

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ПОЉОПРИВРЕДНОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Датум: 25. 02. 2025.

Предмет: Извештај Комисије за оцену урађене докторске дисертације Предрага Д. Ранђеловића, мастер инжењера пољопривреде.

Одлуком Наставно-научног већа Пољопривредног факултета Универзитета у Београду број 32/4-5.1., именовани смо у Комисију за оцену урађене докторске дисертације под насловом: „Развој модела за високопропусну фенотипизацију квантитативних особина у оплемењивачким колекцијама соје“, кандидата Предрага Д. Ранђеловића, мастер инжењера пољопривреде.

Комисија у саставу: др Томислав Живановић, редовни професор, Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, др Наташа Милосављевић, ванредни професор, Пољопривредни факултет, Универзитет у Београду, др Марина Теран, виши научни сарадник, Институт за ратарство и повртарство, Нови Сад, Институт од националног значаја за Републику Србију.

ИЗВЕШТАЈ

1. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ И ДИСЕРТАЦИЈИ

Основни подаци о кандидату. Предраг (Драгослав) Ранђеловић, мастер инжењер пољопривреде, рођен је 16. 3. 1994. године у Новом Саду. Основну школу и гимназију је завршио у Новом Саду. Школске 2013/2014. године је уписао Пољопривредни факултет Универзитета у Новом Саду, смер Ратарство и повртарство, а дипломирао 2017. године са просечном оценом 9,10. Током студија био је стипендиста Министарства просвете и спорта Републике Србије. Мастер студије је уписао 2017. године на истом факултету где је и одбранио мастер рад под називом „Индиректне методе у обрачуну потреба кукуруза за водом у климатским условима Војводине“ са оценом 10. Просек оцена на мастер студијама износио је 9,86.

Докторске студије на модулу Ратарство и повртарство, Пољопривредног факултета, Универзитета у Београду уписао је 2018. године, а од фебруара 2018. године је запослен у Институту за ратарство и повртарство у Новом Саду као стручни сарадник на пословима оплемењивања соје. У звање истраживач приправник изабран је 2019. године а звање истраживач сарадник за научну област Биотехничке науке, ужу научну област Генетика и оплемењивање стекао је 2021. године. До сада је био ангажован на пројекту финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Поред тога учествовао је на два међународна пројекта у оквиру програма Европске уније, Horizon 2020. Тренутно је учесник националног пројекта „Soybean yield prediction using multi-omics data integration-SoyPredict” (број пројекта: 6788) Фонда за науку Републике Србије и три пројекта из Horizon Europe програма Европске уније. Као аутор или коаутор до сада је објавио преко

60 научних радова у целини или изводу међу којима је и пет радова који су публиковани у међународним часописима који се налазе на SCI (Science Citation Index) листи.

Основни подаци о дисертацији. Докторска дисертација мастер инжењера пољопривреде Предрага Ранђеловића под називом: „Развој модела за високопропусну фенотипизацију квантитативних особина у оплемењивачким колекцијама соје“ написана је у складу са захтевима који су прописани на основу „Упутства о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду“. Дисертација је написана на укупно 123 стране у оквиру којих се налази осам табела, 20 слика и 25 графика и садржи наведене делове: насловну страну на српском и енглеском језику, страну са информацијама о менторима и члановима комисије, страну са резимеом на српском и енглеском језику, две странице са садржајем и следећа поглавља: Увод (стр. 1–2); Преглед литературе (стр. 3–19); Циљ истраживања (стр. 20); Основне хипотезе од којих се полази (стр. 21); Материјал и методе (стр. 22–34); Резултати (стр. 35–66); Дискусија (стр. 67–81); Закључак (стр. 82–83); Литература (стр. 84–103); Прилози (стр. 104–118); Биографија аутора (стр. 119); Изјаве о ауторству, о истоветности штампане и електронске верзије и о коришћењу (стр. 120–123).

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Предмет истраживања ове докторске дисертације представља развој модела за високопропусну фенотипизацију броја биљака по јединици површине, покривности, висине, биомасе и приноса соје. Креирање модела засновано је на подацима који су добијени даљинском детекцијом и фотограметријском анализом дигиталних фотографија које су прикупљене помоћу беспилотне летелице и одговарајућег сензора. Поседовање алата који ће омогућити недеструктивну, брзу и што прецизнију процену претходно наведених квантитативних особина соје током вегетационог периода, може допринети побољшању ефикасности оплемењивачких програма који за циљ имају стварање високоприносних сорти. Поред креирања предикционих модела, анализиран је однос између података добијених помоћу модела за високопропусну фенотипизацију и морфолошких, технолошких и продуктивних особина дивергентне гермплазме соје.

3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ ОД КОЈИХ СЕ ПОЛАЗИЛО У ИСТРАЖИВАЊУ

У оквиру ове докторске дисертације се полази следећих основних претпоставки:

- Да се на основу података добијених даљинском детекцијом и фотограметријском анализом дигиталних фотографија генотипова соје, прикупљених током вегетационог периода, могу креирати поуздани модели за предикцију броја биљака по јединици површине, покривности, висине, биомасе и приноса.
- Да ће модели за високопропусну фенотипизацију соје креирани и оцењени на основу анализе одабраних генотипова омогућити успешну процену параметара раста и свих осталих генотипова у оквиру постављених огледа.
- Да креирање модела на основу података који су прикупљени током вишегодишњих огледа у независним окружењима осигурава довољну робусност за њихово коришћење у различитим условима.

- Да се резултати добијени помоћу креираних модела за високопропусну фенотипизацију могу повезати, кроз даља истраживања, са вредностима морфолошких, технолошких и продуктивних особина.
- Да ће вредности квантитативних особина које су добијене помоћу модела за високопропусну фенотипизацију и класичним методама фенотипизације омогућити проналажење разлика између анализираних генотипова соје и детектовање супериорне гермплазме која би као таква могла бити укључена у будуће оплемењивачке програме.

4. КРАТАК ОПИС САДРЖАЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Увод: У оквиру уводног поглавља кандидат се осврнуо на таксономску припадност соје као биљне врсте и њеног значаја са производног и агроеколошког аспекта по питању приноса и формирања симбиотске заједнице. Даље, Кандидат истиче фотопериодску зависност и значај дужине вегетације код соје (000 до III групе зрења), као и могућност коришћења високопропусне фенотипизације за повећање ефикасности процеса прикупљања података о расту и развоју биљака током вегетационог периода указујући на предности које би биле остварене њеном применом.

Преглед литературе: На почетку овог поглавља поред истицања значаја соје, кандидат је детаљније указао који су највећи светски произвођачи соје и које површине је ова легуминоза заузимала у Републици Србији за период 2018-2022. година. Остатак поглавља подељен је у три потпоглавља (*Порекло, ширење и оплемењивање соје, Квантитативне особине соје и Фенотипизација, даљинска детекција и фотограметрија*) који говоре о самој тематици истраживања докторске дисертације. У оквиру првог потпоглавља, Кандидат се осврнуо на историјат, доместификацију, ген центре и моменат почетка гајења соје у Европи и на Северноамеричком континенту. У наставку овог потпоглавља аутор говори о почецима, принципима и циљевима савременог оплемењивања соје. У другом потпоглављу Докторанд даје преглед најважнијих квантитативних особина соје које су обухваћене оплемењивањем и њихову повезаност са приносом семена те ближе објашњава њихов значај у оплемењивању. Треће потпоглавље, *Фенотипизација, даљинска детекција и фотограметрија*, обухвата четири издвојене целине као посебне поднасловне (*Алати и технике даљинске детекције и фотограметрије, Примена високопропусне фенотипизације у оплемењивању биљака, Високопропусна фенотипизација и оплемењивање соје и Примена машинског учења у високопропусној фенотипизацији*) и говори о фенотипизацији као научној дисциплини, значају који има при одабиру супериорних генотипова и могућностима побољшања њене ефикасности што би допринело остварењу једног од главних циљева оплемењивача, повећања генетичке добити од селекције. Прва целина *Алати и технике даљинске детекције и фотограметрије* обухвата приказ уређаја за даљинску детекцију, њихову поделу: према типу уређаја за прикупљање података (сателите, различите моделе уређаја који се налазе на земљи и беспилотне летелице) и према типу платформе за прикупљање података. Кандидат даје осврт на значај, предности и недостатке сензора који могу бити активни или пасивни у зависности да ли бележе рефлектовано или емитовано електромагнетно зрачење посматраног објекта. На крају аутор даје посебан акценат на најсложенији део високопропусне фенотипизације који се односи на обраду и интерпретацију велике количине прикупљених података, примену протокол и начине за повећање ефикасности и

прецизности коначних података. Наредни поднаслов **Примена високопропусне фенотипизације у оплемењивању биљака** даје општи приказ о начину на који је високопропусна фенотипизација коришћена до сада, које особине могу да се прате са посебним акцентом на употребу података који су везани за рефлектовано сунчево зрачење а приказани су у виду вегетационих индекса. Издвојени су најзначајнији индекси и њихово довођење у везу са својствима биљака значајним за њихов раст и развој и геномску селекцију и *speed breeding* технике. У оквиру следећег поднаслова **Високопропусна фенотипизација и оплемењивање соје** ближе је објашњена примена високопропусне фенотипизације код соје истичући велики број особина које су праћене помоћу различитих алата и техника даљинске детекције и фотограметријске анализе снимака. Аутор истиче предности које се могу остварити применом савремених метода и алата за потребе прецизније и ефикасније оцене оплемењивачког материјала. Последњи поднаслов **Примена машинског учења у високопропусној фенотипизацији** говори о коришћењу машинског учења за потребе креирања сложених предикционих модела за високопропусну фенотипизацију који омогућавају коришћење великог броја предиктора.

Материјал и методе: У основи кандидат у овом поглављу истиче да је истраживање реализовано у четворогодишњим пољским огледима, у две фазе, на парцелама Института за ратарство и повртарство у Римским Шанчевима. Модели за високопропусну фенотипизацију соје креирани су на основу података добијених анализом дигиталних фотографија и стварно измерених вредности особина за које су модели прављени.

Детаљнији приказ овог поглавља дат је кроз три потпоглавља. У првом потпоглављу **ФАЗА I- Развој модела за предикцију броја биљака соје по јединици површине** кандидат наводи да је креирање модела за предикцију броја биљака по јединици површине обављено током прве две године истраживања. Биљни материјал сачињавало је укупно 266 генотипова соје. При томе, 66 генотипова соје се користило у првој години огледа за креирање модела за предикцију, док је 200 генотипова соје коришћено у другој години, за оцену прецизности креираног модела. Бројање биљака обављено је директно на свакој појединачној парцели. За прикупљање фотографија током прве две године огледа коришћена је беспилотна летелица под називом Phantom 4 (*DJI, Shenzhen, China*) која је опремљена RGB камером са три канала (*Red, Green, Blue*). Модел за предикцију броја биљака креиран је помоћу алгорита насумичне шуме (енг. *random forest, RF*) и одговарајућих предиктора у статистичком софтверу R. Као предиктори коришћени су различити, од раније познати вегетациони индекси добијени обрадом фотографија. Резултати добијени помоћу креираног модела проверени су поређењем са ручно избројаним вредностима броја биљака по јединици површине.

У оквиру другог потпоглавља **ФАЗА II- Развој модела за предикцију висине, покривности, биомасе и приноса соје** ближе су приказани материјал и методе коришћене током наредне две године односно у другој фази истраживања током које су креирани модели за предикцију покривности, висине биљака, биомасе и приноса соје. Огледи у овој фази постављени су по *p*-гер (*partially replicated*) дизајну где су неки од њих били посејани у више понављања као контрола. У овом делу истраживања коришћена је оплемењивачка колекција од 206 генотипова соје, при чему је обављена подела на рану (117 генотипова) и касну (89 генотипова) гермплазму. Одабрани генотипови су у идентичним огледима посејани на два различита типа земљишта од којих је један био песковити лес за симулацију суше а други чернозем. У огледима је сваке године било заступљено укупно 560 експерименталних парцела соје. Фотографисање генотипова соје током друге фазе

огледа обављено је помоћу беспилотне летелице ознаке P4M (*DJI, Shenzhen, China*). Ова летелица је опремљена мултиспектралном камером са пет канала (*Red, Green, Blue, Red Edge, NIR*). Снимања су током овог дела истраживања обављана у више временских тачака током вегетационог периода соје.

За потребе процене покривности генотипова соје развијена је техника маскирања земљишта на дигиталним фотографијама што је омогућило да за анализу слике остане само вегетативна површина биљака соје. Покривност сваког анализираних генотипа израчуната је на основу процента вегетативне масе која испуњава регион од интереса тог генотипа на дигиталној фотографији. Користећи податке о покривности добијене у више временских тачака омогућено је добијање информација о дужини трајања максималне покривности (укупан број дана са покривношћу изнад 90%).

Помоћу фотограметријске обраде слике, анализом дигиталног модела терена (ДМТ) и дигиталног модела површине (ДМП) у R софтверу је одређена висина генотипова соје. За потребе провере прецизности дигитално одређене висине у оквиру огледа а непосредно пре сваког фотографисања физички је измерена висина генотипова соје на одабраним парцелама. Прикупљање података о висини биљака обављено је на пет места у оквиру сваке одабране парцеле. Предиктоване висине биљака на калибрационим парцелама соје упоређене су са ручно измереним вредностима ради утврђивања прецизности модела. Модел је у наставку искоришћен за предикцију висине биљака на осталим експерименталним парцелама посејаним у оквиру друге фазе истраживања.

За потребе креирања модела за предикцију биомасе посејане су додатне парцеле, са обзиром да се ради о деструктивној методи. Ове експерименталне парцеле су такође фотографисане помоћу беспилотне летелице и мултиспектралне камере а након тога покошене и измерене. Са мултиспектралних фотографија ових парцела одређене су вредности дигиталних бројева појединачних канала помоћу којих су израчунате и вредности вегетационих индекса. Поред тога, израчунате су вредности покривности и висине биљака на наведеним парцелама. Користећи алгоритме машинског учења RF и регресију делимичних најмањих квадрата (енг. *partial least square regression, PLSR*) и скуп предиктора који су чиниле варијабле добијене обрадом фотографија креиран је модел за предикцију биомасе. Модел са већом прецизношћу при поређењу са покошеним вредностима биомасе искоришћен је за предикцију биомасе и код свих осталих генотипова гајених током друге фазе истраживања.

У последњем делу другог потпоглавља ближе је објашњен начин на који је креиран модел за предикцију приноса соје. Креирање модела обављено је на основу података прикупљених са 1113 експерименталних парцела соје користећи RF и PLSR алгоритме машинског учења и различите предикторе. Као предиктори коришћени су подаци о броју биљака по јединици површине, покривности, дужини трајања максималне покривности, висини и биомаси добијени применом претходно развијених модела за високопропусну фенотипизацију. Заједно са њима додатне варијабле била су и 33 вегетациона индекса. Употребом R софтвера и у њему одговарајућих статистичких пакета развијени су иницијални модели за предикцију приноса соје при чему је модел који је показао већу прецизност при поређењу са приносом добијеним након жетве одабран као коначни алат. Даљи рад био је усмерен на повећање ефикасности одабраног модела кроз редукацију висококорелираних варијабли. На основу података добијених помоћу финалног модела анализиран је ефекат промене приноса у односу на варирање преосталих предиктора.

У последњем потпоглављу **Прикупљање података о морфолошким, производним и технолошким особинама соје класичном фенотипизацијом** дат је осврт на анализу материјала на традиционалан начин. У пуној зрелости, непосредно пре жетве, од сваког генотипа узорковано је по пет биљака, на којима су одређене вредности морфолошких особина и то висине прве махуне, броја зрна по биљци, броја грана, маса зрна по биљци и маса хиљаду зрна. На након жетве експерименталних парцела измерен је принос, као најважнија агрономска особина. У лабораторијским условима, анализиран је хемијски састав зрна, у погледу садржаја протеина и уља, како би се оценио технолошки квалитет анализираних генотипова соје. За обраду података добијених у пољу коришћен је мешовити линеарни модел као и одговарајуће статистичке методе, применом статистичког софтвера R. На овај начин добијене су вредности BLUP-ова (енг. *best linear unbiased predictor*) на основу којих је обављена даља анализа испитиваног материјала. Вредности добијене обрадом података из директног фенотипирања упоређене су са подацима добијеним помоћу креираних модела за високопропусну фенотипизацију.

Резултати: Ово поглавље је највеће и састоји се од седам потпоглавља у којима је аутор на јасан и прецизан начин приказао резултате истраживања које је спроведено у оквиру докторске дисертације. Употребом бројних слика, графика и табела омогућен је детаљан увид у добијене резултате. У првом потпоглављу **Предикциони модел за процену броја биљака соје по јединици површине** показано је да су перформансе модела креираног у 2018. години на основу RF алгорита и осам вегетационих индекса добијених са 66 калибрационих парцела соје биле веома добре. О томе сведоче високе вредности коефицијента корелације ($R^2 = 0,80$) и ниске вредности грешке (MAE = 3,07; RMSE = 3,91) добијене при поређењу предиктованог и ручно избројаног броја биљака по јединици површине. Додатна евалуација обављена је наредне године на независном сету од 200 генотипова соје. Модел је задржао високу прецизност о чему сведоче и добијени статистички подаци, $R^2 = 0,76$, MAE = 6,24 и RMSE = 7,47. Иако су вредности MAE и RMSE порасле, ово је било очекивано и приписано је утицају неконтролисаних фактора који могу утицати на прецизност модела. Аутор наглашава да је модел на парцелама на којима је уочено позитивно одступање између ручно избројаног и предиктованог броја биљака потценио стваран број и обрнуто. Поред тога кандидат наглашава да је уочена већа варијабилност код резултата прикупљених ручним бројањем пре свега зато што су подаци који су добијени помоћу модела имали ниже максималне вредности. Даље је приказан ефекат предиктора односно вегетационих индекса обрачунатих из две развојне фазе соје (V4 и R3) на учинак модела истичући већи значај предиктора из R3 фазе. Коначно, модел је искоришћен за процену броја биљака у оквиру огледа посејаним током друге фазе истраживања. Резултати су показали да су неповољни услови проузроковани сушом довели до смањења бројности биљака, посебно у 2020. години. Поред тога и у 2020. и у 2021. години код ранијих сорти забележен је већи број биљака по јединици површине у односу на касни материјал.

Друго потпоглавље под насловом **Предикциони модел за процену покровности соје** говори о резултатима покровности добијене на основу процене процента биљних пиксела који испуњавају сваку парцелу представљене у виду оивиченог региона (енг. *Region of Interest, ROI*) на фотографијама. Модел је заснован на издвајању биљне масе помоћу NDVI индекса а затим уклањања пиксела земљишта помоћу *Otsu* методе. Након тога је добијена бинарна слика која је омогућила процену покровности на свакој од експерименталних парцела соје од почетка вегетационог периода па све до потпуног

прекривања земљишта лисном масом. Аутор истиче да промене у боји земљишта и биљака које су се јављале током сезоне као последица падавина, различитог механичког састава и развоја биљака нису утицале на учинак модела што говори у прилог његовој робусности. Кандидат на основу добијених резултата наводи да су у неповољним условима и рани и касни генотипови имали мању покривност у односу на контролу и спорије затварали редове. Поред тога сагледан је и ефекат неповољних услова на дужину максималне покривности, која је била краћа у сушним условима, а разлике су биле израженије код каснијих сорти. На основу података из 2020. и 2021. године, изабрано је по пет генотипова који најбрже достижу 50% покривности у контролним и сушним условима, као и они са најдужом максималном покривношћу.

У трећем потпоглављу **Предикциони модел за процену висине биљака соје** истиче се да је процена висине заснована на анализи фотографија калибрационих парцела добијених помоћу беспилотне летелице. Процес је укључивао употребу SCI индекса за маскирање земљишта и издвајање биљака након чега су висине одређене на основу разлике између дигиталног модела терена (ДМТ) и дигиталног модела површине (ДМП). Резултати добијени применом овог модела показали су високу корелацију са ручно измереним висинама о чему сведоче добијене вредности статистичких показатеља ($R^2 = 0,92$; MAE = 3,93 cm; RMSE = 6,88 cm). Аутор наглашава високу прецизност модела током читавог вегетационог периода соје будући да су се вредности грешке кретале у распону од 3,56 cm до 10,17 cm за RMSE и од 2,74 cm до 8,04 cm за MAE. У 2020. и 2021. години, модел је коришћен за предикцију висине свих генотипова соје у сушним и у контролним условима. У 2020. години, максимална просечна висина биљака код касних сорти у контролним условима износила је 102,28 cm а 83,86 cm код раних. Касне сорте су биле више и наредне године али су максималне висине биле мање и остварене су касније у поређењу са 2020. годином. Кандидат истиче да је суша негативно утицала на висину биљака соје и код ране и код касне гермплазме. На основу података о висини из 2020. и 2021. године, изабрани су генотипови чија је максимална висина била између 100 и 110 cm, што је оптималан распон за формирање великог броја махуна уз контролисани ризик од полегања.

Четврто потпоглавље **Предикциони модел за процену биомасе соје** започиње са наводима о промени вредности покривности, висине биљака и свеже биомасе са накупљањем суме активних температура. Резултати су показали да су биљке соје на калибрационим парцелама које су коришћене за креирање модела биле више у 2020. години, док је покривност скоро у потпуности достигла 100% у обе године. Вредности свеже биомасе су биле веће у каснијим фазама у 2020. години, док је у раним фазама 2021. године ниво акумулације биомасе био бржи. У наставку, Кандидат даје осврт на могућност повећања ефикасности предикционог модела кроз смањење броја висококорелираних индекса. То је и урађено тако да су од иницијалних 33, као јединствени преостали TGI и GCI. Они су заједно са покривношћу и висином биљака коришћени као предиктори за креирање RF и PLSR модела за предикцију биомасе соје. Након редукције броја индекса, оба модела су понудила добру прецизност предикције биомасе. Међутим, RF модел је дао нешто боље резултате, са нижом стандардном девијацијом при поређењу предиктованих и покошених вредности биомасе. Аутор истиче да је у оба модела, висина биљака имала највећи утицај на прецизност предикције, док је TGI имао мањи утицај на резултате. Одабрани RF модел је затим коришћен за предикцију свеже биомасе свих генотипова соје анализираним у огледима постављеним током 2020. и 2021. године. Имајући у виду да је предикција обављена у већем броју временских тачака, модел је омогућио праћење

динамике накупљања органске материје током вегетационог периода. Кандидат наглашава да су веће вредности биомасе у контролним условима забележене код касних сорти у односу на ране док су негативни услови проузроковани сушом довели до смањења акумулације органске материје како код сорти са краћим тако и код оних са дужим трајањем вегетационог периода. На основу добијених података, одређени су генотипови који су акумулирали највећу количину органске материје у сушним и контролним условима.

Пето потпоглавље *Морфолошке, производне и технолошке особине соје* садржи већи број подналова у оквиру којих су приказани резултати добијени класичном фенотипизацијом анализираних генотипова соје. У овом делу докторске дисертације, аутор је приказао утицај услова гајења и дужине вегетационог периода, односно групе зрења на вредности испитиваних својстава. Након анализе сваког својства издвојени су најбољи генотипови како у контролним тако и у сушним условима. Када је у питању висина прве махуне она се налазила на већој висини код касних сорти у односу на ране и у сушним и у контролним условима. Кандидат такође наглашава да су сушни услови значајно смањили висину прве махуне код анализираних гермплазме без обзира на групу зрења. Код броја грана по биљци неповољни услови средине имали су значајног утицаја само у 2021. години када је услед суше дошло до појачаног гранања, посебно код касних сорти. Код броја зрна по биљци, већи ефекат на ово својство имала је група зрења а нешто мање услови гајења који су се показали као значајан фактор само у 2021. години док је дужина вегетационог периода имала утицај на ову особину у обе године друге фазе истраживања. Аутор истиче да су у готовом свим случајевима и услови гајења и група зрења имали значајан утицај на масу зрна по биљци. Једини изузетак је забележен у 2020. години када није уочена статистички значајна разлика између раних и касних генотипова соје гајених у сушним условима. Осим тога, веће вредности у маси зрна по биљци уочене су код касних у односу на ране сорте и у контролним у односу на сушне услове. Код масе хиљаду зрна кандидат наглашава да је вредност овог својства у свим условима била већа код раних у односу на касне сорте. Поред утицаја групе зрења, на испољавање овог својства значајан утицај имала је и суша која је довела до смањења масе хиљаду зрна у свим огледима. Принос као агрономски најважнија особина је варирао у зависности од услова и дужине вегетационог периода анализираних генотипова соје. Резултати су показали да су статистички значајно већи приноси забележени у контролним условима у поређењу са сушом. Када је у питању група зрења, касни генотипови су у готово свим случајевима били приноснији од раних осим у сушним условима у 2020. години где су сорте са краћим вегетационим периодом биле приносније. Када је у питању садржај протеина и садржај уља у семену соје кандидат истиче да главни утицај на испољавање ових својстава има група зрења а мање услови гајења. Двогодишњи резултати су показали да сорте са краћим вегетационим периодом имају значајно већи процентуални удео протеина у зрну у односу на касне сорте док је код садржаја уља обрнут случај.

Шесто потпоглавље *Предикциони модел приноса соје* говори о процесу развоја модела за предикцију приноса соје коришћењем алгоритама машинског учења, као што су RF и PLSR, заснованих на подацима добијеним из високопропусне фенотипизације. Почетни модел је користио 426 предиктора, укључујући број биљака по јединици површине, покровност, дужину трајања максималне покровности, вегетационе индексе, висину и биомасу биљака. Резултати су показали да је RF модел имао мању грешку (RMSE = 0,49 t/ha) у предвиђању приноса у поређењу са PLSR (0,50 t/ha за PLSR). Поред тога

PLSR модел је у појединим случајевима предвиђао негативне вредности приноса због чега је елиминисан. У наставку рада иницијални сет предиктора је редукован кроз више фаза како би се постигла већа ефикасност модела. У финалном моделу за предикцију приноса соје коришћено је свега 5 кључних предиктора из три временске тачке али је прецизност задржана на виском нивоу уз грешку која је била мања од 0,6 t/ha. Кандидат даље истиче да су анализирани вредности одабраних предиктора, при чему је уочена значајна варијабилност између различитих парцела и временских тачака. Након тога је помоћу PDP и PDP+ICE графика указано како промене у вредностима предиктора утичу на предикцију приноса соје. На крају одабрани су најприносији генотипови како у контролним тако и у сушним условима.

У последњем потпоглављу *Карактеризација генотипова соје на основу класичне и високопропусне фенотипизације* приказана је могућност коришћења података високопропусне фенотипизације за потребе евалуације анализираних гермплазме. Аутор као прву могућност истиче издвајање супериорних генотипова соје на основу претходно креираних модела за високопропусну фенотипизацију. На овај начин издвојени су генотипови који су се показали најбоље по питању параметара покривности, висине, биомасе и приноса што их кандидује за коришћење у будућим оплемењивачким програмима као извор супериорних особина. Други правац је подразумевао проверу везе између података добијених помоћу предикционих модела и података добијених класичном фенотипизацијом. Однос између наведених особина приказан је помоћу корелационог матрикса при чему је анализа показала да су се вредности корелационог коефицијента кретале између -0,5 и 0,5. Аутор истиче да поседовање овакве врсте података може допринети ефикаснијем и прецизнијем одабиру линија које су добијене након иницијалног укрштања родитеља.

Дискусија. Ово поглавље је подељено на седам потпоглавља слично претходном поглављу. Аутор дискутује и на релевантан начин пореди добијене резултате проистекле из докторске дисертације са другим истраживањима. Прво потпоглавље *Модел за предикцију броја биљака по јединици површине* дат је осврт на успешно креирање наведеног модела користећи вегетационе индексе као предикторе и RF алгоритам машинског учења. Посебно је истакнуто да је креирани модел задржао високу прецизност и приликом тестирања на независном сету података што није био случај код модела који су претходно креирани у другим истраживањима. И поред добре прецизности, модел је показао одређени степен грешке када је потценио или преценио стваран број биљака. Аутор као главне разлоге за то истиче густину сетве и архитектуру биљака због чега веома рано долази до преклапања биљака што има негативне последице на учинак модела. Једно од решења могло би бити прикупљање фотографија у ранијим фазама развоја соје али би то према наводима аутора могло произвести грешке које се односе на занемаривање накнадно изниклих биљака и губитке биљака који би се јавили касније током сезоне. Аутор такође истиче једноставност предложеног модела будући да не захтева додатне компликоване трансформације снимака усева чинећи га истовремено прецизним и ефикасним. У другом потпоглављу *Модел за предикцију покривности соје* говори се о могућности коришћења беспилотних летелица и дигиталних камера за олакшано прикупљање података о важном својству биљака као што је покривност. Будући да је модел заснован на процени удела биљних пиксела у оквиру ROI-ја који представљају експерименталне парцеле, избегнута је употреба машинског учења и захтевних математичких алгоритама. Један од кључних сегмената овог модела је правилно

раздвајање биљака од земљишта за шта могу бити коришћени вегетациони индекси у овом случају NDVI. Употреба вегетационих индекса за потребе сегментације од раније је позната о чему говоре и наведени литературни извори који су дискутовани у дисертацији. Поред индекса за правилно елиминисање непотребних шума посебно се истиче значај *threshold* метода који омогућавају добијање бинарне слике са које се коначно издвајају вредности покривности анализираних биљака. Аутор даље говори о појединим изазовима који могу да се јаве током одређивања покривности као што су појава корова, промена осветљења или неправилно постављени ROI. За правилну процену покривности неопходно је свести њихов утицај на што мању меру. У трећем потпоглављу **Модел за предикцију висине биљака соје** аутор дискутује о добијеним резултатима и самом моделу за предикцију висине биљака. Аутор наводи да је прецизност предвиђања висине биљака помоћу елевационих модела која је добијена у оквиру ове докторске дисертације на нивоу других истраживања који су користили сличан приступ. Кандидат посебно истиче да се бољи резултати добијају при коришћењу елевационих модела него активног сензора (LiDAR) и вегетационих индекса при процени висине што је дискутовано поређењем резултата студије у којој је коришћен наведени сензор. Као главне ограничавајуће факторе у примени предложеног модела аутор наводи промену осветљења, присуство корова и полагање главног стабла. Поред тога истиче се значај контролних тачака за добијање прецизних резултата будући да ове тачке осигуравају правилно геореферисање снимака. Четврто потпоглавље се односи на **Модел за предикцију биомасе соје**. У овом потпоглављу истакнут је ефекат коришћења машинског учења и различитих предиктора (покривност, висина биљака и вегетациони индекси) за потребе креирања поузданих модела за предвиђање биомасе соје. На основу добијених резултата RF је показао већу прецизност у односу на PLSR. Поред тога посебно је наглашено да је за добијање прецизних података довољно користити мањи број одговарајућих предиктора односно свега два вегетациона индекса, покривност и висину биљака. Иако је висина означена као најважнија варијабла, аутор наводи да комбиновање различитих предиктора даје боље резултате него употреба појединачних предиктора што потврђују и резултати других студија. Као и код предикције других особина и у овом случају главни изазови могу представљати полагање стабла, присуство корова и промена спектралне рефлексије анализираних парцеле због чега је важно обратити пажњу на ове детаље приликом процене биомасе соје. Применом модела на свима парцелама у оквиру друге фазе истраживања омогућено је сагледавање ефекта услова гајења и групе зрења на акумулирање органске материје анализираних генотипова. У оквиру петог потпоглавља **Модел за предикцију приноса соје** аутор указује на значај модела који омогућава процену приноса током вегетационог периода соје. Модел је заснован на машинском учењу и предикторима које чине вегетациони индекси као и подаци добијени помоћу претходно креираних модела за високопропусну фенотипизацију. Будући да су иницијално коришћена два алгорита RF и PLSR, за нијансу боље резултате остварио је RF. И код овог модела обављена је фазна редукција броја предиктора, све до финалних пет од којих су сви били вегетациони индекси из блиских временских тачака. Добијени резултати показују већу прецизност у односу на податке других истраживања у којима је коришћена слична методологија. Аутор наглашава да предикција приноса соје помоћу предложеног модела зависи од динамике вегетационих индекса будући да је рад модела заснован само на предикторима који се односе на податке спектралне рефлексије. У идеалном случају, одабир високоприносних генотипова могао би бити обављен на основу вредности индекса али је за тако нешто

потребно додатно тестирање модела у бројним другим окружењима на додатном биљном материјалу. У шестом поглављу *Тумачење квантитативних и квалитативних особина соје добијених класичном фенотипизацијом* аутор дискутује о резултатима добијеним анализом биљног материјала након жетве. Двогодишњи резултати су показали да висина прве фертилне нодије (махуне) варира у зависности од групе зрења, при чему су касне сорте имале прву нодију на већој висини у односу на ране сорте, како у условима суше, тако и у контролним условима. Ова појава је потврђена и претходним истраживањима, која су показала да сорте са дужим вегетационим периодом имају прву махуну на већој удаљености од тла. Суша је негативно утицала на све анализиране генотипове смањујући висину прве махуне, а већи пад висине забележен је у 2021. години, када су разлике између контролних и сушних услова биле око 3,5 cm. Развој бочних грана варирао је у зависности од групе зрења. Аутор истиче да су се ране сорте више гранале у односу на касне сорте. Ови резултати су сагласни са претходним истраживањима која су показала да сорте са краћим вегетационим периодом формирају више бочних грана. Суша је углавном утицала на повећање броја бочних грана што је у супротности са неким од претходних истраживања. Кандидат истиче да јаче гранање у неповољним условима може бити последица мањег броја биљака по јединици површине што је стимулисало формирање бочних грана. У погледу броја зрна по биљци, резултати су показали да сорте са дужим вегетационим периодом имају бољи потенцијал за формирање већег броја зрна у поређењу са раним сортама. Суша је негативно утицала на број зрна по биљци при чему је ефекат био израженији код раних у односу на касне генотипове. Добијени резултати у складу са подацима других истраживања. Када је у питању маса зрна по биљци веће вредности овог својства забележене су код касних сорти у односу на ране што је у сагласју са резултатима других аутора. Као и код осталих особина неповољни услови средине одразили су се негативно и на масу зрна по биљци без обзира на групу зрења анализираних генотипова соје. Резултати истраживања су показали да сорте из ранијих група зрења имају већу масу 1000 зрна у поређењу са касним сортама. Поред крупнијег семена аутор истиче да ране сорте боље подносе неповољне услове проузроковане сушом у односу на генотипове са дужим вегетационим периодом. Када је у питању принос зрна, прикупљени подаци су показали да су касне сорте биле продуктивније али и подложније суши у односу на рану гермплазму соје. Ови наводи у складу су са наводима других аутора. Кандидат истиче да један од разлога за већу толерантност раних сорти на неповољне услове средине може бити тај што оне раније пролазе критичне фазе развоја, пре наступања периода са високим температурама и недостатком падавина. Што се тиче хемијског састава зрна, добијени резултати су показали стабилност анализираних генотипова соје. У основи, рани генотипови имали су већи садржај протеина а нижи уља у односу на касне сорте. Кандидат посебно наглашава да је разлика у хемијском саставу више последица групе зрења него услова гајења. Ове наводе потврђују и резултати других студија. Добијени резултати за садржај протеина били су значајно већи у односу на резултате других истраживања која су спроведена на севернијим географским ширинама чиме су потврђене тврдње да процентуални удео протеина у зрну расте идући ка екватору. Последње потпоглавље је *Селекција супериорне гермплазме соје на основу класичне и високопропусне фенотипизације*. Ово потпоглавље говори о могућности коришћења комбинованог приступа традиционалних и савремених техника за одабир супериорних генотипова соје. Аутор истиче да употреба алата за високопропусну фенотипизацију може иницијално захтевати већа улагања али се дугорочно свакако исплати. У наставку кандидат даје осврт

на значај података добијених помоћу високопропусне фенотипизације из више временских тачака те њихов однос са вредностима особина добијених класичном фенотипизацијом. Анализа је показала да је јачина везе између ових особина зависила од развојних фаза у којима су подаци прикупљени. Аутор наводи да је однос између четири квантитативна показатеља (број биљака, покровност, висина и биомаса) добијена помоћу предикционих модела и појединих морфолошких, производних и технолошких особина соје био различит али је ипак у највећем броју случајева установљена одређена повезаност. То указује на потенцијал коришћења дигиталних технологија и машинског учења за рану процену оплемењивачког материјала и избор најбољих генотипова соје. Имајући у виду овај потенцијал, у оквиру ове докторске дисертације је на основу две стратегије обављена селекција супериорних генотипова соје комбинујући податке класичне и високопропусне фенотипизације. Прва стратегија била је усмерена на избор високоприносних генотипова са повољним вредностима особина које су важне за техничког аспект жетве, као што су висина биљака и удаљеност прве махуне од тла. Друга стратегија подразумевала је избор генотипова који су се и у контролним и у сушним условима издвојили на основу технолошког квалитета семена односно садржаја протеина и масе 1000 зрна. Аутор на крају овог потпоглавља истиче да сорте које су издвојене на основу наведених стратегија могу имати велики значај за будуће оплемењивачке програме као елитни генотипови.

Закључци. Резултати истраживања довели су до испуњења циљева постављених у докторској дисертацији и омогућили доношење релевантних закључака. Употреба даљинске детекције и фотограметријске анализе снимака омогућила је креирање поузданих модела за предикцију броја биљака по јединици површине, покровности, висине, биомасе и приноса. Модели креирани на основу одабраних генотипова омогућили су процену особина и осталих генотипова који су анализирани у оквиру истраживања. Робусност модела осигурана је тиме што су модели креирани на основу података из вишегодишњег истраживања у ком је биљни материјал гајен у различитим условима средине. Креирање модела за процену броја биљака по јединици површине засновано је вегетационим индексима, висине на фотограметрији а биомасе на подацима о спектралној рефлексiji, покровности и висини. У моделу за предикцију приноса поред вегетационих индекса коришћени су подаци добијени на основу претходно креираних модела за високопропусну фенотипизацију. Креирани модели показали високо поклапање између предиктованих и стварних вредности особина. Користећи моделе за високопропусну фенотипизацију омогућена је карактеризација великог броја генотипова соје који су анализирани у оквиру овог истраживања. Користећи предиктоване вредности покровности, висине и биомасе из различитих временских тачака омогућено је праћење тока вегетационог периода гермплазме соје која је гајена у различитим условима средине. Поређењем параметара добијених помоћу високопропусне фенотипизације и података добијених класичном фенотипизацијом установљено је постојање одређене везе што говори о потенцијалу савремених технологија за рану карактеризацију селекционог материјала. Имајући ово у виду, на основу добијених резултата и две стратегије од којих је једна била усмерена на висок принос а друга на технолошки квалитет, издвојени су најбољи генотипови соје који би као такви могли бити коришћени у будућим оплемењивачким програмима.

Литература. У дисертацији је наведено 317 литературних извора. Литература је наведена на правилан начин и у потпуности одговара тематици истраживања.

Прилози. У прилогу се налазе: листа скраћеница, вегетациони индекси коришћени приликом креирања модела за високопропусну фенотипизацију соје, списак раних и

касних генотипова соје који су коришћени у другој фази истраживања и подаци о земљиштима који су коришћени у оквиру друге фазе истраживања укључујући механички састав, % органске материје и ретенцију влаге.

5. ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Студија на соји која је спроведена у оквиру ове дисертације представља значајан пионирски подухват у области агрономије и оплемењивања, који је први пут на нашим просторима омогућио детаљну карактеризацију дивергентне гермплазме соје користећи савремене алате и технике. По први пут у Републици Србији праћен је ток вегетационог периода биљака соје путем анализе фотографија прикупљених помоћу беспилотне летелице и дигиталне камере. Добијени резултати истраживања значајно доприносе дубљем разумевању процеса раста и развоја биљака соје, што је кључно за повећање прецизности и ефикасности оплемењивања. Кроз развијене моделе за предикцију квантитативних особина соје, као што су број биљака по јединици површине, висина биљака, покривност, биомаса и принос, ова студија пружа алате који могу помоћи у раној селекцији генотипова са жељеним својствима. Осим практичног значаја, који је истакнут кроз развијене моделе за предикцију кључних квантитативних особина, ова студија пружа значајан увид у потенцијал даљинске детекције и фотограметрије у оплемењивању соје и поставља чврсту основу за даљи развој високопропусне фенотипизације.

6. ОБЈАВЉЕНИ И САОПШТЕНИ РЕЗУЛТАТИ

1. **Randelović Predrag**, Vuk Đorđević, Stanko Milić, Svetlana Balešević-Tubić, Kristina Petrović, Jegor Miladinović, Vojin Đukić. „Prediction of soybean plant density using a machine learning model and vegetation indices extracted from RGB images taken with a UAV“, *Agronomy*, 10(8), 1108, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10081108
2. **Randelović Predrag**, Đorđević Vuk, Miladinović Jegor, Prodanović Slaven, Čeran Marina, Vollmann Johann. „High-throughput phenotyping for non-destructive estimation of soybean fresh biomass using a machine learning model and temporal UAV data“. *Plant Methods*, 19, 89, 2023. DOI: 10.1186/s13007-023-01054-6

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Комисија сматра да докторска дисертација Предрага Д. Ранђеловића, мастер инжењера пољопривреде под насловом „**Развој модела за високопропусну фенотипизацију квантитативних особина у оплемењивачким колекцијама соје**“ представља самостално и оригинално дело аутора. Докторска дисертација је урађена у потпуности у складу са циљем и програмом који су дефинисани у оквиру одобрене пријаве теме. Кандидат је у уводу и прегледу литературе на јасан и детаљан начин анализирао литературу која се односи на тематику докторске дисертације. Након тога истакао је значај квантитативних особина за процес селекције те указао на улогу фенотипизације и могућност коришћења савремених алата и техника даљинске детекције и фотограметрије за унапређење ефикасности оплемењивања. Прегледом литературе образложена је тема докторске дисертације уз јасно дефинисање циљева и програма истраживања. Методе које

су коришћене су савремене, поуздане и у потпуности одговарајуће за спроведену студију. Добијени резултати потврђују постављене хипотезе и циљ истраживања. Они су приказани на детаљан и адекватан начин а у оквиру дискусије је дат осврт на резултате других истраживања. На основу добијених резултата успешно су изведени одговарајући закључци. Будући да на нашим просторима тема ове докторске дисертације до сада није била предмет истраживања, комисија сматра да резултати ове студије поред практичног имају велики значај као основа за даљи рад у области високопропусне фенотипизације. Као главни резултат овог истраживања створени су модели за предикцију важних квантитативних особина соје који могу допринети бољем разумевању процеса који се одвијају током раста и развоја биљака. Они пружају нове могућности за прикупљање података о квантитативним особинама на много бржи, прецизнији и ефикаснији начин у односу на традиционалне методе фенотипизације. Примена креираних модела за високопропусну фенотипизацију у оквиру оплемењивачких програма могла би потенцијално довести до повећања ефикасности и прецизности селекције и на тај начин значајно допринети процесу стварања нових, супериорних сорти соје. Узимајући у обзир све претходно изнето, укључујући добијене резултате њихов обим, практични и научни допринос, Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију Предрага Д. Ранђеловића, мастер инжењера пољопривреде под насловом „**Развој модела за високопропусну фенотипизацију квантитативних особина у оплемењивачким колекцијама соје**“ и предлаже Наставно-научном већу Пољопривредног факултета Универзитета у Београду да прихвати позитивну оцену и тако омогући кандидату јавну одбрану ове докторске дисертације.

Београд – Земун
Датум: 25. 02. 2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Томислав Живановић, редовни професор, председник
Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет
(ужа научна област: Генетика)

др Наташа Милосављевић, ванредни професор, члан
Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет
(ужа научна област: Математика и информатика)

др Марина Ђеран, виши научни сарадник, члан
Институт за Ратарство и повртарство у Новом Саду,
(ужа научна област: Генетика и оплемењивање)

Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације: „**Развој модела за високопропусну фенотипизацију квантитативних особина у оплемењивачким колекцијама соје**“ аутора **Предрага Ранђеловића**, констатујемо да утврђено подударње текста износи 7%. Овај степен подударности последица је библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

У Београду, 25. 02. 2025. године

Ментори

1. др Славен Продановић, редовни професор
Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет
(ужа научна област: Оплемењивање биљака)

2. др Вук Ђорђевић, научни саветник
Институт за Ратарство и повртарство у Новом Саду,
(ужа научна област: Генетика и оплемењивање)