

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ - БИОЛОШКОГ ФАКУЛТЕТА

На III редовној седници Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Биолошког факултета, одржаној 9. децембра 2024. године, на основу молбе ментора, др Славише Станковића, редовног професора, Универзитет у Београду – Биолошки факултет и др Марије Стојменовић, научног саветника, Универзитет у Београду – Института за нуклеарне науке „ВИНЧА“- Института од националног значаја за Републику Србију, одређена је Комисија за преглед и оцену докторске дисертације Ирине Кандић, докторанда, истраживача-сарадника на Институту за нуклеарне науке „ВИНЧА“ - Институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитет у Београду, под насловом: **„Синтеза, карактеризација и биолошка активност угљеничних материјала добијених од листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.)“**, у саставу: др Милан Краговић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију, др Весна Караџић, научни сарадник, Институт за јавно здравље Србије „Др Милан Јовановић Батут“, др Стефана Цветковић, доцент, Универзитет у Београду – Биолошки факултет.

Комисија је прегледала урађену докторску дисертацију кандидата и Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Биолошког факултета подноси следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### Општи подаци о докторској дисертацији

Докторска дисертација Ирине Кандић, под називом **„Синтеза, карактеризација и биолошка активност угљеничних материјала добијених од листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.)“** је истраживање проистекло из вишегодишњег истраживања које је обухватало синтезу и карактеризацију угљеничних материјала добијених од листова урмине палме и плода црне јове, испитивање биолошке активности (антибиофилм, цитотоксични и генотоксични потенцијал) као и испитивање утицаја материјала на уклањање цијанобактерија. Ова дисертација је највећим делом урађена у лабораторијама Института за нуклеарне науке „ВИНЧА“- Институт од националног значаја за Републику Србију, на Катедри за микробиологију, Универзитета у Београду, Биолошког факултета и на Институту за јавно здравље Србије „Др Милан Јовановић Батут“.

Докторска дисертација садржи: насловну страну на српском и енглеском језику, податке о ментору и члановима комисије, изјаву захвалности, сажетак са кључним речима на српском и енглеском језику, списак скраћеница, садржај, текст по поглављима, списак литературе и прилоге. Докторска дисертација је написана на 127 страна и подељена је на 7 поглавља: Увод (32 стране), Циљеви истраживања (1 страна), Материјал и методе (15 страна), Резултати и дискусија (54 стране), Закључци (2 стране), Литература (18 страна) и Прилози (5 страна). Докторска дисертација садржи 47 слика, 34 табеле и 309 библиографских јединица. Поред

наведеног, теза садржи и Биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

## Анализа докторске дисертације

Поглавље „Увод“ докторске дисертације је детаљно структурирано у неколико потпоглавља обухватајући преглед релевантних литературних података, који су кључни за разумевање теме и постављање основа које су биле предмет истраживања.

**Први део увода** се бави глобалним изазовима који су повезани са загађењем вода и процесом еутрофикације, узрокованим антропогеним утицајем, укључујући прекомерни доток нутријената, климатске промене и промене у стратификацији водених екосистема. Истакнут је значај праћења еутрофикације која највише погађа плитка језера и акумулације, где се уочава учесталије „цветање“ воде. Посебан фокус је стављен на цијанобактерије, које не само да доминирају у еутрофичним условима, већ могу производити токсине (цијанотоксине) који представљају директан ризик по јавно здравље. Наведени су главни механизми токсичности цијанотоксина.

**У другом делу увода**, разматрају се актуелни приступи третману вода, са фокусом на методе које се користе за уклањање цијанобактерија и цијанотоксина. Издвајају се активни угљенични материјали као перспективни адсорбенти због своје високе специфичне површине, порозности и хемијске стабилности. Описани су механизми адсорпције на активним угљеничним материјалима и наглашена је потреба за истраживањем нових, јефтинијих прекурсора који су одрживи и лако доступни, што је у овом раду реализовано коришћењем биоотпада попут листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плодова црне јове (*Alnus glutinosa* L.).

**Треће потпоглавље** посвећено је синтези и карактеризацији активних угљеничних материјала. Детаљно су описане методе карбонизације и активације, укључујући физичке и хемијске приступе. Анализирани су параметри попут специфичне површине, порозности и функционалних група на површини активних угљеника, који одређују њихове адсорпционе способности. Указано је да избор прекурсора, попут лигноцелулозне биомасе, значајно утиче на структуру и примену материјала. Листови урмине палме и плодови црне јове истакнути су као адекватни прекурсори због високог садржаја лигнина и целулозе, што омогућава добијање материјала са оптималним својствима

**У наредном потпоглављу увода** детаљно је описана улога биофилмова на површини активних угљеничних материјала. Објашњено је да биофилм представља комплексну структуру микроорганизама уроњених у екстрацелуларни полимерни матрикс, што може имати како позитиван, тако и негативан утицај на процес пречишћавања воде. Док биофилмови могу допринети разградњи органских загађивача, њихово присуство такође може довести до зачепљења пора материјала, смањења адсорпционог капацитета и контаминирања воде.

**Следеће потпоглавље увода** се фокусира на мониторинг водних тела, посебно у контексту еутрофикације и процене ризика од цијанотоксина. Наведени су параметри који се користе за оцењивање еколошког статуса вода, као што су биолошки, физичко-хемијски и хидроморфолошки показатељи. Такође је истакнута потреба за праћењем сезонских варијација и антропогеног утицаја на водна тела, како би се осигурала њихова безбедност и одрживост.

У **наредним потпоглављима увода** описане су основне карактеристике цијанобактерија и њихове улоге у екосистемима. Додатно, дате су информације о цијанотоксинима, њиховој хемијској структури, као и таксонима који их продукују. Описана је и појава „цветања цијанобактерија“, при чему су истакнуте негативне последице ове појаве и фактори који утичу на исту.

**Последњи сегмент увода** интегрише све претходно наведене аспекте и наглашава допринос ове докторске дисертације у развоју нових материјала за третман вода. Објашњено је како коришћење иновативних прекурсора, попут листа урмине палме и плодова црне јове, доприноси добијању активних угљеничних материјала који имају значајан потенцијал за уклањање цијанобактерија и цијанотоксина из воде. Поред тога, истакнута је важност испитивања еколошке и здравствене безбедности ових материјала, укључујући њихову цитотоксичност и генотоксичност и потенцијал за ослобађање токсичних елемената у водену средину.

У поглављу **„Циљ истраживања“** кандидат истиче да су основни циљеви овог истраживања обухватили добијање угљеничних материјала од листа палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.), који су окарактерисани и испитана је њихова безбедна примена у уклањању цијанобактерија из вештачке акумулације.

Главни циљеви докторске дисертације у складу са горе наведеним су:

1. Синтеза материјала пореклом од стабљике листа палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.) поузданих и проверених карактеристика процесом карбонизације и активације, као и одређивање карактеристика материјала. Из овог циља произашли су специфични циљеви:

- Одређивање структуре материјала,
- Одређивање вредности специфичне површине материјала и расподеле и величине пора,
- Одређивање садржаја макро- и микроелемената,
- Испитивање морфолошких и микроструктурних својстава.

2. Испитивање цитотоксичног и генотоксичног потенцијала синтетисаних материјала пореклом од листа урмине палме и плодова црне јове на нормалној ћелијској линији.

3. Испитивање ефекта синтетисаних материјала пореклом од плодова црне јове на формирања биофилма одабраних бактеријских сојева.

4. Анализа цијанобактерија у узорцима воде из вештачке акумулације са изразитим степеном еутрофикације која обухвата квалитативну и квантитативну анализу састава цијанобактерија, као и анализу продукције цијанотоксина.

5. Потенцијална примена синтетисаних материјала као филтера за пречишћавање воде са изразитим степеном еутрофикације. Ови материјали испитују се на узорцима из вештачке акумулације чија је првобитна намена била за водоснабдевање и рекреацију.

Треће поглавље докторске дисертације, **„Материјали и методе“**, састављено је из осам потпоглавља која детаљно описују коришћене материјале, поступке синтезе, физичко-хемијске карактеризације, као и биолошке тестове.

У потпоглављу **„Материјали“** наведени су полазни прекурсори за синтезу активних угљеничних материјала, укључујући лист палме и плодове црне јове. Такође су описани бактеријски сојеви и хумана ћелијска линија MRC-5 коришћени у биолошким тестовима, као и раствори и хранљиве подлоге потребни за њихово гајење и одражавање. Посебно је описан

састав раствора за рад са бактеријским културама и хуманим ћелијама, као и стандардни цијанотоксини и други аналитички реагенси који су коришћени у истраживању.

У потпоглављу „Методe“ описане су све методе које су укључене у докторску дисертацију:

Процеси синтезе материјала који су укључивали процесе карбонизације и активације полазних прекурсора.

Методe физичко-хемијске карактеризације укључивале су: анализу хемијског састава прекурсора, рендгенску дифракциону анализу (XRD) за идентификацију фаза, FTIR и Раманску спектроскопију за анализу функционалних група и структуре угљеничних материјала, скенирајућу електронску микроскопију (FESEM) за морфолошке карактеристике и BET анализу за одређивање специфичне површине и расподеле пора.

У оквиру испитивања ефеката на људско здравље и животну средину обухваћено је одређивање концентрације потенцијално токсичних елемената (*PTE*) у води након третмана активним угљеничним материјалима, а анализа је урађена методом оптичке емисионе спектроскопије са индуктивно спрегнутом плазмом (ICP-OES). Осим тога испитана је цитотоксичност МТТ тестом и генотоксичност алкалним Комет тестом на нормалним хуманим феталним фибробластима плућа (MRC-5).

За испитивање антибиофилм ефекта материјала добијеног од плода црне јове најпре је описана микродилуциона метода са додатком ресазурина у циљу успостављања инхибиторних концентрација материјала, а затим је детаљно описана метода бојења биомасе биофилма кристал виолетом.

Физичко-хемијске карактеристике воде и биодиверзитет фитопланктона Александровачког језера анализирани су како би се стекла свеобухватна слика о квалитету воде и еколошком статусу језера. Испитани су физичко-хемијски параметри, а анализе су спроведене у акредитованој лабораторији Института за јавно здравље Србије „Др Милан Јовановић Батут“, применом стандардних метода. Квалитативна и квантитативна анализа фитопланктона вршена је током периода од 2020. до 2022. године. За квантитативну анализу коришћена је Utermöhl метода. Ове анализе су пружиле информације о присуству и распрострањености цијанобактерија, што је било кључно за процену стања воде и планирање даљих третмана. Анализа присуства цијанотоксина у води, укључујући микроцистине (MC-RR, MC-LR и MC-YR) и цилиндроспермопсин (CYN), извршена је применом течне хроматографије са масеном спектрометријом (LC-MS).

Примена активних угљеничних материјала на узорцима воде из Александровачког језера била је усмерена на употребу синтетисаних активних угљеничних материјала, добијених од стабљика листа палме и плодова црне јове, као и комерцијалног активног угљеника, за уклањање цијанобактерија и цијанотоксина из воде Александровачког језера. Први део експеримената обухватао је уклањање цијанобактерија. Узорци воде из Александровачког језера су третирани активним угљеничним материјалима, а анализиран је број цијанобактерија пре и након третмана. Адсорпциони капацитет материјала је процењиван током различитих временских интервала. У другом делу експеримената, активни угљенични материјали су испитани на уклањање цијанотоксина из воде. За ове тестове, вода из језера је прво обogaћена вештачким додавањем микроцистина (MC-RR, MC-LR и MC-YR), а испитивани узорци су анализирани LC-MS методом. Третман воде је извршен применом различитих количина активних угљеничних материјала, а адсорпциони капацитет је процењиван после одређеног контактеног времена. Применом FTIR спектроскопије, анализиран је механизам адсорпције микроцистина на материјалима.

Резултати добијени у МТТ тесту, као и приликом испитивања антибиофилм ефекта су анализирани коришћењем једносмерне ANOVA и Mann–Whitney *U* теста, са дефинисаним нивоима значајности. Софтвери GraphPad Prism и Statistica су коришћени за анализу и приказ резултата.

Четврто поглавље докторске дисертације, „Резултати и дискусија“, састављено је из шест потпоглавља. У првом потпоглављу „Физичко - хемијска карактеризација материјала“ приказани су резултати и анализа физичко-хемијских, структурних и морфолошких карактеристика активних угљеничних материјала добијених из биомасе листа палме и плода црне јове:

Анализа лигноцелулозног састава прекурсора показала је значајне разлике у садржају целулозе, хемицелулозе и лигнина између листа палме и плода црне јове. Док је лист палме имао доминантан садржај целулозе, плодови црне јове су се истакли већим уделом лигнина. Ове разлике у саставу директно утичу на својства добијених активних угљеника, чинећи црну јову погоднијим прекурсором. Поређење са литературним подацима указује на утицај климатских услова и земљишта на биомасу прекурсора, што потврђује варијације и добијеним резултатима.

Процеси карбонизације и активације довели су до значајног губитка масе сирових материјала. Плодови црне јове показали су већи степен трансформације током активације у поређењу са листом палме. Ови резултати су у складу са претходним истраживањима која указују на конверзију лигнина у угљеничне структуре током термичке обраде.

XRD анализа потврдила је присуство графита и калцита у активираним материјалима. Резултати су открили слабу кристалну структуру угљеника у материјалима добијеним из црне јове, што је карактеристично за угљеничне материјале. XRD анализа за палму показала је доминацију минерала халита и силвина, а највероватније су присутни јер је биомаса узоркована из приобалне зоне.

Резултати FTIR анализе указују на успешно уклањање већине органских компоненти током карбонизације и активације. Након термичке обраде, спектрални опсези одговарају углавном ароматичним C=C и C–H групама, што потврђује формирање стабилних угљеничних структура. Резултати указују на формирање функционалних група на површини активних угљеника.

Резултати Раман спектроскопије за сва три материјала – активни угљеник добијен из листа палме (P\_AC), плода црне јове (A\_AC) и комерцијални активни угљеник (C\_AC) – показали су присуство карактеристичних D и G трака, које одговарају неуређеној и графитној структури угљеника.

Испитивање специфичне површине и расподеле пора за сва три материјала указало је на значајне разлике у текстурним карактеристикама. Комерцијални активни угљеник (C\_AC) показао је највећу специфичну површину од 1100 m<sup>2</sup>/g, доминантно микропорозну структуру и волумен микропора од 0.42 cm<sup>3</sup>/g, што га чини високоефикасним у адсорпционим процесима. Материјал добијен из црне јове (A\_AC) имао је специфичну површину од 485 m<sup>2</sup>/g, са мешовитом структуром која укључује микропоре и допринос мезопора. Насупрот томе, материјал добијен из палме (P\_AC) показао је најмању специфичну површину од 36.6 m<sup>2</sup>/g, са структуром која је претежно непорозна и садржи минималан допринос микропора.

FESEM микроскопија додатно је потврдила разлике у морфологији ова три материјала. Код материјала P\_AC, након карбонизације и активације, уочене су неправилно распоређене плоче са малим бројем порозних структура. Материјал A\_AC показао је хетерогену порозну структуру са добро развијеним каналима и шупљинама различитих величина, што указује на

боље активирање и већу порозност. Комерцијални активни угљеник (C\_AC) имао је глатку и уједначену површину са правилно распоређеним микропорама и ситним честицама на површини, што је у складу са његовим процесом хемијске активације. Ови резултати указују на специфичне разлике у процесима синтезе и њихов утицај на текстурна и морфолошка својства материјала.

У другом потпоглављу **„Испитивање утицаја активних угљеничних материјала на здравље људи и животну средину“** представљени су резултати испитивања активних угљеничних материјала и њихов утицај на квалитет воде, здравље људи и животну средину, уз истовремену анализу добијених података у контексту њихове потенцијалне примене у пречишћавању воде:

Резултати мерења концентрација потенцијално токсичних елемената у води третираној са P\_AC, A\_AC и C\_AC материјалима показали су да већина елемената остаје испод границе детекције. Овај налаз потврђује да материјали, у већини случајева, не ослобађају значајне количине токсичних елемената. Међутим, у води третираној P\_AC материјалом детектовани су елементи као што су Ni, Zn и Mo у концентрацијама које су близу дозвољених граница за пијаћу воду. Насупрот томе, A\_AC и C\_AC материјали нису показали ослобађање ових елемената у мерљивим количинама, чиме су испунили све стандарде за хигијенски исправну воду.

Израчунате вредности хроничног дневног уноса (CDI) и коефицијента опасности (HQ) за потенцијално токсичне елементе у води указују да C\_AC материјал представља значајан здравствени ризик, са вредностима HI изнад 1 (1.91). Вредности за A\_AC и P\_AC биле су знатно ниже (0.00 и 0.52), што указује на минималан здравствени ризик. Ови резултати наглашавају потребу за пажљивом анализом материјала, како би се смањио здравствени ризик повезан са њиховом употребом.

Резултати МТТ теста показали су да P\_AC материјал значајно смањује вијабилност MRC-5 ћелија, са преживљавањем од 25.3% при концентрацији од 25% и само 10.1% при концентрацији од 100%. Ови резултати указују на изразиту цитотоксичност овог материјала, што се приписује присуству никла. С друге стране, A\_AC и C\_AC нису показали значајан цитотоксични ефекат, са преживљавањем ћелија изнад 95% чак и при највишим концентрацијама. Ови налази указују на безбедну употребу материјала A\_AC и C\_AC. Међутим, цитотоксичност P\_AC материјала наглашава потребу за додатним корацима у његовој обради како би се обезбедила сигурна употреба. Из резултата комет теста уочено је да материјал P\_AC изазива значајна оштећења ДНК. Ово указује на висок генотоксични потенцијал, који је, као и код цитотоксичности, највероватније повезан са присуством никла. Насупрот томе, A\_AC и C\_AC нису показали значајне генотоксичне ефекте, чак ни при концентрацији од 100%. Ови резултати истичу да су A\_AC и C\_AC материјали безбедни у контексту генотоксичности, док P\_AC није погодан за употребу без додатне обраде.

У трећем потпоглављу **„Испитивање антибиофилм ефекта активних угљеничних материјала“** представљени су резултати испитивања ефекта материјала (A\_AC) на формирање биофилма различитих бактеријских сојева. Анализирана је ефикасност материјала у инхибицији формирања биофилма, при чему је посебна пажња посвећена бактеријама од значаја за људско здравље.

Ефекат материјала A\_AC на формирање биофилма анализиран је на осам бактеријских сојева. Резултати су показали значајну варијабилност, са највећом инхибицијом према *E. coli* (62.63%) и *E. cloacae* (73.86%) при концентрацији од 50%. Ово указује на значајну потенцијалну примену A\_AC у третману контаминираних водених средина. Антибиофилм

ефекат материјала А\_АС за *E. coli*, *E. cloacae*, а у мањој мери и за *P. mirabilis* и *K. pneumoniae* наглашава његов потенцијал у примени за пречишћавање воде. Истовремено, ограничења код других бактеријских сојева указују на потребу за додатним модификацијама материјала.

У четвртном потпоглављу „**Физичко-хемијске карактеристике воде и биодиверзитет фитопланктона Александровачког језера**“ представљени су резултати:

Анализа физичко-хемијских параметара воде из Александровачког језера током периода од августа до новембра 2017. године показала је значајне сезонске варијације. Током летњих месеци примећене су више вредности мутноће и раствореног кисеоника, што указује на интензивну биолошку активност, док је у јесен дошло до пораста концентрација амонијака и смањења биолошке потрошње кисеоника, што је последица разградње органских материја. Високе вредности рН (изнад 9) током целог периода указују на алкалност воде и потенцијал за развој цијанобактерија. Укупни органски угљеник и амонијак указују на значајно органско загађење, док су концентрације нитрата и ортофосфата биле ниске. Генерално, вода је класификована у IV-V класу еколошког потенцијала, што указује на низак квалитет и потребу за побољшањем стања језера.

Мониторинг фитопланктона у периоду 2020–2021. године потврдио је разноврсност таксона, са доминацијом цијанобактерија (32.6%), као и значајно учешће врста из групе Chlorophyta (26.09%). Присуство инвазивне врсте *Raphidiopsis raciborskii*, забележено је током читавог периода истраживања, са највећом бројношћу у летњим месецима. Ова врста је доминантно утицала на екосистем језера, указујући на ризик од масовног „цветаша“ воде.

У петом потпоглављу „**Анализа цијанотоксина у Александровачком језеру**“ испитано је праћење присуства цијанотоксина. Прелиминарна испитивања цијанотоксина у Александровачком језеру извршена су 2017. године, када су одређиване концентрације три форме микроцистина (MC-RR, MC-LR и MC-YR). Резултати су показали да су све концентрације биле испод 0.5 µg/L. Анализе воде су извршене током три периода 2022. године: у јуну, октобру и новембру, са циљем одређивања интрацелуларног и ванћелијског присуства токсина. Концентрације су мерене LC-MS методом. У јуну 2022. године, концентрације свих анализираних цијанотоксина биле су испод минималне детектибилне концентрације (МДК). У октобру 2022. године дошло је до повећања концентрација цијанотоксина. Ови резултати указују на повећану активност цијанобактерија и производњу токсина током јесењег периода. У новембру 2022. године концентрације цијанотоксина су благо опале у односу на октобар. Иако су концентрације остале релативно ниске, присуство токсина у овом периоду захтева пажњу због њихових потенцијално штетних ефеката. Резултати анализе указују на сезонску динамику присуства цијанотоксина у Александровачком језеру. У јуну су нивои токсина били испод граница детекције, док су у октобру достигли максимум, након чега су у новембру благо опали. Ове флукуације наглашавају потребу за континуираним мониторингом и ефикасним методама уклањања токсина из воде. Присуство микроцистина (MC-RR и MC-LR) у различитим периодима указује на потребу за проналажењем адекватних метода за њихово уклањање.

У шестом потпоглављу „**Примена активних угљеничних материјала на узорцима воде из Александровачког језера**“ су наведени резултати употребе материјала (P\_АС, A\_АС и C\_АС) за уклањање цијанобактерија и микроцистина из воде.

Ефикасност уклањања након 24 сата износила је 99.99% за P\_АС и A\_АС, и 89.79% за C\_АС. Резултати су показали да су P\_АС и A\_АС уклонили више од 99% цијанобактерија већ у првих 15 минута, док је C\_АС показао ефикасност од >84% након 15 минута и >90% након 12 сати.

Испитивања кинетике су указале на то да се уклањање најбоље описује моделом псеудо-II реда, који имплицира хемијску природу процеса адсорпције и достиже равнотежу брзо за P\_AC и A\_AC. Поређењем специфичних површина (36.6, 485, и 1,100 m<sup>2</sup>/g за P\_AC, A\_AC и C\_AC), закључено је да материјали са мањом површином могу имати већу ефикасност услед различите порозности и интеракције са цијанобактеријама.

Резултати тестова са различитим масама адсорбента показали су да је за постизање ефикасности изнад 90% потребна маса од 20 до 250 mg, зависно од запремине раствора (25–1,000 mL). За веће запремине, повећање количине адсорбента изнад одређене границе није значајно допринело уклањању, што је приписано смањењу доступне специфичне површине услед агломерације честица.

Резултати су истакли значајну ефикасност материјала A\_AC, што га чини најпогоднијим за даљу примену у уклањању цијанобактерија.

У наставку су детаљно представљени добијени резултати за примену материјала A\_AC у уклањању микроцистина, при чему су анализирани узорци воде из Александровачког језера. Тестирања су показала високу ефикасност A\_AC у уклањању три врсте микроцистина (MC-RR, MC-LR, и MC-YR) из водених раствора. За 35 mg у 1,000 mL воде, постигнута је максимална ефикасност уклањања од 88.7% за MC-RR, 82.58% за MC-LR, и 93.33% за MC-YR (јун 2022. године). Повећањем количине A\_AC на 40 mg, ефикасност уклањања микроцистина достигла је готово 100%, посебно за MC-YR (новембар 2022. године). Примећен је тренд смањења адсорбоване количине са повећањем масе адсорбента, што је објашњено феноменом засићења активних центара активног угљеника. У априлу 2024. године спроведена су додатна испитивања уклањања микроцистина из воде са A\_AC материјалом. У сировом узорку воде цијанотоксини су били испод прага детекције (<0.005 µg/L), али су у експерименталне сврхе додате дефинисане концентрације микроцистина (MC-RR: 5.34 mg/L, MC-LR: 12.53 mg/L и MC-YR: 3.39 mg/L). Испитивање је укључивало третман воде помоћу 35 mg и 40 mg A\_AC у 1,000 mL узорка. Након третмана са 35 mg A\_AC, ефикасност уклањања достигла је 86.9%, 89.7% и 96.6% за MC-RR, MC-LR и MC-YR. При количини од 40 mg A\_AC, уклањање је било још веће – 95.7% за MC-RR, 95.9% за MC-LR, док је MC-YR у потпуности уклоњен (100%).

Структура и функционалне групе материјала су значајно допринеле ефикасности адсорпције. Са FTIR спектра је уочено су присуство хидроксилних, карбонилних и аминок група, које су кључне за интеракцију са микроцистинима. Механизам везивања је обухватио комбинацију електростатичких интеракција и π-π слагања између ароматичних структура на токсинима и површини активног угљеника. Такође, структура материјала омогућила је лак приступ токсинима до активних центара.

У поглављу „Закључци“, наводи се 12 конкретних закључака који су проистекли из резултата истраживања током ове докторске дисертације. Крајњи закључак је да је активни угљенични материјал добијен из плода црне јове (A\_AC) не само ефикасан, већ и еколошки прихватљив адсорбент, који нема негативан утицај на здравље људи и животну средину. Његова примена представља значајан корак ка решавању проблема цијанобактеријског цветања и контаминације воде токсинима, уз могућност да се ова технологија даље унапреди и примени у широком спектру система за третман воде.

У оквиру поглавља „Литература“ наведено је 309 библиографских јединица. Библиографски извори обухватили су релевантна и савремена истраживања у одговарајућим научним областима, пружајући добру основу истраживању које обухвата докторска дисертација.



Поглавље „Прилози“ садржи 9 табела. У Прилогу 1 и 2 дат је литературни преглед лигноцелуозног састава урмине палме и плода црне јове. У Прилогу 3 су приказане дозвољене концентрације одређених елемената у води. Смернице и референтне вредности за одабране цијанотоксине (СЗО, 2020) су приказане у Прилогу 4, док су Смернице Светске здравствене организације за воду (СЗО, 2003) приказане у Прилогу 5. У Прилогу 6 налази се преглед базе - „Serbian Cyanobacterial Database“ цветања цијанобактерија у лентичким водама у Србији. У Прилогу 7 дати су физичко-хемијски параметри Александровачког језера (2008-2012. године). За прорачуне утицаја на здравље људи у Прилогу 8 и 9 дати су параметри за израчунавање хроничног дневног уноса и референтна доза (*RfD*) за различите метале.

## **Радови и конгресна саопштења проистекли из докторске дисертације**

### **Радови у часописима међународног значаја**

1. **Kandić, I.**, Kragović, M., Krstić, J. B., Gulicovski, J., Popović, J., Rosić, M., Karadžić, V., Stojmenović, M. (2022). Natural Cyanobacteria Removers Obtained from Bio-Waste Date-Palm Leaf Stalks and Black Alder Cone-Like Flowers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6639. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116639>

**M21 IF=4.614**

2. **Kandić, I.**, Kragović, M., Živković, S., Knežević, J., Vuletić, S., Cvetković, S., Stojmenović, M. (2024). Kinetics and Mechanism of Cyanobacteria Cell Removal Using Biowaste-Derived Activated Carbons with Assessment of Potential Human Health Impacts. *Toxins*, 16(7), 310. <https://doi.org/10.3390/toxins16070310>

**M21 IF=3.9**

3. **Kandić, I.**, Kragović, M., Gulicovski, J., Cvetković, S., Marinković, A., Stanković, S., Stojmenović, M. (2024). Examination of the Anti-Biofilm Properties of Lignocellulose-Based Activated Carbon from Black Alder for Water Treatment Applications. *Processes*, 12(11), 2383. <https://doi.org/10.3390/pr12112383>

**M22 IF=2.8**

### **Конгресна саопштења на скуповима међународног значаја штампана у целини (M33)**

1. **Kandić, I.**, Kragović, M., Gulicovski, J., Nikolić, K., Nišić, N., Karadžić, V., Stojmenović, M. (2023). Removal of potentially toxic cyanobacteria by using activated carbons obtained from biowaste. *MEP-23 : 9th International Conference Mining and Environmental Protection: Proceedings Book*. Belgrade : University of Belgrade : Faculty of Mining and Geology.

### **Конгресна саопштења на скуповима међународног значаја штампана у изводу (M34)**

1. **Kandić, I.**, Kragović, M., Vasić, A., Nišić, N., Nikolić, K., Gulicovski, J., Stojmenović, M. (2022). Characterization of active carbon materials obtained from bio waste for potential use in water purification. *6CSCS : Advanced Ceramics and Application : 6th Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials : Book of Abstracts*. Belgrade: Institute for Multidisciplinary Research, University of Belgrade.

## Провера оригиналности докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Ирине А. Кандић, број индекса Б3026/2018, послата је 16.12.2024. године на софтверску проверу оригиналности. Извештај који садржи резултате провере оригиналности ментор је добио истог дана. На основу извештаја који је добијен анализом докторске дисертације Ирине А. Кандић, под насловом „Синтеза, карактеризација и биолошка активност угљеничних материјала добијених од листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.)“, коришћењем програма iThenticate, добијен је индекс сличности који износи 9 %. Увидом у извештај утврђено је да је добијен степен подударности последица пре свега претходно публикованих резултата докторандових истраживања, проистеклих из ове дисертације. Уз то, индексу подударности допринели су и неки општи подаци, као што су латинска имена микроорганизама, скраћенице, библиографски подаци о коришћеној литератури, као и широко коришћени појмови у списку материјала и опису метода. Поједини делови текста који показују подударност нису повезани са тематиком докторске дисертације.

Када се све изнето узме у обзир, а у складу са чланом 8., став 2, Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, извештај указује на оригиналност докторске дисертације кандидата Ирине А. Кандић, под насловом „Синтеза, карактеризација и биолошка активност угљеничних материјала добијених од листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.)“, те се прописани поступак за њену одбрану може наставити.

## Мишљење и предлог Комисије

Докторска дисертација Ирине А. Кандић представља оригинални научно-истраживачки рад који се бави синтезом, карактеризацијом, као и биолошким активностима угљеничних материјала добијених од листа урмине пламе и плода црне јове, те њиховом применом у уклањању цијанобактерија и цијанотоксина. Такође, први пут се испитује антибиофилм ефекат материјала добијеног од плода црне јове. Резултати испитивања цитотоксичности, генотоксичности и утицаја животну средину материјала пружају увид у потенцијалну примену угљеничних материјала и додатно доприносе процени њихове безбедне употребе. У дисертацији је први пут описана употреба угљеничних материја добијених од биоотпада за уклањање цијанобактерија. Детаљно су описани механизми уклањања и цијанобактерија, а и цијанотоксина из воде што даје овој докторској дисертацији на важности. Дисертација се истиче јасно формулисаним циљевима, прецизним избором метода за њихово остварење, успешно спроведеним експериментима са наглашеним мултидисциплинарним приступом, темељном дискусијом и сажетим, јасним закључцима. Постигнути резултати објављени су у три научна рада у међународним часописима. Имајући у виду експериментални рад, остварене резултате и написану докторску дисертацију, Комисија закључује да су задаци постављени у циљевима испуњени, тако да позитивно оцењује докторску дисертацију.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Биолошког факултета Универзитета у Београду да прихвати позитивну оцену докторске дисертације кандидата **Ирине А. Кандић**, под насловом „Синтеза, карактеризација и биолошка активност угљеничних материјала добијених од листова урмине палме (*Phoenix dactylifera* L.) и плода црне јове (*Alnus glutinosa* L.)“ и омогући кандидату јавну одбрану рада.

У Београду, 16. 12. 2024. године

#### КОМИСИЈА:

---

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

---

др Весна Карацић, научни сарадник  
Институт за јавно здравље Србије „Др Милан  
Јовановић Батут“

---

др Стефана Цветковић, доцент  
Универзитет у Београду – Биолошки факултет