

**ИСПИТИВАЊЕ БИОСОРПЦИОНОГ КАПАЦИТЕТА
РАЗЛИЧИТИХ БИОЛОШКИХ МАТЕРИЈАЛА УЗОРКОВАНИХ
НА ТЕРИТОРИЈИ СРБИЈЕ ЗА УКЛАЊАЊЕ ЈОНА Cu^{2+} И Co^{2+}
ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА**

**EXAMINATION OF THE BIOSORPTION CAPACITY OF
VARIOUS BIOLOGICAL MATERIALS COLLECTED ON THE
TERRITORY OF SERBIA FOR THE REMOVAL OF Cu^{2+} AND
 Co^{2+} IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS**

ДУШАН МИЛОЈКОВ¹

ВУКОСАВА ЖИВКОВИЋ-РАДОВАНОВИЋ²

МИРОСЛАВ СОКИЋ³ БИЉАНА ДОЈЧИНОВИЋ⁴

АНА МРАКОВИЋ⁵ МАРИЈА КОПРИВИЦА⁶ МАРИЈА СИМИЋ⁷

Оригинални научни рад

DOI: 10.5937/VIK24421M

Резиме: Тешки метали представљају значајне контаминанте отпадних вода због своје небiorазградиве природе и трајне способности да се акумулирају у екосистемима. Технологије биоадсорпције, које користе биолошке материјале као што су микро-организми, делови биљака и природни полимери, представљају ефикасне методе за

¹ Душан Милојков, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше де Епереа 86, Београд, d.milojkov@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0746-4185

² Вукосава Живковић-Радовановић, Универзитет у Београду, Хемијски факултет, Студентски трг 16, Београд, vuka@chem.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-2558-4957

³ Мирослав Сокић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франш д'Епереа 86, Београд, m.sokic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4468-9503

⁴ Биљана Дојчиновић, Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију, Његошева 12, Београд, bmatic@chem.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1479-8060

⁵ Ана Марковић, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Мике Петровића Аласа 12-14, Београд, amrakovic@vin.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4569-5857

⁶ Марија Копривица, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше де Епереа 86, Београд, m.koprivica@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1451-5959

⁷ Марија Симић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше де Епереа 86, Београд, m.petrovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1717-7796

уклањање тешких метала из водених раствора. Ова студија истражује потенцијал различитих природних биоматеријала, пореклом из Србије, пиљевину, вуну и храстову галу за биосорпцију Cu^{2+} и Co^{2+} јона из водених раствора. Резултати показују да сви испитани материјали имају потенцијал за ремедијацију Cu^{2+} и Co^{2+} јона, при чему храстова гала демонстрира највећи капацитет биосорпције међу анализираним узорцима.

Кључне речи: биосорпција, биолошки материјали, отпадне воде, тешки метали

Abstract: Heavy metals are persistent contaminants in wastewater due to their non-biodegradable nature and their ability to accumulate in ecosystems. Biosorption technologies, which utilize biological materials such as microorganisms, plant parts, and natural polymers, have emerged as effective methods for removing heavy metals from aqueous solutions. This study evaluates the biosorption potential of various natural biomaterials originating from Serbia—specifically sawdust, wool, and oak galls—for the removal of Cu^{2+} and Co^{2+} ions from water. The examined biomaterials exhibit potential for the remediation of Cu^{2+} and Co^{2+} ions, with oak galls demonstrating the highest biosorption capacity among the tested materials.

Key Words: biosorption, biological materials, wastewater, heavy metals

1. Увод

У савременом индустријском свету, загађење вода тешким металима представља озбиљан еколошки проблем са широким последицама на животну средину и људско здравље. Тешки метали, као што су јони бакра (Cu^{2+}) и кобалта (Co^{2+}), често се налазе у отпадним водама које потичу из различитих индустријских процеса, укључујући електрохемијску, металуршку и текстилну индустрију. Ови метали, иако имају значајне технолошке и индустријске примене, могу узроковати озбиљна еколошка и здравствена оштећења када се налазе у водама у вишим концентрацијама. Јони бакра, иако су мање токсични у поређењу са неким другим тешким металима, могу изазвати разне здравствене проблеме, укључујући гастроинтестиналне поремећаје, оштећење јетре и проблеме са бубрезима при високим концентрацијама [1]. Због тога је важно контролисати ниво ових метала у отпадним водама како би се очувала људска и еколошка сигурност.

Кобалт, с друге стране, представља додатни изазов због своје потенцијалне радиоактивности. У природним условима, кобалт се може наћи у форми изотопа који су радиоактивни, као што је кобалт-60. Кобалт-60 је познат по својој употреби у медицинској радиотерапији и индустријским стерилизацијама, али због своје радиоактивности може представљати значајан ризик за људско здравље и животну средину. Радиоактивни изотопи кобалта могу узроковати озбиљне здравствене проблеме, укључујући повећан ризик од рака, генетска оштећења и друге облике биолошког стреса [2, 3]. С обзиром на ове

ризике, ефикасно уклањање јона кобалта из отпадних вода је од кључне важности за очување еколошке равнотеже и заштиту људског здравља. За решавање проблема загађења водом тешким металима, развијене су различите технологије за ремедијацију, од којих се биосорпција показала као обећавајућа метода. Биосорпција користи природне материјале као што су биљни отпад, микроорганизми и животињски материјали за уклањање јона метала из водених раствора. Ова метода нуди бројне предности, укључујући високу ефикасност у уклањању јона метала, ниске трошкове и еколошку прихватљивост. Такође, биосорпција омогућава употребу материјала који су широко доступни и често су нуспроизводи различитих индустрија, што додатно доприноси њеној економској исплативости и одрживости [4, 5].

У овом раду испитујемо употребу природних биосорбената из Србије за уклањање јона бакра (Cu^{2+}) и кобалта (Co^{2+}) из водених раствора. Специфични материјали који ће бити истражени укључују пиљевину, вуну и храстову галу. Пиљевина и вуна су отпадни производи из дрвне и текстилне индустрије који су често доступни и лако обрадиви, док су храстове гале биљног порекла присутне су у природним окружењима и лако доступне. Истраживање ће се фокусирати на ефикасност ових материјала у уклањању јона метала, анализирајући како њихова хемијска и физичка својства утичу на биосорпцију. Такође, биће истражене могућности за побољшање технологија за третман отпадних вода, пружајући препоруке за примену ових материјала у стварним поступцима како би се унапредила ефикасност и одрживост процеса ремедијације.

2. Материјали и методе

2.1. Узorkовање и карактеризација биосорбената

Како смо желели да упоредимо сорпционе особине природних биоматеријала, одабрали смо пиљевину, вуну и храстову галу, и осушили их на ваздуху. Карактеризација биоматеријала је извршена помоћу оптичке микроскопије, којом је испитана морфологија, и FTIR спектроскопије, којом су идентификоване функционалне групе.

2.2. Адсорпција

Припремљено је по 1 L раствора концентрације 15 mM бакар-ацетата и 15mM кобалт-ацетата, као и 1 L mix-rastvora који садржи 15 mM бакар-ацетата и 15 mM кобалт-ацетата. Ти раствори су разблажени 5 пута по 20,0 mL у нормалним судовима од 100,0 mL, да бисмо касније ICP методом одредили њихове тачне концентрације. Пиљевина, гала и вуна су одмерени у количини од по 1g и пренети у ерленмајере. На њих је додато по 100 mL раствора метала. Ерленмајери су затворени парафилмом и остављени 24 h. Након тог времена одекантовали смо растворе и аликвоте од по 10,0 mL прокували са по 6,0 mL

конц. азотне киселине и 3,0 mL 30% водоник пероксида (да бисмо разорили органску материју) и разблажили до 50,0 mL у нормалним судовима.

2.3. Десорпција

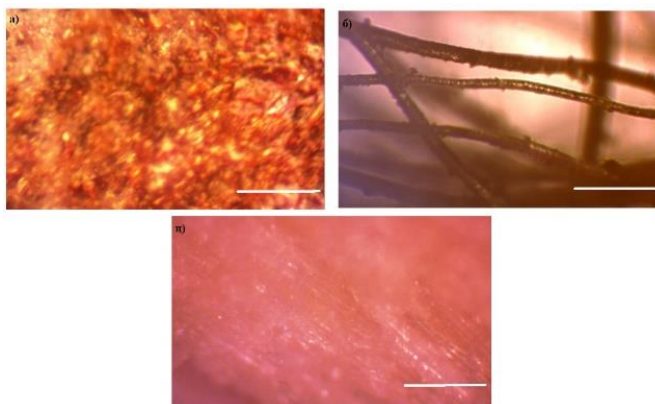
Биосорбенте (који су се видно обојили сорбованим јонима) смо испрали неколико пута дејонизованом водом и потопили у по 50 mL 0,5M раствора HCl. Након 24 h растворе смо одекантовали и разблажили дејонизованом водом 5 пута (аликвоте од 10,0 mL у нормалним судовима од 50,0 mL).

2.4. Одређивање садржаја Cu^{2+} и Co^{2+} у добијеним растворима

Садржај метала одредили смо ICP-методом на апарату: ICP iCap 6500 Duo (Thermo Scientific, England). Раствори мултистандарда за калибрационе криве имали су следеће концентрације: 1; 10, 100 и 200 ppm.

3. Резултати и дискусија

Коришћење пиљевине, вуне и храстове гале као биосорбената за јоне тешких метала има неколико предности, а пре свега њихова расположивост и обновљивост, затим еколошка прихватљивост и ефикасност у биосорпцији. Сви наведени материјали су природни, што може смањити трошкове и еколошки утицај у поређењу са хемијским методама. Пиљевина, вуна, и храстове гале су лако доступни и обновљиви ресурси, што олакшава њихову употребу у различитим географским подручјима.



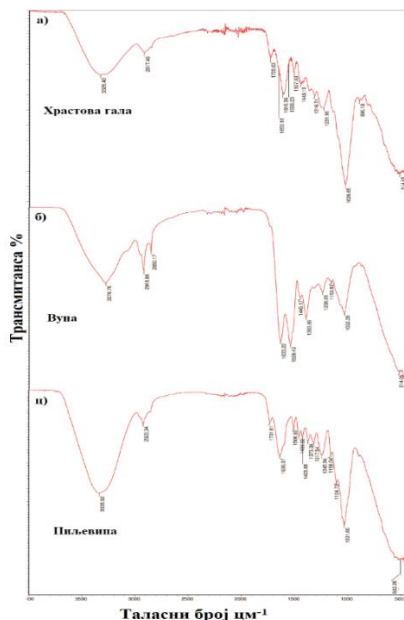
Слика 1. Микроскопско испитивање морфологије биосорбената. Храстова гала (а), вуна (б) и пиљевина (ц). Увећање 100х.

Figure 1. Microscopic investigation of biosorbent morphology. (a) oak gala, (b) wool, sawdust (c). Magnification 100x.

Ови материјали показују способност да ефикасно сорбују тешке метале из водених раствора, што је кључно за њихову примену у третману загађених

вода или земљишта. Употреба ових биосорбената може бити еколошки прихватљива алтернатива конвенционалним хемијским методама, смањујући потенцијалну штету по животну средину. На слици 1 је приказано микроскопско испитивање морфологије природних материјала као потенцијалних биосорбената.

Под светлосним микроскопом, храстове гале, формиране као одговор храста на јаја инсеката или присуство патогена, приказују сложене слојеве ткива око централне коморе са јајетом. Структура ткива варира у зависности од фазе развоја, често изгледајући густе и комплексне под микроскопским испитивањем [6]. Спољашња површина гале обично је смеђа, одражавајући њен тврди састав. Микроскопско испитивање вуне открива дугуљаста влакна која се одликују својом дужином и присуством љуски дуж површине, које постају видљиве при већем увећању [7]. Влакна имају црну или смеђу боју, и имају мекану и влакнасту текстуру. Под микроскопом пиљевина се појављује као скуп малих ћелија дрвета различитих величина и облика. Детаљним посматрањем уочавају се појединачна дрвена влакна И јасни зидови ћелија зависно од врсте дрвета [8]. Општи изглед карактерише влакнаста текстура, обично у нијансама смеђе или тан боје.



Слика 2. FTIR спектри биосорбената (а) храстова гала, (б) вуна, (ц) пиљевина

Figure 2. FTIR spectrum of biosorbents (a) oak gale, (b) wolo, (c) sawdust

FTIR спектроскопија анализира хемијски састав биосорбената на основу детекције вибрација функционалних група (слика 2). На основу FTIR спектра може се видети да су храстове гале богате танинима, фенолима, целулозом и лигнином. Хемијске групе у вуни указују на присуство протеина, липида и других органских једињења. Док је пиљевина богата целулозом, хемицелулозом и лигнином. На слици 2 су детаљно анализирани пикови на FTIR спектрима, којима су додељене вибрације на основу литературних података.

Специфични пикови у FTIR спектру храстове гале указују на присуство танина, фенола, целулозе, хемицелулозе и других органских компоненти:

- 514 cm^{-1} : C-C вибрације у ароматским једињењима, карактеристичне за танине и феноле [9].
- 896 cm^{-1} : C-H савијене вибрације у ароматским једињењима или C-O-C вибрације у хемицелулози и целулози [9].
- 1231 cm^{-1} : C-O вибрације у естерским групама, C-N у аминским групама, или C-O-C у хемицелулози [10].
- 1316 cm^{-1} : CH_2 и C-H савијене вибрације у танинима или целулози [11].
- 1448 cm^{-1} : CH_2 савијене вибрације у танинима, хемицелулози, или целулози, и могуће COO^- групе [10].
- 1507 cm^{-1} : C=C вибрације у ароматским прстеновима, типичне за фенолне једињења и танине [11].
- 1616 cm^{-1} : C=C вибрације у ароматским прстеновима, указујући на танине или фенолна једињења [9].
- 1653 cm^{-1} : C=O вибрације у естерским групама, могуће присуство киселих група или амида I у протеинским материјалима [10].
- 1733 cm^{-1} : C=O вибрације у естерским групама, указујући на естре или киселине [10].
- 2917 cm^{-1} : CH_2 асиметричне растезљиве вибрације у танинима, хемицелулози, целулози или другим органским материјама [10].
- 3329 cm^{-1} : O-H или N-H растезљиве вибрације, указујући на водоникове везе у фенолима, танинима или другим органским материјама [9].

FTIR спектар вуне открива различите пикове који одговарају специфичним вибрацијама функционалних група и хемијских структура у влакнима вуне пореклом од протеина, липида и других органских компоненти:

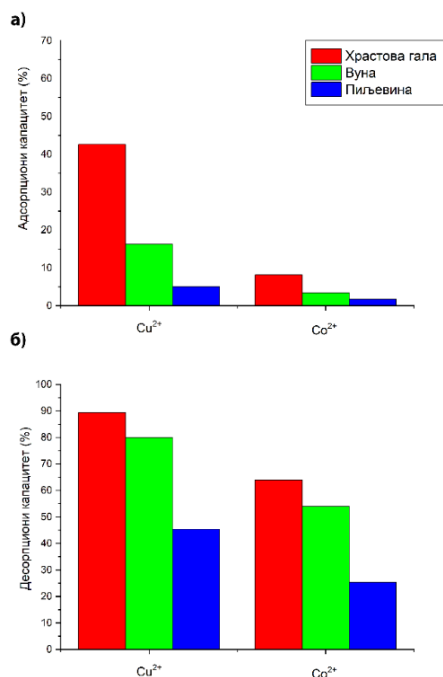
- 514 cm^{-1} : C-S вибрације у дисулфидним мостовима (S-S) у кератину, као и C-N вибрације у аминским групама [12, 13, 14].
- 1039 cm^{-1} : C-O-C вибрације у полисахаридима или C-N вибрације у аминским групама кератина, или C-O вибрације у угљенохидратима [12].

- 1153 cm^{-1} : C-O-C вибрације у хемицелулози или C-N вибрације у аминским групама [12, 13, 14].
- 1238 cm^{-1} : C-N вибрације у аминским групама, C-O вибрације у естерским групама, или амидне III вибрације у кератину [12].
- 1393 cm^{-1} : CH_3 савијене вибрације или COO^- вибрације у киселим групама у кератину [12].
- 1445 cm^{-1} : CH_2 савијене вибрације, повезане са метиленским групама у кератину [12].
- 1539 cm^{-1} : Amide II вибрације, укључујући N-H савијене вибрације и C-N вибрације у кератину [12].
- 1633 cm^{-1} : Amide I вибрације, укључујући C=O вибрације у пептидним везама у кератину, или C=C вибрације у ароматским једињењима [12].
- 2850 cm^{-1} : CH_2 асиметричне растезљиве вибрације, присутне у липидима и другим органским материјама [13].
- 2918 cm^{-1} : CH_3 асиметричне растезљиве вибрације у липидима, протеинима и другим органским молекулама [12].
- 3276 cm^{-1} : O-H и N-H растезљиве вибрације, повезане са -OH или -NH групама у кератину и другим протеиним [12].

FTIR спектар пиљевине открива пикове који одражавају присуство различитих хемијских компоненти као што су целулоза, хемицелулоза, лигнин и други органски материјали:

- 502 cm^{-1} : C-C вибрације у ароматским једињењима, као што је лигнин, и C-H савијене вибрације у целулози или хемицелулози [15].
- 1031 cm^{-1} : C-O-C вибрације у хемицелулози или целулози, или C-O вибрације у полисахаридима [15].
- 1104 cm^{-1} : C-O-C вибрације у целулози и хемицелулози, указујући на присуство ових полисахарида [15].
- 1158 cm^{-1} : C-O-C вибрације у хемицелулози и C-O вибрације у целулози, с могућим присуством C-N вибрација у аминским групама [15].
- 1234 cm^{-1} : C-O-C вибрације у хемицелулози, и C- вибрације у протеинским материјалима ако су присутни [15].
- 1317 cm^{-1} : CH_2 савијене вибрације или C-H савијене вибрације у хемицелулози или лигнину [15].
- 1373 cm^{-1} : CH_3 савијене вибрације и C-H савијене вибрације у целулози или хемицелулози, или COO^- групе у киселим компонентама [15].

- 1423 cm^{-1} : CH_2 савијене вибрације у целулози, хемицелулози или лигнину [15].
- 1456 cm^{-1} : CH_2 савијене вибрације и C-H вибрације у целулози, хемицелулози или лигнину [15].
- 1506 cm^{-1} : $\text{C}=\text{C}$ вибрације у ароматским једињењима као што је лигнин, или $\text{C}=\text{O}$ вибрације у киселим компонентама [15].
- 1636 cm^{-1} : $\text{C}=\text{O}$ вибрације у естерским групама или $\text{C}=\text{C}$ вибрације у ароматским ринговима, посебно у лигнину [15].
- 1731 cm^{-1} : $\text{C}=\text{O}$ вибрације у естерским групама или киселим групама као што су ацетилне групе у хемицелулози [15].
- 2923 cm^{-1} : CH_2 асиметричне растезљиве вибрације, присутне у целулози, хемицелулози и другим органским материјама [15].
- 3335 cm^{-1} : O-H или N-H растезљиве вибрације, указујући на водоникове везе у хемицелулози, целулози или у неким протеинима [15].



Слика 3. Сорпциони капацитет биосорбента за Cu^{2+} и Co^{2+} јоне (а) адсорпција, (б) десорпција.

Figure 3. Sorption capacity of biosorbents for Cu^{2+} and Co^{2+} ions. (a) adsorption, (b) desorption.

На слици 3 су приказане сорпционе особине испитиваних биосорбената. Храстова гала показује највећи адсорпциони капацитет за Cu^{2+} јоне (око 44%) и значајан капацитет за Co^{2+} јоне (око 10%). Ови резултати указују на високу ефикасност храстове гале у везивању Cu^{2+} јона у поређењу са Co^{2+} јонима. Ово може бити последица присуства танина у храстој гали, који су природна органска једињења са јаким афинитетом према јонима метала. Танини могу формирати комплексне структуре с јонима метала путем координационих веза, посебно с хидроксилним и карбоксилним групама које су присутне у њиховој структури. С обзиром на то, храстова гала се издваја због своје способности да ефикасно адсорбује Cu^{2+} јоне, док су кобалтови иони мање привучени. Вуна има мањи капацитет за адсорпцију Cu^{2+} јона (око 15%) и Co^{2+} јона (око 4%) у поређењу са храстовом галом. Ова разлика може бити објашњена присуством кератина, протеина у вуни, који може имати мањи афинитет према металним јонима у односу на танине у храстој гали. Кератин садржи функционалне групе које могу интераговати с јонима метала, али у мањој мери [16]. Површински набор вуне може бити мање ефикасан за адсорпцију.

Пиљевина показује најмањи капацитет за адсорпцију Cu^{2+} јона (око 5%) и Co^{2+} јона (око 2%). Пиљевина има велику специфичну површину, али њена мања способност за адсорпцију може бити последица мањег броја функционалних група или њихове мање афинитетности према јонима метала [17]. Присутне функционалне групе као што су хидроксилне групе могу допринети адсорпцији, али у мањој мери у поређењу са групама код танина и кератина. Храстова гала показује високи капацитет за десорпцију Cu^{2+} јона (око 90%) и значајан капацитет за десорпцију Co^{2+} јона (око 65%). Висок капацитет десорпције може бити резултат стварања комплекса и слабијих веза између јона метала и функционалних група танина [18]. Ово указује на могућност ефикасне регенерације храстове гале након адсорпције јона метала. Танини у храстој гали формирају сложене координационе комплексе с јонима метала. Ове интеракције могу бити релативно слабе и лако се могу раскинути током процеса десорпције, нарочито ако се користе одговарајући десорптори. То омогућава високу ефикасност десорпције јона метала. Танини често имају више слободних грана и активних места која олакшавају ослобађање металних јона [18].

Вуна показује средњи капацитет за десорпцију Cu^{2+} јона (око 80%) и Co^{2+} јона (око 55%). Ово сугерише да иако вуна може ефикасно адсорбовати одређене металне јоне, процес десорпције је мање ефикасан у поређењу с храстовом галом. Могуће је да су комплексне структуре у вуни мање стабилне за десорпцију у поређењу са онима у храстој гали [16]. У вуни, кератин може формирати чврсте и стабилне везе са јонима метала, делимично због своје комплексне структуре и способности да се формирају дисулфидне везе између

аминокиселина. Ове везе могу бити теже за раскидање, што отежава десорпцију јона метала. Вуна може имати слабији капацитет за десорпцију у поређењу с храстовом галом јер су јони метала чврсто везани за протеинске структуре [16]. Пиљевина има најнижи капацитет за десорпцију Cu^{2+} јона (око 45%) и Co^{2+} јона (око 25%). Ниска ефикасност десорпције може бити последица јаке интеракције између јона метала и функционалних група у пиљевини, као и мањих површинских карактеристика за ефикасну регенерацију [17].

Пиљевина може садржавати релативно мало функционалних група или имати групе које формирају стабилније комплексне везе с јонима метала. Ове стабилније интеракције могу отежати ослобађање металних јона током десорпције, иако су и капацитети за адсорпцију мањи у поређењу с другим материјалима [17].

Примена биосорпције у Србији нуди значајне предности захваљујући доступности локалних сировина попут пиљевине, вуне и храстове гале, што не само да може смањити трошкове, већ и допринети одрживом управљању ресурсима. С обзиром на специфичне карактеристике биоматеријала, додатна истраживања и технолошка унапређења могу побољшати ефикасност биосорпције и њен утицај на очување животне средине.

4. Закључак

Резултати овог истраживања указују на значајан потенцијал природних биоматеријала као што су храстова гала, вуна, и пиљевина у процесу биосорпције тешких метала из водених раствора. Посебно се издваја храстова гала, која је показала највиши капацитет биосорпције за јоне Cu^{2+} и Co^{2+} међу испитиваним материјалима.

Ови налази потврђују да су локално доступни биолошки материјали из Србије ефикасни у уклањању тешких метала из отпадних вода, пружајући еколошки прихватљиве и економски исплативе алтернативе конвенционалним хемијским методама. Имплементација ових биоматеријала у праксу може допринети одрживом управљању природним ресурсима, смањењу загађења и заштити животне средине.

Даље истраживање и оптимизација биосорпционих процеса могли би унапредити њихову примену у индустријској и еколошкој пракси.

5. Захвалница

Захваљујемо се Министарству за науку, технолошки развој и иновације Републике Србије (број уговора: 451-03-66/2024-03/200023, 451-03-66/2024-03/200168, 451-03-66/2024-03/200026).

6. Литература

- [1] Alloway B, Ayres D. C. *Chemical principles of environmental pollution*. CRC press; Feb 13, 1997.
- [2] Mason C. F. *Biology of Freshwater Pollution*. Longman, 2002.
- [3] Gautam P. K, Gautam R. K, Banerjee S, Chattopadhyaya M. C, Pandey J. D. *Heavy metals in the environment: fate, transport, toxicity and remediation technologies*. Nova Sci Publishers. 60:101-30, 2016.
- [4] Volesky B, Holan Z. R. Biosorption of heavy metals. *Biotechnology progress*. May;11(3):235-50, 1995.
- [5] Ahalya N, Ramachandra T. V, Kanamadi R. D. Biosorption of heavy metals. *Res. J. Chem. Environ*. Dec;7(4):71-79, 2003.
- [6] Banc R, Rusu M. E, Filip L, Popa D. S. Phytochemical profiling and biological activities of quercus sp. galls (Oak galls): a systematic review of studies published in the last 5 years. *Plants*. 2023 Nov 16;12(22):3873, 2023.
- [7] Heliopoulos N. S, Komporozos G. A, Papageorgiou S. K. *Quality evaluation of wool: methods of evaluation of quality of wool, parameters, and important standards*. In *The Wool Handbook 2024* Jan 1 (pp. 195-237). Woodhead Publishing, 2024.
- [8] Tardif J. C, Conciatori F. *Microscopic examination of wood: Sample preparation and techniques for light microscopy*. Plant microtechniques and protocols. 373-415, 2015.
- [9] Siesler H. W, Ozaki Y, Kawata S. & Heise H. M. (Eds.). *Near-infrared spectroscopy: principles, instruments, applications*. John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Faix O. *Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy*, 21-28, 1991.
- [11] Ricci A, Olejar K. J, Parpinello G. P, Kilmartin P. A, Versari A. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in the characterization of tannins. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2015 May 28;50(5):407-42, 2015.
- [12] Peets P, Kaupmees K, Vahur S. et al. Reflectance FT-IR spectroscopy as a viable option for textile fiber identification. *Herit Sci* 7, 93, 2019.
- [13] Belukhina O, Milasiene D, Ivanauskas R. Investigation of the Possibilities of Wool Fiber Surface Modification with Copper Selenide. *Materials*. 14(7):1648, 2021.
- [14] Hou X, Xu H, Shi Z, Ge M, Chen L, Cao X, Yang Y. Hydrothermal pretreatment for the preparation of wool powders. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(8), 2014.
- [15] Cao C, Yang Z, Han L. et al. Study on in situ analysis of cellulose, hemicelluloses and lignin distribution linked to tissue structure of crop stalk internodal transverse section based on FTIR microspectroscopic imaging. *Cellulose* 22, 139–149, 7, 2015.

- [16] Shankar S, Rhim J. W. Eco-friendly antimicrobial nanoparticles of keratin-metal ion complex. *Materials Science and Engineering: C*, 105, 110068, 2019.
- [17] Mishra V, Tadepalli S. Biosorption of toxic heavy metals on sawdust. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 43(3), 360-367, 2015.
- [18] Bacelo H. A, Santos S. C, Botelho C. M. Tannin-based biosorbents for environmental applications–A review. *Chemical Engineering Journal*, 303, 575-587, 2016.