

**НАУЧНО НАСТАВНОМ ВЕЋУ
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Одлуком Научно-наставног већа Грађевинског факултета у Београду број 244/14-19 од 26.01.2021. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александра Секулића, маг. инж. геод., под насловом:

**SPATIO-TEMPORAL INTERPOLATION OF CLIMATE ELEMENTS USING
GEOSTATISTICS AND MACHINE LEARNING**

Наслов дисертације на српском језику:

**ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКА ИНТЕРПОЛАЦИЈА КЛИМАТСКИХ ЕЛЕМЕНАТА
ПРИМЕНОМ ГЕОСТАТИСТИКЕ И МАШИНСКОГ УЧЕЊА**

Комисија у саставу:

1. В. проф. др Милан Килибарда, дипл. инж. геод., Универзитет у Београду, Грађевински факултет;
2. Проф. др Бранислав Бајат, дипл. инж. геод., Универзитет у Београду, Грађевински факултет;
3. В. проф. др Јелена Луковић, дипл. геогр., Универзитет у Београду, Географски факултет;
4. Доц. др Милутин Пејовић, дипл. инж. геод., Универзитет у Београду, Грађевински факултет;
5. Доц. др Младен Николић, дипл. мат., Универзитет у Београду, Математички факултет;

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Подаци о процедури пријављивања и предаје дисертације

Кандидат Александар Секулић, маг. инж. геод. је уписао докторске студије на Грађевинском факултету, Универзитета у Београду, школске 2014/2015 године. Приступни рад је одбранио 16.07.2019. године. Кандидат је 06.11.2019. године пријавио тему докторске дисертације.

На седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду одржаној 14.11.2019. године (одлука бр. 244/6 од 20.11.2019. године) одређена је Комисија за оцену научне заснованости и пријем теме докторске дисертације под насловом „Spatio-temporal interpolation of climate elements using geostatistics and machine learning“ (на српском „Просторно-временска интерполација климатских елемената применом геостатистике и машинског учења“) у саставу в. проф. др Милан Килибарда, проф. др Бранислав Бајат и в. проф. др Јелена Луковић (Географски факултет, Универзитет у Београду). Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости и пријем теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 12.12.2019. године (одлука бр. 244/8 од 16.12.2019. године). За ментора при изради докторске дисертације изабран је в. проф. др Милан Килибарда, дипл. инж. геод. са Катедре за геодезију и геоинформатику Грађевинског факултета Универзитета у Београду. На седници Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у

Београду одржаној дана 24.12.2019. године под бројем 61206-5279/2-19 дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Александра Секулића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 13.01.2021. године. Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду донетој на седници одржаној 21.01.2020. године (одлука бр. 244/14-19 од 26.01.2021. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Александра Секулића, маг. инж. геод.

1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области Геодетско инжењерство и ужој научној области Моделирање и менаџмент у геодезији, за коју је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Ментор је в. проф. др Милан Килибарда, дипл. инж. геод. са Грађевинског факултета Универзитета у Београду који испуњава важеће критеријуме Универзитета у Београду. Радови публиковани у међународним часописима који квалификују ментора в. проф. др Милана Килибарду за вођење докторске дисертације су:

1. Sekulić, A., **Kilibarda, M.**, Heuvelink, G.B.M., Nikolić, M., Bajat, B. (2020) *Random Forest Spatial Interpolation*. Remote Sensing. 12 (10) DOI: 10.3390/rs12101687
2. Sekulić, A., **Kilibarda, M.**, Protić, D., Tadić, M. P., & Bajat, B. (2020). *Spatio-temporal regression kriging model of mean daily temperature for Croatia*. Theoretical and Applied Climatology, 140(1–2), 101–114. DOI: 10.1007/s00704-019-03077-3
3. Pejović M., Nikolić, M., Heuvelink, G.B.M., Hengl, T., **Kilibarda, M.**, Bajat, B. (2018) *Sparse regression interaction models for spatial prediction of soil properties in 3D*. Computers & Geosciences. 118, pp.1-13. DOI: 10.1016/j.cageo.2018.05.008
4. Čeh, M., **Kilibarda, M.**, Lisec, A., Bajat, B. (2018) *Estimating the Performance of Random Forest versus Multiple Regression for Predicting Prices of the Apartments*. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 7, 168. DOI: 10.3390/ijgi7050168
5. Hengl, T., de Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., **Kilibarda M.**, et al. (2017) *SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning*. PLOS ONE. 12 (2), pp.e0169748. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748
6. **Kilibarda, M.**, Perčec Tadić, M., Hengl, T., Luković, J., Bajat, B. (2015) *Global geographic and feature space coverage of temperature data in the context of spatio-temporal interpolation*. Spatial Statistics. 14, pp.22-38. DOI: 10.1016/j.spasta.2015.04.005
7. Luković, J., Blagojević, D., **Kilibarda, M.**, Bajat, B. (2015). *Spatial pattern of North Atlantic Oscillation impact on rainfall in Serbia*. Spatial Statistics, 14, pp.39-52. DOI: 10.1016/j.spasta.2015.04.007
8. Bajat, B., Blagojević, D., **Kilibarda, M.**, Luković, J., Tošić, I. (2015). *Spatial analysis of the temperature trends in Serbia during the period 1961–2010*. Theoretical and Applied Climatology, 121(1–2), 289–301. DOI: 10.1007/s00704-014-1243-7
9. **Kilibarda, M.**, Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., Gräler, B., Pebesma, E., Perčec Tadić, M., Bajat, B. (2014). *Spatio-temporal interpolation of daily temperatures for global land areas at 1 km resolution*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(5), 2294–2313. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020803>
10. Luković, J., Bajat, B., Blagojević, D., **Kilibarda, M.** (2014) *Spatial pattern of recent rainfall trends in Serbia (1961–2009)*. Reg Environ Change 14, 1789–1799. DOI: 10.1007/s10113-013-0459-x

1.3. Биографски подаци о кандидату

Александар Секулић је рођен 30.01.1991. године у Панчеву. Основну школу „Стевица Јовановић“ завршио је 2005. године у Панчеву, а гимназију „Урош Предих“ (природно-математички смер) 2009. године такође у Панчеву. Два пута је учествовао на Републичком такмичењу из математике и освојио једно друго место. На основне академске студије (које трају 3 године) на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, смер геодезија и геоинформатика, уписао се 2009. године. 30.10.2012. године основне академске студије је завршио са просечном оценом 9.47 и оценом 10 на синтезном раду под називом „3D моделирање у окружењу софтвера Cadcorp 7.1“ и стекао звање инжењера геодезије. Мастер академске студије (које трају 2 године) на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, смер геоинформатика, уписао се 2012. године. 22.09.2014. године мастер академске студије је завршио са просечном оценом 9.72 и оценом 10 на мастер раду под називом „Примена транспортне мреже и модула pgRouting за потребе рутирања возила“ и стекао звање мастер инжењера геодезије. Три пута је награђиван за постигнути успех током студирања од стране Научно наставног већа Грађевинског факултета, а 2014 године је добио награду Института за геодезију и геоинформатику за најбољи мастер рад на одсеку за геодезију и геоинформатику у школској 2013/2014 години.

Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2014. године и положио све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија, са просечном оценом 9.88. Током докторских студија је као аутор или коаутор објавио више радова на тему просторно-временске интерполације климатских елемената, од тога: 3 рада у водећим међународним часописима са SCI листе, 2 рада у међународним часописима, 1 рад у домаћем часопису, 8 радова на међународним конференцијама, 1 рад на домаћој конференцији и 2 техничка решења.

Од новембра 2014. године, Александар Секулић је запослен на Грађевинском факултету Универзитета у Београду као асистент-студент докторских студија, а од новембра 2017. поново изабран у исто звање. На седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду одржаној дана 21.01.2021. године изабран је у звање истраживача сарадника. Учествује у настави на предметима: геодезија, геодезија саобраћајница, геоинформациони системи, геоинформациони системи у саобраћајницама и геостатистика. Александар Секулић је тренутно ангажован на пројекту технолошког развоја Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом: „Улога и имплементација државног просторног плана и регионалних развојних докумената у обнови стратешког истраживања, мишљења и управљања у Србији“ (ев. бр. III47014), као и на пројекту Фонда за науку Републике Србије под називом „CERES - EO-based information for 'smarter' agriculture and carbon farming“ (програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције, бр. уговора 6527073). Такође је био ангажован на ERASMUS+ пројекту под називом „GEOWEB - Modernising geodesy education in Western Balkan with focus on competences and learning outcomes“. Александар је још био ангажован и на Horizon 2020 пројекту под називом „APOLLO - Advisory platform for small farms based on earth observation“ (call H2020-EO-2015, topic EO-1-2015 Bringing EO applications to the market, бр. уговора 687412) и тренутно је ангажован на Horizon 2020 пројекту под називом „BEACON - Redefining Agriculture Insurance tools“ (call H2020-SPACE-2018-2020, topic DT-SPACE-01-EO-2018-2020 Copernicus market uptake, бр. уговора 821964).

Поред матерњег српског језика, говори, чита и пише енглески језик. Поседује и основно знање из француског језика.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

1.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Александра Секулића под насловом „Spatio-temporal interpolation of climate elements using geostatistics and machine learning“ (на српском „Просторно-временска интерполација климатских елемената применом геостатистике и машинског учења“) садржи

укупно 182 стране, од којих је основни текст на 126 страна. Дисертација је писана на енглеском језику и подељена је у 8 (осам) поглавља:

1. Увод
2. Методе за просторну интерполацију и њихова примена на климатске елементе
3. Јавно доступни дневни климатски подаци
4. Адаптација глобалног геостатистичког модела средњих дневних температура на локална подручја
5. Просторна и просторно-временска интерполација користећи *Random Forest*
6. Просторна и просторно-временска интерполација дневних климатских елемената за подручје Србије са просотрном резолуцијом од 1 km
7. Аутоматска просторно-временска интерполација применом R пакета *meteo*
8. Дискусија и закључци

Дисертација садржи 49 оригиналних слика на којима су приказане карте и дијаграми, 15 табела као и 47 нумерисаних израза. На крају дисертације дат је попис цитиране литературе који садржи 272 библиографских наслова, углавном актуелних иностраних извора. На почетку дисертације је дат резиме на енглеском и српском језику, са кључним речима. Дисертација још садржи изјаву захвалности, списак слика, табела и скраћеница коришћених у тексту као и садржај. Биографија аутора дата је на крају дисертације.

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

1.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је истакнут значај гридованих података (растера) дневних климатских елемената као и проблеми са постојећим методама интерполације заснованим на геостатистици и машинском учењу. Поред тога, представљени су предмет, циљеви и методологија истраживања, као и структура и организација дисертације по поглављима.

У другом поглављу је приказан преглед најчешће коришћених метода за просторну интерполацију климатских елемената са акцентом на новоразвијене методе просторне интерполације које су базиране на машинском учењу. Ово поглавље је подељено на четири дела (потпоглавља). У уводном делу је дефинисан проблем просторне и просторно временске интерполације, дат је историјски преглед и постојеће класификације интерполационих метода коришћених за климатске елементе. Затим су методе интерполације за картирање климатских елемената класификоване у три групе (потпоглавља): (1) базиране на станицама, (2) базиране на предикторима и (3) комбиноване. За сваку од ове три групе дат је детаљан опис одговарајућих интерполационих метода као и разматрана је њихова примена на климатске елементе.

У трећем поглављу су описани отворени глобални и регионални (европски) извори дневних података климатских елемената који су коришћени у дисертацији. Прво је дат опис у свету највише коришћених извора података са метеоролошких станица. Затим је дат опис најчешће коришћених гридованих дневних климатских података у погледу коришћене методологије, просторне резолуције, временског периода који покривају, итд. Гридовани дневни климатски подаци су подељени у три групе: (1) базирани на подацима са метеоролошких станица, (2) базирани на подацима даљинске детекције и (3) климатске реанализе. Додатно су описани и (гридовани) топографски подаци који су коришћени као предиктори за интерполацију климатских елемената.

У четвртном поглављу, прво је тестиран глобални модел просторно-временског регресионог кригинга средњих дневних температура изнад површи Земље са просторном резолуцијом од 1 km користећи станице за подручје Хрватске. Затим је, калибрацијом глобалног модела тј. користећи исте предикторе као и код глобалног модела изузев MODIS LST сателитских снимка

(дигитални модел терена, топографски индекс влажности и геометријски температурни тренд), направљен локални модел просторно-временског регресионог кригинга средњих дневних температура изнад површи Земље са просторном резолуцијом од 1 km за подручје Хрватске. Тачност локалног модела за подручје Хрватске је оцењена користећи метод унакрсне-валидације, и то две његове верзије: (1) за сваку станицу посебно (leave-one-out) као и (2) угњеждена (k-fold). За тестирање глобалног модела, креирање локалног модела као и његову валидацију коришћена су опажања на станицама за подручје Хрватске из 2008. године. Креирани су гридовани дневни подаци средњих дневних температура изнад површи Земље за подручје Хрватске за 2008. годину на основу глобалног и локалног модела. Такође је извршено поређење глобалног и локалног модела, као и поређење локалног модела са сличним моделима за друга локална подручја у погледу тачности, једноставности, робустности и других релевантних аспеката.

У петом поглављу је по први пут представљена и анализирана нова *Random Forest Spatial Interpolation (RFSI)* метода за просторну (просторно-временску) интерполацију базирана на *Random Forest (RF)* методи машинског учења и опажањима на најближим локацијама и растојањима до њих у форми просторних предиктора. *RFSI* методологија је тестирана на 3 студије случаја. Прво је поређена са једноставним детерминистичким методама, обичним кригингом и *Random Forest for spatial prediction (RFsp)* методом на симулираном (синтетичком) сету података. Предност симулираног сета података је то што су тачне вредности познате за цео просторни домен и тачност поменутих интерполационих метода је оцењена поређењем тачних вредности и предикција. Затим је *RFSI* методологија поређена са просторно-временским регресионим кригингом, методом инверзних дистанци, стандардним *RF* и *RFsp* у две реалне студије случаја: (1) дневне количине падавина за подручје Каталоније за 2016–2018 период и (2) средње дневне температуре изнад површи Земље за подручје Хрватске за 2008 годину. За поређење поменутих метода у ове две студије случаја коришћена је угњеждена просторна унакрсна-валидација.

У шестом поглављу је креиран *MeteoSerbia1km* — први гридовани сет података дневних климатских елемената са просторном резолуцијом од 1 km за подручје Србије за период 2000–2019 — користећи *RFSI* методологију. *MeteoSerbia1km* чине дневни гридовани подаци пет климатских елемената: максималне, минималне, средње температуре, средњег атмосферског притиска на нивоу мора и количине падавина. Дигитални модел терена, топографски индекс влажности, *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)* су коришћени као предиктори, док су дневна опажања са *OGIMET* сервиса коришћене као независна променљива у процесу креирања *RFSI* модела. Ови дневни климатолошки гридовани подаци су још агрегирани у времену производећи тако месечне и годишње просеке, као и дневне, месечне и годишње вишегодишње просеке. Тачност дневних гридованих података је оцењена такође користећи угњеждену просторну унакрсну-валидацију, затим користећи независни сет опажања са метеоролошких станица у Војводини и поређењем са *Ensembles daily gridded observational (E-OBS)* гридованим сетом података за Европу са просторном резолуцијом од 10 km.

У седмом поглављу је прво приказан исотријски развој пакета за просторну (просторно-временску) интерполацију у *R* софтверском окружењу. Затим је представљен *R* пакет *meteo* за аутоматско мапирање, како климатолошких, тако и свих осталих параметара животне средине и отореног је кода и бесплатан за коришћење. Приказане су и описане две унапређене функције за интерполацију просторно-временским регресионим кригингом, као и четири нове функције за просторну интерполацију *RFSI* методологијом.

У последњем, осмом поглављу, су изнета су закључна разматрања и дата је препорука за будућа истраживања у области просторно-временске интерполације климатских елемената.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Александра Секулића се бави савременим проблемима у области просторне и просторно-временске интерполације климатских елемената (посебно дневних), и то геостатистичким методама и развијањем нових метода интерполације базираних на техникама машинског учења.

Иако су подаци базирани на сателитским снимцима по структури већ гридовани, проблем је то што њихова просторна резолуција углавном није довољна за различите примене на локалном нивоу. Због тога се они често користе за моделе који производе климатолошке гридоване податке боље просторне резолуције. Такође и глобални модели, због своје лошије просторне и временске резолуције, а тиме и губитка просторне и временске варијабилности нису погодни за анализе на локалним подручјима. Због тога је у оквиру докторске дисертације испитана су могућности прилагођавања глобалних модела на локална подручја.

Кригинг (енг. *Kriging*) геостатистичка метода, иако представља оптимални линеарни предиктор за просторну интерполацију, садржи извесне недостатке. Она се заснива на претпоставкама да је просторна променљива стационарна. Такође не може да се носи са свим типовима података (квалитативни подаци) и прорачун може дуго да траје. Последњих година се све више користе технике машинског учења за просторну интерполацију не би ли превазишле недостатке Кригинга. Неке од најуспешнијих техника машинског учења попут насумичних сума, вештачких неуронских мрежа и других у основи не узимају у обзир просторну (просторно-временску) корелацију тако да постоји простор за унапређење. Оно што је недостатак свих досадашњих методологија за просторну интерполацију машинским учењем је то што ниједна од њих не укључује опажања и растојања до најближих локација. Због тога је у оквиру истраживачког рада докторске дисертације развијена и анализирана *RFSI* методологија за просторну и просторно-временску интерполацију која користи *Random Forest* методу машинског учења заједно са поменутим опажањима и растојањима до најближих локација. Ово је уједно и највећи научни допринос докторске дисертације.

Постоји велика потреба за гридованим дневним подацима високе просторне резолуције у Србији, поготову у областима анализе климе и праћење климатских промена, пољопривреди, метеорологији, хидрологији, екологији, итд. Имајући у виду да гридовани дневни подаци метеоролошких елемената високе просторне резолуције за подручје Србије још увек не постоје, у оквиру истраживачког рада докторске дисертације развијени су модели и креирани историјски гридовани дневни подаци климатских елемената са просторном резолуцијом од 1 km за подручје Србије користећи новоразвијену *RFSI* методологију. Креирани подаци су јавно доступни преко *WEB* сервиса и представљају највећи практични допринос ове дисертације.

У последњој деценији све је популарнији концепт отворености података из разлога што се креирани подаци, код и технологије могу користити бесплатно, што даље убрзава процес научног развоја. Због тога је цео процес креирања, предикције, калибрисања и валидације аутоматизован користећи R програмски језик и публикован кроз R пакет *meteo*, а креирани подаци су доступни под *GPL* лиценцом отвореног типа.

Узимајући у обзир све наведене чињенице, може се закључити да је предмет истраживања докторске дисертације актуелна тема и да приказани резултати дисертације имају научну и практичну вредност и резултат су оригиналног научног истраживања.

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 „Spatio-temporal interpolation of climate elements

using geostatistics and machine learning“ (на српском „Просторно-временска интерполација климатских елемената применом геостатистике и машинског учења“), аутора Александра Секулића, потврђена је оригиналност ове докторске дисертације.

2.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Докторска дисертација садржи 272 библиографских извора релевантних за област просторне и просторно-временске интерполације климатских елемената, од чега већину чине радови објављени у врхунским међународним часописима (нпр. *International Journal of Climatology*, *Journal of Geophysical Research*, *Theoretical and Applied Climatology*, *Remote Sensing*, *Remote Sensing of Environment*, *Geoderma*, *Journal of Hydrology*, *Spatial Statistics*, итд.) и књиге (више од 200) и мањи број докторских дисертација, извештаја научних пројеката, техничких извештаја и радова на међународним конференцијама.

Око 70% (око 200) библиографских извора је новијег датума, тј. објављени су након 2000. године, од чега је приближно половина објављена након 2015. године.

2.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току израде дисертације активности су реализоване паралелном применом теоријског приступа ослоњеног на податке добијене из литературе и практичног приступа заснованог на сопственом експерименталном истраживању.

Кандидат је извршио анализу и синтезу досадашњих истраживања и резултата у области просторне (просторно-временске) интерполације, са посебним освртом на интерполацију климатских елемената. За планирање и анализу резултата експерименталног истраживања примењена је хипотетичко-дедуктивна метода. Експериментални део истраживања чини креирање модела интерполације климатских елемената као и оцена њихове тачности. За потребе моделирања, коришћене су геостатистичке и методе машинског учења. Компаративне и статистичке методе испитивања су коришћене у анализи експерименталних резултата, тачније за поређење нових модела са постојећим, за оцену тачности модела и интерпретацију резултата.

Наведене методе истраживања су у потпуности адекватне за примену у предметном истраживању. На основу свега наведеног, добијене резултате и закључке изведене у оквиру дисертације треба прихватити као потпуно валидне.

2.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултати добијени у оквиру истраживања указују:

1. да глобални просторно-временски геостатистички модели дневних климатских елемената могу бити прилагођени за локална подручја и тако побољшати тачност предикција
2. да опажања на најближим локацијама и растојања до њих у форми просторних предиктора могу да унапреде просторну интерполацију методама машинског учења
3. да применом *RFSI* методологије за просторну (просторно-временску) интерполацију могуће добити гридоване климатолошке податке високе тачности
4. да је могуће аутоматизовати процес просторне и просторно-временске интерполације применом просторно-временског регресионог кригинга и *RFSI* методологије

Изведени закључци су последица анализа спроведених на сопственим експерименталним резултатима. Поред тога, опсежна анализа резултата експеримената и оцене тачности модела дневних климатских елемената указују на то да се развијене методологије за калибрисање глобалних модела на локална подручја, као и новоразвијена *RFSI* методологија могу користити у даљим истраживањима у областима просторне и просторно-временске интерполације и креирању гридованих сетова података, како климатских елемената, тако и осталих параметара животне средине. *MeteoSerbia1km* гридовани сет података дневних климатских елемената за подручје Србије, као и остале гридоване сетове података дневних климатских елемената

креиране у оквиру дисертације, могуће је даље користити за разне анализе у различитим областима и дисциплинама, као што су метеорологија, климатологија, саобраћајне анализе, просторно планирање, пољопривреда, екологија, и друге.

2.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Александар Секулић се у оквиру своје докторске дисертације бавио изучавањем и критичком анализом доступне релевантне литературе, затим планирањем, спровођењем, обрадом и анализом резултата експерименталног истраживања. Студиозним приступом постављеном проблему, повезујући различите сегменте научно-истраживачког рада, успешно је решио постављене задатке и дао оригиналне научне и практичне доприносе у предметној области истраживања кроз публикације радова у врхунским међународним часописима и учешћа на међународним конференцијама. Све ово доказује да кандидат поседује способност за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

3.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација Александра Секулића под насловом „Просторно-временска интерполација климатских елемената применом геостатистике и машинског учења“ даје научни допринос у области геоинформатике, а посебно у области геостатистике и интерполације климатских елемената. У оквиру докторске дисертације Александра Секулића остварени су следећи научни доприноси:

1. Доказано је да се прилагођавањем глобалног модела просторно-временског регресионог кригинга на локално подручје побољшава тачност предикције код климатских елемената
2. Развијена је *RFSI* методологија за просторну и просторно-временску интерполацију
3. Креиран је први гридовани сет података дневних климатских елемената (максимална, минимална, средња температуре, средњи атмосферски притисак на нивоу мора и количина падавина) са просторном резолуцијом од 1 km за подручје Србије за период 2000–2019 користећи *RFSI* методологију, под називом *MeteoSerbia1km*.
4. Унапређена је аутоматизација процеса интерполације просторно-временским регресионим кригингом и аутоматизован је процес интерполације *RFSI* методологијом

3.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад Александра Секулића је био оријентисан на унапређење просторно-временске интерполације климатских елемената, како геостатистичким тако и методама машинског учења. У оквиру истраживања је спроведен низ експеримената и добијени резултати омогућавају извођење закључака, као и њихову даљу употребу од стране других истраживача.

Утврђено је да је могуће прилагодити глобални геостатистички модел за средње дневне температуре и направљено је побољшање од 3.4% у описаној варијабилности (R^2) и 0.7°C у очекиваној тачности (RMSE) за подручје Хрватске. Креирани локални модел је такође једноставнији јер користи само три предиктора које је једноставно направити и има већу тачност у односу на постојећи модел за подручје Хрватске. Локални модел и даље има мању тачност у планинским регијама што би требало истражити и унапредити у будућем истраживању. Такође се може испитати примена ове методологије на друге климатске елементе.

Експерименти и анализа резултата је показала да новоразвијена *RFSI* методологија углавном даје већу тачност у односу на једноставне детерминистичке методе, као и геостатистичке и постојеће методе базиране на техникама машинског учења. *RFSI* методологија може бити посебно погодна за просторно-временску интерполацију комплексних и нестационарних климатских елемената. Предност *RFSI* методологије је то што, за разлику од Кригинга, узима у обзир и нелинеарне

везе измеђи предиктора, просторних и непросторних. Нови просторни предиктори (опажања на најближим локацијама и растојања до њих) дозвољавају моделу да одлучи да ли просторна корелација или корелација међу непросторним предикторима има већи утицај на предикцију. *RFSI* методологија се може применити на друге климатске променљиве и остале параметре животне средине што може бити предмет даљег истраживања. Ову методологију је потребно даље унапредити у погледу брзине моделирања и предикције, проширења на просторно-временски домен и моделирање више променљивих истовремено, и друго. Такође се може испитати примена нових просторних предиктора у другим методама машинског учења.

Креирани *MeteoSerbia1km* гридовани сет дневних климатских елемената развијен користећи *RFSI* методологију је први овакав сет за подручје Србије. Резултати показују да је *MeteoSerbia1km* високе тачности и да се може користити за даља истраживања у многим областима. Овај сет података се може додатно унапредити пре свега укључивањем већег броја метеоролошких станица и унапређењем саме *RFSI* методологије.

Развијањем *R* пакета *meteo* омогућава се коришћење развијених методологија у различитим студијама и дат је значајан допринос заједници отвореног кода. Функционалности развијене у оквиру овог пакета се такође могу даље унапредити и оптимизовати.

Добијени резултати јасно показују научни и практични доприноси ове дисертације и дају одличну основу и мотивацију за будућа истраживања и унапређење предложених методологија и креираних података.

3.3. Верификација научних доприноса

У току израде дисертације, Александар Секулић је међународној и домаћој, научној и стручној јавности представио свој рад кроз следеће публикације:

Категорија M21a:

1. Luković, J., Chiang, J., Blagojevic, D., **Sekulić, A.** (2021) *A later onset of the rainy season in California*. *Geophysical Research Letters*, 48 (4), e2020GL090350. DOI: 10.1029/2020GL090350

Категорија M21:

1. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Heuvelink, G.B., Nikolić, M., Bajat, B. (2020) *Random Forest Spatial Interpolation*. *Remote Sensing*, 12(10), 1687. DOI: 10.3390/rs12101687
2. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Protić, D., Bajat, B. (2021) *A high-resolution daily gridded meteorological dataset for Serbia made by Random Forest Spatial Interpolation*. *Scientific Data*. (у процесу рецензије)

Категорија M22:

1. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Protić, D., Perčec-Tadić, M., Bajat, B. (2020) *Spatio-temporal regression kriging model of mean daily temperature for Croatia*. *Theoretical And Applied Climatology*, 140, 101–114. DOI: 10.1007/s00704-019-03077-3

Категорија M33:

1. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Luković, J. (2018) *Space-time interpolation of daily precipitation over Mediterranean area using Random Forest*. In: MEDCLIVAR 2018, Belgrade, Serbia.
2. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Bajat, B. (2016) *High resolution daily temperature for Serbia (1960-2015)*. In: *Proceedings of GeoMLA, Geostatistics and Machine Learning, Applications in Climate and Environmental Sciences*.

Категорија M81:

1. **Sekulić, A.**, Kilibarda, M., Nikolić, M., Bajat, B. (2020) *Random Forest Spatial Interpolation - softversko rešenje za prostornu interpolaciju Random Forest metodom mašinskog učenja*. Technical report.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру докторске дисертације Александра Секулића, маг. инж. геод. дат је значајан допринос у области просторно-временске интерполације климатских елемената која је актуелна не само за области геоинформатике и геостатистике, већ и за друге научне дисциплине. Прилагођавање глобалног геостатистичког моделана на локална подручја и новоразвијена *RFSI* методологија се поред климатских елемената, може применити и на друге просторне и просторно-временске феномене. Такође, *MeteoSerbia1km* представља први овакав сет података за подручје Србије.

Резултати експерименталних истраживања која су спроведена од стране кандидата, као и развијени концепт методологије и развијени софтвер за аутоматизацију просторно-временске интерполације, представљају оригиналан научни и стручни допринос у области геоинформатике и геостатистике. Резултати истраживања имају практичну примену и могу да послуже и као основ за даља научна истраживања у овој области. Комисија сматра да докторска дисертација има све неопходне елементе и 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 под насловом „Spatio-temporal interpolation of climate elements using geostatistics and machine learning“ (на српском „Просторно-временска интерполација климатских елемената применом геостатистике и машинског учења“) кандидата Александра Секулића, маг. инж. геод. изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за њену јавну одбрану.

Београд, 19.02.2021.

Чланови комисије:

В. проф. др Милан Килибарда, дипл. инж. геод.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Проф. др Бранислав Бајат, дипл. инж. геод.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

В. проф. др Јелена Луковић, дипл. геогр.
Универзитет у Београду, Географски факултет

Доц. др Милутин Пејовић, дипл. инж. геод.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Доц. др Младен Николић, дипл. мат.
Универзитет у Београду, Математички факултет

