаја и производа од дрвета. Разумевање својстава црвеног храста и могућност њихове брзе и недеструктивне процене било би од велике користи за практичну примену у примарној и финалној преради дрвета. На тај начин успоставила би се директна веза између научних истраживања и стварних потреба тржишта.

Све наведено показује да простор за будућа истраживања није само широк, већ и неопходан. Она треба да интегришу анатомске, физичко-механичке и еколошке аспекте, уз примену савремених технологија и аналитичких метода, како би се добила што прецизнија и поузданија слика о квалитету дрвета црвеног храста и његовом потенцијалу у шумарској пракси и дрвној индустрији.

9. ЛИТЕРАТУРА

У овом поглављу, кандидаткиња, Ивана М. Живановић, наводи 226 литературна извора који су суштински везани за проблематику истраживања. Треба истаћи да је кандидаткиња на правилан начин поменуте референце доводила у компаративни контекст са својим истраживањем и на тај начин показала завидан степен оспособљености за научно-истраживачки рад. Велики број литературних навода је новијег датума. Референце су поређане по абецедном редоследу.

V ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“, кандидаткиње дипл. инж. Иване Живановић, представља самостално и оригинално научно истраживање које обрађује актуелну тему у области науке о дрвету. Предмет истраживања – црвени храст (*Quercus rubra* L.), као економски и еколошки важна интродукована врста – анализиран је са становишта његових физичко–механичких и анатомских својстава, као и кроз могућности њихове процене применом недеструктивне и полудеструктивне методе.

Истраживање је спроведено на три локалитета у Србији (Бруске шуме, Степин и Дебели луг), уз примену акустичног томографа, фрактометра и стандардних лабораторијских метода за испитивање својстава дрвета. Прикупљени експериментални подаци обрађени су уобичајеним статистичким поступцима, а резултати критички анализирани и упоређени са подацима из домаће и стране литературе. На тај начин омогућено је доношење релевантних закључака о потенцијалу црвеног храста у домаћим условима.

Практични значај дисертације огледа се у показаној могућности примене акустичног томографа и фрактометра за брзу теренску процену квалитета дрвета у стаблу. Ови налази су корисни за газдовање шумама, јер омогућавају рационалније планирање сече и ефикасније коришћење ресурса, уз напомену да се (још увек) ради о поступцима прелиминарне процене (“скрининга”) који не замењују стандардна лабораторијска испитивања.

Кандидаткиња је истраживање спровела самостално, са високим степеном стручности и посвећености. Примењена методологија је савремена, а циљеви и полазне хипотезе и циљеви су постављени реално. Дискусија је јасно изложена уз аргументовано поређење добијених резултата са налазима других аутора који су се бавили сличном проблематиком. Дисертација представља оригиналан и самосталан научно-истраживачки рад, писана је разумљивим језиком и стилем, са јасним и логичним методолошким распоредом материје.

VI ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Докторска дисертација „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“ доноси доприносе у области науке о дрвету, шумарства и примењених метода недеструктивног испитивања.

Научни допринос рада огледа се у:

- утврђивању физичко–механичких и анатомских својстава црвеног храста у условима Србије, по локалитетима
- доказаној повезаности између теренских недеструктивно/полудеструктивно одређених параметара са лабораторијским резултатима,
- развоју статистичких модела за предвиђање квалитета дрвета на основу недеструктивних теренских мерења,
- препорукама за примену ових метода у пракси процене квалитета дрвета, као и за оптимално коришћење црвеног храста у домаћој дрвној индустрији.

Дисертација показује да се комбинација недеструктивних и полудеструктивних метода може успешно применити у пракси за процену квалитета дрвета у дубећим стаблима.

Имајући у виду важеће нормативе који као обавезан услов постављају објављен рад из дисертације у часопису међународног значаја, Комисија констатује да је кандидаткиња, дипл. инж. Ивана Живановић, као први аутор, објавила научни рад у међународном часопису (категирија M23): Živanović I., Todorović N., Šurjanac N., Jovanović F. (2023). Modeling quality of northern red oak (*Quercus rubra* L.) wood using fractometric measurements. Fresenius Environmental Bulletin and Advances in Food Sciences 32, 08/2023, 2901-2908.

<https://unilib.phaidrabg.rs/open/o:3598>

VII ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Комисија сматра да докторска дисертација дипл. инж. Иване Живановић под насловом „Могућност процене квалитета дрвета у стаблима црвеног храста (*Quercus rubra* L.) применом акустичног томографа и фрактометра“ представља самостално и оригинално дело аутора у оквиру области за коју је одобрена Пријава теме. Дисертација је урађена у складу са постављеним циљем и програмом истраживања. Кандидаткиња је у уводу и прегледу литературе приказала релевантна истраживања, јасно формулисала циљеве и хипотезе, док су примењене методе адекватне предмету рада. Резултати су приказани и образложени на примерен начин, а у дискусији су стављени у шири контекст постојећих сазнања.

Исправке извршене након увида Комисије допринеле су уједначавању терминологије, јединица и ознака, прецизнијем приказу резултата по локалитетима и јаснијем навођењу методолошких ограничења. Комисија констатује да допринос дисертације има превасходно апликативни и локално релевантан карактер: систематизована су анатомска, физичка и механичка својства црвеног храста на испитиваним локалитетима и предложени су оријентациони модели недеструктивне процене засновани на фрактометријским и акустичним мерењима. Уочена ограничења (обим узорка по стаблу/локалитету,

хијерархија података и домет валидације модела) наведена су и у примењеној мери узета у обзир у коначном тексту, те не доводе у питање заснованост главних налаза у оквиру спроведеног истраживања.

Узимајући у обзир све претходно – укључујући добијене резултате, њихов обим и остварени допринос – Комисија оцењује да дисертација у садашњој верзији испуњава стандарде за докторску дисертацију у одговарајућој научној области.

На основу тога, Комисија предлаже Надлежном већу да прихвати ову оцену и омогући кандидаткињи јавну одбрану докторске дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Горан Милић, редовни професор,
Универзитета у Београду, Шумарског факултета

др Бранко Стајић, редовни професор
Универзитета у Београду, Шумарског факултета

др Душан Јокановић, ванредни професор,
Универзитета у Београду, Шумарског факултета

др Алеш Страже, ванредни професор,
Универзитет у Љубљани – Биотехнички факултет

др Макс Мерела, ванредни професор
Универзитет у Љубљани – Биотехнички факултет