

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

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ненада Бродића

Одлуком Научно-наставног већа Грађевинског факултета у Београду број 140/13-20 од 25.05.2023. именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ненада Бродића, маг. инж. геод, под насловом:

**СЕМАНТИЧКА СЕГМЕНТАЦИЈА ОБЛАКА ТАЧАКА ДОБИЈЕНОГ ЛАСЕРСКИМ
СКЕНИРАЊЕМ ИЗ ВАЗДУХА КОРИШЋЕЊЕМ МЕТОДА МАШИНСКОГ УЧЕЊА**

Наслов дисертације на енглеском језику:

**SEMANTIC SEGMENTATION OF AIRBORNE LASER SCANNING POINT CLOUDS
USING MACHINE LEARNING METHODS**

Комисија у саставу:

1. др Жељко Цвијетиновић, дипл. инж. геод., ванредни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду
2. др Драган Михајловић, дипл. инж. геод., ванредни професор у пензији, Грађевински факултет Универзитета у Београду
3. др Милева Самарџић–Петровић, дипл. инж. геод., ванредни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду
4. др Драган Борота, дипл. инж. шум., доцент, Шумарски факултет Универзитета у Београду
5. др Милутин Миленковић, дипл. инж. геод., истраживач, *International Institute for Applied Systems Analysis – IIASA*

после прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, подноси Научно-наставном већу следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Подаци о процедури пријављивања и предаје дисертације

Кандидат Ненад Бродић је уписао докторске студије на Грађевинском факултету, Универзитета у Београду, школске 2012/2013. године. Јавно излагање предлога теме докторске дисертације одржано је 20.05.2020. године. Комисија у саставу в. проф. др Жељко Цвијетиновић, дипл. инж. геод, в. проф. др Драган Михајловић, дипл. инж. геод, и доц. др Милева Самарџић-Петровић, дипл. инж. геод. прихватила је предложену тему.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета бр. 140/5 од 29.06.2020. године, одређена је Комисија за оцену научне заснованости и пријем теме докторске дисертације под насловом „Семантичка сегментација облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем метода машинског учења“ (на енглеском језику „*Semantic segmentation of airborne laser scanning point clouds using machine learning methods*“) у саставу в. проф. др Жељко Цвијетиновић, дипл. инж. геод., в. проф. др Драган Михајловић, дипл. инж. геод., доц. др Милева Самарџић-Петровић, дипл. инж. геод., доц. др Милутин Пејовић, дипл. инж. геод. и др Милутин Миленковић, дипл. инж. геод. (Универзитет у Вахенингену, Лабораторија за геоинформатичке науке и даљинску детекцију). Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости и пријем теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 16.07.2020. године (одлука бр. 140/7 од 17.07.2020. године). Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 01.09.2020. године (одлука бр. 61206-2470/2-20 од 01.09.2020. године) усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидата Ненада Бродића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 17.05.2023. године. Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду донетој на седници одржаној 25.05.2023. (одлука бр. 140/13-20 од 25.05.2023.), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ненада Бродића.

1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области *Геодезија* и ужим научним областима *Геодетски премер* и *Геоинформатика* (по старој класификацији: *Фотограметрија* и *даљинска детекција* и *Земљишни информациони системи*), које су дефинисане Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

За ментора дисертације одређен је др Жељко Цвијетиновић, дипл. инж. геод., ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду који испуњава важеће критеријуме Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ненад Бродић рођен је 19.09.1988. године у Шапцу, Република Србија. Основну школу „Јанко Веселиновић“ у Црној Бари завршио је 2003. године, а затим је похађао Геодетску техничку школу у Београду коју је завршио 2007. године. У току основног и средњег образовања био је одличан ученик и носилац је Вукове дипломе.

Основне академске студије Грађевинског факултета Универзитета у Београду, студијски програм Геодезија, уписао је 2007. године а завршио 2010. године са просечном оценом 9.83. Исте године, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је мастер академске студије, студијски програм Геодезија, модул Геоинформатика. Мастер академске студије успешно је завршио 2012. године са просечном оценом 10.00. За успехе постигнуте током основних академских студија додељена му је награда „Студент генерације“ Грађевинског факултета Универзитета у Београду за школску 2010/2011. годину.

Школске 2012/2013. године уписао је докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду – студијски програм Геодезија и геоинформатика.

Од 2010. до 2012. био је ангажован на Грађевинском факултету Универзитета у Београду као студент демонстратор. Од 2013. до 2019. био је запослен на Грађевинском факултету Универзитета у Београду као асистент – студент докторских студија.

Од 2015. године био је ангажован у организацији два Еразмус+ програма за подизање капацитета у високом образовању: „*Modernising geodesy education in Western Balkan with*

focus on competences and learning outcomes (GEOWEB)“ и *„Business driven problem–based learning for academic excellence in geoinformatics (GEOBIZ)*“. Један је од коаутора Практикума из геоинформатике за студенте основних академских студија геодезије и геоинформатике.

Од 2019. године ангажован је као истраживач на пројекту Министарства науке, просвете и технолошког развоја ев. бр. TP36009: *„Примена GNSS и LiDAR технологије у мониторингу стабилности инфраструктурних објеката и терена”*.

До сада је, као аутор или коаутор, објавио бројне стручне и научноистраживачке радове у страним и домаћим научним часописима и међународним научним конференцијама из области геоинформатике, фотограметрије и даљинске детекције. Носилац је бројних награда и добитник је великог броја стипендија током свог школовања. Присуствовао је бројним радионицама, курсевима и летњим школама које су биле релевантне и корисне за област истраживања за коју се определио.

Поседује одлично знање енглеског и основно знање немачког језика. Ожењен је и отац двоје деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Ненада Бродића под насловом *„Семантичка сегментација облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем метода машинског учења”* садржи укупно 224 стране, од којих је основни текст са списком цитиране литературе и прилозима дат на 186 страна (155 страна без прилога, 138 страна без списка цитиране литературе и прилога). Дисертација је написана на српском језику и подељена је у седам поглавља:

1. Увод
2. Преглед и анализа досадашњих истраживања
3. Теоријске основе
4. Расположиви скупови података ласерског скенирања
5. Експериментални део
6. Дискусија
7. Закључна разматрања

Поред ових поглавља, дисертација садржи и списак цитиране литературе и прилоге. Дисертација садржи 65 слика на којима су приказани дијаграми, карте и цртежи који су релевантни за илустрацију текста, као и 48 табела. Списак цитиране литературе садржи 200 наслова. На почетку дисертације дат је резиме на српском и енглеском језику са кључним речима. Биографија кандидата дата је на крају дисертације.

Дисертација је технички обликована у складу са упутствима Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије доктората. Садржи обавезна поглавља и обрасце: изјава о ауторству, изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Као што је већ речено, основни текст разматране докторске дисертације има седам поглавља, након којих је дат списак коришћене литературе и прилози.

У првом уводном поглављу дисертације представљена је мотивација за истраживање проблема семантичке сегментације облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем техника машинског учења. Представљени су семантичка сегментација облака тачака и детекција појединачних стабала на основу података ласерског скенирања из ваздуха, а посебно основни проблеми који се при томе јављају и приступи за њихово превазилажење. Дефинисан је предмет научног истраживања, при чему су идентификована питања и проблеми за која је у оквиру истраживања требало наћи одговарајуће одговоре и решења. На основу тога, специфицирани су и представљени циљеви истраживања, као и приступ који је у дисертацији коришћен за остваривање постављених циљева. Уводно поглавље се завршава кратким описом структуре дисертације.

Друго поглавље дисертације садржи преглед и анализу досадашњих истраживања релевантних за предмет истраживања докторске дисертације. Када је реч о семантичкој сегментацији облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха, посебно је обрађен статус тренутних истраживања у којима су коришћене традиционалне методе машинског учења. Такође, представљен је и статус истраживања која се односе на методе детекције појединачних стабала и делинеације крошњи стабала у шумским подручјима на основу облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. У оквиру овог поглавља наведен је значајан број научних радова у којима су публиковани резултати релевантних научних истраживања.

У трећем поглављу дисертације дате су релевантне теоријске основе. У првом делу овог поглавља представљене су методе машинског учења које су коришћене у оквиру истраживања за семантичку сегментацију облака тачака и детекцију појединачних стабала и делинеацију крошњи стабала у шумским подручјима: вештачке неуронске мреже, метода потпорних вектора, логистичка регресија, наивни Бајесов класификатор, стабло одлучивања, као и ансамбл методе машинског учења: случајна шума и екстремно насумична стабла, градијентно појачавање и екстремно појачавање градијента и методе слагања модела (енгл. *model stacking*). Представљена је и методологија која се користи за семантичку сегментацију облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. Посебно су анализирани проблеми и решења који се односе на: дефинисање суседства код одређивања атрибута за класификацију; екстракцију атрибута; метод селекције атрибута коришћењем генетских алгоритама и рекурзивном елиминацијом атрибута; узорковање тренинг података у смислу смањивања количине тренинг података; просторну регуларизацију резултата семантичке сегментације облака тачака и методе машинског учења које се користе за семантичку сегментацију облака тачака. У наставку поглавља представљена је методологија за побољшање резултата детекције појединачних стабала на основу облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. Описане су процедуре за: генерисање *CHM*-а (енгл. *Canopy Height Model*, висински модел крошњи), екстракцију атрибута релевантних за детекцију врхова стабала, балансирање скупа података према класама и означавање *LM*-а (енгл. *Local Maxima*, локални максимуми) који су класификовани као врхови крошњи стабала. На крају поглавља представљене су технике за оцену тачности класификације, тј. квантитативне мере за оцену перформанси добијених модела класификације.

У четвртом поглављу дисертације дат је преглед неколико јавно доступних скупова података преваасходно намењених за такмичења у семантичкој сегментацији облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. Ови скупови података се разликују у величини подручја које је снимано, густини облака тачака и заступљеним класама тачака које припадају различитим типовима објеката на том подручју. Такође су описани и референтни скупови података ласерског скенирања који обухватају искључиво шумска подручја и намењени су за детекцију појединачних стабала. Мотив за коришћење наведених референтних скупова података у оквиру овог истраживања је објективна верификација резултата семантичке сегментације облака тачака и детекције појединачних стабала, тј. поређење тих резултата са резултатима који су остварени у оквиру других

релевантних истраживања. Разматрани су сви значајнији скупови података за које је процењено да могу бити релевантни за истраживања спроведена у оквиру израде ове дисертације, али су на крају само неки од ових скупова и искоришћени у оквиру експерименталног дела рада. Реч је о подацима фотограметријског снимања и ласерског скенирања из ваздуха публикованим од стране Међународног друштва за фотограметрију и даљинску детекцију (енгл. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ISPRS*) и подацима ласерског скенирања из ваздуха које је публиковало Удружење за геонауку и даљинску детекцију (енгл. *The Geoscience and Remote Sensing Society – GRSS*) Института инжењера електротехнике и електронике (енгл. *Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE*). На крају поглавља је представљен и скуп података формиран посебно за потребе истраживања проблема детекције појединачних стабала реализованог у оквиру ове дисертације.

У петом поглављу је представљен експериментални део дисертације. Описана је реализација пет експеримената којима су покривени сви дефинисани циљеви истраживања. Први експеримент се односи на екстракцију атрибута тачака који се користе као предиктори приликом семантичке сегментације *ISPRS* облака тачака. Тестирана су два начина претраге суседства са различитим полупречницима претраге, као и вишеразмерни приступ где се истовремено користи више полупречника претраге суседства. У другом експерименту је вршена семантичка сегментација *ISPRS* облака тачака и у оквиру њега је истраживан проблем одређивања оптималних хиперпараметара модела за различите технике машинског учења. Испитивана је важност појединих атрибута и вршена селекција најважнијих атрибута код оних комбинација атрибута које су дале најбоље резултате семантичке сегментације коришћењем четири традиционалне методе машинског учења. Такође је извршено и поређење резултата семантичке сегментације када је вршено балансирање података према класама и анализа повећања тачности која се добија просторном регуларизацијом ознака класа. Циљ трећег експеримента у оквиру ког је такође коришћен *ISPRS* скуп података је био да се утврди који је то оптимални узорак тренинг података, тј. да се провери да ли се редукцијом података добијају значајно лошији резултати на уштрб скраћења времена тренирања модела. У оквиру четвртог експеримента вршена је семантичка сегментација *GRSS* облака тачака као и испитивање универзалности истренираног модела. Конкретно, вршена је семантичка сегментација *ISPRS* облака тачака коришћењем модела који је истрениран коришћењем *GRSS* облака тачака. Пети експеримент је посвећен проблему побољшања резултата детекције појединачних стабала у шумским подручјима коришћењем метода машинског учења. Испитиван је ефекат балансирања података према класама и селекције најважнијих атрибута коришћењем генетских алгоритама, као и важност појединих атрибута за класификацију. У овом делу је тестирано неколико метода машинског учења, извршено фино одређивање оптималних параметара модела и представљени резултати добијени коришћењем различитих метода.

Шесто поглавље је посвећено дискусији резултата остварених у оквиру експерименталног дела рада. Дискусија резултата је извршена по целинама које у потпуности прате редослед представљања пет експеримената у петом поглављу. Резултати експеримената су анализирани у складу са дефинисаним циљевима истраживања: избор оптималног суседства и екстракција атрибута за класификацију; избор оптималног скупа атрибута; ефекти узорковања тренинг података, тј. утицаја смањивања количине тренинг података на резултате семантичке сегментације облака тачака; ефекти балансирања података према класама и анализа повећања тачности семантичке сегментације која се добија просторном регуларизацијом ознака класа; избор оптималне методе машинског учења за семантичку сегментацију облака тачака; применљивост модела истренираног над једним скупом података за сегментацију другог скупа података; упоредна анализа резултата семантичке сегментације добијених у оквиру израде докторске дисертације и публикованих резултата других истраживања над истим референтним подацима; ефекти побољшања резултата детекције појединачних стабала и стратегија и процедура које при томе треба користити (процедуре за припрему података, ефекти балансирања класа, избор методе машинског учења, избор атрибута), квалитет резултата класификације, тј. детекције

појединачних стабала у зависности од типа шуме и упоредна анализа добијених резултата са резултатима добијеним у оквиру других референтних истраживања.

У седмом поглављу су на основу дискусије из шестог поглавља изведени најважнији закључци у складу са дефинисаним циљевима истраживања. У наставку поглавља дате су и одговарајуће смернице и препоруке за даља истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Након обраде сирових података, ласерским скенирањем из ваздуха добија се густ геореференцирани 3Д облак тачака које се односе на површ терена и објекте и појаве на тој површи. С обзиром да се савременим ласерским скенерима прикупља више стотина хиљада тачака, а често и милион и више тачака у секунди, тај облак тачака најчешће се састоји из изузетно велике количине тачака са тродимензионалним координатама и пратећим атрибутима. Врста и број тих атрибута зависи од карактеристика скенера, природе простирања сигнала кроз медијум, а такође се, на основу суседства тачке, могу одредити и различити геометријски атрибути тачака. Кључни проблем код обраде таквих података је екстракција релевантних информација из самог облака тачака. Наиме, многе информације су у том облаку тачака само имплицитно представљене. Тачке из облака су мање-више независне и неопходно је да се изврши класификација наведених тачака у зависности од тога од којих појава се ласерски сигнал одбио (терен, зграде, ниска и висока вегетација, надземни водови, и слично). Ово груписање тачака са сличним атрибутима у виду кластера који имају одређеног смисла назива се семантичка сегментација облака тачака. Овај корак је неопходан да би се добили производи као што су дигитални модел терена или 3Д модел објеката (зграде, далеководи, и слично). Један од специфичних и актуелних проблема, када је реч о семантичкој сегментацији облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха, је детекција појединачних стабала и делинеација крошњи стабала у шумским подручјима на основу тог облака тачака. Тиме се из облака тачака добијају експлицитне информације које се односе на појединачна стабла у шумским подручјима, а које су изузетно корисне за примене у шумарству и тачнију процену количине складиштене биомасе и угљеника у дрвећу – есенцијалних информација за праћење климатских промена.

Кључни проблем код семантичке сегментације облака тачака је што се ради о изузетно великој количини података, па је неопходно коришћење високог степена аутоматизације целог процеса сегментације. Све грешке настале током тог процеса морају се накнадно исправити, најчешће применом мануелних метода рада. То онда захтева утрошак значајних ресурса, пре свега у погледу људства и времена за обраду података. Због тога и мања побољшања резултата сегментације могу резултирати значајним уштедама у трошковима обраде података.

Постоји велики број метода развијених за потребе семантичке сегментације облака тачака. Већина успешних метода базира се на томе да се прво изврши филтрирање тачака које припадају површи терена. Након тога се врши даља класификација тачака које не припадају терену на тачке које се односе на зграде, вегетацију, надземне водове и друго. Савремена истраживања која се баве семантичком сегментацијом облака тачака најчешће се заснивају на надзираним методама учења. Предмет научних истраживања су најчешће традиционалне методе машинског учења, али квалитет резултата (тачности) сегментације облака тачака која се постиже овим методама је и даље далеко од жељене. Новија истраживања су показала да се најбољи резултати у погледу тачност семантичке сегментације облака тачака остварују коришћењем метода дубоког учења (неуронске мреже са великим бројем скривених слојева). Међутим, методе дубоког учења захтевају

велике количине тренинг података (тачака са информацијом о припадности одређеној класи), што најчешће захтева пуно мануелног рада за припрему тих података. Поред тога, с обзиром да се ради о великој количини тренинг података, тренирање неуронских мрежа је и процесорски веома захтевно, што изискује додатне рачунарске ресурсе. Проблем представља и то што су неуронске мреже генерално тешке за интерпретацију. Све у свему, главни проблеми који се јављају код семантичке сегментације облака тачака су: недостатак расположивих скупова података за тренирање и тестирање алгоритама, велики хардверски захтеви за процесирање података и неефикасност предложених метода у погледу постигнуте тачности и брзине извршавања. Зато се у практичним применама још увек често користе решења која нису заснована на техникама машинског учења.

Због свега наведеног, научна истраживања која се односе на даља унапређења семантичке сегментације облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха, а која се базирају на коришћењу техника машинског учења (традиционалних техника, ансамбл техника и техника дубоког учења) и даље су врло актуелна, што потврђује и велики број истраживања реализованих у последњих неколико година на која се кандидат позива у тексту дисертације.

У дисертацији је истраживана примена техника машинског учења код сегментације облака тачака, а посебно су тражени одговарајућа решења и одговори на велики број врло актуелних питања кључних за постизање високе тачности сегментације: избор оптималног суседства и екстракција атрибута за класификацију; избор оптималног скупа атрибута; ефекти узорковања тренинг података, тј. могућност редукције количине тренинг података, а да се тиме значајно не смањи тачност семантичке сегментације облака тачака; ефекти балансирања података према класама и анализа повећања тачности сегментације која се добија просторном регуларизацијом ознака класа; избор оптималне методе машинског учења за семантичку сегментацију облака тачака (традиционалне и ансамбл технике машинског учења); применљивост модела истренираног над једним скупом података за сегментацију другог скупа података.

Анализом је у истраживању обухваћен знатно већи скуп атрибута за класификацију него што је то случај у другим истраживањима са сличном тематиком.

Истраживањем је обухваћен и специфичан проблем код сегментације облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха, а који се односи на детекције појединачних стабала и делинеацију крошњи стабала у шумским подручјима на основу облака тачака. Овај проблем је врло актуелан и његово решење подразумева избор одговарајуће стратегије и процедура: процедуре за припрему података, начин балансирања класа, избор методе машинског учења, избор атрибута и сл. И овде је, дакле, потребно наћи одговоре на слична питања која су наведена у претходном параграфу.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру дисертације цитирано је укупно 200 библиографских јединица, од чега се 117/200 (58%) односи на библиографске јединице током и после 2012. године, односно 48/200 (24%) су библиографске јединице не старије од пет година. Кандидат је кроз преглед литературе обухватио најважније ауторе и публикације из области фотограметрије и даљинске детекције, класификације и машинског учења. Значајан број референци сачињавају радови објављени у врхунским међународним часописима као што су: *Remote Sensing of Environment*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *Remote Sensing*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, и др., као и на бројним међународним конференцијама.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Рад у дисертацији је реализован паралелном применом теоријског приступа ослоњеног на информације које су прикупљене из коришћене литературе и практичног приступа заснованог на сопственом експерименталном истраживању.

За сагледавање постојећих сазнања из предметне области извршена је синтеза досадашњих истраживања применом структурално-функционалне и компаративне анализе постојећих метода семантичке сегментације облака тачака и метода за детекцију појединачних стабала у шумским подручјима. Ове методе су анализирани у погледу коришћених приступа, али и у погледу тачности и ефикасности резултата класификације. За планирање експерименталног истраживања, анализу добијених резултата и извођење одговарајућих закључака примењена је хипотетичко-дедуктивна метода.

Експериментални део истраживања односи се на обраду великог броја скупова података добијених ласерским скенирањем из ваздуха. Коришћењем техника машинског учења формирано је и тестирано више класификационих модела, при чему је посебна пажња посвећена оцени квалитета резултата класификације. Приликом анализе и валидације резултата експериментално коришћене су компаративне и статистичке методе испитивања. Статистичком анализом је извршено поређење и интерпретација резултата добијених применом формираних класификационих модела ради компаративне анализе различитих аспеката предложених процедура за семантичку сегментацију облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. У оквиру експерименталног дела рада вршена је и обрада расположивих скупова података коришћењем комбинације више техника машинског учења и анализирани су ефекти у погледу остварене тачности. Статистичка анализа је такође коришћена и за упоредну анализу резултата добијених применом предложених процедура и резултата остварених у оквиру других релевантних научних истраживања. Исте научне методе коришћене су и за развој оптималних процедура за детекцију појединачних стабала и делинеацију крошњи стабала у шумским подручјима.

Примењене методе научног истраживања су потпуно валидне и адекватне за предмет истраживања и у складу су са тренутном научном праксом у овој области.

3.4. Применљивост остварених резултата

Применљивост резултата истраживања који су добијени током израде ове дисертације је вишеструка. Закључци који се односе на различите аспекте процедура за семантичку сегментацију облака тачака и процедура за детекцију појединачних стабала у шумским подручјима могу се успешно искористити у оквиру будућих научних истраживања која имају за циљ даље унапређење ових процедура. Кандидат је у оквиру дисертације дао препоруке за избор оптималних параметара код развоја и имплементације ових процедура. Текст дисертације омогућава идентификацију свих неопходних информација како би изведене препоруке биле успешно примењене.

Методологија и процедуре које су развијене током израде докторске дисертације могу се ефикасно применити у практичним применама за извођење семантичке сегментације облака тачака и за побољшање детекције појединачних стабала у шумским подручјима. Као што је то већ речено, кључни проблем код семантичке сегментације облака тачака је у томе што се ради о изузетно великој количини података, па је неопходно коришћење високог степена аутоматизације целог процеса сегментације. Коришћење методологије и процедура развијених током израде докторске дисертације, али и закључака који се односе на различите аспекте (припрема података, избор и одређивање атрибута за класификацију, коришћење предложених метода машинског учења, и сл.) могу у практичним применама резултирати значајним уштедама у погледу трошкова обраде података добијених ласерским скенирањем из ваздуха.

Предложене процедуре су верификоване кроз примену над референтним скуповима и добијени су задовољавајући резултати. Добијени резултати указују да се те процедуре могу успешно применити и на друге скупове података, уз евентуална прилагођавања.

Процедуре које су имплементирани у виду одговарајућих софтверских решења могу такође бити врло корисне за примене у будућим истраживањима која се односе на семантичку сегментацију облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха.

3.5. Оцена достигнути способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат се у оквиру израде своје докторске дисертације бавио изучавањем и критичком анализом доступне релевантне литературе, планирањем, спровођењем, обрадом и анализом резултата експерименталног истраживања. Систематичним приступом постављеном проблему, повезујући различите сегменте научно-истраживачког рада, кандидат Ненад Бродић је успешно решио постављене задатке и дао оригиналне научне и практичне доприносе у предметној области истраживања кроз публикацију резултата овог и других повезаних истраживања у врхунским међународним часописима. Све наведено потврђује да кандидат поседује способности за самостално бављење научно-истраживачким радом.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација Ненада Бродића под насловом „*Семантичка сегментација облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем метода машинског учења*“ представља вредан научни допринос у областима геоинформатике, фотограметрије и даљинске детекције. Вредност истраживања приказаног у дисертацији огледа се у обезбеђењу следећих научних доприноса:

1. Анализа утицаја балансирања тренинг података по класама на тачност класификације код семантичке сегментације облака тачака.
2. Анализа значаја појединих атрибута на тачност код семантичке сегментације облака тачака. Посебна пажња је посвећена оптимизацији параметара који се односе на избор суседства тачака на основу којих се врши прорачун поменутих атрибута. Анализирани су ефекти коришћења различитих комбинација атрибута за класификацију, као и ефекат избора атрибута коришћењем рекурзивне елиминације атрибута или генетских алгоритама.
3. Избор оптималних метода машинског учења за потребе сегментације облака.
4. Анализа утицаја редукције тренинг података узорковањем података на тачност семантичке сегментације.
5. Анализа универзалности модела класификације, тј. могућности коришћења модела који су добијени тренирањем над једним скупом података за семантичку сегментацију облака тачака из других скупова података.
6. Развој процедура за семантичку сегментацију облака тачака које се успешно могу користити у будућим научним истраживањима или практичним применама.
7. Развој методологије и процедура за побољшање детекције појединачних стабала у шумским подручјима заснованих на методи случајне шуме.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад кандидата Ненада Бродића, маг. инж. геод. имао је за циљ да се истраже бројни аспекти примене техника машинског учења за сегментацију облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. Већ у уводном делу рада наглашено је да најновија истраживања указују да се најбољи резултати у погледу тачности сегментације постижу коришћењем техника дубоког учења. Међутим, констатовано је и да се код примене тих техника у практичним условима јављају озбиљни проблеми који се првенствено односе на захтеве у погледу велике количине тренинг података и значајних рачунарских ресурса за процесирање података. Зато је у овом истраживању фокус био усмерен на традиционалне технике машинског учења, али и на ансамбл методе које комбинују више техника машинског учења. Поред тога, коришћење ових техника омогућава бољу интерпретацију добијеног модела машинског учења, што није случај код метода дубоког учења. То омогућава бољи увид у значај појединих атрибута и ефекат који они и начин њиховог одређивања имају на квалитет модела класификације, тј. на тачност сегментације облака тачака.

Оригинална истраживања која су осмишљена и спроведена у оквиру дисертације омогућила су добијање одговора на велики број врло актуелних питања кључних за ефикасну и високо квалитетну семантичку сегментацију облака тачака: начин избора оптималног суседства и екстракција атрибута за класификацију; начин избора оптималног скупа атрибута; ефекти узорковања тренинг података, тј. могућност редукције количине тренинг података, а да се тиме значајно не смањи тачност семантичке сегментације облака тачака; ефекти балансирања података према класама и анализа повећања тачности сегментације која се добија просторном регуларизацијом ознака класа; избор оптималне методе машинског учења за семантичку сегментацију облака тачака (традиционалне и ансамбл технике машинског учења); применљивост модела истренираног над једним скупом података за сегментацију другог скупа података; упоредна анализа резултата семантичке сегментације добијених коришћењем методологије развијене у оквиру овог истраживања и резултата добијених у оквиру других истраживања; ефекти побољшања резултата детекције појединачних стабала и стратегија и процедура које при томе треба користити (процедуре за припрему података, ефекти балансирања класа, избор методе машинског учења, избор атрибута), квалитет резултата класификације, тј. детекције појединачних стабала у зависности од типа шуме и упоредна анализа добијених резултата са резултатима добијеним у оквиру других референтних истраживања.

У оквиру истраживања осмишљени су и реализовани опсежни експерименти у оквиру којих су коришћени релевантни скупови података, при чему се кандидат фокусирао на актуелне међународне податке које омогућавају независну валидацију резултата на основу поређења тих резултата и резултата других истраживања, што не би било могуће са масовним скуповима података. Зато развијене процедуре нису примењиване за обраду података које се односе на подручја целих градова или региона. То су веома рачунарски захтевне процедуре које долазе са другачијим проблемима који превазилазе дефинисане циљеве докторске дисертације и захтевају посебно истраживање.

На основу резултата тих експеримената изведени су врло корисни закључци и добијени су одговори на већину питања наведених у претходном параграфу. Овим је истраживачима и стручњацима из праксе омогућен далеко бољи увид у деловање различитих механизма семантичке сегментације облака тачака на тачност сегментације. Ово се посебно односи на то како треба вршити избор оптималног суседства и екстракцију атрибута за класификацију, како селекувати скуп најважнијих атрибута и како све то утиче на тачност сегментације. Наравно, врло су вредна и запажања у погледу тачности семантичке сегментације која се постиже коришћењем различитих техника машинског учења.

Значај и вредност резултата истраживања је и у томе што су у дисертацији дефинисане и одговарајуће препоруке и оптималне процедуре за семантичку сегментацију облака тачака, али и за побољшање детекције појединачних стабала у шумским подручјима.

У овом истраживању је испробано значајно више атрибута него у другим радовима са сличном тематиком, те је стога добијено да предложени модел даје боље резултате семантичке сегментације у односу на друге студије које су користиле исте референтне податке.

Утврђено је да је утицај балансирања података код примена техника машинског учења за побољшање детекције појединачних стабала на основу облака тачака значајан, док је тај утицај на семантичку сегментацију облака тачака незнатан.

Коришћењем развијених процедура остварена је већа тачност семантичке сегментације у односу на већину резултата публикованих у другим истраживањима. Утврђено је и да се елиминацијом атрибута са високом међусобном корелацијом и рекурзивном елиминацијом атрибута не снижава значајно тачност семантичке сегментације, али се драстично смањује време тренирања модела машинског учења и предикције. Закључено је да је најбоље решење да се користи вишеразмерна комбинација атрибута, али да при томе треба извршити избор најважнијих атрибута и са њима вршити тренирање модела за семантичку сегментацију облака тачака.

Резултати указују да се највиша тачност семантичке сегментације облака тачака постиже коришћењем сложеног ансамбл модела базираног на наивном Бајесу. Наведени модел је конструисан на основу модела случајне шуме, градијентног појачавања и логистичке регресије. У закључцима дисертације дат је и велики број запажања и препорука када је реч о коришћењу различитих метода машинског учења за семантичку сегментацију облака тачака. Утврђено је да је тачност сегментације која се добија традиционалним методама машинског учења, чак и са коришћењем ансамбл техника, и даље нижа од оне која се постиже техникама дубоког учења.

Закључено је да је и даље тешко постићи универзалност модела машинског учења. Утврђено је да је један од главних проблема усклађивање класа између различитих скупова података, али и одабир репрезентативних делова скупа података којим се могао истренирати оптималан модел.

Посебно је значајно то што су у оквиру експеримената углавном коришћени референтни скупови података, што је омогућило објективну верификацију предложених процедура и поступака поређењем добијених резултата са резултатима добијеним у оквиру других релевантних истраживања. Развијене процедуре су верификоване тако што је њиховим коришћењем над референтним скуповима података остварена тачност семантичке сегментације облака тачака која је у већини случајева већа од тачности остварене у оквиру других публикованих истраживања где су коришћене традиционалне технике машинског учења. Нешто бољи резултати добијени су у радовима где су коришћене традиционалне методе машинског учења, али код којих је извршено уношење контекстуалних информација у класификационе моделе. Значајно бољи резултати су добијени само у истраживањима у којима су коришћене технике дубоког учења, за које је већ речено да захтевају велику количину тренинг података и значајне рачунарске ресурсе за процесирање, па њихова примена у практичним применама може бити проблематична.

Резултати побољшања детекције појединачних стабала у шумским подручјима добијени коришћењем развијене методологије и процедура потврђују да је и овај део истраживања успешно реализован. Иновативност ове методологије се посебно огледа у унапређењу успешности класификације са балансирањем података према класама *ADASYN* алгоритмом.

У закључном поглављу дисертације јасно је направљен преглед постигнутих научних доприноса у виду закључака и препорука који се односе на бројне аспекте примене техника машинског учења код сегментације облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха. Такође је направљен и критички осврт на нерешене проблеме и отворена питања који могу бити предмет даљих истраживања.

Добијени резултати јасно показују научни и практични допринос ове дисертације и дају одличну основу и мотивацију за будућа истраживања.

4.3. Верификација научних доприноса

У току израде дисертације, Ненад Бродић је резултате свог истраживања објавио у радовима публикованим у врхунским међународном часописима (M21) и раду саопштеном на међународном научном скупу (M34).

Категорија M21:

1. **Brodić, N.**, Cvijetinović, Ž., Milenković, M., Kovačević, J., Stančić, N., Mitrović, M., Mihajlović, D., 2022. Refinement of Individual Tree Detection Results Obtained from Airborne Laser Scanning Data for a Mixed Natural Forest. *Remote Sensing* 14, 5345; DOI: 10.3390/rs14215345
2. Kovačević, J., Cvijetinović, Ž., Lakušić, D., Kuzmanović, N., Šinžar-Sekulić, J., Mitrović, M., Stančić, N., **Brodić, N.**, Mihajlović, D. (2020): Spatio-Temporal Classification Framework for Mapping Woody Vegetation from Multi-Temporal Sentinel-2 Imagery, *Remote Sensing*. 12 (17), 2845; DOI: 10.3390/rs12172845

Категорија M34:

1. **Brodić, N.**, Cvijetinović, Ž., Milenković, M., Dorninger, P., Mitrović, M. (2014). „Airborne Laser Scanning (ALS) point cloud ground filtering for area of an active landslide (Doren, Western Austria)“: European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2014, Vol.16, EGU2014-15341-5, 2014, Веč, Austrija, 27.04. – 02.05.2014.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру докторске дисертације Ненада Бродића, маг. инж. геод. дат је значајан допринос у области обраде података ласерског скенирања из ваздуха, која је актуелна не само за области геоинформатике, фотограмetriје и даљинске детекције, већ и за друге научне дисциплине. Истраживање је фокусирано на решавање проблема семантичке сегментације облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем техника машинског учења. Испитивани су ефекти које припрема тренинг података, начин одређивања и селекција атрибута за класификацију, као и избор методе машинског учења имају на тачност семантичке сегментације, као и на детекцију појединачних стабала у шумским подручјима на основу облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха, што представља специфичан проблем код сегментације облака тачака. На основу опсежне анализе добијених резултата изведени су корисни закључци и добијени одговори на постављена питања, што је омогућило и дефинисање и развој методологије и процедура за семантичку сегментацију облака тачака и делинеацију крошњи и детекцију појединачних стабала на основу облака тачака. С обзиром да су експерименти углавном реализовани коришћењем референтних скупова података који су коришћени и у оквиру других истраживања, поређењем добијених резултата обезбеђена је објективна верификација резултата истраживања.

Резултати спроведених експерименталних истраживања и изведени закључци, као и развијена методологија и процедуре за семантичку сегментацију облака тачака, представљају оригиналан научни и стручни допринос у областима геоинформатике, фотограмetriје и даљинске детекције. Резултати истраживања имају практичну примену и могу да послуже као основа за даља истраживања у овој области. Комисија сматра да докторска дисертација има све неопходне елементе и да задовољава све захтеване

критеријуме, као и да је кандидат показао способност за самосталан научно-истраживачки рад у свим фазама израде ове дисертације.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Семантичка сегментација облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем метода машинског учења“ (на енглеском језику „*Semantic segmentation of airborne laser scanning point clouds using machine learning methods*“) кандидата Ненада Бродића, маг. инж. геод. изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду ради давања сагласности за њену јавну одбрану.

У Београду, 26.05.2023. године

Чланови комисије:

Др Жељко Цвијетиновић, дипл. инж. геод., ванредни професор,
Грађевински факултет Универзитета у Београду

Др Драган Михајловић, дипл. инж. геод., ванредни професор у пензији,
Грађевински факултет Универзитета у Београду

Др Милева Самарџић-Петровић, дипл. инж. геод., ванредни професор,
Грађевински факултет Универзитета у Београду

Др Драган Борота, дипл. инж. шум., доцент,
Шумарски факултет Универзитета у Београду

Др Милутин Миленковић, дипл. инж. геод., истраживач,
International Institute for Applied Systems Analysis – IIASA