

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Ане (Радован) Додиг, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком Научно-наставног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 650/9 од 08.04.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Ане Додиг за израду докторске дисертације и научне заснованости теме "Модел машинског учења за просторно-временску предикцију вишеструких хидролошких параметара" (енг. "Machine learning models for spatio-temporal prediction of multiple hydrological parameters").

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ана Додиг је рођена 15. маја 1997. године у Београду. Основну школу „Јосиф Панчић” у Београду је завршила као носилац дипломе „Вук Караџић”. Тринаесту гимназију у Београду је завршила такође као носилац дипломе „Вук Караџић”. Електротехнички факултет, Универзитета у Београду је уписала 2016. године и дипломирала 2020. године са просеком 9,67 на смеру Сигнали и системи. Дипломски рад под насловом: „*Решавање RushHour слагалице алгоритмима претраге*” је одбранила под менторством проф. др Предрага Тадића. Мастер академске студије је завршила 2022. године на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду на смеру Сигнали и системи са просечном оценом 10 и са одбрањеним мастер радом под насловом „*Контрола усредсређена на корисника заснована на дубоком учењу подстицањем*” такође под менторством проф. др Предрага Тадића.

Докторске академске студије, уписала је 2022. године на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду на смеру Управљање системима и обрада сигнала, где је положила све испите са просечном оценом 10.

Ана Додиг је први аутор једног рада у часопису са SCI листе (M22), шести аутор још једног рада са SCI листе (M22), и 2 рада са међународних конференција (у категорији M10). Од октобра 2020. године до марта 2022. године је радила у компанији Телеком Србија на позицији софтвер инжењер, а од марта 2022. године запослена је на Истраживачко-развојном институту за вештачку интелигенцију Србије на ком је 22. новембра 2022. изабрана у звање истраживач-приправник. На институту, Ана Додиг је ангажована у групи која се бави

применом вештачке интелигенције у зеленим решењима (енг. *Green AI*). Конкретно у групи користи методе вештачке интелигенције у области хидрологије, тачније у области предикције хидролошких параметара (хемијских и физичких) површинских вода.

Ана Додиг је ангажована и као учесник на домаћем пројекту Фонда за науку РС – Зелени програм сарадње науке и привреде под називом: „*REmote WAter quality monitoRing and IntelliGence (REWARDING)*“. Такође, ангажована је и на комерцијалном пројекту за потребе акционарског друштва „Електропривреда Србије“ под називом: „*Примена алгоритама вештачке интелигенције у процесима производње и планирања производње*“.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Ана Додиг је показала интересовање за научноистраживачки рад у дигиталној обради сигнала и примени метода машинског и дубоког учења у предикцији сигнала. Уписала је докторске академске студије школске 2022/2023. године на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду на смеру Управљање системима и обрада сигнала, где је положила све испите са просечном оценом 10 и остварио 111 ЕСПБ. Списак положених испита са осталим факултетским обавезама приказан је у наставку:

Шифра	Назив Предмета	Оцена	ЕСПБ
19Д051НМ	Неуралне мреже	10	9
19Д051КЕС	Класификација и естимација сигнала	10	9
19Д051СОС	Савремене технике обраде сигнала	10	9
19Д111НАМ	Напредни алгоритми машинског учења	10	9
19Д091УНР	Увод у научни рад	10	6
19Д081АР	Аутоматско резоновање	10	9
19Д051ТОС	Технике оптимизације у системима управљања и одлучивања	10	9
Обавеза	Студијски истраживачки рад I	-	24
Обавеза	Научно стручни рад	-	3
Обавеза	Студијски истраживачки рад II	-	24

У звање истраживач-приправник изабрана је 22.11.2022. године на Истраживачко-развојном институту за вештачку интелигенцију Србије. Досадашњи резултати кандидата су приказани у два рада у међународним часописима са SCI листе, у две публикације на међународним конференцијама, у једном техничком решењу и једном националном патенту:

- Радови у часописима са импакт фактором:

- **A. Dodig**, E. Ricci, G. Kvascev, M. Stojkovic, A novel machine learning-based framework for the water quality parameters prediction using hybrid long short-term memory and locally weighted scatterplot smoothing methods, JOURNAL OF HYDROINFORMATICS, Vol. 26, Issue 5 April 2024. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.273>. IF = 2.2. (M22)

- S. Cojbasic, S. Dmitrasinovic, M. Kostic, M. Turk Sekulic, J. Radonic, **A. Dodig**, M. Stojkovic, Application of machine learning in river water quality management: A review. Water Science & Technology 88, no. 9 (2023): 2297-2308. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.331>. IF = 2.5. (M22)
- Радови на међународним конференцијама:
 - **A. Dodig**, V. Djapic, Digital Solution to Estimate Solar Power Potential of Rooftops in City of Belgrade, Conference on Information Technology and its Applications ICIST 2023: Disruptive Information Technologies for a Smart Society, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 872., pp. 362 - 374, Springer, Cham, Kopaonik, Srbija, May, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50755-7_34. (M33)
 - **A. Dodig**, T. Lutovac Evaluating Bayesian Approaches for Water Quality Classification: A Comparative Study, - Book of Abstracts for The Third Serbian International Conference on Applied Artificial Intelligence (SICAAI), University of Kragujevac, Serbia, Kragujevac, Serbia, April, 2024., pp. 59. (M34)
- Техничка решења:
 - M. Stojkovic, **A. Dodig**, V. Ilic, M. Medojevic, M. Brboric, M. Turk Sekulic, S. Dmitrasinovic, J. Radonic, D. Vukobratovic, New water quality forecasting system based on Artificial Intelligence, 2025 (M82)
- Национални патент:
 - M. Stojkovic, **A. Dodig**, System and Method for Predicting Water Quality Parameters using Machine Learning, 2024 (M87)

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Дана 7. маја 2025. године, кандидат Ана Додиг је на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду усмено полагала испит о подобности теме докторске дисертације и кандидата (докторски испит), пред Комисијом у саставу:

- Др Горан Квашчев, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- Др Милан Стојковић, виши научни сарадник, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије
- Др Дражен Драшковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

На јавној усменој одбрани предложене теме, Комисија је кандидата оценила оценом **задовољно**.

На основу резултата испита за оцелу научне заснованости теме докторске дисертације, резултата током студирања на свим нивоима студија, објављених научних радова у области теме докторске дисертације и оствареног искуства у раду на предложеном истраживању, Комисија констатује да кандидат Ана Додиг поседује знање и истраживачко искуство и показује зрелост и самосталност који га квалификују за израду дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања докторске дисертације под радним насловом „Модели машинског учења за просторно-временску предикцију вишеструких хидролошких параметара” (енг. *“Machine learning models for spatio-temporal prediction of multiple hydrological parameters”*) је развој и примена нових напредних модела машинског учења (енг. *Machine learning* - ML) за временску и просторну предикцију вишеструких хидролошких параметара, укључујући и параметре квалитета воде (нпр. растворени кисеоник, проводљивост) и параметре квантитета воде (нпр. проток). Поред саме предикције, фокус истраживања ће бити и на припреми података за ML моделе која обухвата попуњавање непостојећих и синтезу нових хидролошких података различитим методама и потискивање шума које је повезано са мерном опремом са циљем побољшања прецизности и робусности предикције.

Водни екосистеми су све више угрожени утицајем људске активности и климатским променама што ремети режиме хидролошких параметара укључујући параметре квалитета и параметре количине воде (протока) (Whitehead и др. 2009; Van Vliet и др. 2013; Abbas и др. 2022). Промене режима протока воде у речним токовима доводе до све чешћих поплавних таласа како у свету тако и у Србији (Gavrilovic и др. 2012; Hirabayashi и др. 2013), а прогресиван опадајући тренд квалитета воде је такође забележен, због већег загађења и индустријског отпада, што се посебно одражава на речне токове у Србији (Mănoiu и др. 2021). Због ових проблема, потреба за ефикасним методама за предикцију хидролошких параметара ради побољшања управљања водним ресурсима, очувања здравља животне средине, воде и људи и унапређења система за ублажавање ризика од поплава је све већа (Carr и др. 2008; Ahmadi и др. 2024). Међутим, динамичност и комплексност хидролошких процеса чине њихову предикцију изазовном посебно сада због све већег антропогеног утицаја и утицаја климатских промена. Традиционални приступи за предикцију хидролошких параметара, засновани на физичким моделима, често су ограничени у погледу прецизности и скалабилности. Ови модели, због потребе развоја комплексних речних мрежа, захтевају велики број података који се односе на топографију, хидролошке и граничне услове и дуготрајно и скупо време симулације (Zhou и др. 2018; Dodig и др. 2024). Са друге стране, статистички модели као што су ауторегресивни покретни просек (енг. *Autoregressive moving average* – ARMA) и њихове варијације, имају ограничења у погледу обраде нелинеарних и нестационарних временских серија попут хидролошких (Box и др. 2013). Ипак последњих година су се појавиле напредне технике машинског учења које могу да превазиђу поменуте недостатке конвенционалних метода и понуде обећавајуће решење за ове изазове. Ове методе могу да ухвате нелинеарност и сложеност хидролошких параметара директно из самих података и не захтевају уношење додатних топографских и хидролошких параметара. Вештачке неуронске мреже (енг. *Artificial Neural Networks* - ANNs) се већ дуги низ година користе за предикцију разних хидролошких параметара (Dibike и др. 2001; Elkiran и др. 2019). Поред ANNs, користе се разне друге ML технике попут Регресије вектора подршке (енг. *Support Vector Regression* - SVR), као и модели засновани на стаблима одлучивања као што су Екстремно појачавање градијента (енг. *Extreme Gradient Boosting* – XGBoost) и Случајне шуме (енг. *Random Forest* - RF) (Lu и др. 2020; Xu и др. 2021). Додатним напретком технологије, популарност су стекле рекурентне неуралне мреже (енг. *Recurrent Neural Networks* – RNNs), а међу њима поготову мреже дуге краткорочне меморије (енг. *Long Short-Term Memory* – LSTM). Оне су се показале веома ефикасним у предикцији временских серија јер могу да ухвате дугорочне зависности у комплексним секвенцијалним подацима као што су хидролошке серије (Wang и др. 2023; Schutte и др. 2024). Иако веома популарне, RNNs се могу мучити да ухвате комплексне просторне зависности међу хидролошким параметрима на различитим хидролошким мерним станицама дуж речног тока и потребан је засебан модел предикције за сваку станицу. Модели као што су Графне неуронске мреже (енг. *Graph Neural Networks* - GNNs) превазилазе ове лимитације. Оне могу природно да представе речне мреже

као графове, који обухватају просторне и временске зависности у процесу предикције. Ова способност пружа прилику за побољшање предикције динамике хидролошких параметара дуж речног тока кроз међусобно повезане мерне станице (Sun и др. 2021; Li и др. 2024).

Иако могу да пруже веома добре резултате предикције, модели машинског учења ипак захтевају велику количину података како би могли да ухвате зависности међу њима. Међутим, недостатак квалитетних и конзистентних хидролошких података остаје значајан изазов, посебно у регионима са ограниченим мониторингом. Традиционално се генерисање нових података у временским серијама ослања на већ поменуте статистичке ARMA моделе (Kang и др. 2020). Ови модели могу бити ефикасни у симулацији основних временских серија, али имају ограничења у представљању сложених међузависности унутар података. Такође, приступ заснован на моделима Марковљевих ланаца (енг. *Markov Chain* – MC) се користи за стохастичко генерисање временских серија, јер је једноставан и успешно хвата статистичке карактеристике података (Aksoy и др. 2003). Међутим, као што је случај са ARMA моделима, ова метода не успева да ухвати сложене зависности међу подацима. Потенцијално решење за недовољне и неконзистентне хидролошке податке се опет може наћи у машинском учењу. За недостајуће податке у временским серијама се могу користити и разне методе које се баве импутацијом недостајућих података. Неке од популарнијих су K-најближих суседа (енг. *K-Nearest Neighbors* – KNN) и пондерисани KNN (енг. *Weighted KNN* – WKNN), који су се у пракси добро показали када није доступан велики број података, а чак и за податке у просторном и временском домену (Poloczek и др. 2014; Pujianto и др. 2019; Al-Helali и др. 2021). Такође, у последње време све популарније постају генеративне супарничке мреже (енг. *Generative adversarial networks* – GANs), које могу понудити потенцијално решење за недовољну количину података кроз генерисање читавих серија података, укључујући хидролошке серије (Goodfellow и др. 2020; Weng и др. 2023). На овај начин, могу се не само допунити реални подаци, већ и синтетисати нови, чиме се потенцијално могу побољшати перформансе ML модела. Ове методе, заједно са напредним ML техникама за предикцију, отварају нове могућности за прецизнију и робуснију предикцију хидролошких параметара, што је од кључног значаја за управљање водним ресурсима и ублажавање ризика од природних катастрофа.

Фокус овог истраживања биће на свеобухватном приступу који обухвата не само развој модела за предикцију и побољшање доступности и квалитета података, већ и на проналажењу најбољих модела за предикцију међу неким од поменутих, оптимизацију њихових хиперпараметара што је од изузетне важности (Agrawal 2021; Géron 2022) и упоређивању њихових перформанси. Истраживање ће се бавити идентификацијом оптималних хиперпараметара за сваки модел како би се осигурало да пружа најбоље могуће резултате. Модели ће бити међусобно упоређени на основу више метрика које осликавају прецизност предикције, као што су средња квадратна грешка (енг. *Mean Squared Error* - MSE), средња апсолутна грешка (енг. *Mean Absolute Error* - MAE), коефицијент детерминације (R^2) и друге релевантне метрике. Овај приступ ће омогућити избор модела са најбољим перформансама за различите параметре предикције. Такође, фокус ће бити и на проналажењу најбољих метода за попуњавање недостајућих података и синтезу нових хидролошких података. За ове методе ће се такође вршити потрага за оптималним хиперпараметрима, а генерисани или допуњени подаци ће бити валидирани коришћењем више метрика како би се утврдило да ли се могу користити и да ли довољно тачно осликавају реалне податке. Одабране најбоље методе ће се затим користити за попуњавање и синтезу података, који ће бити интегрисани у процес тренирања ML модела. Овај корак је кључан за побољшање робусности и прецизности модела, посебно у условима непотпуних или шумовитих података. Додатно, истраживање ће се бавити и методама за отклањање шума у подацима, анализирајући њихов утицај на прецизност предикције модела, а истовремено њихово очување важних информација у подацима. Анализа утицаја шума на предикцију ће допринети разумевању колико је квалитет података кључан за успех ML модела и како се ефикасно носити са шумовитим подацима. Свеобухватно, истраживање ће обухватити све

фазе од припреме података до развоја и оптимизације модела, са циљем да се осигура највиши ниво прецизности и робусности у предикцији хидролошких параметара.

Основни циљ овог истраживања је развој и примена иновативних и напредних модела машинског учења за временску, али и просторну предикцију вишеструких хидролошких параметара. Додатно, циљ истраживања је побољшање доступности, квалитета и конзистентности података хидролошких серија, што обухвата попуњавање недостајућих података, синтезу нових хидролошких података и уклањање шума из временских серија. Побољшање квалитета самих података ће допринети развоју основног циља и осигурати боље резултате у предикцији. Модели за предикцију ће интегрисати податке из различитих извора (мерени, синтетисани, допуњени подаци) како би се побољшала прецизност и робусност предикције.

Значај ове докторске дисертације огледа се у њеном потенцијалном доприносу научној заједници кроз развој нових метода за просторно-временску предикцију хидролошких параметара, као и у практичној примени у управљању водним ресурсима. Један од доприноса је и побољшање доступности и квалитета хидролошких података што ће осигурати да модели за предикцију буду робуснији и способни да се носе са непотпуним или шумовитим подацима, а тиме ће ови подаци постати доступни за будућа истраживања. Заједно, ове методе ће омогућити прецизније планирање заштите од поплава, ефикасније управљање водним ресурсима у условима климатских промена и очување здравља водених екосистема. Осим тога, истраживање ће допринети развоју алата који ће се моћи користити у реалном времену, што је од посебног значаја за регионе са ограниченим ресурсима за мониторинг и управљање водом.

3. Полазне хипотезе

Основне хипотезе у овом истраживању су:

- 1) Модели машинског и дубоког учења могу да врше предикцију вишеструких хидролошких параметара са високом прецизношћу.
- 2) Унапређење мерених података и синтеза нових података може значајно побољшати прецизност модела за предикцију.
- 3) Одабир модела, његове структуре и хиперпараметара су кључни за побољшање квалитета предикције хидролошких параметара.
- 4) Интеграција просторних и временских података може побољшати прецизност модела за предикцију хидролошких параметара.
- 5) Напредни модели машинског и дубоког учења могу да успоставе дугорочне временске и просторне зависности у мрежама хидролошких података и превазиђу недостатке традиционалних метода.

4. Научне методе истраживања

У оквиру докторске дисертације први корак истраживања јесте креирање базе података коришћењем јавних и приватних сервиса за преузимање хидролошких података који укључују мерења параметара квалитета воде и мерења параметара количине воде, односно протока. Овај корак обухвата и чишћење података, укључујући отклањање шума и попуњавање недостајућих вредности коришћењем техника као што су KNN, WKNN и друге ML методе за интерполацију података. Што се тиче отклањања шума, користиће се методе као што су Емпиријски начин декомпозиције (енг. *Empirical Mode Decomposition* - EMD) (Huang и др. 1998) и LOWESS (енг. *Locally Weighted Scatterplot Smoothing*) (Cleveland 1979) техника за изглађивање серија података. Ове методе су се показале ефикасне у студијама које се баве предикцијом хидролошких параметара у комбинацији са различитим методама

предикције (Zhang и др. 2022; Dokulil 2014). Истраживање ће се потом посебно фокусирати на примену KNN-а и његове пондерисане варијанте (WKNN-а) за импутацију недостајућих података, с обзиром на њихову доказану ефикасност у раду са просторним и временским подацима, као што су хидролошки подаци. На пример, Poloczek и др. 2014. су у свом раду показали је да је KNN регресија ефикасна метода за импутацију недостајућих података у просторно-временским скуповима података о ветру. Такође, WKNN је коришћен у раду од Al-Helali и др. 2021 где је показано да пондерисање суседа на основу удаљености значајно побољшава тачност импутације у поређењу са стандардним KNN. Додатно, KNN је у раду од Rajesh и др. 2022. показао добру ефикасност у комбинацији са ML моделима за предикцију временских серија, попут LSTM-а, јер је интеграција KNN-а са LSTM-ом побољшала тачност предикције. Ово указује на потенцијал хибридних приступа у решавању проблема недостајућих података и њиховој накнадној предикцији што је од изузетне важности за ово истраживање. Следећи корак истраживања ће се фокусирати на проблем недовољне количине хидролошких података и бавиће се генерисањем синтетичких хидролошких података применом генеративних супарничких мрежа (GANs). Већ су спроведена истраживања која комбинују GAN моделе са моделима за предикцију (Weng и др 2023), при чему је њихов утицај тестиран у контексту предвиђања поплава. У оквиру овог истраживања, додатно ћемо анализирати примену GAN модела за генерисање и других хидролошких параметара, као што су параметри квалитета воде, и увидети утицај генерисаних података на резултате предикције.

Истраживање у оквиру ове дисертације ће потом великим делом бити усмерено и на избор и развој ML модела за предикцију вишеструких хидролошких параметара. Првенствено, избор саме методе предикције је кључан фактор и неке од метода које ће се користити укључују LSTM, GNN, XGBoost, Random Forest и SVR. Као што је већ и поменуто има доста радова у литератури који се баве предикцијом хидролошких параметара, а у овом истраживању посебан фокус ћемо усмерити на коришћење LSTM и GNN метода. LSTM модели су се показали веома ефикасним у предикцији секвенцијалних података попут хидролошких серија као што су показали Wang и др 2023. и Schutte и др. 2024. при предикцији параметара квалитета и количине воде респективно. GNN модели су у последње време привукли велику пажњу јер могу природно да представе речне мреже као графове, који обухватају просторне и временске зависности у процесу предикције. Li и др. 2024 су показали да GNN модели бити јако ефикасни при предикцији параметара квалитета воде, а Liu и др. 2023. су показали да се такође GNN модели могу користити и за предикцију дневног протока у комбинацији са метеоролошким параметрима (падавинама и температурама ваздуха) које имају значајан утицај на проток воде. Кључ при развоју GNN модела је добро постављање самог графа, како би он реално представио мрежу речног тога у комбинацији са метеоролошким станицама при предикцији протока, и како би дао добре резултате предикције и на овоме ће бити фокус у докторској дисертацији. Додатни акценат при развоју ових модела ће бити и на оптимизацији њихових хиперпараметара како би они дали што је могуће боље резултате.

Након развоја свих модела за предикцију, они ће бити тестирани на независним скуповима података и валидирани коришћењем различитих метрика за евалуацију перформанси, укључујући MSE, MAE и R^2 коефицијент. Такође, модели ће бити међусобно упоређени и анализираће се утицај квалитета и квантитета података на резултате предикције како би се идентификовали најефикаснији модели.

Након реализације свих претходних корака, најбољи модели ће се користити за развој софтверског алата за визуелизацију историјских података и података предвиђених тим моделима. Затим ће се у зависности од заинтересованости носиоца одлука (водовод, водопривреда) испитати могућност примене развијених модела у реалном времену за управљање водним ресурсима..

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси докторске дисертације су:

- Систематски преглед литературе са анализом трендова, изазова и празнина у области предикције хидролошких параметара.
- Побољшање квалитета хидролошких података применом метода за уклањање шума и интерполацију недостајућих података применом различитих метода машинског учења.
- Синтеза нових вештачких хидролошких података коришћењем GAN.
- Развој хибридних модела машинског учења за просторно-временску предикцију хидролошких параметара, укључујући примену напредних алгоритама машинског учења попут LSTM и GNN.
- Развој визуелизационог система за анализу историјских и предиктивних података.
- Обезбеђивање алата и промоција комерцијалне примене алата за управљање водним ресурсима.

6. План истраживања и структура рада

Прва фаза предложеног истраживања је концентрисана на прикупљање и препроцесирање хидролошких података. Истраживање је фокусирано на примени напредних метода за чишћење података, укључујући интерполацију недостајућих вредности и отклањање шума из података. Додатно, у овој фази ће се тестирати и применити методе за синтезу нових података, као што су генеративне супарничке мреже (GAN), са циљем повећања обима података. Ова фаза је кључна за обезбеђивање квалитетног улаза за развој модела машинског учења.

Друга фаза истраживања је фокусирана на развој модела машинског учења за просторно-временску предикцију хидролошких параметара. У оквиру ове фазе, посебна пажња ће бити посвећена развоју GNN модела за моделирање просторних зависности међу хидролошким мерним станицама дуж речних токова. Такође, развијаће се LSTM модели за прецизну предикцију временских серија, као и други ML модели који ће служити за поређење и утврђивање ефикасности предложених напредних метода.

Трећа фаза ће обухватити евалуацију и анализу перформанси развијених модела. У оквиру ове фазе, модели ће бити тестирани на независним скуповима података како би се оценила њихова робусност и прецизност. Такође, вршиће се међусобно упоређивање модела, како би се утврдиле предности и мане различитих приступа. Додатно, анализираће се утицај различитих фактора, као што су квалитет и квантитет података, на њихове перформансе. Ова фаза је кључна за идентификацију најбољих модела и метода за практичну примену у управљању водним ресурсима.

Списак коришћене литературе:

- [1] Van Vliet, M. T., Franssen, W. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23(2), 450-464.
- [2] Abbas, M., Zhao, L., & Wang, Y. (2022). Perspective impact on water environment and hydrological regime owing to climate change: a review. *Hydrology*, 9(11), 203.
- [3] Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 101-123.
- [4] Ahmadi, S. M., Balahang, S., & Abolfathi, S. (2024). Predicting the hydraulic response of critical transport infrastructures during extreme flood events. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108573.
- [5] Carr, G. M., & Neary, J. P. (2008). *Water quality for ecosystem and human health*. UNEP/Earthprint..
- [6] Zhou J. G., Borthwick A., Liu H. & Qian L. 2018b Advances in numerical techniques for modelling water flows. *Mathematical Problems in Engineering* 2018, 8175674.

- [7] Dodig, A., Ricci, E., Kvascev, G., & Stojkovic, M. (2024). A novel machine learning-based framework for the water quality parameters prediction using hybrid long short-term memory and locally weighted scatterplot smoothing methods. *Journal of Hydroinformatics*, 26(5), 1059-1079.
- [8] Box, G., Jenkins, G., & Reinsel, G. (2013). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Wiley.
- [9] Dibike, Y. B., & Solomatine, D. P. (2001). River flow forecasting using artificial neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(1), 1-7.
- [10] Xu C., Chen X. & Zhang L. 2021 Predicting river dissolved oxygen time series based on stand-alone models and hybrid wavelet-based models. *Journal of Environmental Management* 295, 113085.
- [11] Lu H. & Ma X. 2020 Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction. *Chemosphere* 249, 126169.
- [12] Wang X., Li Y., Qiao Q., Tavares A. & Liang Y. 2023b Water quality prediction based on machine learning and comprehensive weighting methods. *Entropy*, 25, 1186.
- [13] Schutte C., van der Laan M. & van der Merwe B. 2024 Leveraging historic streamflow and weather data with deep learning for enhanced streamflow predictions. *Journal of Hydroinformatics* 26 (8), 835–852.
- [14] Li, Z., Liu, H., Zhang, C., & Fu, G. (2024). Real-time water quality prediction in water distribution networks using graph neural networks with sparse monitoring data. *Water Research*, 250, 121018.
- [15] Sun, A. Y., Jiang, P., Mudunuru, M. K., & Chen, X. (2021). Explore spatio-temporal learning of large sample hydrology using graph neural networks. *Water Resources Research*, 57(12), e2021WR030394.
- [16] Poloczek, J., Treiber, N. A., & Kramer, O. (2014, June). KNN regression as geo-imputation method for spatio-temporal wind data. In *International Joint Conference SOCO'14-CISIS'14-ICEUTE'14: Bilbao, Spain, June 25th-27th, 2014, Proceedings* (pp. 185-193). Cham: Springer International Publishing.
- [17] Pujianto, U., Wibawa, A. P., & Akbar, M. I. (2019, October). K-nearest neighbor (k-NN) based missing data imputation. In *2019 5th International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)* (pp. 83-88). IEEE.
- [18] Al-Helali, B., Chen, Q., Xue, B., & Zhang, M. (2021). A new imputation method based on genetic programming and weighted KNN for symbolic regression with incomplete data. *Soft Computing*, 25(8), 5993-6012.
- [19] Weng, P., Tian, Y., Liu, Y., & Zheng, Y. (2023). Time-series generative adversarial networks for flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 622, 129702.
- [20] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2020). Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*, 63(11), 139-144.
- [21] Aksoy, H. (2003). Markov chain-based modeling techniques for stochastic generation of daily intermittent streamflows. *Advances in Water Resources*, 26(6), 663-671.
- [22] Kang, Y., Hyndman, R. J., & Li, F. (2020). GRATIS: GeneRAting Time Series with diverse and controllable characteristics. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 13(4), 354-376..
- [23] Géron A. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O'Reilly Media, Inc.; 2022.
- [24] Agrawal T. *Hyperparameter optimization in machine learning: make your machine learning and deep learning models more efficient*. Springer; 2021.
- [25] Mănoiu, V. M., & Crăciun, A. I. (2021). Danube river water quality trends: A qualitative review based on the open access web of science database. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(4), 613-628.
- [26] Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature climate change*, 3(9), 816-821.
- [27] Gavrilović, L., Milanović Pešić, A., & Urošev, M. (2012). A hydrological analysis of the greatest floods in Serbia in the 1960–2010 period. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(4), 107-116.
- [28] Rajesh, M., & Rehana, S. (2022). Impact of climate change on river water temperature and dissolved oxygen: Indian riverine thermal regimes. *Scientific Reports*, 12(1), 9222.
- [29] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ... & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995
- [30] Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 74(368), 829-836.
- [31] Dokulil, M. T. (2014). Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia*, 731, 19-29.
- [32] Zhang, Y., Li, C., Jiang, Y., Sun, L., Zhao, R., Yan, K., & Wang, W. (2022). Accurate prediction of water quality in urban drainage network with integrated EMD-LSTM model. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131724.
- [33] Liu, G., Ouyang, S., Qin, H., Liu, S., Shen, Q., Qu, Y., ... & Zhou, J. (2023). Assessing spatial connectivity effects on daily streamflow forecasting using Bayesian-based graph neural network. *Science of the Total Environment*, 855, 158968.

7. Закључак и предлог

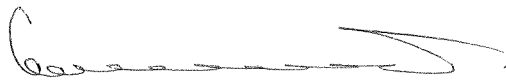
На основу приложене документације и целокупног стеченог утиска о теми докторске дисертације током одбране теме докторске дисертације и досадашњег рада кандидата Ане Додиг, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија је дошла до следећих закључака:

- Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације.
- Предложена тема „Модели машинског учења за просторно-временску предикцију вишеструких хидролошких параметара“ јесте научно заснована, а резултати који ће проистећи израдом ове докторске дисертације представљају значајан и оригинални допринос међународној научној заједници. Тема припада ужој научној области Обрада сигнала и примена модела машинског учења.

На основу свега предложеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета, Универзитета у Београду, као надлежном за научну област обраде сигнала и примена модела машинског учења, да кандидату Ани Додиг одобри израду докторске дисертације под називом „Модели машинског учења за просторно-временску предикцију вишеструких хидролошких параметара“ (енг. *Machine learning models for spatio-temporal prediction of multiple hydrological parameters*) под менторством др Сање Вујновић, ванредне професорке Електротехничког факултета, Универзитета у Београду.

Датум: 07.05.2025. године у Београду

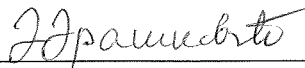
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Горан Квашчев, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Стојковић, виши научни сарадник
Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије



др Дражен Драшковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет