

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тачка 4. Статута Универзитета у Београду (“Гласник Универзитета у Београду” број 162/11, пречишћен текст, 167/12, 172/13 и 178/14), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

Зоран (Живко) Секулић, дипломирани инжењер

КАНДИДАТ: **Зоран Секулић** пријавио је докторску дисертацију под називом:

„Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“

Из научне области: **ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Универзитет је дана **26.08.2019.** године, својим актом **61206-3157/2-19.** дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

„ Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа “

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Зорана Секулића** образована је на седници Наставно-научног већа одржаној **29.06.2021.** године Одлуком Факултета под бр. **35/160.** у саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1. Др Катарина Тривунац	Доцент	Контрола квалитета
2. Др Александра Перић-Грујић	Редовни професор	Контрола квалитета
3. Др Антоније Оњица	Ванредни професор	Аналитичка хемија
4. Др Владимир Павићевић	Доцент	Инжењерство заштите животне средине
5. Др Тијана Урошевић	Доцент	Хемијско инжењерство

Студент је уписан на докторске студије школске 2012/2013. године.

На захтев студента, у складу са Статутом Универзитета у Београду и Статутом Факултета, декан је донео Решење бр. 20/157 од 28.09.2018. године о продужењу рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2020/2021. године.

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **08.07.2021. године.**

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

бр. 20/157

28 SEP 2018

БЕОГРАД

год.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду бр. 201/2018") и члана 76. став 1. и став 4. Статута Технолошко-металуршког факултета у Београду, као и захтева студента за продужење рока за завршетак студија Декан доноси

РЕШЕЊЕ

о продужењу рока за завршетак студија

Студенту ЗОРАНУ СЕКУЛИЋУ, број индекса 4027/2012, уписаном-ој у прву годину докторских академских студија школске 2012/2013. године продужава се рок за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2020/2021. године.

Поука о правном леку:

Против овог решења именовани-а може поднети жалбу Савету Факултета у року од 8 дана од дана пријема решења.

Доставити:

- Студенту;
- Служби за студентска питања;
- Општој служби – архиви.

ДЕКАН

Проф. др Борђе Јанаћковић



На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 08.07.2021. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Катарина Тривунац, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Александра Перић-Грујић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Антоније Оџић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Владимир Павићевић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Тијана Урошевић, доцент Универзитета у Београду, Пољопривредни факултет, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: „**Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће-микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа**“ коју је поднео **Зоран Секулић**, дипломирани инжењер и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Зорана Секулића, под називом „**Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће-микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа**“ Одлуком број: 61206-3157/2-19 од 26.08.2019. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија М22:

1. **Sekulić Z.**, Atanasijević D., Stevanović S., Trivunac K.: Application Of Artificial Neural Networks For Estimating Cd, Zn, Pb Removal Efficiency From Wastewater Using Complexation-Microfiltration Process, *International Journal of Environmental Science And Technology* vol. 14 no. 7, pp. 1383-1396, 2017 (ISSN 1735-1472, IF (2017) 2,037)
2. **Sekulić Z.**, Atanasijević D., Stevanović S., Trivunac K.: The Prediction of Heavy Metal Permeate Flux in Complexation-Microfiltration Process: Polynomial Neural Network Approach, *Water Air and Soil Pollution* vol. 230 no. 1, article number 23, 2019 <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4072-y> (ISSN 0049-6979, IF (2018) 1,769)

Категорија М64:

1. **Sekulić Z.**, Antanasijević D., Živković A., Petrović T., Kentera M., Stevanović S., Trivunac K.: “Predviđanje koeficijenta zadržavanja teških metala iz otpadnih voda kompleksirajuće-mikrofiltracionim procesom u prisustvu aminokiselina primenom veštačkih neuronskih mreža”, *Kratki izvodi radova/Knjiga radova* 57. savetovanje Srpskog hemijskog društva Kragujevac, Srbija 2021., pp. 69

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата дипл. инж. технологије Зорана Секулића.

Одлуком 35/160 бр. од 29.06.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Зорана Секулића под насловом

**ПРЕДВИЂАЊЕ СЕПАРАЦИОНИХ КАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКСИРАЈУЋЕ-
МИКРОФИЛТРАЦИОНОГ ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ
НЕУРОНСКИХ МРЕЖА**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

20.05.2019. – Кандидат Зоран Секулић пријавио је тему докторске дисертације, под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“.

30.05.2019. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука (бр. 35/189) о именовању чланова комисије за оцену подобности теме и кандидата Зорана Секулића, дипломираног инжењера технологије за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом: „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“.

04.07.2019. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о прихватању Реферата комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације. За ментора је именована др Катарина Тривунац, доцент (одлука бр. 35/225).

26.08.2019. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације Зорана Секулића, дипломираног инжењера технологије под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“ (одлука бр. 61206-3157/2-19).

Кандидат Зоран Секулић, дипломирани инжењер технологије (број индекса 4027/2012) уписан је на докторске академске студије школске 2012/2013. године на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду, научна област Инжењерство заштите животне средине, ужа научна област Инжењерство заштите животне средине.

28.09.2018. - Решењем бр. 20/157 продужен је рок за завршетак докторских студија кандидата Зорана Секулића, до истека троструког броја школских година, односно до краја школске 2020/2021 године.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања рађена у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области инжењерство заштите животне средине, ужа научна област инжењерство заштите животне средине за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментор др Катарина Тривунац, доцент ТМФ-а је на основу досадашњих објављених радова и искуства компетентна да руководи израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Зоран Ж. Секулић, рођен је 2.7.1982. у Пакрацу, Република Хрватска. Средњу хемијску и прехрамбену школу завршио је у Београду. Уписао је Технолошко-металуршки факултет 2000. године, смер Неорганска хемијска технологија (контрола квалитета). Дипломирао је 2009. године код проф. др Славице Стевановић на Катедри за аналитичку хемију са радом „Примена полиакрилних мембрана за уклањање јона цинка комбинованом комплексирајуће – микрофилтрационом методом“.

Докторске студије уписао је у октобру 2012. године, студијски програм Инжењерство заштите животне средине. Положио је све испите предвиђене планом докторских студија и одбранио завршни испит под називом „Развој модела за предвиђање емисије киселих оксида у ваздуху применом вештачких неуронских мрежа“ оценом 10.

Запослен је у Градском заводу за јавно здравље Београд, као здравствени сарадник - аналитичар у екотоксиколошкој лабораторији и поред тога као заменик руководиоца за системе квалитета (9001/14001/17025). Поред стручних послова Зоран Секулић се бави научно-истраживачким радом у оквиру завода.

Област научноистраживачког рада Зорана Секулића је усмерена на проблеме заштите животне средине (ваздуха, воде, земљишта) као и начине праћења и предвиђања концентрације загађујућих материја. Посебан интерес обухвата примену мембранских филтрационих процеса за уклањање тешких метала из отпадне воде и примену неуронских мрежа за предвиђање флуksа и коефицијента задржавања.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Зорана Секулића, дипломираног инжењера технологије под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“ садржи 160 страна (од којих је 145 нумерисано) у оквиру којих се налази седам поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература и Прилог. Дисертација садржи 39 слика, 25 табела (3 у прилогу) и 166 литературних навода. На почетку дисертације дат је Извод (на српском и енглеском језику), Листа скраћеница и симбола, Списак слика, Списак табела и Садржај. У оквиру Прилога, дата је Биографија аутора, Изјава о ауторству,

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије, Изјава о коришћењу и Изјава о оригиналности тезе. По форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу је указано на проблематику загађења отпадних и природних вода са тешким металима и значај примене еколошки и енергетски повољних мембранских сепарационих процеса у третману вода. Представљени су предмет и циљеви дисертације који се односе на моделовање комплексирајуће-микрофилтрационог процеса уклањања тешких метала из воде и предвиђање сепарационих карактеристика помоћу вештачких неуронских мрежа, што би могло да буде од значаја за експлоатацију и индустријску примену ових процеса.

Теоријски део докторске дисертације се састоји из три целине: Вода у природи, Мембрански филтрациони процеси и Вештачке неуронске мреже. Прва целина је посвећена улози воде у сваком аспекту живота и резултатима њене примене од стране човека. Дефинисане су најзначајније загађујуће материје које утичу на састав и квалитет воде, а посебно је обрађен утицај тешких метала на животну средину и јавно здравље. Сагледане су предности и недостаци различитих метода које се користе за пречишћавање отпадних вода и смањење концентрације тешких метала до нивоа прописаних законским регулативама. У другој целини су дати теоријски основи мембранских филтрационих процеса који су последњих година незаменљиве компоненте у погонима за прераду отпадне воде и припрему воде за пиће и за индустрију. Посебан осврт је дат на микрофилтрацију и параметре који се користе за карактеризацију овог процеса. Приказани су и класични математички модели за предвиђање флукаса. Преглед литературе и научних истраживања, која се односе на коришћење комбинованог процеса за уклањање загађујућих материја из отпадних вода и могуће механизме везивања јона метала са изабраним комплексирајућим агенсима на бази целулозе или аминокиселина, указује на значај и актуелност проучавање проблематике. С обзиром на сложену природу комплексирајуће-микрофилтрационог процеса у трећој целини теоријског дела су описани основни делови вештачких неуронских мрежа - ANN (*eng.* Artificial Neural Networks) и њихов начин рада, класификација и начини селекције улазних променљивих. Дат је детаљан преглед литературе која се односи на досадашња истраживања могућности моделовања и примене вештачких неуронских мрежа у области микрофилтрације и ултрафилтрације.

У експерименталном делу докторске дисертације дати су подаци о коришћеној опреми и материјалима и опис експеримента за одређивање коефицијента задржавања јона тешких метала и вредности флукаса у процесу комплексирајуће-микрофилтрације. Шематски је приказан план експерименталног рада – испитивање утицаја примењеног притиска (P), pH вредности воденог раствора, почетне концентрације јона тешких метала (C_{ME}), комплексирајућег агенса (C_{KA}) и једињења на бази аминокиселине (C_{AK}). У другом делу истраживања добијени експериментални резултати су искоришћени за предвиђање коефицијента задржавања и флукаса пермеата. Детаљно је описана методологија развоја модела заснованог на вештачким неуронским мрежама (припрема података, раздвајање података, избор архитектуре вештачке мреже, избор критеријума заустављања учења) и индекси перформанси модела помоћу којих је извршена евалуација успешности развијених модела. На крају поглавља је дат шематски приказ тока предвиђања коришћењем вештачких неуронских мрежа.

У поглављу Резултати и дискусија који је организован у три целине, извршена је анализа и дискусија експерименталних резултата. Такође је детаљно приказана методологија развоја ANN модела: одабир улазних променљивих и припрема података, развој и оптимизација неуронске мреже, примена метода за одабир улазних променљивих, као и анализа значајности појединих улазних променљивих и анализа перформанси развијених модела. У

првом делу приказани су резултати испитивања утицаја различитих реакционих параметара (притиска, рН, почетне концентрације метала, концентрације комплексирајућег агенса) током комплексирајуће-микрофилтрације на флуks пермеата. Показано је да процес комплексирања а тиме и вредност флуksа зависе од рН вредности и концентрације комплексирајућег агенса. Због релативно малог сета расположивих улазних величина за моделовање је одабрана архитектура Групна метода управљања подацима - ГМДХ (*eng. Group method data handling*) и добијена је једначина полинома који се користи за предвиђање излазне величине уношењем улазних параметара у исти. Да би модел могао да разликује податке за сваки метал, поред радних параметара као улазне величине одабрани су и карактеристични параметри. Поређење резултата предвиђања са резултатима добијеним применом најчешће коришћеног модела вишеструке линеарне регресије - MLR (*eng. Multiple linear regression*) показало је да се GMDH може успешно искористити за предвиђање флуksа. Успешност модела доказана је и статистичком анализом индикатора перформанси модела. У другом делу приказани су резултати испитивања утицаја различитих реакционих параметара на коефицијент задржавања јона метала. На основу добијених вредности закључено је да се комплексирање одвија боље при рН>7 за оба комплексирајућа агенса. Приликом промене притиска и почетне концентрације метала (у опсегу од 30,0 до 70,0 mg/dm³) не долази до повећања коефицијента задржавања. Са повећањем концентрације комплексирајућег агенса у опсегу од 35,0 до 110,0 mg/dm³ коефицијент задржавања расте, због пораста броја могућих места за везивања јона тешких метала. Због већег броја експерименталних података, прогнозирање коефицијента задржавања вршено је применом два модела Неуронска мрежа са пропагацијом грешке уназад - BPNN (*eng. Backpropagation neural network*) и Неуронска мрежа са општом регресијом - GRNN (*eng. General regression neural network*). Након корелационе анализе и израчунатих појединачних фактора уједначавања - ISF (*eng. Individual smoothing factor*), девет улаза задовољава задате критеријуме (довољно мало корелише међу улазним величинама и довољно корелише са излазној величини). Израчунат је и остварени утицај сваке улазне променљиве у систему BPNN мреже и закључено да највећу важност има концентрација у пермеату а затим моларна маса, концентрација комплексирајућег агенса и притисак. Користила су се два приступа за прогнозирање, први је био да се прогнозирање коефицијента задржавања врши коришћењем свих прикупљених података и насумичним избором 10 % ради евалуације модела. Резултати предвиђања добијени су са грешком у опсегу од 4 – 8 % за GRNN модел и од 2 – 4 % за BPNN. Анализом осталих индикатора перформанси утврдило се да BPNN има само 4 % средње релативне грешке - MAPE (*eng. The Mean Absolute Percentage Error*) и 2,8 % грешке корена средњег квадрата – RMSE (*eng. Root Mean Squared Error*), док са друге стране GRNN има MAPE од 6 % и RMSE од 4,72 % што јесте лошији резултат али је и даље у границама критеријума са врло dobrим резултатима. У другом приступу испитивана је могућност прогнозирање коефицијента задржавања тако што је модел научен помоћу података за друга два метала. Када су подаци непознатог метала ван опсега података метала са којим је модел учио (случај екстраполисања), GRNN модел није приказао задовољавајуће резултате, док је BPNN модел приказао прихватљиве резултате предвиђања, са MAPE 12-18 % и 9-12 % респективно. Са друге стране када су подаци непознатог метала у границама података метала са којима се модел учио (случај интерполисања), добијени бољи резултати предвиђања, MAPE у границама 6-9 % и закључено да је боље учити моделе у што ширем опсегу улазних података како би се успешно предвидели резултати непознатог метала. У трећем делу приказани су резултати испитивања утицаја аминокиселина/дипептида/протеина на коефицијент задржавања јона метала и поспешивање процеса комплексирања додавањем колиганда. Показано је да са порастом рН раствора расте коефицијент задржавања. Главни разлог је померање равнотеже и прелазак молекула аминокиселине у анјонски облик након изоелектричне тачке чиме је омогућено веће везивање катјона метала. Велику улогу у везивању јона метала има бочни низ код аминокиселина. Повећање концентрације јона метала у раствору није имало велики утицај на промену коефицијента задржавања, док је повећање концентрације

комплексирајућег агенса натријум-карбоксиметил целулозе у присуству цистеина, хистидина или глицил-глицина утицало на повећање коефицијента задржавања олова. Повећање концентрације цистеина у растворима олова и комплексирајућег средства доводи до смањења коефицијента задржавања, док у случају кадмијума долази до пораста услед великог афинитета кадмијума према сумпору. Корелационом анализом потврђено је да највећи утицај на излазну величину има прва енергија јонизације, моларне масе метала и комплексирајућег агенса, притисак и рН вредност. ISF анализом потврђен је резултат корелационе анализе и прогнозирање коефицијента задржавања рађено је избором истих архитектура, BPNN и GRNN, као у експерименту без додавања аминокиселине. Поређењем примењена два модела уочава се да и у случају додавања аминокиселине и појаве конкуренције са комплексирајућим агенсом, BPNN модел и даље приказује боље резултате предвиђања у односу на GRNN модел. Графичким приказом резултата и на основу коефицијента детерминације r^2 већим од 0,75 за оба модела може се закључити да су модели били успешни и у границама прихватљивог.

Закључак садржи концизно сумиране резултате добијене током истраживања у овој докторској дисертацији а који одговарају постављеним циљевима дисертације.

У поглављу Литература, наведен је списак свих литературних навода који су цитирани у тексту докторске дисертације. Прилог садржи додатне експерименталне податке у виду табела и слика добијених у оквиру проучавања описаних у делу Резултати и дискусија

На крају дисертације приложена је кратка биографија кандидата, прилози са Изјавом о ауторству, Изјавом о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјавом о коришћењу, као и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације, потписана од стране ментора.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Загађење животне средине, посебно воде, тешким металима представља озбиљну претњу с обзиром на токсичне ефекте које могу имати, како на биљке и животиње, тако и на човека. Мембрански процеси се све више користе у области заштите животне средине као и за припрему и прераду воде за потребе прехранбене и фармацеутске индустрије, петрохемије и др. Ефикасност, поузданост и релативно ниски трошкови сепарације утицали су на све масовнију примену мембранских система. Такође, да би се повећала ефикасност и селективност процеса развијају се нове, хибридне методе. Једна од њих је комплексирајуће-микрофилтрациона метода код које се мали јони метала везују са макромолекулима великих молекулских маса, чиме се може постићи висок флуks и проток пречишћене воде и висок коефицијент задржавања јона метала. Избором селективног комплексирајућег средства могуће је остварити селективно раздвајање више јонских врста. Успешност комплексирања као и спречавање пада флуksа зависи од услова процеса и различитих радних параметара. Да би овај процес био применљив у пракси потребно је остварити висок флуks и проток пречишћене воде и висок коефицијент задржавања јона метала. Стога би могућност предвиђања сепарационих карактеристика у систему била од изузетног значаја. Како су међусобне везе у систему јон метала – макромолекул – мембрана нелинеарне и недовољно дефинисане, одређени математички модели за предвиђање вредности флуksа нису задовољавајући и не могу описати све области у којима се одвија процес. Због тога се истражује моделовање мембранских процеса применом вештачких неуронских мрежа.

Оригиналност докторске дисертације Зорана Ж. Секулића огледа се у дефинисању оптималних радних параметара као и међусобног утицаја комплексирајућег агенса и колиганда на бази аминокиселина у процесу уклањања јона тешких метала комплексирајуће-микрофилтрационим поступком. Показало се да на ефикасност процеса велику улогу има бочни низ код аминокиселина и да присуство сумпора или додатног азота може имати улогу

у селективном везивању јона метала као што су кадмијум и олово. Такође, по први пут су прогнозиране сепарационе карактеристике комплексирајуће-микрофилтрационих процеса при статичном трансферзалном току применом вештачких неуронских мрежа. Предвиђањем сепарационих карактеристика у систему могуће је смањити број експеримената и добити добру базу за комерцијалну примену оваквих процеса у области пречишћавања отпадне воде. На основу детаљног увида у предметну докторску дисертацију, остварене резултате и научну литературу може се закључити да ова истраживања прате светске трендове и указују на значај и актуелност проучавање проблематике.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде дисертације кандидат је прегледао литературу која се односи на утицај тешких метала на животну средину, затим на карактеристике отпадних вода и методе за уклањање тешких метала са посебним освртом на мембранске сепарационе процесе и комбиноване ултра/микрофилтрационе процесе и на крају примену вештачких неуронских мрежа на моделовање мембранских процеса. У оквиру докторске дисертације цитирано је 166 литературних навода, од којих највећи број чине најновији радови из међународних часописа са тематиком значајном за израду докторске дисертације. Истраживања приказана у наведеним референцама су коришћена за постављање полазних хипотеза, планирање експерименталног рада, анализу и тумачење резултата добијених током израде докторске дисертације као и извођење закључака. Прегледана обимна литература и објављени радови кандидата указују на актуелност истраживања и адекватно познавање предметне области истраживања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У овој докторској дисертацији примењене су савремене научне методе за испитивање ефикасности комплексирајуће-микрофилтрационе методе за сепарацију јона тешких метала из воде. Концентрација јона метала у пермеату након микрофилтрације и аминокиселина/дипептида/протеина одређене су атомском апсорпционом спектроскопијом - AAS, ултра-љубичастом и видљивом спектрофотометријом - UV-VIS и индуковано спрегнутом плазмом са атомском емисионом спектроскопијом - ICP-OES. За моделовање комплексирајуће-микрофилтрационог процеса примењене су различите архитектуре вештачких неуронских мрежа: Неуронска мрежа са пропагацијом грешке уназад (енг. Backpropagation Neural Network - BPNN), Неуронска мрежа са општом регресијом (енг. General Regression Neural Network - GRNN) и Полиномална неуронска мрежа (енг. Polynomial Neural Network, PNN). Анализа перформанси модела вршена је тестирањем развијених модела кроз поређење моделованих и измерених вредности концентрација јона тешких метала и кроз поређење са линеарним моделима. Коришћени су статистички индикатори перформансе модела: индекс слагања (IA) и унапређени индекс слагања (dr), проценат предвиђених вредности у оквиру фактора 1,25 (FA1,25), средња апсолутна грешка (MAE), корен средње квадратне грешке (RMSE), средња апсолутна грешка у процентима (MAPE) и проценат пристрасности (PBIAS).

3.4. Применљивост остварених резултата

На основу објављених литературних података из ове области, експерименталних испитивања и добијених резултата из овог рада, остварен је велики допринос у развоју хибридних мембранских процеса за уклањање јона тешких метала из воде. Подаци добијени испитивањем ефеката радних параметара на ефикасност и селективност микрофилтрационих процеса су важни са аспекта потенцијалне примене испитиваних комплексирајућих агенаса у пречишћавању контаминираних вода. Развијени модели вештачких неуронских мрежа за

предвиђање сепарационих карактеристика испитиваног процеса дају боље резултате у поређењу са конвенционалним моделима моделовања. Предвиђањем сепарационих карактеристика у систему могуће је смањити број експеримената и добити добру базу за комерцијалну примену комплексирајуће-микрофилтрационих процеса у области пречишћавања отпадне воде. Верификација резултата је потврђена и од стране међународне научне јавности, објављивањем у водећим међународним часописима из домена ове проблематике.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Зоран Секулић, дипломирани инжењер технологије је током припреме и реализације експеримената, обраде експерименталних података и резултата, анализе и моделовања добијених резултата, у оквиру израде докторске дисертације, показао стручност, ангажованост и систематичност. Комисија сматра да кандидат поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Резултати истраживања у оквиру ове дисертације омогућиће проширење научног и практичног знања из области заштите животне средине и контроле квалитета. Најзначајнији научни доприноси, проистекли као резултат докторске дисертације обухватају:

- извршен је избор оптималних параметара комплексирајуће-микрофилтрационог процеса. Увођењем једињења на бази аминокиселина у систем постиже се селективност комплексирања тешких метала као последица присуства различитих функционалних група у бочном низу аминокиселине/дипептида/протеина;
- развијена је, тестирана и примењена метода заснована на вештачким неуронским мрежама за предвиђање флуksа пермеата;
- развијене су и тестиране две методе засноване на вештачким неуронским мрежама за предвиђање коефицијента задржавања јона тешких метала;
- извршена је детаљна анализа перформанси развијених модела коришћењем одговарајућих статистичких показатеља;
- најбољи модели засновани на вештачким неуронским мрежама упоређени су са одговарајућим линеарним математичким моделима;
- показано је да се модели могу користити за предвиђање вредности сепарационих карактеристика комплексирајуће-микрофилтрационог процеса за уклањање јона тешких метала а добијени подаци могу бити од суштинског значаја за екстраполацију третмана у реалним условима ван лабораторије.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације су осмишљена на основу дефинисаних циљева и детаљне анализе литературе из области примене и моделовања комплексирајуће-микрофилтрационог процеса за пречишћавање воде. Методе примењене у изради докторске дисертације у складу су са савременим методама и показују мултидисциплинарни приступ истраживању. Прегледом новије доступне литературе, која разматра примену комплексирајуће-микрофилтрационих процеса за пречишћавање воде, може се уочити да је даљи правац истраживања усмерен на ефикасност и селективност комплексирајућег агенса. Увођење колиганда односно аминокиселина довело је до повећања селективности у односу на јоне олова и кадмијума сходно афинитетима ових метала према одређеним елементима у бочном низу. Комплексирајућа-микрофилтрација са статичким током је комплексан процес са недовољно дефинисаним релацијама унутар система па је тешко математички описати. Моделовање и предвиђање сепарационих карактеристика статичног трансферзалног тока применом вештачких неуронских мрежа омогућава сагледавање могућности процеса за даљи развој и унапређење. Увидом у доступну литературу и резултате истраживања добијене у овој докторској дисертацији може се установити да су резултати значајни са научног аспекта и дају јасан допринос у области побољшања квалитета животне средине применом унапређене комплексирајуће-микрофилтрационе методе.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Зоран Секулић је резултате добијене у току израде ове дисертације потврдио објављивањем два рада у истакнутим часописима међународног значаја (M22) и саопштавањем рада на националном скупу (M64). Након извршене провере оригиналности поднете тезе, извештај указује на оригиналан допринос докторске дисертације.

Категорија M22:

1. **Sekulić Z.**, Atanasijević D., Stevanović S., Trivunac K.: Application Of Artificial Neural Networks For Estimating Cd, Zn, Pb Removal Efficiency From Wastewater Using Complexation-Microfiltration Process, *International Journal of Environmental Science And Technology* vol. 14 no. 7, pp. 1383-1396, 2017 (ISSN 1735-1472, IF (2017) 2,037)
2. **Sekulić Z.**, Atanasijević D., Stevanović S., Trivunac K.: The Prediction of Heavy Metal Permeate Flux in Complexation-Microfiltration Process: Polynomial Neural Network Approach, *Water Air and Soil Pollution* vol. 230 no. 1, article number 23, 2019 <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4072-y> (ISSN 0049-6979, IF (2018) 1,769)

Категорија M64:

1. **Sekulić Z.**, Antanasijević D., Živković A., Petrović T., Kentera M., Stevanović S., Trivunac K.: “Predviđanje koeficijenta zadržavanja teških metala iz otpadnih voda kompleksirajuće-mikrofiltracionim procesom u prisustvu aminokiselina primenom veštačkih neuronskih mreža”, *Kratki izvodi radova/Knjiga radova* 57. savetovanje Srpskog hemijskog društva Kragujevac, Srbija 2021., pp. 69

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Зорана Секулића, дипломираног инжењера технологије под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“ представља оригинални научни допринос предметне области истраживања, што је потврђено, између осталог и објављивањем радова у релевантним часописима међународног значаја, као и презентовањем резултата истраживања на конференцији националног значаја. Постављени предмет и циљеви докторске дисертације у потпуности су остварени, на основу чега Комисија износи мишљење да докторска дисертација под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“, испуњава све захтеване критеријуме.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду да прихвати овај Реферат, пружи на увид јавности поднету докторску дисертацију кандидата Зорана Секулића, дипломираног инжењера технологије под називом „Предвиђање сепарационих карактеристика комплексирајуће–микрофилтрационог процеса применом вештачких неуронских мрежа“ у законом предвиђеном року, као и да Реферат упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, и да се након завршене процедуре, кандидат позове на усмену одбрану докторске дисертације пред Комисијом у истом саставу.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Катарина Тривунац, доцент
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Александра Перић-Грујић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Антоније Оџија, ванредни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Владимир Павићевић, доцент
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Тијана Урошевић, доцент
Универзитет у Београду, Пољопривредни факултет