

ZAKLJUČNO POROČILO
O REZULTATIH OPRAVLJENEGA RAZISKOVALNEGA DELA
NA PROJEKTU V OKVIRU CILJNEGA RAZISKOVALNEGA
PROGRAMA (CRP)
»ZAGOTOVIMO.SI HRANO ZA JUTRI« 2011 – 2020«

I. Predstavitev osnovnih podatkov raziskovalnega projekta

1. Šifra projekta:

V4-2014

2. 1. Naslov projekta v slovenskem jeziku:

Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji

2.2. Naslov projekta v angleškem jeziku:

The development of forest models for Slovenia

3. Ključne besede projekta

3.1. Ključne besede projekta v slovenskem jeziku:

modeliranje razvoja gozdov, upravljanje gozdov, rast, simulator, mortaliteta, gozdnogospodarsko načrtovanje

3.2. Ključne besede projekta v angleškem jeziku:

forest stand development, forest management, growth&yield analysis, tree growth and stand simulators, mortality, forest management planning

4. Šifra ter ime in priimek vodje projekta:

27615 Andrej Ficko

5. Naziv nosilne raziskovalne organizacije:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

5.1. Seznam sodelujočih raziskovalnih organizacij (RO):

Gozdarski inštitut Slovenije

6. Raziskovalno področje po šifrantu ARRS¹:

4.01.01 Gozd - gozdarstvo

¹ Spletni naslov šifranta ARRS: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/sif-vpp.asp>

7. Raziskovalno področje po šifrantu FOS²:

4.01 Kmetijstvo, gozdarstvo in ribištvo

8. Sofinancer/sofinancerji:

Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano

II. Vsebinska struktura zaključnega poročila o rezultatih raziskovalnega projekta v okviru CRP

1. Cilji projekta:

1.1. Ali so bili cilji projekta doseženi? (v izbran kvadratik vtisni črko x)

a) v celoti

b) delno

c) ne

Če b) in c), je potrebna utemeljitev.

1.2. Ali so se cilji projekta med raziskavo spremenili?

a) da

b) ne

Če so se, je potrebna utemeljitev:

² Spletni naslov šifranta FOS: <http://www.ars.gov.si/sl/gradivo/sifranti/klasif-znan-FOS.asp>

2. Izvleček vsebinskega poročila o realizaciji predloženega programa dela ³:

Kljub bogatim podatkovnim zbirkam in raznolikosti sestojev v Sloveniji primanjkuje lastnih modelov razvoja gozdov. Projekt se osredotoča na razvoj modela razvoja gozdov na drevesni ravni za podporo odločanju in upravljanju gozdov. Cilji projekta so bili 1) izdelava koncepta modela, 2) priprava in upravljanje podatkov, 3) razvoj modulov, 4) izgradnja modela in simulacije razvoja gozdov ter 5) implementacija in testiranje modela. Z razvojem modela, ki upošteva specifične razmere v slovenskih gozdovih (rast, mortaliteta, vrast), želimo izboljšati procese odločanja pri gospodarjenju z gozdovi. V projektu smo izdelali konceptualni model, analizirali smo dostopnost in resolucijo podatkov, pripravili podatkovne zbirke in protokole obdelav, izvedli modeliranje debelinske rasti dreves za 40 vrst, vrasti, mortalitete dreves in največjih sestojnih gostot, debelinske strukture gozdnih sestojev ter izvedli parametrizacijo dveh obstoječih velikoprostorskih modelov. Pri oblikovanju konceptualnega modela smo uporabili diagram poteka z več hierarhičnimi ravnmi za podrobno opredelitev kompleksnih procesov. Za modeliranje debelinske rasti smo uporabili kubične naravne zlepk in polinomske regresije. Pri modeliranju vrasti smo uporabili Tobit model krnjene regresije, pri mortaliteti pa Reinekejeve krivulje in logistične modele. Parametre v Reinekejevih krivuljah smo ocenjevali z uporabo kvantilne regresije in stohastične mejne analize. Za velikoprostorske modele smo uporabili podatke nacionalne gozdne inventure in razvili vrstno specifične modele ter uporabili več podnebnih scenarijev. V zaključku smo izdelali prvo različico prototipa računalniškega modela na drevesni ravni v programskem paketu Excel. Modele debelinske strukture bukovih gozdov smo vgradili v slovensko različico simulatorja SiWaWa 2.0. Zaključujemo, da je za parametrizacijo modelov pomembno ohranjati fino mrežo meritev na stalnih vzorčnih ploskvah. Poudarjamo pomen samostojnega razvoja modelov v Sloveniji. Sistematična podpora in naložbe v raziskave na tem področju so ključne za nadaljnji napredek modelov in aplikacije.

3. Izkoriščanje dobljenih rezultatov:

3.1. Kakšen je potencialni pomen rezultatov in učinkov vašega raziskovalnega projekta⁴:

F.02 pridobitev novih znanstvenih spoznanj

Razviti modeli predstavljajo temeljno znanja na področju prirastoslovja in sestojne dinamike (rast, mortaliteta, vrast) slovenskih gozdov.

³ Na tem mestu je potrebno napisati izvleček vsebinskega raziskovalnega poročila -študije, ki je obvezen element tega obrazca (Priloga 1). V izvlečku mora biti na kratko predstavljen program dela z raziskovalno hipotezo in metodološko-teoretičen opis raziskovanja pri njenem preverjanju ali zavračanju vključno s pridobljenimi rezultati projekta.

⁴ Vpišete lahko več odgovorov. Uporabite šifrant rezultatov pod točko F, učinkov pod točko G), ki je dostopen na spletnem naslovu: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/inc/sif-razisk-rezult.pdf>

F.08 razvoj in izdelava prototipa

Simulator razvoja gozdnih sestojev na drevesni ravni je novost v Sloveniji. Različica, ki je nastala v projektu, je prototip.

F.23 razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev

Nastala je programska rešitev, simulator razvoja gozdnih sestojev. Nastala je programska rešitev, slovenska različica simulatorja SiWaWa. Nastala je nova metodološka rešitev pri ugotavljanju potreb po redčenjih, diagrami sestojnih gostot SDMD.

G.01.02 razvoj podiplomskega izobraževanja

Razviti modeli in znanja se že vključujejo v program magistrskega študija Gozdarstvo in upravljanje gozdnih ekosistemov, predmet Modeliranje razvoja gozdnih sestojev ter Metode raziskovalnega dela v gozdarstvu II.

G.03.03 uvajanje novih tehnologij

Z modeli se v upravljanje z gozdovi uvajajo digitalne tehnologije (zajem podatkov do sistemov za podporo odločanju).

G.04.02 izboljšanje vodenja in upravljanja

Razviti modeli bodo prispevali k bolj utemeljenemu odločanju Zavoda za gozdove Slovenije o ukrepih v gozdu ter gozdnogospodarskemu načrtovanju.

3.2. Označite s katerimi družbeno-ekonomskimi cilji sovpadajo rezultati vašega raziskovalnega projekta⁵:

8 Kmetijstvo: kmetijstvo, gozdarstvo in ribištvo

9 Izobraževanje: visokošolsko izobraževanje

3.3. Kateri so neposredni rezultati vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Novo znanstvene ugotovitve glede vrasti dreves v sestoj, debelinskega priraščanja različnih drevesnih vrst ter mortalitete dreves ter največjih gostot (analiza kompeticije), vključevanje v univerzitetno izobraževanje na Biotehniški fakulteti in izboljšanje odločanja in načrtovanja na ZGS.

3.4. Kakšni so lahko dolgoročni rezultati vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

⁵ Šifrant je dostopen na spletnem naslovu: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/inc/klasif-druz-ekon-09.pdf>

Rezultati so res izjemno pomembni za razvoj lastnega sestojnega simulatorja in sistema za podporo odločanju v gozdarstvu v prihodnje. S projektom smo postavili temelje za izgradnjo takšnega sistema, ki ga javna gozdarska služba potrebuje na različnih ravneh. Izgradnja takih modelov traja celo več desetletij in brez sistematičnega pristopa in pristopa, ki omogoča nadgradnje, ni mogoče pričakovati napredka na področju kvantitativnega odločanja.

3.5. Kje obstaja verjetnost, da bodo vaša znanstvena spoznanja deležna zaznavnega odziva?

X a) v domačih znanstvenih krogih;

V 2023 smo organizirali posvet Modeli pri gospodarjenju z gozdovi in digitalna prihodnost gozdarstva.

1. FICKO, Andrej (urednik). *Modeli pri gospodarjenju z gozdovi in digitalna prihodnost gozdarstva : XXXIX. Gozdarski študijski dnevi : zbornik povzetkov predavanj : Ljubljana, 28.-29. september 2023 = Models in forest management and the digital future of forestry : XXXIX. Forestry Study Days : book of abstracts : Ljubljana, 28.-29. september 2023*. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 2023. II, 30 str. ISBN 978-961-6020-85-5. <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=150570>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=150570>. [COBISS.SI-ID [165008899](https://doi.org/10.1007/s10342-023-01562-z)]

X b) v mednarodnih znanstvenih krogih;

Znanstvena spoznanja so bila objavljena v znanstvenih člankih in pričakujemo odzive v obliki citatov in ponovljenih študij. Objave znanstvenih člankov s povezavami do citatov:

1. BONČINA, Andrej, TRIFKOVIČ, Vasilije, FICKO, Andrej, KLOPČIČ, Matija. Diameter growth of European beech on carbonate: a regional versus forest type perspective. *European journal of forest research (Internet)*. 2023, vol. 142, iss. 4, str. 917-932. ISSN 1612-4677. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01562-z>, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-023-01562-z>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=148145>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=148145>, DOI: [10.1007/s10342-023-01562-z](https://doi.org/10.1007/s10342-023-01562-z). [COBISS.SI-ID [149604099](https://doi.org/10.1007/s10342-023-01562-z)], [JCR, SNIP, Scopus do 22. 10. 2023: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.25]
2. TRIFKOVIČ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Recruitment of European beech, Norway spruce and silver fir in uneven-aged forests : optimal and critical stand, site and climatic conditions. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. 2023, vol. 529, art. 120679, 13 str. ISSN 1872-7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120679>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112722006739?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142940>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142940>, DOI: [10.1016/j.foreco.2022.120679](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120679). [COBISS.SI-ID [132318979](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120679)], [JCR, SNIP, WoS do 1. 9. 2023: št. citatov (TC): 2, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.33, Scopus do 21. 10. 2023: št. citatov (TC): 2, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.33]
3. TRIFKOVIČ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Density-dependent mortality models for mono- and multi-species uneven-aged stands: The role of species mixture. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. 2023, vol. 545, article no. 121260, str. 1-12. ISSN 1872-7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121260>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723004942?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=149152>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=149152>, DOI: [10.1016/j.foreco.2023.121260](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121260). [COBISS.SI-ID [163208707](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121260)], [JCR, SNIP, WoS, Scopus]
4. BONČINA, Andrej, TRIFKOVIČ, Vasilije, FICKO, Andrej. Diameter growth of Silver fir (*Abies alba* Mill.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), and Black pine (*Pinus nigra* Arnold) in Central European forests : findings from Slovenia. *Forests*. [Online ed.]. 2023, vol. 14, iss. 4 [article no. 793], 16 str. ISSN 1999-4907. <https://doi.org/10.3390/f14040793>, <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/4/793>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=145342>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=145342>, DOI: [10.3390/f14040793](https://doi.org/10.3390/f14040793). [COBISS.SI-ID [149608195](https://doi.org/10.3390/f14040793)], [JCR, SNIP, WoS do 7. 11. 2023: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.33, Scopus do 27. 10. 2023: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.33]
5. TRIFKOVIČ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Analyzing asymmetries in the response of European beech to precipitation anomalies in various stand and site conditions using decadal diameter censuses. *Agricultural and forest meteorology*. [Print ed.]. 2022, vol. 327, art. 109195, 15 str., ilustr. ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109195>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192322003823?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142410>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142410>, DOI: [10.1016/j.agrformet.2022.109195](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109195). [COBISS.SI-ID [128324355](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109195)], [JCR, SNIP, WoS do 7. 11. 2023: št. citatov (TC): 5, čistih citatov (CI): 2, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.67, Scopus do 13. 10. 2023: št. citatov (TC): 4, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAU): 0.33]

6. FICKO, Andrej, TRIFKOVIĆ, Vasilije. Primerjava različnih regresijskih modelov za napovedovanje debelinskega priraščanja jelke = A comparison of alternative types of regression models for predicting the diameter increment of silver fir. *Acta Silvae et Ligni*. [Tiskana izd.]. 2021, [št.] 126, str. 61-76, ilustr. ISSN 2335-3112. <https://doi.org/10.20315/ASetL.126.6>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=14645>, <http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-TXoTX5C1>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=14645>, DOI: [10.20315/ASetL.126.6](https://doi.org/10.20315/ASetL.126.6). [COBISS.SI-ID [87358979](https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-TXoTX5C1)], [WoS]
7. BONČINA, Živa, TRIFKOVIĆ, Vasilije, ROSSET, Christian, KLOPČIČ, Matija. Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests. *IForest*. 2022, vol. 15, iss. 6, str. 484-490, ilustr. ISSN 1971-7458. <https://doi.org/10.3832/for4145-015>, <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142941>, <https://iforest.sisef.org/abstract?id=ifor4145-015>, <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142941>, DOI: [10.3832/for4145-015](https://doi.org/10.3832/for4145-015). [COBISS.SI-ID [132338691](https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-TXoTX5C1)], [JCR, SNIP, WoS do 21. 7. 2023: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.25, Scopus]
8. JEVŠENAK, Jernej, MALI, Boštjan, SKUDNIK, Mitja. Analiza izbranih drevesnih modelov razvoja gozdov, primernih za modeliranje na velikoprostorski ravni, in možnosti njihove uporabe v Sloveniji = Analysis of selected single-tree growth models suitable for large-scale modelling and their potential use in Slovenia. *Acta Silvae et Ligni*. [Tiskana izd.]. 2023, [št.] 130, str. 1-16, ilustr. ISSN 2335-3112. <https://doi.org/10.20315/ASetL.130.1>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=16665>, <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=147236>, <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=147236>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=16665>, DOI: [10.20315/ASetL.130.1](https://doi.org/10.20315/ASetL.130.1). [COBISS.SI-ID [156905475](https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-TXoTX5C1)], [WoS]
9. JEVŠENAK, Jernej, ARNIČ, Domen, KRAJNC, Luka, SKUDNIK, Mitja. Machine Learning Forest Simulator (MLFS) : R package for data-driven assessment of the future state of forests. *Ecological informatics*. 2023, vol. 75, article no. 102115, 11 str. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102115>
10. SKUDNIK, Mitja, JEVŠENAK, Jernej. Artificial neural networks as an alternative method to nonlinear mixed-effects models for tree height predictions. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. vol. 507, art. 120017, 9 str. ISSN 1872-7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120017>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112722000111?dgcid=author>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=15134>

X c) pri domačih uporabnikih;

Predvideno je sodelovanje z ZGS pri nadaljnjem razvoju aplikacij.

d) pri mednarodnih uporabnikih.

3.6. Kdo (poleg sofinancerjev) že izraža interes po vaših spoznanjih oziroma rezultatih?

Zavod za gozdove Slovenije

3.7. Število diplomantov, magistrstrov in doktorjev, ki so zaključili študij z vključenostjo v raziskovalni projekt?

Z raziskovalnega področja projekta je v 2024 predviden zagovor doktorata Vasilija Trifkovića (tematika modeli debelinske rasti, vrasti in mortalitete) ter zagovor doktorata Žive Bončina (modeli debelinske strukture).

4. Sodelovanje z tujimi partnerji:

4.1. Navedite število in obliko formalnega raziskovalnega sodelovanja s tujimi raziskovalnimi inštitucijami.

Pri razvoju modelov debelinske strukture in vgradnji razvitih modelov v simulator smo sodelovali z Univerzo v Bernu (Švica), prof. dr. Christianom Rossetom ter njegovimi sodelavci (Gaspard Dumollard). Sodelovanje je formalizirano (somentorstvu pri doktoratu Žive Bončina). Omogočen je bil vpogled v delovanje modela SiWaWa in sklenjen dogovor o izdelavi slovenske različice tega simulatorja.

Pri razvoju modelov debelinskega priraščanja in mortalitete smo sodelovali z Univerzo v Zagrebu , prof. dr. Jura Čavlović inizr. prof. dr. Krunoslav Teslak v obliki gostovanja vodje projekta pri gostiteljih in članstvu izr. prof. dr. Teslaka v komisiji za oceno primernosti doktorske disertacije.

Raziskovalno sodelovanje je potekalo tudi z Univerzo v Zvolnu (doc. dr. Michal Bose'la, september do november 2023) in Tehniško univerzo v Münchnu (prof. dr. Thomas Knoke, september 2023). Oba raziskovalca sta 28. in 29. 9. 2023 sodelovalna na predstavitvi rezultatov modelov in evalvaciji.

Datum:13. 11. 2023

Podpis vodje projekta:

Podpis in žig izvajalca:

Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji (V4-2014)

Zaključno poročilo o rezultatih opravljenega
raziskovalnega dela na projektu v okviru
ciljnega raziskovalnega programa (CRP)

Avtorji: Andrej Ficko, Vasilije Trifkovič,
Živa Bončina, Blanka Klinar, Maruša
Čotar, Andrej Bončina, Matija Klopčič,
Mitja Skudnik, Jernej Jevšenak

Univerza v Ljubljani, Biotehniška
fakulteta



Univerza v Ljubljani



Biotehniška fakulteta

Naslov projekta in šifra projekta: Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji (V4-2014)

Trajanje in vrednost: 1.11.2020 - 31.10.2023
150.000 €

Nosilna RO: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

Sodelujoče RO: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta
Gozdarski inštitut Slovenije

Vodja projekta: Izr. prof. dr. Andrej Ficko

Sodelujoči na projektu: Izr. prof. Andrej Ficko, Vasilije Trifković, Blanka Klinar, Živa Bončina, Maruša Čotar, prof. dr. Andrej Bončina, doc. dr. Matija Klopčič, Blaž Fricelj, Tim Pirc, doc. dr. Mitja Skudnik, dr. Jernej Jevšenak

Financerja:



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA KMETIJSTVO,
GOZDARSTVO IN PREHRANO



Javna agencija za znanstvenoraziskovalno
in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije

Povzetek

Kljub bogatim podatkovnim zbirkam in raznolikosti sestojev v Sloveniji primanjkuje lastnih modelov razvoja gozdov. Projekt se osredotoča na razvoj modela razvoja gozdov na drevesni ravni za podporo odločanju in upravljanju gozdov. Cilji projekta so bili 1) izdelava koncepta modela, 2) priprava in upravljanje podatkov, 3) razvoj modulov, 4) izgradnja modela in simulacije razvoja gozdov ter 5) implementacija in testiranje modela. Z razvojem modela, ki upošteva specifične razmere v slovenskih gozdovih (rast, mortaliteta, vrast), želimo izboljšati procese odločanja pri gospodarjenju z gozdovi. V projektu smo izdelali konceptualni model, analizirali smo dostopnost in resolucijo podatkov, pripravili podatkovne zbirke in protokole obdelav, izvedli modeliranje debelinske rasti dreves za 40 vrst, vrasti, mortalitete dreves in največjih sestojnih gostot, debelinske strukture gozdnih sestojev ter izvedli parametrizacijo dveh obstoječih velikoprostorskih modelov. Pri oblikovanju konceptualnega modela smo uporabili diagram poteka z več hierarhičnimi ravni za podrobno opredelitev kompleksnih procesov. Za modeliranje debelinske rasti smo uporabili kubične naravne zlepe in polinomske regresije. Pri modeliranju vrasti smo uporabili Tobit model krnjene regresije, pri mortaliteti pa Reinekejeve krivulje in logistične modele. Parametre v Reinekejevih krivuljah smo ocenjevali z uporabo kvantilne regresije in stohastične mejne analize. Za velikoprostorske modele smo uporabili podatke nacionalne gozdne inventure in razvili vrstno specifične modele ter uporabili več podnebnih scenarijev. V zaključku smo izdelali prvo različico prototipa računalniškega modela na drevesni ravni v programskem paketu Excel. Modele debelinske strukture bukovih gozdov smo vgradili v slovensko različico simulatorja SiWaWa 2.0. Zaključujemo, da je za parametrizacijo modelov pomembno ohranjati fino mrežo meritev na stalnih vzorčnih ploskvah. Poudarjamo pomen samostojnega razvoja modelov v Sloveniji. Sistematična podpora in naložbe v raziskave na tem področju so ključne za nadaljnji napredek modelov in aplikacije.

Ključne besede

modeliranje razvoja gozdov, upravljanje gozdov, rast drevesa, simulator, mortaliteta, gozdnogospodarsko načrtovanje

Abstract

Despite rich databases and the diversity of stands in Slovenia, there is a lack of locally developed models. This project focuses on creating a stand growth simulator at the tree level to support decision-making and forest management. The project goals include 1) developing the conceptual model, 2) preparing and managing data, 3) developing modules, 4) building the prototype and simulating forest development, and 5) implementing and testing the tree-level forest development model. By developing a model that considers the specific conditions in Slovenian forests (growth, mortality, ingrowth), we aim to improve decision-making processes in forest management. In creating a conceptual model, we used a flowchart. Cubic natural splines and polynomial regression were used for modeling tree diameter growth, Tobit censored regression models for ingrowth, and Reineke curves and logistic models for tree mortality. Parameters in Reineke's curves were estimated using Quantile regression and Stochastic frontier analysis. Reineke's curves were developed for several types of pure and mixed uneven-aged stands. For large-scale models, national forest inventory data were used to develop species-specific models, considering multiple climate scenarios. In conclusion, the project produced a prototype of forest stand simulator at the tree level using Excel. Models of beech forest diameter structure were incorporated into the Slovenian version of the mobile SiWaWa 2.0 simulator. The study emphasizes the importance of maintaining a fine network of measurements on permanent sample plots for model parameterization. Systematic support and research investments are crucial for further progress in this field and transferring the models into applications.

Key words

forest stand development, forest management, growth&yield analysis, stand simulator, mortality, forest management planning

1. Opis problema in ciljev

Modeli se v gozdarstvu uporabljajo že od samega začetka načrtnega gospodarjenja. Razlog za relativno večji pomen modelov v gozdarstvu je predvsem v veliki prostorski razsežnosti gozdov, dolgih proizvodnih obdobjih, heterogenih rastiščnih in sestojnih razmerah ter različnih okoljskih dejavnikov, ki lahko znatno vplivajo na razvoj gozdov. Za razumevanje stanja gozdov in načrtovanje gospodarjenja z gozdovi je zato nujno poenostavljanje, ki ga dosežemo z modeliranjem.

Med modeli, ki se uporabljajo v gozdarstvu, prevladujejo tisti, ki obravnavajo drevje in gozdne sestoje (v nadaljevanju »modeli razvoja gozdov«). Ti modeli so pomembni za 1) opisovanje stanja gozdnih sestojev (npr. model razvojnih faz gozda ali model optimalne debelinske strukture), 2) razumevanje dosedanjega razvoja drevja in sestojev (npr. zakonitosti priraščanja drevja in sestojev, pomlajevanja in mortalitete drevja) in predvsem za 3) prognoziranje razvoja gozdnih sestojev. Prognoziranje (ang.: *forecasting*) razvoja sestojev pomeni znanstveno napovedovanje njihovega prihodnjega razvoja glede na prepoznane zakonitosti v dosedanjem razvoju. Prognoziranje je pomembno za oblikovanje scenarijev, s katerimi napovedujemo razvoj gozdnih sestojev glede na različne variante ukrepanja in/ali različne vplive iz okolja, kar je podlaga za odločitve in načrtovanje prihodnjih ukrepov.

Z modeli razvoja gozdov napovedujemo razvoj dreves ozirom gozdnih sestojev glede na drevesne, sestojne, rastiščne in gozdnogospodarske dejavnike. Spremembe gozdnih sestojev so posledica treh glavnih procesov: 1) rasti, 2) pomlajevanja in vraščanja drevja ter 3) mortalitete drevja. Ti procesi so različni glede na rastiščne in okoljske razmere, nanje lahko pomembno vplivamo z gospodarjenjem z gozdovi. Modeli razvoja gozdov so praviloma sestavljeni iz sistema enačb in algoritmov, ki temeljijo na empiričnih relacijah med znaki posameznega drevesa ali sestoja in/ali matematični kvantifikaciji različnih ekofizioloških procesov. Prvi znani modeli razvoja gozdov so donosne (sestojne) tablice, ki so jih razvili prirastoslovci za spremljanje rasti sestojev in donosov gozdov. Najpreprostejše najdemo že v 18. stoletju, dopolnjevale pa so se v 19. in 20. stoletju. Sredi 20. stoletja so raziskovalci začeli razvijati prve empirične modele, pozneje so razvijali programska orodja za modeliranje, v zadnjih desetletjih pa je opazen razvoj procesnih in hibridnih modelov (Pretzsch, 2010); slednji združujejo elemente empiričnih in procesnih modelov.

Modeli so bili razviti bodisi v znanstvene namene ali za podporo odločanju pri gospodarjenju gozdovi (npr. SYLVA, Pretzsch, 2010; MOSES, Hasenauer, 1994; PICUS, Lexer and Hönninger, 2001; SiWaWa, Rosset in sod., 2013) in gozdni politiki (npr. EFISCEN, Nabuurs in sod., 2001; CBM-CFS, Kurz in sod., 2009). Različni tipi modelov razvoja gozdov zahtevajo različne vhodne podatke. Za nekatere omenjene modele zadostujejo podatki iz obstoječih gozdarskih podatkovnih virov, za druge je treba podatke dopolniti.

V Sloveniji so razmere na področju razvoja modelov za gospodarjenje z gozdovi v primerjavi z gozdarsko razvitimi deželami precej slabe. Ostali smo pri uporabi sestojnih tablic, švicarske sestojne tablice so bile razvite pred dobrimi petdesetimi leti, pred slabimi dvajsetimi leti je Kotar (2003) priredil slovaške donosne tablice. Poznano je, da imajo tablice številne pomanjkljivosti in zato omejeno uporabno vrednost za upravljanje gozdov. Zavod za gozdove Slovenije je razvil modele proizvodnih dob in optimalnega razmerja razvojnih faz gozda (Veselič, 2002). V nekaj zadnjih letih smo v Katedri za urejanje gozdov in ekosistemske analize na Oddelku za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire v sodelovanju s tujimi raziskovalci (Hubert Hasenauer, Manfred J. Lexer, Timo Pukkala, Christian Rosset, Thomas Knoke) preverjali nekatere sodobne modele razvoja gozdov (npr. MOSES, ForClim, Efiscen) in nekatere modele tudi že razvili za izbrana območja in drevesne vrste (npr. matrične modele za raznomerne gozdove jelke, bukve in smreke; Ficko in sod., 2016). Nekateri izsledki so bili objavljeni (npr. Hudernik, 2016; Mina in sod., 2016; Klopčič in sod., 2017; Ficko in sod., 2018), modeli pa niso v obliki, da bi jih lahko neposredno uporabili pri upravljanju gozdov. Na Gozdarskem inštitutu Slovenije so s podatki Nacionalne gozdne inventure (NGI) testirali uporabo globalnega modela European Forestry Dynamics Model (EFDM) (Skudnik in Mali, 2015). Znatno izboljšavo pomeni CRP projekt V4-1821 Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različnih prostorskih ravneh (vodja Matija Klopčič), ki je usmerjen v pregled osnovnih tipov modelov razvoja gozdov na globalni in evropski ravni ter presoji, kateri izmed teh tipov modelov je najprimernejši za simuliranje razvoja gozdov v Sloveniji. Končni rezultati tega projekta so bili izhodišče za začetek izgradnje modela razvoja gozdov v tem projektu.

Primerjalno z drugimi državami imamo v Sloveniji bogate in tudi relativno podrobne podatkovne zbirke o gozdnih sestojih, deloma tudi rastiščih; ti podatki niso optimalno uporabljeni za modeliranje in upravljanje gozdov, so pa dobro izhodišče za razvoj modelov. Do sedaj tudi še nismo razvili vseh prirastoslovnih podlag, ki so pogoj za izdelavo modelov. Eden izmed pomembnih parametrov pri opisu sestoja je njegova debelinska struktura. Ta kaže na sestojni tip, stabilnost sestoja, kompeticijo med drevesi, dinamiko rasti, sortimentno sestavo, pa tudi nakazuje bodoči razvoj sestoja in potrebne ukrepe v prihodnosti (Kangas in Maltamo, 2000; Kotar, 2005; Pretzsch, 2010). Poleg tega je debelinska struktura sestoja pri mnogih modelih, ki operirajo na drevesni ravni, nujen vhodni podatek (Fabrika in Pretzsch, 2013; Rosset in sod., 2018). Podatke za analize debelinske strukture pridobimo z meritvami dreves v okviru gozdne inventure, kar pa praviloma pomeni visoke stroške in časovno potratno delo. Zato se pri zagonu določenih modelov včasih namesto dejanske strukture uporablja simulirana debelinska struktura. Za delovanje takšnega modela moramo poznati povezave med sestojnimi, rastiščnimi in klimatskimi parametri ter debelinsko strukturo, na podlagi katerih bi lahko zgradili model za napovedovanje debelinske strukture.

V gozdnogospodarskem načrtovanju modelov ne uporabljamo, saj sodobnih modelov razvoja gozdov nimamo, modeli, razviti v tujini, pa praviloma brez obsežne reparameterizacije in validacije niso primerni. Poleg tega so sestoji v Sloveniji bolj ali manj raznomerni, po navadi mešani, gozdove zaznamuje velika rastiščna pestrost, kar omejuje uporabo tujih modelov. Za načrtovanje in upravljanje gozdov je zato treba razviti modele, ki bodo omogočili simulacije razvoja gozdov za različne rastiščne tipe glede na različne variante ukrepanja. Takšni modeli bi bili uporabni za načrtovalce, revirne gozdarje in lastnike gozdov, pa tudi za gozdno politiko. Izgradnja modelov razvoja gozdov je dolgotrajno delo, v tujini se model razvoja gozdov po navadi razvija nekaj desetletij. Ob tem se je treba zavedati, da je treba modele glede na nova znanja in podatkovne vire, nove tehnične možnosti in tudi okoljske spremembe dopolnjevati in nadgrajevati. V Sloveniji bomo s predlaganim projektom postavili temelje za razvoj modeliranja razvoja kot enega izmed pomembnih področij upravljanja gozdov.

Cilji projekta so bili:

- C1. izdelati koncept modeliranja razvoja gozdov v Sloveniji, ki bo podlaga za izdelavo računalniške aplikacije za podporo odločanju,
- C2. izdelati protokol priprave in dopolnitve podatkov Zavoda za gozdove Slovenije za modeliranje razvoja gozdnih sestojev,
- C3. izdelati modele (regresije za razvoj izbranih drevesnih in sestojnih parametrov) za opisovanje razvoja gozdnih sestojev za glavne gozdne tipe v Sloveniji,
- C4. izdelati simulacijo razvoja gozdov z vključevanjem upravljaljskih strategij,
- C5. izdelati in testirati računalniško aplikacijo v podporo odločanju pri gospodarjenju z gozdovi.

Cilje projekta smo dosegli s petimi delovnimi sklopi (WP) znotraj katerih je bilo trinajst nalog (T):

WP1: Konceptualna zasnova modelov razvoja gozdov v Sloveniji

- T1.1: Oblikovanje konceptualnega modela izgradnje razvoja gozdov
- T1.2: Določitev načinov izdelave prototipa modela razvoja gozdov

WP2: Upravljanje podatkov, potrebnih za izgradnjo modelov

- T2.1: Priprava podatkovnih zbirk za obdelavo v regresijskih modelih
- T2.2: Izračun osnovnih vhodnih spremenljivk za posamezne module in protokoli njihovih izračunov

WP3: Moduli in parametrizacija funkcij

- T3.1: Transformacije spremenljivk in izgradnja modulov za debelinsko rast, mortaliteto in

vrast

- T3.2: Kontrola kakovosti regresijskih modelov in mer prileganja (validacija)
- T3.3: Prileganje porazdelitvenih funkcij empiričnim podatkom o debelinski strukturi
- T3.4: Izgradnja regresijskih modelov med parametri porazdelitvenih funkcij in sestojnimi parametri
- T3.5: Parametrizacija velikoprostorskih modelov CALDIS in FORMIT-M

WP4: Simulacije razvoja gozdov

- T4.1: Izdelava prve verzije prototipa modela in vključitev omejenega števila upravljaljskih strategij
- T4.2: Izdelava prototipa računalniškega modela razvoja gozdov ("alfa" različica)

WP5: Prenos modela v prakso in kontrola kakovosti

- T5.1: Kodiranje in implementacija programa v programskem jeziku
- T5.2: Preskušanje in vzdrževanje "beta" različice.

Razdelitev v delovne sklope in naloge izhaja iz temeljnih faz pri razvoju modelov razvoja gozdov, ki obsegajo strukturiranje problema, oblikovanje konceptualnega modela z osnovnimi diagrami poteka, izgradnjo matematičnih modelov z validacijo, izgradnjo prve končne stabilne verzije in testiranje modela in kontrolo njegove kakovosti.

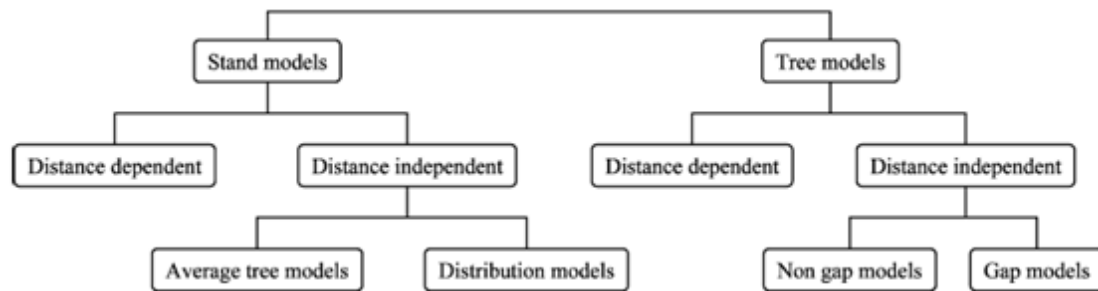
2. *Kratek povzetek ključnih ugotovitev iz literature*

Modele razvijamo za lažje razumevanje kompleksnih odnosov v okolju. So koristno orodje za podporo pri odločanju pri gospodarjenju z gozdovi. Z njimi lahko simuliramo prihodnji razvoj gozdnih sestojev, kar je pomembno zaradi dolgih proizvodnih obdobj (Uzoh in Oliver, 2008; Burkhardt in Tomé, 2012). Prvi modeli za upravljanje gozdov, ki so primerljivi z današnjim pojmovanjem modela, so bile donosne tablice (Skovsgaard in Vanclay, 2007; Pretzsch, 2009). Sestojne tablice so izdelane na podlagi meritev velikega števila dreves in opisujejo razvoj povprečnih sestojnih parametrov v čistih sestojih na določenem območju po starostnih obdobjih. V zadnjih nekaj desetletjih se modeliranje razvoja gozdov naglo razvija zaradi razvoja računalniške tehnologije ter dopolnjenih teoretičnih osnov za modeliranje rasti in drugih procesov v gozdnih ekosistemih (Pretzsch, 2009; Burkhardt in Tomé, 2012).

Modelov razvoja gozdov je več vrst. Osnova delitev je na empirične, procesne (mehanistične) in hibridne. Prvi so primernejši za upravljanje, drugi so uporabni predvsem za raziskovalne namene in temeljijo na zvezah med parametri, ki opisujejo ekofiziološke procese (Pretzsch, 2009; Burkhardt in

Tomé, 2012), tretji pa so kombinacija prvih dveh (Landsberg, 1986; Kimmins, 1990; Mohren in sod., 1994). Empirični modeli temeljijo na empirično ugotovljenih povezavah med drevesnimi oziroma sestojnimi znaki, ki so pogosto opredeljeni glede na rastiščne razmere, in rastjo. Za upravljanje gozdov na sestojni in rastiščni ravni so pomembni predvsem ti.

Glede na način modeliranja rasti lahko razdelimo modele na sestojne, drevesne in modele, ki združujejo principe obeh skupin (Munro, 1974; Burkhardt 1990; Pretzsch, 2009; Burkhardt in Tomé, 2012, Slika 1).



Slika 1: Poenostavljena delitev modelov razvoja gozdov (po Porté in Bartelink, 2002): V projektu razviti model spada v skupino prostorsko neodvisnih drevesnih modelov (Non gap models)

Sestojni modeli kažejo razvoj sestojnih parametrov, tipičen primer so sestojne tablice. Pri vmesnih oblikah modelov so podatki o rasti sestoja izračunani z agregacijo podatkov o rasti dreves ali obratno, na podlagi rasti sestoja so generirane vrednosti rasti posameznih dreves (npr. Rosset in sod., 2013; Siwawa 2.0..., 2018). Drevesni modeli so praviloma najbolj natančni, mnogi izmed njih upoštevajo tudi prostorsko razporeditev dreves (Pretzsch, 2009; Burkhardt in Tomé, 2012). Podvrsta drevesnih modelov so modeli vrzeli ali modeli zaplat (»gap models«) (Bugmann, 2001), ki so za upravljanje gozdov manj uporabni, a sposobni bolj natančne obravnave rasti in odziva vegetacije na okoljske dejavnike.

Zaradi razlik v razvoju enomernih in raznomernih sestojev so se modeli za enomerne in raznomerne sestoje razvijali večinoma ločeno. Deloma je k temu pripomoglo tudi dejstvo, da zaradi prevladujočega golosečnega načina gospodarjenja v času, ko so nastajale prve donosne tablice, raznomerni sestoji niso bili zanimivi. Ker je mešanost v raznomernih sestojih ponavadi večja in ker ni bilo na voljo dovolj trajnih raziskovalnih objektov za spremljavo rasti, je razvoj modelov za raznomerne sestoje zaostajal za razvojem modelov za enomerne sestoje. S spreminjanjem koncepta gospodarjenja pa vse več srednjeevropskih gozdov izgublja klasično enomerno zgradbo, povečuje se mešanost. Smaltschinski (1990) je že pred 30 leti na podlagi podatkov nacionalne gozdne inventure (NGI) v Nemčiji navajal, da je kar 42 % gozdov v Nemčiji mešanih. V Avstriji NGI kaže, da je površina takšnih gozdov okrog 36 %. V Sloveniji je delež čistih sestojev izredno majhen, delež prebiralnih

gozdov se sicer giblje okrog 5 % celotne gozdne površine (ZGS, 2000; Bončina, 2011), sestojev z raznomerno zgradbo pa je bistveno več. Raznomernost je pogosto posledica pestrih rastiščnih razmer, ki se mozaično spreminjajo. Kompleksna sestojna zgradba raznomernih gozdov in dinamika teh gozdov (Bončina, 1994; Schütz, 2001) sta še vedno predmet številnih raziskav.

V zadnjih dveh desetletjih je bilo na globalni ravni razvito veliko število računalniško podprtih rastiščnih modelov za modeliranje rasti in donosa za raznomerne gozdove. Med izrazito uporabnimi za upravljanje lahko omenimo na primer modele, ki so jih za raznomerne gozdove v ZDA razvili na Univerzi v Oregonu v skupini prof. Buongiorna (npr. NorthPro, SouthPro, WestPro Plus, CallPro), saj poleg prognoziranja omogočajo tudi optimiziranje gospodarjenja in finančne analize. Kasneje so bili ti modeli reparameterizirani za mešane sestojne smreke, rdečega bora in breze različnih sestojnih oblik na Norveškem (model NorgePro, avtorji Espen Halvorsen, Joseph Buongiorno in Ole-Martin Bollandssås). Na Finskem so se z razvojem modelov za raznomerne sestojne ukvarjali npr. Timo Pukkala (2009), Erki Lähde in Oli Tahvonen (2011). V Sloveniji z izjemo matričnih modelov za nekaj rastiščnih tipov z jelko (Ficko in sod., 2016; Ficko in sod., 2018) ne razpolagamo z modeli, ki bi bili primerni za napovedovanje rasti in razvoja raznomernih gozdov. Ravno tako še nimamo svojega modela razvoja enomernih sestojev, čeprav je bilo raziskav, usmerjenih v to področje, v preteklosti veliko in jih bomo lahko v projektu neposredno uporabili pri razvoju modela. Prvi tak poskus modela povprečij na sestojni ravni je model MORSE (MOdel Razvoja Sestojev, Bončina in Štraus, 2022), ki omogoča simuliranje razvoja enomernih mešanih sestojev na ravni posameznih sestojev in večji prostorski ravni. Zgrajen je iz treh modulov, ki obravnavajo rast, mortaliteto in ukrepanje (redčenje in obnova). MORSE simulira razvoj sestojev za obdobje dvesto let glede na upravljavske odločitve o redčenju (jakost, pogostnost, zvrst, pospeševanje drevesnih vrst) in obnovi (ciljne velikosti, pomladitvena doba, čas in jakost pomladitvenih sečenj, pomladitveni cilj). Mogoča sta dva načina določanja režima redčenj: i) eksplicitna določitev terminov in jakosti redčenj in ii) posredna glede na primerjavo dejanske in optimalne temeljnice sestojja. MORSE je v fazi preverjanja na sestojni ravni, potrebna je tudi validacija modela in morebitna parametrizacija določenih funkcij na slovenskih podatkih.

Za izgradnjo modelov so potrebni podatki o rasti, vrsti in mortaliteti. Večina modelov v gozdarstvu je namreč empiričnih, to je zgrajenih na preteklih opazovanjih teh pojavov. S produktijsko sposobnostjo rastišč in rastjo so se v Sloveniji poglobljeno ukvarjali predvsem Čokl (1967, 1971), Košir (1992), Kotar (1985, 1989, 1994, 1996, 2002, 2005), Kadunc (2003, 2004, 2010, 2012a) ter Kotar in Kadunc (2003). Čokl (1980) in pozneje Kotar (2003) sta priredila švicarske, nemške in slovaške (Halaj, 1987) tablice, ki opisujejo rastiščne procese v sestojih. Na področje prirastoslovnih raziskav pa so posegali tudi drugi, npr. Cedilnik (1986), Klopčič in sod. (2010), Kobal in sod. (2011), Hladnik in Kobal, 2012. V zadnjem obdobju smo na slovenskih podatkih preizkusili nekatere tuje modele; npr. model

vrzeli FORCLIM (Mina in sod., 2015; Klopčič in sod., 2017), uporabljene so bile tudi metode strojnega učenja (Debeljak in sod., 2011; Jevšenak in Levanič, 2016).

Modeli razvoja gozdov so po navadi sestavljeni iz več sklopov ali modulov, ki opisujejo (glavne) procese v gozdu; najpogosteje so to rast, (naravno) pomlajevanje in mortaliteta (npr. Bugmann in sod., 2001; Hynynen in sod., 2002; Pukkala in sod., 2009; Larocque in sod. 2011; Rasche in sod., 2012), pri raznomernih sestojih je pomembna še vrst. Modeliranje pomlajevanja (vrasti) in mortalitete drevja je zaradi kompleksa vplivnih dejavnikov zahtevnejše kot modeliranje rasti dreves (Pukkala in sod., 2008; Rasche in sod. 2012). V modele je možno vgrajevanje dodatnih modulov, npr. modulov za vpliv klimatskih sprememb (npr. FORCLIM, Mina in sod., 2015; Rasche in sod., 2011, 2013) in modulov variant ukrepanja (npr. Hynynen in sod., 2002; Pukkala in sod., 2008), bodisi s prednastavljenimi režimi ali pa je določitev ukrepanja predmet optimizacije. Slednje velja predvsem za modele za raznomerne sestoje, ki so zgrajeni na zakonitostih populacijske dinamike, na primer pri matričnih modelih.

Mnogi rastni modeli so bili razviti na podlagi podatkov z dolgoročnih raziskovalnih objektov in podatkov gozdnih inventur (npr. Hynynen in sod., 2002; Werhli in sod., 2005; Crookston in Dixon, 2005; Pukkala in sod., 2008; Rosset in sod., 2013; Hernandez–Moreno, 2018). Na Finskem so na podlagi podatkov gozdnih inventur razvili modele, ki simulirajo rast sestojev na podlagi modulov za pomlajevanje, rast in mortaliteto dreves (Hynynen in sod., 2002; Pukkala in sod., 2008). Uporabljajo jih za določanje trajnostne količine poseka na različnih rastiščih in preizkušanje različnih načinov gospodarjenja. V Švici na podlagi podatkov s številnih dolgoročnih raziskovalnih objektov in ploskev nacionalne gozdne inventure razvijajo in izpopolnjujejo več modelov. Model SiWaWa na podlagi preprostih vhodnih podatkov generira debelinsko strukturo sestoja in simulira razvoj sestoja za obdobje do 30 let, pri tem pa omogoča variiranje gojitvenega ukrepanja (Rosset in sod., 2013; Siwawa 2.o., 2018). Debelinska struktura je namreč lastnost, ki dobro opisuje sestojno strukturo in je ključni vhodni parameter tudi pri modelih za raznomerne sestoje. Napovedne spremenljivke, ki so bile uporabljene za napovedovanje debelinske rasti dreves, so bile izbrane na podlagi drevesnih, sestojnih in rastiščnih značilnosti ter pogosto transformirane. Zaradi hierarhične strukture podatkov (na primer drevesa so razvrščena v sestoje, ti pa naprej v rastiščne tipe) so pogosto uporabljeni mešani linearni modeli. Spremenljivke, kot so temeljnica debelejših dreves (BAL), indeks gostote sestoja (SDI), naklon, pH, depozicija dušika in temperatura, so bile vključene v večino modelov, med ostalimi spremenljivkami najdemo še tip gozda, ekspozicija, globalno sevanje ipd. Ralston in sod. (2003) so z nelinearnimi matričnimi modeli napovedovali rast dreves v raznomernih gozdovih duglazije na podlagi podatkov iz stalnih vzorčnih ploskev. Debelinsko rast so napovedovali kot funkcijo premera dreves, gostote sestoja, drevesne vrste, rastiščnega indeksa in sestojne temeljnice. Ugotovili so, da

se debelinska rast povečuje s premerom, doseže maksimum in se nato zmanjša. Debelinska rast je večja na produktivnejših rastiščih in manjša na ploskvah, ki imajo večjo temeljnico. Debelinsko rast oziroma verjetnost prehoda med debelinskimi razredi v desetih letih so Roessiger in sod. (2016) izračunali kot vsoto konstantne verjetnosti prehoda, izračunane z logistično regresijo z uporabo premera drevesa in gostote sestoja kot neodvisnih spremenljivk.

Vrast dreves, ki sledi odmiranju (mortaliteti) in poseku dreves, je bistvena komponenta modelov za raznomerne sestoje. Ralston in sod. (2003) so na podlagi podatkov iz stalnih vzorčnih ploskev izračunali parametre funkcije vrasti. Čeprav so bile v empiričnem delu preizkušene kompleksnejše enačbe, je končna različica modela predpostavljala, da je vrast linearno odvisna od gostote sestoja. Študija Pukkale (2009) predvideva vrast pri različnih načinih upravljanja in je izračunana posebej za smreko, bor, bukev in ostale vrste. Trasobares in sod. (2004) so razvili rastni model za raznomerne gozdove mešanih sestojev črnega in rdečega bora v Kataloniji. Roessiger in sod. (2016) so vrast modelirali z logaritemsko-logistično funkcijo sestojne temeljnice.

Mortaliteta dreves se pogosto obravnava kot ključni kazalnik spremembe gozdov (Adame, 2010). V simulaciji razvoja gozdnih sestojev je mortaliteta pomemben proces in eden od najmanj razumljenih pojavov v dinamiki gozdnih sestojev zaradi kompleksnih interakcij med različnimi okoljskimi dejavniki, pa tudi pomanjkanja podatkov za napovedovanje verjetnosti mortalitete dreves. Yao in sod. (2001) so razvili posplošeni logistični model za napovedovanje mortalitete dreves za določene drevesne vrste (topole, bore in smreko). Model temelji na empirični podatkovni zbirki stalnih vzorčnih ploskev. Vgrajeni model predvideva verjetnost preživetja posameznega drevesa na podlagi premera dreves, letnega debelinskega prirastka, temeljnice, drevesne sestave in produktivnosti rastišč. Hasenauer in sod. (2001) so uporabili različne vrste nevronske mreže, da bi predvideli smrtnost dreves in rezultate primerjali s konvencionalnim statističnim pristopom.

Za aplikativne modele, ki jih uporabljamo pri upravljanju gozdov, je pomembno, da lahko delujejo z enostavnimi, lahko izmerljivimi podatki o gozdnih sestojih (Hynynen in sod., 2002, Rosset in sod., 2013; Siwawa 2.0..., 2018). Kadar teh podatkov ni ali pa jih ni mogoče hitro pridobiti, pa lahko modeli manjkajoče podatke generirajo, npr. Siwawa (Siwawa, 2.0..., 2018), SILVA 2.2 (Pretzsch, 2001), SIBILA in SILVA.SK (Fabrika in Dursky, 2006). Takšen primer je npr. generiranje debelinske strukture gozdnih sestojev s pomočjo porazdelitvenih funkcij, katerih parametre poiščemo glede na enostavno merljive vhodne podatke, kot so temeljnica sestoja in število dreves, srednji temeljnični premer, rastiščni indeks in podobno (npr. Nord-Larson in Cao, 2006; Siwawa 2.0..., 2018; Schütz in Rosset, 2020). V Švici so v ta namen uporabljali različne funkcije; za opis unimodalnih porazdelitev, ki so značilne za enomerne sestoje, se je zaradi fleksibilnosti dobro obnesla (dvo ali triparametrna) Weibullova funkcija (Bailey in Dell, 1973; Burghart in Tomé, 2012).

3. Uporabljene metode dela

Pri **T1.1** Oblikovanje konceptualnega modela smo uporabili diagram poteka (angl. *flowchart*) z več hierarhičnimi ravnmi. Več ravni smo uporabili zato, da smo posamezne bolj kompleksne procese in postopke dovolj podrobno opredelili in da konceptualni model ni ostal na ravni idejne zasnove modela. Diagram poteka je prikazoval možne poti podatkov skozi sistem oz. program, na nižjih ravneh pa je opisoval potek operacij za izračun parametrov. Pri tem smo uporabili grafične simbole za ponazoritev vnosa in izpisa podatkov, odločitev, razvejitev in podprogramov. V **T1.2** smo izvedli analizo dostopnosti in resolucije vhodnih in izhodnih podatkov modelov, določili načine in protokole preverjanja veljavnosti modelov, opredelili načine izračunov v modulih (npr. prostorska raven enega sestoja, podrobnost obravnave, možnosti obravnave več sestojev hkrati in odločanje od zgoraj navzdol), določili načine integrabilnosti v ostale sisteme za podporo odločanju (DSS) ter stopnjo odprtosti, možnosti spreminjanja ter širitve, določili zahteve glede preglednosti izpisov in prijaznosti do uporabnika ter opredelili protokole za določitev hranjenja dokumentacije (delovni protokoli in metapodatki).

Pri pripravi podatkovnih zbirk za obdelavo v regresijskih modelih (**T2.1**) smo uporabili relacijske baze, izdelali protokole za standardizirane izračune spremenljivk, vključili kontrolnike veljavnosti in kakovosti podatkov ter določili mejne vrednosti pri klasifikacijskih spremenljivkah (enomernost/raznomernost, mešanost sestojev). Za parametrizacijo modelov debelinske rasti, vrasti in mortalitete so bili uporabljeni podatki dveh zaporednih meritev na stalnih vzorčnih ploskvah Zavoda za gozdove Slovenije (SFS, 2014). Najzgodnejša prva meritev je bila iz leta 1990, najpoznejša druga pa v letu 2014. Pri pojasnjevalnih spremenljivkah smo uporabili drevesne, sestojne, rastiščne, topografske in klimatske spremenljivke. Topografske spremenljivke smo izpeljali iz digitalnega modela reliefa (DEM, 2017) z ločljivostjo 5 m. Klimatske spremenljivke so bile izpeljane iz dolgoročnih podatkov o podnebjju v obdobju 1971-2000 (SEA, 2021). Bioklimatske spremenljivke so bile določene po O'Donnell and Ignizio (2012). Padavine so bile izračunane za desetletje, ki je bilo specifično za vsako ploskev, in so bile pridobljene iz visokoločljivega dnevnega podatkovnega niza SLOCLIM za obdobje 1950-2018 (Škrk in sod., 2021) v izvorni ločljivosti 1 km², ki smo jo pripeljali na mrežo vzorčnih ploskev s pomočjo metode najbližjega sosedu.

Za določitev strukture in klasifikacije stalnih vzorčnih ploskev (PSP) na enomerne (ang. *even-sized*) in raznomerne (ang. *uneven-sized*) smo uporabili indekse diverzitete premerov in terenske ocene razvojnih faz na ploskvah in sestoji na približno 90.000 ploskvah. Za vsako ploskev smo izračunali tri različne indekse diverzitete premerov, in sicer Gini indeks (Gini, 1921), Shannon indeks (Shannon, 1964) in koeficijent variacije premera (Danescu, 2016) glede na temeljnico posameznih dreves na

ploskvi. Nato smo izvedli analizo razvrščanja ploskev v dve skupini z metodo voditeljev (ang. K-means), posebej za Gini indeks, Shannon indeks in za koeficient variacije premerov. Vrednosti Gini indeksa se gibljejo med 0 in 1, pri čemer višje vrednosti kažejo na bolj raznoliko strukturo. Enako velja za Shannon indeks in koeficient variacije premera. Za preverjanje kakovosti klasifikacije in izbora najbolj primernega indeksa je bila izračunana mera podobnosti Sokal Michener med pari skupin na podlagi GINI_01, SHANNON_01 in DCV_01 in terenske ocene razvojnih faz na ploskvi (SVP_01) in na sestoji (SESTOJ_01). Rezultati so pokazali, da sta najbolj podobna indeks GINI_01 in ocena razvojne faze na sestoji SESTOJ_01, Sokal-Michenerjeva mera znaša 62 %, zato smo sprejeli Gini indeks in maksimalno vrednost Gini indeksa prve skupine 0,33 kot ustrezno mejo za razmejitev raznomernih ploskev od enomernih.

Za rast in naravno mortaliteto ter posek, za raznomerne sestojne pa tudi vrst, smo pripravili nabor spremenljivk, ki te procese opisujejo ter protokole za njihove izračune (**T2.2**). Podobno smo pripravili protokole izračunov in podatkovne zbirke za pojasnjevalne spremenljivke, s katerimi smo v WP3 izdelali regresijske modele. Obdelave so potekale v R programskem orodju in z GIS orodji. Vsi protokoli priprave in obdelave podatkov so bili dokumentirani, algoritemsko pa so bili zapisani v obliki skript v programskem jeziku R.

Za izdelavo modelov debelinske rasti dreves smo kot napovedne spremenljivke uporabili drevesne, sestojne in rastiščne parametre, ki smo jih po potrebi transformirali (**T3.1**). Uporabili smo spremenljivke, kot so prsni premer, temeljnica debelejših dreves (BAL), indeks gostote sestoja (SDI), sestojna temeljnica, število dreves, naklon, nadmorska višina, mešanost sestojev in stopnja raznomernosti (Preglednica 1).

Preglednica 1: Spremenljivke, ki smo jih uporabili pri izgradnji modelov (Opomba: pri testiranju končnih modelov in izgradnji modela debelinske rasti za bukev smo uporabili tudi druge (podrobne klimatske) spremenljivke)

Oznaka	Opis
DBH	Premer
DBH ²	Kvadrat prsnega premera
BA	Sestojna temeljnica
sqrt(BA)	Kvadratni koren sestojne temeljnice
N	Število dreves
QMD	Srednjetemeljnični premer
QMD ²	Kvadrat srednjetemeljničnega premera
BAL	Vsota temeljnic debelejših dreves
PBRO	Delež listavcev
P	Delež vrst

PCON	Delež iglavcev
ScS3	Socialni status dreves
SCA	Sposobnost senčenja
SCA:P41	Sposobnost senčenja:delež bukve
SHN	Shannon indeks, mešanost
GINI	Ginijev indeks diverzitete premerov
K	Volumen drevesa premera 45 cm
pH	pH vrednost
BEDROCK	Kamnina
RST	Kamnitost
ORG	Organska snov
NORTH	Severne ekspozicije
ELEV	Nadmorska višina
ELEV ²	Kvadrat nadmorske višine
SLOPE	Nagib
SLOPE ²	Kvadrat nagiba
BIO1	Povprečna letna temperatura zraka
BIO10	Povprečna letna temperatura najtoplejšega četrletja
PCPPSP	Količina padavin v 10-letnem obdobju
TMIN	Minimalna temperatura

Zaradi hierarhične strukture podatkov smo testirali tudi mešane linearne modele. Zaradi rezanja podatkov pri vrednosti 0 smo testirali regresijske modele z omejenimi odvisnimi spremenljivkami (*limited dependent variable models*), vse z ali brez dodajanja slučajnostnega šuma v intervalu [0,1) empiričnim podatkom o prirastku. Regresije so bile izvedene v programskih orodjih R in NLOGIT. Za modeliranje debelinskega prirastka posameznih dreves (id) smo uporabili 1) naravne regresijske zlepke "ns()" in 2) polinomske regresije. V zadnjo verzijo modela so bili vgrajeni modeli debelinskega priraščanja, izdelani s pomočjo polinomske regresije:

$$\sqrt{id} = \beta_1 + \beta_2 DBH + \beta_3 DBH^2 + \beta_4 \sqrt{BA} + \beta_5 BAL + \beta_6 QMD + \beta_7 QMD^2 + \beta_8 GINI + \beta_9 SHN + \beta_{10} ELEV + \beta_{11} ELEV^2 + \beta_{12} SLOPE + \beta_{13} SLOPE^2 + \beta_{14} K$$

kjer je id 10-letni debelinski prirastek, β_1 je konstanta in $\beta_{2,...,n}$ so regresijski koeficienti.

Posebej smo izdelali modele vrasti (**T3.1**). Vrast dreves smo definirali kot število dreves/ha, ki pri prejšnji meritvi niso presegla meritvenega praga 10 cm, pri ponovni meritvi pa imajo premer ≥ 10 cm (Poljanec, 2010). Pri dejavnikih, ki vplivajo na vrast, smo testirali vpliv gostote sestoja (npr. preko sestojne temeljnice) in ostalih sestojnih znakov. Poudarek je bil na vključitvi tistih znakov, ki bi jih bilo mogoče kasneje z gozdno inventuro na lahek način izmeriti, s čimer je zagotovljeno delovanje modela

v praksi. Za modeliranje vrasti smo uporabili Tobit model krnjene regresije, ki upošteva krnjenje pri nič. Funkcija vraščanja dreves R_i v številu vraslih dreves na ha se glasi:

$$R_i = \Phi\left(\frac{\beta_i X_i}{\sigma_i}\right) \beta_i X_i + \sigma_i \phi\left(\frac{\beta_i X_i}{\sigma_i}\right)$$

pri čemer je

$$\begin{aligned} \beta_i X_i = & \beta_0 + \beta_1 * N + \beta_2 * BA + \beta_3 * GINI + \beta_4 * P_i + \beta_5 * P_{CON} + \beta_6 * SCS_3 + \beta_7 * SCA + \beta_8 \\ & * SCA: P_i + \beta_9 * BEDR + \beta_{10} * RST + \beta_{11} * pH + \beta_{12} * ORG + \beta_{13} * K_i + \beta_{14} \\ & * NORTH + \beta_{15} * PCP_{PSP} + \beta_{16} * T_{MIN} + \beta_{17} * BIO1 + v_i \end{aligned}$$

Ta model uspešno rešuje nekonsistentnost in pristranskost cenilk, ki ju pogosto srečamo pri ocenah parametrov z metodo najmanjših kvadratov (OLS). Tobit regresijski model predpostavlja, da so vse negativne vrednosti latentne vrasti (y^*) cenzurirane na nič. To pomeni, da model domneva, da je vrast teoretično lahko tudi negativna, a je mi pri merjenju ne zaznamo, oziroma takšne vrednosti zabeležimo kot odsotnost vrasti. Posledica takšnega razumevanja je, da lahko uspešnejše modeliramo tudi primere, ko vrasti ni. Izbor spremenljivk za končni model je vključeval dva koraka. Najprej smo za zmanjšanje multikolinearnosti odstranili po eno spremenljivko iz parov s Pearsonovim koeficientom korelacije večjim od 0,6. Potem smo z metodo postopne vključitve spremenljivk v model vključevali spremenljivke in interakcije tako, da smo uporabili spremembo v AIC. Krivulje odziva smo uporabili za določitev optimalnih in kritičnih pogojev za vrast vrste. Optimalni pogoji so bili opredeljeni kot povprečje vsakega prediktorja pri vrednostih napovedane vrasti nad 95. percentilom, medtem ko so bili kritični pogoji opredeljeni kot povprečje vsakega prediktorja pri vrednostih napovedane vrasti, ki so manjše ali enake 5. percentilu. Za preverjanje modela smo uporabili razdelitev podatkov na učno in testno množico 30%/70% za učenje/testiranje. Modeli vrasti so bili izdelani za smreko, jelko in bukev, za ostale vrste predvidevamo uporabo enega izmed teh treh modelov, ali pa kasnejšo prametrizacijo. Za določene vrste modelov ne bo mogoče razviti zaradi zelo skromnih podatkov in velike stohastičnosti pojava. Regresije so bile izvedene v programskih orodjih R.

Pri modeliranju mortalitete dreves (**T3.1**) smo uporabili privzete generalne zakonitosti odmiranja v odvisnosti od sestojne gostote v obliki Reinekejevih krivulj, pri čemer smo za izbrane skupine mešanosti (GRP 1 do GRP 4) in čiste sestoje smreke, bukve in jelke razvili specifične krivulje največjih gostot. Koeficiente funkcij, ki opisujejo Reinekejeve krivulje maksimalnih gostot (N/ha) v odvisnosti od srednje temeljničnega premera (D_g) v dvojno logaritemskem papirju, smo najprej ocenili z uporabo kvantilne regresije (Koenker in Bassett, 1978), kjer smo uporabili 90., 95. in 99. centil, zatem pa tudi s pomočjo metode stohastične meje (SFA).

Linearizirana Reinekejeva funkcija maksimalnih gostot (N) v odvisnosti od srednje temeljničnega premera (D_g) je bila sledeča:

$$\ln N = c_0 + c_1 \ln D_g$$

Za izbrane rastiščne tipe z raznomernimi sestoji in 10 drevesnih vrst smo razvili posplošeni logistični model za napovedovanje verjetnosti mortalitete posameznega drevesa. Ker so bili intervali ponovnih meritev različni (z razponom od 6 do 12 let in mediano 10 let), smo logistično funkcijo utežili skladno z metodologijo, opisano v Monserud (1976).

Funkcija verjetnosti za pojav mortalitete:

$$\log(p/(1-p)) = (\beta_0 + \beta_1 DBH_{ij} + \beta_2 BA_{ij} + \beta_3 QMD + \beta_4 PBRO + \beta_5 P + \beta_6 SHN + \beta_7 K + \beta_8 pH + \beta_9 BEDROCK + \beta_{10} BIO1 + \beta_{11} BIO10 + u_j)$$

Da bi zmanjšali multikolinearnost v končnih modelih, smo izključili eno spremenljivko iz vsakega para, ki je imel Pearsonov korelacijski koeficient $> 0,8$. Za vsako vrsto posebej smo izdelali model, uporabili smo postopno metodo (ang. *stepwise*) z uporabo kriterija AIC za izbor spremenljivk na podlagi zmanjšanja deviance. Validacija modela je temeljila na desetkratni navzkrižni validaciji (ang. *k-fold cross validation*) (Kuhn, 2008). Regresije so bile izvedene v programskih orodjih R. Veljavnost regresijskih napovedi (**T3.2**) smo testirali z deljenjem podatkovne baze na učno in testno množico ali z navzkrižno validacijo. Vse v projektu zgrajene modele smo validirali.

Raziskavo smo omejili na čiste bukove enomerne gozdove. Za to smo se odločili, ker je bukev najpogostejša drevesna vrsta v Sloveniji (ZGS, 2022), bukova rastišča pokrivajo 70 % gozdne površine (Bončina in sod., 2021), na njih pa so enomerne zgradbe (razvojne faze) precej pogoste (Klopčič in sod., 2012).

Modeliranje debelinske strukture smo izvedli v programu R (R Core Team, 2022). Za modeliranje debelinske strukture se pogosto uporabljajo podatki (nacionalnih) gozdnih inventur (npr. Kangas in Maltamo, 2000), čeprav je raba relativno majhnih ploskev za modeliranje debelinske strukture v ohranjenih gozdovih z relativno naravno zgradbo redka (npr. Mey in sod., 2021). V naši raziskavi smo uporabili podatke s stalnih vzorčnih ploskev Zavoda za gozdove Slovenije. Naravne ujme imajo lahko znaten vpliv na debelinsko strukturo, zato smo v izogib vpliva obsežnega žledoloma v letu 2014 v analizah uporabili podatke, zbrane pred letom 2014 (ZGS, 2015). Bazo smo ustrezno prečistili, da ni vsebovala napak, izločili smo ploskve, ki so v podatkih vključevale napake, ki bi lahko ključno vplivale na izračun modela debelinske strukture. Kot čiste bukove sestoj smo opredelili ploskve, kjer je bil delež bukve v temeljnici $G > 80\%$, kot enomerne sestoj smo opredelili ploskve s Gini indeksom $< 0,33$ (Trifkovic in sod., 2023). Po zgledih iz literature (npr. Poudel in Cao, 2013) smo iz analiz odstranili

ploskve z manj kot 10 drevesi, podatkovna zbirka pa je kljub temu štela 6573 ploskev. Modeliranje smo izvedli na 70 % ploskev, 30 % smo jih uporabili za validacijo modelov (povzeto po npr. Berrar, 2019).

Podatkom o debelinski strukturi smo prilagajali Weibullovo funkcijo (**T3.3**), ki je ena od najpogosteje uporabljenih funkcij za opis debelinske strukture, saj lahko opiše različne oblike porazdelitev od eksponentne do normalne funkcije (Bailey and Dell, 1973; Kotar, 2005; Pretzsch, 2010; Fabrika in Pretzsch, 2013). Poleg tega so parametri Weibullove funkcije povezani s sestojnimi parametri; v primeru triparameterske Weibullove funkcije je parameter a (t.i. »location parameter«) povezan z začetkom porazdelitve oziroma minimalnim premerom (DMIN) (v primeru dvoparameterske funkcije je začetek funkcije v točki 0), parameter b (t.i. »scale parameter«) je povezan s srednje temeljničnim premerom (DG) in parameter c (t.i. »shape parameter«) nakazuje obliko porazdelitvene krivulje. Obstajajo tudi druge metode, npr. »percentile method« (Kangas in Maltamo, 2000), ki pa se za naše podatke niso izkazale kot uporabne. Enačbi 1 in 2 prikazujeta primer izračuna gostote verjetnosti in kumulativne verjetnosti Weibullove funkcije, pri čemer je x neodvisna spremenljivka, v našem primeru je to bil prsni premer dreves, a , b in c pa koeficienti funkcije:

$$f(x) = \frac{c}{b} * \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} * e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

Debelinsko strukturo smo modelirali s hektarskimi vrednostmi števila dreves na ploskvi po 5-cm debelinskih razredih. Parametre funkcije smo izračunali z metodama »parameter prediction method« (PPM) (Clutter in Bennet, 1965) in »parameter recovery method« (PRM) (Kangas in Maltamo, 2000). Preizkusili smo več različnih variant izračuna parametrov in njihovih kombinacij, skupaj 7: PPM, tri variante metode PRM PRM₁, PRM₂ in PRM₃ ter dve hibridni varianti H₁ in H₂, ki sta združevali pristope obeh skupin (preglednica 1), prikazali pa smo tudi rezultate metode prilagajanja s t.i. »computational method« COM.

Na podlagi rezultatov T3.3 smo raziskavo nadaljevali v **T3.4**. Tu smo PPM metodo nadgradili z izgradnjo linearnih modelov, pri čemer so bili dobljeni parametri Weibullove funkcije (t.j. zgoraj opisani a , b in c) odvisne spremenljivke, kot neodvisne spremenljivke pa smo uporabili lahko merljive/določljive sestojne parametre (DMIN, maksimalni premer DMAX, število dreves N , dominantni premer DDOM, DG in G), rastiščne lastnosti (nadmorska višina, naklon, ekspozicija, gozdna združba) in nekatere klimatske parametre, ki so se v sorodni raziskavi debelinske rasti bukve (Trifković in sod., 2023) izkazali kot vplivni dejavniki. Z analizo multikolinearnosti (Pearsonov korelacijski koeficient >0.80; Zuur in sod., 2010) smo nekatere spremenljivke izločili iz nadaljnjih

analiz, dodatno smo določene spremenljivke izključili iz modeliranja z analizo VIF («variance inflation factor»; Zuur in sod., 2010), če je bil $VIF > 10$. Da bi zadostili pogojem linearnih modelov, smo nekatere odvisne in neodvisne spremenljivke transformirali z logaritmsko ali Box-Cox transformacijo (preglednici 1 in 2). Najboljši model smo izbrali na podlagi primerjave prilagojenega R^2 , RMSE in AIC kriterija za različne modele. Za parameter a smo po zgledu literature fiksirali vrednost na DMIN (npr. Gorgoso in sod., 2012; Lei 2008; Cao 2004)

Pri PRM metodi se parametre Weibullove funkcije izrazi preko momentov funkcije, npr. srednji premer, DG, varianca premera (Burk in Newberry 1984; Lindsay in sod. 1996, Merganič in Sterba, 2006) ali preko percentilov funkcije, npr. mediana (McEwen in Parresol 1991; Gorgoso in sod., 2007; Schmidt in sod., 2021). Parametre izračunamo preko sistema enačb, ki pa lahko združuje momente in percentilni pristop (npr. Sghaier in sod. 2015; Siipilehto in Mehtätalo, 2013). Pri tej metodi smo preverili različne izračune parametrov in izdelali tri različne variante PRM modelov.

Metode oziroma z njimi razvite modele smo med seboj primerjali z srednjimi vrednosti mer točnosti in natančnosti napovedovanja modeliranih vrednosti MAE, RMSE in MAPE glede na napoved sestojnih parametrov ter srednjimi vrednosti MAE in RMSE in biasa glede števila dreves po debelinskih stopnjah. Najboljše metode smo analizirali in prikazali tudi grafično.

Za parameterizacijo velikoprostorskih modelov CALDIS in FORMIT-M (T3.5) smo uporabili podatke nacionalne gozdne inventure iz obdobja 2007-2012-2018. Na osnovi 5500 meritev višin, ki so bile izmerjene v letu 2018, smo razvili vrstno specifične modele ter napovedali višine za vse drevesne vrste v podatkovni bazi. Razvili smo tudi modele za ocenjevanje starosti posameznih dreves. Uporabili smo poenostavljen pristop, pri čemer smo oceno sestojne starosti tehtali z debelinami posameznih dreves. Za vsako ploskev smo pripravili tudi nabor potrebnih sestojnih (kot so sestojna temeljnica in sestojna lesna zaloga, stopnja kompeticije glede na razmerje temeljnic debelejših dreves) in okoljskih spremenljivk. V sodelovanju z Agencijo Republike Slovenije za Okolje (ARSO) smo pripravili klimatske podatke in scenarije razvoja klime za vsako ploskev MGGE posebej. Uporabili smo dva različna klimatska scenarija, RCP4.5 in RCP8.5, ki bosta omogočila vpogled v razvoj gozdov glede na spreminjanje klime. Poleg padavinskih in temperaturnih podatkov smo pridobili tudi scenarije maksimalnih vetrnih sunkov, ki jih model CALDIS uporablja za simulacijo vetrolomov. Opravili smo presojo primernosti izbranih drevesnih modelov z vidika možnost njihove uporabe v Sloveniji. Modela CALDIS in FORMIT-M smo parametrizirali z uporabo kalibracijskih podatkov, medtem ko smo validacijsko množico uporabili za ovrednotenje uspešnosti simulacij. Večjo pozornost smo namenili ključnim procesom razvoja gozdov, kot so debelinska, višinska in volumenska rast ter mortaliteta. Preverili smo tudi, ali je bilo mogoče posamezne module v obeh modelih prilagoditi razmeram v slovenskih gozdovih, s čimer smo zagotovili večjo uspešnost delovanja. Delo je obsegalo pregled

primernih modelov razvoja gozdov, pripravo podatkov, testiranje in pripravo možnih nadgradenj. V zadnjem letu smo z izbranim modelom pripravili simulacije razvoja gozdov do leta 2030 ob upoštevanju različnih scenarijev.

Aktivnosti v sklopu **WP4** smo izvedli v programskih paketih Excel, R in simulatorju SiWaWa, ki je služil kot primerjalni model. Pri izdelavi prve verzije smo sodelovali z Univerzo v Bernu (prof. dr. Christian Rosset), ki nam je omogočala začasno uporabo ugotovljenih povezav, vgrajenih v simulator SiWaWa, dokler parameterizacija ni bila v celoti opravljena in ni bila dosežena beta različica simulatorja. Izdelali smo skripte v R in/ali programske kode v Visual Basic for Windows v Excelu. Pri izdelavi upravljaljskih strategij smo določili zgolj ročni način določanja strukture poseka po debelinskih stopnjah in drevesnih vrstah.

V zadnjem sklopu **WP 5** je bila izdelana "Alfa" različica prototipa računalniškega modela, ki je prva celotna različica programa, in sicer v programskih paketih Excel ali R. Pomemben del tega sklopa je bila izdelava funkcionalnih specifikacij, ki so bile osnova za programerjevo delo. S pomočjo specifikacij bo programer lahko izdelal bolj izpopolnjeno in uporabniku prijazno aplikacijo. V okviru tega sklopa smo tudi vgradili razvite modele za debelinsko strukturo enomernih bukovih gozdov v mobilno aplikacijo SiWaWa 2.0 ter izdelali celoten prevod aplikacije, ki je sedaj dostopna v slovenskem jeziku.

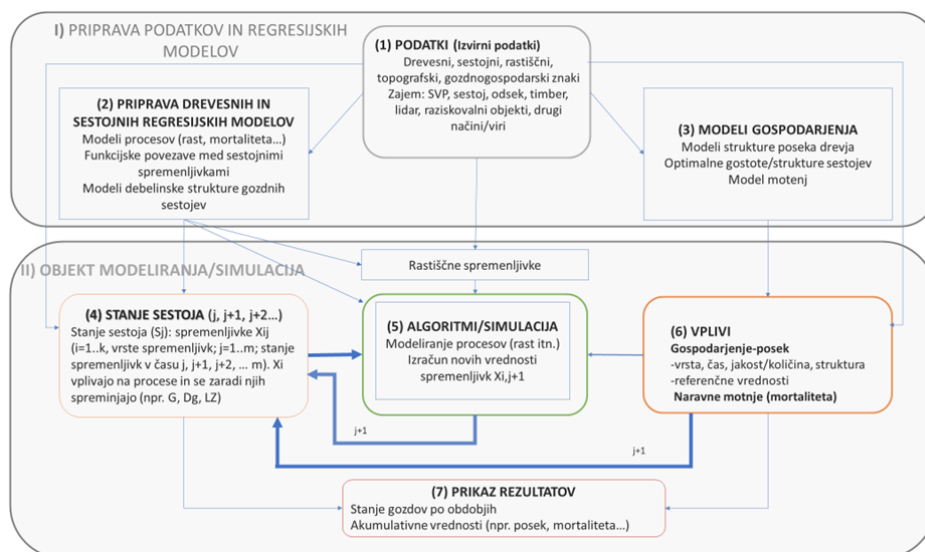
4. Rezultati raziskave

4.1. WP1: Konceptualna zasnova modelov razvoja gozdov v Sloveniji

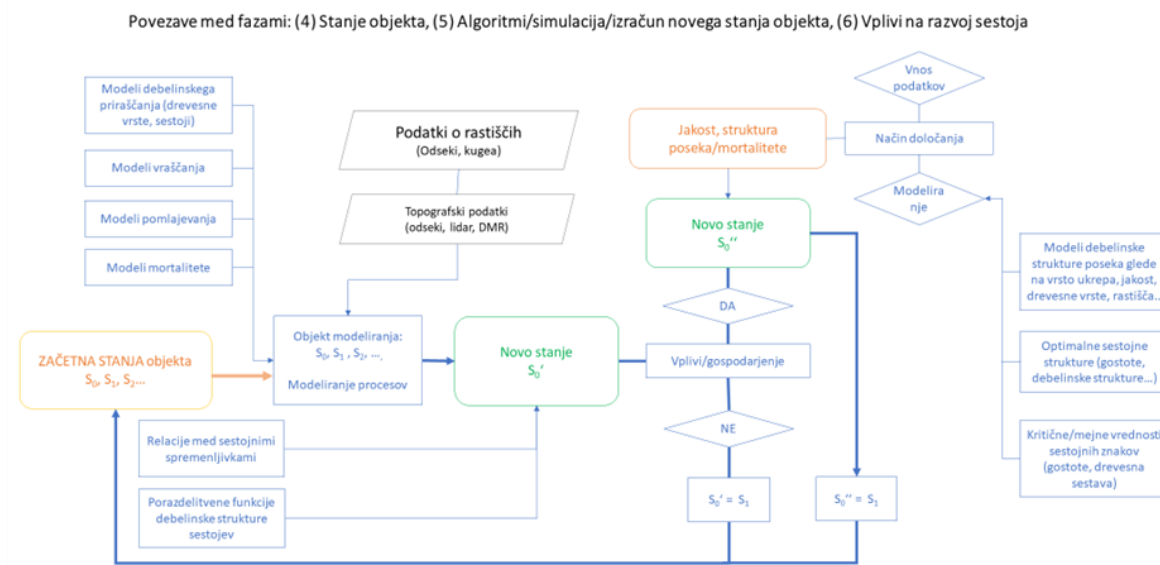
Izdelan prototip modela razvoja gozdov lahko uvrstimo v drevesni model (glej razvrstitev modelov, slika 1). Diagrami poteka izgradnje in delovanja drevesnega modela (slike 2, 3 in 4) opisujejo arhitekturo in delovanje modela. Struktura in način delovanja modela, ki smo ju postavili na začetku projekta, sta se dopolnjevala med projektom skladno s tehničnimi in arhitekturnimi problemi pri izgradnji ter možnimi rešitvami, ki so še omogočale, da prvo delovno različico simulatorja pripravimo v času trajanja projekta.

Osnovna značilnost modela/simulatorja je, da deluje na drevesni ravni, pri čemer ne dopušča razlik v rasti enako debelih dreves določene drevesne vrste pri istih drugih vplivnih dejavnikih (klima, tla, orografija, sestojne značilnosti ipd.). Enota modeliranja je drevo, ki je opredeljeno z drevesno vrsto in začetnim prsnim premerom, zaokroženim na 1 cm. Model je prostorsko nedoločen in kompeticijo upošteva le na sestojni ravni (npr. z BAL in maksimalnimi sestojnimi gostotami). Sestoj sestavlja do 10 drevesnih vrst, razpon modeliranih prsnih premerov je od vključno 10 cm do vključno 100 cm.

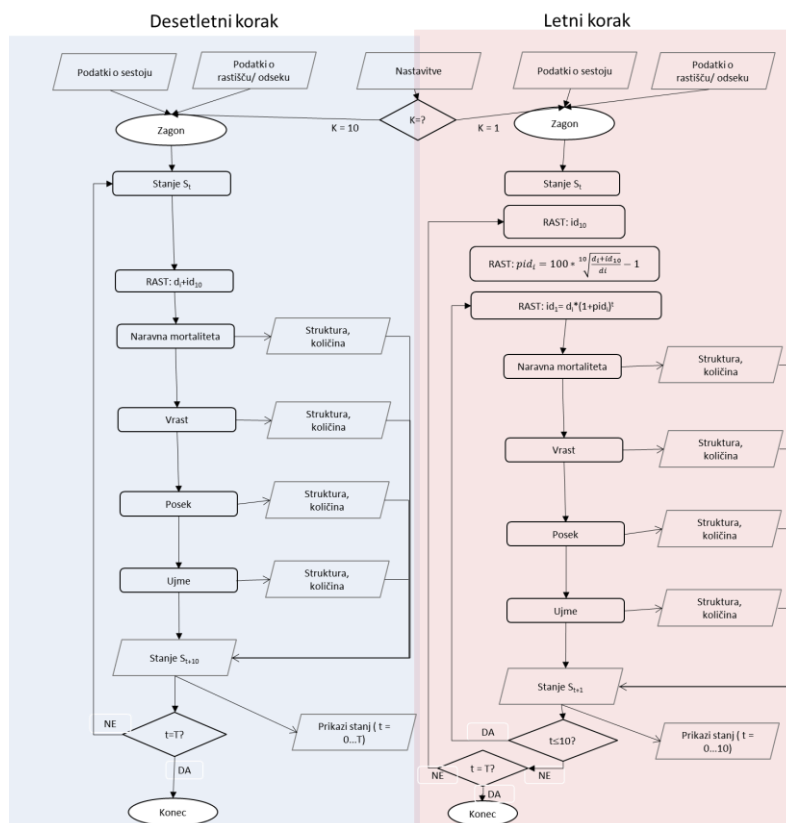
Sestojni parametri so izračunani z agregiranjem napovedi na drevesni ravni. Korak modeliranja je 10 let. Izračun volumnov dreves ter lesne zaloge sestoja poteka z enovhodnimi deblovnici (tarifami). Ostale tehnične rešitve v modelu so predstavljene v poglavju 4.4.



Slika 2: Proces izgradnje modela razvoja gozdov s sestavnimi deli in poglavji



Slika 3: Podrobnejša analiza izgradnje, ki se omejujejo na vsebinske komponente modela in vhode



Slika 4: Prototip načina delovanja drevesnega modela ob desetletnem koraku simulacije (modro) in možnem letnem koraku simulacije (rdeče, ni implementirano).

4.2. WP2: Upravljanje podatkov, potrebnih za izgradnjo modelov

Vhodni podatki za parametrizacijo in validacijo modela so bili podatki stalnih vzorčnih ploskev (glej podrobne opise v metodah). Izdelani so bili **protokoli za pripravo podatkov in kontrolo kakovosti** v programu RStudio.

Stalne vzorčne ploskve SVP (Zavod za gozdove Slovenije, 2014)

- SVP: 83.801
- Dreves: 1.394.388

1 Indeksi diverzitete premerov

$$\text{Gini coefficient (GINI)} = \frac{\sum_{j=1}^n (2j - n - 1) b a_j}{\sum_{j=1}^n b a_j (n - 1)}$$

$$\text{Shannon index (SHN)} = - \sum_{i=1}^s p_i \ln(p_i)$$

$$\text{Diameter coefficient of variation (DCV)} = 100 \times \frac{s_{d_{DBH}}}{x_{DBH}}$$

4 McNemar χ^2 je ($p < 0,05$)

PLOSKEV:
Enomerni: 51.118
Raznomerni: 32.683

DREVES
Enomerni: 850.576,68
Raznomerni: 543.811,32

2 Klaster analiza

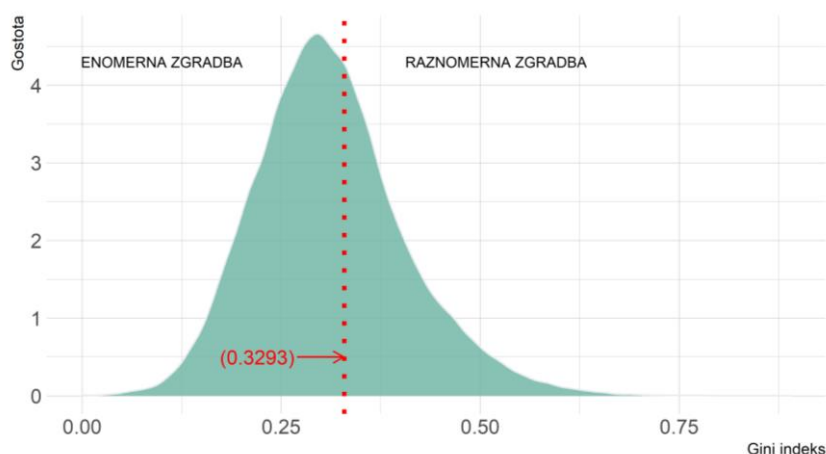
Raznomerni sestoji	
Indeksi diverzitete	Mejne vrednosti
SHN	$\geq 1,446$
GINI	$\geq 0,329$
DCV	$\geq 0,413$
Terensko merjenje	
Razvojne faze	
SVP in SESTOJ	tipični prebiralni sestoji
	raznomerno (posamično-šopasti)
	raznomerni (skupinsko-gnezdasti)

3 Mere podobnosti za binarne podatke

	Sokal-Michenerjeva mera (%)
SVP – SHN	32
SVP – DCV	55
SVP – GINI	59
SESTOJ – SHN	34
SESTOJ – DCV	58
SESTOJ – GINI	62

5

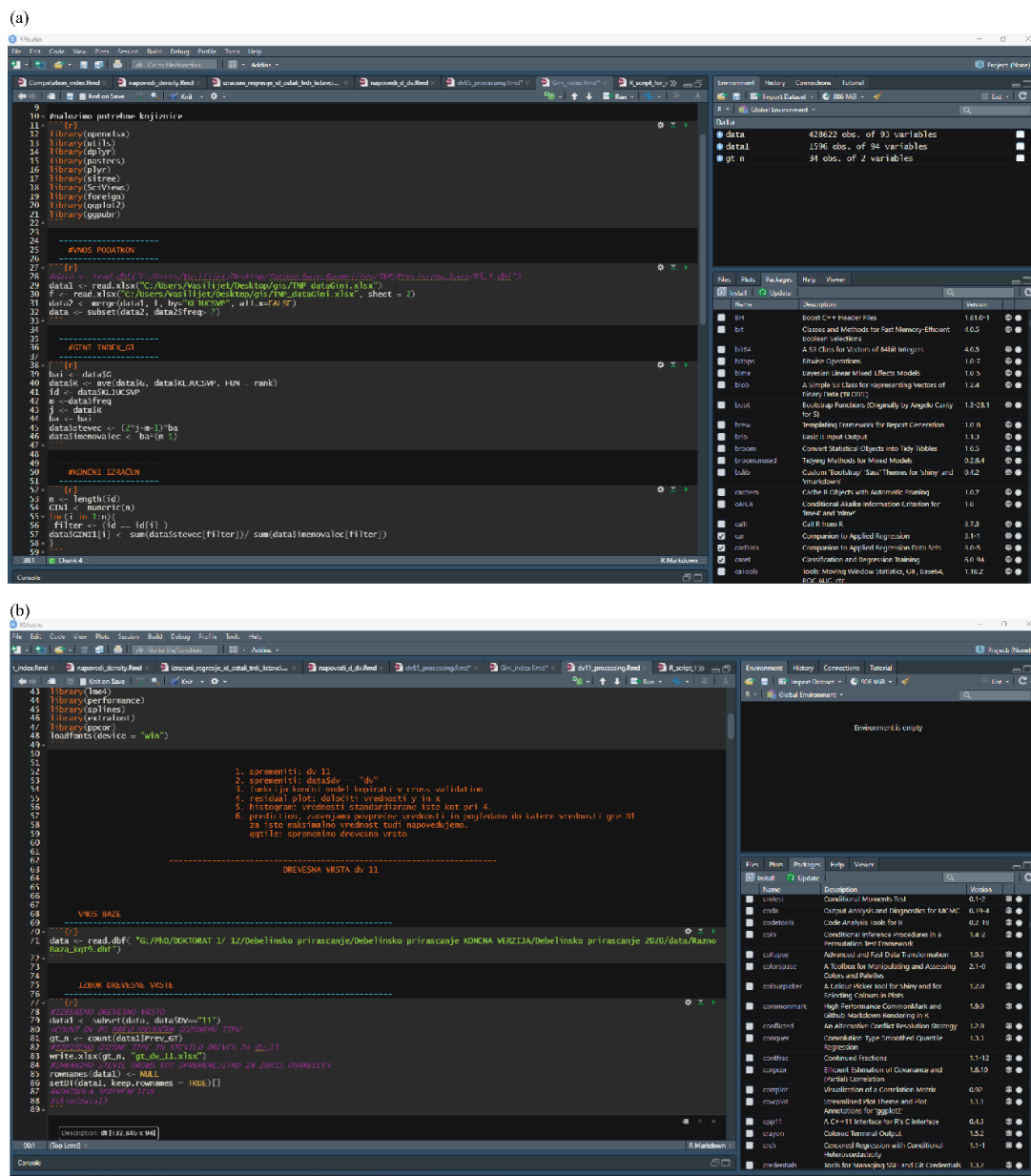
Slika 5: Protokol klasifikacije gozdnih sestojev v enomerne in raznomerne



Slika 6: Prikaz klasifikacije stalnih vzorčnih ploskev

Delo v tem sklopu je obsegalo med drugim: razmejitev na pretežno enomerne in pretežno raznomerne sestoje (Slika 5 in Slika 6), kontrola prsnih premerov in kode dreves na posamezni ploskvi, popravek kode dreves glede na vsebino kode dreves, če je napaka, protokol za izračun zveznega debelinskega prirastka po kontrolni metodi pri cm natančnosti in z zaokroževanjem navzdol, združevanje baz, izračun novih vhodnih spremenljivk, protokol za določanje dominantnega drevja na stalnih vzorčnih ploskvah z upoštevanjem dveh koncentričnih vzorčnih površin in protokol za izračun srednjega dominantnega premera dreves, izločitev napak in izbor kode dreves za izračun debelinskega priraščanja, izdelava protokolov za izračun sestojnih znakov na hektar in za upoštevanje resolucije zaradi različnih mrež vzorčenja, priprava vzorcev in delitev podatkov na učne in testne množice, priprava klimatskih spremenljivk za kontrolo vpliva klimatskih anomalij (baza SLOCLIM),

priprava podatkov o rastiščnih in okoljskih parametrih, kjer smo uporabili bazo Pedološka karta Slovenije, in drugo. Primer prikazuje Slika 7. Podrobnejši opisi rezultatov tega sklopa so na voljo v vmesnih poročilih projekta.



Slika 7: (a) Protokol priprave baz in izračuna spremenljivk, primer skripte za izračun Gini indeksa, (b) Primer izračuna parametrov regresijskega modela

4.3. WP3: Moduli in parametrizacija funkcij

Razvili smo modele debelinskega priraščanja za 40 najpogostejših drevesnih vrst v raznomernih gozdovih ter izdelali napovedi debelinskega prirastka v obdobju 10 let (podrobnejši rezultati so v Trifković, 2023). Modeli s kubičnimi zlepkami so se podatkom prilagodili zadovoljivo; od $R^2 = 5\%$ za mali

jesen do $R^2 = 51\%$ za duglazijo. Modeli debelinskega priraščanja listavcev imajo običajno nižje vrednosti R^2 kot modeli za iglavce, prav tako k nižjim vrednostim prispeva raznomernost sestojev. Ključne spremenljivke BAL, BA, DBH, ELE, SLOPE in QMD so se pojavile v večini modelov (25-28 modelov), medtem ko so bile pri določenih vrstah (16-17 modelov) vključene tudi spremenljivke GINI, SHN in K. Sestojni parametri, zlasti sestojna temeljnica, so bili eni izmed najbolj pomembnih kazalnikov za pojasnjevanje debelinskega priraščanja.

Modeli debelinskega priraščanja, izdelani s polinomske regresije druge stopnje (Preglednica 2), so bili izdelani za 10 najpogostejših drevesnih vrst v raznomernih sestojih. Funkcije za te vrste so uporabljene v skupinah vrst, kot jih ima simulator. Njihovo prileganje je predstavljeno v Preglednici 3.

Preglednica 2: Regresijski koeficienti v funkcijah debelinskega prirastka po drevesnih vrstah (polinomska regresija)

	Intercept	DBH	DBH ²	sqrt(BA)	BAL	QMD	QMD ²	GINI	SHN	ELEV	ELEV ²	SLOPE	SLOPE ²	K
Smreka	2,4132	0,0483	-0,0005	-0,1402	-0,0112	-0,0469	0,0008	0,6298	-0,0959	-0,0001		-0,0069		0,0340
Jelka	2,4546	0,0561	-0,0006	-0,1371	-0,0096	-0,0593	0,0009	1,0224	-0,0421	-0,0005		-0,0024		0,1444
Rdeči bor	2,0514	0,0073	-0,0001	-0,1321	-0,0071	-0,0134		0,4652	-0,1458	0,0002		0,0076	-0,0004	0,1347
Zeleni bor	1,9352	0,0840	-0,0011		-0,0209	-0,0302						-0,0103		
Macesen	2,2146	0,0237	-0,0002	-0,0042	-0,0075	-0,0561	0,0007		-0,1196	0,0002		-0,0116		
Bukev	1,1886	0,0526	-0,0006	-0,1292	-0,0089	-0,0080	0,0003	0,7616	0,2008	0,0001	0,0000	-0,0054		0,0872
Graden	1,3318	0,0283	-0,0002	-0,0496	-0,0039	-0,0031			0,0934	-0,0005		-0,0059		0,1308
Gorski javor	1,7196	0,0147	-0,0002	-0,0084	-0,0113			0,6726		-0,0002		-0,0015		
Beli gaber	1,6083	0,0192	-0,0002	-0,1286	-0,0054	0,0059		0,7524		-0,0003				-0,1282
Breza	1,6613			-0,1462	-0,0128			1,0628		0,0004				

Preglednica 3: Mere prilaganja polinomskih regresijskih modelov in velikosti vzorcev

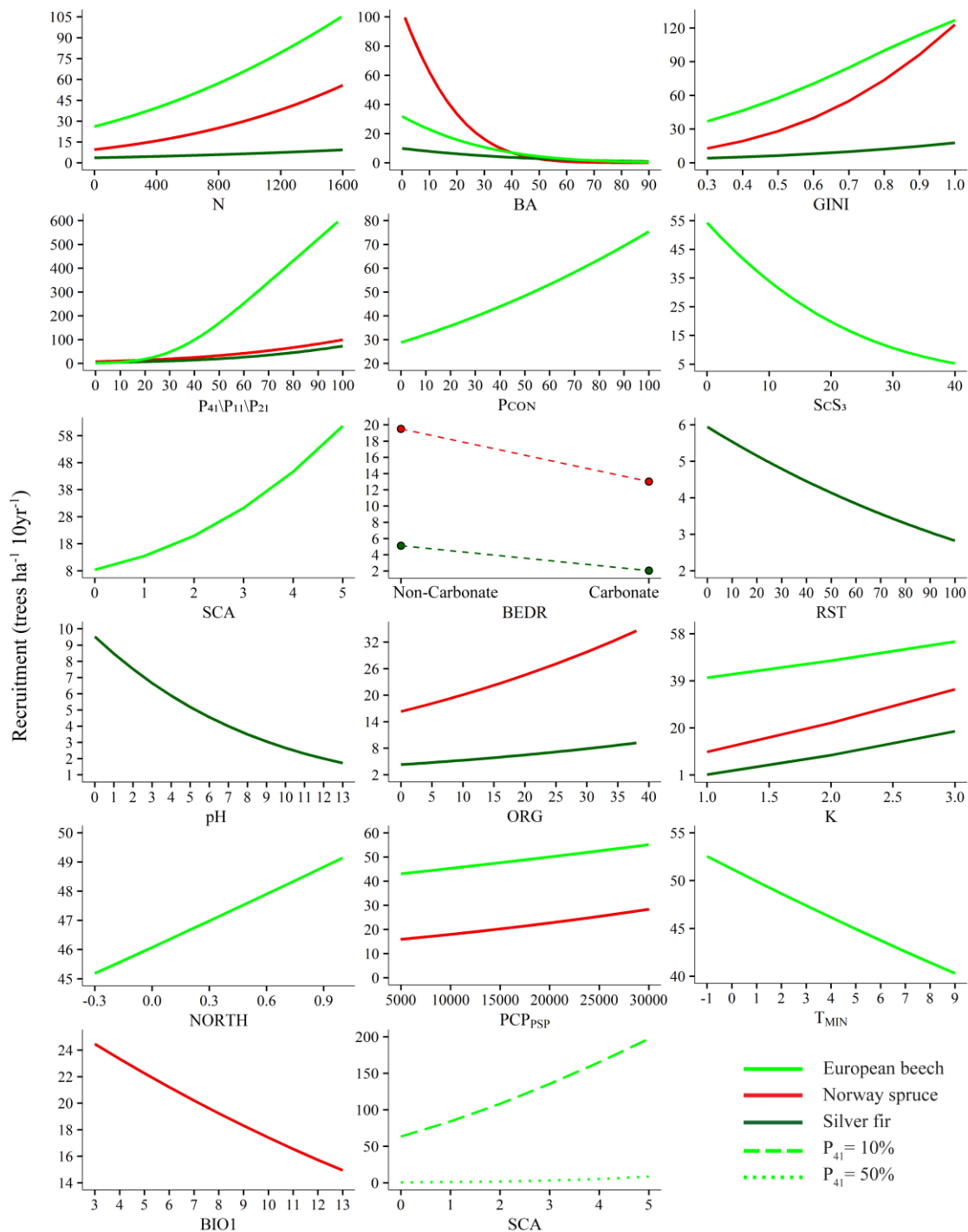
	R ²	N _{ploskev}	N _{dreves}
Smreka	0,2792	18709	132846
Jelka	0,2735	9561	37973
Rdeči bor	0,1333	2494	9036
Zeleni bor	0,3686	85	337
Macesen	0,1267	1147	2971
Bukev	0,2957	21899	149061
Graden	0,1342	5320	14828
Gorski javor	0,1309	6731	14233
Beli gaber	0,0851	4558	18558
Breza	0,1380	823	1596

Modele za vrast smo razvili za bukev, jelko in smreko (Trifković in sod., 2023a, Preglednica 4). Ugotovili smo, da je vrast dreves v raznomernih gozdovih precej stohastičen proces, za najbolj vpliven dejavnik pa so se izkazale sestojne razmere. Sestojna temeljnica, število dreves, sestojna zgradba, delež proučevanih vrst in produktivnost rastišča vplivajo na vrast vseh treh vrst, čeprav se njihovi učinki bistveno razlikujejo. Bukov vrašča v večjem obsegu pri višji gostoti sestoja kot smreka, vendar je optimalna gostota sestoja za bukev veliko nižja kot za jelko. Pričakovani odziv jelke na sestojno gostoto je nizek in precej stohastičen, kar otežuje načrtovanje optimalnih razmer za vraščanje jelk (Slika 8).

Preglednica 4: Regresijski koeficienti Tobit modelov za vraščanje bukve, smreke in jelke ter mere prilaganja

	Bukev	Jelka	Smreka
Konstanta	-438,000	-537,720	-520,100
N	0,101	0,049	0,141
BA	-3,088	-2,026	-9,155
GINI	241,900	186,385	479,400
P	9,076	3,178	3,503
PCON	1,051	-	-
ScS ₃	-4,953	-	-
SCA	36,260	-	-
SCA:P ₄₁	-1,610	-	-
BEDR	-	-69,180	-47,180
RST	-	-0,581	-
pH	-	-10,289	-
ORG	-	1,673	2,511
K	16,840	112,088	75,260
NORTH	7,022	-	-
PCPPSP	0,001	-	0,003
TMIN	-2,860	-	-
BIO ₁	-	-	5,984
R ² _{ANOVA}	0,08	0,15	0,09
R ² _{DECOMPOSITION}	0,05	0,15	0,08
R _{COR}	0,07	0,12	0,04
<i>R_{COR,120}</i>	0,08	0,10	0,03
-LL	18558,08	12686,76	4311,09
AIC	37144,60	25395,1	8644,18
-LL _C	19096,98	13561,40	4665,53
AIC _C	38197,96	27126,79	9335,05
LR test	1077,80 ^(***)	1749,28 ^(***)	708,87 ^(***)

Modelske prognoze smo uporabili, da smo določili najboljše in najslabše pogoje za vraščanje dreves za vsako spremenljivko posebej, pri čemer so bili upoštevani sočasni značilni učinki drugih spremenljivk v modelu (glej Trifković in sod., 2023).



Slika 8: Napoved vrsti za bukev, jelko in smreko v odvisnosti od sestojnih, rastiščnih in klimatskih parametrov (prevzeto po Trifković in sod. 2023)

Modeli individualne mortalitete dreves kažejo, da obstajajo značilne razlike v stopnjah mortalitete med drevesnimi vrstami. Najvišja stopnja mortalitete je bila opažena pri brezi, kjer je bila 5,3-krat večja od stopnje, ki smo jo opazili pri gorskem javorju. Povprečna letna mortaliteta je znašala 0,58 % od števila dreves (N), 0,37 % od sestojne temeljnice (BA) in 0,31 % od lesne zaloge (GS). Modeli so predstavljeni v Preglednici 5.

Preglednica 5: Ocene parametrov (β) v fiksnem delu binomskega linearnega posplošenega mešanega modela za 10 proučevanih vrst in mere prilaganja na podlagi 10-kratne navzkrižne validacije (prevzeto po Trifković in sod., 2023)

		Bukev	Smreka	Jelka	Rdeči bor	Macesen	Dob	G. javor	Zeleni bor	Beli gaber	Breza
Drev	Konstanta	-6.0103 (***)	-1.7634 (***)	-3.2610 (***)	-2.2727 (***)	-2.7629 (***)	-1.6108 (**)	-7.8516 (***)	-12.9734 (***)	-6.8333 (***)	-8.8980 (***)
	DBH	-0.1148 (***)	-0.1666 (***)	-0.0838 (***)	-0.1787 (***)	-0.2564 (***)	-0.1032 (***)	-0.2922 (***)	-0.0964 (***)	-0.1917 (***)	-0.1365 (***)
Sset.	BA	0.0506 (***)	0.0681 (***)	0.0533 (***)	0.0620 (***)	0.0581 (***)	0.0490 (***)	0.0633 (***)	0.0499 (*)	0.0436 (***)	0.0668 (***)
	QMD	-	-	-	-	0.1148 (***)	-	-	0.1217 (*)	-	-
	PBRO	1.8071 (***)	-	-	-	-	1.1782 (***)	-	-	-	-
	P	2.6048 (***)	0.2203 (**)	-	-	-	1.0772 (***)	1.7160 (***)	-	-	-
	SHN	-	-	0.4782 (***)	1.5063 (***)	-	-	0.4620 (***)	-	-	0.1746 (***)
Rast.	K	-	-0.2057 (***)	-0.6899 (***)	-	-	-	-	-	-	-
	pH	-	-	-	-	-	-	-	0.7464 (***)	0.2160 (***)	-
	BEDROCK	-0.2921 (***)	-0.4654 (***)	-1.0749 (***)	-0.4049 (*)	-	-0.9112 (***)	-	-	-	-1.5037 (***)
Klima	BIO1	-	-0.1577 (***)	-0.1233 (**)	-	-	-	-	-	-	-
	BIO10	-	-	-	-	-	-0.0781 (*)	-	0.3006 (*)	-	0.1127 (***)
Mere ujemanja	AUC	0.926	0.910	0.971	0.946	0.990	0.931	0.980	0.810	0.971	0.978
	AIC	26213	38634	8196	3149	1196	5777	1836	165.181	5928	1131
	-LL	13099	2104	4090	1568	593	2881	912	76	2959	588
	HL test	284	145	433	377	90	443	95	115	63	6
	(p-value)	(0.124)	(0.113)	(0.326)	(0.574)	(0.686)	(0.121)	(0.579)	(0.110)	(0.078)	(0.648)
	R ² _{logit(m)}	0.319	0.474	0.195	0.367	0.560	0.291	0.118	0.316	0.079	0.023
	R ² _{logit(c)}	0.581	0.757	0.767	0.689	0.841	0.602	0.970	0.377	0.901	0.971
	ICC	0.386	0.538	0.710	0.509	0.632	0.439	0.964	0.090	0.892	0.970
T ₀₀	2.066	3.820	8.129	3.432	5.641	2.471	9.317	0.325	7.123	8.641	

Z modeli Reinekejevih gostot smo ugotovili, da imajo tipični prebiralni sestoji največjo maksimalno gostoto in da se v tem tipu maksimalna gostota najhitreje zmanjšuje z naraščanjem srednjega premera. Drevesna sestava pomembno vpliva na maksimalne gostote, vendar pa se te bistveno razlikujejo le med najbolj različnimi tipi mešanosti, kot so mešanice bukve in jelke v primerjavi z drugimi skupinami mešanih gozdov predvsem listavcev (npr. graden in beli gaber). Nasprotno kot v enomernih sestojih se krivulja maksimalnih gostot v raznomernih gozdovih premika navzgor s povečevanjem čistosti sestoja, kar nakazuje, da so čisti raznomerni gozdovi gostejši od mešanih raznomernih gozdov. Primerjava drevesne sestave v mešanih gozdovih kaže, da bi lahko razlog za to bila večja raznovrstnost drevesnih vrst v mešanih raznomernih gozdovih in nekomplementarnost vrst. Večji kot je delež bukve v sestoji, večji sta konstanta Reinekejeve krivulje ter njen naklon. Napovedi največjih gostot s pomočjo metode SFA so sistematično nižje in manj variabilne kot napovedi s pomočjo kvantilne regresije (Preglednici 6 in 7, Slika 9).

Preglednica 6: Ocene parametrov konstante (c_0) in naklona (c_1) Reinekejevih krivulj s kvantilno regresijo (99. kvantil) (prevzeto po Trifković in sod. 2023) in mere prileganja za čiste in mešane raznomerne sestoje ter prebiralne sestoje

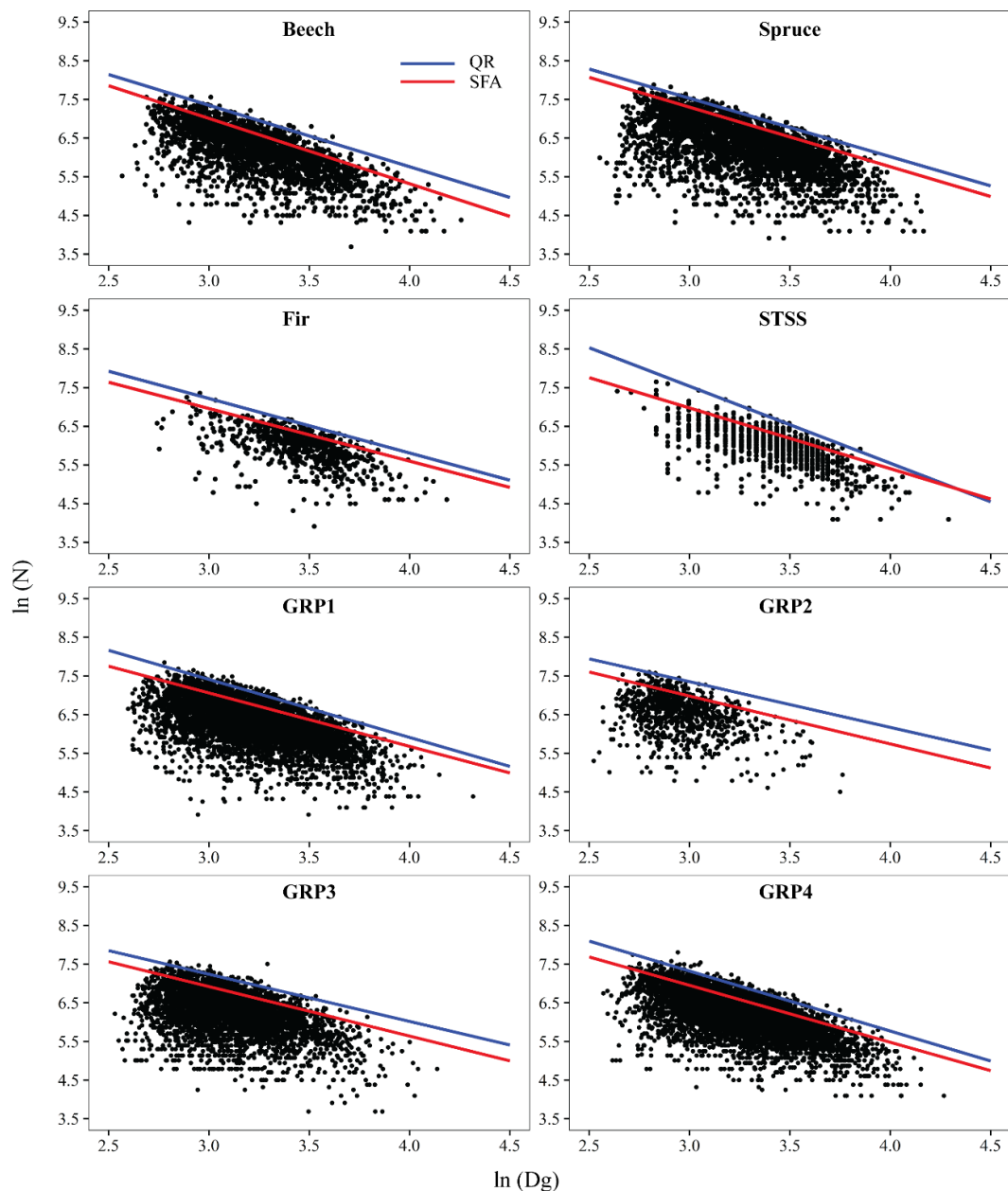
Sestojni tip	SVP	Kvantilna regresija				Mere prileganja					
		c_0	95% CI	c_1	95% CI	R^2	AIC	-LL	AIC _C	-LL _C	LR _{TEST}
Čisti raznomerni											
Bukev	2263	12.1 2	[11.97; 12.27]	- 1.59	[-1.64; - 1.54]	0.3 2	4116	205 6	5859	292 8	1745 ^(***)
Smreka	3056	12.0 6	[11.99; 12.13]	-1.51	[-1.53; - 1.49]	0.3 4	5655	282 6	8214	410 6	2561 ^(***)
Jelka	631	11.45	[11.01; 11.88]	- 1.41	[-1.53; - 1.30]	0.4 4	786	391	1513	755	729 ^(***)
	5950										
Mešani raznomerni											
GRP1	5495	11.9 0	[11.82; 11.99]	- 1.50	[-1.53; - 1.48]	0.27	9706	4851	13133	656 6	3430 ^(***)
GRP2	828	10.8 9	[10.44; 11.34]	- 1.18	[-1.33; - 1.02]	0.1 8	1533	764	1793	895	262 ^(***)
GRP3	3960	10.9 1	[10.63; 11.18]	- 1.22	[-1.31; - 1.32]	0.1 9	7529	3762	8969	448 3	1442 ^(***)
GRP4	5891	11.97	[11.83; 12.12]	- 1.55	[-1.60; - 1.51]	0.33	969 6	484 6	1429 2	7145	4599 ^(***)
	1617 4										
Prebiralni											
STSS	912	13.51	[12.42; 14.59]	- 1.99	[-2.31; - 1.67]	0.47	1385	691	2553	1276	1169 ^(***)

R^2 , pseudo- R^2 po Koenker and Machado (1999); AIC, Akaike Information Criterion; AIC_C, AIC modela s konstanto; -LL, -Log-likelihood; -LL_C, -Log-likelihood modela s konstanto; LRT, test logaritmov verjetja.

Preglednica 7: Ocene parametrov konstante (c_0) in naklona (c_1) Reinekejevih krivulj z metodo stohastične meje (SFA in mere prileganja za čiste in mešane raznomerne sestoje ter prebiralne sestoje (povzeto po Trifković in sod., 2023)

Tip sestoja	SVP	Analiza stohastične meje (SFA)				Mere prileganja				
		c_0	[95% CI]	c_1	[95% CI]	σ^2	γ	μ	-LL	AIC
Čisti raznomerni										
Bukev	2263	12.08	[11.88; 12.27]	-1.69	[-1.75; -1.63]	1.63 (0.21)	0.97 (0.01)	-2.51 (0.48)	1373	2757
Smreka	3056	11.92	[11.74; 12.11]	-1.54	[-1.59; -1.48]	1.19 (0.19)	0.97 (0.01)	-0.77 (0.35)	2232	4473
Jelka	631	11.04	[10.66; 11.42]	-1.36	[-1.47; -1.25]	1.32 (0.30)	0.98 (0.01)	-2.28 (0.71)	259	528
5950										
Mešani raznomerni										
GRP1	5495	11.20	[11.05; 11.35]	-1.38	[-1.42; -1.34]	1.02 (0.19)	0.95 (0.01)	-1.18 (0.45)	3291	6593
GRP2	828	10.70	[10.20; 11.20]	-1.24	[-1.41; -1.08]	1.13 (0.46)	0.95 (0.02)	-1.17 (0.99)	542	1093
GRP3	3960	10.76	[10.57; 10.95]	-1.28	[-1.34; 1.22]	1.16 (0.22)	0.95 (0.01)	-1.17 (0.48)	2646	5301
GRP4	5891	11.36	[11.22; 11.49]	-1.47	[-1.51; -1.43]	1.15 (0.17)	0.96 (0.01)	-2.09 (0.45)	2893	5797
16174										
Prebiralni										
STSS	912	11.68	[11.39; 11.98]	-1.57	[-1.66; -1.48]	1.02 (0.15)	0.96 (0.01)	-1.98 (0.43)	356	721

σ^2 (sigma squared): the parameter is the variance of the inefficiency term; γ (gamma) lies between 0 and 1 and indicates the relevance of an SFA model; μ (mu): the inefficiency term is assumed to follow a truncated normal distribution and can be 0 (resulting in a half normal distribution) or can take positive or negative values; Log-likelihood (-LL), Akaike Information Criterion (AIC). Values in brackets are standard errors.



Slika 9: Napovedi maksimalnih gostot sestojev s kvantilno regresijo (QR) in metodo stohastične meje (SFA) za čiste in mešane raznomerne sestoje

Pri analizi prileganja porazdelitvenih funkcij (T3.3) empiričnim podatkom o debelinski strukturi (Preglednica 8) se je kot najustreznejša za PPM izkazala modificirana momentna metoda MM1 (t.i. »method of modified moment type«) iz R paketa ForestFit (Teimouri, 2019). Glavna pomanjkljivost MLE metode je neuspešna prilagoditev funkcije, ko je število enot (dreves) majhno in ko podatki izkazujejo J-porazdelitev, kar je precej pogosta značilnost podatkov iz naših gozdov. Znanstveni članek z rezultati analiz te aktivnosti »Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests« je objavljen v znanstveni reviji iForest - Biogeosciences and Forestry.

Preglednica 8: Formule za izračun parametrov Weibullove porazdelitvene funkcije a, b in c po različnih variantah

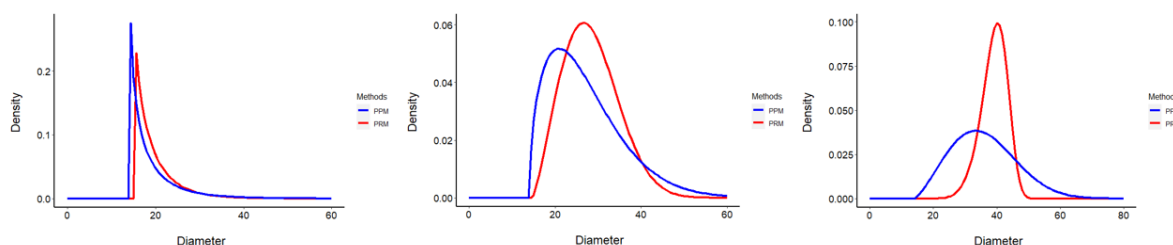
Varianta	Parameter a	Parameter b	Parameter c
PPM	D_{MIN}	$-12.54 + 0.33 * DG - 5.9 * \ln(D_{MIN}) + 0.06 * G - 0.002 * N$ *Box cox transformacija ($\lambda=0.67$)	$-3.53 + 1.53 * \ln(DG) - 0.023 * D_{MIN} - 0.025 * D_{MAX} + 0.007 * G$ *Logaritemska transformacija
H1	$D_{MIN} - (-0.60 * (\frac{D_{MAX}-D_{MIN}}{N} * D_{MIN}))^{-0.76}$	$-12.54 + 0.33 * DG - 5.9 * \ln(D_{MIN}) + 0.06 * G - 0.002 * N$ *Box cox transformacija ($\lambda=0.67$)	$-3.53 + 1.53 * \ln(DG) - 0.023 * D_{MIN} - 0.025 * D_{MAX} + 0.007 * G$ * Logaritemska transformacija
H2	$D_{MIN} - (-0.60 * (\frac{D_{MAX}-D_{MIN}}{N} * D_{MIN}))^{-0.76}$	$-1.82 + 1.06 * DG - a$	$-3.53 + 1.53 * \ln(DG) - 0.023 * D_{MIN} - 0.025 * D_{MAX} + 0.007 * G$ * Logaritemska transformacija
PRM1	$D_{MIN} - (-0.60 * (\frac{D_{MAX}-D_{MIN}}{N} * D_{MIN}))^{-0.76}$	$-1.82 + 1.06 * DG - a$	$\frac{\ln(-\ln(\frac{1}{2N}))}{\ln(\frac{D_{MAX}-a}{b})}$
PRM2	$D_{MIN} - (-0.60 * (\frac{D_{MAX}-D_{MIN}}{N} * D_{MIN}))^{-0.76}$	$(\frac{D_{MAX}-a}{\ln(2N)})^{\frac{1}{c}}$	$\frac{\ln(\ln(2N)) - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{N}))}{\ln(D_{MIN}) - \ln(D_{MIN})}$
PRM3	$D_{MIN} - \left(b * \left(-\ln \left(1 - \left(\frac{1}{2N} \right) \right) \right) \right)^{\frac{1}{c}}$	$-4.52 + 1.13 * DG - a$	$\frac{\ln(-\ln(\frac{1}{2N}))}{\ln(\frac{D_{MAX}-a}{b})}$

Opomba: Parametre funkcije smo izračunali z metodama »parameter prediction method« (PPM) (Clutter in Bennet, 1965) in »parameter recovery method« (PRM) (Kangas in Maltamo, 2000). Preizkusili smo več različnih variant izračuna parametrov in njihovih kombinacij, skupaj 7: PPM, tri variante metode PRM PRM1, PRM2 in PRM3 ter dve hibridni varianti H1 in H2, ki sta združevali pristope obeh skupin.

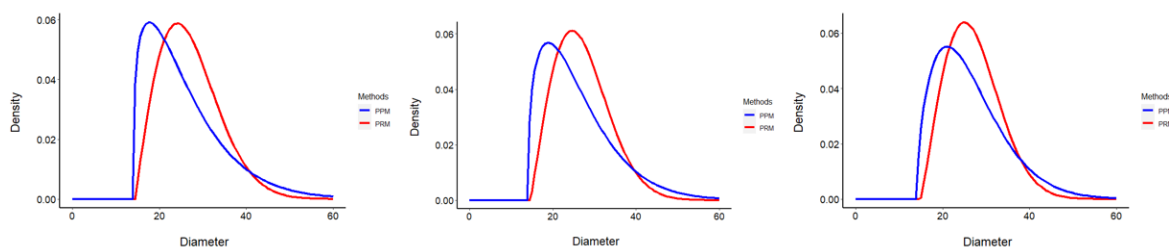
Pri izdelavi modelov debelinske strukture (T3.4) so se kot ključne napovedne spremenljivke za parametre Weibullove porazdelitve izkazali sestojni parametri (DG, DMIN, G, N, DMAX). Klimatski in rastiščni parametri sploh niso bili vključeni v modele (Preglednica 9). Srednje vrednosti, dobljene po modificirani momentni metodi MM1, so bile za parameter a = 14,81, parameter b = 14,38 in parameter c = 1,46. Za najboljši metodi sta se izkazali PPM in PRM1. Končni modeli za parametre a, b, c so prikazani v Preglednici 9. Vpliv sestojnih parametrov DG, G in DMAX na obliko krivulje debelinske strukture za metodi PPM in PRM1, ki sta se izkazali kot najustrežnejši, je prikazan na slikah 10, 11 in 12. Sestojna parametra DG in G sta bila najboljše napovedana z modelom PRM1 (MAE za DG < 0,8 cm, MAE za G < 1,8 m2), DDOM pa z modelom PPM (MAE < 2,4 cm). Kljub dobrim povprečnim napovedim je model PPM izkazoval večji raztros napovedi in je zelo nenatančno napovedal vrednosti sestojnih parametrov določenemu številu ploskev, a je bil ta delež vseeno relativno nizek (≈6 % ploskev). Z večanjem DDOM, kar pomeni s staranjem sestoja, so se napovedi izboljševale (Slika 13), najnatančnejše so bile v odraslih debeljakih z DDOM > 30 cm. Značilnosti ploskev, kjer PPM sestojne parametre napove slabše, so večje število dreves N (večja gostota), večji Gini indeks (večanje heterogenosti v sicer enomernih homogenih sestojih), večja G (večja gostota) ter manjši DG, DDOM in DMAX.

Preglednica 9: Izračunani parametri Weibullove porazdelitvene funkcije po metodah PPM in PRM₁, ki sta za izkazali za najustreznejši

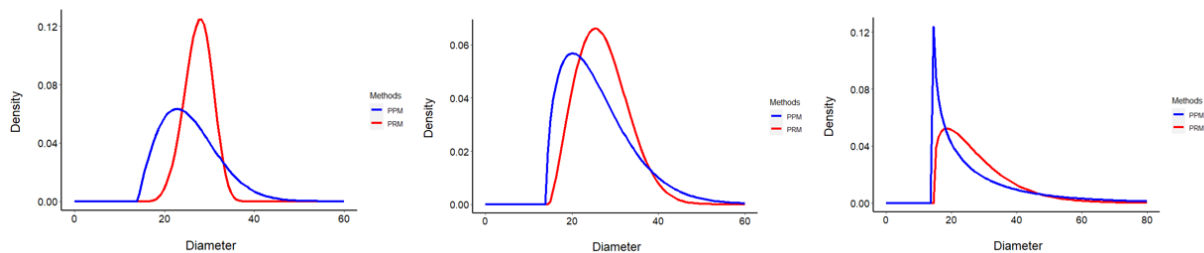
Parametri	Transformacija odvisne spremenljivke	Model	Pseudo R ² /Adj.R ²	RMSE
a _{PRM1}		$D_{MIN} - (-0.62 * (\frac{D_{MAX}-D_{MIN}}{N} * D_{MIN}))^{-0.67}$	0,92	1,39
b _{PRM1}		$-1.82 + 1.06 * DG - a_{PRM1}$	0,93	2,00
c _{PRM1}		$\frac{\ln(\ln(2N)) - \ln(-\ln(1-\frac{1}{N}))}{\ln(D_{MAX}) - \ln(D_{MIN})}$		
b _{PPM}	Box cox transformacija (λ=0.67)	$-12.54 + 0.33 * DG - 5.9 * \ln(D_{MIN}) + 0.06 * G - 0.002 * N$	0,83	0,99
c _{PPM}	Logariitemska transformacija	$-3.53 + 1.53 * \ln(DG) - 0.023 * D_{MIN} - 0.025 * D_{MAX} + 0.007 * G$	0,52	0,186



Slika 10: Vpliv srednjetelejnčnega premera sestoja DG na debelinsko strukturo za dve metodi – PPM (modro) in PRM (rdeče), ostali sestojni paramteri so fiksirani na srednje vrednosti; levo DG= 20cm, na sredini DG=30cm, desno DG=40cm.



Slika 11: Vpliv sestojne temeljnice G na debelinsko strukturo za dve metodi – PPM (modro) in PRM (rdeče), ostali sestojni paramteri so fiksirani na srednje vrednosti; levo G= 20 m²/ha, na sredini G=30 m²/ha, desno G=50 m²/ha.

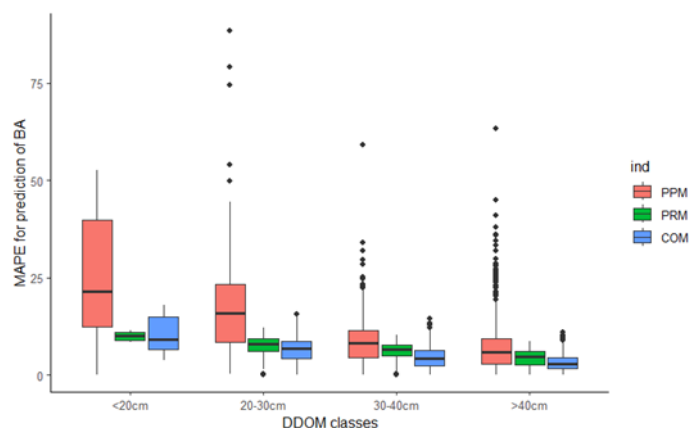


Slika 12: Vpliv maksimalnega (dominantnega) sestojnega premera D_{MAX} na debelinsko strukturo za dve metodi – PPM (modro) in PRM (rdeče), ostali sestojni parametri so fiksirani na srednje vrednosti; levo $D_{MAX} = 35$ cm, na sredini $D_{MAX} = 45$ cm, desno $D_{MAX} = 70$ cm.

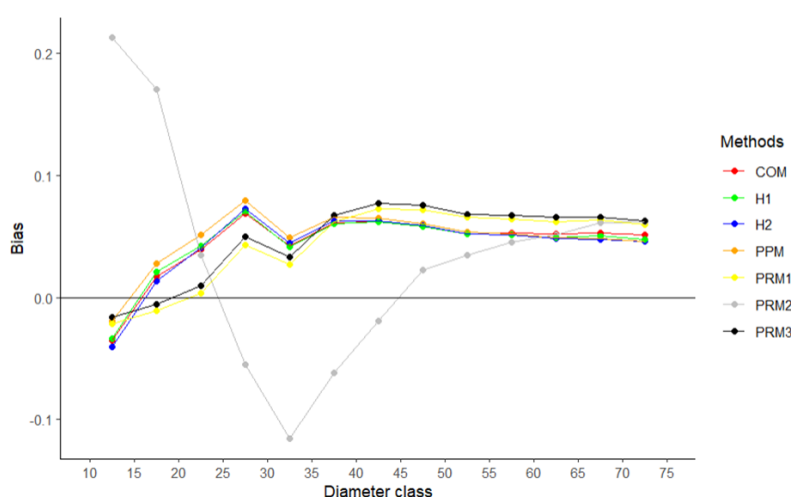
Kot zelo dober model za napoved frekvenc dreves po debelinskih stopnjah (debelinske strukture) se je izkazal eden izmed hibridnih modelov, vendar je imel tudi model PPM primerljive rezultate (srednja vrednost MAE med empiričnimi in generiranimi relativnimi frekvenca je znašala 0,079), medtem ko je model PRM1 izkazoval višje MAE (MAE = 0.091). Vse testirane variante, z izjemo ene, so v splošnem podcenjevale število tanjših dreves v tretji in v nekaterih primerih tudi v četrti debelinski stopnji (negativen bias) in precenjevale število dreves v višjih debelinskih stopnjah (pozitiven bias). V primerjavi s PPM je PRM1 model izkazal relativno manjši bias do premerov 35 cm (Slika 14).

Prednosti PPM metode so boljše napovedi D_{DOM} , pomembnega upravljalškega sestojnega parametra, in boljše napovedi števila dreves po debelinskih stopnjah. Slabost PPM so izrazito slabe napovedi v bolj heterogenih sestojih, sestojih, ki so bili poškodovani po ujmah ali degradiranih sestojih. Prednost PRM metode je boljše napoved DG in G, manjši bias za napoved števila dreves do 35 cm ter bolj stabilne napovedi ne glede na zgradbo sestoja.

Kot skupni prikaz rezultatov T3.4 je pripravljen znanstveni članek za objavo v znanstveni reviji z delovnim naslovom »Modelling diameter distribution of near-natural even-aged European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests: comparison of different modelling approaches using forest inventory data« (kot prvo bo članek predvidoma poslan v revijo *Forest Ecology and Management*). Model debelinske strukture enomernih bukovih gozdov, ki se je izkazal za ustreznega, je bil vključen v različico modela razvoja gozdov Siwawa 2.0 (Rosset in sod., 2018), ki smo jo tudi prevedli v slovenski jezik.



Slika 13: Srednje vrednosti povprečne absolutne odstotne napake (MAPE) za modele PPM, PRM1 in COM po razredih dominantnega sestojnega premera D_{DOM}



Slika 14: Srednje vrednosti biasa v številu dreves po 5-cm debelinskih stopnjah za različne metode izdelave modela debelinske strukture

Raziskave primernosti tujih velikoprostorskih modelov (T3.5) so pokazale, da je model CALDIS primernejši od modela FORMIT-M, saj je CALDIS podrobnejši, deluje na ravni posameznih dreves, medtem ko FORMIT-M deluje na ravni sedmih skupin dreves. CALDIS je bil razvit v Avstriji, ki je geografsko precej sorodna država Sloveniji in je tudi rezultat večletnega razvoja, medtem ko je bil FORMIT-M prvič objavljen leta 2019 in je zasnovan za simulacije gozdne dinamike na širših ravneh, kot so regijska, nacionalna in širše. V okviru projektnih aktivnosti smo za revijo *Acta Silvae et Ligni* pripravili izvorni znanstveni članek o izbranih drevesnih modelih razvoja gozdov, ki so primerni za modeliranje na velikoprostorski ravni. V članku smo predstavili področje empiričnih drevesnih modelov in metode za modeliranje posameznih komponent drevesnih modelov, kot so debelinska in višinska rast, razvoj krošnje, mortaliteta ter vrast in pomlajevanje. Opravili smo presojo primernosti

izbranih drevesnih modelov z vidika možnost njihove uporabe v Sloveniji. Ugotovili smo, da imajo modeli SILVA, WEHAM, MASSIMO in CALDIS največje možnosti za uporabo v Sloveniji, saj so vsi primerni za različne gozdne tipe in mešane gozdove z raznomerno zgradbo, ki prevladujejo v Sloveniji. Z vidika prihodnjega razvoja področja smo predlagali razširitev nabora kazalnikov pri gozdnih inventurah ter dodatne meritve značilnosti dreves, npr. lastnosti krošenj, ki bi razširile možnosti modeliranja razvoja gozdov v Sloveniji. Priporočamo razvoj in testiranje možnosti uporabe strojnega učenja na področju modeliranja razvoja gozdov, saj bi tovrstni modeli lahko predstavljali naslednjo generacijo modelov.

4.4. WP4: Simulacije razvoja gozdov

Prototip računalniškega modela razvoja gozdov je oblikovan v obliki matrik in delovnih listov v Excel (Slika 15). Osnova matrika v modelu je matrika debelinske strukture sestoj, ki je vsota matrik debelinskih struktur drevesnih vrst. Model ima naslednje arhitekturne/tehnične značilnosti:

- Stolpec v matrikah je debelinska stopnja (ločeno po naslednjih drevesnih vrstah: (bukev (bu), smreka (sm), jelka(je), rdeči bor (bo), hrast (hr), plemeniti listavci (pl_1st), drugi trdi listavci (dr_tr_1st, mehki listavci (meh_1st), macesen (ma) in drugi iglavci (dr_igl))
- Vrstica v matrikah je časovno obdobje (10 let)
- Izračun nove debelinske strukture poteka tako, da se izračuna debelinski prirastek (dinamično), izračuna se mortaliteta (dinamično), izračuna se vrast (dinamično). Zatem se stari premeri povečajo za debelinski prirastek ter se izračuna nova začasna debelinska struktura z zaokroževanjem na 1 cm navzdol. Začasna debelinska struktura se zatem popravi glede na izračunano mortaliteto in vrast (to je, zmanjša se število dreves zaradi mortalitete ter doda se število dreves v najnižjo stopnjo). Takšna debelinska struktura je predmet možnega poseka in s tem ponovne spremembe. Če ni poseka, je takšna debelinska struktura novo stanje čez 10 let. Postopek se ponovi.
- Tehnični potek izvedbe zgoraj opisanega algoritma v Excel: Po 1 cm drevesnih stopnjah se v prvo vrstico (pod leto 0) na zavihku N vpiše začetno število dreves. Premer vsakega drevesa se nato poveča za izračunan prirastek (zavihek PII), ki se spreminja v odvisnosti od parametrov sestoj po enačbi v zavihku X. Nov premer se izračuna na zavihku Premeri, zatem pa še enkrat zaokrožen premer na zavihku Premeri_round. Nova debelinska struktura se nato prepíše v matriko debelinske strukture sestoj (zavihek N) in na ta način sestoj raste. Poleg debelinske rasti, sta v simulator dodana še modela mortalitete in vrasti ter gospodarjenje

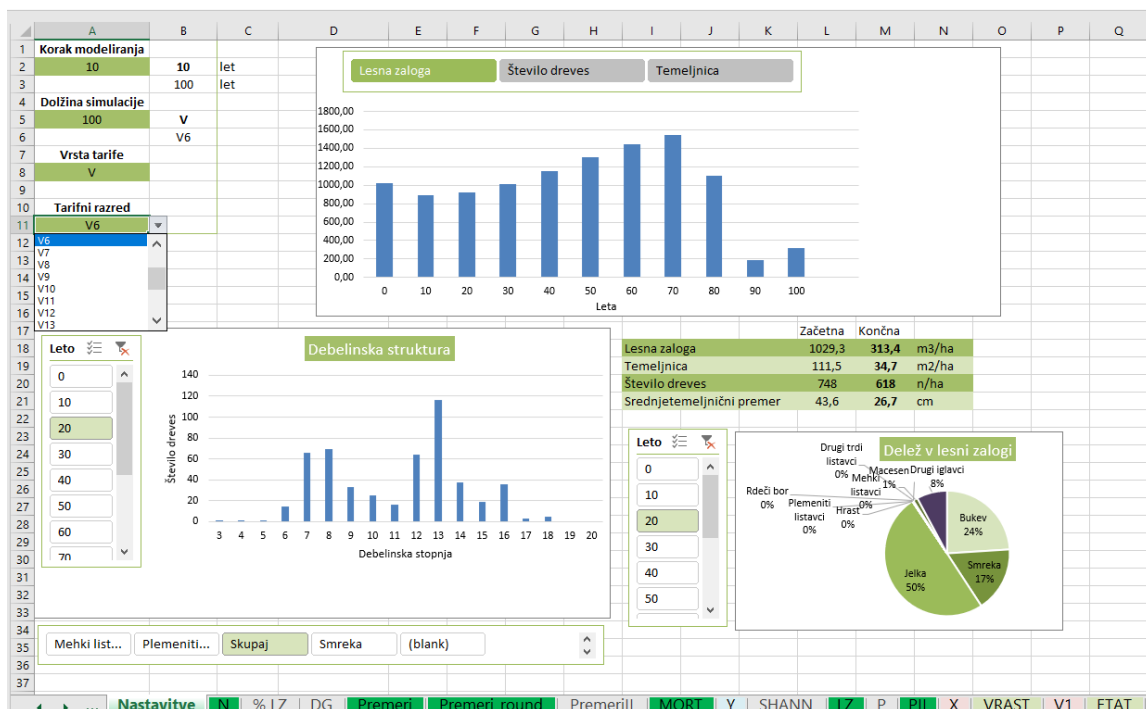
oziroma etat. Mortalitet se izračunava na zavihku MORT, ki upošteva parametre iz zavihka Y, vrast se računa na zavihkih VRAST in V1, etat pa na zavihkih ETAT in E1.

- Model »premika« drevesa po matrikah skladno z debelinsko rastjo, verjetnostjo za mortaliteto in posekom.
- V zavihku Nastavitve se določa korak modeliranja in dolžina simulacije, ki sta trenutno nastavljeni na 10 in 100 let. V spustnem seznamu se izbere tudi vrsto tarife in tarifni razred, ki jo model uporabi za izračun lesne zaloge (Slika 16, kasneje možna implementacija avtomatske izbire).

bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu
bu10	bu11	bu12	bu13	bu14	bu15	bu16	bu17	bu18	bu19	bu20	bu21
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5
0,007854	0,0095033	0,0113097	0,0132732	0,0153938	0,0176715	0,0201062	0,022698	0,0254469	0,0283529	0,0314159	0,0346361
10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0
11,2	12,4	13,5	14,6	15,7	16,8	17,9	19,0	20,1	21,2	22,3	23,5
12,4	13,6	14,8	16,0	17,2	18,4	19,7	20,9	22,1	23,3	24,5	25,8
13,2	14,5	15,8	17,1	18,3	19,6	21,0	22,3	23,6	24,8	26,1	27,5
13,6	14,9	16,3	17,6	19,0	20,3	21,7	23,1	24,5	25,9	27,2	28,6
13,7	15,1	16,5	17,9	19,2	20,6	22,1	23,5	24,9	26,3	27,7	29,2
13,7	15,1	16,5	17,9	19,3	20,7	22,2	23,6	25,0	26,5	27,9	29,4
13,8	15,1	16,5	17,9	19,3	20,7	22,2	23,6	25,0	26,5	27,9	29,4
13,9	15,2	16,6	17,9	19,3	20,7	22,2	23,6	25,0	26,5	27,9	29,4
13,9	15,2	16,6	17,9	19,3	20,7	22,2	23,6	25,1	26,5	28,0	29,5
14,1	15,4	16,8	18,2	19,7	21,1	22,6	24,1	25,6	27,1	28,6	30,1
15,0	16,5	18,0	19,4	20,9	22,5	24,0	25,6	27,2	28,8	30,4	32,0
18,2	19,8	21,5	23,1	24,7	26,4	28,1	29,8	31,5	33,2	35,0	36,7

bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu	bu
bu10	bu11	bu12	bu13	bu14	bu15	bu16	bu17	bu18	bu19	bu20	bu21
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5
0,007854	0,0095033	0,0113097	0,0132732	0,0153938	0,0176715	0,0201062	0,022698	0,0254469	0,0283529	0,0314159	0,0346361
50	50	3	0	0	52	0	0	0	0	28	2
0	49	49	3	0	0	51	0	0	0	0	0
0	0	0	48	48	0	3	0	0	51	0	0
0	0	0	0	0	0	0	46	47	0	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 15: Izsek iz matrike modela, zgoraj: Napovedi prsnih premerov dreves. Spodaj: Napovedi debelinske strukture. Oboje po desetletjih za bukev brez ukrepanja in vrasti



Slika 16: Zavihek Nastavitve z glavnimi kontrolniki in izpisi modela (delovna različica)

Model ima v zadnji delovni različici (stanje november 2023) povezane vse glavne module, kar omogočajo zagon modela razvoja za enomerne ali raznomerne čiste ali mešane sestoje po desetletjih za poljubno število desetletij. Za lažje razumevanja podajamo nekaj bistvenih pojasnil.

Izračun debelinskega prirastka določenega drevesa poteka s pomočjo formul v zavihku X (Slika 17). V zavihku X je po 20 stolpcev namenjeno vsaki izmed desetih drevesnih vrst oziroma skupin vrst in parametrom, ki določajo njihovo priraščanje. Na Sliki 17 je prikazan primer funkcije za bukev, kjer so parametri, ki statistično značilno vplivajo na debelinsko priraščanje, naslednji: nadmorska višina (NV; linearni in kvadratni člen), nagib (NAGIB), Shannonov indeks diverzitete (SHAN), Gini indeks diverzitete drevesnih vrst, temeljnica velikih dreves (BAL), prsni premer (d; linearni in kvadratni člen) in kvadratni koren temeljnice (sqrt(G)) ter konstanta (intercept). Na posebnih zavihkih so izračunani naslednji dinamični sestojni parametri: Shannonov indeks diverzitete (SHAN; na zavihku SHANN), Gini indeks diverzitete drevesnih vrst (na zavihku GINI) in temeljnica debelejših dreves (BAL; na zavihku BAL).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2	Bu	41	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	tu so reg.	koef.				
3			1,18862	0,08719	6,4516E-05	-0,0054	0,20079	0,76159	-0,0089	0,0526	-0,008	-0,1292							
4			intercept	k	NV	NAGIB	SHAN	GINI	BAL	D1	dg	sqr(G)	Nig						
5					-1,68E-07					-0,0006	0,00027								
6		Leto	Leto_error																
7		0	0	2,08973	834,772211	14,5927	1,14138	0,88				43,6	10,6						
8		10	10	2,08973	834,772211	14,5927	1,15117	0,85				44,5	10,0						
9		20	20	2,08973	834,772211	14,5927	1,14174	0,85				47,3	10,4						
10		30	30	2,08973	834,772211	14,5927	1,14554	0,85				54,3	11,3						
11		40	40	2,08973	834,772211	14,5927	1,14854	0,84				65,4	12,0						
12		50	50	2,08973	834,772211	14,5927	1,0888	0,86				77,8	12,8						
13		60	60	2,08973	834,772211	14,5927	0,87797	0,49				69,4	6,7						
14		70	70	2,08973	834,772211	14,5927	0,68983	0,72				26,4	4,5						
15		80	80	2,08973	834,772211	14,5927	0,76384	0,88				25,9	6,8						
16		90	90	2,08973	834,772211	14,5927	0,73843	0,91				29,4	8,7						
17		100	100	2,08973	834,772211	14,5927	0,74957	0,93				49,1	14,9						
18				2,08973	834,772211	14,5927	0,93882	-0,09				67,7	4,7						

Slika 17: Zavihek X s parametri funkcije debelinskega priraščanja, uporabljene pri modeliranju debelinske rasti bukve

Mortaliteta se na zavihku MORT računa kot verjetnost, da bo posamezno drevo odmrlo v 10 letih (Slika 18). Neodvisne spremenljivke, pomembne pri določanju mortalitete posamezne drevesne vrste, so navedene v Preglednici 10. V zavihku N se za izračun novega števila dreves uporabi vrednost 1-MORT, to je verjetnost preživetja.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1													dv	bu	bu	bu	bu	bu	bu
2													d	bu10	bu11	bu12	bu13	bu14	bu15
3		Leto	Leto_error										ds	10	11	12	13	14	15
4										N	G		g	3	3	3	3	3	4
5														0,007854	0,009503	0,01131	0,013273	0,015394	0,01767
6		0	0											0,34	0,31	0,28	0,26	0,24	0,21
7		10	10											0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14
8		20	20											0,36	0,33	0,30	0,27	0,25	0,22
9		30	30											0,63	0,59	0,56	0,53	0,50	0,47
10		40	40											0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,71
11		50	50											0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88
12		60	60											0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
13		70	70											0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
14		80	80											0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
15		90	90											0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
16		100	100											1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
17														0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
18														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23														#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
24														#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
25														#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
26														#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
27														#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Slika 18: Zavihek MORT in primer izračuna verjetnosti mortalitete bukve v 3. debelinski stopnji na začetku obdobja modeliranja (leto 0)

Posek lahko v trenutni verziji določamo ročno, tako da v zavihek ETAT vnesemo število posekanih dreves. Struktura poseka (E1) se nato pri izračunu nove debelinske strukture v zavihku N odšteje.

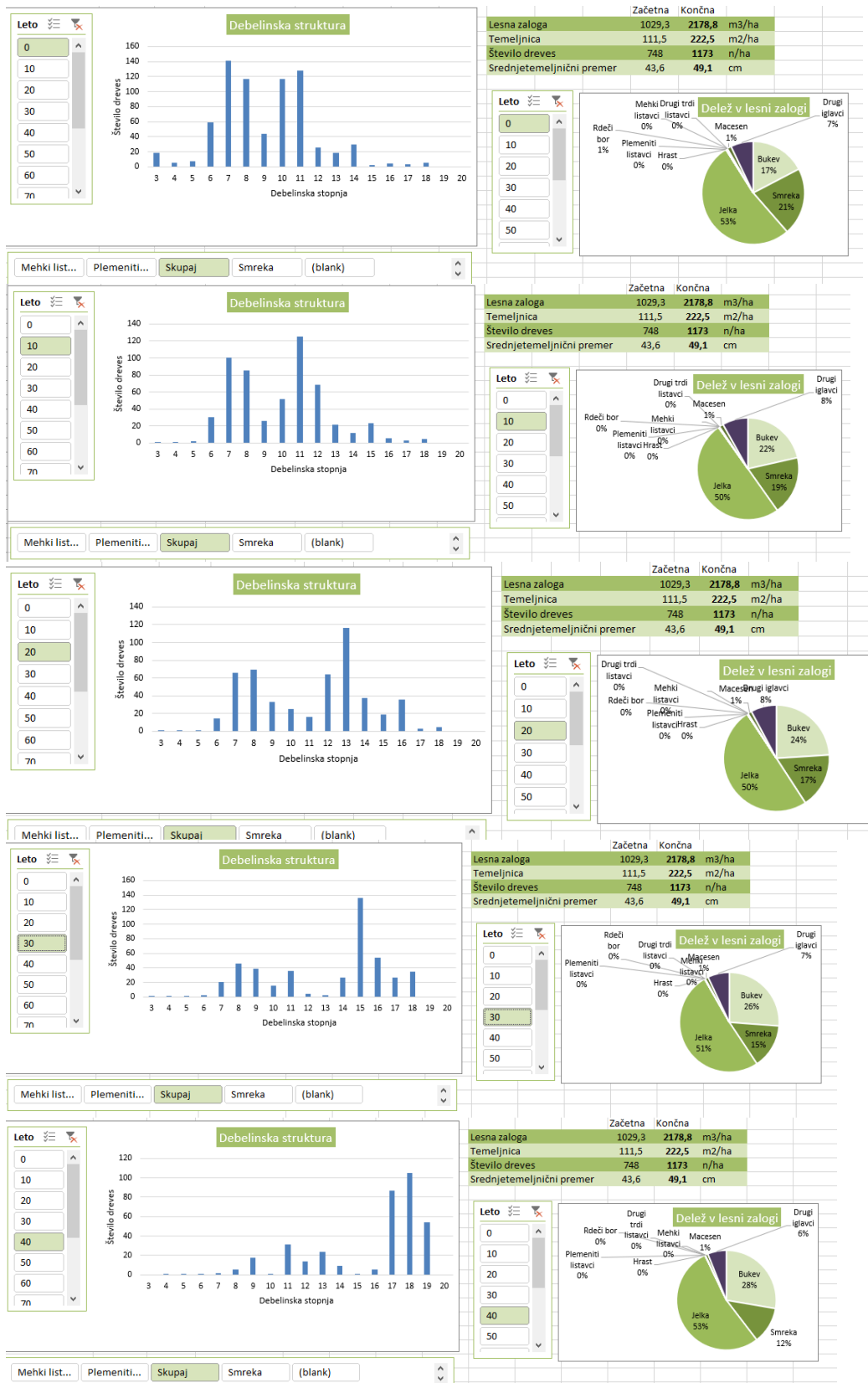
Preglednica 10: Prikaz neodvisnih spremenljivk, ki so vključene v modele mortalitete po drevesnih vrstah

Parameter	Oznaka	bu	sm	je	hr	bo	dr_tr_lst	pl_lst	meh_lst	ma	dr_igl
Prsni premer	d	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
sestojna temeljnica	G_1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Srednje kvadratični premer	dg									x	x
delež smreke	dl11	x	x	x							
delež listavcev	dlLST	x			x						
delež bukve	dl41	x									
delež hrasta	dl51				x						
delež g. javorja	d61							x			
Shannonov indeks diverzitete	SHAN			x		x		x	x	x	
kategorična spremenljivka: silikatna podlaga		x	x		x				x		
PH vrednost	PH_avg						x				x
produksijska sposobnost	V45		x	x							
konstanta	intercept	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Vrast je v zadnji različici modela izračunana po logističnih enačbah in ne po Tobitovem modelu (Slika 19). Postopek poteka tako, da so na zavihku V1 izračunane verjetnosti, da pride do vstopa mladih dreves v prve tri debelinske razrede (10, 11 in 12 cm), v zavihku VRAST pa največje pričakovano število dreves, ki bi lahko vrasle v te razrede. Ker je dobljeno število precej previsoko, je na zavihku N uporabljen dodaten faktor, ki uravnava število vraslih dreves, s čimer vseeno ohranimo dobro prilagodljivost modela. Za napovedovanje vrasti so trenutno uporabljeni prediktorji: delež vrste v celotni temeljnici (PBA), temeljnica (BA) in rastiščni indeks (SI).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
16		100	100	0,01	0,20	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0				
17																				
18				#VALUE!	Recruitment:															
19				#VALUE!	The recruitment is the number of trees that enter the smallest diameter class (50-100 mm) in a 5 year interval:															
20				#VALUE!	$R = p * r$															
21				#VALUE!	where p is the probability that some trees of a particular species will appear in the smallest diameter class during a 5 year interval, and r is the expected number of recruits, conditional on recruitment being positive. The probability of positive recruitment is given by:															
22				#VALUE!																
23				#VALUE!	Parameter															
24				#VALUE!	Species	a_1	a2	a3												
25				#VALUE!	Spruce	-2,2905	-0,0175	0,019	PBA	Proportion of a species within total basal area (%)										
26				#VALUE!	Pine	-3,5519	-0,0616	0,0313												
27				#VALUE!	Birch	-0,9038	-0,037	0,0159												
28				#VALUE!	Other Hardwoods	-3,4379	-0,029	0,1232												
29				#VALUE!																
30				#VALUE!	The conditional number of recruits (number of recruits/ha/year if there is recruitment) is predicted by:															
31				#VALUE!																
32				#VALUE!	Parameter															
33				#VALUE!	Species	a_1	a2	a3	A4	$r = a1 + BA^{a2} * SI^{a3} * PBA^{a4}$										
34				#VALUE!	Spruce	431,419	-0,15665	0,36812	0,05097											
35				#VALUE!	Pine	562,913	-0,3233	0,40089	0,42026											
36				#VALUE!	Birch	649,428	-0,16102	0,14293	0,1042											
37				#VALUE!	Other Hardwoods	314,383	-0,16945	0,44216	0,19348											

Slika 19: Enačbe, ki so v trenutni različici modela uporabljene za izračun vrasti, zato da smo zagotovili popolno delovanje modela

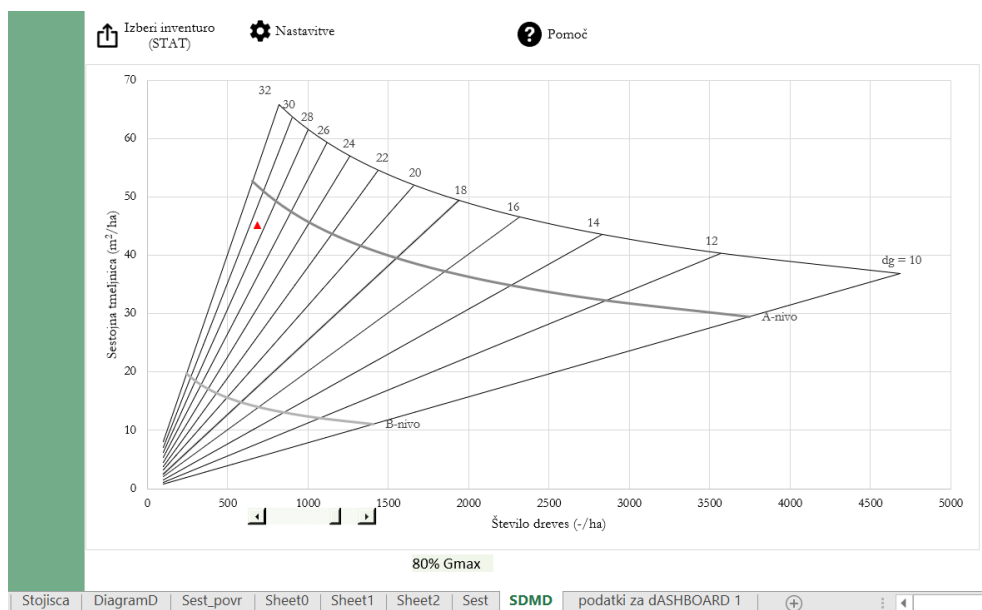


Slika 20: Prikaz rezultatov simulacije razvoja sestoja s slepimi podatki od leta 0 do leta 40

4.5. WP5: Prenos modela v prakso in kontrola kakovosti

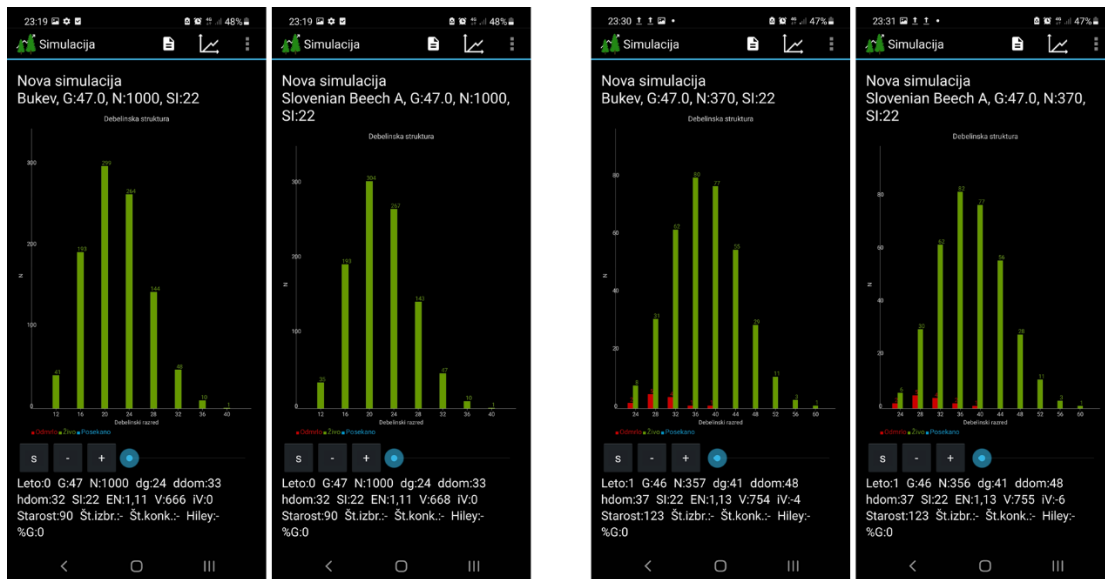
Zadnja delovna različica (stanje november 2023) je na voljo za testiranje in preverjanje veljavnosti. Analiza delovanja s slepimi podatki kaže precenjevanje parametrov (G, LZ, Slika 20), zato bo v primeru nadaljnjega razvoja modela največ pozornosti treba nameniti popravljanju in dopolnjevanju. Ocenjujemo, da je precenjevanje lahko posledica vključitve enostavnejših funkcij (polinomov namesto zlepkov) ter šibko izražene naravne mortalitete, ki je pri podatkih s SVP zabeležena le v tanjših debelinskih stopnjah. Prav tako bo treba preveriti in izboljšati učinek kompeticije in starosti drevesa na upadanje prirastka in mortaliteto dreves zaradi senescence. Na stalnih vzorčnih ploskvah je število primerov naravne mortalitete debelejših dreves zelo majhno ali pa takih primerov sploh ni, zato teh vplivov ni mogoče empirično zajeti v funkcije mortalitete. Pri vgradnji klasičnih preživetvenih krivulj ter zagonu modela s takšnimi funkcijami mortalitete, kjer verjetnost preživetja začne strmo padati po določeni starosti, se je izkazalo, da model daje bistveno realnejše napovedi.

Modele največjih sestojnih gostot (Reinekejevih gostot) smo vgradili v diagram sestojnih gostot SDMD (ang. *Stand density management diagrams*), za katerega smo kodo izvorno izdelali v okviru EIP projekta Digitalizacija kmetijskih gospodarstev za načrtovanje gospodarjenja z gozdovi (DIGIGOZD) ter ga nadgradili tako, da je primeren tudi za mešane sestoje. Takšni diagrami bi bilo lahko samostojni modeli, ki bi jih uporabili v praksi pri načrtovanju redčenj. Diagrami prikazujejo več različnih nivojev sestojnih gostot. Najvišji nivo je maksimalna sestojna gostota (Reinekejeva), pod njo je nivo pričetka odmiranja (krivulja samo-redčenja, določena relativno glede na Reinekejevo krivuljo), pod krivuljo pričetka odmiranja pa še krivulja izkoriščenosti rastišča (tudi izražena relativno glede na Reinekejevo krivuljo). Uporabnik bo ob uporabi tega diagrama lahko za konkreten sestoj preveril, kako blizu je sestoj optimalnim vrednostim oziroma kako intenzivna mortaliteta se pričakuje. Diagrami so pripravljene v Excel (Slika 21) in jih bo mogoče s kodami, ki smo jih razvili v VBA programskem jeziku, razviti v popolnoma samostojno aplikacijo.



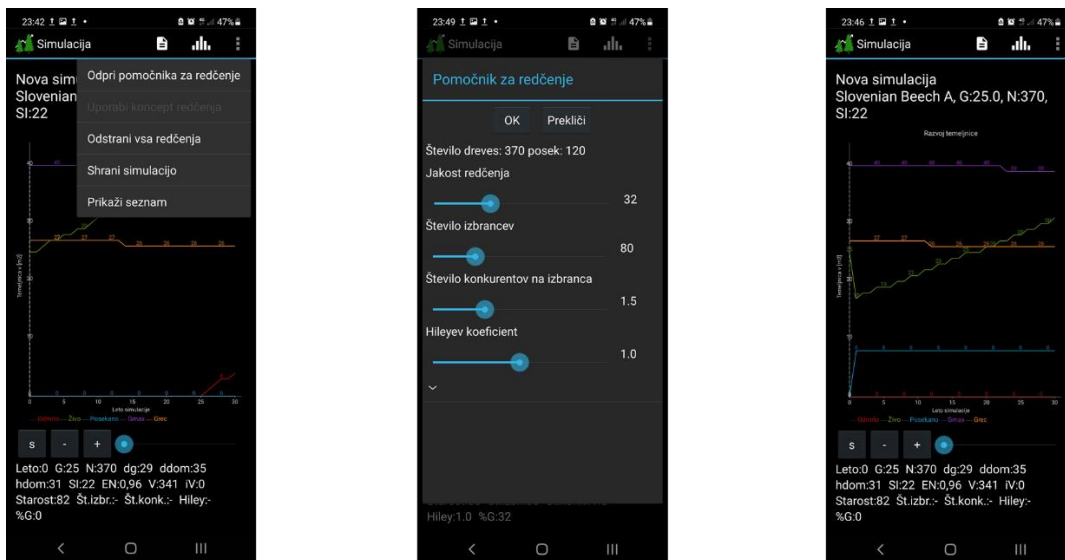
Slika 21: Osutek aplikacije SDMD (Diagram sestojnih gostot). Diagram prikazuje sestoj (rdeč trikotnik) glede na začetek odmiranja zaradi kompeticije (A-nivo), maksimalno možno (Reinekejevo) gostoto pri tej kombinaciji števila dreves in sestojne temeljnice (zgornja črta) in minimalno gostoto (B-nivo). Diagram se ustvari avtomatsko, prikazan je primer za mešan raznomerni sestoj tipa GRP1. Drevesna sestava: sm 61,0%, je 13,0%, r.bo 0,0%, mac 0,0%, oi 0,0%, bu 22,0%, v.js 0,0%, hr 0,0%, g.ja 4,0%, ol 0,0%.

Razvite modele debelinske strukture za čiste bukove sestoje smo vgradili v švicarski simulator čistih enomernih sestojev SiWaWa 2.0, ki deluje na mobilnih napravah. Slika 22 prikazuje primerjavo začetnih debelinskih struktur čistih bukovih sestojev ($G = 47 \text{ m}^2/\text{ha}$ in $dg = 24 \text{ cm}$) ter struktur čez eno leto, generiranih z našimi funkcijami (Slovenian beech), in struktur, generiranih z izvornimi švicarskimi modeli (Bukev). Razlike v debelinskih strukturah po obeh metodah so zelo majhne, kar deloma nakazuje, da je mogoče do izboljšanje modela in vgradnje novih slovenskih funkcij rasti model SiWaWa 2.0 uporabljati tudi s švicarskimi funkcijami.



Slika 22: Vgradnja razvitih modelov za generiranje debelinske strukture za bukove enomerne sestoje v Sloveniji v švicarski sestojni simulator za čiste enomerne sestoje SiWaWa

S prevodom celotne aplikacije SiWaWa 2.0 in prosto dostopnostjo slovenske različice (namestitvena datoteka je na voljo pri vodji projekta) je omogočena uporaba ravnega modela SiWaWa na mobilnih telefonih tudi za slovenske uporabnike. Slika 23 prikazuje Pomočnika za redčenje, kjer uporabnik lahko določa različne jakosti in se odloča za visoko ali nizko redčenje (Hileyev koeficient).



Slika 23: Slovenska različica švicarske mobilne aplikacije SiWaWa 2.0, ki je izšla kot rezultat dela projekta V4-2014 in IIP projekta DIGIGOZD, bi z vgradnjo tudi ostalih funkcij v prihodnosti lahko postala popolnoma prilagojena za čiste enomerne sestoje v Sloveniji

5. Razprava, zaključki in priporočila naročniku

V projektu smo z razvojem funkcij za vse temeljne procese ter izgradnjo prve različice simulatorja postavili temelje za izgradnjo samostojnega modela razvoja sestojev. Ocenjujemo, da je bil projekt obsežen in zahteven, a uspešen. Mnogi rezultati so po raziskovalni naravi temeljni, a imajo razvito aplikacijo. Na podlagi podatkov stalnih vzorčnih ploskev Zavoda za gozdove Slovenije smo razvili modele debelinskega priraščanja za 40 najpogostejših drevesnih vrst v raznomernih gozdovih v Sloveniji. Ti modeli so vključevali različne parametre, vključno z dejavniki, povezanimi z drevesnimi značilnostmi, značilnostmi rastišč in stanjem sestoja. Naše raziskave izboljšujejo razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na debelinsko rast dreves in zagotavljajo vse nujne prirastoslovne podlage za razvoj sestojnega simulatorja na drevesni ravni. Testno različico sestojnega simulatorja z vgrajenimi moduli za debelinsko rast, mortaliteto, vrast in posek smo tudi izdelali. Ocenjujemo, da so z izgradnjo testne različice postavljeni temelji za izboljšave, vgradnjo novih funkcij in predvsem validacijo. Testna različica je na voljo pri vodji projekta.

Modeli vrasti za bukev, jelko in smreko kažejo, da je vrast dreves v raznomernih gozdovih precej stohastičen proces, najbolj vpliven dejavnik pa so sestojne razmere. Ena od glavnih prednosti izbranega Tobit modela za proučevanje vraščanja dreves in določanju pragov za optimalne in kritične pogoje je, da odsotnost vraščanja razumemo kot krnjenje (ang. censoring) latentnega dela vrasti in ne kot kombinacijo verjetnosti vrasti in števila vraslih dreves. To se zdi posebej pomembno pri raznomernih sestojih, kjer so mikropogoji za vrast lahko zelo različni in odsotnost vrasti ne pomeni enako neugodnih pogojev za vrast. Predvidevamo, da bi lahko razvite modele vrasti in napovedane kritične in optimalne razpone sestojnih, rastiščnih in podnebnih parametrov uporabili tudi pri določanju najugodnejših razmer za vraščanje bukve, smreke in jelke v raznomernih sestojih.

Študije mortalitete so pokazale, da je povprečna letna mortaliteta v raznomernih sestojih 0,58 % od števila dreves (N), 0,37 % od sestojne temeljnice (BA) in 0,31 % od lesne zaloge (GS). Poudarjamo, da je mortaliteta, ki je ocenjena s pomočjo podatkov o odmrlih drevesih na stalnih vzorčnih ploskvah, manjša od dejanske mortalitete v sestoju, saj se del odmrlih dreves še pred zabeleženjem v inventuri odstrani. Na takšnih podatkih razviti modeli kažejo predvsem na mortaliteto tanjših dreves in s tem na kompeticijo v mladosti, učinek kasnejše kompeticije na rast pa je težje zaznati. Mortalitete, ki nastopi zaradi pešanja vitalnosti, ni mogoče empirično ugotoviti, oziroma bi takšne stopnje bilo mogoče ugotoviti le s kombinacijo podatkov o sanitarnem poseku in posušenih drevesih na ploskvah. Takšen pristop smo v Sloveniji v preteklosti že uporabili pri razvoju matričnega modela, ki je bil parametriziran na stalnih vzorčnih ploskvah. Premajhna mortaliteta v modelu povzroča nerazumno dolgo in hitro povečevanje dimenzij in volumnov dreves, kar vodi v nerealne napovedi sestojnih kazalcev pri daljših obdobjih simulacij.

Pri razvoju Reinekejevih krivulj smo opravili temeljno delo, saj krivulj maksimalnih sestojnih gostot za mešane raznomerne sestojne v literaturi ni bilo. Kljub temu, da so nekatere razvite krivulje precej podobne krivuljam iz enomernih čistih sestojev, smo ugotovili, da so največje gostote raznomernih sestojev lahko večje in tudi statistično značilno različne od krivulj v enomernih sestojih, pa tudi med sabo se razlikujejo. To je lahko argument pri zagovarjanju raznomernih in mešanih sestojev v podnebni politiki, kjer je cilj povečati ponore CO₂, saj podatki kažejo, da je teoretična največja akumulacija ogljika možna prav v raznomernih sestojih. S konstrukcijo diagramov sestojnih gostot SDMD smo izdelali samostojne sestojne modele (resda enostavne in zaenkrat statične), ki jih lahko uporabljamo pri oceni nujnosti redčenj sestojev. Statičnost diagramov pomeni, da prikazujejo le trenutno stanje v sestoji glede doseganja največjih možnih gostot, priporočenih ter minimalnih gostot, ne kažejo pa pričakovane dinamike v prihodnje. S kombinacijo teh diagramov in modeli povprečij na sestojni ravni (npr. sestojnih tablic) bi bilo mogoče izdelati dinamične diagrame, ki bi prikazovali sedanje stanje gostote glede na priporočeno, maksimalno in minimalno gostote, ter razvoj teh razmerij v naslednjih desetletjih. Diagrame sestojnih gostot, ki so zdaj izdelani za razmerja N/ha proti G, bi bilo mogoče izdelati tudi za druge sestojne kazalce, kot so sestojna višina ali lesna zaloga proti dg. Slabosti, ki jih vidimo pri uporabi SDMD, so razpoložljivost podatkov o številu dreves na ha, način izbora referenčnega diagrama pri poljubni mešanosti sestoja ter neposredna uporabnost diagramov, kadar ne gospodarimo sestojno. V okviru gozdne inventure opise sestojev izvajamo kombinirano fototerestrično, pri čemer nobenega sestojnega parametra ne ugotavljamo objektivno, ampak le z okularno oceno, ki jo kasneje korigiramo z objektivno izmerjenimi podatki. Ker ne ugotavljamo niti G, niti N/ha, je izdelava diagramov možna le pri podrobnejšem obravnavanju sestojev (gojitveno obravnavanje), pri gozdnogospodarskem načrtovanju pa le z uporabo novejših tehnologij za oceno sestojnih parametrov (daljinsko zaznavanje, lidar). Diagrami sestojnih gostot smo izdelali za 4 tipe mešanosti. S tem se odpira vprašanje, kako v praksi izbirati med najprimernejšim modelom, ko imamo mešan sestoj. Velja tudi izpostaviti, da je uporabnost diagramov v našem sistemu gospodarjenja precej manjša kot v sistemih, ki togo sledijo uravnavanju gostot in gospodarjenju s starostnimi razredi.

Za velikoprostorsko raven modeliranja razvoja gozdov z namenom ocene gibanja agregatov v prihodnje v Sloveniji (npr. Lz/ha, ponori CO₂) potrebujemo kvaliteten in redno vzdrževan informacijski sistem za gozdove, ki temelji na rednem zbiranju podatkov o rasti dreves in stanju gozdov na vzorčnih ploskvah, katerih lokacija izpolnjuje pogoje statističnega vzorčenja na območju celotne države. Vendar to ne pomeni, da moramo vse parametre, ki so potrebni za delovanje takšnega simulatorja na nacionalni ravni, tudi ocenjevati ločeno od gozdnogospodarskih inventur na časovno in resolucijsko enotni vzorčni mreži. Pomen nacionalne inventure je predvsem v

zagotavljanju nepristranske ocene populacijskih parametrov. Parametrizacija modulov v velikoprostorskem modelu (rast, vrast, mortaliteta) se lahko opravi tudi na vzorčnih mrežah ZGS. Vpliv časovne komponente na te procese in problem stacionarnosti je zanemarljiv, zato velja ohraniti dovolj fino mrežo meritev na stalnih vzorčnih ploskvah. Takšne so tudi izkušnje iz tujine, kjer se podatki za izdelavo modelov pridobivajo od stalnih raziskovalnih objektov, ploskev, nacionalne inventure do literature, če ni drugih boljših virov.

Ne glede na raven modeliranja in namen/uporabnost modelov velja poudariti, da brez samostojnega razvoja modelov v Sloveniji ne bo mogoče slediti trendu utemeljevanja odločitev pri gospodarjenju z gozdovi na podatkih/orodjih. Samo privzemanje tujih ali prirejanje tujih modelov ni ustrezno. Pri mnogih funkcijah, ki smo jih parametrizirali v projektu, bo treba preveriti veljavnost na manjših prostorskih enotah in po potrebi izdelati posebne funkcije za prostorske ravni in kategorije, ki so dejansko v uporabi v gozdnogospodarskem načrtovanju (npr. RGR ali rastiščni tipi). Glede na to, da so vsi protokoli napisani in dokumentirani, takšno delo ob primernem interesu za takšne modele in financiranju raziskovalnih projektov ne bi predstavljajo težav.

V projektu razvit prototip drevesnega modela še ni različica, ki bi bila primerna za končnega uporabnika v gozdarstvu (npr. načrtovalca na ZGS). Razlogi za to so potrebe po izboljšanju vseh modulov, nepreverjena točnost napovedi, premajhen obseg validacije in uporabniku neprijazna oblika dela z modelom. Treba bo tudi jasno določiti, kje bodo uporabni morebitni modeli povprečij (tablice) in kje drevesni modeli. Razvoj uporabniku bolj prijaznih grafičnih vmesnikov je predviden po tem, ko bomo lahko pokazali, da je model točen, natančen in robusten ter s tem veljaven.

Razvoj modelov je dolgotrajen proces, ki v tujini traja nekaj desetletij, v procesu pa sodeluje večja skupina raziskovalcev, po navadi tudi strokovnjaki s področja programiranja in računalniške arhitekture. Glede na relativno zaostajanje na področju modeliranja v Sloveniji v primerjavi z drugimi državami ocenjujemo, da smo s projektom V4-2014 razvili glavne prirastoslovne in računalniške temelje za razvoj samostojnega simulatorja razvoja gozdnih sestojev, ki bo deloval na drevesni ravni. Da razvoj ne zastane, so potrebna vlaganja in sistematična podpora raziskovalni dejavnosti na tem področju.

Ključne objave, nastale v okviru projekta, so:

TRIFKOVIĆ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Recruitment of European beech, Norway spruce and silver fir in uneven-aged forests : optimal and critical stand, site and climatic conditions. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. 2023, vol. 529, art. 120679, 13 str. ISSN 1872-7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120679>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112722006739?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142940>

TRIFKOVIĆ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Density-dependent mortality models for mono- and multi-species uneven-aged stands: The role of species mixture. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. 2023, vol. 545, article no. 121260, str. 1-12. ISSN 1872-

7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121260>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723004942?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=149152>
- TRIFKOVIĆ, Vasilije, BONČINA, Andrej, FICKO, Andrej. Analyzing asymmetries in the response of European beech to precipitation anomalies in various stand and site conditions using decadal diameter censuses. *Agricultural and forest meteorology*. [Print ed.]. 2022, vol. 327, art. 109195, 15 str., ilustr. ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109195>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819232003823?via%3Dihub>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142410>
- BONČINA, Živa, TRIFKOVIĆ, Vasilije, ROSSET, Christian, KLOPČIČ, Matija. Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests. *IForest*. 2022, vol. 15, iss. 6, str. 484-490, ilustr. ISSN 1971-7458. <https://doi.org/10.3832/IFOR4145-015>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142941>
- JEVŠENAK, Jernej, MALI, Boštjan, SKUDNIK, Mitja. Analiza izbranih drevesnih modelov razvoja gozdov, primernih za modeliranje na velikoprostorski ravni, in možnosti njihove uporabe v Sloveniji = Analysis of selected single-tree growth models suitable for large-scale modelling and their potential use in Slovenia. *Acta Silvae et Ligni*. [Tiskana izd.]. 2023, [št.] 130, str. 1-16, ilustr. ISSN 2335-3112. <https://doi.org/10.20315/ASetL.130.1>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=16665>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=147236>
- JEVŠENAK, Jernej, ARNIČ, Domen, KRAJNC, Luka, SKUDNIK, Mitja. Machine Learning Forest Simulator (MLFS) : R package for data-driven assessment of the future state of forests. *Ecological informatics*. 2023, vol. 75, article no. 102115, 11 str. ISSN 1574-9541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102115>
- SKUDNIK, Mitja, JEVŠENAK, Jernej. Artificial neural networks as an alternative method to nonlinear mixed-effects models for tree height predictions. *Forest Ecology and Management*. [Online ed.]. vol. 507, art. 120017, 9 str. ISSN 1872-7042. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120017>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112722000111?dgcid=author>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=15134>
- BONČINA, Andrej, TRIFKOVIĆ, Vasilije, FICKO, Andrej, KLOPČIČ, Matija. Diameter growth of European beech on carbonate: a regional versus forest type perspective. *European journal of forest research (Internet)*. 2023, vol. 142, iss. 4, str. 917-932. ISSN 1612-4677. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01562-z>, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-023-01562-z>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=148145>
- BONČINA, Andrej, TRIFKOVIĆ, Vasilije, FICKO, Andrej. Diameter growth of Silver fir (*Abies alba* Mill.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), and Black pine (*Pinus nigra* Arnold) in Central European forests : findings from Slovenia. *Forests*. [Online ed.]. 2023, vol. 14, iss. 4 [article no. 793], 16 str. ISSN 1999-4907. <https://doi.org/10.3390/f14040793>, <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/4/793>, <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=145342>
- FICKO, Andrej, TRIFKOVIĆ, Vasilije. Primerjava različnih regresijskih modelov za napovedovanje debelinskega priraščanja jelke = A comparison of alternative types of regression models for predicting the diameter increment of silver fir. *Acta Silvae et Ligni*. [Tiskana izd.]. 2021, [št.] 126, str. 61-76, ilustr. ISSN 2335-3112. <https://doi.org/10.20315/ASetL.126.6>, <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?id=14645>