

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

ПРЕДМЕТ: Извештај комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње **Невене Радивојевић**, мастер биохемичара, студента докторских студија на Хемијском факултету Универзитета у Београду и истраживача-сарадника Института за нуклеарне науке „Винча“, Института од националног значаја за Републику Србију, Универзитета у Београду.

На редовној седници Наставно-научног већа Хемијског факултета, Универзитета у Београду, одржаној 10.9.2026. године (одлука бр. 950/7), изабрани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње **Невене Радивојевић**, мастер биохемичара, студента докторских студија на Хемијском факултету Универзитета у Београду и истраживача-сарадника Института за нуклеарне науке Винча, Института од националног значаја за Републику Србију, Универзитета у Београду, под називом:

„Синтеза и карактеризација наноматеријала добијених коришћењем *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за примену у третману загађених вода“

Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је дало сагласност о прихватању теме докторске дисертације на седници одржаној дана 26.2.2026. године, (одлука бр. 61206-660/2-26).

Комисија је докторску дисертацију прегледала и Наставно-научном већу Хемијског факултета, Универзитета у Београду подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација Невене Радивојевић, под називом „Синтеза и карактеризација наноматеријала добијених коришћењем *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за примену у третману загађених вода“, написана је на српском језику и обухвата укупно 150 страна. Основни текст је писан фонтом Times New Roman величине 12 pt, уз маргине од 2 cm, при чему су поједине странице са табеларним и графичким приказима постављене у пејзажној оријентацији. Дисертација садржи 26 слика и 24 табеле. У погледу структуре, дисертација обухвата шест основних поглавља, која су даље организована у одговарајуће тематске целине, и то на следећи начин: Поглавље 1 – Увод (2 стране), Поглавље 2 – Теоријске основе (27 страна), Поглавље 3 – Циљеви истраживања и структура докторске дисертације (2 стране), Поглавље 4 – Експериментални део (10 страна), Поглавље 5 – Резултати и дискусија (75 страна), Поглавље 6 – Закључак (3 стране). Поред наведеног, дисертација садржи Насловну страну на српском и енглеском језику (2 стране), податке о менторима и члановима комисије (1 страна), Захвалницу (2 стране), Сажетак на српском и енглеском језику (по 2 стране), Садржај (2 стране), Литературу (16 страна), као и Прилоге који обухватају Биографију

кандидаткиње (1 страна), Изјаву о ауторству (1 страна), Изјаву о истоветности (1 страна) и Изјаву о коришћењу (2 стране). Дисертација је по својој структури и садржају у складу са стандардима прописаним од стране Универзитета у Београду.

Дисертација је структурно организована тако да се од општег теоријског оквира и дефинисања циљева истраживања, преко детаљно описаног експерименталног приступа, долази до систематичног приказа и тумачења резултата, након чега су изведени закључци који обједињују оба истраживачка правца.

Увод садржи приказ значаја и актуелности примене наноматеријала у савременој науци, са посебним освртом на развој одрживих и еколошки прихватљивих поступака њихове синтезе. Представљен је значај биљних екстраката као природних редукционих и стабилизационих агенаса за зелену синтезу металних наночестица, као и потенцијал биљне биомасе као обновљивог извора угљеника за добијање функционалних порозних материјала. Посебна пажња посвећена је сребрним наночестицама, њиховим физичкохемијским и биолошким својствима, као и њиховом потенцијалу за примену у различитим областима. У наставку увода разматран је значај угљеничних материјала добијених из биомасе за уклањање загађивача из водених система, са посебним освртом на катјонске боје.

Теоријске основе дисертације обухватају пет главних тематских целина. У првој целини, „Наноматеријали и њихов значај у савременој науци и технологији“, приказане су основне карактеристике, класификација и својства наноматеријала, као и њихова примена у различитим областима, укључујући биомедицину, енергетику, технологију и заштиту животне средине. Друга целина, „Одрживи и еколошки прихватљиви приступи синтези наноматеријала“, посвећена је принципима зелене хемије, коришћењу обновљивих сировина и биомасе, као и значају циркуларне економије у развоју одрживих поступака синтезе. У оквиру треће целине, „Сребрне наночестице“, разматране су основне карактеристике AgNPs, методе њихове синтезе, оптичка својства и различите области примене. Посебне тематске целине посвећене су улози биљних материјала у зеленој синтези сребрних наночестица, као и њиховим биохемијским ефектима, укључујући цитотоксичне и генотоксичне ефекте, оксидативни стрес, индукцију апоптозе и утицај на активност ацетилхолинестеразе. Четврта целина теоријских основа посвећена је угљеничним материјалима. Размотрени су угљенични материјали добијени карбонизацијом биомасе, утицај услова карбонизације на њихову структуру и својства, као и могућности њихове примене у заштити животне средине. Посебно су разматране катјонске боје као значајна група загађивача водених система, као и различите методе њиховог уклањања из воде. Пета целина обухвата основне принципе адсорпције на чврстој површини, са посебним освртом на кинетику адсорпције и адсорпционе изотерме. На овај начин је у теоријском делу успостављена основа за разумевање односа између структуре и површинских својстава синтетисаних материјала и њихове функционалности у испитиваним системима.

Поглавље „**Циљеви истраживања и структура докторске дисертације**“ дефинише основни научни циљ рада, који се односи на развој интегрисаног и одрживог приступа коришћењу биомасе биљних врста *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за добијање функционалних материјала различите намене. Концепт истраживања заснован је на сукцесивном искоришћењу истог биљног прекурсора: етанолни екстракти коришћени су за зелену синтезу AgNPs, док су чврсти остаци након екстракције даље коришћени за добијање угљеничних материјала карбонизацијом. У овом поглављу дефинисани су и појединачни циљеви који се односе на оптимизацију синтезе и карактеризацију AgNPs, испитивање њихових биолошких ефеката, као и на синтезу, карактеризацију и испитивање адсорпционих својстава угљеничних материјала.

Експериментални део садржи систематичан приказ коришћеног материјала, експерименталних поступака, метода карактеризације и опреме примењене током истраживања. У оквиру дела који се односи на материјал описана је припрема етанолних екстраката, синтеза сребрних наночестица и синтеза угљеничних материјала карбонизацијом биљних остатака. Карактеризација синтетисаних AgNPs извршена је применом UV-Vis

спектроскопије, SEM/EDX анализе, XRD, FTIR спектроскопије, динамичког расипања светлости, мерења зета потенцијала и ICP-OES анализе. Испитивања биохемијских ефеката обухватила су испитивање цитотоксичног и генотоксичног потенцијала на хуманим ћелијским линијама, анализу продукције реактивних врста кисеоника, цитокинезис-блок микронуклеус тест, одређивање пролиферативног индекса, анализу апоптозе као и испитивање утицаја наночестица на активност ацетилхолинестеразе. За угљеничне материјале примењене су методе SEM/EDX, FTIR, XRD, BET/NLDFT и мерење зета потенцијала, док су адсорпциони експерименти спроведени у стационарним и динамичким условима, укључујући испитивање регенерације и поновне употребе адсорбенса.

У поглављу „**Резултати и дискусија**“ приказани су и детаљно анализирани резултати истраживања. Поглавље је организовано у четири основне тематске целине: физичкохемијска карактеризација синтетисаних наночестица сребра, биохемијски ефекти наночестица сребра, физичкохемијска карактеризација угљеничних материјала и адсорпција катјонских боја на синтетисане материјале. У првој целини разматрана су оптичка, структурна, морфолошка и површинска својства AgNPs добијених коришћењем екстраката три одабране биљне врсте. Присуство карактеристичних максимума локализоване површинске плазмоне резонанце у области 400-415 nm, као и дифракционих максимума карактеристичних за површински центрирану кубну структуру металног сребра, потврдило је успешну синтезу кристалних AgNPs. Утврђено је да су добијене наночестице претежно сферичне, али да се системи разликују у степену агрегације, хидродинамичкој величини и колоидној стабилности. Посебно се издвојио AS-Ag као најфиније диспергован и електростатички најстабилнији систем, док је JR-Ag показао већу склоност ка агрегацији.

У делу који се односи на биохемијске ефекте AgNPs испитиван је њихов утицај на хумане ћелијске линије нормалног и туморског порекла, и то TK6, MRC-5, HeLa и A549. Анализирани су продукција реактивних врста кисеоника, ћелијска вијабилност и пролиферација, генотоксичност применом цитокинезис-блок микронуклеус теста, индукција апоптозе и утицај на активност ацетилхолинестеразе. Резултати су показали да биолошки одговор зависи од врсте биљног прекурсора, концентрације наночестица и коришћеног ћелијског модела. JR-Ag је на TK6 ћелијама показао најизраженији цитотоксични потенцијал, SI-Ag је испољио конзистентан концентрационо-зависан генотоксични и цитостатски одговор, док су ефекти AS-Ag генерално били блажи. Све три врсте AgNPs индуковале су апоптозу, али различитим интензитетом и концентрационим обрасцима. Истовремено, промене нивоа ROS нису у свим системима непосредно пратиле степен цитотоксичности и апоптозе, што указује на сложеност механизма ћелијског одговора. Испитивање активности ацетилхолинестеразе показало је изражен инхибиторни ефекат SI-Ag и JR-Ag, док је ефекат AS-Ag био знатно блажи.

У делу посвећеном угљеничним материјалима приказани су резултати добијени карбонизацијом чврстих остатака биљних прекурсора на температурама од 400 °C и 900 °C. Показано је да температура карбонизације има кључан утицај на развој порозне структуре и површинских својстава материјала. Повећањем температуре са 400 °C на 900 °C дошло је до значајног повећања специфичне површине и запремине пора, као и преласка ка доминантно микропорозној структури. Специфичне површине материјала SI900, JR900 и AS900 износиле су 295, 790 и 177 m² g⁻¹, редом, при чему се JR900 издвојио највећом специфичном површином и најизраженијим развојем микропорозности. Резултати су истовремено показали да природа почетне биомасе значајно утиче на коначна структурна и површинска својства добијених угљеничних материјала.

Адсорпциона својства добијених угљеничних материјала испитивана су коришћењем метиленског плавог, родамина В, кристално љубичастог и малахитно зеленог као модел катјонских загађујућих супстанци. Анализиран је утицај pH вредности, температуре, концентрације адсорбенса и времена контакта, као и кинетика и равнотежа адсорпције и механизми интеракције између адсорбенса и адсорбата. Материјали карбонизовани на 900 °C показали су генерално бржу кинетику и веће адсорпционе капацитете у односу на одговарајуће материјале добијене на 400 °C. Показано је да адсорпциона ефикасност није одређена само

специфичном површином, већ и доступношћу пора, ефективним попречним пресеком, тродимензионалном геометријом и конформационом флексибилношћу адсорбата, као и π - π , електростатичким, хидрофобним и дисперзионим интеракцијама и водоничним везама. Адсорпција испитиваних боја била је доминантно физичке природе.

Посебан део резултата посвећен је испитивању адсорпције у динамичким условима, регенерацији и поновној употреби одабраних угљеничних материјала. Испитивање је спроведено кроз пет адсорпционо-десорпционих циклуса, при чему су боје након адсорпције десорбоване 50% раствором етанола. На тај начин омогућени су регенерација адсорбенса, његова поновна употреба и издвајање адсорбованих боја. SI900 се издвојио као најуниверзалнији материјал за вишецикличну примену, док је JR900 показао изражену селективност према родамину В, за који су постигнуте практично потпуна адсорпција и готово квантитативна регенерација током поновљених циклуса. Ови резултати показују да велика специфична површина и висока почетна адсорпциона ефикасност саме по себи нису довољни показатељи практичне применљивости адсорбенса, већ је неопходно узети у обзир и ефикасност десорпције, регенерацију и очување функционалних својстава материјала током поновљене употребе.

У поглављу „Закључак“ сумирани су најважнији резултати и изведени основни научни закључци проистекли из истраживања. Потврђено је да се исти биљни прекурсор може сукцесивно користити као извор биоактивних компоненти за зелену синтезу AgNPs и као извор угљеника за добијање функционалних адсорбенса. Показано је да врста почетне биомасе значајно утиче на физикохемијска и биолошка својства AgNPs, као и на структурна, површинска, адсорпциона и регенерациона својства угљеничних материјала. На основу добијених резултата закључено је да избором биљног прекурсора и контролом услова синтезе и карбонизације могу да се добију функционални материјали различитих својстава и потенцијалних примена. Посебан научни допринос представља успостављање интегрисаног концепта сукцесивног коришћења исте биљне биомасе за добијање две класе функционалних материјала, као и сагледавање адсорпционог процеса кроз целокупан циклус који обухвата адсорпцију, десорпцију, регенерацију и поновну употребу адсорбенса.

У делу „Литература“ наведени су релевантни научни извори коришћени у теоријском и експерименталном делу дисертације.

Б. Кратак опис истраживања

У овој докторској дисертацији развијен је интегрисан и одржив приступ искоришћењу биомасе биљних врста *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за добијање функционалних наноматеријала различите намене. Основна специфичност истраживања огледа се у сукцесивном коришћењу исте биљне биомасе, при чему су етанолни екстракти коришћени као природни редукциони и стабилизациони агенси за зелену синтезу сребрних наночестица, док су чврсти остаци преостали након екстракције даље коришћени као прекурсори за добијање угљеничних материјала карбонизацијом. На овај начин је успостављен концепт потпунијег искоришћења обновљивог биљног ресурса, којим се из истог полазног материјала добијају две класе функционалних материјала, у складу са принципима зелене хемије, циркуларне економије и одрживог развоја.

У првом делу истраживања успешно је спроведена зелена синтеза AgNPs коришћењем етанолних екстраката *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum*. Детаљна физикохемијска карактеризација синтетисаних SI-Ag, JR-Ag и AS-Ag наночестица применом UV-Vis спектроскопије, SEM/EDX анализе, XRD, FTIR спектроскопије, динамичког расипања светлости, мерења зета потенцијала и ICP-OES анализе потврдила је успешно формирање кристалних наночестица сребра. Утврђено је да биљни прекурсор значајно утиче на величину, расподелу величина, степен агрегације и колоидну стабилност добијених наночестица, што указује на значај фитохемијског састава екстракта у контроли својстава материјала. Посебно

се издвојио AS-Ag као систем са најфинијом дисперзијом и најизраженијом колоидном стабилношћу, док је код JR-Ag уочена већа склоност ка агрегацији.

У оквиру биолошке карактеризације испитан је утицај синтетисаних AgNPs на хуманим здравим (TK6 и MRC-5) и туморским (HeLa и A549) ћелијским линијама. Анализирани су продукција реактивних врста кисеоника, ћелијска вијабилност и пролиферација, генотоксичност применом цитокинезис-блок микронуклеус теста, пролиферативни индекс, индукција апоптозе, као и утицај наночестица на активност ацетилхолинестеразе. Добијени резултати показали су да биолошки одговор зависи од врсте биљног прекурсора, концентрације наночестица и типа ћелијског модела. JR-Ag је на TK6 ћелијама показао најизраженији цитотоксични потенцијал, док је SI-Ag испољио конзистентан концентрационо-зависан генотоксични и цитостатски ефекат. AS-Ag је генерално показивао блаже ефекте у односу на SI-Ag и JR-Ag. Све три врсте AgNPs индуковале су апоптозу, али различитим интензитетом и са различитим концентрационим обрасцима. Истовремено, промене нивоа ROS нису у свим испитиваним системима непосредно пратиле степен цитотоксичности и апоптозе, што указује на сложеност механизма ћелијског одговора на зелено синтетисане AgNPs.

Испитивањем утицаја синтетисаних AgNPs на AChE је утврђено да се инхибиторни потенцијал наночестица разликује у зависности од биљног прекурсора и концентрације. SI-Ag је показао најизраженији инхибиторни ефекат, са IC₅₀ вредношћу од 0,12 ppm, при чему је значајна инхибиција примећена већ при најнижим испитиваним концентрацијама, а при концентрацијама од 10 ppm и вишим постигнута је готово потпуна инхибиција ензимске активности. Код JR-Ag IC₅₀ је износила 1,483 ppm, уз изражен пораст инхибиције са повећањем концентрације и готово потпуну инхибицију при концентрацијама од 10 ppm и вишим. Насупрот томе, AS-Ag је показао знатно блажи ефекат и није достигнута 50% инхибиција у испитиваном концентрационом опсегу. На основу добијених резултата утврђен је следећи редослед инхибиторног потенцијала према AChE: SI-Ag > JR-Ag > AS-Ag.

Други део истраживања био је усмерен на валоризацију чврстих остатака биљне биомасе преосталих након екстракције, који су употребљени као прекурсори за синтезу угљеничних материјала. Добијени материјали су карбонизовани на температурама од 400 °C и 900 °C, а њихова физикохемијска својства испитана су применом SEM/EDX, FTIR, XRD, BET/NLDFT анализе и мерења зета потенцијала. Показано је да температура карбонизације има кључан утицај на морфологију, развој порозне структуре и површинска својства материјала. Повећање температуре карбонизације са 400 °C на 900 °C довело је до значајног повећања специфичне површине и запремине пора, као и до преласка ка доминантно микропорозној структури. Специфичне површине материјала SI900, JR900 и AS900 износиле су 295, 790 и 177 m² g⁻¹, редом, при чему се JR900 издвојио као материјал са најразвијенијом микропорозном структуром.

Адсорпциона својства синтетисаних угљеничних материјала испитана су коришћењем метиленског плавог, родамина В, кристално љубичастог и малахитног зеленог као модел катјонских загађујућих супстанци. Испитан је утицај pH вредности, температуре, концентрације адсорбенса и времена контакта, као и кинетика и равнотежа адсорпције. Резултати скрининг теста указали су на то да материјали добијени карбонизацијом на 900 °C показују знатно већи потенцијал за даљу примену у адсорпционим процесима у односу на материјале добијене на 400 °C. Изузетак је материјал SI400, који је такође показао задовољавајуће перформансе. Сходно томе, даља истраживања су била усмерена на материјале добијене на 900 °C, као и на материјал SI400. Показано је да ефикасност адсорпције није одређена искључиво вредношћу специфичне површине, већ представља резултат међусобног утицаја доступности порозне мреже, величине и облика молекула адсорбата, њихове конформационе флексибилности, као и различитих површинских интеракција. У процесу адсорпције значајну улогу имају π-π интеракције, електростатичке, хидрофобне и дисперзионе интеракције, као и водоничне везе. На основу анализе параметара адсорпционих модела утврђено је да је адсорпција испитиваних боја доминантно физичке природе.

Додатна вредност истраживања огледа се у испитивању адсорпционих перформанси одабраних угљеничних материјала у динамичким условима, као и њихове регенерације и поновне употребе. Материјали су испитивани током пет узастопних адсорпционо-десорпционих циклуса, при чему је за десорпцију коришћен 50% раствор етанола. На овај начин је омогућено истовремено испитивање стабилности адсорпционог процеса, могућности регенерације адсорбенса и издвајања адсорбованих боја. SI900 се издвојио као најуниверзалнији материјал за поновљену примену, док је JR900 показао изражену селективност према родамину В, за који су постигнути практично потпуна адсорпција и готово квантитативна регенерација током поновљених циклуса. Добијени резултати су показали да велика специфична површина и висока почетна адсорпциона ефикасност нису сами по себи довољни за процену практичне применљивости адсорбенса, већ је неопходно узети у обзир и ефикасност десорпције, могућност регенерације и очување функционалних својстава материјала током поновљене употребе.

Постигнути резултати у целини показују да избор почетне биљне врсте и контрола услова синтезе представљају кључне факторе за подешавање својстава добијених материјала. Код AgNPs, врста биљног прекурсора утиче на физичкохемијска својства, колоидну стабилност и биолошки одговор, док код угљеничних материјала температура карбонизације значајно одређује развој порозне структуре и адсорпционе перформансе. Истовремено, резултати показују да се функционална својства материјала не могу процењивати само на основу једног параметра, већ је неопходно повезати структурне, површинске, физичкохемијске и функционалне карактеристике.

Научни значај постигнутих резултата огледа се, пре свега, у успостављању интегрисаног концепта сукцесивног искоришћења исте биљне биомасе за добијање две различите класе функционалних материјала – зеленом синтезом AgNPs и карбонизацијом преосталих чврстих остатака за добијање угљеничних адсорбенса. Посебна вредност овог приступа је у показивању да природа биљног прекурсора оставља препознатљив утицај на обе класе материјала: на физичкохемијска, колоидна и биолошка својства AgNPs, као и на структурна, површинска, адсорпциона и регенерациона својства угљеничних материјала. На тај начин повезани су зелена синтеза наноматеријала, биолошка процена њихове функционалности, валоризација преостале биомасе и третман загађених вода, што представља допринос развоју одрживих приступа заснованих на рационалном коришћењу обновљивих ресурса.

В. Компаративна анализа резултата кандидаткиње са резултатима из литературе

Савремена истраживања зелене синтезе металних наночестица усмерена су ка замени конвенционалних редукционих и стабилизационих реагенса природним изворима, при чему биљни екстракти имају посебан значај због присуства различитих група фитохемијских једињења способних да истовремено учествују у редукцији металних јона и стабилизацији насталих наночестица (El-Seedi et al., 2019; Fahim et al., 2024). Резултати ове дисертације потврђују наведена сазнања, али их проширују систематским поређењем AgNPs добијених применом етанолних екстраката три различита биљна прекурсора – *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* – при упоредивим условима синтезе и карактеризације.

Примена *Juglans regia* и *Allium sativum* за зелену синтезу AgNPs раније је описана у литератури. Abbasi et al. (2017) применили су водени екстракт зелене љуске *Juglans regia*, док су Al-Saadi et al. (2023) показали могућност синтезе AgNPs коришћењем етанолног екстракта *Allium sativum*. За разлику од појединачних литературних примера, у овој дисертацији три биљна система испитана су у заједничком експерименталном оквиру, што је омогућило директније повезивање природе прекурсора са морфолошким, колоидним, површинским и биолошким својствима добијених наночестица.

Физичкохемијска карактеризација показала је да све три врсте AgNPs имају карактеристичне LSPR максимуме у области 400-415 nm и кристалну, површински центрирану кубну структуру металног сребра, што је у складу са општим својствима AgNPs описаним у литератури (Duman

et al., 2024). Међутим, изражене разлике у колоидним својствима указују на улогу биљног прекурсора: зета потенцијали износили су $-29,97$ mV за SI-Ag, $-16,5$ mV за JR-Ag и $-30,7$ mV за AS-Ag. AS-Ag се издвојио као најфиније диспергован и електростатички најстабилнији систем, док је JR-Ag показао највећу склоност ка агрегацији. FTIR резултати, у складу са механизмом синтезе који су описали Rajeshkumar и Bharath (2017), потврдили су присуство биомолекула биљног порекла на површини наночестица.

Новина овог истраживања огледа се у систематском повезивању физикохемијских својстава зелено синтетисаних AgNPs, условљених избором биљног прекурсора, са њиховим биолошким ефектима. Литературни подаци показују да цитотоксични, генотоксични и проапоптотички ефекти AgNPs зависе од величине, концентрације, површинских својстава и интеракције наночестица са ћелијама (Thomas et al., 2024). У овој дисертацији показано је да се биолошки одговор додатно разликује у зависности од биљног прекурсора: JR-Ag је испољио најизраженији цитотоксични потенцијал према ТК6 ћелијама, SI-Ag конзистентан концентрационо-зависан генотоксични и цитостатски одговор, док су ефекти AS-Ag генерално били блажи. Резултати су тако показали да исто метално језгро не условљава јединствен биолошки профил, већ да значај имају и површински омотач, колоидно стање и друга својства одређена условима зелене синтезе.

одатни аспект новине представља упоредно испитивање утицаја AgNPs, синтетисаних применом различитих биљних прекурсора, на активност ацетилхолинестеразе. Док су Khatoon et al. (2018) показали да зелено синтетисане AgNPs могу мењати активност AChE, у овој дисертацији је извршено директно поређење три система добијена различитим биљним прекурсорима. SI-Ag је показао најизраженији инхибиторни потенцијал са IC_{50} од $0,12$ ppm, за JR-Ag је IC_{50} износила $1,483$ ppm, док код AS-Ag 50% инхибиције није достигнуто у испитиваном концентрационом опсегу. Редослед SI-Ag > JR-Ag > AS-Ag представља јасан показатељ да избор биљног прекурсора може значајно усмеравати специфичну биолошку активност зелено синтетисаних AgNPs.

Други део дисертације уклапа се у савремене приступе валоризације биомасе кроз њену конверзију у функционалне угљеничне материјале. Утицај температуре карбонизације на развој порозности добро је познат и описан, између осталог, у раду Li et al. (2008). Резултати ове дисертације потврдили су да повећање температуре са 400 °C на 900 °C доводи до израженог развоја специфичне површине, запремине пора и микропорозности, али су истовремено показали да врста полазне биомасе представља додатни фактор који одређује текстуална својства коначног материјала.

Овај утицај јасно се види из специфичних површина материјала SI900, JR900 и AS900, које су износиле 295 , 790 и 177 m² g⁻¹, редом. Иако је JR900 имао највећу специфичну површину и најразвијенију микропорозност, његово понашање у динамичким условима није било универзално најповољније. Ово представља важан резултат јер показује да специфична површина, иако значајан параметар, није довољна за предвиђање практичне адсорпционе ефикасности без разматрања доступности пора, површинске хемије, транспорта адсорбата и његових молекулских својстава.

Адсорпција боја на угљеничним материјалима условљена је комбинацијом текстуалних својстава адсорбента и интеракција на његовој површини (Tan et al., 2015). У овој дисертацији показано је да се адсорпција метиленског плавог, родамина В, кристално љубичастог и малахитног зеленог доминантно одвија физичким путем. Значај имају π - π , електростатичке, хидрофобне и дисперзионе интеракције, као и водоничне везе. Додатно је показано да саме димензије молекула нису довољна за предвиђање адсорпције, већ су од пресудног значаја ефективни попречни пресек, тродимензионална геометрија, конформациона флексибилност и могућност одговарајуће оријентације молекула унутар порозне мреже.

Посебан допринос у односу на уобичајена равнотежна испитивања адсорбена представља анализа понашања материјала у динамичким условима током пет адсорпционо-десорпционих циклуса. SI900 се издвојио као најуспешнији материјал када се истовремено разматрају све четири испитиване боје, док је JR900 показао изражену структурно условљену селективност.

Најповољнији систем био је JR900/RB, код кога је адсорпција родамина В износила 100% и у почетном и у петом циклусу, док је ефикасност регенерације износила 94,5% у почетном и 97,8% у петом циклусу. Истовремено, добро адсорпционо/десорпционо понашање SI400 за метиленско плаво показује да функционалан и регенерибилан адсорбенс може бити добијен и при нижој температури карбонизације, што има значај са становишта смањења енергетских захтева процеса.

Најзначајнија оригиналност дисертације огледа се у интегрисању зелене синтезе AgNPs и добијања угљеничних адсорбенса у јединствен концепт сукцесивног искоришћења исте биљне биомасе. Док се ове две области у литератури најчешће разматрају одвојено, у овој дисертацији етанолни екстракт биљног материјала најпре служи као извор редукционих и стабилизационих биомолекула за синтезу AgNPs, а чврсти остатак након екстракције затим постаје прекурсор за добијање порозних угљеничних материјала. На тај начин исти обновљиви ресурс добија две функционалне намене уз потпуније искоришћење полазне биомасе.

У целини, резултати ове докторске дисертације превазилазе оквир појединачних поређења са литературом и успостављају јасну везу између природе биљног прекурсора, услова његове прераде, структуре и површинских својстава добијених материјала и њихове функционалности. Код AgNPs ова повезаност огледа се у колоидним и биолошким својствима, док се код угљеничних материјала испољава кроз порозност, адсорпциону селективност, динамичко понашање, могућност десорпције и регенерације. Овакво повезивање представља научни допринос развоју одрживих материјала и рационалних приступа третману загађених вода.

1. El-Seedi, H.R., et al., *Metal nanoparticles fabricated by green chemistry using natural extracts: biosynthesis, mechanisms, and applications*. RSC Advances, 2019. **9**(42): p. 24539-24559.
2. Fahim, M., et al., *Green synthesis of silver nanoparticles: A comprehensive review of methods, influencing factors, and applications*. JCIS Open, 2024. **16**: p. 100125.
3. Abbasi, Z., et al., *Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of dried Juglans regia green husk and examination of its biological properties*. Green Processing and Synthesis, 2017. **6**(5): p. 477-485.
4. Al-Saadi, H.K., et al., *Antioxidant and Antibacterial Activities of Allium sativum Ethanol Extract and Silver Nanoparticles*. Tropical Journal of Natural Product Research, 2023. **7**(6).
5. Rajeshkumar, S. and L.V. Bharath, *Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles – A review on biomolecules involved, characterisation and antibacterial activity*. Chemico-Biological Interactions, 2017. **273**: p. 219-227.
6. Duman, H., et al., *Silver Nanoparticles: A Comprehensive Review of Synthesis Methods and Chemical and Physical Properties*. Nanomaterials, 2024. **14**(18): p. 1527.
7. Thomas, S., et al., *Plant-based synthesis, characterization approaches, applications and toxicity of silver nanoparticles: A comprehensive review*. Journal of Biotechnology, 2024. **394**: p. 135-149.
8. Khatoon, A., et al., *Silver nanoparticles from leaf extract of Mentha piperita: Eco-friendly synthesis and effect on acetylcholinesterase activity*. Life Sciences, 2018. **209**: p. 430-434.
9. Li, W., et al., *Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars*. Industrial crops and products, 2008. **28**(2): p. 190-198.
10. Tan, K.B., et al., *Adsorption of dyes by nanomaterials: recent developments and adsorption mechanisms*. Separation and purification technology, 2015. **150**: p. 229-242.

Г. Научни радови објављени у међународним часописима који чине део докторске дисертације

Као резултат истраживања обухваћених овом докторском дисертацијом објављена су два научна рада у врхунским међународним часописима:

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Radivojević, N.**, Knežević, S., Graovac, S., Rajić, V., Terzić, T., Potkonjak, N., ... & Milanković, V. (2025). Eco-Friendly Synthesis and Paper Immobilization of AgNPs for Portable Colorimetric Detection of Hg²⁺ in Water. *Chemosensors*, 13(12), 433. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13120433>
2. **Radivojević, N.**, Terzić, T., Lazarević-Pašti, T., Pašti, I., Potkonjak, N., Luković, A., ... & Milanković, V. (2026). Zero-Waste Conversion of Juglans regia and Allium sativum Biomass into Porous Carbons for Dye Removal and Recovery from Water. *Molecules*, 31(15), 2678. <https://doi.org/10.3390/molecules31152678>

Д. Провера оригиналности докторске дисертације

Оригиналност докторске дисертације Невене Радивојевић је проверена 23.09.2026. године на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22.06.2018). Помоћу програма "iThenticate", утврђено је да количина подударања текста износи 9 %. Подударности су последица општих места, дефиниција и описа коришћених експерименталних метода, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из дисертације, што је у складу са чланом 9. овог Правилника.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација Невене Радивојевић оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

Ђ. Закључак

На основу увида у целокупни садржај докторске дисертације кандидаткиње Невене Радивојевић, мастер биохемичара, под називом „Синтеза и карактеризација наноматеријала добијених коришћењем *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за примену у третману загађених вода“, Комисија сматра да је кандидаткиња у потпуности и успешно одговорила на постављене истраживачке задатке. Истраживањем је развијен интегрисан приступ искоришћењу биљне биомасе који обједињује зелену синтезу наночестица сребра и валоризацију чврстих остатака насталих након екстракције, кроз њихову прераду у функционалне угљеничне материјале. У првом делу истраживања показано је да се применом етанолних екстраката *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* могу успешно добити кристалне AgNPs, при чему природа биљног прекурсора значајно утиче на њихову диспергованост, степен агрегације, површинску хемију и колоидну стабилност. AS-Ag се издвојио као најфиније диспергован и електростатички најстабилнији систем, док је JR-Ag показао већу склоност ка агрегацији. Тиме је показано да биљни екстракт не представља само редуccionи и стабилизациони медијум, већ фактор који усмерава коначна својства формираних наночестица.

Биохемијска карактеризација потврдила је да се наведене разлике одражавају и на функционални профил AgNPs. JR-Ag је испољио најизраженији цитотоксични потенцијал према ТК6 ћелијама, SI-Ag конзистентан концентрационо-зависан генотоксични и цитостатски одговор, док су ефекти AS-Ag генерално били блажи. Посебно значајан резултат представља прекурсор-зависна инхибиција ацетилхолинестеразе: за SI-Ag је одређена IC₅₀ вредност од 0,12 ppm, за JR-Ag 1,483 ppm, док код AS-Ag није достигнута 50% инхибиција у испитиваном концентрационом опсегу.

У другом делу истраживања показано је да се чврсти остаци истих биљних прекурсора могу успешно конвертовати у порозне угљеничне материјале. Температура карбонизације и природа полазне биомасе значајно су одређивале њихова структурна, морфолошка и текстурална својства. Материјали добијени на 900 °C развили су знатно већу специфичну површину и порозност, при чему је JR900 достигао специфичну површину од 790 m² g⁻¹. Истовремено је показано да највећа специфична површина сама по себи не гарантује најбоље понашање у свим адсорпционим условима.

Испитивањем адсорпције метиленског плавог, родамина В, кристално љубичастог и малахитног зеленог успостављена је веза између порозне структуре и површинске хемије адсорбенса, са једне стране, и молекулске геометрије, ефективног попречног пресека и конформационе флексибилности адсорбата, са друге стране. Посебну практичну вредност имају резултати динамичких адсорпционо-десорпционих испитивања. SI900 се издвојио као најуниверзалнији материјал за поновљену примену, док је JR900 показао изражену селективност према родамину В, за који су током поновљених циклуса постигнуте потпуна адсорпција и готово квантитативна регенерација.

Научни допринос дисертације огледа се, пре свега, у успостављању интегрисаног концепта сукцесивног коришћења истог биљног прекурсора за добијање две класе функционалних материјала, као и у успостављању везе између природе биљне биомасе, физичкохемијских и биолошких својстава зелено синтетисаних AgNPs и структурних, адсорпционих и регенерационих својстава угљеничних материјала. Посебну вредност представља показивање да се практична применљивост угљеничних адсорбенса не може процењивати искључиво на основу специфичне површине и равнотежног адсорпционог капацитета, већ захтева истовремено разматрање селективности, динамичке адсорпције, десорпције и стабилности током поновљене примене.

Оваквим приступом обједињени су принципи зелене хемије, валоризације биомасе, циркуларне економије и развоја функционалних материјала за заштиту животне средине. Резултати истраживања објављени су у два рада у врхунским међународним часописима, чиме је научни допринос кандидаткиње већ представљен и верификован у међународној научној јавности.

На основу свега изложеног, а у складу са Законом о високом образовању и Статутом Хемијског факултета, Комисија закључује да докторска дисертација кандидаткиње Невене Радивојевић представља оригиналан и научно значајан допринос у области зелене синтезе наноматеријала, испитивања њихових биохемијских и биолошких својстава, развоја функционалних угљеничних материјала и њихове примене у заштити животне средине. Дисертација се уклапа у савремене токове истраживања усмерене ка разумевању повезаности физичкохемијских својстава наноматеријала са њиховим биолошким ефектима, одрживом добијању функционалних материјала, рационалном искоришћењу биомасе и развоју ефикасних и регенерабилних материјала за третман загађених вода. Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Хемијског факултета да прихвати поднету докторску дисертацију под насловом **„Синтеза и карактеризација наноматеријала добијених коришћењем *Saintpaulia ionantha*, *Juglans regia* и *Allium sativum* за примену у третману загађених вода“** и одобри њену јавну одбрану, чиме би били испуњени услови за стицање научног звања доктора биохемијских наука.

У Београду, 25.09.2026.

Чланови комисије:

др Александар Поповић,

редовни професор, Универзитет у
Београду, Хемијски факултет

др Марија Гавровић Јанкуловић,

редовни професор, Универзитет у
Београду, Хемијски факултет

др Ведран Миланковић,

виши научни сарадник, Универзитет
у Београду, Институт за нуклеарне
науке „Винча“, Институт од
националног значаја за Републику
Србију