

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. Орган који је именовано (изабрао) комисију и датум:
Одлуком Наставно-научног већа Шумарског факултета Универзитета у Београду бр. 01-2/187 од 25.12.2022. године, образована је Комисија за оцену израђене докторске дисертације кандидата **маст. инж. шум. Марка Казимировића**, под насловом: **„СИМУЛАТОР РАСТА ШУМСКИХ СТАБАЛА И САСТОЈИНА „РАСТко“: РАЗВОЈ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ЗА БУКВУ У ЗАПАДНОЈ СРБИЈИ“**.
2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датум избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:
1. **др Бранко Стајић**, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарског факултета, уже научна област Планирање газдовања шумама, изабран у звање 31. марта 2021.
 2. **др Дамјан Пантић**, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарског факултета, уже научна област Планирање газдовања шумама, изабран у звање 10. јуна 2015. године.
 3. **др Оливера Кошанин**, редовни професор Универзитета у Београду - Шумарског факултета, уже научна област Екологија шума, заштита и унапређивање животне средине, 28. септембра 2022. године.
 4. **др Ненад Петровић**, ванредни професор Универзитета у Београду - Шумарског факултета, уже научна област Планирање газдовања шумама, изабран у звање 11. октобра 2022.
 5. **др Војислав Дукић**, редовни професор Универзитета у Бањој Луци - Шумарског факултета, уже научна област Планирање газдовања шумама, изабран у звање 29. септембра 2022. године

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:
Марко, Мирослав, Казимировић
2. Датум и место рођења, општина, држава:
26.08.1990, Зворник, Република Српска (БиХ)
3. Датум одбране, место и назив магистарске тезе/мастер рада:
24.10.2014. Универзитет у Београду Шумарски факултет; мастер рад „Прираст биомасе букве у састојинама на подручју Мајданпека“
4. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука/мастера:
Планирање газдовања шумама

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

СИМУЛАТОР РАСТА ШУМСКИХ СТАБАЛА И САСТОЈИНА „РАСТко“: РАЗВОЈ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ЗА БУКВУ У ЗАПАДНОЈ СРБИЈИ

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна поглавља, слика шема, графикона и сл.

Докторска дисертација под насловом „СИМУЛАТОР РАСТА ШУМСКИХ СТАБАЛА И САСТОЈИНА „РАСТко“: РАЗВОЈ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ЗА БУКВУ У ЗАПАДНОЈ СРБИЈИ“ садржи укупно 228 страна, од чега је: 207 стране текста и 20 страна литературе. Докторска дисертација садржи 30 табела, 19 слика и 51 графикон. Списак релевантне литературе, везане за област истраживања, садржи 295 литературних референци. На почетку текста докторске дисертације, налазе се кључне документационе информације и резиме, на српском и енглеском језику, са кључним речима.

Текст је подељен у 10 поглавља, која су структурирана тако да представљају посебне, али логички повезане целине:

1. УВОД (1-8 стр.)
2. ПРОБЛЕМ И ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА (9-28 стр.)
3. ОБЈЕКАТ ИСТРАЖИВАЊА (29-48 стр.)
4. ЦИЉ И ЗАДАТАК РАДА (49-50 стр.)
5. ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ (51 стр.)
6. МЕТОД РАДА (52-73 стр.)
7. РЕЗУЛТАТИ (74-190 стр.)
8. ДИСКУСИЈА (191-200 стр.)
9. ЗАКЉУЧЦИ (201-207 стр.)
10. ЛИТЕРАТУРА (208-228 стр.)

Иза поглавља „Литература“ дате су потребне изјаве кандидата о ауторству, истоветности штампане и дигиталне верзије рада, као и овлашћење о начину коришћења. Дисертација је написана ћиричним писмом, у складу са Упутством за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду .

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Наслов докторске дисертације је концизан и адекватан дефинисаном предмету и циљевима истраживања. Наслов дисертације на језгровит начин истиче тематику и садржај дисертације.

1. УВОД (1-8 стр.)

У поглављу је систематски дат општи приказ проблема који су обрађивани кроз докторску дисертацију. На самом почетку кандидат је указао на значај познавања процеса раста стабала, шумских састојина и шума и њиховог моделовања за савремено газдовање и управљање шумама. Након осврта на значење општих појмова везаних за методе моделовања, дате су информације које приказују најважније специфичности моделовања раста у шумарству и наведена је подела модела на категорије. Описане су сличности и разлике код појмова модел, симулација и симулатор. Даље су дате неке од најважнијих подела типова симулатора раста шумских стабала и састојина и наведене њихове најбитније карактеристике, а затим су дате основне назнаке о процесима израде симулатора раста. Посебно је истакнут значај модела раста доминантних стабала у висину и навео методе које се користе приликом моделовања висинског раста. Након тога, кандидат се осврнуо на специфичности раста пречника и представио неке од најпоузданијих методе моделовања дебљинског раста и прираста.

2. ПРОБЛЕМ И ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА (9-28 стр.)

Поглавље Проблем и преглед досадашњих истраживања подељено је у неколико потпоглавља и делова потпоглавља, која чине логичне целине. У оквиру потпоглавља **2.1. Подаци – извори и начини њиховог прикупљања** говори се могућим изворима података у оквиру оваквих истраживањима и њиховој доступности, како за потребе ових истраживања, тако и за могућа будућа истраживања моделовања раста шума. Указано је на предности и недостатке појединих извора података, као и на то који од поступака моделовања може бити примењен у зависности од доступности и врсте података о расту шумских стабала и састојина. У потпоглављу **2.2. Моделовање раста шумских стабала и састојина** поново је апострофирана потреба дефинисања низа елемената газдовања шумама на поузданим информацијама о карактеристикама раста и прираста стабала и састојина, у чију сврху су јако прикладни параметризовани модели раста који на најсвеобухватнији начин осликавају динамику стабала и састојина у времену и простору. Анализирани су основни принципи класификовања модела раста у шумарству и указано је на најважније карактеристике, својства и могућности примене неких од најпознатијих модела и симулатора раста у Европи и Свету. Кандидат констатује да су, упркос експанзији различитих приступа у моделовању динамике раста шумских екосистема, највећи потенцијал у погледу практичне примене показали симулатори раста појединачних стабала, настали као резултат интегрисања процесно базираног приступа са чисто емпиријским моделима раста. Један од најважнијих елемената симулатора раста јесу модели којима се нумерички описује динамика висинског раста стабала. Кандидат је детаљно указао на различите поступке дефинисања кривих раста у

висину доминантних стабала и најприкладније поступке дефинисања скривих станишних индекса, које представљају основ производног диференцирања станишта. Кандидат посебно апострофира *генерализовани алгебарско диференцијални приступ* (GADA), као најсавременији методолошки поступак и констатује да је главна предност GADA приступа у томе што представља математички утемељен метод трансформације различитих модела раста, помоћу којег је омогућено да више једног параметара буду дефинисани као локални, односно станишно специфични. На тај начин су створени услови за извођење флексибилних динамичких функција, које истовремено могу осигурати неопходну полиморфност облика и имати различите асимптоте. Приликом дефинисања GADA модела параметри се доводе у везу са теоријском варијаблом x , која је представља јединствен одраз станишних карактеристика које предодређују темпо и интензитет раста. У овом потпоглављу кандидат даје и основна својства и приказ методологије моделовања раста у дебљину, као и приказ најважнијих истраживања и њихових резултата који се односе на моделовање раста шумских стабала и састојина у Србији до сада.

3. ОБЈЕКАТ ИСТРАЖИВАЊА (29-48стр.)

У наведеном поглављу кандидат описује подручје, газдинске јединице и одсеке у којима су проведена истраживања, прецизно их лоцирајући на прикладној карти. Напомиње да су анализиране две огледне површине (ШГ Борања - Лозница, ГЈ "Источна Борања" и НП "Тара", ГЗ "МЗ Рача"), са укупно 66 огледних поља. Приликом формирања узорка покривен је трансект у дужини од преко 600 m вертикалне дистрибуције букових састојина. Сва огледна поља постављена су у чистим састојинама букве високог порекла, у којима се у последње две деценије редовно газдовало проредним сечама умереног до ниског интензитета. Затим детаљно говори о станишту (типovima) и његовим релацијама са растом и прирастом шумских стабала. Указао је на врсте станишних типова у оквиру подручја истраживања и описао план узорковања састојина, огледних поља и доминантних стабала букве на у зависности од геолошке подлоге. Кандидат наводи да је за моделовање раста стабала користио токове раста оборених укупно 52 доминантних стабла.

4. ЦИЉ И ЗАДАТАК РАДА (49-50 стр.)

Главни циљ овог рада је развој и параметризација симулатора раста шумских стабала и састојина, под називом РАСТко. У питању је хибридни симулатор са интегрисаним моделима раста појединачних стабала и позиционо-зависним индексима конкуренције. Дефинисани симулатор је први симулатор раста који је формиран и калибрисан за услове Србије, са могућности разноврсне примене и решавања низа практичних, пре свега недоумица везаних за процену очекиваног нивоа продукције у односу на примењени газдински третман, па све до предикције раста стабала и састојина у условима климатских промена.

У сврху остваривања главног, али низа посебних циљева рада, било је неопходно реализовати већи број задатака, од којих се као најбитнији, издвајају следећи:

- проучити методологију мапирања станишних типова и еколошке услове који су од значаја приликом прикупљања и анализе емпиријских података,
- успоставити синхронизоване серије радијалног (дебљинског) прираста и емпиријске серије висинског раста,
- извршити анализу састојинске структуре на огледним површинама, уз посебан осврт на разматрање старосне структуре и варијација броја стабала, дебљинске и висинске структуре, мапирања крошњи и одређивање запремина и темељница,
- моделовати токове висинског раста и израдити станишне индексе одабраном GADA функцијом, које се на основу калибрационе и верификационе статистике покаже као најподеснија од неколико тестираних модела,
- проучити динамику висинског раста и прираста у односу на ефекте станишних услова и упоредити је са станишним индексима формираним за букву у оквиру централне и источне Србије, као и са кривим конструисаним за у неколико европских земаља,
- детектовати природу утицаја фактора окружења и састојинских услова на дебљински раст, а затим формирати и калибрисали одговарајући NLME модел,
- на основу прикупљених емпиријских података о изграђености крошњи, калибрисати

локалне моделе промене ширине и висине почетка крошњи у односу на прсни пречник,

- успоставити алгоритам рада симулатора РАСТко, написати извршни код за реализовање појединачних модула и формирати кориснички интерфејс shiny апликације.

5. ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ (51 стр.)

У складу са прикупљеним материјалом и постављеним циљевима и задацима истраживања, као и прегледном резултата досадашњих истраживања, кандидат је дефинисао следеће полазне хипотезе:

1. Чисте састојине букве су на малим површинама доминантно једнодобне или приближно једнодобне старосне структуре.

2. Окуларна процена старости на основу елемената структурне изграђености није поуздан метод у буковим састојинама.

3. Буква у истраживаном подручју у зрелим састојинама достиже висине преко 40 m, што ова станишта сврстава у једна од најпроизводнијих за ову врсту дрвећа код нас и у Европи.

4. Износ станишног индекса СИ100 на станишту највећег производног потенцијала (бонитета) на подручју ШГ "Борања"- Лозница већи је него за букву на подручју НП "Тара" и подручју источне и централне Србије.

5. Висински раст стабала букве се разликује по анализираним типовима станишта.

6. Оперативна верзија симулатора, са одговарајућим интерфејсом, може бити формирана у функционално-оријентисаном програмском језику R и представљена корисницима у форми интерактивне shiny интернет апликације.

7. Примена генерализованог алгебарско-диференцијалног приступа (GADA) приликом конструкције модела висинског раста прикладнија је за разврставање станишта по производности у односу на приступ који је коришћен приликом израде полиморфних станишних индекса у склопу симулатора SILVA (Немачка) и SYBILA (Словачка).

8. Симулатор „РАСТко“ поуздано симулира раст стабала и састојина букве на подручју на којем је вршена параметризација модела.

6. МЕТОД РАДА (52-73 стр.)

Ово поглавље је подељено на три дела. У првом потпоглављу **6.1. Прикупљање емпиријских података** кандидат детаљно описује начин постављања огледних поља у оквиру две истраживане огледне површине (локалитета) – њихов број, величину, критеријуме по којима су одабране и све податке који су у оквиру њих прикупљени. Поред тога, прецизиран је начин узимања узорака, припреме и мерења података за анализу токова раста доминантних стабала (котурови и извртци). У потпоглављу **6.2. Анализа и приказ прикупљених података** кандидат напомиње да су величине основних елемената раста и параметри структурне изграђености детерминисани су за сваку огледну површину и огледно поље. Резултати су одвојено приказивани за огледна поља огледне површине 1 и огледне површине 2. Матични супстрат на првом локалитету су гранодиоритске стене, а на другом је кречњак. Добијени резултати су даље груписани на основу података о станишним типовима (гранодиорит) или на основу фактора (експозицијама, рељефним облицима) који служе за дефинисање станишних типова (кречњак). Утврђивање свих елемената раста извршено је по уобичајеној методолошкој процедури.

У циљу примене генерализованог алгебарско-диференцијалног приступа – GADA моделовања висинског раста стабала наведени су модели који су тестирани у функцији одабира базичног модела. Приликом параметризације одабраних GADA модела примењени су поступци одређивања параметара помоћу узастопних итерација и применом вештачке (енгл. "dummy") промењиве. Након што су параметри одређени итеративном процедуром извршено је њихово поновно израчунавање и верификација применом тзв. пенализованог нелинеарног модела најмањих квадрата (Pinheiro, Bates 2000; Stegmann et al. 2018; Pinheiro et al. 2021). Посебна пажња поклоњена је уклањању аутокорелације и хетероскедастичности из серија података. У начелу, кандидат је у циљу одабира најподобнијег динамичног модела за описивање висинског раста доминантних стабала у оквиру истраживаног подручја, користио: (1) параметре калибрационе и верификационе статистике, (2) графичке методе за анализу

резидуала и (3) подобност модела да представе биолошке законитости раста (Goelz, Burk 1992; Socha et al. 2020), јер избор најбољег модела представља компромис између биолошких и статистичких разматрања (Barrio-Anta, Diéguez-Aranda 2005).

Приликом израде симулатора, један део извршног кода имао је задатак да реализује основну обраду унесених података премера и врши припрему за визуализацију. Ову групу команди кандидат је користио и приликом анализе структурне изграђености крошњи на огледним површинама. У циљу омогућавања тродимензионалног приказа крошњи извршено је моделовање облика изводнице крошње. У сврху анализе зависности радијалног прираста од састојинских услова, квантификација степена конкурентског притиска, односно конкурентских услова, извршена је помоћу KKL коефицијента (Pretzsch 1995). Разлике у просечном степену конкурентског притиска код анализираних група стабала различитог социјалног положаја тестирана је применом t теста. За изравнавање везе између радијалног прираста и KKL коришћена је експоненцијална функција. У потпоглављу **6.3. Извршни код симулатора** кандидат је описао програмско окружење у којем је рађен симулатор и апострофирао из чега се састоји извршни код. Алгоритам рада симулатора представљен је процесним дијаграмом, који се састоји од основних симбола формализованог псеудо кода.

У циљу омогућавања адекватне обраде улазних података кандидат је формирао преко 30 јединствених екстерних функција. Ради брзине процесуирања, улазни и излазни подаци су претежно задржавани у форми основних структура података (матрица, вектора и листи), али су по потреби коришћене и структуре изведених S3 класа, најчешће сложених листи. Иако је рад симулатора процесно оријентисан и свака функција егзистира сама за себе, кандидат их је класификовао у главних 6 програмских модула. Поред претходно наведених јединствених функција, за реализацију задатих наредби коришћене су генеричке функције из 15 различитих библиотека у оквиру R окружења. Посебно се издвајају функције садржане у пакетима *rgl* и *plotly*, које су укључене у модул дводимензионалног (2D) и тродимензионалног (3D) графичког приказа стабала и састојина. Кориснички интерфејс је формиран прилагођавањем корисничке табле из *shinydashboard* пакета. За унос података и читавање података постављена су обележена реактивна поља и слајдери. Додатно визуелно подешавање и увођење неопходних функционалности реализовано је уз помоћ чеоних програмских језика HTML, CSS и JavaScript.

7. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА (74-190 стр.)

Ово поглавље конципирано је из 4 потпоглавља. У потпоглављу 7.1. Структура састојина кандидат је анализирао бројне елементе структурне изграђености у оквиру огледних поља. У ту сврху користио је адекватне методе примењујући статистичке поступке анализе дистрибуција фреквенција елемената раста и различите видове статистичког тестирања у циљу објективизације закључака које изводи. Описивање једноставне структуре шумских састојина обављено је највећим делом преко средњих или сумарних састојинских параметара. Посебну пажњу посветио је питању старости стабала и састојина, констатујући правилно да не поседовање прецизних информација о старости стабала и састојина и следствено томе примена одређених уређајних и узгојних мера на бази таквих података о старости, може довести до великих грешака и проблема у газдовању шумама. На основу резултата, кандидат констатује да се старосна структура букових састојина не може поуздано проценити и да ослањање на средњи пречник и број стабала у преко 50% случајева може довести до погрешног закључка о стварној старости састојине. Из тих разлога, изведен је јасан закључак да неимање прецизне класификације састојина по питању тачне старости утиче на прописивање узгојних мера, које нису усклађене са тренутном прирасном снагом стабала, што са једне стране може да воде у деградацију састојине, а са друге да резултује непотпуним коришћењем продукционог потенцијала станишта.

Говорећи о броју стабала, као елементу структуре састојина, кандидат напомиње да сва огледна поља на којима је уочено веће одступање у старости између стабала (сем ОП 30) имају дебљинску структуру која се значајно не разликује од теоријске Weibull-ове расподеле која указује на дебљинску структуру сличну структури једнодобних састојина. Из тога је изведен закључак да разнодобне састојине ретко могу бити јасно уочене на терену, осим у

случају типичне разнодобности и пребирне структуре и мањих одступања од такве изграђености.

Резултати истраживања темељнице и запремине огледних поља показали су да старосна структура и број стабала не утичу значајно на варирање запремине у анализираном добном разреду. Потпоглавље 7.2. Модели раста стабала је подељено у 3 целине: 7.2.1. Раст стабала у висину - станишни индекси; 7.2.2 Раст стабала у дебљину и 7.2.3. Раст крошњи стабала. У првој целини дате су најпре основне информације о сетовима података коришћеним за параметризацију и верификацију модела, дате по старосним класама ширине 20 година. У ту сврху кандидат наводи, између осталог, да су приликом параметризације одабраних GADA модела за представљање раста стабала у висину коришћени емпиријски подаци о расту 52 доминантна стабала. Емпиријски подаци о динамици раста стабала показали су добру избалансираност формираног узорка, јер је обухваћен читав спектар различитих токова висинског раста који пружају могућност поседовања података о висинском расту букве на стаништима различитог производног потенцијала. Резултати калибрације тестираних модела висинског раста стабала показали су да су модели М5, М6, М7, М9 и М10 постигли потпуну конвергенцију и да у складу са тим имају статистички изузетно значајне износе параметара ($p < 0,001$). С друге стране, регистровано је да параметар минимално доприноси ($p < 0,1$) предикционој моћи модела М11. Најлошије се показао М8, као форма Lundqvist-ове функције, која је калибрисана са високим износом толеранције код конвергенционог критеријума. На тај начин, од великог броја тестираних функција, избор за модел који најадекватније описује висински раст доминантних стабала на истраживаном подручју сужен је на пет кандидата. Сви анализирани модели објаснили су појединачно преко 99,5% укупне варијансе података. Ипак, параметри калибрационе статистике су као најбоље функције, издвојили динамичне форме Charman-Richards-овог модела М6 и М5. Обе функције имају готово идентичне и уједно највеће износе коефицијента псеудо корелације и најмање износе пристрасности процене, стандардне грешке регресије) и информационих критеријума АИС и ВИС. Модификована Hossfeld IV функција М10 (Cieszewski 2003) показала је нешто слабије перформансе у погледу величина информационих критеријума, док им се износе показатеља корелације, пристрасности процене и стандардне грешке регресије минимално разликују. Иако изведен из исте базичне функције, као и модели М6 и М5, модел М7 показао је да увођење само једног додатног параметра у Charman-Richards-ов модел не пружа довољан степен флексибилности, што је резултовало укупно најлошијим износима параметара калибрациона статистике. Поред квалитета прилагођавања подацима који су послужили за параметризацију, за целисходну оцену и избор најпогоднијег модела неопходно је тестирати моделе на независном сету података (верификација модела). Том приликом, поново су се модели М5 и М6 издвојили као најбољи, с том разликом што је у овом случају пристрасност модела М5 евидентно мања. Поред тога, нешто мање разлике су регистроване код средњег апсолутног одступања, док је ефикасност предикције код оба модела идентична. Према износима верификационе статистике, кандидат М9 се нешто боље показао у односу на М10, док се као најлошији издвојио модел М7. Повољни износе калибрационе и верификационе статистике истовремено не гарантују и биолошку оправданост модела кандидата. Ту се пре свега мисли на асимптотске износе, које на најбољим стаништима треба да буду у складу са максимално могућим висинама забележеним на истраживаном подручју. Компарацијом модела М5 и М6 уочено је да ова два модела за све анализирание износе СИ100 показују слична времена и износе кулминације текућег прираста. Међутим, ако се максимално утврђене висине на најпроизводнијим стаништима ($СИ_{100} = 40 \text{ m}$) упореде са максималним висинама које буква достиже у истраживаном подручју, може се закључити да модел М5 омогућава нешто веродостојније предикције максималне висине стабала букве. Кандидат даље правилно закључује да свеобухватна валидација добијених резултата подразумева и компарацију презентованих станишних индекса, најпре са до сада утврђеним "домаћим" кривама станишних индекса, а затим и са GADA моделима и њиховим приказима (кривама) станишних индекса за букву, формираним у различитим европским земљама. У ту сврху извршио је поређење утврђених кривих станишних индекса са подручја у западној Србији са

анаморфним и полиморфним кривама станишних индекса из источне и централне Србије (Stajić et al. 20016, Stajić et al. 2021), као и кривих станишних индекса (СИ100) за букву у Великој Британији (Manso et al. 2021b), Словачкој (Sharma et al. 2019a), Пољској (Socha et al. 2020), западној Летонији (Matisons et al. 2018), Данској (Nord-larsen 2006) и Швајцарској (Álvarez-González et al. 2010). У целини 7.2.2. Раст стабала у дебљину кандидат напомиње да су резултати у оквиру овог дела дисертације бази рани на 279 временских серија радијалног прираста доминантних стабала и 564 серије дебљинског прираста кодоминантних стабала и стабала осталих социјалних положаја (укупно 843 серије). Резултати су показали да не постоји изражена правилност у погледу варирања дебљинског прираста у односу на матични супстрат. Детаљно је анализиран и дебљински прираст доминантних стабала и стабала из нижих категорија и њихова зависност од различитих фактора. Говорећи о начину и употреби дебљинског прираста за израду симулатора раста кандидат правилно закључује да се одређивање величина текућег прираста пречника у емпиријским симулаторима често се базира на директној редукацији износа максималног могућег прираста евидентираног код доминантних стабала на најбољем станишту у зависности од јачине дејства "редуктора". Приликом утврђивања параметри за оцену прилагођавања модела серијама максималног дебљинског прираста стабала тестирано је више модела. Утврђено је да модел М15 показао најбоље резултате. У целини 7.2.3. Раст крошњи стабала моделоване су промене ширине крошње и висине почетка крошње стабала, а као најбољи показали су се М12 и М13 модел. У потпоглављу 7.3. Структура симулатора раста РАСТко указује се на то да програм садржи читав низ функција везаних за обраду и визуелизацију предефинисаних уноса података, затим симулацију даљег раста, као и креирање извештаја у .csv или .pdf формату. Основни мени симулатора састоји се од следећа четири прозора: „Унос података“, „Обрада“, „Прираст“ и „Симулација“. Кандидат даље наводи да је функционисање симулатора раста РАСТко засновано на сличној структурној шеми као и код симулатора SILVA и SYBILA (Pretzsch et al. 2002a; Fabrika 2004). Такође се наводи да се извршни код симулатора РАСТко подељен на шест основних функционалних блокова, односно модула, који су међусобно повезани. Затим је кандидат детаљно описао њихову структуру и начин на који су дефинисани сви појединачни модули: Модул за израчунавање елемената раста, 3Д и 2Д приказ састојине Модул за одређивање конкуренције, Модул раста, Модул одумирања стабала и Модул за узгојне интервенције. У потпоглављу 7.4. Могућности и ограничења симулатора кандидат констатује да РАСТко представља први хибридни симулатор раста стабала и састојина букве на подручју западне Србије, чија функционалност је прилагођена тренутним околностима и могућностима, а да су ограничења везана највише за примену симулатора раста „РАСТко“, односно због чињенице да је приликом његове израде била доступна релативно скромна и ограничена база података о расту и прирасту стабала и састојина на истраживаном подручју. Иако су се подаци обједињени овом приликом показали као детаљна и поуздана основа за калибрацију и верификацију модела раста букве, идеално би било да се овакав вид истраживања употпуни информацијама прикупљеним у склопу систематског праћења мреже дугорочних огледних површина. Под утицајем "прилива" нових квалитетних података рекалибрација и ажурирање симулатора раста „РАСТко“ могу бити ефикасно изведени. На тај начин би кроз унапређење обима базе полазних података била унапређена најпре тачност резултата, али и проширена валидност симулатора на већу територију.

8. ДИСКУСИЈА (191-200 стр.)

У оквиру овог поглавља кандидат обједињује парцијалне резултате истраживања. Користећи савремене литературне изворе на веома квалитетан начин дискутује о карактеру својих резултата, али и о резултатима бројних других домаћих и иностраних истраживања. Посебно се критички осврће на најважније истраживачке кораке и методолошке приступе који доводе до формирања симулатора раста шумских стабала РАСТко, поредећи их са корацима и методологијом рада у оквиру неких од најважнијих симулатора раста оваквог профила у Европи. У оквиру потпоглавља **Значај резултата истраживања за шумарску праксу и задаци будућих истраживања** аутор поново напомиње да „РАСТко“ први симулатор раста

израђен на подручје Србије, те да је неопходно унапредити још пар његових аспеката и перформанси да би исти достигао своју пуну форму. У ту сврху наводи два примаран задатка: проширивања постојеће базе података на територију целе земље и омогућавања симулације раста стабала других врста шумског дрвећа. Поред тога, кандидат констатује и да је неопходно додатно технички усавршити симулатор „РАСТко“, што пре свега подразумева додатну оптимизацију кода, пребацивање на посвећени сервер (енгл. *dedicated server*), омогућавање режима серијске обраде података (енгл. *batch-mode*) и формирање апликације која ће имати могућности да се прилагоди екстерним екранима различите величине. Говорећи о значају истраживања, кандидат напомиње, између осталог, да израђени симулатор није сам себи, него да треба, пре свега, бити намењени практичној примени и да ће сазнања о расту стабала и састојина букве на подручју западне Србије, примену у газдовању шумама, као темељ за доношења одлука на пољу гајења шума, планирања газдовања шумама, шумарске политике и екологије у најширем смислу

9. ЗАКЉУЧЦИ (201-207 стр.)

У овом поглављу кандидат концизно и јасно износи закључке. Закључци су изнесени по логичном и адекватном редоследу.

10. ЛИТЕРАТУРА (208-228 стр.)

У овом поглављу кандидат је приказао 295 референци уско везаних за проблем истраживања, као и две интернет адресе. Кандидат је на правилан начин користио наводе из обрађене литературе кроз читав текст дисертације. Обрађена је научна и стручна литература страних и домаћих аутора, где доминирају референце на енглеском језику. Референце су поређане по алфабетном редоследу.

VI ЗАКЉУЧЦИ, ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

На бази утврђених резултата и провере постављених хипотеза, кандидат је остварио низ закључака, од који су најзначајнији следећи:

- 1) Резултати анализе старости показују да је једнодобна и приближно једнодобна структура утврђена на по 25 огледних поља (укупно 50 ОПа), док је разнодобно било 16 ОПа. Овакви резултати су у највећем делу потврдили прву хипотезу да су чисте састојине букве су на малим површинама доминантно једнодобне или приближно једнодобне старосне структуре. Са повећањем старости постоји изражена тенденција ка линеарном повећању стандардне девијације података о старости стабала.
- 2) Метод окуларне процене старости није довољно поуздан у буковим састојинама и у преко 50% случајева доводи до грешке, која је већа од половине добног разреда у једнодобним састојинама. На тај начин потврђена је претпоставка изнесена као друга радна хипотеза. На формирање погрешног утиска о састојинској старости највише утиче густина састојине исказана преко броја стабала, док средњи састојински пречници имају нешто мањи утицај на давање погрешних процена.
- 3) Приликом формирања висинских кривих, најмање средње одступање емпиријских од моделованих података (RMSE) показала је Проданова функција. Најнижи износи средње састојинске висине и средње висине доминантних стабала евидентирани су код најмлађег ОП 61 ($h_g=20,2$ m и $H_g=23,5$ m). Висине преко 40 m евидентирани су код разнодобне ОП 26 ($H_g=45,4$ m), те је на тај начин потврђена трећа хипотеза да буква у истраживаном подручју у зрелим састојинама достиже висине преко 40 m, што ова станишта сврстава у једна од најпроизводнијих за ову врсту дрвећа код нас и у Европи.
- 4) Највећи износи запремине и темељнице регистровани су на ОП 31 и ОП 24, где су евидентирани запремине од чак 1009,7 m³ и 1041,6 m³, а темељница чак 68,3 m² и 73,0 m². Најнижи износи запремине (256,6 m³) и темељнице (18,5 m²) забележени су на ОП 54.
- 5) Параметризација модела висинског раста обављена је на бази емпиријских података о расту 52 доминантна стабала, односно укупно 1027 парова података висина-старост за калибрацију и 227 за верификацију модела.
- 6) Тестирана је могућност примене 7 различитих динамичних GADA модела. На основу параметара калибрационе и верификационе статистике (табела 19), као и показатеља који одражавају реалистичност прогноза које тестирани модели дају, закључено је да модел M5 најбоље репрезентује динамику висинског раста букве на истраживаним

локалитетима.

- 7) У поступка избора референте старости на који ћу се станишни индекси упућивати, коришћена референта старост од 100 година се показала као довољно поуздан основ за предвиђање висина у свим другим старостима. Регистровано је повећање RMSE са ширином интервала доцње, а најизраженије разлике су регистроване у најранијем добу, што упућује на слабију прецизност неупотребљивост модела, када је у питању предикција на основу старости мањих од 30 година. На основу праћења промене критичне грешке процене утврђено је да се грешка процене средње висине преко $\pm 20\%$ могу очекивати код предикција дужих од 15 година.
- 8) Упоређивањем овде формираних кривих станишних индекса са резултатима из источне и централне Србије (Stajić et al. 2016, Stajić et al. 2021), утврђено је да се у западном делу Србије на најбољим стаништима, у истој старости, могу очекивати и до 8 m веће висине, а на најлошијим до 4 m. Овакви резултати потврдили су други део четврте радне хипотезе, да су СИ100 на станишту највећег производног потенцијала (бонитета) на гранодиоритима у ШГ "Борања"- Лозница већи је него за букву источне и централне Србије.
- 9) Упоређењем кривих станишних индекса (СИ100) за букву у западној Србији са кривим у Великој Британији (Manso et al. 2021b), Словачкој (Sharma et al. 2019a), Пољској (Socha et al. 2020), западној Летонији (Matisons et al. 2018), Данској (Nord-larsen 2006) и Швајцарској (Álvarez-González et al. 2010) констатовано је да су највеће сличности евидентирани у поређењу са резултатима из Швајцарске, а највеће разлике одступања су регистрована у односу на букву из Пољске, Данске и Велике Британије.
- 10) Резултати ANOVE показали су да се СИ100 остварени на све три анализирани геолошке подлоге значајно разликују ($p < 0,01$). На овај начин потврђен и је први део четврте радне хипотезе, да су износи СИ100 на стаништима највећег производног потенцијала (бонитета) на гранодиоритима у ШГ "Борања"- Лозница већи је него за букву на кречњаку у НП "Тара".
- 11) Код доминантних стабала на кречњаку и гранодиориту статистички значајне разлике између остварених износа радијалног прираста утврђене су само за 4 од посматраних 152 године ($p < 0,05$).
- 12) Код 227 доминантних стабала не постоји корелациона зависност између утврђених величина износа радијалног прираста у 2019. години и износа коефицијента конкуренције у борби за светлост и простора за раст - KKL ($p = 0,51$). Код 564 стабала из нижих социјалних положаја, приметно је да већи конкурентски притисак резултује формирањем значајно ужих година ($r = -0,38$, $p < 0,001$). Није утврђено да са повећањем старости долази до смањивања износа KKL. Просечни и медијални износи KKL утврђени за посебно доминантна и осталих стабала верификовали су поделу стабала у ове две групе које се одликују битно различитим степеном конкурентског притиска. Детерминисана је и значајна негативна веза између износа KKL и величина којима је окарактерисана развијеност крошњи (Pок, Zр и Vк).
- 13) За модел максималног раста и прираста пречника коришћена је функција M15, која представља Чарман-Ричардс модел чије је асимптота проширена за континуални фиксни ефекат квалитета станишта исказан преко СИ100 (Schelhaas et al. 2018). Приликом калибрације модела, аутокорелација резидуала је уклоњена помоћу ауторегресионог модела структуре AR2MA1, док је стабилизација варијансе извршена применом степене функције. Дистрибуција нормализованих резидуала око линије регресије и Durbin-Watson тест указали су да је модел добро калибрисан и да резидуали не показују никакав шаблон у варирању. Графички приказ M15 јасно указује изражену тенденцију раста максимално могућих пречника од лошијих ка бољим стаништима. На најлошијим стаништима у старости од 200 година очекује се максимални пречник од 45 cm, а на најбољим максималних 108 cm. Уколико посматрамо референтну старост од 100 година, максимални процењени пречник од 50 cm имају стабла на стаништима чији СИ100 прелази 27 m.
- 14) Основне функционалности које нуди интерфејс симулатора раста РАСТко подељене су у четири прозора: „Унос података“, „Обрада“, „Прираст“ и „Симулација“. Учитавањем података премера у складу са презентованим упутствима и датим шаблоном, као и уносом додатних информација у програм стичу се услови за покретање провере и

логичке контроле унесених података. Након успешно реализоване провере отвара се читав низ могућности које подразумевају даљу обраду података и симулацију будућег раста шумских стабала и састојина.

- 15) Целокупан систем функционисања РАСТка и међусобне релације модула симулатора приказане су у форми одговарајућег алгорита. С тим у вези, евидентно је потврђена је и радна хипотеза да оперативна верзија симулатора, са одговарајућим интерфејсом, може бити формирана у функционално-оријентисаном програмском језику R и представљена корисницима у форми интерактивне shiny интернет апликације.
- 16) У склопу модула за израчунавање елемената раста укључене су функционалности везане за израчунавање елемената раста и позиционирање појединачних стабала у простору, као и одређивање просечних и сумарних елемената раста састојина.
- 17) Модул за 2D и 3D приказ састојине је сачињен од низа интерактивних графикана. Као резултат активације овог модула, формиран су графикони висинске криве и дебљинске структуре, који поред емпиријских података садрже криве одговарајућих модела.
- 18) Интерактивна карта крошњи приказује просторни распоред стабала, облик крошње и спољне границе огледног поља. Модул садржи низ функција које омогућавају тродимензионални приказа терена и састојине. Кликом на крошњу неког од стабала приказаног на 3D графикону добија се низ информација о његовим елементима раста.
- 19) Модул за одређивање конкуренције квантификује конкурентске односе између суседних стабала, кроз утврђивање коефицијента крошњи доступне светлости – KKL, прага конкуренције, степена асиметричности притиска конкурената и коефицијента примешаности других врста.
- 20) У склопу модула раста приказан је комплексни поступак којим на основу датих станишних услова врши модификација прираста добијених из модела раста пречника, висине и крошњи. У ту сврху примењене су трансформационе и агрегатне функције, као и низ редукционих коефицијената који додатно модификују моделне износе прираста.
- 21) Проблем избора референтне старости код модела раста у висину је код РАСТка решен применом GADA методологије. Кроз M5 форму Chapman-Richards-ове функције добијене су непристрасне криве висинског раста букве на стаништима различитог производног потенцијала. Овакав приступ конструкцији модела висинског раста може се сматрати значајно прикладнијим за разврставање станишта по производности у односу на приступе који су коришћени приликом израде анаморфних и полиморфних станишних индекса у склопу симулатора SILVA (Немачка) и SYBILA (Словачка). С тим у вези, потврђена је и 7. радна хипотеза. Упоредни приказ кривих раста открио је да постоји значајан степен разлика између кривих висинског раста у западној Србији и кривих које су инкорпорирани у симулаторе SILVA и SYBILA.
- 22) РАСТко представља хибридни симулатор раста стабала и састојина букве на подручју западне Србије, чија функционалност је прилагођена тренутним околностима и могућностима. Упркос низу ограничења проистеклим из релативно скромне базе података којом је ограничена подобност шире примене и верификације резултата, за огледно поље 2 које се налази у оквиру сталне огледне површине у одсеку b 50 одељења ГЈ „Источна Борања“, успешно је спроведена средњорочна прогноза раста састојине у наредних 30 година. Тако је потврђена и последња, 8 хипотеза, да РАСТко може поуздано да симулира раст стабала и састојина букве на подручју на којем је вршена параметризација модела

VII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

На основу комплетног и детаљног увида као и извршене анализе свих поглавља докторске дисертације кандидата маг. инж. шум. Марка Казимировића, под насловом „СИМУЛАТОР РАСТА ШУМСКИХ СТАБАЛА И САСТОЈИНА „РАСТко“: РАЗВОЈ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ЗА БУКВУ У ЗАПАДНОЈ СРБИЈИ“, Комисија сматра да је целокупна дисертација на веома јасан и прегледан начин структурирана и написана.

Кандидат је систематично проучио литературу везану за предмет истраживања и правилно упоређивао резултате својих истраживања са истраживањима других аутора. За обраду података коришћене су одговарајуће статистичке методе, а резултати истраживања приказани су текстуално, табеларно и графички. Тумачење резултата је на високом научном нивоу, а закључци су прецизно изведени и произилазе из добијених резултата. Кандидат је потврдио постављене хипотезе и успешно реализовао постављене циљеве истраживања.

Дисертација представља оригиналан и самосталан научно-истраживачки рад, а резултати, поред научне имају и практичну вредност.

Имајући у виду да се, као услов за одбрану докторске дисертације, поставља објављен рад у часопису међународног значаја, Комисија констатује да је кандидат овај услов испунио. Кандидат је коаутор 1 рада у часопису међународног значаја, категорије M23:

Stajić B., Janjatović Ž., Aleksić, P., Baković, Z., **Kazimirović, M.**, Milojković, N. (2016): Anamorphic site index curves for Moesian beech (*Fagus × Taurica* Popl.) in the Region of Žagubica, Eastern Serbia. Šumarski list, volume 5-6, pp. 251-258; UDK 630* 101 + 561 (001) ISSN No.: 1846-9140

VIII КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Дисертација садржи све неопходне елементе: насловну страну на српском и енглеском језику, информације о ментору и члановима комисије, резиме на српском и енглеском језику, садржај, текст рада по поглављима, литературу, биографију и библиографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу. Докторска дисертација својим насловом, садржајем, постављеном методологијом, резултатима истраживања, начином тумачења добијених резултата, као и изнетих закључака, садржи све битне елементе који се захтевају за радове овакве врсте и представља један заокружен, самосталан научно-истраживачки рад.

Комисија позитивно оцењује структуру и све елементе које садржи докторска дисертација.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Оригинални допринос науци ове дисертације може се изразити кроз више елемената. Научни приступ у постављању истраживачког проблема, постављању хипотеза и циљева и добијени резултати ову дисертацију чини оригиналном. Најпре, израђени симулатор раста шумских стабала „РАСТко“ први је симулатор раста израђен у Србији. Нужност за оваквим истраживањима, која код нас нису до сада провођена је веома велика и лежи у чињеници да симулатори раста шумских стабала и састојина пружају изузетно широке могућности у погледу научне и практичне примене. У оба случаја, резултати симулација раста и развоја шумских стабала и састојина под конкретним околностима помажу приликом разматрање низа постојећих недоумица у газдовању и доношењу објективних одлука у погледу њиховог разрешавања. Уопштено, симулатори раста представљају савремени и иновативни програмски алат, са низом уклопљених дефинисаних модела раста стабала, али и осталих модела, који струци и науци пружају могућност доношења практичних решења у функцији реалног газдовања шумама. Поред конкретне израде програма, допринос дисертације би се огледао и у непосредном представљању и приближавању овог интегрисаног алата шумарској оперативи Србије. Поред тога, у оквиру ове дисертације формирана је нова, функционалнија база података, која је поред извршене систематизације досадашњих информација, допуњена новим релевантним емпиријских подацима о расту и прирасту букве и станишним карактеристикама, али и новим сазнањима о њиховој интеракцији.

Целокупни рад изложен у дисертацији кандидата Марка Казимировића је чврсто утемељен у веродостојним теоријско-методолошким и истраживачко-аналитичким поступцима, у погледу обима, структуре и релевантности грађе на којој се заснива.

Имајући све наведено у виду Комисија констатује да ова дисертација представља несумњив оригинални допринос науци и ужој научној области Планирања газдовања шумама.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Комисија није уочила недостатке докторске дисертације који би утицали на резултате истраживања.

IX ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене докторске дисертације, комисија предлаже:

- да се докторска дисертација кандидата магист.инж.шум. Марка Казимировића под насловом „СИМУЛАТОР РАСТА ШУМСКИХ СТАБАЛА И СASTOЈИНА „РАСТко“: РАЗВОЈ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ЗА БУКВУ У ЗАПАДНОЈ СРБИЈИ“, прихвати а кандидату одобри одбрана.

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

др Бранко Стајић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Шумарски факултет

др Дамјан Пантић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Шумарски факултет

др Оливера Кошанин, редовни професор,
Универзитет у Београду, Шумарски факултет

др Ненад Петровић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Шумарски факултет

др Војислав Дукић, редовни професор,
Универзитет у Бањој Луци, Шумарски факултет

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.