Часопис за уређење бујица и заштиту од ерозије
Journal of erosion and torrent control

ЕРОЗИЈА

Број 52

UDK 626 ISSN 0350-9648 (Штампано изд.); ISSN 3104-3259 (Online)



Београд, 2026. година

ЕРОЗИЈА
Научни часопис за уређење бујица и заштиту од ерозије

Главни и одговорни уредник
Нада Драговић, Шумарски факултет Универзитета у Београду

Уређивачки одбор

Станимир Костадинов, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Миодраг Златић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Ратко Ристић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Ivan Blinkov, Faculty of Forestry University of Sv.Kiril and Metodij, Skopje, North Macedonia
Johannes Huebl, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria
Miroslav Dumbrovský, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic
José Luis Rubio, Desertification Research Centre-CIDE, University of Valencia, Spain
Stefanos Stefanidis, Hellenic Agricultural Organization-Forest Research Institute, Thessaloniki, Greece
Guillaume Piton, Univ. Grenoble Alpes, INRAE, IGE–Institute of Environmental Geosciences, France
Muhamed Bajrić, Šumarski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
Мирјана Тодосијевић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Снежана Белановић Симић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Тијана Вулевић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Ирина Стефановић, Институт за водопривреду Јарослав Черни, Београд
Соња Брауновић, Институт за шумарство, Београд
Сара Лукић, Шумарски факултет Универзитета у Београду
Весна Николић Јокановић, Шумарски факултет Универзитета у Београду

Технички уредници
Милутин Стефановић, Синиша Половина, Иван Миладиновић

Издавач
Удружење бујичара Србије и Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд
Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд

Адреса е-поште: nada.dragovic@sfb.bg.ac.rs, bujicari@gmail.com
Интернет презентација:
https://www.sfb.bg.ac.rs/fakultet/izdavacka-delatnost/suizdavaci/casopis-erozija/;
www.udruzenjebujicara.com

Тираж: 50

Штампа
Тукан принт

EROSION CONTROL
Scientific Journal of erosion and torrent control

Editor in Chief
Nada Dragović, Faculty of Forestry University of Belgrade

Advisory Board
Stanimir Kostadinov, Faculty of Forestry University of Belgrade
Miodrag Zlatić, Faculty of Forestry University of Belgrade
Ratko Ristić, Faculty of Forestry University of Belgrade
Ivan Blinkov, Faculty of Forestry University of Sv. Kiril and Metodij, Skopje, North Macedonia
Johannes Huebl, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria
Miroslav Dumbrovský, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic
José Luis Rubio, Desertification Research Centre-CIDE, University of Valencia, Spain
Stefanos Stefanidis, Hellenic Agricultural Organization-Forest Research Institute, Thessaloniki, Greece
Guillaume Piton, Univ. Grenoble Alpes, INRAE, IGE–Institute of Environmental Geosciences, France
Muhamed Bajrić, Šumarski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
Mirjana Todosijević, Faculty of Forestry University of Belgrade
Snežana Belanović Simić, Faculty of Forestry University of Belgrade
Tijana Vulević, Faculty of Forestry University of Belgrade
Irina Stefanović, Institute for water management Jaroslav Černi, Belgrade
Sonja Braunović, Institut of Forestry, Belgrade
Sara Lukić, Faculty of Forestry University of Belgrade
Vesna Nikolić Jokanović, Faculty of Forestry University of Belgrade

Technical editors
Milutin Stefanović, Siniša Polovina, Ivan Miladinović

Publisher
Association of graduate engineers in torrent control of Serbia and Faculty of Forestry University of Belgrade, Belgrade, Kneza Viseslava 1, 11030 Belgrade
E-mail address: nada.dragovic@sfb.bg.ac.rs; bujicari@gmail.com
Web site: https://www.sfb.bg.ac.rs/fakultet/izdavacka-delatnost/suizdavaci/casopis-erozija/; www.udruzenjebujicara.com

Circulation: 50 copies

Print
Tukan Print

садржај
contents

I ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАДОВИ
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER

Љубица Симанић, Синиша Половина, Владислав Кецовић, Ратко Ристић, Вукашин Милчановић
Анализа површинског отицаја на сливу реке Јабланице до бране Стубо-Ровни применом HEC-HMS модела
Analysis of surface runoff in the Jablanica river catchment up to the Stubo-Rovni dam using HEC-HMS model **7**

Анђелковић Александар, Николић Јокановић Весна, Јокановић Душан, Парезановић Софија
Инверзни хидраулички прорачун средњег пада и предлог регулационог решења водотока
Inverse hydraulic calculation of the mean energy slope and a regulation design proposal for a torrential stream **32**

Софија Парезановић, Весна Николић Јокановић, Душан Јокановић, Александар Анђелковић, Кристина Ђорђевић
Анализа хидролошког режима на подручју хигрофилних шума Горњег Подунавља
Analysis of the hydrological regime at the area of higrophilous forests of Gornje Podunavlje area **47**

Tijana Vulević, NadaDragović, Mirko Šćepanović
Primena bagera u vodoprivredi i njihov uticaj na životnu sredinu
Application of excavators in water management and their impact on the environment **58**

Aleksandar Baumgertel, Sara Lukić, Dule Karavesović
Postojeće stanje šumskih zaštitnih pojaseva i njihov potencijal za unapređenje EuroVelo biciklističkih ruta u Vojvodini
Present state of protective forest belts (pfbs) and their potential for enhancing EuroVelo cycling routes in Vojvodina **70**

II ПРЕГЛЕДНИ РАДОВИ
REVIEWS PAPERS

Стефановић Милутин, Стефановић Ирина, Ђорђе Живановић
Пројектовање и примена биотехничких радова у заштити од ерозије земљишта
Design and implementation of biotechnical measures for soil erosion control **80**

Marlena Baranowska, Sylwia Budzyńska, Miodrag Zlatić
Monitoring drvenastih biljaka i sanacija hemijski degradiranih zemljišta u Poljskoj: od dendromonitoringa do dendroremedijacije i obnove ekosistema
Woody plants in the monitoring and restoration of chemically degraded soils in Poland: from dendromonitoring to dendroremediation and ecosystem restoration **100**

III УПУТСТВО ЗА АУТОРЕ
INSTRUCTION FOR AUTHORS **128**

Штампање часописа ЕРОЗИЈА број 52 омогућила је:

ИНЖЕЊЕРСКА
КОМОРА
СРБИЈЕ

Фотографије на насловној страни:
Слика 1. Регулација потока Cascade du Morel (Водопад Морел) у близини места La Léchère и Grand-Aigueblanche, област Савоја у Француској; Аутор: Patafisik
Слика 2. Примена багера Menzi Muck на регулисању водотока;
Извор: ЈВП "Београдводе", Београд
Слика 3. Ветрозаштитни појас;
Извор: https://www.poljosfera.rs/vocarstvo-i-vinogradarstvo/vetrozastitni-pojas/

DOI:10.5937/eroz52-72597 ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД

АНАЛИЗА ПОВРШИНСКОГ ОТИЦАЈА НА СЛИВУ РЕКЕ ЈАБЛАНИЦЕ ДО БРАНЕ СТУБО-РОВНИ ПРИМЕНОМ HEC-HMS МОДЕЛА

ANALYSIS OF SURFACE RUNOFF IN THE JABLANICA RIVER CATCHMENT UP TO THE STUBO-ROVNI DAM USING HEC-HMS MODEL

Љубица Симанић[1*], Синиша Половина[2], Владислав Кецовић[1], Ратко Ристић[2], Вукашин Милчановић[2]

[1]„Србијаводе“ д.о.о, Булевар уметности 2а, 11070 Београд
[2]Шумарски факултет Универзитет у Београду, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд

Примљен: 24.04.2026. / ***Рецензиран:*** 24.05.2026. / ***Прихваћен:*** 01.07.2026

АПСТРАКТ

У раду је анализиран процес формирања површинског отицаја на сливу реке Јабланице до бране Стубо-Ровни применом хидролошког модела HEC-HMS. Истраживање је усмерено на испитивање могућности примене модела у симулацији појединачних падавинских догађаја. Формиран је полудистрибуирани модел заснован на SCS методи губитака, SCS јединичном хидрограму и рецесионом моделу базног протока. Калибрација је извршена за период мај 2024. године, док је валидација спроведена на независном периоду мај 2025. године, уз задржавање истих параметара модела. Добијени резултати показују да модел омогућава задовољавајућу репродукцију временске динамике и укупне количине отицаја. Модел добро осликава динамику отицаја, али се вршне вредности не поклапају. Резултати указују да HEC-HMS модел представља применљив алат за анализу процеса отицаја у условима симулације појединачних падавинских догађаја.

Кључне речи: Површински отицај, HEC-HMS, хидролошко моделирање, слив реке Јабланице, симулација падавинских догађаја

ABSTRACT

This study analyzes the process of surface runoff formation in the Jablanica River catchment upstream of the Stubno–Rovni dam using the HEC-HMS hydrological model. The research is focused on assessing the applicability of the model for simulating individual rainfall events. A semi-distributed model was developed based on the SCS loss method, the SCS Unit Hydrograph, and a recession-based baseflow model. Calibration was performed for the period of May 2024, while validation was conducted using an independent dataset from May 2025, with the same model parameters retained. The obtained results indicate that the model provides a satisfactory reproduction of the temporal dynamics and total runoff volume. The model adequately represents runoff dynamics, although peak discharge values show certain

[1] *Љубица Симанић, email: ljubica.simanic@srbijavode.rs, ORCID ID: 0009-0005-7025-0093; Синиша Половина ORCID ID: 0000-0001-5134-0548; Ратко Ристић ORCID ID: 0000-0001-6817-2800; Вукашин Милчановић ORCID ID: 0000-0001-6595-3863

discrepancies. Overall, the findings suggest that the HEC-HMS model represents a suitable tool for analyzing runoff processes under conditions of individual rainfall event simulations.

Keywords: Surface runoff, HEC-HMS, hydrological modeling, Jablanica River catchment, rainfall event simulation

УВОД

Хидролошко моделирање представља симулацију процеса хидролошког циклуса, од падавина до формирања отицаја на сливовима. Његова примена је веома широка и обухвата прогнозу протока и великих вода, пројектовање система за заштиту од поплава, анализу урбаних система одвођења атмосферских вода, процену водних ресурса и разумевање процеса трансформације падавине у отицај (Chow et al., 1988; Beven, 2012). Посебан значај хидролошко моделирање има у анализи екстремних догађаја, односно појаве великих вода, које представљају један од најважнијих фактора ризика у управљању водама (Singh, 1995; Плавшић, 2014).

Основна подела хидролошких модела је на стохастичке и параметарске. Стохастички модели („црне кутије“) заснивају се на статистичким везама између улазних података (падавине, температура и др.) и излазних величина (проток), без директног описивања физичких процеса. Насупрот томе, параметарски модели („сиве кутије“) представљају отицај помоћу концептуалних резервоара који симулирају различите компоненте хидролошког циклуса, као што су површински и подземни отицај, инфилтрација и ток у речном кориту (Chow et al., 1988). Ови модели дају детерминистичке резултате за исте улазне услове, док стохастички приступи производе расподеле вероватноће исхода.

Савремени хидролошки модели садрже скуп улазних података, граничних и почетних услова, као и параметара који описују понашање слива. Док се поједини параметри могу одредити директним мерењем, већина се утврђује кроз процес калибрације, чији је циљ постизање задовољавајућег слагања између симулираних и осмотрених протока (Beven, 2012). У зависности од начина просторне репрезентације, модели могу бити дистрибуирани, са параметрима дефинисаним за сваку просторну јединицу, или агрегирани, где се цео слив посматра као јединствен систем. Полудистрибуирани приступ представља компромис између ова два, јер слив дели на подсливове са сопственим параметрима (Refsgaard, 1997; Singh & Woolhiser, 2002; Плавшић, 2014).

Развој хидролошког модела обухвата више фаза: дефинисање перцептуалног оквира, формулисање математичког описа процеса, имплементацију у софтверском окружењу, као и поступке калибрације и валидације. Валидација подразумева тестирање модела на независном периоду, при чему је уобичајено да резултати буду нешто слабији у односу на калибрациони период (Beven, 2012).

У зависности од временског обухвата, модели могу бити континуални или епизодни. Епизодни модели се примењују за симулацију појединачних падавинских догађаја и формирања поплавних таласа, што је од посебног значаја у анализи великих вода (Singh, 1995). Један од најчешће коришћених софтверских пакета за ову намену је HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), који омогућава симулацију процеса трансформације падавине у отицај применом различитих метода губитака, трансформације и базног тока (Feldman, 2000; USACE, 2016). Његова примена је широко заступљена како у научним истраживањима тако и у инжењерској пракси (Beven, 2012; Плавшић, 2014; Zlatanović, 2006).

Успешност примене модела најчешће се оцењује упоређивањем симулираних и осмотрених хидрограма уз примену статистичких показатеља, као што су коефицијент корелације и Nash–Sutcliffe коефицијент ефикасности (Nash,Sutcliffe, 1970; Moriasi et al.,

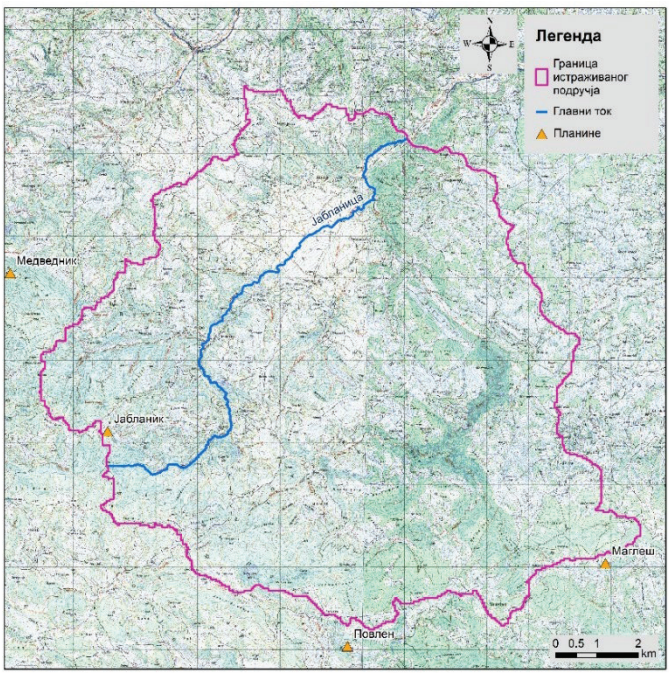
2007). Ови показатељи омогућавају процену систематских и динамичких одступања у симулацији отицаја.

Хидролошко моделирање се може примењивати на изучених и на неизучених сливовима. На изученим сливовима, као што је слив реке Јабланице, могуће је спровести калибрацију модела на основу расположивих података о падавинама, протицајима и климатским условима (Todorović, 2016; Плавшић, 2014; Ерић, 2019; Beven, 2012; Wagener et al., 2004). У оквиру овог рада коришћени су подаци часовних вредности протока са хидролошке станице „Седлари ХС“ и подаци часовних вредности падавина забележених са метеоролошке станице „Доње Лесковице ДКС“, на основу којих је формиран модел за анализу процеса отицаја применом HEC-HMS софтвера.

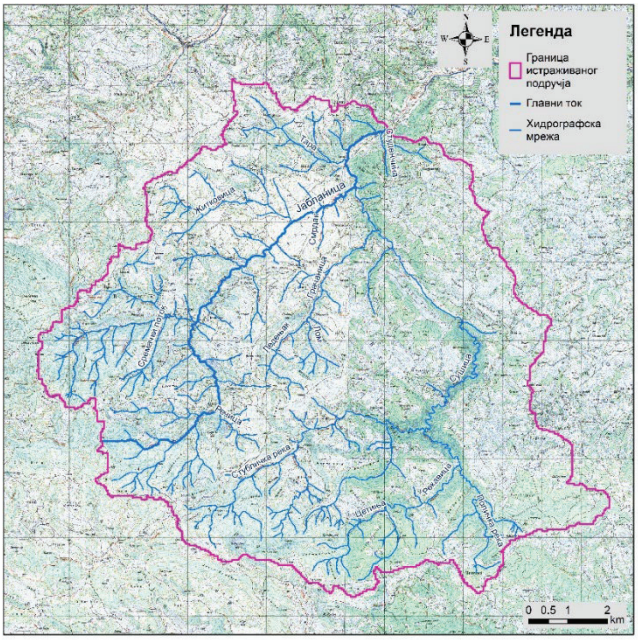
МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Опште карактеристике истраживаног подручја

Подручје на ком је спроведена анализа у овом раду је слив реке Јабланице до бране Стубо-Ровни, који се налази у северозападном делу Републике Србије, југозападно од града Ваљева (слика 1). Слив је позициониран у општини Ваљево, која припада Колубарском округу. Слив Јабланице припада сливу Колубаре, коју формира заједно са Обницом, и њене веће притоке су Сушица, Тара и Велика Река (слика 2). Укупна површина сливног подручја износи 117,06 km^2, а остале физичко-геогрфаске карактеритике су дате у табели 1.



Слика 1. Географски положај слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure1. Geographical location of the Jablanica River catchment, Source: Author


Легенда
Граница истраживаног подручја
Главни ток
Хидрографска мрежа
Јабланица
Сувајска река
Сувајска река
Сувајска река

Истраживано подручје окружују, са западне стране планине Медведник и Јабланик, са јужне стране Повлен, а са западне Маглеш (слика 1). Ове планине су сврстане у категорију средњих планина јер су висине преко 1000 m надморске висине. Управо због оваквог рељефа, тј. великих нагиба у горњим деловима слива, слив реке Јабланице је подложан стварњу ерозионих процеса, нарочито код водне ерозије.
На графику 1 су приказане вредности средњих годишњих температура и суме падавина за период од 1991. до 2023. године измерене на хидрометеоролошкој станици Ваљево. Суме падавина су доста променљиве и најчешће су биле преко 700 mm. Највећа годишња сума падавина је забалежена 2014. године и износила је 1332,40 mm (РХМЗ, 1991-2023).

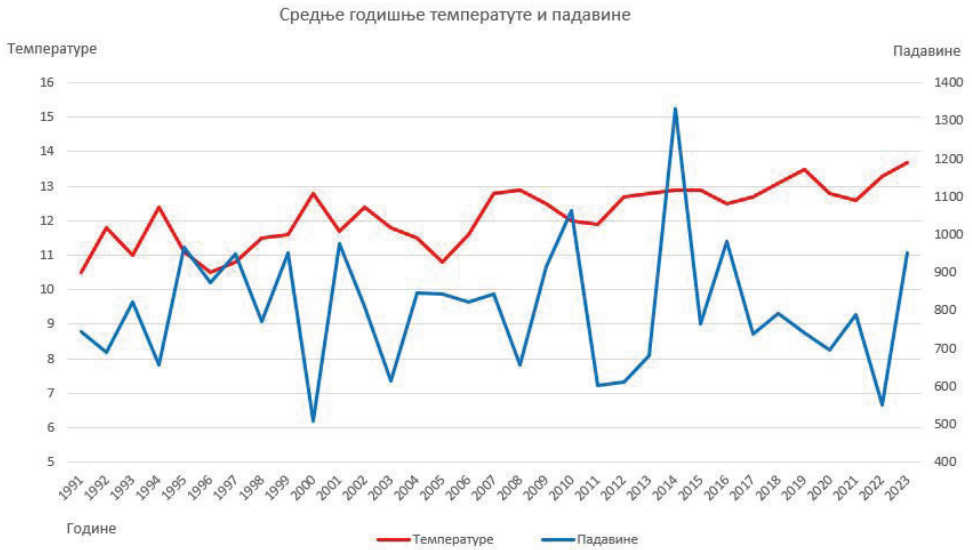
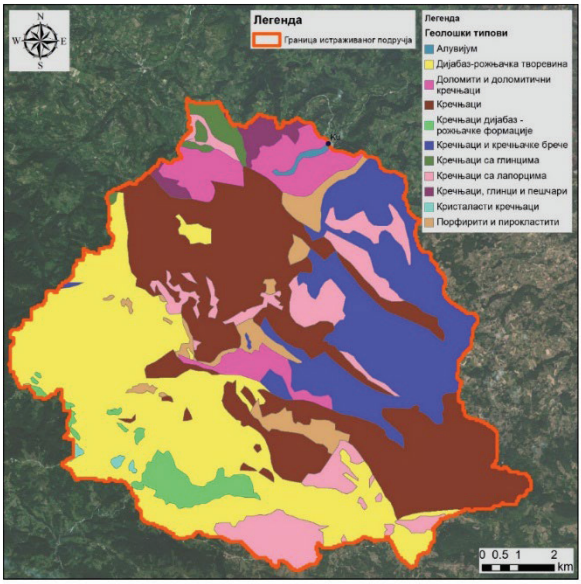


График 1. Средње годишње температуре ваздуха и суме падавна за мерну станицу Ваљево, Извор: Аутор
Graph 1. Mean annual air temperatures and total precipitation at the Valjevo meteorological station, Source: Author

На истраживаном подручју се јавља 11 геолошких типова (слика 3), од којих доминирају различите варијације кречњака. Најзаступљенији су дијабаз-рожњачка творевина, кречњаци који се простиру од северозападног до југоисточног дела слива, као и кречњаци и кречњачке брече на источном делу слива. Остали типови – кречњаци са лапорцима, доломити и доломитски кречњаци, порфирити и пирокласти, дијабази и спилити, глинци и пешчари, као и кречњаци са глинцима – заступљени су са мање од 10%, док су кристаласти кречњаци и алувијум присутни у веома малом уделу. Процентуална заступљеност геолошких типова приказана је на графику 2.
Кречњачке формације које доминирају на сливу карактеришу се израженом карстификацијом и испуцалошћу, што условљава повећану пропустљивост и омогућава интензивну инфилтрацију падавина у дубље делове подземља (Ford,Williams, 2007; White, 2002). У таквим условима подземне воде се акумулирају у карстним шупљинама или циркулишу кроз пукотинске системе и проширене канале настале процесима

карстификације, што значајно утиче на хидролошко понашање слива и динамику формирања отицаја (Bonacci, 1993; Петровић, 1991).



Слика 3. Просторни распоред геолошких типова на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 3. Spatial distribution of geological types within the Jablanica River catchment, Source: Author

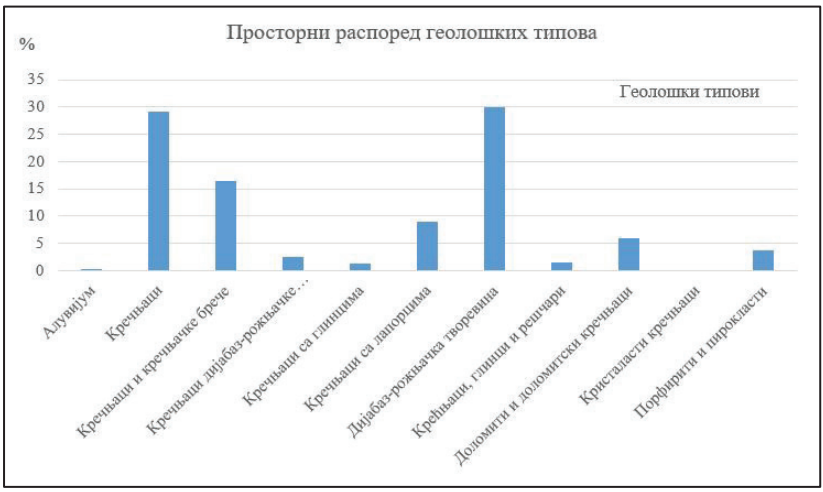
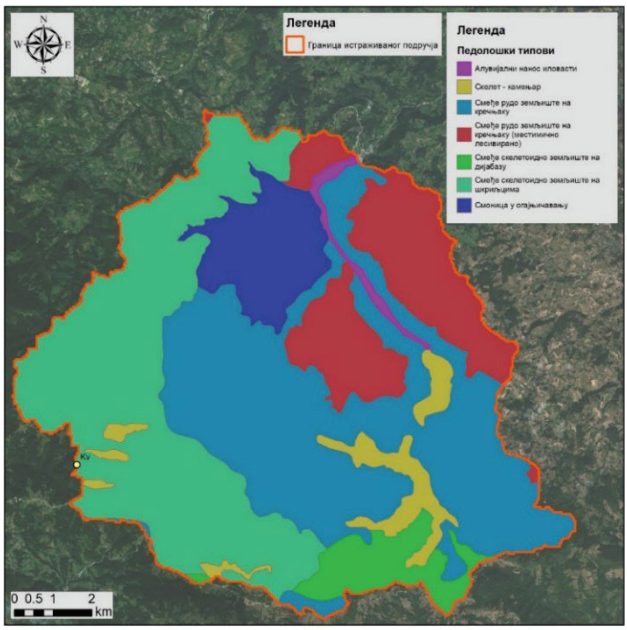


График 2. Процентуална заступљених геолошких типова на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 2. Percentage distribution of geological types in the Jablanica River catchment, Source: Author

Педологија на сливу реке Јабланице одређена је на основу Педолошке карте Србије у размери 1:50.000, израђеној на Институту за проучавање земљишта, Београд – Топчидер (Tanasijević et al., 1963). Педолошки типови су приказани на изведеној педолошкој карти (слика 4). На сливу реке Јабланице најзаступљенија су смеђа земљишта, као што су типична смеђа земљишта на кречњаку, на централном и југозападном делу слива, затим ранкер дуж правца северозапад-запад и јуозапад и лувисол на североистоку слива. Поред наведених педолошких типова, на сливу реке Јабланице присутни су још и смоница у огајњичавању, смеђе скелетоидно земљиште на дијабазу, скелет – камењар и иловасти алувијални нанос. На графику 3 приказана је процентуална заступљених типова земљишта на сливном подручју.



Слика 4. Просторни распоред типова земљишта на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 4. Spatial distribution of soil types within the Jablanica River catchment, Source: Author

Истраживања спроведена на експерименталним сливовима су показала повољан утицај вегетације на хидролошки режим сливова кроз повећање удела малих и средњих вода у односу на велике воде, у укупној структури годишњег отицаја (Ристић, 2011.). Овај утицај се највише огледа кроз интерцепцију и инфилтрационо – ретенционе карактеристике земљишта. Подаци о начину кришћења земљишта су преузети са платформе Corine land cover (EEA, 2018) за 2018. годину (слика 5). На подручју слива реке Јабланице најзаступљеније су површине под лишћарским шумама, пољопривреда са значајним површинама под природном вегетацијом и сложени обрасци обраде се. Поред наведених начина коришћења заступљени су још и прелазни шумовито/жбунасти

предели, пашњаци, мешовити шумски комплекси, четинарске шуме и водна тела. На графику 4 приказана је процентуална заступљених класа начина коришћења земљишта на сливном подручју.

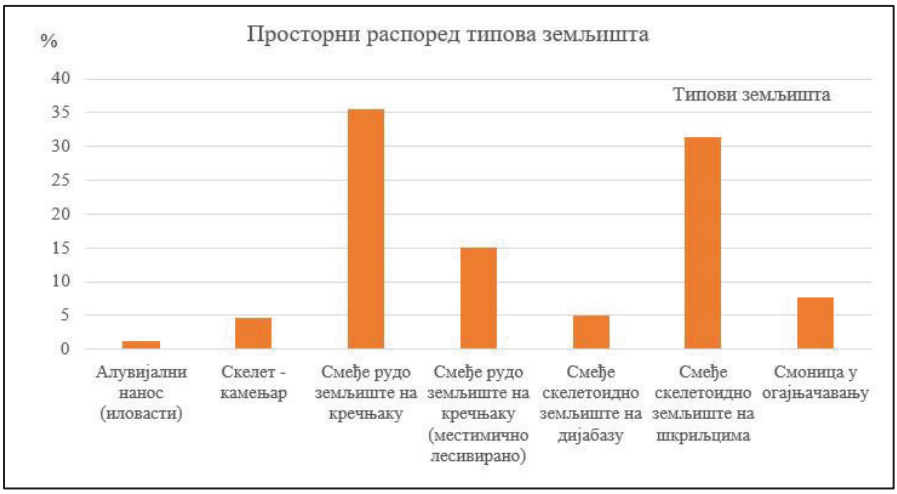
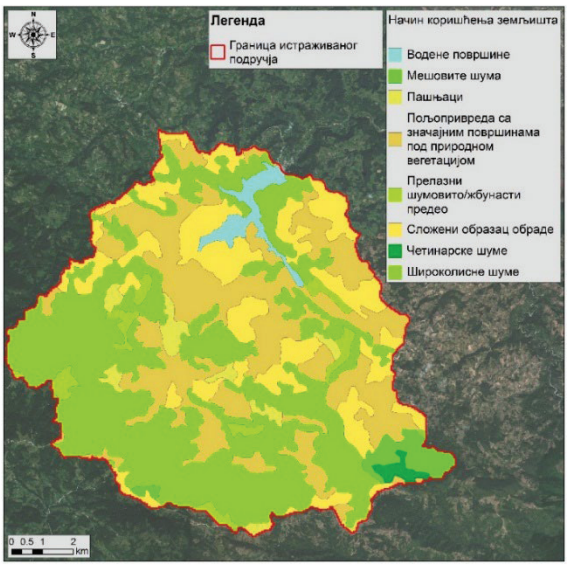


График 3. Процентуална заступљених типова земљишта на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 3. Percentage distribution of soil types in the Jablanica River catchment, Source: Author



Слика 5. Просторни распоред начина коришћења земљишта на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 5. Spatial distribution of land use within the Jablanica River catchment, Source: Author

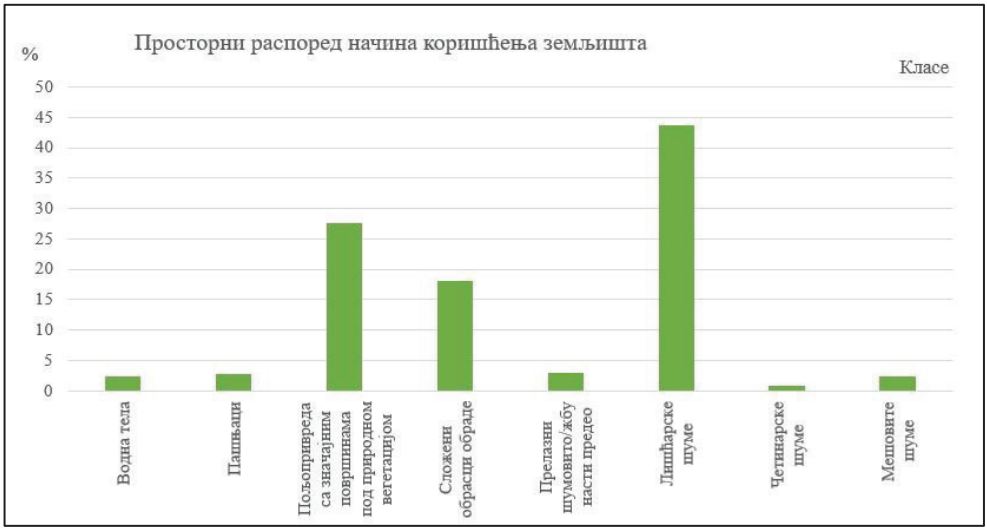


График 4. Процентуална заступљених класа начина коришћења земљишта на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 4. Percentage distribution of land use classes in the Jablanica River catchment Source: Author

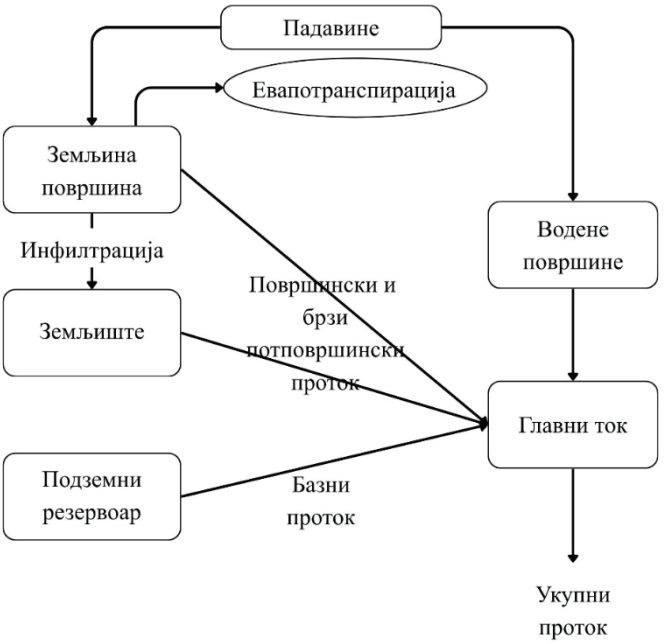
У раду су коришћени хидрограми часовних вредности протока са хидролошке станице „Седлари ХС“ и подаци часовних вредности падавина забележених на метеоролошкој станици „Доње Лесковице ДКС“, за период осматрања мај 2024. године и мај 2025. године. Наведене станице се налазе у систему станица за праћење хидролошког стања на сливу реке Колубаре у оквиру пројекта РНУ Колубара (Систем ране најаве и упозорења на сливу реке Колубаре, 2025).

Опис модела за прорачун површинског отицаја

За потребе овог рада извршена је анализа површинског отицаја на сливу реке Јабланице применом хидролошког моделирања у програмском пакету HEC-HMS (USACE, 2015). Овај пакет омогућава једноставно управљање улазним подацима, као и преглед резултата у графичком и табеларном облику, што га чини погодним за примену у анализи падавинско-отичних процеса (Feldman, 2000; Živanović, 2006). Због своје флексибилности и модуларне структуре, HEC-HMS се широко примењује у истраживањима процеса отицаја и формирања поплавних таласа (Beven, 2012; Плавшић, 2014).

Модели засновани на физичким законима најбоље описују процес отицаја (слика 6), јер у обзир узимају природне карактеристике слива и параметре који утичу на кретање и расподелу воде (Chow et al., 1988; Singh, 1995). Међутим, како је готово немогуће обухватити целокупан хидролошки циклус у једном моделу, у пракси се он дели на више компоненти које се посебно анализирају и моделирају (Beven, 2012; Todorović, 2016). У оквиру HEC-HMS-а овај принцип реализован је кроз четири основне компоненте (USACE, 2015):

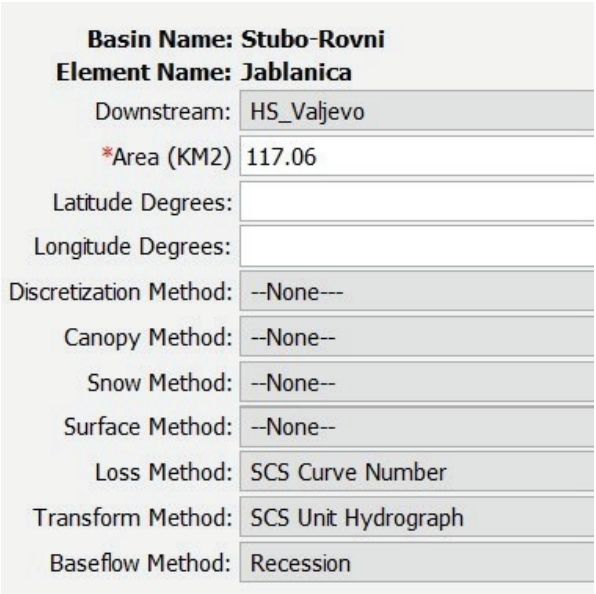
1. модел слива,
2. метеоролошки модел,
3. временске серије и улазни подаци и
4. контролне спецификације.



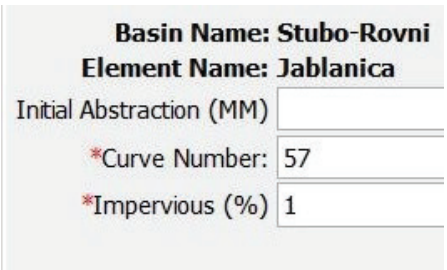
Слика 6. Дијаграм тока рада у моделу HEC-HMS, Извор: Аутор
Figure 6. Workflow diagram in the HEC-HMS model, Source: Author

У оквиру HEC-HMS-а могуће је моделирати не само отицај услед падавина већ и отицај настао топљењем снега (USACE, 2015; Scharffenberg, Fleming, 2010). Подаци о падавинама могу бити унети као тачкаста мерења, просечно израчунати применом метода Тијесенових полигона или инверзног растојања, као и у облику растерских података добијених радарским осматрањем (Feldman, 2000; Beven, 2012). Модел омогућава и додатну корекцију тежина које се приписују појединачним станицама, што доприноси реалистичнијој просторној репрезентацији падавина (Singh, 1995). Топљење снега симулира се методом степен-дана, уз коришћење индекса претходне температуре и посебних параметара за услове падавина у течном облику (Anderson, 1973; USACE, 2015). У дистрибуираним верзијама модела примењује се Gridded Temperature Index метода (USACE, 2015), док се у случају епизодних симулација снег може и изоставити. Потенцијална евапотранспирација (ПЕТ) у HEC-HMS-у може се моделирати методом Priestley–Taylor, било као просторна расподела по ћелијама мреже, било у виду месечних просечних вредности (Priestley, Taylor, 1972; Scharffenberg, Fleming, 2010). Док се код епизодних симулација она најчешће занемарује, код континуалних анализа представља важну компоненту, јер утиче на влажност земљишта и величину ефективних падавина (Beven, 2012; Плавшић, 2014).

Поред ових основних функција, HEC-HMS садржи модуле за симулацију хидротехничких објеката као што су акумулације, ретензије и обилазни канали, као и алате за аутоматску калибрацију параметара на основу осмотрених хидролошких и метеоролошких података (Scharffenberg, Fleming, 2010).
Модел слива реке Јабланице (слика 7) у оквиру HEC-HMS софтвера представља модел епизоде и обухвата дефинисање метода за одређивање запремине директног отицаја (SCS Curve Number), трансформацију директног отицаја (SCS Unit Hydrograph) и моделирање базног отицаја применом рецесионог приступа (USACE, 2015; Chow et al., 1988) (слика 8).



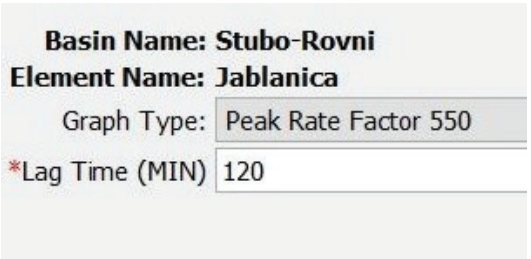
Слика 7. Поставка HEC-HMS модела слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure 7. HEC-HMS model setup for the Jablanica River catchment, Source: Author



Слика 8. Подешавање параметара у моделу слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure 8. Parameter configuration in the Jablanica River catchment model, Source: Author

За прорачун запремине директног отицаја у овом раду примењена је SCS метода губитака, која представља један од најчешће коришћених емпиријских приступа у хидролошком моделирању падавина–отицај процеса (USDA SCS, 1972; Ponce, Hawkins,

1996). Ова метода заснива се на параметру криве броја – CN (Curve Number), који интегрално обухвата утицај хидролошких својстава земљишта, начина коришћења земљишта и претходног стања влажности на процес инфилтрације и формирање површинског отицаја (Mockus, 1964; Chow et al., 1988). Значај CN параметра у анализи трансформације падавина у отицај се огледа у његовој практичној применљивости у условима недостатка хидролошких података (Плавшић, 2012; Todorović, 2016; Zlatanović, 2015). Метода подразумева и увођење почетне апстракције (Initial Abstraction), која представља део падавина изгубљен услед интерцепције, депресионог задржавања и иницијалне инфилтрације пре почетка формирања директног отицаја (USDA SCS, 1972; Mishra, Singh, 2003). Ова компонента има значајну улогу у дефинисању почетне фазе хидролошког понашања слива и често се повезује са физичким карактеристикама површинског покривача и структуре земљишта (Morgan, 2005). Параметар Impervious одређује удео непропусних површина у оквиру слива и представља важан фактор у моделирању површинског отицаја, посебно у условима изражених антропогених утицаја и промена у начину коришћења земљишта (Wischmeier, Smith, 1978; Beven, 2012). Његова вредност се добија анализом просторних података о коришћењу земљишт и представља значајан улазни параметар у хидролошким моделима (Плавшић, 2012). На слици 9 су приказане усвојене вредности параметара модела формираног за потребе овог рада.



Слика 9. Параметри модела за одређивање запремине директног отицаја, Извор: Аутор

Figure 9. Model parameters for estimating direct runoff volume, Source: Author

Модели директног отицаја имају за циљ да опишу процес трансформације ефективних падавина у отицај на излазном профилу слива, односно део падавина који након одузимања губитака услед инфилтрације, интерцепције и површинског задржавања учествује у формирању отицаја и доспева до хидрографске мреже (Chow et al., 1988; Beven, 2012). У ову групу спадају и јединични хидрограми, који се сврставају у концептуалне моделе, будући да успостављају функционалну зависност између ефективних падавина и одговора слива без експлицитног моделовања свих унутрашњих хидролошких процеса (Sherman, 1932; Todorović, 2016).

У овом раду је примењен синтетички SCS јединични хидрограм (SCS Unit Hydrograph) који полазећи од основних претпоставки теорије јединичног хидрограма: да је ефективна киша равномерно распоређена по сливу и константног интензитета током трајања, да за падавине истог трајања база хидрограма остаје непромењена, а ординате пропорционалне количини ефективне падавине, као и да је јединични хидрограм карактеристика датог слива (USDA SCS, 1972; Mockus, 1964). Ове претпоставке су широко прихваћене у инжењерској хидрологији и потврђене у бројним применама синтетичких хидрограма (Chow et al., 1988; Плавшић, 2012).

Овај приступ заснива се на стандардизованом приказу одговора слива на јединичну ефективну падавину, при чему се укупни ефекат кретања и привременог задржавања воде унутар слива описује кроз карактеристичан облик хидрограма директног отицаја (Singh, 1992). Облик SCS јединичног хидрограма дефинисан је временом достизања вршног протицаја и максималном ординатом хидрограма (USDA SCS, 1972).
Кључни параметар модела представља време кашњења слива (енг. lag time), које означава временски интервал између тежишта ефективне падавине и појаве вршног протицаја директног отицаја (McCuen, 2005). Ова величина интегрално одражава динамику кретања воде од најудаљенијих делова слива до излазног профила.

Време достизања врха хидрограма одређује се према релацији (US SCS, 1972):

$$t_{\mathrm{p}} = \frac{t_{\mathrm{r}}}{2} + t_{\mathrm{la}}g$$

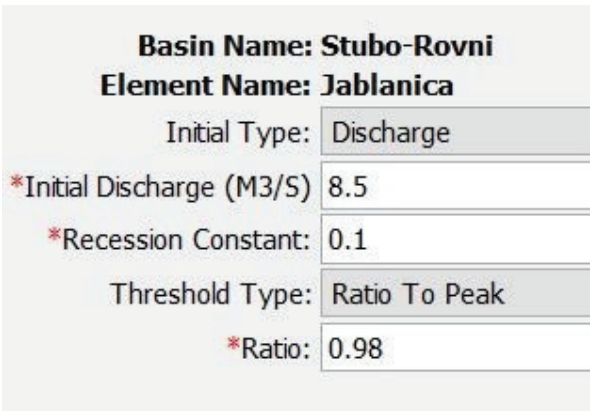
где су:

t_p — време до врха хидрограма,

t_r — трајање ефективне падавине,

$t_{la}g$ — време кашњења слива.

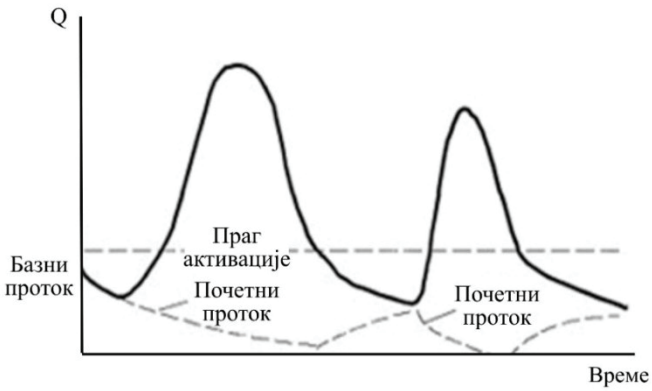
Максимална ордината јединичног хидрограма дефинише се у функцији запремине директног отицаја и времена достизања врха, чиме се обезбеђује очување укупне количине воде која учествује у отицању (Chow et al., 1988).
За примену SCS јединичног хидрограма у оквиру HEC-HMS модела неопходно је дефинисати време кашњења слива, као параметар који у највећој мери одређује облик и динамику хидрограма директног отицаја (USACE, 2000). Његова вредност може се проценити на основу времена концентрације, морфометријских карактеристика терена и хидролошких услова на сливу (McCuen, 2005; Плавшић, 2012).
Усвојене вредности параметара примењене у моделу формираном за потребе овог рада приказане су на слици 10.



Слика 10. Параметри модела директног отицаја, Извор: Аутор
Figure 10. Direct runoff model parameters, Source: Author

За моделирање базног протока у HEC-HMS-у постоји пет метода, при чему је његово укључивање опционо, па се код епизодних водотока може и занемарити (USACE, 2000). У овом раду за прорачун базног отицаја примењена је метода рецесије. Основна претпоставка овог модела је да се опадање протока након врха хидрограма може представити експоненцијално опадајућом кривом (Tallaksen, 1995; USACE, 2000).
Примена модела рецесије захтева дефинисање почетног услова, односно вредности базног протока на почетку симулације, као и два параметра: константе рецесије (k) и вредности прага (Tallaksen, 1995). Константа рецесије одређује брзину опадања базног протока и може поприматиvредности између 0 и 1. Веће вредности (k) указују на спорије опадање, док вредност k = 1 значи да је базни проток константан (USACE, 2000).

Промене укупног и базног протока након кишне епизоде описују се експоненцијалном кривом, што представља поједностављен, али широко прихваћен приказ пражњења подземних резервоара (Tallaksen, 1995; Beven, 2012). Пораст базног протока, односно његово „ресетовање“, настаје када силазна грана хидрограма достигне праг. Тај праг може бити дефинисан као део пика поплавног таласа или као конкретна вредност протока (USACE, 2000). У овом моделу усвојено је да праг представља део пика поплавног таласа. Након достизања прага, укупни хидрограм се даље описује рецесионом кривом, све док се у одређеном моменту укупни проток не сведе на вредност базног протока (слика 11).



Слика 11. „Ресетовање“ базног протока, Извор: USACE, 2016
Figure 11. "Resetting" of baseflow, Source: Author

Калибрација модела

Калибрација модела представља процес подешавања параметара са циљем да симулирани хидрограм што верније репродукује осмотрени, односно реални хидролошки одговор слива (Beven, 2012; Gupta et al., 1998; Todorović, A., 2013). У овом раду параметри су подешавани ручно, водећи рачуна да буду истовремено физички оправдани и ефикасни у репродуковању стварних података (Madsen, 2000; Плавшић, 2012; Todorović, A., 2016).

Део параметара има калибрациони карактер, што значи да се њихове вредности мењају до постизања задовољавајућих показатеља квалитета модела (Gupta et al., 1998; Moriasi et al., 2007; Todorović, A., 2016). Параметри коришћени у овом раду приказани су у Табели 2.

Остали параметри су фиксни и одређени на основу анализе доступних подлога и изведених прорачуна, након чега се уносе у модел (USACE, 2000; Плавшић, 2012; Todorović, A., 2013). Ова подела омогућава да се калибрација усмери на најосетљивије параметре, уз очување физичке реалности модела (Beven, 2012; Refsgaard & Storm, 1996; Todorović, A., 2016).

Табела 2. Приказ метода прорачуна у моделу слива и усвојених параметара, Извор: Аутор
Table 2. Overview of calculation methods used in the catchment model and adopted parameters, Source: Author

Прорачунска компонента везе падавине-отицај	**Одабрана метода за модел слива реке Колубаре**	**Параметри потребни за прорачун**
Запремина директног отицаја	SCS – број криве (CN број)	Почетни губици падавина (mm) Број криве отицаја (CN) (-) Удео непропусних површина (%)
Транформација ефективних падавина у површински отицај	SCS јединични хидрограм	Време кашњења отицаја (min)
Базни отицај	Метода рецесије	Почетни протицај (m^3/s) Константа рецесије (-) Однос (-)

Валидација модела

Након завршене калибрације спроводи се валидација модела, која подразумева симулације са усвојеним параметрима на основу података који нису коришћени током калибрације, ради процене способности модела да поуздано репродукује хидролошки одговор слива у независним условима (Refsgaard & Storm, 1996; Moriasi et al., 2007; Todorović, A., 2016). У Табели 3 приказани су периоди који су коришћени за калибрацију и валидацију.

У поступку формирања и тестирања модела, период маја 2024. године коришћен је за калибрацију, док је за потребе валидације примењен исти календарски период у наредној години, односно мај 2025. године. Избор наведеног периода условљен је присуством израженијих падавинских епизода и одговарајућих протицаја, што омогућава поузданију идентификацију параметара модела (Плавшић, 2013; Gupta et al., 1998).

Примена узастопних година омогућила је проверу стабилности калибрисаних параметара у условима различитих хидролошких реализација, односно оцену њихове преносивости из периода калибрације у независан период валидације, што представља важан корак у верификацији хидролошких модела (Todorović, A., 2016; Beven, 2012). На тај начин омогућено је сагледавање утицаја усвојених параметарских вредности на репрезентацију процеса отицаја у временски блиским, али хидролошки независним условима (Плавшић, 2013).

Табела 3. Анализирани периоди коришћени у моделу, Извор: Аутор
Table 3. Analyzed periods used in the model, Source: Author

Период симулације	
01Maj2024 (00:00h) – 31Maj2024 (23:00h)	калибрација
01Maj2025 (00:00h) – 31Maj2025 (23:00h)	валидација

Показатељи квалитета модела

Ефикасност хидролошког модела оцењује се применом више статистичких показатеља који омогућавају квантитативну анализу слагања симулираних и осмотрених протицаја (Moriasi et al., 2007; Gupta et al., 2009; Плавшић, 2014; Todorović, 2016).

- Коефицијент Nash-Sutcliffe:

$$NSE = 1 - \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{{\sigma_{osm}}^2}$$

У коме су:

N – број података у низу;
Qsim,i (m^3/s) – симулирани протицај;
Q_(sim,i) (m^3/s) – опажени протицај;
Q_(osm,i) – варијанса осмотрених протока.

Коефицијент Nash–Sutcliffe (NSE) представља један од најчешће коришћених критеријума за оцену ефикасности хидролошких модела (Nash, Sutcliffe, 1970; Gupta et al., 2009). Заснива се на поређењу квадрата одступања између симулираних и осмотрених протока са варијансом осмотрених вредности. Његове вредности крећу се од -∞ до 1, при чему вредност 1 означава савршено поклапање резултата модела са мерењима. Показатељ је осетљив на системске и динамичке грешке, при чему већу тежину придаје слагању у домену високих вода, док је утицај малих вода мање изражен (Moriasi et al., 2007; Плавшић, 2014).

- Грешка у максималном протоку:

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_{sim,max} - Q_{osm,max}}{Q_{osm,max}} \cdot 100\%$$

где су:

$Q_{sim,max}$ – максимални симулирани протицај;
$Q_{osm,max}$ – максимални осмотрени протицај.

Овај показатељ описује способност модела да репродукује вршне вредности протицаја, што је од посебног значаја у анализама екстремних хидролошких догађаја (Singh, 1995; Плавшић, 2014).

- Грешка у осмотреној и симулираној запремини:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{osm}} \cdot 100\%$$

где су:

V_{sim} – запремина симулираног хидрограма;

V_{osm} – запремина осмотреног хидрограма.

Овај показатељ омогућава оцену укупног водног биланса (Beven, 2012; Todorović, 2016).

- Релативна пристрасност (PBIAS)

$$B = \frac{\Sigma Q_{sim,i} - \Sigma Q_{osm,i}}{\Sigma Q_{osm,i}} \cdot 100\%$$

Вредности:

B=0 - нема систематског одступања;

B>0 - модел потцењује протицаје;

B<0 - модел прецењује протицаје.

- Релативна средња квадратна грешка RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{n}}$$

Показатељ RMSE (Root Mean Square Error) изражава просечно одступање између симулираних и осмотрених протока и често се користи у анализама поузданости симулација (Legates, McCabe, 1999; Gupta et al., 2009). Мање вредности указују на боље поклапање резултата.

При оцени ефикасности модела неопходно је користити комбинацију више показатеља, јер појединачни статистички параметри не могу у потпуности описати квалитет симулације (Gupta et al., 2009; Beven, 2012). Посебно код континуираних симулација са поједностављеним моделима губитка падавина, потпуно поклапање симулираних и осмотрених протицаја није реално очекивано, те се успешност модела оцењује и на основу физичке реалности хидрограма (Плавшић, 2014; Todorović, 2016).

РЕЗУЛТАТИ

Калибрација HEC-HMS модела извршена је за период мај 2024. године на сливу Јабланице, у циљу прилагођавања параметара модела стварним хидролошким условима. Усвојене вредности параметара приказане су у табели 4, док су резултати симулације представљени графички и табеларно (график 5; табеле 5 и 6).

Табела 4. Усвојене вредности параметара за калибрацију и валидацију хидролошког модела, Извор: Аутор

Table 4. Adopted parameter values for calibration and validation of the hydrological model, Source: Author

Група параметара	Параметри	Вредности
Губици	Број криве отицаја (CN)	57
	Удео непропусних површина	1
Трансформација отицаја	Тип хидрограма (PRF)	350
	Време кашњења отицаја	360
Базни отицај	Тип почетног услова	Discharge
	Почетни протицај	0,181
	Константа опадања протицаја	0,93
	Тип граничног услова	Однос у односу на вршни протицај
	Однос	0,08

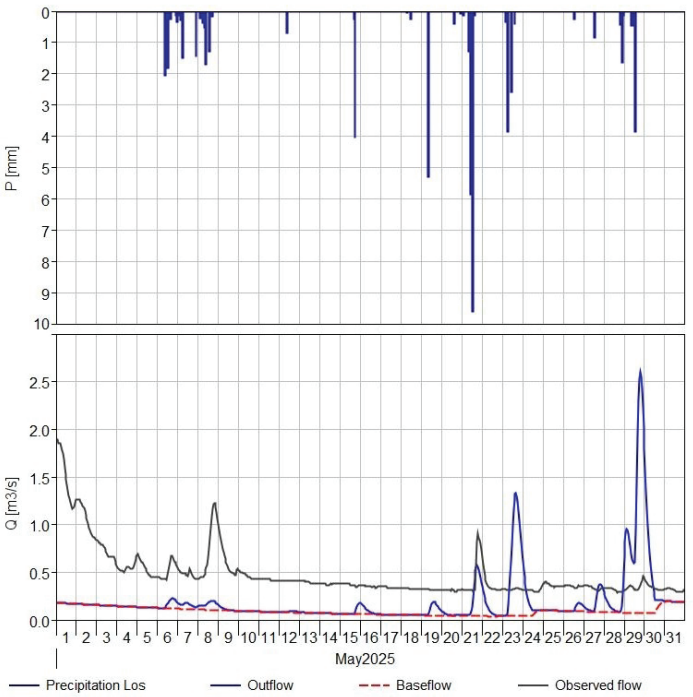


График 5. Осмотрени и моделирани протоци калибрације – мај 2024. године, Извор: Аутор

Graph 5. Observed and simulated discharges – calibration – May 2025. Source: Author

Табела 5. Показатељи квалитета модела – калибрација, Извор: Аутор
Table 5. Model performance indicators – calibration, Source: Author

Показатељи квалитета	
Релативна средња квадратна грешка RMSE	2,4
Коефицијент Nash-Sutcliffe	-4,890
Релативна пристрасност (PBIAS)	7,94
R^2	0,00

Табела 6. Карактеристике симулираног хидрограма - калибрација, Извор: Аутор
Table 6. Characteristics of the simulated hydrograph – calibration, Source: Author

Каратеристике хидрограма	
Хидролошки елемент	Јабланица
Површина слива (KM2)	117,06
Максимални протицај (M3/S)	3,8
Време појаве вршног протицаја	29 Мај 2024, 04:00
Запремина отицаја (MM)	6,62

Анализа добијених резултата показује да модел у задовољавајућој мери репродукује временску динамику протицаја, нарочито у погледу појаве и трајања значајнијих догађаја. Симулирани хидрограм прати општи тренд осмотрених протока и одражава основне карактеристике отицаја у посматраном периоду. Уочена одступања у појединим деловима хидрограма указују да модел не може у потпуности да прикаже све промене протока, што је очекивано при примени једноставних концептуалних модела губитака падавина током симулације појединачне падавинске епизоде. Упркос томе, добијени резултати показују да модел задржава динамику отицаја и омогућава адекватну репрезентацију основних хидролошких процеса на сливу.
На основу извршене анализе може се закључити да калибрисани модел представља поуздану основу за спровођење поступка валидације.
Валидација модела је извршена је за период мај 2025. године и вредности параметара модела коришћених у поступку валидације су исте као и у поступку калибрације. Резултати симулације приказани су графички и табеларно (график 6; табеле 7 и 8). Циљ валидације био је да се испита у којој мери модел, без даљег прилагођавања параметара, може да репродукује хидролошко понашање слива слива у условима другачије падавинске епизоде.

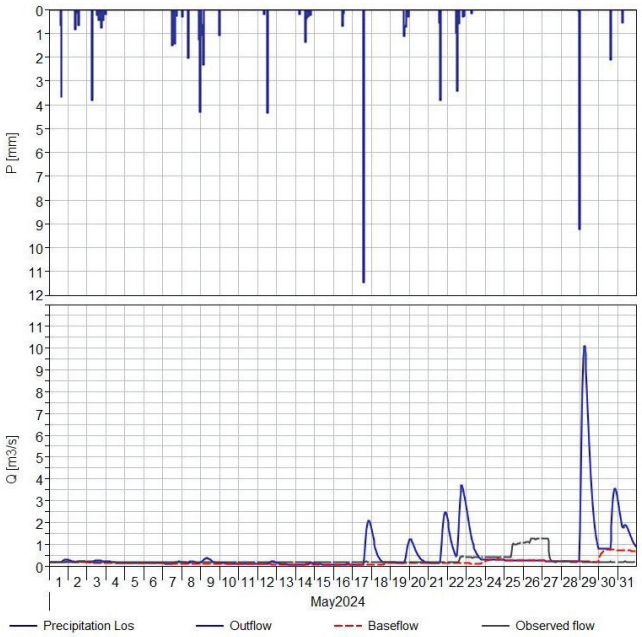


График 6. Осмотрени и моделирани протоци валидације – мај 2025. године, Извор: Аутор

Graph 6. Observed and simulated discharges – validation, May 2025, Source: Author

Табела 7. Показатељи квалитета модела – валидацијаџ, Извор: Аутор

Table 7. Model performance indicators – validation, Source: Author

Показатељи квалитета	
Релативна средња квадратна грешка RMSE	1,8
Коефицијент Nash-Sutcliffe	-2,413
Релативна пристрасност (PBIAS)	-23,75
R^2	0,00

Табела 8. Карактеристике симулираног хидрограма – валидација, Извор: Аутор

Table 8. Characteristics of the simulated hydrograph – validation, Source: Author

Каратеристике хидрограма	
Хидролошки елемент	Јабланица
Површина слива (KM2)	117,06
Максимални протицај (M3/S)	2,60
Време појаве вршног протицаја	29 Мај 2025, 19:00
Запремина отицаја (MM)	4,48

Анализа добијених резултата показује да модел задржава стабилно понашање и у оквиру валидационог периода. Симулирани хидрограм прати општи ток промена протока, као и појаву значајнијих догађаја. Уочена су одступања у појединим деловима хидрограма, пре свега у погледу интензитета реакције, што указује на ограничену способност модела да у потпуности прикаже све промене протока током симулације појединачне падавинске епизоде. Ипак, модел задржава стабилну динамику отицаја и не показује нестабилности које би указивале на прекомерно прилагођавање параметара у фази калибрације. Задржавање истих параметара указује на њихову хидролошку оправданост.

Упоређивањем резултата калибрације и валидације може се закључити да модел показује доследно понашање у различитим условима симулације са поједностављеним моделима губитка падавина.

ДИСКУСИЈА

Резултати калибрације и валидације показују да HEC-HMS модел омогућава задовољавајућу репродукцију општег хидролошког понашања слива током симулације појединачних падавинских догађаја. Иако одступања између симулираних и осмотрених протицаја остају присутна, модел је успео да прикаже временску динамику отицаја и основне карактеристике реакције слива.

Слични резултати су уочени и у бројним студијама примене концептуалних модела губитака падавина, где се истиче да савршено поклапање симулираних и осмотрених хидрограма није реално очекивати, посебно при коришћењу поједностављених метода губитака падавине (Beven, 2012; Singh, 1995; Nash, Sutcliffe, 1970; Todini, 1988). Ови модели пре свега имају за циљ репродукцију општег тренда и временског распореда отицаја, а не потпуно поклапање појединачних вредности протока. Сличан приступ у тумачењу резултата моделовања заступљен је и у домаћој литератури која се бави применом концептуалних хидролошких модела (Плавшић, 2014; Todorović, 2016; Zlatanović, 2006).

У анализи добијених статистичких показатеља уочено је да модел задржава релативно низак ниво грешке у репродукцији водног биланса, што указује на добру способност описивања укупне количине отицаја. Овакав резултат је у складу са налазима других аурора (Moriasi et al., 2007; Gupta et al., 1998; Schaefli, Gupta, 2007), који наглашавају да показатељи засновани на запремини отицаја често дају стабилнију оцену успешности модела од показатеља који су осетљиви на краткотрајне варијације протока. Значај очувања водног биланса као једног од кључних критеријума успешности симулације истакнут је и у домаћим истраживањима (Плавшић, 2014).

С друге стране, вредности коефицијента NSE указују на ограничену способност модела да у потпуности репродукује варијабилност протока током појединачних догађаја. Ово је очекивано, имајући у виду да је овај показатељ осетљив на локална одступања у хидрограму, нарочито у домену ниских вода (Gupta et al., 2009; Legates & McCabe, 1999; Krause et al., 2005; McCuen et al., 2006). У домаћим студијама примене хидролошких модела такође је наглашено да NSE често показује строжију оцену успешности у односу на показатеље који описују укупну количину отицаја (Todorović, 2016).

Упоређивање резултата калибрације и валидације показује да модел задржава доследно понашање у условима симулације са поједностављеним моделима губитка падавина. Задржавање истих параметара уз прихватљиву репродукцију хидролоког понашања слива указује на њихову физичку оправданост, што је у складу са препорукама у литератури да се успешност модела не оцењује искључиво на основу статистичког

поклапања, већ и на основу стабилности параметара и реалистичности симулираних процеса (Beven, 2012; Плавшић, 2014; Wagener et al., 2001; Perrin et al., 2001).
Ограничења модела огледају се у делимичној неспособности да верно репродукује интензитет појединих вршних вредности протока. Ово је уобичајено за концептуалне моделе који не укључују експлицитно моделирање процеса складиштења воде у тлу и подземним зонама (Singh, 1995; Clark et al., 2008; Fenicia et al., 2008). Ипак, способност модела да задржи стабилно понашање у валидационом периоду указује да параметри нису резултат искључиво статистичког прилагођавања, већ одражавају стварне хидролошке карактеристике слива, што је наглашено и у домаћим истраживањима примене оваквих модела (Todorović, 2016).
У целини, добијени резултати потврђују да HEC-HMS модел може представљати користан алат за анализу хидролошког понашања слива током појединачних падавинских догађаја, уз уважавање ограничења у детаљној репродукцији варијабилности протока.

ЗАКЉУЧАК

У раду је анализиран процес формирања површинског отицаја на сливу реке Јабланице до бране Стубо-Ровни применом хидролошког модела HEC-HMS у оквиру симулације појединачних падавинских догађаја. Формирани модел, заснован на SCS методи губитака, SCS јединичном хидрограму и рецесионом моделу базног протока, омогућио је репрезентацију основних карактеристика хидролошког понашања слива.
Калибрацијом модела за период мај 2024. године постигнуто је задовољавајуће слагање симулираних и осмотрених протока у погледу временске динамике и укупне запремине отицаја. Валидација модела на независном периоду мај 2025. године показала је да усвојени параметри задржавају стабилност и омогућавају репродукцију општег облика хидрограма и појаве значајнијих протицајних догађаја.
Уочена одступања у репродукцији појединих вршних вредности протока указују на ограничења примене поједностављених концептуалних модела губитака падавина, што је у складу са налазима из литературе. Ипак, модел добро осликава динамику отицаја, и иако се вршне вредности не поклапају има способност да адекватно опише хидролошко понашање слива.
Добијени резултати потврђују да HEC-HMS модел представља применљив алат за анализу процеса површинског отицаја на сливу реке Јабланице у условима симулације појединачних падавинских догађаја. Истовремено, указује се на значај даљег унапређења модела кроз примену детаљнијих улазних података и сложенијих метода описивања процеса губитака, како би се побољшала репродукција екстремних протицаја.

Захвалница
Рад је реализован у оквиру пројекта институционалног финансирања од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије под уговором број 451-03-34/2026-03/200169 од 05.02.2026. године.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петровић П. (1991). Карст хидрологија, Грађевинска књига, Београд.
2. Плавшић Ј. (2012). Хидролошко моделирање, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
3. Плавшић Ј. (2013). Примена хидролошких модела у анализи водног режима, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
4. Плавшић Ј. (2014). Хидролошко моделирање у управљању водним ресурсима, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
5. Ристић Р. (2011). Утицај вегетације на водни режим сливова, Универзитет у Београду-Шумарски факултет, Београд.
6. РХМЗ,1991-2023. Republički hidrometeorološki zavod Srbije. Meteorološki godišnjaci – klimatološki podaci u periodu od 1991 do 2023): Digitalna baza klimatoloških podataka. Beograd: RHMZ. Preuzeto sa https://www.hidmet.gov.rs/
7. Anderson E. (1973). National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model, NOAA Technical Memorandum, Silver Spring.
8. Beven K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, John Wiley & Sons, Chichester.
9. Bonacci O. (1993). Karst hydrology, Springer-Verlag, Berlin.
10. Clark M.P., Slater A.G., Rupp D.E., Woods R.A., Vrugt J.A., Gupta H.V., Wagener T., & Hay L.E. (2008): Framework for understanding structural errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models, Water Resources Research 44 (12).
11. Chow V.T., Maidment D.R., & Mays L.W. (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York.
12. Erić, R., Plavšić, J., Todorović, A., & Đukić, V. (2019). Mogućnosti za primenu kalibrisanog hidrološkog modela epizoda za proračun računskih velikih voda. Vodoprivreda, 51, 179-186.
13. EEA. (2018). Corine land cover datasets (2018). European Environmental Agency. https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover (accessed /приступљено 13.04.2026)
14. Feldman A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis.
15. Fenicia F., Savenije H.H.G., Matgen P., & Pfister L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, Water Resources Research 44 (1).
16. Ford D., & Williams P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology, Wiley, Chichester.
17. Gupta H.V., Sorooshian S., & Yapo P.O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, Water Resources Research 34(4), (751-763).
18. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., & Martinez G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria, Journal of Hydrology 377, (80-91).
19. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (2025). Sistem rane najave i upozorenja na poplave na slivu reke Kolubare - RNU „Kolubara", Beograd.
20. Krause P., Boyle D.P., & Bäse F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances in Geosciences 5, (89–97).

21. Legates D.R., & McCabe G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic modeling, Water Resources Research 35(1), (233-241).
22. Madsen H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model, Journal of Hydrology 235, (276-288).
23. McCuen R.H. (2005). Hydrologic Analysis and Design, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
24. McCuen R.H., Knight Z., &Cutter A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index, Journal of Hydrologic Engineering 11 (6), (597–602).
25. Mishra S.K., & Singh V.P. (2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
26. Mockus V. (1964). Estimation of direct runoff from storm rainfall, USDA Soil Conservation Service, Washington D.C.
27. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., & Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines, Transactions of the ASABE 50(3), (885-900).
28. Nash J.E., & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Journal of Hydrology 10(3), (282-290).
29. Perrin C., Michel C., & Andréassian V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, Journal of Hydrology 242 (3–4), (275–301).
30. Ponce V.M., & Hawkins R.H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity?, Journal of Hydrologic Engineering 1(1), (11-19).
31. Priestley C.H.B., & Taylor R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux, Monthly Weather Review 100, (81-92).
32. Refsgaard J.C., & Storm B. (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models, In: Abbott M.B., Refsgaard J.C. (Eds.), Distributed Hydrological Modelling, Kluwer, Dordrecht, (41-54).
33. Scharffenberg W., & Fleming M. (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual, USACE Hydrologic Engineering Center, Davis.
34. Schaefli B., & Gupta H.V. (2007). Do Nash values have value?, Hydrological Processes 21 (15), (2075–2080).
35. Sherman L.K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method, Engineering News Record 108, (501-505).
36. Singh V.P. (1992). Elementary Hydrology, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
37. Singh V.P. (1995): Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch.
38. Singh V.P., & Woolhiser D.A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology, Journal of Hydrologic Engineering 7(4), (270-292).
39. Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology 165, (349-370).
40. Tanasijević, Đ. (1963). Pedološka karta Srbije, list Beograd 1, razmera 1:50.000. Institut za proučavanje zemljišta Beograd i 'Geokarta' Beograd.
41. Todini E. (1988). The ARNO rainfall–runoff model, Journal of Hydrology 102 (1–4), (339–382).
42. Todorović A. (2013). Hydrological response modeling under changing climate conditions, Journal of Hydrology and Hydromechanics 61(2), (123-132).
43. Todorović A. (2016). Application of hydrological models in flood risk assessment, Water Resources Management 30(9), Springer, (3105-3118).

44. USACE (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Davis.
45. USACE (2015). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual, US Army Corps of Engineers, Davis.
46. USACE (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Applications Guide, US Army Corps of Engineers, Davis.
47. USDA SCS (1972). National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology, Soil Conservation Service, Washington D.C.
48. White W.B. (2002). Karst hydrology: recent developments and open questions, Engineering Geology 65, (85-105).
49. Wagener T., Gupta H.V., Boyle D.P., Han D., & Vijai Gupta, Sorooshian S. (2004). A framework for development and application of hydrological models, Hydrology and Earth System Sciences 8 (3), (327–350).
50. Wagener T., McIntyre N., Lees M.J., Wheater H.S., & Gupta H.V. (2001). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall–runoff modelling: Dynamic identifiability analysis, Hydrological Processes 15 (2), (455–476).
51. Zlatanović, N., & Prohaska, S. (2015). Preliminarna hidrološka rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare. Vodoprivreda, Beograd, (276-278), 161-175.
52. Živanović N. (2006). Primena HEC-HMS modela u analizi bujičnih tokova, Građevinski fakultet, Beograd.

DOI: 10.5937/eroz52-72603 ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД

ИНВЕРЗНИ ХИДРАУЛИЧКИ ПРОРАЧУН СРЕДЊЕГ ПАДА И ПРЕДЛОГ РЕГУЛАЦИОНОГ РЕШЕЊА ВОДОТОКА

INVERSE HYDRAULIC CALCULATION OF THE MEAN ENERGY SLOPE AND A REGULATION DESIGN PROPOSAL FOR A TORRENTIAL STREAM

Анђелковић Александар[1], Николић Јокановић Весна[1], Јокановић Душан[1], Парезановић Софија[1*1]

[1]Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Примљен: 17.07.2026. / ***Рецензиран:*** 25.08.2026. / ***Прихваћен:*** 02.09.2026.

Апстракт: У раду је извршена хидрауличка анализа природног корита водотока у сливу Барајевске реке на основу теренских мерења протицаја и површинске брзине течења. Применом инверзног прорачуна на основу Маннингове једначине одређен је енергетски пад тока, при чему је усвојена корекција за прелазак са површинске на средњу брзину. Добијена вредност средњег пада од приближно 1,16% указује на изражено бујични карактер тока и присуство критичног режима течења при меродавном протицају од 15 m³/s. На основу утврђеног хидрауличког стања извршена је анализа могућности регулације деонице дужине 1 km са циљем обезбеђења мирног режима течења и смањења ерозионе моћи тока. Предложено је трапезно регулисано корито са уздужним падом од 3‰ и системом каскада за дисипацију вишка енергије. Усвајањем броја и висине каскада (H ≤ 2 m) дефинисано је технички и хидраулички најрационалније решење које обезбеђује стабилан подкритични режим течења и прихват меродавног протицаја без изливања. Резултати рада представљају методолошки оквир за хидрауличку реконструкцију постојећег стања и концептуално пројектовање уздужне регулације мањих бујичних водотока.

Кључне речи: хидрауличка анализа; Манингова једначина; енергетски пад; бујични ток; регулација водотока; каскадна стабилизација; дисипација енергије; трапезно речно корито.

Abstract: This paper presents a hydraulic analysis of a natural stream reach within the Barajevska River basin based on field measurements of discharge and surface flow velocity. An inverse hydraulic calculation using Manning's equation was applied to determine the energy slope, including a correction factor for converting surface velocity to mean flow velocity. The obtained average slope of approximately 1.16% indicates a torrential flow character and near-critical flow conditions at the design discharge of 15 m³/s. Based on the identified hydraulic conditions, a regulation concept for a 1 km reach was developed in order to ensure subcritical flow conditions and reduce erosive capacity. A trapezoidal regulated channel with a longitudinal slope of 3‰ and a cascade system for energy dissipation was proposed. By adopting of the number and height of drop structures (H ≤ 2 m) resulted in a technically and hydraulically efficient solution ensuring stable subcritical flow and safe

[1] Парезановић Софија: sofija.parezanovic@sfb.bg.ac.rs; ORCID 0009-0006-7416-9273; Анђелковић Александар ORCID 0000-0001-8986-315X; Николић Јокановић Весна ORCID 0000-0003-3393-9981; Јокановић Душан ORCID 0000-0002-8143-4219

conveyance of the design discharge without overtopping. The presented methodology provides a practical framework for hydraulic reconstruction of existing conditions and conceptual design of longitudinal regulation measures for small torrential streams.

Keywords: hydraulic analysis; Manning equation; energy slope; torrential flow; river regulation; cascade stabilization; energy dissipation; trapezoidal river channel.

УВОД

Бујични водотоци представљају динамичне и често непредвидиве елементе хидрографске мреже, карактеристичне за брдско-планинска подручја. Током интензивних падавинских догађаја долази до наглог пораста протока и великих количина наноса из сливних подручја, што значајно утиче како на хидрауличке карактеристике тока, тако и на геоморфолошки развој корита. Овакав развој догађаја може узроковати брзо таложење наноса у нижим деловима сливова и у акумулационим објектима, због наглог смањења транспортног капацитета услед смањења пада и брзине течења, што доводи до повећања нивоа воде и изливања и поплава. Транспорт седимента такође утиче на обликовање профила корита, стабилност обала и ефикасност водних објеката за заштиту од поплава и ерозије (Vázquez Tarrío et al., 2024, Harada & Egashira, 2024).

У контексту Републике Србије, поплаве из маја 2014. године представљају пример екстремног хидрометеоролошког догађаја који је довео до историјских максимума водостаја и протицаја на многим притокама великих река, што је изазвало масовне поплаве, ерозију земљишта и деструктивне процесе у сливовима мањих бујичних токова (Jovanović, 2021, Đeković i sar., 2015). Стручњаци истичу да су управо транспорт наноса и нагли порасти протока кључни фактори ризика код бујичних поплава, јер седимент значајно утиче на хидрауличку стабилност тока и склоност корита наглим променама геометрије (Harada & Egashira, 2024).

Акумулациони објекти лоцирани низводно од предметне деонице испитиваног водотока, попут акумулације Дубоки поток, нарочито су осетљиви на високе концентрације наноса донешене из горњих делова слива, што смањује њихов корисни простор и ефикасност при задржавању поплавних таласа. У недостатку одговарајућих регулационих и седиментних контролних мера, такви процеси могу довести до брзог таложења и смањења капацитета акумулација, повећаног ризика од изливања и већих економских штета (Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2001). Предметни водоток представља десну притоку Барајевске реке, а у његовом горњем делу слива спроведене супарцијалне биолошке и техничке мере рекултивације са циљем смањења ерозионог потенцијала и стабилизације падина.

Један од приступа решењу ових проблема јесте примена хидрауличког моделовања и прорачуна, који омогућавају квантитативну процену енергетског пада тока и идентификацију регулаторних мера за стабилизацију корита и контролу транспорта наноса. У том смислу, инверзни прорачун пада тока на основу познатих хидрометријских мерења представља основу за дефинисање пројектних параметара регулације тока и систематско пројектовање уздужних стабилизационих објеката попут каскада, чиме се обезбеђује мирни режим течења и смањује ерозивна моћ бујичних вода (Jovanović, 2021). У раду је приказана метода емпиријске допуне недостајућих мерених података и предлог идејног решења за регулацију притоке која је у периоду великих вода

маја 2014. године изазвала велике деструктивне промене у кориту допремајући одгомне количине наноса у низводну хидрографску мрежу. Највећи део наноса али и опасних материја које се у периоду поплава транспортују дуж хидрографске мреже слива, на крају се исталожи у акумулацији, ако је има низводно (Anđelković, 2020), што је у овом приказаном раду случај.

Засипање акумулација ерозионим наносом из притока представља озбиљан проблем због губљења корисне запремине (Wolfgang & Walling, 2002). У областима брдско-планинског карактера водотоци поседују велику кинетичку енергију тока за покретање и стварање нових количина наноса, као и за транспорт постојећег наноса из речног корита и слива до профила акумулације који се транспортује делом у свим хидрауличким режимима а највише у периоду великих вода (Anđelković, 2020).

Да би се заштитиле акумулације од ерозионог материјала и полутаната, могуће је користити заштитне биотехничке мере у сливу, као што су: орање по изохипсама; израда тераса; контурне терасе формиране риперима и плуговима; градони; рустикалне преграде; постављање фашина; пошумљавање, мелиорације шума и пашњака; спречавање стварања јаруга и вододерина у сливу; изградња попречних објеката за заустављање ерозионог материјала; изградња илофилтера по ободу акумулације.

Ефикасне мере за контролу кретања наноса кроз хидрографску мрежу сливова су хидротехнички попречни објекти: каскаде и преграде (Kostadinov i sar., 2022).

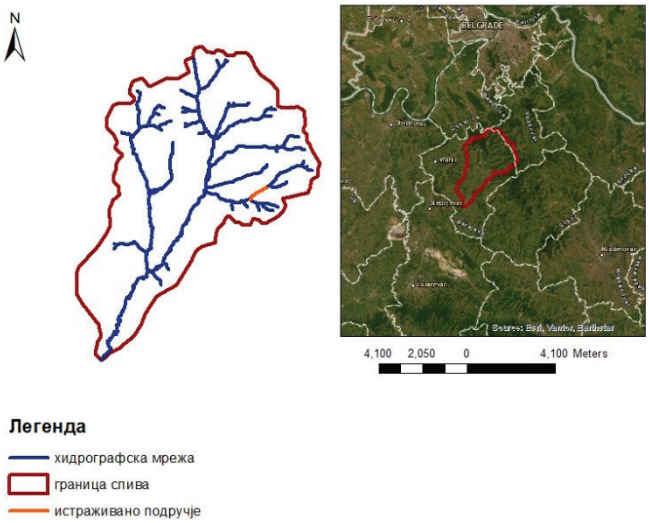
Попречним објектима се врши редукција пада дна корита водотокова до зоне пада изједначења. У тим условима речни ток није у могућности да ствара и покреће нове количине ерозионог материјала, а такође ни да одлаже нанос који вода покреће и носи дуж слива и корита водотока (Kostadinov i sar., 2022). Подизањем депонијских преграда у систему стварају се услови за трајно депоновање и заустављање наноса из речног тока. Применом попречних објеката у притокама трајно се заустављa вучени нанос пре уласка у профил акумулације (Kostadinov i sar., 2022; Hamidifar et al., 2024). Спречавањем појаве ерозионих процеса, поправља се квалитет воде у погледу боје, мириса, укуса, мутноће, као и осталих физичко-хемијских и микробиолошких параметара воде (Letić et al., 2014). У сливу Барајевске реке на једној од притока налази се акумулација Дубоки поток.

Вегетација слива Барајевске реке припада вегетацији побрђа централне Србије и одликује се мозаиком шумских, ливадских, аграрних и рипаријалних станишта (Tomić & Rakonjac, 2011). Потенцијалну природну вегетацију чине претежно шуме сладуна и цера, док се на свежијим и влажнијим експозицијама јављају заједнице китњака и граба (Tomić & Rakonjac, 2011). Дуж корита Барајевске реке и њених притока развијена је уска зона рипаријалне вегетације у којој доминирају меки лишћари попут: беле врбе, крте врбе, црне јове и беле тополе, док се у плићим и повремено плављеним деловима јављају асоцијације трске, рогоза и шашева (Vukotić et al., 2024). Велике површине слива данас се налазе под оранicама, воћњацима и секундарним травњацима, због чега је природна вегетација очувана углавном уз водотокове, на стрмијим падинама и мањим шумским комплексима (Jenačković et al., 2010). На састав вегетације у великој мери утиче антропогени фактор, нарочито пољопривредна производња, урбанизација и регулација водотока, што узрокује фрагментацију природних станишта и смањење површина аутохтоних шумских и приобалних заједница (Tomić & Rakonjac, 2011).

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ РАДА

Опште карактеристике истраживаног подручја

Барајевска река је водоток у општини Барајево, југозападно од Београда, и део је Колубарског слива, који се даље улива у реку Сава. Настаје спајањем мањих потока, укључујући Крчевицу и Раковицу, а дужина њеног тока износи око 12,7 км, док површина слива обухвата приближно 77 km² . Ток реке карактеришу ниска пловност и мањи хидролошки режим, типичан за регионалне притоке око Београда, што је посебно важно у контексту заштите од поплава и заштите и регулације наноса (Anđelković et al. 2017).



Слика 1. Гис карта границе општине Барајево и поред карта слива Барајевске реке
Figure 1. GIS map of the Barajevo municipality boundary and the Barajevska River basin

У оквиру слива Барајевске реке налази се акумулација Дубоки поток, земљана брана изграђена на притоци Дубоки поток, која служи за задржавање поплавних таласа и заштиту локалних насеља и пољопривредних површина. Запремина на коти круне прелива износи око 300.000 m³ (Anđelković et al. 2017). Ова мала акумулација је такође значајна у регулацији наноса који се доприма низводно, што је кључно за одржавање стабилности тока и очување еколошке функције реке.

Географске координате Барајевске реке су приближно 44°36′39,74″ N и 20°25′50,88″ E, док надморска висина тока износи око 160 m. Река и њен слив представљају важан елемент локалне хидролошке мреже и имају значај у управљању водама и превенцији поплава, нарочито током високих водостаја, као што су забележене поплаве у мају 2014. године. Мањи притоци попут Барајевске реке утичу на хидродинамику већих акумулација и речних система, што их чини релевантним за пројектовање речних регулација и анализа седиментације у сливу.

Изворишни део слива у коме је вршено мерење има релативно малу површину, у односу на укупну површину слива, односно, 1,62 km². Слив је у доњем делу, делимично

обрастао шумом доброг склопа и покровности, са развијеним земљишним творевинама, добре структуре. Под шумом се налази укупно 43,10% од укупне површине слива. Под утринама, напуштеним њивама (и делом њивама које се још увек активно користе), виноградима и окућницама, се налази око 56,9% површине слива.

У периоду у коме су истраживања спроведена падавине су биле екстремне за ово подручје и након проласка поплавног таласа уочене су многе морфолошке промене у самом кориту притоке. На овако екстреман протицај се по правилу не пројектују регулације и у овом раду биће анализирана мера пројектовања класичног једногубог речног корита у природном материјалу, као пример уређења а не као мера за конкртетну притоку. Димензионисање је урађено на основу података прикупљених на терену у периоду великих вода и непосредно након проласка великих вода. Из мерења је намерно изостављен податак везан за средњи пад тока који у многоме одређује карактеристике самог пројектовања регулације. Да би се до овог податка дошло коришћен је метод инверзног хидрауличког прорачуна како би се емпиријски добио енергетски пад који је касније коришћен у поступку одређивања других елемената за пројектовање регулације.

Методологија инверзног хидрауличког прорачуна

У условима када нема директних, континуалних геодетских мерења уздужног енергетског пада тока током великих вода, примењује се метод инверзног хидрауличког прорачуна заснован на Манинговој једначини за стационарно једнолико течење. Прорачун се изводи уназад, полазећи од теренски измереног протицаја (Q_{max}) и површинске брзине (V_p) на основу регистрованих хидрауличких трагова врха поплавног таласа из маја 2014. године.

Први корак подразумева корекцију површинске брзине у средњу профилну брзину тока према изразу:

$$V_{sr} = k \cdot V_p$$

где је k коефицијент корекције (усвојен као 0,85). Према препорукама Светске метеоролошке организације (WMO) и релевантне хидрометријске литературе (Јовановић, 2021), за природна, хетерогена речна корита са већим дубинама тока (h > 0,5 m), овај коефицијент се стандардно креће у опсегу од 0,80 до 0,90, те вредност 0,85 представља оптималну инжењерску средину.

Површина протицајног профила (A) рачуна се преко једначине континуитета:

$$A = \frac{Q_{max}}{V_{sr}}$$

За приближно трапезни облик природног корита, средња дубина тока (h_{sr}) се одређује у односу на ширину огледала воде (B):

$$h_{sr} = \frac{A}{B}$$

Оквашени обим (O) за трапезни попречни пресек рачуна се по формули:

$$O = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$$

где је b ширина дна корита, h дубина, а m коефицијент нагиба косина.

Хидраулички радијус (R) представља однос површине и оквашеног обима:

$$R = \frac{A}{O}$$

Коначно, средњи (енергетски) пад тока (I_{sr}) израчунава се инверзијом Манингове формуле:

$$I_{sr} = \left(\frac{V_{sr} \cdot n}{R^{2/3}}\right)^2$$

где је n Манингов коефицијент храпавости корита.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Анализа хидролошко-хидрауличких параметара

Основни подаци о релевантним кишомерним станицама представњени су у табелама 1 и 2 и подаци о забележеним дневним вредностима падавина, у мају 2014. године. Током маја 2014. године (13. и 14. маја) пало је више од 200 mm кише, што је изазвало појаву разорних бујичних поплава. Слабљење и престанак падавина започели су током 16. маја.

У једној од притока језера Дубоки поток забележени су трагови великих вода на основу којих је реконструисан протицај (слика 2.).



Слика 2. Изглед протицајног профила са максималним нивоом воде и после проласка поплавног таласа (фото: А. Анђелковић)

Figure 2. Appearance of the flow cross section at maximum water level and after the passage of the flood wave (photo: A. Anđelković)

Анализом хидрауличких трагова великих вода утврђено је да је дубина воде на појединим профилима била већа од 2 m, а ширина протицајног профила преко 4,5 m. Током трајања поплавног таласа бележени су трагови велике воде, а обављено је мерење површинске брзине тока, помоћу пловка (float method). Након проласка поплавног таласа вршена су накнадна геодетска снимања попречних протицајних профила, у циљу детерминисања геометријских и хидрауличких параметара тока, и каснијег одређивања укупног протицаја воде (Đeković et al., 2015).

За прорачун максималног протицаја коришћене су максималне дневне кише вероватноће појаве Hg(p), одређене на основу теоријске расподеле вероватноћа Log Pearson Type III (Табела 3). У Табелама 1 и 2 приказан је преглед разматраних падавинских станица са бројем осмотрених максималних падавина које су коришћене за одређивање вероватноће појаве екстремних падавина (Табела 3). За истраживање услова појаве флувијалне ерозије, узети су узорци наноса из дна и обала протицајног профила, ради утврђивања гранулометријских карактеристика.

Табела 1. Основни параметри релевантних кишомерних станица (извор: РХМЗ)

Table 1. Basic parameters of the relevant rain-gauge stations (source: RHMZ)

N⁰	Метеоролошка станица	Географске координате мерних станица		Надморска висина	Број обрађених података	Година почетка мерења
		Ширина	Дужина			
1	Авала – Шумска управа	44,42	20,31	290	42	1953
2	Барајево	44,36	20,27	270	32	1963
3	Врчин	44,39	20,25	250	38	1958
4	Јајинци	44,44	20,29	175	43	1952
5	Раља	44,34	20,34	230	45	1945
6	Вождовац	44,34	20,24	150	36	1954
7	Вранић	44,36	20,22	230	35	1955

Табела 2. Подаци о падавинама у непосредној близини слива Дубоки поток (извор: РХМЗ)

Table 2. Precipitation data recorded in the vicinity of the Duboki potok catchment (source: RHMZ)

N⁰	Подручје ГМЦ	Назив станице	Подаци о падавинама у току 3 дана *(mm)*			
			14.5.2014.	15.5.2014.	16.5.2014.	Укупно за 3 дана
1	Београд	Пиносава	16,20	129,00	72,20	217,20
2	Београд	Макиш	31,10	100,80	46,20	178,10
3	Београд	Јајинци	21,20	148,20	48,20	217,60
4	Београд	Церак	25,20	104,00	47,20	176,40
5	Ваљево	Степојевац	23,60	185,10	84,80	293,50
6	Ваљево	Уб	61,20	114,80	51,20	227,20
7	Ваљево	Љиг	31,00	125,00	73,50	229,50

Табела 3. Рачунске кише за прорачун великих вода за анализирани профил водотока (извор: РХМЗ)

Table 3. Design rainfall values used for flood discharge calculation at the analyzed stream cross-section (source: RHMZ)

Меродавне рачунске кише за прорачун великих вода			
N⁰	Вероватноћа %	Повратни период (god)	H_g (p) (*mm*)
1	0,01	10.000	194,00
2	0,10	1.000	137,00
3	1	100	93,80
4	2	50	82,00

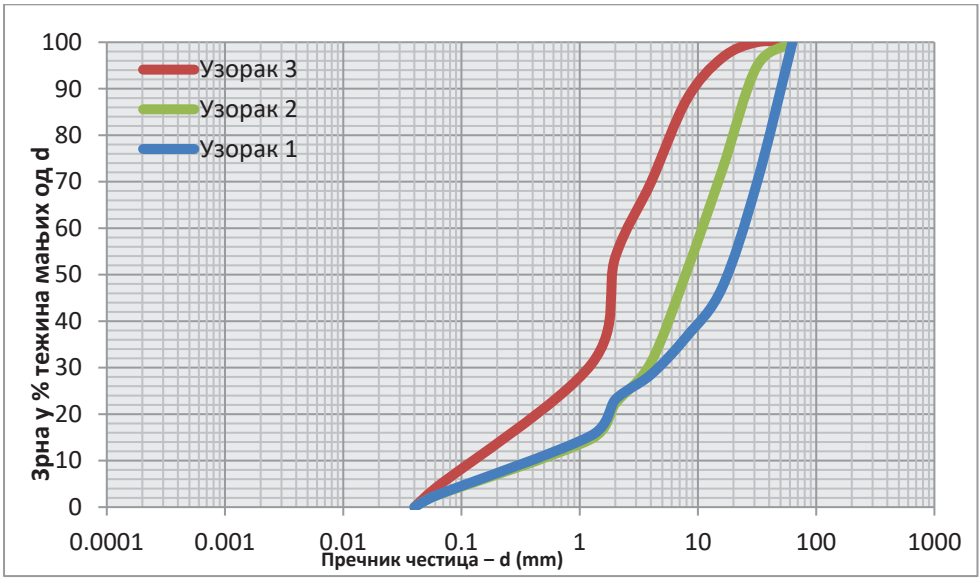
Траг велике воде послужио је само да би се извршило калибрисање пропусне способности корита, а не у сврху осредњавања хидрауличких и морфолошких параметара протицајних профила на деоници водотока. С обзиром на то да су отпори корита и геометрија протицајног профила променљиви, као и пад дна корита, најподеснији прорачуни за ову сврху су на основу диференцијалних једначина неједноликог течења.

Гранулометријски састав наноса

На Слици 3 приказан је дијаграм гранулометријског састава материјала узетог из корита притоке. Средња крупноћа наноса на 50% учешћа је од 1,90 до 20 mm. Критична вучна сила тока за покретање и транспорт наноса дуж притока креће се у границама од 0,00077 *kN/m²* до 0,0129 *kN/m²* (добијено преко једначине за критични тангенцијални напон са прилагођеном *Shildsovom константом*).

$$\tau_{cr} = \theta \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{sr},$$

где су: τ_{cr} – критични тангенцијални напон;
θ – Shildsova константа (средња вредност 0,0478);
ρ_s – запреминска маса наноса 2,4 *t/m³;*
ρ – запреминска маса воде 1,0 *t/m³;*
d_{sr} – средњи пречник наноса у метрима.



Слика 1. Дијаграм гранулометријског састава материјала из корита (извор: оригинал)
Figure 3. Grain-size distribution diagram of the riverbed material (source: original)

У Табели 4. приказани су резултати морфолошко-хидрауличке анализе главне притоке са прорачуном критичних тангенцијалних напона за средњи пречник зрна наноса $d_{50\%}$ са криве гранулометријског састава. При максимално забележеном протицају од $Q=15,00\ m^3.s^{-1}$ у сва 3 профила, тангенцијални напони су редовно већи од критичних напона, тако да речно корито није отпорно на флувијалне ерозионе процесе.

Табела 4. Површинска брзина тока и тангенцијални напони по дну корита (извор: оригинал)
Table 4. Surface flow velocity and bed shear stress values (source: original)

Профил	Стационажа	Максимална дубина тока h	Средња површинска брзина тока $V_{sr.pov}$	Средњи пречник наноса $d_{50\%}$	Тангенцијални напони	
					Критични τ_{cr}	Стварни τ_{max}
N^0	km	m	$m^1.s^{-1}$	mm	kN/m^2	kN/m^2
1	0+000	1,50	4,90	1,20	0,00077	0,600
2	0+017,60	1,84	4,55	/	/	0,557
3	0+036,60	1,49	5,00	20	0,0129	0,613

Средњи пад тока

Мерени пад између три попречна профила показао је да је средњи пад тока на овој деоници I_0=1,04%. Док је средњи пад тока I_t=5,6% измерен од ушћа у акумулацију до извора. За даљи прорачун средњег пада тока у анализираној притоци користићемо податак добијен теоријски за деоницу у дужини од 1 km, помоћу инверзне Манингове формуле за трапезно корито. Овим прорачуном добијамо средњи (енергетски) пад који не мора у потпуности осликавати и средњи пад тока, али је добра полазна основа, уз ограничења. Познате димензије су нам максимални проток Q_{max} = 15 m^3/s, површинска брзина V_p = 3,18 m/s. За прелазак са измерене површинске брзине на процењену средњу брзину течења усвојен је корекциони коефицијент у интервалу 0,80–0,90. У основном прорачуну усвојена је вредност 0,85, као средња вредност наведеног интервала, па је средња брзина износила Vsr = 0,85 · Vp = 2,70 m/s. С обзиром на то да избор корекционог коефицијента директно утиче на резултат инверзног прорачуна енергетског пада, извршена је и анализа осетљивости за крајње вредности интервала (0,80 и 0,90), при чему су остали параметри прорачуна задржани непромењеним, табела 5. Манингов коефицијент рапавости усвојен је у износу од (n = 0,028) на основу емпиријских Chow-ових таблица (Chow, 1959; Јовановић, 2021) за природна корита са стабилним дном од крупног шљунка и ситног камена. Иако је деоница седиментолошки хетерогена, за потребе прорачуна усвојена је јединствена вредност како би се добио репрезентативан, средњи енергетски пад за целу деоницу дужине 1 km, ширина огледала воде T = 8 m, природно корито приближно трапезног облика.

Табела 5. Анализа осетљивости редукционог коефицијента корекције у препорученом опсегу Светске метеоролошке организације (WMO)

Table 5. Sensitivity analysis of the velocity reduction coefficient within the range recommended by the World Meteorological Organization (WMO)

Фактор корекције		**Средња брзина V_{sr}**	**Израчунати пад**
N⁰		*$m^1.s^{-1}$*	**%**
1	0,80	2,54	0,83
2	**0,85**	**2,70**	**1,16**
3	0,90	2,86	1,22

Анализа осетљивости показује да се при промени корекционог коефицијента са 0,80 на 0,90 добијени енергетски пад мења од приближно 0,83 % до 1,22 %, док је за усвојену вредност коефицијента 0,85 добијен пад од 1,16%. Иако избор коефицијента утиче на апсолутну вредност израчунатог пада, промена не доводи до промене основног закључка о израженом паду и хидрауличком карактеру анализиране деонице, у сва три случаја је он силовит (критичан). Стога је вредност 0,85 задржана као референтна вредност за даљи прорачун.

Површина протицајног профила:

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = 5{,}56\ m^2$$

Средња дубина:

$$h_{sr} = \frac{A}{T}$$

$$h_{sr} = 0{,}695 \text{ m} \approx 0{,}70 \text{ m}$$

Оквашени обим се за трапезно корито рачуна по формули $O = B + 2h\sqrt{1+m^2}$, где употребљене ознаке представљају геометријске параметре корита за усвојени коефицијент k = 0,85; b = 6,22 m израчуната ширина дна корита, h_{sr} = 0,70 m ,пошто је реч о произвољном попречном пресеку који је по опажању на терену близак трапезном усвојићемо облик трапез са усвојеним косинама као за пројектовану деоницу. Оквашени обим је 9,46 m.

Хидраулички радијус:

$$R = A/O$$

$$R = 0{,}588 \text{ m}$$

Инверзијом се може израчунати пад на следећи начин:

$$I_{sr} = \left(\frac{V_n}{R^{2/3}}\right)^2$$

$R^{2/3} = 0{,}70$; $V_n = 0{,}0756$; $I_{sr} = 0{,}108^2 = 0{,}0116 =$ **1,16%.**

Провером Фрудовог броја дошло се до закључка да је ток на граници критичног Fr ≈ 1,03. Оваква појава иницира бујични карактер течења уз велику ширину и малу дубину воде у кориту па је флувијална ерозија врло заступљена.

Пад енергије добијен рачунским путем је приближан морфолошком средњем паду тока добијеном мерењима, па га можемо користити у даљим прорачунима у овом примеру. Овај део прорачуна урађен је као пример коришћења емпиријских и теоријских података у моделима како би се добио недостајући податак неопходан за пројектовање протицајног профила, али се не може користити као валидан податак за пројектовање конкретног решења већ само као оквиран податак. За пројектовање конкретног решења пад мора бити мерен прецизним геодетским инструментима.

Илустративни пример прорачуна концептуалног регулационог решења

На самом почетку у раду је наглашено да се овим радом желело показати могући начин решавања проблема појаве флувијалне ерозије у кориту изазване превеликим брзинама течења и заштите од бујичних поплава применом класичног регулисања водотока. Предложени хидраулички прорачун димензионисања новог корита изведен је стриктно за максимални меродавни протицај поплавног таласа из маја 2014. године, који износи Q = 15 m³/s (повратни период 0,01%). Овај екстремни протицај је намерно задржан у прорачуну као најнеповољнији сценарио, како би се хидраулички тестирала ефикасност и стабилност предложеног каскадног система под максималним оптерећењем. У реалној инжењерској пракси, трајне регулације за овакав тип водотока пројектовале би се на знатно чешћи протицај повратног периода од 1% (стогодишња вода).

Циљ пројектовања регулације у овој притоци је смањење брзине течења и превођење тока из силовитог у миран режим. Применом класичног типа регулисања водотока то

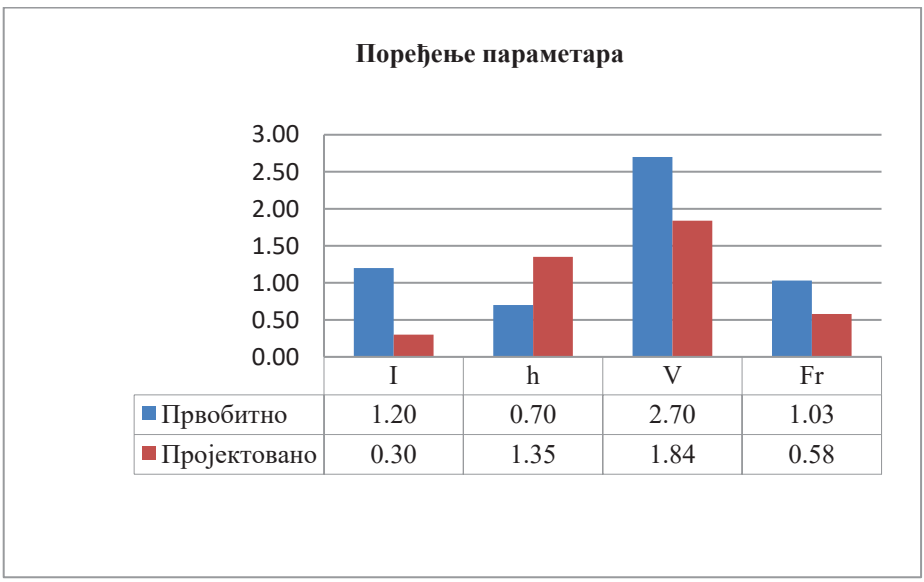
ћемо постићи смањењем пада дна корита. Крајњи циљ је смањење Фрудовог броја испод 1,0 и постизање пада изједначења кад више неће бити заступљена флувијална ерозија у кориту реке. Анализом постојећих података дошли смо до закључка да је неопходно због великог пада деоницу од 1 km изделити каскадама на секторе између којих пад дна корита не сме прелазити више од 3‰ (I_n = 0,003), што је висинска разлика од 3 m на укупној дужини сектора. Користећи раније добијене податке долазимо до потребних параметара за геометрију трапезног корита, па је у овом случају b = 4 m; m = 1,5; I_n = 0,003 (3 ‰); Методом претпоставке дубине рачунамо хидрауличке параметре да би задовољили меродавни протицај у кориту.

Манингова формула за стационарно неједнолико течење:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \sqrt{J_{sr}}$$

потребна нам је геометрија трапеза, уз претпоставку дубине долазимо до резултата да је потребно h = 1,35 m.

Проверавамо брзину $V = \frac{Q}{A}$ = 1,84 m/s, затим и Фрудов број који износи приближно Fr = 0,58.



	I	h	V	Fr
Првобитно	1.20	0.70	2.70	1.03
Пројектовано	0.30	1.35	1.84	0.58

Слика 4. График упоређених параметара пре и након пројектовања регулације (извор: оригинал).

Figure 4. Comparative graph of hydraulic parameters before and after the proposed regulation (source: original)

Поређењем добијених података јасно се види разлика у смањењу брзине течења и Фрудовом броју, што су основни предуслови да се смањи (или потпуно искључи) појава флувијалне ерозије у кориту (Слика 4). На основу графичког приказа упоредних параметара пре и након извођења регулације, уочава се изражена промена у

хидрауличком режиму течења. Експлицитним упоређивањем очитаних вредности утврђено је да је уздужни пад корито ублажен за готово четири пута (са 1,16% ≈1,2 на 0,3%), што је директно утицало на пад средње брзине течења са критичних 2,70 m/s на сигурних 1,84 m/s. Кључни индикатор стабилизације тока је Фрудов број (Fr), који је са почетне границе критичног и силовитог течења (Fr = 1,03) преведен у стабилан подкритични, односно миран режим (Fr = 0,58), чиме се у потпуности спречава појава даље флувијалне ерозије дна и обала.

Да би овакво решење било могуће трасу од 1000 m смо морали поделити каскадама на 6 сразмерно једнаких поља дужине приближно 167 m, висине 1,8 m, тако да су прва и последња каскада искоришћене за уливни односно изливни објекат регулације, па је укупан број потребних каскада 7.

ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан поступак инверзног хидрауличког прорачуна енергетског пада водотока на основу теренских мерења протицаја и површинске брзине течења. Применом Manningove једначине добијена је вредност средњег пада од 1,16%, што указује на бујични карактер тока и појаву граничног критичног режима течења.

На основу утврђених хидрауличких услова дефинисано је концептуално решење регулације у виду трапезног корита са смањеним уздужним падом и системом каскада, чиме је постигнуто превођење тока у подкритични режим (Fr < 1) и значајно смањење брзине течења и ерозионе моћи воде.

Резултати показују да инверзни хидраулички прорачун може представљати користан алат у условима ограничених података, али уз неопходно уважавање ограничења методе и потребу за додатном верификацијом. Предложени приступ има потенцијалну примену у концептуалном пројектовању регулационих мера на мањим бујичним водотоцима.

Поред конкретног техничког решења, научни и практични допринос овог рада огледа се у демонстрацији примене инверзног хидрауличког прорачуна у условима дефицита континуалних хидролошких мерења, што је чест проблем на бујичним водотоцима у Србији. Спроведена анализа осетљивости модела доказала је високу робусност примењене методологије, будући да варијације редукционог коефицијента брзине (у опсегу 0,80–0,90) не мењају крајњи инжењерски закључак о изразито бујичном карактеру тока (пад изнад 0,83%). Тиме је потврђено да приказани методолошки приступ и концепт лонгитудиналне регулације помоћу каскадних система могу послужити као поуздан оквир за прелиминарно димензионисање и планирање антиерозионих мера на сличним неизученим малим притокама и бујичним сливовима

Будућа истраживања треба усмерити ка интеграцији хидрауличког моделовања са анализом транспорта наноса, као и утицаја вегетације и биотехничких мера на стабилност корита.

Захвалница

Рад је реализован у оквиру пројекта институционалног финансирања од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије под уговором 451-03-34/2026-03/200169 од 05.02.2026. године.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andjelkovic, A., Ristic, R., Janic, M., Djekovic, V., Zivanovic, N., & Spalevic, V. (2017). Genesis of sediments and siltation of the accumulation "Duboki potok" of the Barajevska river basin, Serbia, Journal of Environmental Protection and Ecology, Vol. 18, No 4, p.1735-1745, ISSN 1311-5065, Balkan Environmental Association, Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, Greece
2. Anđelković, A. (2020). Erozioni i sedimentacioni procesi na slivnim područjima malih vodnih akumulacija na području grada Beograda i Fruške gore. Doktorska disertacija u rukopisu, Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet, COBISS-ID: 514085788.
3. Andualem, T. G., Hewa, G. A., Myers, B. R., Peters, S. & Boland, J. (2023). Erosion and sediment transport modeling: A systematic review. Land, 12(7), 1396. DOI:10.3390/land12071396. ISSN: 2073-445X. https://www.mdpi.com/2073-445X/12/7/1396
4. Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill Book Company.
5. Đeković, V., Anđelković, A., Spalević, V., & Janić, M. (2015). Analiza poplava u Srbiji tokom maja 2014. godine, Šumarstvo, Udruženje šumarskih inženjera i tehničara Srbije, br. 4, p.49-66, 0350-1752, 556.166(497.11), -1043557-, Dec 2015.
6. Hamidifar, H., Nones, M. & Rowinski, P. M. (2024). Flood modeling and fluvial dynamics: A scoping review on the role of sediment transport. Earth-Science Reviews, 253, 104775. DOI:10.1016/j.earscirev.2024.104775. ISSN: 0012-8252. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825224001028
7. Harada, D. & Egashira, S. (2024). Methods to create hazard maps for flood disasters with sediment and driftwood. Proceedings of IAHS, 386:159-164. DOI:10.5194/piahs-386-159-2024. https://piahs.copernicus.org/articles/386/159/2024/index.html
8. Jenačković, D., Dimitrijević, D., & Ranđelović, V. (2010). Macrophytic flora and vegetation of the rivers Svrljiški and Beli Timok (Eastern Serbia). Biologica Nyssana, 1 (1-2): 23-26.
9. Jovanović, M. (2021). Regulacija reka: Rečna hidraulika i morfologija. Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
10. Kostadinov, S., Momirović, N., Lazarević, K., & Stefanović, T. (2022). Erozija i bujične poplave u Srbiji: iskustva i perspektiva odbrane. Vodoprivreda 54 (317-318): 81-96.
11. Letić, Lj., Savić, R., Nikolić, V., Lozjanin, R. (2014): Effects of reclamation works on the state of pedunculate oak forests in Ravni Srem, Šumarstvo 3-4: 117-130.
12. Tomić, Z. & Rakonjac, Lj. (2011): Survey of syntaxa of forest and shrub vegetation of Serbia. Folia Biologica et Geologica, 52 (1-2): 111-140.
13. Vázquez-Tarrío, D., Ruiz-Villanueva, V., Garrote, J., Benito, G., Calle, M., Lucía, A. & Díez-Herrero, A. (2024). Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. Geomorphology, 446, 108976. DOI:10.1016/j.geomorph.2023.108976.ISSN:0169-555X. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108976
14. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ (2001). Водопривредна основа Републике Србије, Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде, Република Србија, https://www.srbijavode.rs/images/dokumenti/vodoprivredna_osnova_republike_srbije.pdf

15. Vukotić, D., Jenačković Gocić, D., Ilić, D.P., Nikolić, D., & Ranđelović, V. (2024). Aquatic and wetland plant communities of the Pusta River (Southern Serbia): floristic characteristics and syntaxonomic affiliation. Biologica Nyssana, 13 (1): 59-81.
16. Wolfgang S., & Walling D. E. (2002). Modelling erosion, sediment transport and sediment yield, International Hydrological Programme, No. 60 UNESCO, Paris, 2002, p. 243–264.

DOI: 10.5937/eroz52-72621 ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД

АНАЛИЗА ХИДРОЛОШКОГ РЕЖИМА НА ПОДРУЧЈУ ХИГРОФИЛНИХ ШУМА ГОРЊЕГ ПОДУНАВЉА

ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL REGIME AT THE AREA OF HIGROPHILOUS FORESTS OF GORNJE PODUNAVLJE AREA

Софија Парезановић[1*1], Весна Николић Јокановић[1], Душан Јокановић[1], Александар Анђелковић[1], Кристина Ђорђевић[1]

[1]Универзитет у Београду Шумарски факултет

Примљен: 17.07.2026/ ***Рецензиран:*** 22.07.2026/ ***Прихваћен:*** 13.08.2026.

Абстракт: Хигрофилне шуме алувијалних равни представљају екосистеме чији развој, продуктивност и стабилност директно зависе од режима површинских (плавних) и подземних вода. Циљ овог рада је био да се анализира режим плавних и подземних вода на подручју хигрофилних шума Горњег Подунавља, утврди њихова динамика и сагледа значај ових хидролошких параметара за функционисање шумских екосистема. Истраживање је спроведено у ГЈ „Карапанџа“, у оквиру Специјалног резервата природе „Горње Подунавље“. Анализа се заснива на подацима о водостају реке Дунав са хидролошке станице „Апатин“, нивоу подземних вода на девет пијезометара распоређених на два осматрачка профила и количини падавина за истраживани период 2018-2022. Добијени резултати показују изражену сезонску динамику површинских и подземних вода. Највиши водостаји Дунава детектовани су током пролећа и лета, док су минимуми установљени крајем лета и почетком јесени. Осцилације нивоа подземних вода показале су сличне тенденције, са максимумима током априла и маја, односно минимумима у септембру, при чему је дубина прве издани била у распону између 0,10 m и 3,54 m, зависно од топографије терена и дистанце од речног тока. Утврђено је да водни режим истраживаног подручја представља резултат интеракције водостаја реке Дунав, климатских услова и локалних хидрогеолошких прилика. Добијени резултати указују на значај перманентног мониторинга режима плавних и подземних вода, будући да поменути хидролошки параметри имају кључни значај за опстанак и развој хигрофилних шумских екосистема. На бази вишегодишњих праћења водног режима, могуће је предвидети неке екстремне сценарије (суше или плављења) и реаговати превентивно, што је од великог значаја са аспекта газдовања и неге ових вредних екосистема.

Кључне речи: алувијално станиште, хигрофилне шуме, приобаље Дунава, поршинске и подземне воде

Abstract: Hygrophilous forests of alluvial flat areas are ecosystems whose development, productivity and stability directly depend on surface and groundwater regime. The goal of the

[1] Парезановић Софија* email: sofija.parezanovic@sfb.bg.ac.rs, ORCID ID 0009-0006-7416-9273; Николић Јокановић Весна ORCID ID 0000-0003-3393-9981; Јокановић Душан ORCID ID 0000-0002-8143-4219; Анђелковић Александар ORCID 0000-0001-8986-315X; Ђорђевић Кристина ORCID ID 0009-0001-4765-7136

paper was to analyze the regime of surface and groundwater at the area of higrophilous forests of Gornje Podunavlje, establish its dynamics and the importance of these hydrological parameters for the forest ecosystems functioning. The study was investigated in the MU „Karapandža“, within the special nature reserve „Gornje Podunavlje“. The analysis was based on the data related to the water level of the Danube river from the hydrological station „Apatin“, the groundwater level at nine piezometers distributed on two profiles and rainfalls quantity for the analyzed period 2018-2022. The obtained results show the significant seasonal dynamics related to surface and groundwater. The highest water levels of the Danube river were detected during spring and summer, while minimums were established at the end of the summer and at the beginning of the autumn. The oscilations of the groundwater level showed the similar tendencies with maximum in April and May, but minimum in September, where the first aquifer was between 0,10 m and 3,54 m, depending on terain topography and distance from the river. There was established that the watering regime of the investigated area was the result of interaction between water level of the river Danube, climat conditions and local hydrogeological conditions. The obtained results display the importance of permanent monitoring of the surface and groundwater regime, because these hydrological parameters are of the essential significance for the survival and development of higrophilous forest ecosystems. Based on multiyear water regime monitoring, it is possible to predict some extreme scenarios (decline or floods) and prevent damages, which is very important from the management and silviculture point of view.

Keywords: aluvial site, higrophilous forests, Danube coast, surface and groundwaters

УВОД

Хигрофилне шуме представљају једне од најпродуктивнијих и највреднијих копнених екосистема чији је опстанак директно условљен хидролошким режимом, а корисне функције алувијалних шума су бројне: очување биодиверзитета, регулисање водног режима, акумулација угљеника, заштита од поплава и стабилизација обала (Николић, 2017). Водни режим представља квалитативну процену свих доступних залиха воде у земљишту током дужег периода времена и то је заправо укупна количина воде која уђе у земљиште на различите начине и расходује се током различитих физиолошких процеса (Burlica, 1987; Nikolić Jokanović et al., 2019). Бројни радови који се баве проблематиком сушења дрвенастих врста лоцираних на алувијалним земљиштима у приобаљу Дунава и Саве узимају у обзир неколико кључних фактора од којих зависи интензитет овог процеса: ниво подземне воде и интензитет сушења (Dekanić, 1974; Đorović & Letić, 2002; Letić et al., 2014); одговор врста на модификоване хидролошке услове (Prpić, 1976); дебљински прираст као показатељ измењених станишних услова (Pranjić & Lukić, 1989); биоеколошки и узгојни разлози (Prpić et al., 1994; Bobinac et al., 1997). У алувијалним екосистемима плавне воде периодично плаве инундационе површине, док подземне воде обезбеђују континуирано снабдевање вегетације водом током периода између поплава. Због тога су структура, функционисање и стабилност ових екосистема директно условљени интеракцијом површинских и подземних вода. (Jokanović & Nikolić Jokanović, 2025).

Дунав је једна од најзначајнијих европских река и други најдужи водоток на старом континенту, после Волге. Укупна дужина Дунава износи 2,857 km, а кроз Србију протиче у дужини од 587 km и на свом току кроз Србију, показује карактеристике типичне равничарске реке (Гавриловић и Дукић, 2014). Својом хидроморфолошком

динамиком, река Дунав је обликовала простране алувијалне равни у којима су се развили комплексни хигрофилни шумски ексосистеми. Природни режим плављења и блиска повезаност између површинских и подземних вода, омогућили су формирање карактеристичних шумских фитоценоза чији састав, продуктивност и просторна распрострањеност зависе директно од хидролошких услова (Nikolić Jokanović et al., 2020). Морфолошке карактеристике корита Дунава кроз Србију веома су разноврсне и обухватају различите форме речног тока – од кањонских делова кроз Ђердапску клисуру до широких алувијалних равница у Панонском делу тока. У алувијалним подручјима Дунава, водни режим представља резултат међусобног деловања површинских и подземних вода, при чему периодичне поплаве обезбеђују допунску влагу и нанос седимента, док режим подземних вода одређује доступност воде вегетацији током периода без плављења (Letić et al., 2014; Гавриловић и Дукић, 2014).

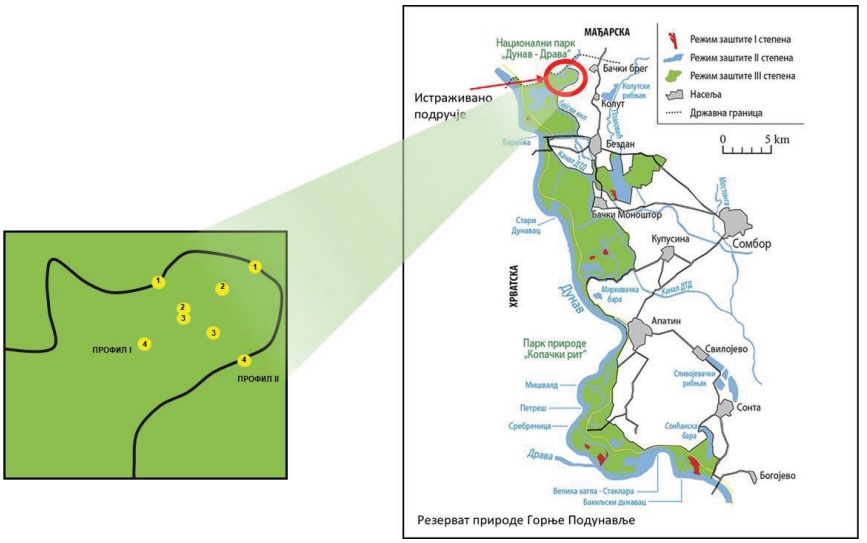
Циљ рада је анализа водног режима хигрофилних шума у алувијуму реке Дунав кроз сагледавање динамике плавних и подземних вода, утврђивање њихове међусобне повезаности и оцену значаја ових хидролошких фактора за функционисање алувијалних шумских екосистема. Један од специфичних циљева може се односити и на давање одређених смерница везано за одрживо газдовање овим вредним шумским ексосистемима, а на бази анализираног водног режима од кога у највећој мери зависи њихов опстанак и развој.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Објекат истраживања – Специјални резерват природе „Горње Подунавље“ једно је од најзначајнијих заштићених природних подручја у Србији. Заузима леву обалу Дунава од границе са Мађарском до Богојева, у дужини од 64 km, обухватајући површину од око 19.605 ha. У оквиру резервата, налазе се следеће вегетацијске форме: ритске шуме, мочваре, водени екосистеми и влажне ливаде које представљају станиште многим ретким и угроженим врстама (Пањковић & Стојнић, 2018). Хидролошке карактеристике подручја су директно зависне од водног режима Дунава, његових сезонских осцилација и периодичних плављења. Флору резервата карактеришу шуме меких лишћара врбе и тополе, које су адаптиране на услове периодичног плављења, потом на нешто узвишенијим теренима налазе се заједнице храста лужњака са пољским јасеном, а на гредама, где владају ксерофилнији станишни услови, могу се наћи стабла граба (Пањковић и сар., 2016). Подручје се одликује и великим богатством фауне, будући да га насељава преко 230 врста птица, при чему се 140 гнезди на овом локалитету. Потврда значаја резервата на међународном нивоу огледа се у чињеници да је део UNESCO програма „Човек и биосфера“ и да је део прекограничног резервата биосфере „Мура-Драва-Дунав“.

У погледу геолошких карактеристика, Северна Бачка одликује се специфичном геолошком грађом која настаје као резултат сложених тектонских процеса и седиментационих циклуса (Маровић и сар., 2007). На овом подручју је констатовано присуство метаморфних стена, попут гнајсева, микашиста и амфиболита, а прекривају их млађе седиментне формације настале трансгресивним таложењем (Кеменци & Чановић, 1997). Хидрогеолошке карактеристике Северне Бачке настају као резултат различитих седиментационих циклуса током геолошке историје и део су Панонског басена. Основна специфичност овог подручја је присуство различитих типова издани

формираних у оквиру квартарних и неогених седимената: фреатске, субартешке и артешке издани.



Слика 1. Истраживано подручје у оквиру резервата природе Горње Подунавље
Image 1. Investigated area within nature reserve Gornje Podunavlje

Геоморфолошку структуру истраживаног подручја чине у највећем делу лесне терасе смештене дуж десне обале Дунава. Настала је током квартара таложењем еолског материјала, пре свега праха, који је ветар доносио са околних планина и алувијалних равни (Букуров, 1975).

У погледу хидрогеографских карактеристика, треба поменути значај реке Дунав, као друге најдуже реке у Европи после Волге. Режим протицаја Дунава карактерише се максималним водостајем у периоду април-мај услед топљења снега са Алпа и пролећних киша у средњој Европи. Минимални водостаји су забележени током јесени и зиме, обично у октобру и новембру (Исаиловић & Прохаска, 2021). Температура воде Дунава показује велика сезонска колебања – највише температуре су забележене током јула и августа, када се крећу у распону 20º-24º C, а најниже температуре се јављају у јануару и фебруару, у распону између 0º и 4º C (Бабић-Младеновић & Коларов, 2019). Квалитет воде Дунава је варијабилан на подручју Србије и зависи од интензитета антропогеног утицаја. Индустријске комуналне и отпадне воде из већих насеља, као и аграрне активности у приобалном подручју, у највећој мери загађују воду, али услед велике количине воде и израженој способности самопречишћавања, Дунав се карактерише релативно стабилним квалитетом воде која се категорише у другу класу водотокова (Николић и сар., 2018).

Климатске карактеристике истраживаног подручја имају сва обележја умерено-континенталне климе, што значи појаву топлих лета и хладних зима, уз присуство прелазних годишњих доба, пролећа и јесени (Лалић и сар., 2011). Просечна годишња температура ваздуха износи 11º C, најхладнији месец је јануар, а најтоплији јул. Што се тиче режима падавина, просечна годишња сума падавина износи 614 mm, при чему је

највећа количина падавина забележена у јуну (75,5 mm), а најмања у фебруару – 31,2 mm. Током вегетационог периода, просечно падне 55 % од укупне годишње количине падавина, што веома погодује развојним карактеристикама шумске вегетације.

Земљишта присутна на истраживаном подручју (Иванишевић и сар., 2011) могу се класификовати на следећа: флувисол (алувијално земљиште), хумофлувисол (алувијално-ливадско земљиште), хумоглеј (ритска црница) и еуглеј (мочварно-глејно земљиште). Вегетацију подручја Горњег Подунавља чине комплекси ритских шума, мочвара и водених површина смештених дуж леве обале Дунава. Специфичан је распоред и састав вегетације и директно условљен режимом плављења, едафским карактеристикама и топографијом терена (Томић и сар., 2011). На овом подручју доминирају заједнице хигрофилних шума врба и топола које су смештене у најнижим деловима алувијалне равни и адаптиране на плављења. На нешто вишим теренима, налазе се шуме беле и црне тополе које су прелазни тип између пионирских врба и климатогених шума храста лужњака (Bobinac & Andrašev, 2009). На гредама и вишим теренима, који нису толико често изложени плављењу, налазе се шуме храста лужњака са пољским јасеном и ове заједнице имају највећи еколошки и економско-производни значај (Letić et al., 2014). У депресијама и барама срећу се репрезенти мочварне вегетације попут трске, рогоза и других хигрофита, док се флотантна и субмерзна вегетација водених екосистема налази код мртваја и канала, где су заступљене врсте попут белог локвања, жутог локвања и других водених биљака.

Опште карактеристике ГЈ „Карапанџа“ – газдинска јединица „Карапанџа“, у којој је спроведено истраживање, део је севернобачког шумског подручја којим газдује ЈП „Војводинашуме“ Петроварадин преко ШГ „Сомбор“. Поменут локалитет се налази између 18º49' и 18º55' северне географске ширине, односно између 45º48' и 45º55' источне географске дужине. Цела газдинска јединица налази се у распону надморске висине 85-88 m. Вештачки подигнуте шуме доминирају у овој газдинској јединици чинећи око 85 % од укупне површине под шумом. Од укупне површине од 2637,33 ha, више од 70 % је под шумом, а остатак углавном чини необрасло земљиште. Структура шума је у доброј мери очувана, при чему више од ¾ површине заузимају очуване састојине, док су разређене и деградиране шуме знатно мање заступљене. Анализа врста дрвећа показује доминацију лужњака, на који отпада скоро трећина дрвне запремине, док различите врсте топола такође имају велико учешће.

Метод рада – истраживања у оквиру овог рада описују у најкраћим цртама најзначајније опште карактеристике ГЈ „Карапанџа“ и то на основу података из публикованих научних и стручних радова, као и из публиковане техничке документације. Анализа површинских вода односила се на податке осматрања водостаја реке Дунав на основу података РХМЗ-а Србије на мерној станици у Апатину за период 2018-2022. Нулта тачка водомера је на 78,84 m над Јадранским морем, а површина слива до Апатина износи 211,139 km^2. Водомер је од ушћа удаљен 1401.9 km. Анализа осцилација нивоа подземних вода за период 2018-2022, на подручју ГЈ „Карапанџа“, на укупно 9 пијезометара распоређених на профилима I и II, спроведена је на основу података мониторинга који спроводи ЈП „Војводинашуме“. На профилу I налазе се пијезометри P-1, P-2, P-3, P-4, P-5, који су постављени управно на ток реке Дунав, док се на профилу II налазе пијезометри са ознакама P-1, P-2, P-3, P-4 постављени паралелно у односу на ток реке Дунав. Конструкција пијезометара састоји се од поцинковане цеви 5/4", таложника 0,5 m, филтера 1,5 m и дела конструкције изнад површине терена од 20 cm. Филтер конструкције представља цев перфорирана кружним отворима пречника

4mm око којег се уграђује шљунчани засип до дубине од 0,5 m од површине терена, у овој зони се поставља глинени тампон. Пијезометарска капа и дно таложника затварају се металним чепом са навојем. Ниво подземних вода мери се у односу на врх пијезометарске цеви који треба поставити 20 cm изнад површине терена, а са њим у равни и бетонско осигурање.

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

На основу анализе осцилација просечних месечних висина падавина на мерној станици „Сомбор“, нивоа површинских вода реке Дунав на хидролошкој станици „Апатин“ и нивоа подземних вода на подручју газдинске јединице „Карапанџа“ на пијезометрима Р-1, Р-2, Р-3, Р-4, Р-5 на профилу I и Р-1, Р-2, Р-3, Р-4 на профилу II, током периода 2018-2022, може се закључити следеће:

Средње месечне количине падавина током истраживаног петогодишњег периода кретале су се за мерну станицу „Сомбор“ од минималних 1,7 mm (март 2019. године) до максималних 155,40 mm (јун 2019. године) са просеком од 52,15 mm (дијаграм 1). Током вегетационог периода, средња месечна количина падавина у истраживаном периоду била је 58,66 mm, а на основу сумарне количине падавина током вегетационог периода, могу се издвојити 2019. година као највлажнија са 486.50 mm, затим 2018. година са 487,70 mm, па 2021. година са 418,00 mm, потом 2020. година са 357,70 mm и као најсувља, 2022. са 303,30 mm.

Средње месечне осцилације водостаја реке Дунав (ХС „Апатин“) кретале су се у распону од 0,00 m до 5,10 m у периоду од 2018. до 2022. године. На дијаграму се јасно уочавају периода са високим водостајем реке Дунав код Апатина у јун 2019. године (5,10 m), као и два периода са веома ниским водостајем, а то су: октобар 2018. године са 0,11 m и април 2020. године са 0,00 m (дијаграм 1).

Током 2018. године, водостај Дунава бележи амплитуде од јануара до јула у распону између 3,87 m и 1,47 m, потом достиже свој минимум током августа, септембра и октобра и након тога уочен је благ пораст до краја године. Током 2019. године такође су детектоване амплитуде у периоду јануар-јул у распону између 5,10 m и 1,65 m, потом се достиже минимум током августа, септембра и октобра и благ раст до краја године, што значи да је тренд осциловања нивоа водостаја Дунава веома сличан претходној години. Што се тиче 2020. године, водостај Дунава расте од јануара до марта, потом достиже свој минимум од 0,00 m у априлу, па креће пораст од маја све до августа, потом је у октобру забележена кота 3,12 m и након тога је регистрован пад до краја године. Почетком 2021. године водостај Дунава је у порасту и достиже свој максимум током фебруара (3,58 m) затим опада до априла након чега је у порасту и достиже свој други максимум током јуна (3,12 m) затим опада и достиже свој минимум крајем године у новембру (0,31 m). Највиши водостај Дунава забележен током 2022. године регистрован је у јануару и износио је 2,12 m, потом долази до редукције водостаја до марта са нивоом од 1,02 m, а након тога је регистрован нови узлазни тренд до јуна, па поново пад до минималних 0,25 m током августа и затим пораст до краја године (дијаграм 1).

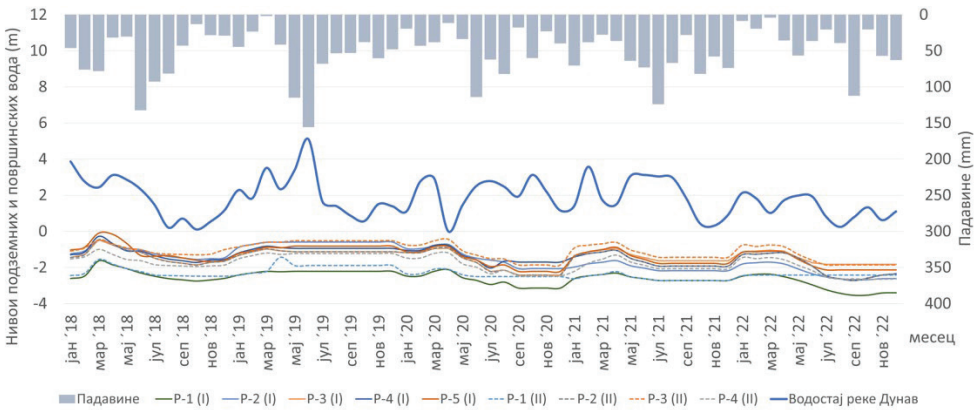
Осцилације средњих месечних нивоа подземне воде на профилима I и II у ГЈ „Карапанџа“ имају исте тенденције на свим пијезометрима (дијаграм 1): у 2018. години, ниво подземне воде расте од јануара до марта, потом следи пад до октобра месеца и након тога пораст до краја године. Ниво подземне воде током ове године варира у

границама 0,10 m – 0,52 m на профилу I и 0,47 m – 2,48 m на профилу II. Током 2019. године, минимални ниво подземне воде регистрован је током јануара, а потом је забележен пораст нивоа до краја године, при чему су се амплитуде на профилу I кретале у распону 0,73 m – 3,14 m, а на профилу II између 0,44 m и 2,50 m. У 2020. години, минимум је детектован у априлу, а максимуми крајем године. Почетком поменуте године, ниво подземне воде расте све до априла, када је достигнут максимум, потом долази до опадања и достизања минимума у септембру и остаје на том нивоу до краја године. Током ове анализиране године, амплитуде нивоа подземне воде износиле су: 0,73 m – 3,14 m на профилу I и 0,44 m – 2,50 m на профилу II. Током 2021. године, ниво подземне воде се налазио у границама између 0,88 m и 2,72 m на профилу I, а између 0,61 m и 2,72 m на профилу II. Од почетка године, ниво подземне воде расте до априла месеца, када достиже свој максимум, а након тога долази до опадања до краја године. Током 2022. године, максимум је регистрован током марта и априла, а минимум у септембру и октобру, док се ниво подземне воде кретао у распону између 1,04 m и 3,54 m на профилу I, а између 0,75 m и 2,72 m на профилу II. Добијени резултати истраживања осциловања нивоа подземних вода током анализираног петогодишњег периода показују да режим подземних вода у оквиру ГЈ „Карапанџа“ одликује један пролећни максимум током марта и априла месеца и један минимум крајем лета, у септембру месецу, изузев 2019. и 2021. године, када је минимум регистрован током јануара. Дубина прве издани током истраживаног периода креће се у распону 0,10 m – 3,54 m, зависно од микрорељефа и удаљености од Дунава. Поменута специфичност има веома велики утицај на развој шумске вегетације, као и на типове шума које се могу наћи на овом подручју.

ДИСКУСИЈА

Површинске воде су кључни фактор у образовању и опстанку хигрофилних шума у алувијалној равни Дунава, при чему хидролошки режим реке Дунав директно детерминише динамику површинских вода у зони приобаља. ГЈ „Карапанџа“ смештена је у алувијалној равни на десној обали Дунава и представља специфичан комплекс који је под директним утицајем водостаја Дунава и његових притока. Хидролошке прилике овог подручја карактерише стална међусобна интеракција површинских и подземних вода. Површинске воде показују изражену сезонску динамику, при чему су највиши нивои достигнути током пролећних месеци услед отапања снега у горњем сливу Дунава и интензивнијих падавина, а њихова улога у алувијалним подручјима је двојака: директно снабдевање вегетације водом и инидиректан утицај на ниво подземних вода (Nikolić Jokanović et al., 2024). Подземне воде чине значајан сегмент водног режима хигрофилних шума и алувијалних подручја реке Дунав. Динамика осцилација и карактеристике подземних вода директно утичу на развој и опстанак шумских фитоценоза у зони приобаља (Nikolić Jokanović et al., 2019; Nikolić Jokanović et al., 2020; Nikolić Jokanović et al., 2024). У алувијалним равнима Дунава, подземне воде су у директној хидрауличкој вези са речним током, при чему осцилације нивоа подземних вода корелирају са амплитудама нивоа водостаја реке. Ова веза нарочито долази до изражаја током периода великих вода, када се издан у значајној мери прихрањује, што се директно рефлектује на водни режим земљишта и околну вегетацију (Letić et al., 2014). Формирање и кретање подземних вода у алувијалним седиментима Дунава условљено је геолошком грађом терена и хидрогеолошким карактеристикама стенских маса. Алувијални седименти, грађени од пескова и шљункова различите гранулације,

представљају главни колектор подземних вода са значајним коефицијентом филтрације (Илић, 2024). Изнад ових водопропусних седимената је повлатни слој од глиновито-песковитих наслага, чија је дебљина варијабилна дуж речног тока (Плавшић и Тодоровић, 2015). У зони хигрофилних шума, током вегетационог периода, ниво подземних вода постепено опада услед повећане евапотранспирације и смањеног прихрањивања издани, а резултати појединих истраживања (Иванишевић и сар., 2011) показали су да оптимална дубина подземних вода за развој хигрофилних шума варира у распону 1,5 m – 3 m, зависно од врста дрвећа и едафских карактеристика.



Дијаграм 1: Осцилације просечних месечних висина падавина, нивоа површинских вода реке Дунав (Х.С. Апатин) и нивоа продземне воде на подручју ГЈ "Карапанџа", 2018-2022.година

Diagram 1: Oscilations of the average monthly rainfalls, the level of the surface water of the Danube river (HS Apatin) and groundwater level at the area of MU „Karapandža" 2018-2022. year

Подземне воде су један од кључних фактора који детерминишу формирање и одржавање специфичних станишних услова у алувијалним подручјима (Nikolić i Jokanović, 2018). Њихов ниво, динамика и трајање задржавања у зони кореновог система непосредно утичу на влажност земљишта, аерацију и доступност воде биљкама, чиме условљавају развој, продуктивност и просторну дистрибуцију хигрофилне вегетације (Nikolić Jokanović et al., 2024). Значајнија варирања у нивоу осциловања подземних вода могу довести до већег модификовања постојећих станишних услова, потом до сукцесије вегетације и умањења виталности хигрофилне вегетације (Николић, 2017). Антропоген утицај може у значајној мери модификовати режим подземних вода у приобалној зони Дунава кроз градњу путева, насипа, регулација речних токова, итд., што намеће потребу за сталним мониторингом режима подземних вода уз спровођење превентивних заштитних мера.

Резултати појединих радова (Prpić, 1976; Nikolić Jokanović et al., 2023) показују да плавне воде негативно утичу на развојне карактеристике подмлатка храста лужњака будући да стагнирање воде током дужег временског периода доводи до редукционих процеса и

дефицита кисеоника. Добијени резултати за неплавно подручје Горњег Срема (Nikolić Jokanović et al., 2019) сугеришу да смањење нивоа подземне воде у поређењу са тзв. референтним нивоом има негативан утицај на водни режим, зато што се директно рефлектује на количину кореновом систему биљке доступне воде. Са друге стране, повећање нивоа подземне воде изнад тзв. референтног нивоа на плавном подручју Доњег Срема (Nikolić Jokanović et al., 2023) има негативан утицај на усвајање кисеоника од стране биљака, што има за последицу да плавни услови више погодују хигрофилнијим врстама попут врбе, тополе, пољског јасена него што је то случај са храстом лужњаком. Pilaš et al. (2007) су истраживали везу између дебљинског раста и нивоа подземних вода на станишту храста лужњака и дошли до закључка да се најинтензивнији радијални раст јавља на почетку вегетационог периода када је подземна вода најближа површини тла, а идући ка крају вегетационог периода, долази до постепеног опадања секундарног раста. Даљим истраживањима би знатно допринело успостављање климатолошке станице на подручју хигрофилних шума „Горњег Подунавља“. То би омогућило континуирано праћење климатских карактеристика станишта и мониторинг подземних вода и примену активних мера заштите шумске вегетације.

ЗАКЉУЧАК

Резултати истраживања током периода 2018-2022 показују да је водни режим хигрофилних шума Горњег Подунавља условљен комплексном интеракцијом водостаја реке Дунав, падавина и динамике подземних вода. Амплитуде водостаја Дунава директно се рефлектују на режим подземних вода, при чему су, током анализираног периода, детектовани изражени пролећни максимуми, као и минимуми у периоду позног лета. Дубина прве издани кретала се у широком дијапазону, што говори о значајном утицају микрорељефа и удаљености од речног тока на локалне хидролошке услове. Такве просторне и временске разлике директно утичу на влажност земљишта и образовање специфичних станишних услова неопходних за развој хигрофилне шумске вегетације. Добијени резултати потврђују да је очување природног режима плављења и повољне динамике подземних вода од кључног значаја за очување стабилности алувијалних шума. Сталан мониторинг режима плавних и подземних вода омогућава благовремено уочавање промена насталих услед климатских колебања и антропогеног утицаја, услед чега се потенцијалне штете у оквиру ових вредних екосистема у будућности могу избећи. Резултати овог истраживања могу послужити као научна основа за будуће хидролошке и еколошке студије, али и за унапређење мера газдовања и очувања хигрофилних шума у све изазовнијим условима глобалних климатских промена и модификација природног водног режима.

Захвалница
Овај рад је проистекао из истраживања која су извршена у оквиру пројекта „Истраживање утицаја режима влажења на станишта храста лужњака у сремском и севернобачком шумском подручју" (бр. 1719/24, ЈП „Војводинашуме", Нови Сад - Шумарски факултет, Београд). Искрено се захваљујемо руководству пројекта и свим колегама на подршци, обезбеђеним ресурсима и сугестијама током реализације овог истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bobinac, M., & Andrašev, S. (2009). Učinci uzgojnih mjera u devitalizovanoj srednjedobnoj sastojini lužnjaka (*Quercus robur* L.) na černozemu u Vojvodini, Šumarski list, 133 (9-10): 513-525
2. Bobinac, M., Grbić, P., Janjatović, G., & Abjanović, Z. (1997). Thinnings in young stands of oak pedunculate and ash at the area of FH Sremska Mitrovica, Šumarstvo 4-5: 33-43
3. Burlica, Č. (1987). Guide for soil examination. Book V, JDPZ, 131, Belgrade, Serbia
4. Dekanić, I. (1974). Influence of level and fluctuations of groundwater to oak pedunculate (*Quercus robur* L.) decline, Journal of Forestry, Society of Croatia, 99 (7-10): 267-280
5. Đorović, M., & Letić, Lj. (2002). Observation of underground water level in the area of Forest Estate „Sremska Mitrovica“ during 2000 and 2001, Bulletin of Faculty of Forestry, 86: 103-109, https://doi.org/10.2298/GSF0286103D
6. Jokanović, D., & Nikolić Jokanović, V. (2025). Hydrological regime of higrophilous forests on the islands along the Danube river, Proceedings of the XVI International Scientific Agricultural Symposium „Agrosym 2025“, Jahorina, October 02-05, 1094-1100, ISBN 978-99976-070-5-8
7. Letić, Lj., Savić, R., Nikolić, V., & Lozjanin, R. (2014). Effects of reclamation works on the state of pedunculate oak forests in Ravni Srem, Šumarstvo 3-4: 117-130
8. Nikolić Jokanović, V., Jokanović, D., Savić, R., Petrović, N., Marinković, M., Tubić, B., & Vasić, I. (2024). Soil moisture regime in lowland forests – quantity and availability of water, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 72 (1): 15-24, https://doi.org/10.2478/johh-2023-0037
9. Nikolić Jokanović, V., Lazović, A., Šoškić, T., & Živanović, K. (2023). Monitoring of groundwater level fluctuations at flooded area of lowland forests of the Sava River (Serbia), REFORESTA 16: 55-65, https://dx.doi.org/10.21750/REFOR.16.05.110
10. Nikolić Jokanović, V., Letić, Lj., Savić, R., & Jokanović, D. (2019). Influence of groundwater level fluctuations on decline of higrophilous pedunculate oak forest, Fresenius Environmental Bulletin, 28 (8): 5989-5996
11. Nikolić Jokanović, V., Vulević, T., & Lazarević, K. (2020). Risk assessment of forest decline by application of geostatistics and multi-criteria analysis, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 68 (3): 285-292, https://doi.org/10.2478/johh-2020-0013
12. Nikolić, V., & Jokanović, D. (2018). Watering regime influence on sustainability of floristic structure of special nature reserve „Obedska bara“, 65: 459-477
13. Pilaš, I., Lukić, N., Vrbek, B., Dubravac, T., & Roth, V. (2007). The effect of groundwater decrease on short and long term variations of radial growth and dieback of mature pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stand, Ekologia 26 (2): 122-131
14. Pranjić, A., & Lukić, N. (1989). Increment of oak pedunculate stems as indicator of site changes, Bulletin of Forestry Plots, 25: 79-94
15. Prpić, B. (1976). Response of oak pedunculate (*Quercus robur* L.) individuals from two different sites to different watering conditions, Journal of Forestry, Society of Croatia, 100 (3): 117-123
16. Prpić, B., Seletković, Z., & Žnidarić, G. (1994). Ecological and biological causes related to oak pedunculate (*Quercus robur* L.) stems devastation in lowland forests Turopoljski lug, Bulletin of Forestry Plots, 30: 193-222

17. Бабић-Младеновић, М., & Коларов, В. (2019). Лед на Дунаву – карактеристике и утицај на пловидбу, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
18. Букуров, Б. (1975). Физичко-географски проблеми Бачке, Српска академија наука и уметности, Одељење природно-математичких наука, Посебна издања, књига 43, Београд
19. Гавриловић, Љ., & Дукић, Д. (2014). Реке Србије, Завод за уџбенике, Београд
20. Иванишевић, П., Галић, З., & Пекеч, С. (2011). Земљишта у шумама Горњег Подунавља, Монографија, Институт за низијско шумарство и животну средину, Нови Сад
21. Исаиловић, Д., & Прохаска, С. (2021). Анализа водног режима Дунава на сектору кроз Србију, Водопривреда, 53 (309-310): 45-56
22. Кеменци, Р., & Чановић, М. (1997). Геологија подручја Војводине, Матица српска, Нови Сад
23. Лалић, Б., Михаиловић, Д.Т., & Подрашчанин, З. (2011). Будуће стање климе у Војводини и очекивани утицај на ратарску производњу, Ратарство и повртарство, 48 (2): 403-418
24. Маровић, М., Толић, М., Рундић, Љ., & Миливојевић, Ј. (2007). Неоалпска тектоника и палеогеографска еволуција подручја Србије, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду
25. Николић, В. (2017). Утицај режима влажења на карактеристике станишта храста лужњака (*Quercus robur* L.) у Равном Срему, Докторска дисертација у рукопису, Унуверзитет у Београду – Шумарски факултет
26. Николић, В., Јокановић, Д., Петровић, Ј., & Анђелковић, А. (2018). Процена квалитета воде у хигрофилним шумама Равног Срема, Шумарство 1-2: 155-166, УДК 556.31 (497.113 Равни Срем)
27. Пањковић, Б., & Стојнић, Н. (2018). Специјални резерват природе „Горње Подунавље“ – вредности и значај, Покрајински завод за заштиту природе, Нови Сад
28. Пањковић, Б., Стојшић, В., & Ковачев, Н. (2016). Флора и вегетација специјалног резервата природе „Горње Подунавље“, Покрајински завод за заштиту природе, Нови Сад
29. Плавшић, Ј., & Тодоровић, А. (2015). Анализа карактеристика алувијалних издани у приобалном подручју Дунава, Водопривреда, 47 (276-278): 187-196.
30. Томић, З., Ракоњац, Љ., & Исајев, В. (2011). Избор врста за пошумљавање и мелиорације у централној Србији, Институт за шумарство, Београд

DOI: 10.5937/eroz52-72627 ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД

PRIMENA BAGERA U VODOPRIVREDI I NJIHOV UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU

APPLICATION OF EXCAVATORS IN WATER MANAGEMENT AND THEIR IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Tijana Vulević [1*1], NadaDragović[1], Mirko Šćepanović[2]

[1]Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet, Kneza Višeslava 1, 11030 Beograd
[2]VD "Zapadna Morava" d.o.o Kraljevo, 36000 Kraljevo

Примљен: 19.08.2026. / ***Рецензиран:*** 17.09.2026. / ***Прихваћен:*** 06.10.2026.

APSTRAKT

Bageri su među najčešće korišćenim mašinama za izvođenje radova sa zemljištem i sličnim materijalima u oblasti zaštite zemljišta od erozije i bujičnih poplava. Vodoprivredna preduzeća u Srbiji ih koriste prvenstveno za uređenje i sanaciju rečnih korita, izgradnju nasipa i drugih objekata za zaštitu od štetnog dejstva voda. Potrošnja energije i emisija CO_2 predstavljaju, pored produktivnosti, troškova i trajanja radova, važne pokazatelje održivosti.
Za određene modele CAT i Komatsu bagera, na osnovu podataka proizvođača o potrošnji pogonskog goriva, određene su potrošnja energije i emisija CO_2. Dodatno je analizirano 17 modela bagera neto snage motora 70-151 kW kojima raspolažu tri vodoprivredna preduzeća. Pri srednjem prosečnom opterećenju motora, procenjena potrošnja energije iznosi 326,12-666,21 MJ/h, a emisija CO_2 24,07-49,17 kg/h. Za potpuniju ocenu emisija potrebno je razmotriti i vreme rada i produktivnost, jer veća časovna emisija ne mora nužno rezultirati većom ukupnom emisijom CO_2.

Ključne reči: bageri, vodoprivredna preduzeća, potrošnja energije, emisija CO_2

ABSTRACT

Excavators are among the most commonly used machines for earthworks related to soil protection against erosion and torrential flooding. Water management companies in Serbia primarily use them for riverbed regulation and rehabilitation, construction of embankments, and other structures for protection against the harmful effects of water. In addition to productivity, costs, and project duration, energy consumption and CO_2 emissions are important sustainability indicators.
For selected CAT and Komatsu excavator models, energy consumption and CO_2 emissions were determined based on manufacturers' fuel consumption data. Additionally, 17 excavator models with net engine power ranging from 70 to 151 kW, operated by three water management companies, were analysed. Under average engine load conditions, estimated energy consumption ranges from 326.12 to 666.21 MJ/h, while CO_2 emissions range from 24.07 to

[1] Tijana Vulević, email: tijana.andrijanic@sfb.bg.ac.rs, ORCID ID: 0000-0003-2417-653X; Nada Dragović ORCID ID: 0000-0001-8935-0717

49.17 kg/h. A more comprehensive assessment should also consider operating time and productivity, as higher hourly emissions do not necessarily result in higher total CO_2 emissions.

Keywords: excavators, water management companies, energy consumption, CO_2 emission

UVOD

U vodoprivrednoj delatnosti, za izvođenje radova na zaštiti zemljišta od erozije i bujičnih poplava primenjuju se različite građevinske mašine. U Srbiji je njihova primena krenula od 20. veka, prilikom uređenja Džepskih bujica u Grdeličkoj klisuri, kada su korišćeni prvi dozeri, utovarivači i bageri u reonskim sekcijama kako su se u to vreme zvala vodoprivredna preduzeća (Dragović, 2011). Prema podacima dostupnim u bazi CompanyWall, zasnovanim na podacima Agencije za privredne registre (APR), u Srbiji postoji 58 aktivnih privrednih subjekata, od čega 55 privrednih društava iz oblasti vodoprivrede, čija je pretežna delatnost izgradnja hidrotehničkih objekata.

Izvođenje, rekonstrukcija sanacija i održavanje različitih objekata (pregrada, nasipa, brana, kanala, crpnih stanica i dr.) preduzeća vrše primenom širokog spektra mehanizacije koji obuhvata bagere, dozere, kamione, utovarivače, kombinirke, uključujući pumpe za vodu, trimere, motorne testere, mešalice, vibronabijače i dr. Mašine koje imaju najširu primenu od pomenutih su bageri - mašine za radove sa zemljom i sličnim materijalima (Oljača et al. 20016) sa cikličnim načinom rada, svetskih proizvođača kao što su Kobelko, O&K, Volvo, Liebher, Komatsu, JCB, CAT, Sunward i dr. (Slika 1).



Slika 1. Primena bagera na izvođenju protiverozionih radova od strane vodoprivrednog društva "Erozija", Niš (Foto: Erozija, Niš)

Figure 1. Use of excavators in erosion control works by a water management company "Erozija", Niš (Foto: Erozija, Niš)

Bageri mogu imati različite priključke zahvaljujući kojima mogu obavljati brojne radove sa velikom efikasnošću, kao npr. demoliranje, ravnanje, podizanje i prenos terete, bušenje, ali se najčešće primenjuju za iskop i utovar materijala. S tim u vezi, najčešći priključni uređaj je dubinska kašika koja se koristi za iskop materijala ispod ravni oslanjanja građevisnke mašine. Kašika se nalazi na kraju ruke bagera (eng. arm) i zglobno vezana za strelu (eng. boom), a zajedno sva tri elementa, čine radni uređaj bagera.

Bageri sa dubinskom kašikom imaju najširu primenu od svih bagera sa jednom kašikom i primenjuju se za iskop temeljnih jama i rovova, iskop kanala za vodovod i kanalizaciju, prokop regulacije, izradu nasutih brana odbrambenih nasipa, iskop materijala sa rečnih sprudišta i iz rečnih tokova i dr. (Dragović, 2011). Koriste se i za izradu zagata. Pored navedenog, bageri su od značaja i za održavanje izgrađenih objekata. Njihov izbor pri uređenju bujičnih slivova zavisi od vrste i obima radova, uslova terena i usvojene tehnologije izvođenja (Dragović, 2011; Vulević i sar., 2021).

Kapacitet (zapremina) kašike bagera je od ključnih parametara za određivanje njegove produktivnosti (količina iskopanog materijala u m^3 po jedinici vremena) i zavisi od veličine bagera na koji se kašika postavlja.

Bageri većih gabaritnih dimenzija imaju veću snagu motora i radni deo većeg kapaciteta (Holt & Edwards, 2015), što omogućava iskop i manipulaciju većim količinama materijala. Takve mašine su posebno zastupljene u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina, gde je obim zemljanih radova znatno veći (Zdravković et al., 2025), dok se za izvođenje protiverozionih radova koriste bageri manje zapremine kašike koja obično iznosi od 0,5 do 1,5 m^3 (Dragović, 2011).

Pogonski mehanizam bagera je dizel motor, odnosno bageri koriste dizel gorivo, koje značajno doprinosi emisiji štetnih gasova u atmosferu, pre svega CO_2 (Jassim et al. 2017). Da bi se odredila potrošnja energije i emisija CO_2 od podataka su potrebni specifična potrošnju goriva, snaga motora mašine, kao i vrednost koeficijent opterećenja motora. Potrošnja goriva je količina goriva u litrima koju mašine utroše u toku jednog sata rada, odnosno u toku 50 minuta rada, jer se procenjuje da je to maksimalno moguće vreme za koje mašina može efektivno da radi (Ivanov & Tsonev, 2025). Potrošnja goriva je važan faktor ekonomičnosti rada bagera jer čini značajan deo operativnih troškova rada bagera. Pored toga, poznavanje potrošnje goriva građevinskih mašina je važno sa aspekta minimiziranja negativnih efekata na životnu sredinu, jer usled sagorevanja dizel-goriva dolazi do emisije CO_2. Potrošnja goriva zavisi od tipa i modela mašina, radne sredine, vrste materijala, načina rukovanja mašinom, snage motora mašine i koeficijenta opterećenja motora. Što je veća vrednost koeficijenta opterećenja motora, veća je potrošnja goriva. Specifična potrošnja goriva je odnos mase utrošenog goriva i proizvedene snage u jedinici vremena koja se može izraziti u kg/(kW·h). Za modernije i novije dizel motore, specifična potrošnja goriva obično iznosi 0,21 kg/(kW·h), a sa povećanjem starosti motora ona se povećava i za istrošene motore obično iznosi 0,26 kg/(kW·h) (Klanfar et al. 2016). Koeficijent opterećenja motora ima vrednosti koje običnu idu do 0,90. Veće vrednosti ovog parametra ukazuju na to da je više goriva potrebno za generisanje neophodne snage. Vrednost ovog parametra se može odrediti na osnovu časovne potrošnje goriva, snage motora, specifične potrošnje goriva i gustine dizela. Ukoliko su poznati ovi podaci, može se odrediti emisija CO_2 ne samo bagera već i čitavog mašino-sastava što je značajno za procenu uticaja radova na životnu sredinu i preduzimanja mera za ublažavanje tih uticaja.

Cilj rada je da utvrdi koje bagere primenjuju privredni subjekti u Srbiji koja se bave vodoprivrednom delatnošću, kolika je potrošnja energije i emisija CO_2 bagera na osnovu

raspoloživih podataka iz kataloga i priručnika proizvođača, i kolike bi vrednosti ovih parametara mogle biti za mehanizaciju koja vodoprivredna preduzeća primenjuju za izgradnju hidrotehničkih objekata.

MATERIJAL I METODE

Materijal

Materijal istraživanja predstavljaju podaci o građevinskoj mehanizaciji, odnosno bagerima, kojima raspolažu vodoprivredna preduzeća u Srbiji, kao i tehnički podaci o analiziranim modelima bagera. Podaci o raspoloživoj mehanizaciji prikupljeni su iz javno dostupnih izvora vodoprivrednih preduzeća, što je obuhvatilo i raspoložive podatke o tehničkim karakteristikama mašina, uključujući proizvođača, model, kapacitet radnog dela i neto snagu motora. Za pojedine modele bagera proizvođača Caterpillar i Komatsu korišćeni su i podaci o snazi motora, potrošnji goriva pri različitim uslovima odnosno režimima rada koji su preuzeti iz kataloga i priručnika proizvođača. Prikupljeni podaci sistematizovani su i korišćeni kao ulazni parametri za procenu potrošnje energije i emisije CO_2.

Proračun potrošnje energije

Časovna potrošnja energije građevinskih mašina (Ec) se može proceniti na osnovu formule (Kecoljevic & Komljenovic, 2011; Klanfar et al. 2016; Jassim et al. 2017):

$$Ec = FC \cdot Ecf \ [MJ/h]$$

Gde je:

Ec – časovna potrošnja energije (MJ/h)

FC –potrošnja goriva u l/h, koja se dobija iz izraza:

$$FC = \frac{SFC \cdot P \cdot LF}{\rho_f} \quad [l/h]$$

SFC – specifična potrošnja goriva u kg/(kW·h)

P – snaga motora u kW

LF – koeficijent opterećenja motora

ρ_f – gustina dizela, ρ_f = 0,85 kg/l

Ecf – faktor koji konvertuje svaki l dizel goriva u energiju; Ecf=36 MJ/l.

Proračun emisije CO_2

Časovna emisija CO_2 usled potrošnje dizel goriva građevinskih mašina se može odrediti primenom formule:

$$E_{CO_2} = FC \cdot Emcf \quad [kgCO_2/h]$$

Gde je:

E_{Co_2} – emisija CO_2 u $kgCO_2/h$

FC – potrošnja goriva u l/h

$Emcf$ – faktor koji konvertuje svaki l dizel goriva CO_2 , tj. Emcf=2,6569 $kgCO_2/l$.

REZULTATI I DISKUSIJA

Vodoprivredna preduzeća u Srbiji imaju u svom vlasništvu različiti broj bagera, koji se razlikuju po tehničkim karakteristikama i godini proizvodnje, i koji se mogu koristiti za izvođenje brojnih vrsta radova. Dragović i Vulević (2016) analiziraju primenu mehanizacije u 5 vodoprivrednih preduzeća u Srbijii i zaključuju da preduzeća raspolažu sa 2 do 5 bagera, sa kratkim i dugim strelama, pri čemu jedno od razmatranih preduzeća raspolaže i sa plovnim bagerima. U pitanju je pretežno mehanizacija nabavljena posle 2004. god, ali ukazuju na to da je potrebna nabavka novih mašina, za šta su potrebna veća ulaganja u vodoprivredu.

Pojedina vodoprivredna preduzeća na svojim internet stranicama, samo navode realizovane i aktivne projekte, bez spiska mehanizacije sa kojom raspolažu, dok druga preduzeća daju brojno stanje mehanizacije u okviru tehničke opremljenosti, ali bez tehničkih karakteristika. Npr. VPD „Regulacije“ iz Sremske Mitrovice raspolaže sa preko 20 specijalizovane mehanizacije koja uključuje i bagere (Regulacije d.o.o., n.d.), dok VPD „Erozija“ doo, Niš raspolaže sa 4 bagera proizvođača Kobelko, O&K i Volvo (Erozija Niš, n.d.).

Vodoprivredno pivredno društvo „Smederevo” d.o.o. raspolaže sa bagerima JCB 210LC Dual, Sunward SWE 210 ELR, Hidromek HMK 310 LC, Sunward SWE 150W i Sunward SWE 120 ELR.

Vodoprivredno privredno društvo „Hidrosrem”, d.o.o. iz Sremske Mitrovice raspolaže sa bagerima točkašima i guseničarima koji se koristi pretežno za iskop i uklanjanje akvatične vegetacije, karakteristika datih u tabeli 1. Vodoprivredno društvo “Zapadna Morava” d.o.o., Kraljevo raspolaže sa tri bagera čije su karakteristike date u tabeli 2. Vodoprivredno društvo Jugokop-Podrinje doo, Šabac ima 6 JCB, 4 VOLVO, 1 O&K i 1 Liebher bager, čije su karakteristike date u tabeli 3 (Jugokop-Podrinje d.o.o., n.d.).

U pojedinim preduzećima su još uvek u upotrebi bageri proizvodnje „Radoje Dakić” iz Podgorice proizvedeni pre nekoliko decenija, ali preduzeća kupuju nove mašine u cilju efikasnijeg izvršenja radova i danas pretežno raspolažu bagerima proizvedenim posle 2000. godine. Vodoprivredna preduzeća, pored cilja da obezbede funkcionisanje stanja vodnih objekata za zaštitu od štetnog dejstva voda kao i blagovremenu relakcije na rizik od poplava, nastoje i da unaprede i modernizuju mehanizaciju. Na osnovu podataka postupnim u Izveštaju o poslovanju, može se videti da preduzeća ulažu u nabavku novih mašina. Npr. VP „Sibnica“ je u period od 2021-2026. nabavilo pored druge mehanizacije 1 bager (VD „Sibnica“, 2026.). VPD „Galovica“ je u periodu 2023-2026. nabavilo 9 bagera, kao i 2 mini bagera za priključcima za rad u urbanim uslovima i bager guseničar sa hidrauličkim bagerskim tarupom (VPD „Galovica“ d.o.o., 2026).

Tabela 1. Karakteristike bagera kojim raspolaže VPD „Hidrosrem"
Table 1. Characteristics of excavators used by water management company "Hidrosrem"

Proizvođač i model bagera	Mehanizam kretanja	Tip strele	Snaga motora	Godina proizvodnje
CAT 325CL	gusenični	sa standardom i dugom strelom dohvata 18m	129 kW	2003.
Komatsu PC 210-8	gusenični	sa standardnom strelom	110 kW	2006.
Komatsu PC 210 NLC-8	gusenični	sa standardnom strelom	110 kW	2007.
Komatsu PC 240-8	gusenični	sa standardom i dugom strelom dohvata 18m	125 kW	2008.
RD600	točkovi		70 kW	1991.

Tabela 2. Karakteristike bagera vodoprivrednog društva"Zapadna Morava" d.o.o., Kraljevo
Table 2. Characteristics of excavators used by water management company "Zapadna Morava" d.o.o., Kraljevo

Proizvođač i model bagera	Mehanizam kretanja	Tip strele/Kašika	Snaga motora	Radna težina mašine	Godina proizvodnje
O&K RH 22	gusenični	dužina strele 5,6m +3,2m; kapacitet kašike 0,95m^3	131kW	23t	2000.
Volvo EC 210C	gusenični	duzina strele 5,7m kapacitet kašike 0,92 m^3	123 kW	22,5t	2008.
Volvo EC210B	gusenični	Dužina strele 5,7m Kapacitet kašike 1,5m^3	119kW	22t	2005.

Tabela 3. Karakteristike bagera vodoprivrednog društva„Jugokop-Podrinje" d.o.o, Šabac
Table 3. Characteristics of excavators used by water management company "Jugokop-Podrinje" d.o.o Šabac

Proizvođač i model bagera	Mehanizam kretanja	Tip strele	Težina mašine	Godina proizvodnje
JCB 220 LC	gusenični	Kratka + duga ruka 17m	22 t	2002.
JCB 220 XD	gusenični	Kašika za iskop 5 m^3	22 t	2001.
JCB 220 NC	gusenični	Profilna kašika 2-2,5 m	22 t	2001.
JCB 220 NC	gusenični	Kratka + duga ruka 17m	22 t	2003.
JCB 240 LC	gusenični	Kratka + duga ruka 15,5m	25 t	2001.
JCB 210 L	gusenični	Insstalacije za čekić	22t	2001.
VOLVO 290 BLC	gusenični	Kašika za iskop 1,8 m^3	30t	2003.
VOLVO 290 NLC	gusenični	Kašika za iskop 2 m^3	30t	2001.
VOLVO 210 LC	gusenični	Hidraulički čekić 1800 kg	22t	1998.
VOLVO 160 B	točkovi	Kašika za iskop, profilna kašika, kašika za bankine	16t	2006.
O&K RH 9 LC	guseničar	Kašika za iskop 2 m^3	32t	1998.
Liebherr 902	Točkovi	Kašika za iskop, profilna kašika, kašika za bankine	14t	1996.

Produktivnost bagera, kao i njihov uticaj na životnu sredinu, preko emisije CO_2 i dr. gasova, zavisi od više faktora, među kojima je potrošnja goriva. Potrošnja goriva kod bagera je podatak koji je potrebno odrediti na terenu, ali postoje i teorijske vrednosti dostupne u priručnicima proizvođača.

Za Komatsu bagere, časovna potrošnja goriva zavisi od intenziteta rada mašine koji može biti nizak (iskorišćenost radnog vremena manja od 65%), srednji (iskorišćenost radnog vremena od 65% do 80%) i visok (iskorišćenost radnog vremena preko 80%) (Tabela 4) (Komatsu Ltd., 2019). U tabeli 4 je data snaga motora i potrošnja goriva (FC) Komatsu bagera koja je preuzeta iz priručnika proizvođača (Komatsu Ltd., 2019).

Na osnovu podataka iz tabele 4, može se zaključiti da potrošnja goriva za Komatsu bagere snage motora od 65 do 200 kW ima vrednost od 4,0 l/h do 37,9 l/h koje su veće ukoliko je veći stepen iskorišćenosti mašine.

Tabela 4. Potrošnja goriva Komatsu bagera

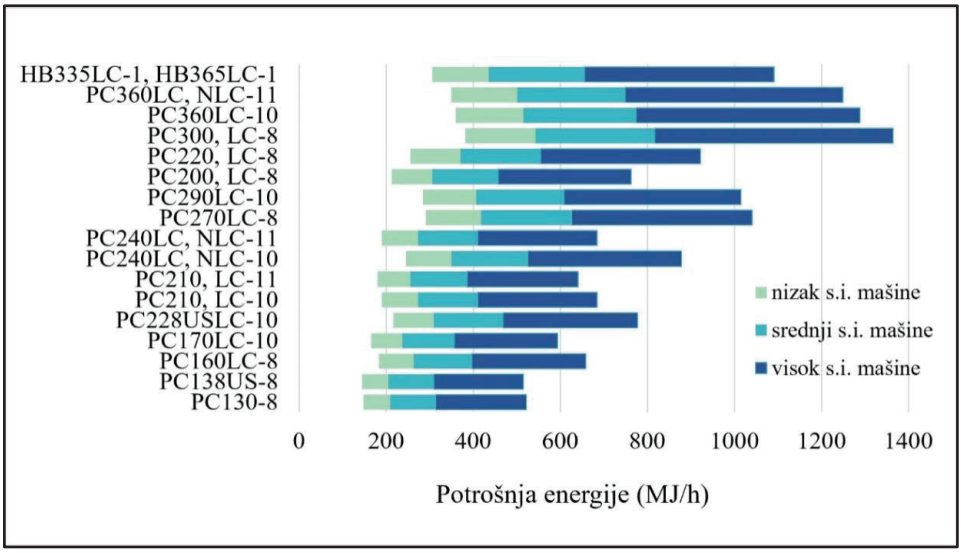
Table 4. Fuel consumption of Komatsu excavators

Bager	Snaga motora	Potrošnja goriva		
	kW	l/h		
		Nizak stepen iskor. mašine	Srednji stepen iskor. mašine	Visok stepen iskor. mašine
PC130-8	68	4,1-5,8	5,8-8,7	8,7-14,5
PC138US-8	68,4	4,0-5,7	5,7-8,6	8,6-14,3
PC160LC-8	86	5,1-7,3	7,3-11	11-18,3
PC170LC-10	86	4,6-6,6	6,6-9,9	9,9-16,5
PC200, LC-8	110	5,9-8,5	8,5-12,7	12,7-21,2
PC228USLC-10	116	6,0-8,6	8,6-13,0	13,0-21,6
PC210, LC-10	118	5,3-7,6	7,6-11,4	11,4-19
PC210, LC-11	123	5,0-7,1	7,1-10,7	10,7-17,8
PC220, LC-8	125	7,1-10,3	10,3-15,4	15,4-25,6
PC240LC, NLC-10	132	6,8-9,7	9,7-14,6	14,6-24,4
PC240LC, NLC-11	132	5,3-7,6	7,6-11,4	11,4-19,0
PC270LC-8	140	8,1-11,6	11,6-17,4	17,4-28,9
PC290LC-10	147	7,9-11,3	11,3-16,9	16,9-28,2
PC300, LC-8	184	10,6-15,1	15,1-22,7	22,7-37,9
HB335LC-1, HB365LC-1	189	8,5-12,1	12,1-18,2	18,2-30,3
PC360LC-10	192	10-14,3	14,3-21,5	21,5-35,8
PC360LC, NLC-11	192	9,7-13,9	13,9-20,8	20,8-34,7

Potrošnja energije Komatsu bagera (Ec) je dobijena primenom formule 1, odnosno na osnovu potrošnje goriva bagera i konverzionog faktora energetskog sadržaja dizel goriva koji iznosi 36 MJ/l. Najniže vrednosti potrošnje energije među razmatranim bagerima ima bager PC138US-8 i te vrednosti se kreću od 144,00 do 205,2 MJ/h pri niskom stepenu iskorišćenja mašine, od 205,2 do 309,6 pri srednjem i od 309,6 do 514,8 MJ/h pri visokom stepenu iskorišćenja mašine (Slika 2). Najviše vrednosti potrošnje energije su dobijene kod bagera PC300 LC-8 koje pri visokom stepenu iskorišćenja mašine dostižu vrednosti i do 1364,40 MJ/h (Slika 2), dok odgovarajuća emisija CO_2 iznosi 100,70 kg/h. Emisija CO_2 Komatsu bagera je

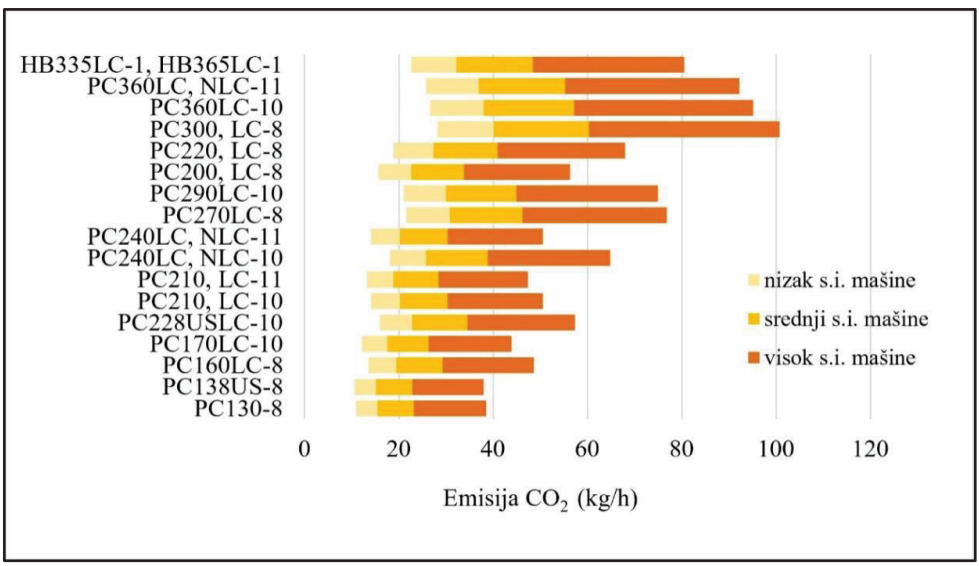
dobijena primenom formule 3, odnosno na osnovu potrošnje goriva u l/h i emisionog faktora koji iznosi 2,6569 (Jassim et al. 2017) i prikazana je na slici 3.

Rezultati pokazuju da bageri koji imaju najveće vrednosti potrošnje goriva, imaju i najveću potrošnju energije, kao i emisiju CO_2.



Slika 2. Potrošnja energije Komatsu bagera (Source: Autor)

Figure 2. Fuel consumption for Komatsu excavators (Source: Author)



Slika 3. Emisija CO_2 Komatsu bagera (Izvor: Autor)

Figure 3. CO_2 emission of Komatsu excavator (Source: Author)

U CAT priručniku iz 2022. Godine (Caterpillar Inc., 2022) navode se podaci za potrošnju goriva u zavisnosti od vremena koje mašina radi bez praznog hoda (motor radi, ali mašina ne obavlja koristan rad). Odnosno, potrošnja goriva je niska, srednja ili visoka ukoliko je vreme rada motora u praznom hodu 50%, 30% ili 10% (Tabela 5).

Tabela 5. Potrošnja goriva, potrošnja energije i emisija CO_2 CAT bagera

Table 5. Fuel consumption, energy consumption and CO_2 emissions of CAT excavators

Bager	Snaga motora	Potrošnja goriva			Potrošnja energije			Emisija CO_2		
	kW	l/h			MJ/h			kg CO_2/h		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c
CAT 313-07	80,9	6,21	7,99	9,73	223,56	287,64	350,28	16,50	21,23	25,85
CAT 320-07	128,5	9,16	11,62	14,08	329,76	418,32	506,88	24,34	30,87	37,41
CAT 323-07	128,5	10,26	13,06	15,82	369,36	470,16	569,52	27,26	34,70	42,03
CAT 325-07	128,5	8,52	10,94	13,36	306,72	393,84	480,96	22,64	29,07	35,50
CAT 326-07	149,8	12,45	15,79	19,15	448,2	568,44	689,4	33,08	41,95	50,88
330-07 GC	150	13,29	17,03	20,78	478,44	613,08	748,08	35,31	45,25	55,21

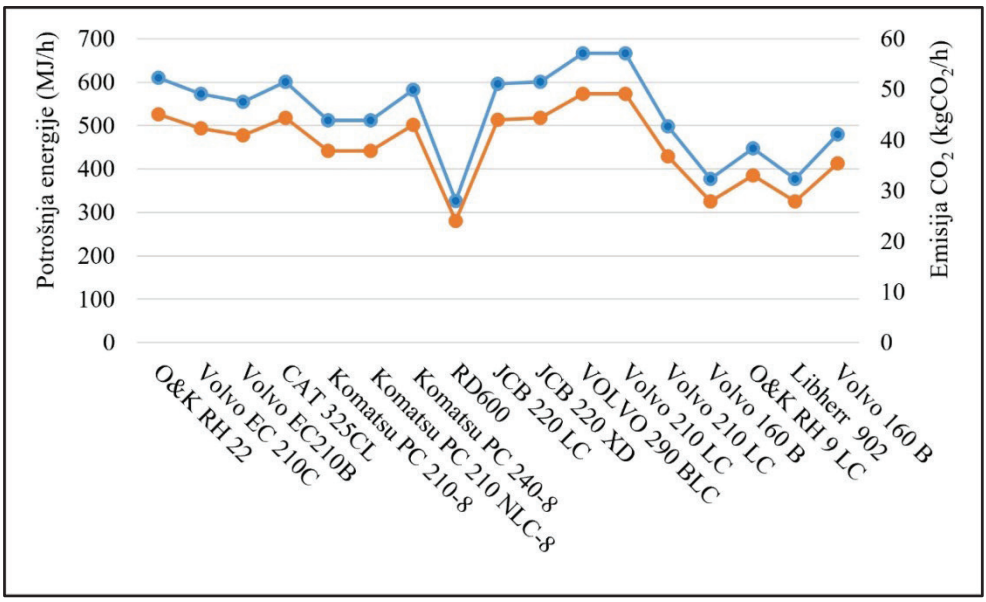
a-niska potrošnja goriva, vreme rada motora u praznom hodu 50%; b-srednja potrošnja goriva, vreme rada motora u praznom hodu 30%; c-visoka potrošnja goriva, vreme rada motora u praznom hodu 10%.

Za odabrane modele CAT bagera snage motora od 80 do 150 kW, potrošnja goriva ima vrednosti od 6,21 do 20,78 l/h, odnosno srednja potrošnja goriva se kreće od 7,99 do 17,03 l/h (Tabela 5). Na osnovu formule 1, istim postupkom kao za Komatsu bagere, izračunate su vrednosti potrošnje energije koja se za razmatrane bagere kreće u rasponu od 223,56 do 748,08 MJ/h. Primenom formule 3 su izračunate vrednosti emisije CO_2 čije vrednosti idu od 16,50 kg CO_2/h do 55,21 kg CO_2/h u zavisnosti od udela vremena u kojem motor radi u praznom hodu.

Na slici 4 su date vrednosti potrošnje energije i emisije CO_2 za određene modele bagera sa kojim raspolažu VD „Zapadna Morava“ d.o.o Kraljevo, „Hidrosrem“ vodoprivredno privredno društvo d.o.o iz Sremske Mitrovice i VD „Jugokop-Podrinje” d.o.o Šabac. Analizom su obuhvaćeni bageri, točkaši i guseničari, koji imaju snagu motora između 70 i 151 kW za koje je utvrđeno da potrošja energije ide od 326,12 do 666,21 MJ/h, a emisija ugljen-dioksida ima vrednosti od 24,07 do 49,17 kg CO_2/h. Prilikom proračuna ovih vrednosti, usvojen je koeficijent opterećenja motora LF od 0,50 (rad bagera pri srednjem prosečnom opterećenju), što odgovara vrednostima koje je su predložene od strane Caterpillar Inc. (2019) i specifična

potrošnja goriva SFC koja iznosi 0,22 kg/(kW·h). Koeficijent opterećenja se može odrediti shodno uslovima rada, koji se mogu definisati na osnovu tipa materijala, odnosno njegove gustine u kg/m^3 i vremena rada mašine (Trani et al. 2016).

Prema vrsti materijala Trani et al. (2016) izdvajaju vrednosti LF koje imaju opseg od 20% za humusni horizont zemljišta do 80% za mešoviti material koji je po sastavu 75% stena i 25% zemljište. Caterpillar u priručniku daje vrednosti LF u zavisnosti od vrste posla i intenziteta rada to: LF=20-40%, LF=40-60% i LF=60-80% (Caterpillar Inc., 2019).



Slika 4. Procena potrošnje energije i emisije CO_2 bagera vodoprivrednih preduzeća u uslovima srednjeg prosečnog opterećenja motora (Izvor: Autor)

Figure 4. Estimated energy consumption and CO_2 emissions of excavators used by water management companies under medium average engine load conditions (Source: Author)

Komatsu daje vrednosti potrošnje goriva za određene modele bagera u zavisnosti od stepena iskorišćenja mašina (Table 4). Za bager PC200, LC-8, pri visokom stepenu iskorišćenja mašine, potrošnja goriva je u rasponu od 12,7-21,2 l/h. Primenom formule 2 za bager Komatsu PC 210-8 iste snage motora, uz usvojene vrednosti SFC i LF, dobijena je potrošnja goriva od 14,24 l/h, koja se nalazi unutar intervala potrošnje goriva koje Komatsu vezuje za intenzivne uslove korišćenja mašine.

Kowalski et al. (2023) su za 11 građevinskih mašina su evidentirali utrošeno gorivo i emisiju CO_2. Za Komatsu PW200 su izmerili 515 časova rada, 5216 l utrošenog dizela i emisiju od 13.978,88 kg CO_2 što je 27,14 kg CO_2/h.

U slučaju manjeg opterećenja motora, što je kod prime u lakšim uslovima rada, npr. iskopa suvog, rastresitog zemljišta, kada se može usvojiti LF oko 0,2-0,4 (Trani et al. 2015) vrednosti potrošnje energije i emisije CO_2 mašina koje su razmatrane u ovom radu (Slika 4) imale bi

vrednosti manje od onih prikazanih na Slici 4 i do 60%. Takođe, za smanjenje emisije CO_2, otrebno je razmotriti primenu alternativnih niskougljeničnih goriva i izvršiti elektrifikaciju pogona, pri čemu elektrifikacija može eliminisati direktne emisije na mestu rada.

ZAKLJUČAK

Bageri su mašine koje vodoprivredna preduzeća najčešće koriste pri izvođenju zemljanih radova u oblasti zaštite od erozije, bujičnih poplava i štetnog dejstva voda.

Preduzeća raspolažu sa bagerima guseničarima ili točkašima, sa dubinskom kašikom, proizvedenih nakon 2000. godine. Dok pojedina preduzeća ulažu u modernizaciju i nabavljaju nove mašine, određena preduzeća nemaju dovoljno investicija za to.

Rezultati analize potrošnje energije i emisije ugljen-dioksida pokazuju da ove vrednosti zavise od snage motora i uslova njegovog opterećenja. Za analiziranih 17 modela bagera, neto snage motora od 70 do 151 kW, u uslovima relativno visokog prosečnog opterećenja motora procenjena je potrošnja energije od 326,12 do 666,21 MJ/h, dok se emisija ugljen-dioksida kreće od 24,07 do 49,17 kg CO_2/h. Dobijeni rezultati ukazuju da izbor i način korišćenja mehanizacije mogu imati značajnu ulogu u smanjenju potrošnje energije i emisije CO_2 pri izvođenju zemljanih radova. Međutim, časovna emisija CO_2 sama po sebi nije dovoljna za ocenu efikasnosti i održivosti primene određene mašine. Bager sa većom časovnom emisijom može, zahvaljujući većoj produktivnosti i kraćem vremenu potrebnom za izvršenje istog obima radova, ostvariti manju ukupnu emisiju CO_2. Zbog toga bi pri izboru mehanizacije, pored časovne potrošnje goriva i emisije CO_2, trebalo razmatrati i produktivnost, ukupno vreme rada i emisiju po jedinici izvedenog rada.

Pri tome, važno je proceniti stvarnu potrošenju pogonskog goriva tokom izvođenja radova, kao i utrošeno vreme rada mašina, kako bi se dobile realne emisije CO_2, a ne procene, što je pravac budućih istraživanja.

Zahvalnica

Rad je realizovan u okviru projekta institucionalnog finansiranja od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod ugovorom broj 451-03-34/2026-03/200169 od 05.02.2026. godine.

LITERATURA

1. Caterpillar Inc. (2019). *Caterpillar performance handbook* (49th ed., SEBD0351-49). Caterpillar Inc.
2. Caterpillar Inc. (2022). *Caterpillar performance handbook* (50th ed., SEBD0351-50). Caterpillar Inc.
3. Dragović, N., & Vulević, T. (2016). Primena mehanizacije u vodoprivredi: Analiza stanja i perspektive razvoja. Traktori i pogonske mašine, 21(4), 1–116
4. Vodoprivredno privredno društvo Erozija Niš. (n.d.). *Objekti i tehnička opremljenost*. https://erozija-nis.rs/objekti-i-tehnicka-opremljenost
5. Holt, G. D., & Edwards, D. J. (2015). Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors. *International Journal of Productivity and Performance* Management, 64(6), 853–869. https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2014-0026

6. Ivanov, P. & Tsonev, V. (2025). Improving Fuel Efficiency of Crawler Excavator VOLVO EC300EL with Hybrid System. *Proceedings of the Technical University of Sofia, 75*(2). https://doi.org/10.47978/TUS.2025.75.02.001
7. Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2011). Impact of bulldozer's engine load factor on fuel consumption, CO_2 emission and cost. *American Journal of EnvironmentalSciences, 7*(2), 125–131. https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.125.131
8. Klanfar, M., Korman, T., & Kujundžić, T. (2016). Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone. Tehnički vjesnik, 23(1), 163–169. https://doi.org/10.17559/TV-20141027115647
9. Komatsu Ltd. (2019). *Specifications & application handbook* (32nd ed.). https://gams.net.au/wp-content/uploads/2022/06/Komatsu-Performance-Handbook.pdf
10. Kowalski, J., Lendo-Siwicka, M., Wrzesiński, G., & Trach, R. (2023). Verification of performance standards for construction equipment in terms of CO_2 emissions. *Sustainability, 15*(21), 15188. https://doi.org/10.3390/su152115188
11. Oljača, M. V., Raičević, D. M., & Gligorević, K. B. (2016). *Mehanizacija u melioracijama zemljišta* (2. dopunjeno izd.). Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu.
12. Vodoprivredno privredno društvo Regulacije d.o.o. (n.d.) *Zašto mi*. https://regulacije.rs/zasto-mi/
13. Trani, M. L., Bossi, B., Gangolells, M., & Casals, M. (2016). Predicting fuel energy consumption during earthworks. *Journal of Cleaner Production, 112*, 3798–3809. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.027
14. Vodoprivredno društvo „Sibnica" d.o.o. (2006). Izveštaj o poslovanju za 2026. godinu chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sibnica.co.rs/upl///Izve%C5%A1taj%20o%20poslovanju%2001.01.-31.03.2026.pdf
15. Vodoprivredno privredno društvo „Galovica" d.o.o. Beograd (2026). *Izveštaj o poslovanju od 01.01. do 30.06.2026***.** https://regulacije.rs/zasto-mi/
16. Vodoprivredno privredno društvo „Hidrosrem" d.o.o. (n.d.). *Mehanizacija***.** https://hidrosrem.rs/mehanizacija/
17. Vulević, T., Dragović, N., Šoškić, T., & Todosijević, M. (2021). Racionalni izbor mehanizacije za izvođenje zemljanih radova kod uređenja bujičnih slivova na primeru Petrovačkog potoka. *Erozija*, *47*, 59-72. https://doi.org/10.5937/erozija2147059V
18. Zdravković, J., Vulević, T., Dragović, N., & Baumgertel, A. (2025). Primena mehanizacije u eksploataciji i rekultivaciji površinskog kopa Kolubara. *Erozija, 51*, 49–64. https://doi.org/10.5937/erozija2551049Z
19. Dragović, N. (2011). Mehanizacija u protiverozionim radovima. Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet
20. Jugokop-Podrinje d.o.o. (n.d.). *Pregled mehanizacije i opreme*. https://www.jugokop.com/download.html?utm_source=chatgpt.com

DOI: 10.5937/eroz52-72605 ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER

PRESENT STATE OF PROTECTIVE FOREST BELTS (PFBS) AND THEIR POTENTIAL FOR ENHANCING EUROVELO CYCLING ROUTES IN VOJVODINA

POSTOJEĆE STANJE ŠUMSKIH ZAŠTITNIH POJASEVA I NJIHOV POTENCIJAL ZA UNAPREĐENJE EUROVELO BICIKLISTIČKIH RUTA U VOJVODINI

Aleksandar Baumgertel [1]*[1], Sara Lukić [1], Dule Karavesović[2]

[1] University of Belgrade – Faculty of Forestry, Department of Ecological Engineering for Soil and Water Resources Protection, Kneza Višeslava 1, Belgrade, Serbia
[2] KK Partizan, Humska 1, Belgrade, Serbia

Received: 02.09.2026 / ***Reviewed:*** 14.09.2026 / ***Accepted:*** 09.10.2026

ABSTRACT

Vojvodina is characterized by low forest cover, intensive agricultural production, and extensive areas exposed to wind erosion. Protective Forest Belts (PFBs) are a multifunctional nature-based solution that can contribute to soil protection, microclimate regulation, biodiversity conservation, and landscape enhancement. This study assessed the current spatial distribution of PFBs and their potential for improving cycling conditions along EuroVelo Routes 6, 11, and 13 in Vojvodina. Spatial datasets on PFBs and EuroVelo routes were processed in a GIS environment. Euclidean distance analysis and zonal statistics were applied to determine the proximity of each route to existing PFBs. The results revealed a highly uneven distribution of PFBs, with the highest concentration in the northwestern part of Vojvodina and extensive areas with limited or no PFBs coverage in the central and southern parts of the province. All three EuroVelo routes contained sections directly adjacent to PFBs. The lowest mean distance from existing PFBs was recorded for EuroVelo Route 11 (8.942 m), followed by Route 13 (9.076 m), whereas the greatest mean distance was observed for Route 6 (12.458 m). The establishment of new PFBs along priority sections of the EuroVelo network could reduce cyclists' exposure to wind and direct solar radiation while improving landscape attractiveness and ecological connectivity. Integrating PFBs into future afforestation, green infrastructure, and cycling development strategies could therefore support sustainable tourism and provide broader environmental benefits in Vojvodina.

Keywords: Windbreaks, shelterbelts, ecosystem services, recreation, cycling, EuroVelo

APSTRAKT

Vojvodinu karakterišu niska šumovitost, intenzivna poljoprivredna proizvodnja i velike površine izložene eolskoj eroziji. Šumski zaštitni pojasevi (ŠZP) predstavljaju

[1] Aleksandar Baumgertel, email: aleksandar.baumgertel@sfb.bg.ac.rs, ORCID ID 0000-0002-8448-0261, Sara Lukić ORCID ID 0000-0003-4653-9717

multifunkcionalno rešenje zasnovano na prirodi koje može značajno doprineti zaštiti zemljišta, regulisanju mikroklime, očuvanju biodiverziteta i unapređenju pejzažnih vrednosti. Cilj ovog istraživanja je da se procene postojeća prostorna rasprostranjenost ŠZP i njihov potencijal za unapređenje uslova za biciklizam duž EuroVelo ruta 6, 11 i 13 na području Vojvodine. Prostorni podaci o ŠZP i EuroVelo rutama obrađeni su u GIS okruženju. Analiza Euklidskog rastojanja i zonska statistika primenjene su radi utvrđivanja udaljenosti pojedinačnih ruta od postojećih ŠZP. Rezultati su pokazali izrazito neravnomernu prostornu raspodelu ŠZP, sa najvećom koncentracijom u severozapadnom delu Vojvodine, dok su u centralnim i južnim delovima zastupljene velike površine sa malom zastupljenošću ili potpunim odsustvom ŠZP. Na sve tri analizirane EuroVelo rute identifikovane su deonice koje se nalaze neposredno uz postojeće ŠZP. Najmanja prosečna udaljenost od postojećih ŠZP utvrđena je za EuroVelo rutu 11 (8.942 m), zatim za rutu 13 (9.076 m), dok je najveća prosečna udaljenost zabeležena za rutu 6 (12.458 m). Uspostavljanje novih ŠZP duž prioritetnih deonica EuroVelo mreže moglo bi doprineti smanjenju izloženosti biciklista vetru i direktnom sunčevom zračenju, uz istovremeno povećanje atraktivnosti pejzaža i unapređenje ekološke povezanosti. Integrisanje ŠZP u buduće strategije pošumljavanja, razvoja zelene infrastrukture i biciklističke mreže moglo bi doprineti razvoju održivog turizma, uz ostvarivanje širih ekoloških koristi na području Vojvodine.

Ključne reči: vetrozaštitni pojasevi, poljezaštitni pojasevi, usluge ekosistema, rekreacija, biciklizam, EuroVelo

INTRODUCTION

The presence of green spaces in the surrounding environment can have a positive impact on various components of the ecosystem and human well-being (Tzoulas et al., 2007). These benefits include improved air quality, reduced air temperature, lower stress levels, and enhanced public health. In this way, vegetation indirectly creates favorable conditions for a wide range of outdoor recreational and sports activities, such as running, cycling, and team sports. Therefore, the strategic conservation of existing green spaces and the establishment of new ones are essential for enhancing their recreational function and encouraging their active use by the people.

The Protective Forest Belts PFBs are multifunctional landscape elements that provide a wide range of ecosystem services (Xie et al., 2018). Their primary function is the protection of soil against wind erosion; however, they also improve local microclimatic conditions by regulating air temperature and evapotranspiration (Baumgertel et al., 2026). In addition, they contribute significantly to climate change mitigation by sequestering and storing atmospheric carbon dioxide in both biomass and soil (Lukić et al., 2018, Belanović Simić et al., 2024). Beyond these ecological functions, PFBs also have an important recreational value, providing attractive spaces for recreation (Smith et al., 2021). Since PFBs are commonly established along roads, they can represent an important natural element for improving conditions for cycling and other sports and recreational activities. By reducing wind speed, moderating temperature extremes, and creating a more comfortable microclimate, they enhance both the comfort and safety of cyclists. Examples of such practices can be found across various parts of Europe (Figure 1).

Vojvodina is characterized by a very low forest cover and intensive agricultural production, making it highly vulnerable to wind erosion processes both under current conditions and in the context of future climate change (Baumgertel et al., 2019, Baumgertel et al., 2022). Three EuroVelo cycling routes pass through its territory, offering considerable potential for the

development of sustainable tourism and outdoor recreation. The aim of this study is to identify areas suitable for the potential establishment of new PFBs based on the analysis of their existing spatial distribution and distance from the EuroVelo routes. The results may provide valuable support for decision-makers in planning and implementing future PFBs, with the objectives of improving cycling conditions, protecting soil resources, and enhancing green infrastructure.



Figure 1. Examples of cycling routes in Germany, France, and Italy (sources: https://www.cyclomundo.com/cycling-tours/beaujolais-cycling-6-days-102.html, https://graveloo.com/, https://www.bikemap.net/en/l/2921044/

Slika 1. Primeri biciklističkih ruta u Nemačkoj, Francuskoj i Italiji (izvori: https://www.cyclomundo.com/cycling-tours/beaujolais-cycling-6-days-102.html, https://graveloo.com/, https://www.bikemap.net/en/l/2921044/)

MATERIAL AND METHOD

General Characteristics of the Study Area

Vojvodina is an autonomous province located in the northernmost part of the Republic of Serbia and represents an important economic region (Figure 2). The landscape is dominated by intensive agricultural production, while woody vegetation (forests) is largely absent. Vojvodina plays a key role in Serbia's transport infrastructure, as three Pan-European transport corridors pass through its territory. Three EuroVelo cycling routes (6, 11, and 13) also traverse the province (Figure 4).



Figure 2. Research area
Slika 2. Istraživano područje

To create a raster representing the distance from PFBs, the Euclidean Distance tool was applied (Figure 3), with a spatial resolution of 500 × 500 m (pixel). Using the Zonal Statistics tool, the minimum, maximum and mean values of the Euclidean distance raster were calculated for each EuroVelo route. The mean distance was calculated by averaging the Euclidean distance values of all raster cells corresponding to each EuroVelo route. All spatial analyses were performed using ArcMap (Esri, Redlands, CA, USA) in the WGS 1984 UTM Zone 34N coordinate system.

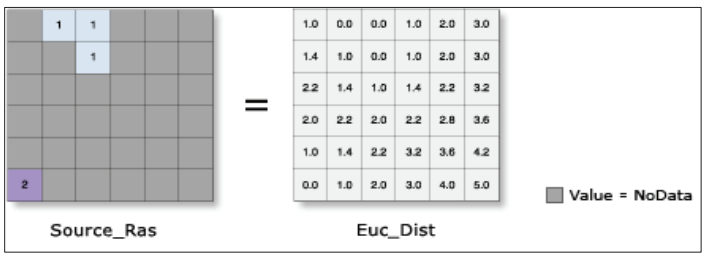


Figure 3. The Euclidian distance workflow
(source: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/euclidean-distance.htm)

Slika 3. Postupak analize Euklidskog rastojanja
(izvor: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/euclidean-distance.htm)

In this study, spatial data of the EuroVelo cycling route network and the spatial distribution of PFBs in Vojvodina were used. All datasets used in this study are freely accessible. The EuroVelo route data were obtained from the official EuroVelo database, while the PFBs data

included belts identified and inventoried within the framework of the international AGFORWEB project, implemented from 2022 to 2024. Information on the datasets used in this research, including the data type and source, is presented in Table 1.

Table 1. Description of the input datasets
Tabela 1. Opis ulaznih podataka

Data	Type	Source
EuroVello routes database	Shapefile	https://en.eurovelo.com/news/2022-07-25_you-can-now-download-eurovelo-routes-and-stages-as-gpx-tracks
PFBs database		https://agforweb.org/wp-content/uploads/2024/10/AGFORWEB_DigitalDatabase2.xlsx

RESULTS

According to the digital database of the AGFORWEB project, there are 283 PFBs in Vojvodina (Figure 4), with a total length of 332 km. The highest concentration of PFBs is found in the northwestern part of Vojvodina, particularly within the territory of the City of Sombor, where 73 PFBs have been recorded, with a total length of 110.95 km. All three EuroVelo routes crossing Vojvodina—EuroVelo 6, EuroVelo 11, and EuroVelo 13—enter the territory of Serbia through the northern border of Vojvodina and continue southeast toward Romania (Figure 4).

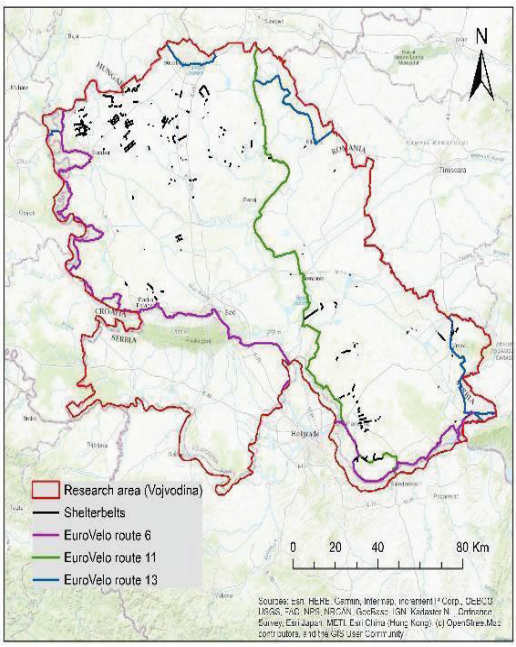


Figure 4. Map of the EuroVelo routes and PFBs in the Vojvodina
Slika 4. Karta EuroVelo ruta i šumskih zaštitnih pojaseva u Vojvodini

The results of the distance analysis between raster pixels and PFBs across the entire territory of Vojvodina are presented in Figure 5. The map clearly shows that extensive areas of Vojvodina are located at considerable distances from PFBs, with these areas being most prevalent in the southern part of the study area.

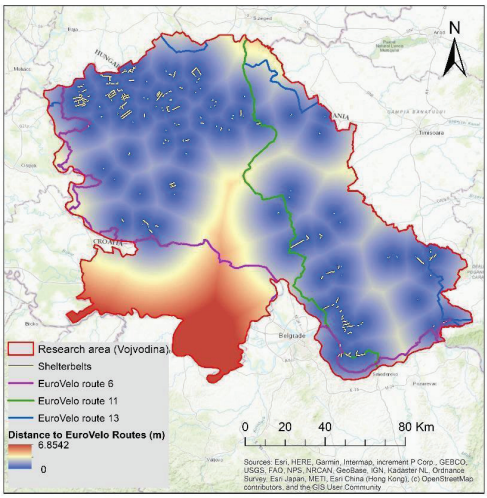


Figure 5. Euclidean distance raster showing the distance of each pixel from the nearest PFB

Slika 5. Raster koji prikazuje udaljenost svakog piksela od najbližeg ŠZP

When considering the individual EuroVelo routes and their proximity to PFBs, the results are presented in Table 2. All EuroVelo routes include sections where PFBs are located directly adjacent to the route (minimum distance - MIN = 0 m). The greatest mean distance between the routes and PFBs was recorded for EuroVelo Route 6, amounting to around 12 km, followed by EuroVelo Route 13 and 11 with around 9 km.. The relatively high standard deviation (around 9 km) observed for Route 6 reflects a heterogeneous spatial distribution of PFBs, with alternating sections characterized by very high and very low proximity (Figure 5). Conversely, the lower standard deviation of Route 13 (around 5 km) suggests a more even distribution of PFBs relative to the cycling route.

Table 2. Distance statistics (m) between the EuroVelo routes and PFBs.

Tabela 2. Udaljenost (m) između EuroVelo ruta i šumskih zaštitnih pojaseva

EuroVelo route	Min (m)	Max (m)	Mean ± St.dev (m)
6	0	35.693	12.458 ± 9.125
11	0	26.767	8.942 ± 6.736
13	0	24.000	9.076 ± 5.441

DISCUSION

Forest cover in Vojvodina is considerably lower than the European average of 39% (Eurostat, 2021). As Vojvodina is predominantly an intensively cultivated agricultural region, the integration of tree components into the landscape through agroforestry practices represents an effective land management approach (Mbow et al., 2014). Within agroforestry systems, PFBs represent one of the established agroforestry practices (Baumhardt & Blanco-Canqui, 2013).

The PFBs can provide benefits that extend beyond their traditional role in controlling wind erosion. The results of this study indicate that only a limited number of PFBs are currently located adjacent to the EuroVelo routes in Vojvodina (Table 2). The establishment of PFBs on both sides of the cycling routes (Figure 6) could substantially improve riding conditions. By reducing wind speed and limiting cyclists' exposure to direct solar radiation, such belts could enhance thermal comfort and contribute to a safer, more pleasant, and overall more enjoyable cycling experience (Lusk et al., 2020).



Figure 6. Principle of the protective forest belt's effect on driving conditions (Source: Kalozi, 2022).

Slika 6. Princip delovanja šumskog zaštitnog pojasa na uslove vožnje (izvor: Kalozi, 2022)

Suitable locations for establishing PFBs were identified in the central part of the study area. In this area, PFBs are absent not only along EuroVelo Route 6 but also throughout the surrounding agricultural landscape (Figure 5). Establishing PFBs in these areas could improve cycling conditions while simultaneously increasing the visual attractiveness of the landscape. This is consistent with the EuroVelo Route Development Guide (Bodor et al., 2011), which emphasizes that cycling routes should pass through visually appealing landscapes and points of interest, including protected natural areas, cultural heritage sites, and other attractions, in order to enhance the overall cycling tourism experience.

This approach is consistent with the broader development of cycling infrastructure in Vojvodina. Bogdanović et al. (2016), in their study of the regional cycling route in Srem and

its connection with EuroVelo Route 6, emphasized the importance of existing infrastructure and identifying suitable locations for rest areas and supporting services. In this context, PFBs established along cycling routes and around associated rest areas could provide additional environmental and landscape benefits.

Moreover, PFBs could serve as ecological corridors, a function also recognized within the Draft Regional Spatial Plan of the Autonomous Province of Vojvodina (2022). This potential is particularly relevant in the context of the EuroVelo network, as previous research has proposed the development of greenways along EuroVelo Route 6 as a means of connecting the natural heritage and protected areas of Vojvodina (Kalozi, 2022). Therefore, integrating PFBs into the EuroVelo network could contribute not only to improving cycling conditions but also to strengthening ecological connectivity among protected and other ecologically important areas along the routes, thereby supporting the wider regional ecological network. The areas proposed for the potential establishment of new PFBs were identified based on spatial analysis; however, the selection of specific locations would require further site-specific assessment of the environmental, spatial, and other relevant conditions for their establishment.

Consequently, decision-makers at national, provincial, and local levels should consider the strategic establishment of PFBs along EuroVelo routes as part of future afforestation and green infrastructure development programs. Such an approach would contribute not only to improving cycling conditions but also to achieving broader sustainability objectives related to climate adaptation, biodiversity conservation, ecosystem restoration, and the promotion of active and healthy lifestyles.

CONCLUSION

This study showed that PFBs are unevenly distributed across Vojvodina and that large sections of the EuroVelo network are located far from existing belts. EuroVelo Route 6 had the greatest mean distance from PFBs. Priority for the establishment of new PFBs should be given to central parts of the study area, where they are absent both along the routes and in the surrounding agricultural landscape. Their establishment could improve cycling conditions by reducing wind exposure and providing shade, while also enhancing landscape quality, ecological connectivity, and protection against wind erosion. PFBs should therefore be integrated into future afforestation, green infrastructure, and cycling development plans in Vojvodina.

Acknowledgments

This research was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, under Grant No. 451-03-34/2026-03/200169 and Contract No. 451-03-33/2026-03/200169. For English language editing and proofreading, ChatGPT was used to improve the grammar, clarity, and readability of the manuscript.

LITERATURE

1. Baumgertel, A., Lukić, S., Belanović Simić, S., & Kadović, R. (2019). *Identifying areas sensitive to wind erosion—A case study of the AP Vojvodina (Serbia).* Applied Sciences, 9(23), 5106. https://doi.org/10.3390/app9235106

2. Baumgertel, A., Lukić, S., Čaković Milosavljević, M., Miljković, P., Tošić, M., Lazić, I., Đurđević, V., & Marković, M. (2022). *Spatiotemporal analysis of the future sensitivity to wind erosion using ensemble of the regional climate models: A case study*. International Journal of Global Warming, 27(3), 284–299. https://doi.org/10.1504/IJGW.2022.124203
3. Baumgertel, A., Lukić, S., Miljković, P., Caković Milosavljević, M., Miletić, S., Živanović, N., & Belanović Simić, S. (2026). *Impact of PFBs (PFBs) on wind reduction, microclimate, and soil properties*. *South-east European Forestry, 17*(1), Article 26009. https://doi.org/10.15177/seefor.26-009
4. Baumhardt, R. L., & Blanco-Canqui, H. (2013). Soil: Conservation practices. In B. A. Stewart (Ed.), Encyclopedia of agriculture and food systems (Vol. 5, pp. 303–315). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00091-7
5. Belanović-Simić, S., Miljković, P., Baumgertel, A., Beloica, J., Ninkov, J., Vasin, J., & Lukić, S. (2024). Značaj šumskih zaštitnih pojaseva za regeneraciju zemljišta. Glasnik Šumarskog fakulteta, 130, 67–80. https://doi.org/10.2298/GSF2430067B
6. Bodor, Á., Lancaster, E., Insall, P., Larsen, J. E., Thomé, C., & Stadtherr, L. (2011). EuroVelo guidance on the route development process. European Cyclists' Federation (ECF).
7. Bogdanović, V., Basarić, V., Ruškić, N., & Garunović, N. (2016). Study of the establishment of the regional cycling route Srem. Transportation Research Procedia, 14, 2334–2343. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.259
8. Esri. (2016). ArcGIS Desktop 10.4 [Computer software]. Environmental Systems Research Institute.
9. Eurostat. (2021). International Day of Forests. European Commission. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20210321-1
10. Kalozi, O. Z. (2022). *Connecting natural heritage in Vojvodina Province (Republic of Serbia) with the EuroVelo 6 route via greenways*. Proceedings of the Fábos Conference on Landscape and Greenway Planning*, 7*(1), Article 48. https://doi.org/10.7275/j5b8-q310
11. Lukić, S., Belanović Simić, S., Pantić, D., Beloica, J., Baumgertel, A., Miljković, P., Borota, D., & Kadović, R. (2018). *Carbon storage in shelterbelts in the agroforestry systems of the Bačka Palanka area (Serbia).* AGROFOR International Journal, 3(2), 80–90. https://doi.org/10.7251/AGRENG1802080L
12. Lusk, A. C., Ferreira da Silva Filho, D., & Dobbert, L. (2020). Pedestrian and cyclist preferences for tree locations by sidewalks and cycle tracks and associated benefits: Worldwide implications from a study in Boston, MA. Cities, 106, 102111. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.024
13. Mbow C, Smith P, Skole D, Duguma L, & Bustamante M. (2014). Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. Current Opinion in Environmental Sustainability 6: 8-14.
14. Public Enterprise Institute for Urban Planning of Vojvodina. (2022). *Draft Regional Spatial Plan of the Autonomous Province of Vojvodina 2021–2035*. https://www.ekourbapv.vojvodina.gov.rs/sr/javni-uvid-u-nacrt-regionalnog-prostornog-plana-autonomne-pokrajine-vojvodine-od-2021-do-2035-godine-i-izvestaj-o-strateskoj-proceni-uticaja-regionalnog-prostornog-plana-autonomne-pokrajine-vojvodin/
15. Smith, M. M., Bentrup, G., Kellerman, T., MacFarland, K., Straight, R., & Ameyaw, L. (2021). *Windbreaks in the United States: A systematic review of producer-reported benefits, challenges, management activities and drivers of adoption*. Agricultural Systems, 187, 103032. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103032
16. Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V. J., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green

Infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning, 81(3), 167–178. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

17. Xie, H., Wang, G. G., & Yu, M. (2018). Ecosystem multifunctionality is highly related to the shelterbelt structure and plant species diversity in mixed shelterbelts of eastern China. *Global Ecology and Conservation, 16*, e00470. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00470

DOI:10.5937/eroz52-72601 ПРЕГЛЕДНИ РАД

ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ПРИМЕНА БИОТЕХНИЧКИХ РАДОВА У ЗАШТИТИ ОД ЕРОЗИЈЕ ЗЕМЉИШТА

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIOTECHNICAL MEASURES FOR SOIL EROSION CONTROL

Стефановић Милутин[1*], Стефановић Ирина[1], Ђорђе Живановић

[1]Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ д.о.о.

Примљен: 21.08.2026. / ***Рецензиран:*** 21.09.2026. / ***Прихваћен:*** 06.10.2026

АПСТРАКТ

Биотехнички радови представљају синергију инжењерских техника и природних вегетационих система. Њихов примарни циљ је стабилизација земљишта, смањење површинског отицања воде и спречавање ерозионих процеса.

На основу анализе доступне литературе размотрени су основни елементи поступка пројектовања, укључујући анализу ерозионог проблема, дефинисање функције објекта, избор типа конструкције, одређивање њеног положаја и распореда, избор конструктивних и биљних елемената, начин извођења и потребе за одржавањем. Приказани су основни типови биотехничких конструктивних решења, са посебним освртом на плетере, гарнисаже, слојеве живог грања и њихову комбинацију са другим мерама заштите од ерозије. Кроз примере пројектовања и примене на подручју Текије и у сливу акумулације Бусур приказане су могућности примене ових решења у различитим условима.

У раду није вршена квантитативна оцена ефеката примењених мера, већ су разматрани принципи пројектовања, конструктивна решења и услови њихове примене. Посебно је указано на значај прилагођавања избора и распореда биотехничких радова условима конкретне локације, као и на потребу за праћењем стања конструктивних елемената и развоја вегетације након извођења. Циљ рада је систематизација основних принципа примене и пројектовања биотехничких радова у заштити од ерозије земљишта, као и приказ начина њиховог укључивања у мере заштите од ерозије на конкретним подручјима.

Кључне речи: биотехнички радови, биоинжењеринг земљишта, стабилизација косина, бујични сливови, плетери

[1]* Милутин Стефановић, email: milutin.stefanovic@jcerni.rs, ORCID ID: 0009-0002-6200-9839; Ирина Стефановић ORCID ID: 0000-0002-2681-223X

ABSTRACT

Biotechnical works represent a synergy between engineering techniques and natural vegetation systems., The primary goal of this approach is soil stabilization, the reduction of surface runoff, and the prevention of erosion processes.

Based on an analysis of available literature, the paper examines the fundamental elements of the design process, including the analysis of the erosion problem, the definition of the structure's function, the selection of the structural type, the determination of its location and layout, the choice of structural and vegetative components, construction methods, and maintenance requirements. Basic types of biotechnical structural solutions are presented, with particular emphasis on wattle fences, brush layers, and live branch layers, as well as their combination with other erosion control measures. Examples of design and implementation in Tekija and Busur reservoir catchment illustrate the potential for applying these solutions under various conditions.

The paper does not provide a quantitative assessment of the effects of the implemented measures, it focuses on design principles, structural solutions, and the conditions for their application. Particular attention is drawn to the importance of tailoring the selection and layout of biotechnical works to the specific site conditions, as well as the need to monitor the condition of structural elements and vegetation development following implementation. The aim of this paper is to systematize the fundamental principles of applying and designing biotechnical measures for soil erosion control, as well as to outline how these measures can be integrated into erosion protection strategies for specific areas.

Keywords: biotechnical works, soil bioengineering, slope stabilization, torrent watersheds, wattle fences

УВОД

Ерозија земљишта представља један од значајних процеса деградације земљишних ресурса, нарочито на подручјима израженог рељефа, где нагиб терена, карактеристике земљишта, режим падавина, начин коришћења простора и стање вегетационог покривача могу значајно утицати на интензитет ерозионих процеса (Костадинов, 2022). Поред губитка површинског слоја земљишта, ерозија доприноси повећању продукције и транспорта наноса, дестабилизацији падина и косина, угрожавању водотокова и акумулација, као и оштећењу инфраструктуре и других објеката. Због тога заштита од ерозије захтева примену одговарајућих мера које се бирају у зависности од природних, хидролошких, геотехничких и антропогених услова конкретног подручја.

У систему заштите од ерозије примењују се техничке, биолошке и биотехничке мере (Gavrilović, 1972, Kostadinov, 1996). Техничке мере обухватају различите врсте грађевинских радова у кориту бујичног водотока којима се непосредно утиче на кретање воде и наноса, стабилност терена и услове одвијања ерозионих процеса. Биолошке мере заснивају се првенствено на успостављању и одржавању вегетационог покривача, најчешће пошумљавањем и затрављивањем. Биотехнички радови представљају радове у којима се својства живог биљног материјала користе у комбинацији са одговарајућим природним материјалима или лаким конструктивним елементима, са циљем заштите земљишта, смањења површинског отицања, контроле ерозије и повећања стабилности површинских слојева терена.

Овакав начин дефинисања биотехничких радова је уобичајен у домаћој литератури у области заштите земљишта од ерозије. Важно је у самој терминологији разграничити појам биотехнички радови и биоинжењеринг земљишта који је заступљен у страној литератури (soil bioengineering). Биотехнички радови представљају шири појам јер комбинују биљни материјал са другим природним материјалима. Биоинжењеринг земљишта је ужи, прецизнији појам и представља радове у којима су саме биљке конструктивни материјал. У оваквој подели би се могло рећи да је биоинжењеринг земљишта подтип биотехничких радова.

Примена биотехничких радова има дугу традицију у заштити од ерозије и бујичних подручја у Србији, где су различита решења примењивана у оквиру радова на уређењу сливова, стабилизацији ерозионих жаришта и заштити земљишта и водотока (Kostadinov et al. 2013, 2016). Искуства домаће праксе, заједно са савременим приступима развијеним у другим земљама, представљају значајну основу за сагледавање могућности примене и пројектовања ових радова. За разлику од масивних бетонских зидова, овај приступ је еколошки повољнији, јефтинији и временом постаје све јачи како се развија коренски систем биљака. Вегетација у биотехничким радовима не служи само као естетски додатак, већ делује као активни структурални елемент који механички повећава отпорност тла на смицање и хидраулички регулише влажност земљишта (Gray and Sotir, 1996).

Имајући у виду различитост услова у којима се биотехнички радови примењују, њихово пројектовање захтева повезивање више области: заштиту од ерозије и бујичних токова, хидрологију, хидраулику, геотехнику, познавања вегетације и искустава из реализованих пројеката. У том контексту, циљ овог рада је да се систематизују основни принципи пројектовања и примене биотехничких радова у заштити од ерозије земљишта, са посебним осртом на поједине типове биотехничких грађевина, услове њихове примене, начин извођења и могућност комбиновања са техничким и биолошким мерама.

ИСТОРИЈСКИ ПРЕГЛЕД ПРИМЕНЕ БИОТЕХНИЧКИХ РАДОВА У СРБИЈИ

За почетак систематских радова на сузбијању штетних последица од ерозије земљишта и бујичних токова на подручју Србије сматра се 1907. године када су извођени радови на уређењу бујичних токова у Грделичкој клисури ради заштите железничке пруге Београд-Скопље-Атина (Kostadinov, 2007). Систематски приступ уређењу бујичних сливова почео је 1928. године, радовима на уређењу бујичног тока Калиманска река у Владичином Хану. На уређењу овог бујичног тока извођени су, поред техничких, и у великом обиму биотехники и биолошки радови. Тада је први пут у Србији од биотехничких радова изведоно: пошумљавање на градонима и контурним рововима, подизање воћњака на терасама и др. Радови на уређењу бујичних токова у том периоду рађени су и у сливу реке Нишаве.

До 1930. године служба за уређење бујичних токова била је у оквиру Хидротехничког одељења Министарства грађевина. Године 1930. године донет је Закон о уређењу бујица којим је формиран самосталан Шумско-технички одсек за уређење бујица у оквиру Министарства шума и руда и банских управа. Све до почетка рата 1941. године радови су извођени углавном ради заштите железничке пруге.

Након II светског рата, 1948. године због обилних киша активирали су се многи бујични токови у Грделичкој клисури и својим катастрофалним поплавама нанели огромне штете, пре свега, двема међународним саобраћајницама - железничкој прузи и путу. Саобраћај је био обустављен на прузи Београд-Скопље-Атина и скоро месец дана на међународном путу. Због великих штета од ерозије и бујичних токова, Влада НР Србије доноси 1949. године посебну Одлуку о непосредним задацима на обнови и пошумљавању подручја која су угрожена од ерозије и бујица. 1950. године формирана је Управа за уређење бујица и грађевинску делатност при министарству шумарства. 1948. године формирана је Реонска секција „Ерозија“ у Нишу а 1953. „Ерозија“ у Владичином Хану и почели су обимни радови на уређењу бујичних токова у Грделичкој клисури и Врањској котлини, односно у јужној и источној Србији.

Најзначајнији закон који је уређивао област заштите од ерозије и уређење бујица после Другог светског рата је Закон о заштити земљишта и уређењу бујица донесен 1954. године. Овај Закон је поново донесен 1960. али је укинут 1965. године због усаглашавања са новим Уставом Републике Србије (Драговић и сар., 2007). Од тог периода до данас, област заштите од ерозије и уређење бујица је регулисано Законом о водама и малим делом неким другим законским актима (Закон о пољопривредном земљишту, Закон о ванредним ситуацијама, Закон о шумама и др.). Законом о водама Србије донесеним 1967. године финансирање радова у области заштите земљишта од ерозије и уређења бујичних сливова, односно организација пословања у овој области потпуно прелази у оквир водопривреде.

Највећи обим радова на заштити од ерозије и уређењу бујица био је у периоду 1954-1965. Интензитет радова након тог периода опада, да би дошло до повећања 1977. и 1978. године, када су добијена значајна средства од Зајма за аутопут и водопривреду 1977. године. Након тога, обим радова се смањује до 1990. године, да би се у периоду од 1991. до 2001. свео на минимум због економске и политичке сутуације у нашој држави. Већа улагања у противерозионе радове са различитим интензитетом била су у периоду од 2001. до 2011. да би након тога поново смањена. Значајна промена у организовању и финансирању радова на заштити од ерозије у уређењу бујица настала је доношењем Закона о водама 2010. године. Одредбама овог Закона, уређење и заштита водотока II реда (бујични водотоци) је у надлежности јединице локалне самоуправе, које често немају организационе, стручне и финансијске капацитета за његово спровођење (Драговић & Вулевић, 2022).

Протеклих деценија евидентно је смањење улагања у заштиту од вода, у изградњу нових и одржавање постојећих објеката, што је један од разлога да су поплаве које су се десиле 2014. године имале тако катастрофалне последице (Dragović & Ristić, 2013). После усвајања закона о водама 2010. финансирање радова за заштиту од ерозије и уређење бујица је, не само смањено, него и непрепознатљиво у финансијским извештајима ЈВП „Србијаводе“. У ранијим извештајима мого се видети колика су улагања, у оквиру ове области, за грађевинско-техничке радове, биотехничке радове и биолошке радове. Средства за биотехничке радове се не опредељују од 2008. године а за биолошке радове су годинама уназад значајно смањивана.

Почев од 1907.г., па све до данашњих дана није било прекида, (чак су и неки мањи радови извршени за време II светског рата) у извођењу радова на уређењу бујичних токова и заштити земљишта од ерозије. Међутим, врста, интензитет, односно обим ових изведених радова, осцилирао је зависно од економске и политичке ситуације и свести доносиоца одлука о значају извођења радова за превентивцију од бујичних поплава.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Методолошки приступ

Рад је заснован на прегледу релевантне литературе и доступне пројектне и стручне документације о биотехничким радовима у заштити од ерозије земљишта. Анализом доступних извора обухваћени су принципи примене и пројектовања биотехничких радова, њихова конструктивна решења, услови примене, као и могућности њиховог комбиновања са техничким мерама.

Приказани материјал обухвата, како опште принципе примене биотехничких радова, тако и практична решења из домаће стручне праксе.

Анализа пројектних примера

У раду су анализирана два одабрана пројекта биотехничких радова. За сваки пример разматрани су услови на подручју примене, предмет и циљ пројекта, пројектовани типови биотехничких радова, њихова диспозиција, основни конструктивни елементи, начин извођења и комбиновање са другим мерама.

Пројектни примери су изабрани са циљем да се прикажу различити услови примене и начини пројектовања биотехничких радова. Њихова улога у раду није статистичко поређење различитих решења, већ приказ начина на који се, у конкретним условима, избор биотехничких мера прилагођава карактеристикама терена и идентификованим ерозионим процесима.

Ограничење анализе

Рад не обухвата квантитативну процену ефеката изведених биотехничких радова, јер за приказане локалитете нису били доступни подаци систематског дугорочног мониторинга пре и након извођења радова.

Стога се приказани пројектни примери користе за анализу начина пројектовања, конструктивних решења и подручја примене биотехничких радова, а не за доказивање ефикасности појединачних мера.

МЕТОДОЛОШКИ ПРИСТУП ПРОЈЕКТОВАЊУ БИОТЕХНИЧКИХ РАДОВА

Пројектовање биотехничких радова представља поступак избора мера којима се, у складу са условима на терену, заустављa интензивирање ерозионих процеса, стабилизују корито и обале водотока, смањује брзина површинског отицања и обезбеђује постепено успостављање вегетационог покривача. За разлику од појединачног избора конструктивног решења, пројектовање подразумева сагледавање међусобне зависности морфолошких, хидролошких, геолошких, педолошких и вегетационих услова на конкретној локацији.

У постојећој пракси биотехнички радови се најчешће примењују као комбинација живог биљног материјала и помоћних, неживих материјала. У почетној фази након изградње биљни материјал још нема развијену функцију, због чега се његова улога допуњује конструктивним елементима који обезбеђују почетну стабилност система. Са развојем вегетације и укорењавањем биљног материјала, биолошка компонента постепено постаје значајнија у функционисању система.

Дефинисање проблема и анализа услова на терену

Први корак у пројектовању је идентификација процеса који угрожавају стабилност терена или корита и одређивање њиховог просторног обухвата. Посебно је потребно разликовати типове ерозионих процеса на падинама слива од процеса ерозије и дестабилизације у кориту и на обалама бујичних токова.

Анализа услова на подручју обухвата сагледавање ерозионих процеса, нагиба и конфигурације терена, карактеристика подлоге и земљишта, стања корита и обала, начина отицања површинских вода и постојећег вегетационог покривача. Код бујичних токова посебан значај имају ширина и нагиб корита, количина и карактер наноса, као и могућност подривања објекта.

Дефинисање функције и циља пројектоване мере

Избор решења се заснива на дефинисаним условима на терену и могућности које одређена биотехничка мера пружа.

Након идентификације проблема дефинише се основна функција биотехничке мере. Она може бити усмерена на стабилизацију косина, стабилизацију дна или обала корита, успоравање течења, задржавање наноса, смањење ерозионог дејства воде или стварање услова за развој вегетације.

Избор врсте биотехничког решења

Избор врсте биотехничких радова се врши на основу дефинисаних услова и потребне функције биотехничке мере. При избору се разматрају расположиви биљни и грађевински материјали, могућност одржавања и потреба за комбинацијом са другим мерама.

Одређивање положаја и распореда објеката

Након дефинисања функције и избора одговарајућег типа биотехничког рада, потребно је одредити његов тачан положај и распоред у оквиру угрожене деонице.

Код попречних конструкција у јаругама и водотоковима посебну пажњу потребно је посветити њиховом уклапању у корито и обале, тако да конструкција обухвати целу ширину профила због учвршћивања у обале. Положај објекта у односу на уздужни профил корита одређује се у складу са његовом функцијом, односно потребом за успоравањем тока, задржавањем наноса, стабилизацијом дна или заштитом угрожених делова корита.

Код система са више објеката њихов распоред треба посматрати као целину, а не као низ независних конструкција. Међусобни положај објеката треба да омогући постепено смањење ерозионог дејства воде и стабилизацију деонице између суседних конструкција. При томе је потребно узети у обзир могућност локалног подривања, преливања, заобилажења воде и концентрације тока између објеката.

При одређивању положаја потребно је узети у обзир и услове извођења, пре свега могућност приступа локацији, допремања и привременог складиштења материјала, као и услове за извођење радова и касније одржавање

Одређивање основних конструктивних елемената и димензија

Основни конструктивни елементи, материјали и димензије биотехничких грађевина морају бити прилагођени условима конкретне локације и функцији објекта.

Посебну пажњу треба посветити обезбеђењу објекта од подривања, испирања и заобилажења воде. Код конструкција у кориту то може подразумевати адекватно уклапање објекта у дно и обале, као и примену додатних материјала низводно.

Избор биљног материјала и начин његове уградње

Избор биљног материјала мора бити повезан са условима станишта и начином примене.

Потребно је одредити врсту и порекло биљног материјала, његове димензије, начин припреме и уградње, као и период извођења. Биолошка компонента не сме се посматрати одвојено од конструктивне, јер њена функција у почетном периоду зависи од правилне уградње и обезбеђивања услова за преживљавање и развој биљака

Фазе извођења, почетна стабилност и одржавање

Код биотехничких радова нарочито је значајно разликовати почетно стање након изградње од стања након успостављања вегетације.

У почетној фази конструктивни елементи преузимају већи део механичког оптерећења, док се са развојем биљног материјала постепено повећава његов допринос стабилизацији. Због тога пројекат треба да предвиди мере које обезбеђују стабилност у периоду док биљке још нису развиле коренов систем и надземну биомасу.

Потребно је предвидети контролу стања објеката након већих падавина и бујичних догађаја, проверу појаве подривања, оштећења конструкције, испирања материјала и стања уграђеног биљног материјала. На основу резултата контроле могу се предвидети поправке или допунски радови.

Основни критеријуми за пројектовање

На основу претходно описаних фаза у пројектовању биотехничких радова, избор биотехничке мере треба разматрати кроз следеће групе услова:

- тип ерозионог процеса – површинска, браздаста, јаружаста или ерозија корита;
- положај у сливу – падина, јаруга, горњи или средњи део бујичног тока и зона уливања у акумулацију;
- нагиб и геометрија терена – дужина и нагиб падине, ширина и дубина корита;
- хидролошки и хидраулички услови – очекивани проток, брзина воде, могућност преливања и поткопавања;
- карактеристике земљишта и подлоге – гранулометријски састав, кохезија, услови влажења и стабилност;
- доступност и особине биљног материјала – врста, способност ожиљавања, прилагођеност локалним условима и време извођења;
- почетна механичка стабилност – потреба за додатним техничким или привременим елементима;

- могућност одржавања и контроле – приступ објекту, контрола након већих падавина, замена оштећених елемената и праћење развоја вегетације.

Овако дефинисани критеријуми представљају основу за пројектантски избор решења. Биотехничке радове не треба посматрати као меру заштите која се примењује независно од услова, већ као део система заштите од ерозије.

ТИПОВИ БИОТЕХНИЧКИХ ГРАЂЕВИНА

У пракси се примењује већи број различитих типова биотехничких грађевина и конструктивних решења. У овом поглављу су приказани плетери, гарнисажи, слојеви живог грања и рустикалне преграде. За сваки од одабраних типова приказани су основна намена, услови примене, конструктивни елементи и начин извођења, уз податке о биљном и другом материјалу који се користи у конкретним решењима.

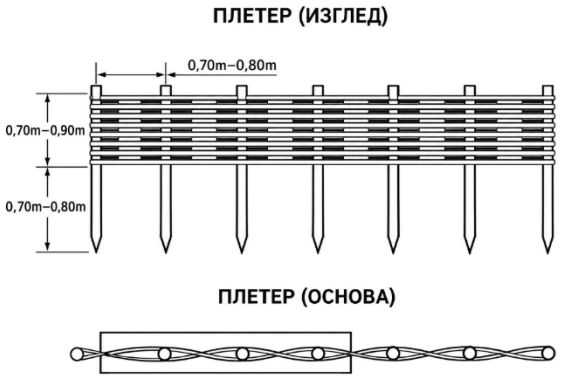
Једноструки и двоструки плетери

Плетери представљају једноставне попречне конструкције од дрвених кољa и савитљивог прућа, које се могу примењивати у јаругама и на падинама изложеним површинској и јаружастој ерозији. Њихова основна функција је успоравање површинског отицања, задржавање еродираног материјала и постепено стабилизовање корита или дела падине. У зависности од услова, могу се изводити као једноструки или двоструки плетери, а у случају употребе живог биљног материјала конструкција временом добија и вегетациону функцију.

Једноструки плетер се формира побијањем кољa у тло и њиховим преплитањем савитљивим гранама. Код живих плетера могу се користити врба, топола, леска, јасен и друге врсте које имају одговарајућу способност ожиљавања и прилагођене су локалним условима. За успешно оживљавање живих елемената важно је да се радови изводе у периоду мировања вегетације, односно у условима када је ризик од исушивања резница минималан.

Према подацима из разматране стручне праксе, код израде живих плетера користи се кољe пречника приближно 8–15 cm и дужине 1,3–1,5 m, док се резнице постављају у дужини од око 30–50 cm. Кољe се поставља у темељну зону конструкције, односно у дно корита и обале, како би се обезбедило његово укрућење. Плот се плете у висину од приближно 20–25 cm, након чега се постављају резнице и врши затрпавање земљом. Поступак се понавља до достизања пројектоване висине конструкције.

За стабилизацију конструкције и спречавање њеног померања под притиском земље, појединa кољa могу се жицом повезати са додатним колцима дубље побијеним у тло иза конструкције. Овакви плетери изводе до висине од око 1 m.

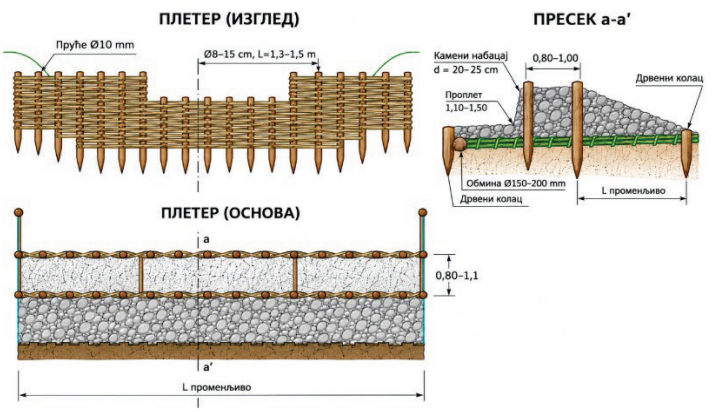


Слика 1. Једноструки плетер (Извор: Пројекат заштите насеља Текија од бујичних вода, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2015)

Figure 1. Single wicker fencing (Source: Designfor the Protection of the Tekija village from Flash Floods, "Jaroslav Černi" Water Institute, 2015)

Двоструки плетер се примењује у условима већег притиска воде и материјала или код ширих корита. Састоји се од два паралелна плетера, при чему се простор између њих испуњава каменом, каменом ситнежи, шљунком или другим расположивим материјалом. Растојање између предњег и задњег плетера у описаном решењу износи око 0,7–1,0 m. Предњи и задњи плетер међусобно се повезују жицом како би се спречило њихово раздвајање током испуне и деловања воде.

Низводно од плетера може се извести камени набачај чија је функција заштита ножице конструкције од поткопавања. Овај елемент је посебно значајан код конструкција постављених у коритима у којима се очекује преливање воде преко објекта.



Слика 2. Двоструки плетер (Извор: Пројекат заштите насеља Текија од бујичних вода, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2015)

Figure 2. Double wicker fencing (Source: Designfor the Protection of the Tekija village from Flash Floods, "Jaroslav Černi" Water Institute, 2015)

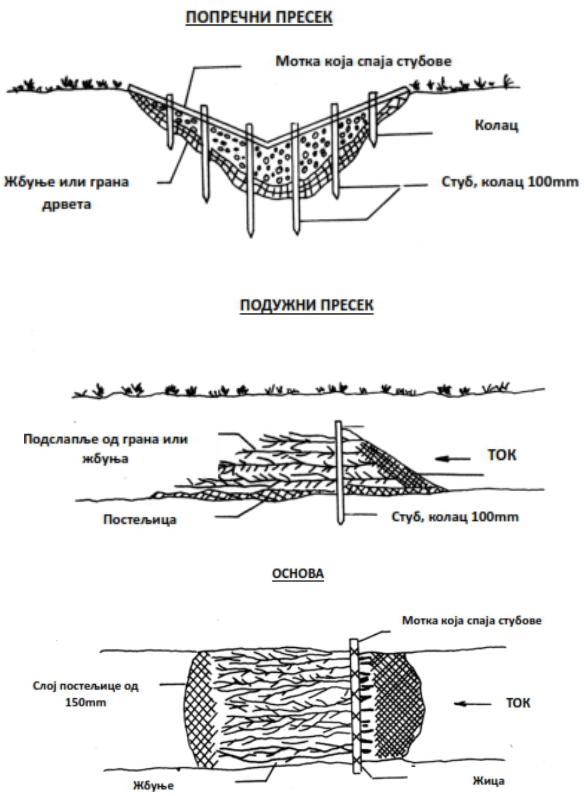
Примена једноструких и двоструких плетера може бити погодна на теренима различитих нагиба, посебно код браздасте и јаружасте ерозије. Међутим, избор овог решења треба да буде условљен очекиваним протоком и количином наноса, јер ова конструкција није замена за технички објекат у условима великих хидрауличких оптерећења.

Гарнисаже (прагови од жбуња)

Гарнисаже представљају конструкције које се могу применити у коритима јаруга за успоравање тока, задржавање материјала и заштиту дна од даљег продубљивања. Њихова конструкција се заснива на комбинацији дрвених стубова и слојева грања и жбуња, при чему биљни материјал има и конструктивну и вегетациону улогу.

Пре извођења конструкције обале јаруге се припремају, након чега се у дно и обале побијају вертикални стубови. Стубови се укопавају приближно 1 m у тло, док део изнад површине износи око 0,5–1,0 m. Као погодан материјал наводи се врба.

У доњем делу конструкције поставља се слој грања и жбуња дебљине око 150 mm. Гране се постављају између стубова, при чему се дебљи крајеви оријентишу узводно. На формирану постељицу постављају се зелене гране различитих дужина, а конструкција се сабија и повезује. Попречне мотке и гране причвршћују се за стубове поцинкованом жицом.

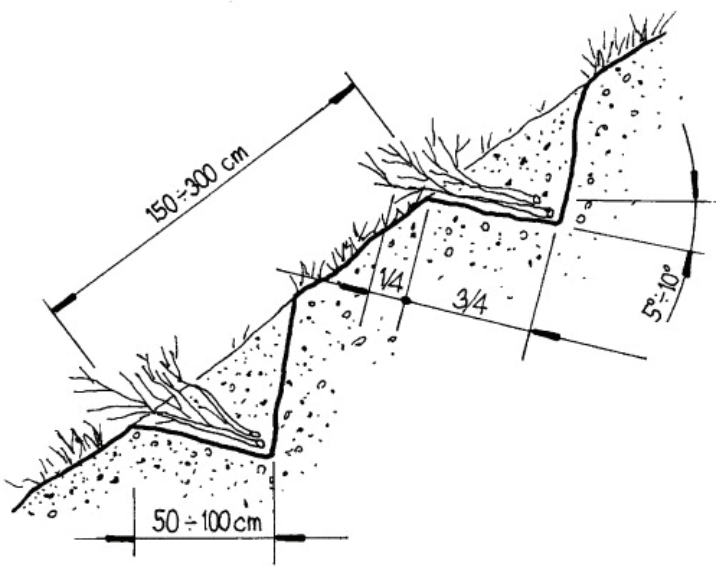


Слика 3. Гарнисажа (једноструки праг од жбуња) (извор: Morgan, 1986).
Figure 3. Garnisage (single brushwood check dam) (Source: Morgan, 1986)

Основни принцип примене гарнисаже је формирање пропусне попречне конструкције која успорава ток и задржава део наноса, док се употребом живог биљног материјала ствара могућност накнадног развоја вегетације. При пројектовању је потребно посебно проверити стабилност конструкције, начин фундирања и заштиту од поткопавања, јер њена трајност непосредно зависи од хидрауличких услова у кориту.

Живи слојеви прућа – brushlayering

Живи слојеви прућа представљају биотехничку меру код које се живе гране или шибље постављају између слојева земљаног материјала. Овај поступак може се применити на падинама и насипима, нарочито када је потребно истовремено обезбедити почетну механичку стабилизацију и створити услове за развој вегетације.



Слика 4. Живи слојеви прућа (Извор: Bischetti et al., 2010)
Figure 4 Live brush layers (Source: Bischetti et al., 2010)

Живи слојеви се постављају између узастопних слојева збијеног земљишта, тако да део грана излази на лице падине. У почетној фази гране могу имати механичку улогу у задржавању површинског материјала и успоравању отицања, док се након ожиљавања њихова функција проширује на коренско ојачање и развој вегетационог покривача.

При пројектовању је потребно узети у обзир нагиб падине, карактеристике земљишта, услове влажења, дужину и распоред слојева, избор врста и период извођења. Нарочито је значајно да се живи материјал не исуши пре успостављања кореновог система. Због тога се време извођења, избор врста и услови складиштења и уградње морају прилагодити локалним условима.

На веома стрмим падинама живи слојеви могу се комбиновати са облицама или даскама које формирају мале терасасте елементе. Оваква модификована решења могу допринети задржавању ситног материјала и смањењу ризика од оштећења младог биљног материјала услед површинског отицања или кретања материјала низ падину. У

постојећем раду као пример је приказано решење са дрвеним елементима дужине око 2 m и дебљине најмање 5 cm, уз могућност додатног причвршћивања арматурним шипкама. Ове вредности представљају карактеристике описаног примера и не треба их генерализовати без пројектне провере.

Рустикалне преграде

Рустикалне преграде познате под називом и прагови од камена у суво могу се примењивати као попречни објекти за контролу уздужног пада корита и успоравање ерозионих процеса у јаругама. За разлику од живих плетера и гарнисажних конструкција, код ових објеката основну механичку функцију има камени материјал, па их је потребно разликовати од биотехничких конструкција са живим елементима. Њихово укључивање у систем биотехничких радова оправдано је само када су део ширег, комбинованог система мера.





Слика 5. и 6. Комбинација плетера и рустикалног зида у потоку Сарач – Пријепоље (фото: Ђ. Живановић 2005.)

Figure 5. and 6. Combination of wicker fencing and rustic wall in the Sarač stream – Prijepolje (Photo: Đ. Živanović, 2005)

Прагови од камена у суво економично се изводе до висине од око 0,45 m. Са низводне стране предвиђа се слапиште ради заштите ножице од поткопавања и расипања енергије воде. Дужина слапишта зависи од нагиба дна јаруге и висине прага.

Изградња почиње припремом обала и ископом рова попречно на дно јаруге и у обалама. У ров се постављају крупнији комади камена који формирају ножицу, након чега се гради тело прага. Комади камена мањи од 100 mm се не користе због могућности њиховог испирања.

Посебну пажњу треба посветити порозности конструкције. Код веома крупног материјала могу се формирати шупљине кроз које вода пролази великом брзином, што може неповољно утицати на стабилност објекта и транспорт наноса. Због тога избор материјала и начин његовог уграђивања треба да буду усклађени са очекиваним протоком и условима темељења.

ПРИМЕРИ ПРОЈЕКТОВАЊА И ПРИМЕНЕ БИОТЕХНИЧКИХ РАДОВА

Одабрани примери примене биотехничких радова у последњих 10-15 година показују начин избора и примене појединих конструктивних решења. Примери обухватају примену плетера и њихових комбинација са другим мерама у Србији.

Примена једноструких и двоструких плетера у заштити насеља Текија од бујичних вода

Након бујичних поплава у септембру 2014. године на подручју насеља Текија по хитном поступку је израђена пројектна документација Заштите насеља Текија од бујичних вода (Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2015). Радови су изведени током 2015. године, а систем заштите насеља састоји се из техничких, биолошких и биотехничких радова.

Насеље Текија се налази у североисточном делу Републике Србије и сконцентрисана је у морфолошки погоднијим деловима терена и уз Дунавску магистралу.

Поред стрмог нагиба падина узводно од насеља, подручје карактерише и изражена геоморфолошка разуђеност са дубоким и стрмим усеченим јаругама које гравитирају ка насељу и даље ка Дунаву. Терен је изграђен од шкриљаца и кластита па су овој средини створени погодни услови за настанак и даљи развој егзогеодинамичких процеса високог интензитета, као што су: механичко распадање, површинско спирање, и линијска ерозија, што условљава и интензивну бујичну активност. Највише су заступљена смеђа кисела земљишта на микашисту и гнајсу и делувијални нанос у осмеђавању.

Површине сливова узводно од насеља су у распону од 0,13 до 0,74 km^2, са средњим падом између 31 и 38%, претежно под шумом и деградираном шумом. Протицаји велике воде вероватноће појаве једном у сто година су од 1,4 до 7,36 m^3/s. Ерозиони процеси су идентификовани теренском проспекцијом. Издвојене су локације за израду плетера, узимајући у обзир и могућност приступа локацији.





Слика 7 и 8. Заштита косина једноструким и двоструким плетерима у Текији (фото: М. Стефановић, 2015.)

Figure 7 and 8. Slope protection with single and double wicker fencing in Tekija (Photo: M. Stefanović, 2015)



Слика 9. Израда плетера у јаругама (фото: М. Стефановић, 2015.)
Figure 9. Installing wicker fencing in gullies (Photo: M. Stefanović, 2015)

На основу поменутог пројекта на падинама узводно од насеља Текија изведено је укупно 1185 m једноструких и 60 m двоструких плетера, груписаних у 5 система.

Примена двоструких плетера у противерозионој заштити слива акумулације Бусур

Након велике количине падавина у јуну 2018. године, на сливу реке Бусур је формиран поплавни талас услед којег је дошло до преливања, поткопавања низводне косине тела бране и оштећења тј. „пролома“ бране „Бусур“ (на левој обали акумулације). Започета је израда Пројекта хитних радова за санацију оштећења на брани „Бусур“ након поплавног догађаја у јуну 2018. год. (Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2018) којим су дефинисани радови на санацији бране и заштити обала непосредно низводно од бране до ушћа реке Коренице. Планирани противерозиони радови у сливу су обухватали техничке и биотехничке радове.

Површина слива узводно од бране је 14,10 km^2, са средњим падом слива од 1,6%. У сливу доминира пољопривредно земљиште на скоро 60% површина, а листопадне шуме су на нешто више од 25% од укупне површине. Најзаступљенији су седименти представљени песковима, пешчарима, глином и сочивима конгломерата. Према педолошком саставу, на сливној површини домира гајњача у оподзољавању са уделом од 72% од укупне површине, док се у централном делу слива јавља значајнија површина на којој преовлађује скелетоидно земљиште (28%). Протицај велике воде вероватноће појаве једном у сто година је 59,9 m^3/s, док је хиљадугодишња вода 91,7 m^3/s. Ерозиони процеси средње категорије су на 52% површине слива, на 32% су заступљени процеси слабе ерозије а врло слабе на 16%.

Укупно је предвиђено 11 бујичних преграда и 9 двоструких плетера. На локацијама где није било могуће решавање имовинско-правних односа неопходних за заузимање површина за класичне бујичне преграде, двоструки плетери су представљали алтернативно конструктивно решење за стабилизацију бујичног тока и контролу наноса.





Слика 10 и 11. Двоструки плетер у кориту бујичног тока узводно од улива у акумулацију Бусур (фото: М. Стефановић, 2018).

Figure 10 and 11. Double wicker fencing on a torrent directly discharging into the Busur reservoir (Photo: M. Stefanović, 2018)

ДИСКУСИЈА

Примена биотехничких радова у заштити од ерозије и стабилизацији падина и бујичних токова заснива се на повезивању конструктивне функције објекта са развојем вегетације (Zeedyk et al. 2009). За разлику од техничких решења код којих се стабилност система у потпуности заснива на механичкој отпорности конструкције, код биотехничких радова се током времена мења значај појединих компоненти система (Sangalli, P. et al. 2021). Због тога избор и пројектовање ових радова захтевају сагледавање услова на терену, функције која се жели постићи, конструктивног решења, избора биљног материјала, начина и времена извођења, као и услова одржавања и развоја вегетације (Suresh et al. 2022).

Избор врсте биотехничких радова не треба посматрати као почетни корак пројектовања, већ као резултат претходне анализе услова на локацији и дефинисања функције објекта. Редослед пројектовања има посебан значај јер се различити типови биотехничких радова разликују по месту примене, конструктивној функцији, начину извођења и захтевима у погледу развоја вегетације (Bischetti et al. 2021).

Почетни корак представља анализа проблема и услова на терену, која обухвата сагледавање типа ерозије, морфологије терена, нагиба, својстава земљишта и подлоге, хидролошких и хидрауличких услова, као и положаја локације у сливу (Polster, 2016). На основу ових услова дефинише се функција коју биотехнички радови треба да остваре, као што су успоравање површинског отицања, задржавање наноса, стабилизација падине или корита и заштита од даље деградације.

Тек након дефинисања услова и функције приступа се избору одговарајућег типа решења (Bergmaister et al. 2009). Овакав приступ је значајан јер исти тип објекта не може имати исту примену у свим условима. Плетери, гарнисажи и слојеви живог грања могу се примењивати у различитим условима, али њихова конструктивна улога, положај и димензионисање зависе од конкретног проблема који треба решити. У случајевима већег хидрауличког оптерећења или изражене опасности од подривања, могу бити потребна додатна техничка решења.

Једна од специфичности биотехничких радова јесте истовремено постојање почетне конструктивне функције и потенцијалног каснијег доприноса развијене вегетације. Код решења као што су живи плетери и слојеви живог грања, бильни материјал у почетној фази нема исту функцију као потпуно развијен коренов систем, па се стабилност непосредно након извођења не заснива искључиво на вегетацији.

Због тога је потребно размотрити период између извођења радова и успостављања вегетације. У том периоду конструктивни елементи, начин анкерисања, ослонац, заштита од подривања и други елементи објекта имају посебан значај. Истовремено, избор врсте и квалитета садног материјала, начин уградње, сезонски услови и доступност влаге у земљишту морају бити прилагођени условима који омогућавају његово преживљавање и укорењавање.

Развој кореновог система представља један од основних механизама којима биљна компонента може допринети стабилизацији земљишта. Коренов систем може утицати на механичку повезаност честица земљишта и допринети повећању отпорности на смицање, док развој вегетације истовремено може утицати на смањење изложености површинског слоја земљишта дејству падавина и површинског отицања (Kumar et al. 2023) а самим тим и на смањење интензитета ерозионих процеса (Kostadinov et al. 2018).

Међутим, величина овог доприноса није константна и зависи од врсте и развоја биљке, карактеристика кореновог система, својстава земљишта, влажности и услова станишта (Polster, 1997). Због тога се у пројектовању не може полазити од претпоставке да ће развој вегетације аутоматски обезбедити потребну стабилност, већ се њен допринос мора посматрати у оквиру конкретних услова и у односу на почетну конструктивну стабилност (Stangl, 2007).

Хидролошки и хидраулички услови представљају један од кључних критеријума за избор и димензионисање биотехничких радова. Посебно је значајно разликовати услове у којима објекат треба првенствено да успори површинско отицање и задржи материјал од услова у којима је изложен директном дејству бујичног тока.

Код објеката постављених у коритима и јаругама, поред саме конструкције, потребно је размотрити и могућност подривања, обилажења воде око објекта и ерозије низводног дела. Због тога се код појединих решења примењују додатни елементи заштите темеља и низводне деонице. Ови елементи не представљају само конструктивни детаљ, већ су део укупног концепта стабилности објекта.

Приказана решења у раду показују да се избор конструкције мора прилагодити очекиваном оптерећењу. Тамо где биотехничка конструкција сама не обезбеђује довољну почетну отпорност, њена примена може бити оправдана у комбинацији са техничким елементима. Такав приступ је присутан и у широј стручној пракси, где се различити облици дрвених, камених и живих конструкција комбинују у зависности од услова терена и захтеване функције (Leiser, 1998).

У различитим областима примењују се бројна решења заснована на коришћењу дрвеног и живог биљног материјала за стабилизацију падина, корита и мањих бујичних токова (Georgi et al. 2006, Blinkov, 2015). У алпским и другим планинским подручјима забележена је примена дрвених преграда и других конструкција од локално доступног дрвета, укључујући и ариш, док се на падинама и дуж мањих водотокова примењују различити облици живих плетера, слојева живог грања и комбинованих конструкција (Schwarz M. et al. 2023).

Иако биотехнички радови имају потенцијал за истовремено остваривање конструктивних и биолошких функција, њихова примена има одређена ограничења (Tarmidzi et al. 2026). Најзначајнија су повезана са зависношћу биљне компоненте од услова станишта, временом потребним за развој вегетације, могућношћу сушења или пропадања садног материјала, као и са хидрауличким оптерећењем којем је конструкција изложена.

Поред пројектовања и правилног извођења, значај имају контрола и одржавање након изградње. Нарочито у почетном периоду потребно је пратити стање конструктивних елемената, развој вегетације, појаву ерозионих процеса, подривање и евентуално обилажење воде око објекта. На основу стања на терену могу бити потребне мање санације или допунске мере. Период непосредно након изградње је значајан не само ради анализе ефеката ових радова. У том периоду оштећење конструктивних елемената или губитак биљног материјала може утицати на даљи развој система. Због тога се биотехнички радови не могу посматрати као решења чија је функција потпуно независна од даљег управљања. Њихова дугорочна функција зависи од односа између конструктивне стабилности, развоја вегетације и услова који се на локацији јављају током времена па би мониторинг након извођења требало да буде саставни део примене биотехничких радова.

Један од тренутно актуелних изазова јесте дефинисање биоинжењерских мера за низ различитих ситуација. Иако су технике добро описане, недостају квантитативне препоруке о томе како и које материјале користити у конкретним ситуацијама (Rey et al. 2019).

Приказани примери не омогућавају квантитативну оцену успешности појединих решења, јер нису доступни подаци о дугорочном праћењу њиховог стања. Њихова улога у овом раду је пре свега у приказу примене биотехничких мера у конкретним условима. За поузданију оцену дугорочне функције различитих решења неопходно је систематско праћење стања објеката и развоја вегетације, уз дефинисање мерљивих показатеља као што су стање ерозије након извођења радова или хидролошки услови на третираном подручју (Kuschel et al. 2025).

ЗАКЉУЧАК

Биотехнички радови представљају део система заштите од ерозије у којем се конструктивни елементи и биљни материјал користе за остваривање стабилизационе и заштитне функције. Њихова специфичност у односу на конструкције чија се функција у потпуности остварује непосредно након изградње огледа се у томе што се улога биљне компоненте мења током времена, са успостављањем и развојем вегетације и кореновог система. Због тога пројектовање ових радова захтева истовремено разматрање почетне конструктивне стабилности и услова за развој вегетације.

Основни принципи пројектовања и примене биотехничких радова подразумевају анализу ерозионих процеса и дефинисање функције објекта, избор типа објекта и одређивање његовог положаја и распореда, до избора конструктивних елемената, биљног материјала, начина извођења и услова одржавања. Пројектовање биотехничких радова треба заснивати на прилагођавању конструктивног решења условима конкретне локације и функцији објекта, уз истовремено уважавање почетне механичке

стабилности, могућности развоја вегетације и захтева у погледу извођења, одржавања и мониторинга.

Приказани типови конструктивних решења показују да биотехнички радови могу имати различите функције у систему заштите од ерозије, од стабилизације површине и косина до успоравања тока, задржавања наноса и стабилизације корита. Истовремено, појединачна решења се не могу посматрати независно од техничких мера. У условима већег ерозионог или хидрауличког оптерећења неопходно је комбиновати техничке и биолошке елементе, при чему се њихове функције међусобно допуњују.

Примери пројектовања и примене на подручју Текије и у сливу акумулације Бусур илуструју примену различитих решења у конкретним условима. Њихова анализа указује на значај правилног избора типа објекта, његовог просторног распореда и начина конструктивног решавања у односу на функцију која се жели постићи. У датим примерима није вршена квантитативна оцена ефеката примењених мера, јер за приказане примере нису били доступни подаци који би омогућили поуздано поређење промена ерозионих процеса, количине наноса, стабилности терена и хидролошких услова.

За унапређење примене биотехничких радова значајно је успоставити систематско праћење изведених објеката, нарочито у периоду непосредно након изградње и током успостављања вегетације. Мониторинг би требало да обухвати стање конструктивних елемената, преживљавање и развој биљног материјала, појаву подривања и заобилажења воде, промене у стању ерозије, количини наноса и потребу за одржавањем. Тако прикупљени подаци могу представљати основу за унапређење пројектантских решења и прецизније сагледавање дугорочног понашања биотехничких система.

Захвалница

У раду су коришћени подаци из пројеката Заштита насеља Текија од бујичних вода, 2014. и Пројекта хитних радова за санацију оштећења на брани „Бусур“ након поплавног догађаја у јуну 2018. год урађених од стране Института за водопривреду "Јарослав Черни" д.о.о.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leiser, A. (1998). Biotechnology for Slope Protection and Erosion Control, A Conference on Watershed Stewardship, Rapid City, South Dakota
2. Morgan R.P.C. (1986). Soil Erosion and Conservation, Longman Group Limited, Hong Hong-London
3. Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control. New York: John Wiley & Sons.
4. Dragović, N., & Ristić, R. (2013). Institutional Organisation and Financing of Works for the Protection of Soil from Erosion and Torrent Control in Serbia: Current Problems and Possible Solutions, Wildbach- und Lawinenverbau, Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering, Juni 2013, Heft Nr, 171, pp. 256-266, ISBN: 978-3-9503089-5-2, Austria
5. Драговић, Н., & Вулевић, Т. (2022). Организација противерозионих радова, универзитетски уџбеник, Универзитет у Београду Шумарски факултет, ISBN 978-86-7299-350-9
6. Dragović, N., Zlatić, M., & Petković, S. (2007). *Comparative Analysis of Institutional*

Organization of Erosion and Torrent Control in Serbia and Same EU Countries, Conference Proceedings „Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management"- marking 100 years of experience with erosion and torrent control in Serbia, on CD, p.p. 1-10, publisher Faculty of Forestry University of Belgrade, Belgrade, ISBN: 978-86-80439-07-5

7. Kostadinov, S., & Marković, S. (1996). Soil erosion and effects of erosion control works in the torrential watersheds in south-east Serbia. In Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives; Walling, D.E.,Webb, B.W., Eds.; IAHS Press: Walingford, UK, 1996; pp. 321-332, ISSN 0144-7815.

8. Kostadinov, S. (2007). Erosion and torrent control in Serbia: hundred years of experiences, International Conference: Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management, Belgrade, Serbia, 25–27 September 2007, Proceedings (CD).

9. Kostadinov, S., & Ristić, R. (2013). Erosion and Torrent Control Works in Serbia, Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering (Zeitschrift fur Wildbach-Lawinen, Erosions und Steinschlagschutz, ISBN 978-3-9503089-5-2), No. 171, pg. 246–254.

10. Kostadinov, S., Borisavljević, A., & Radović, N. (2016). Torrential Floods and Soil Erosion Control in Serbia. *Journal of Torrent and Erosion Control*, 4(1), 12–25.

11. Kostadinov S., Momirović N., Lazarević K., Stefanović T. (2022). Erozija i bujične poplave u Srbiji: iskustva i perspektiva odbrane, Vodoprivreda 0350-0519, Vol. 54 No. 317-318 p. 81-96

12. Kostadinov, S., Braunović, S., Dragičević, S., Zlatić, M., Dragović, N., & Rakonjac, N. (2018). Effects of Erosion Control Works: Case Study-Grdelica Gorge, the South Morava River (Serbia) Water 2018, 10(8), 1094; https://doi.org/10.3390/w10081094

13. Gavrilović, S. (1972): Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Časopis „Izgradnja", Specijalno izdanje, str. 1–292

14. Blinkov, I. (2015). Bioengineering as a tool for soil erosion and torrent control in North Macedonia. *Proceedings of the International Conference on Soil Bioengineering*, Skoplje.

15. Georgi, J.N., & Stathakopoulos, I. (2006). Bioengineering techniques for soil erosion protection and slope stabilization. In Proceedings of the 46th Congress of the European Regional Science Association, Volos, Greece, 30 August–3 September 2006.

16. Kumar, N., & Kumari, S. (2023). The efficiency of Vetiver grass for slope stabilization and erosion control: A comprehensive review. *J. Chem. Health Risks* 2023, *13*, 3755–3767.

17. Suresh, B., & Vinay Dwivedi (2022). Soil Bioengineering to Deal with Soil Erosion and Landslides in Developing Nations. Technoarete Transactions On Recent Research In Applied Microbiology And Biotechnology (TTRRAMB). 1(2), 7-13. doi.org/10.36647/TTRRAMB/01.02.A002.

18. Tarmidzi, S.N.A., Rahman, Z.A., Masri, I.N. *et al.* (2026). A decade of soil bioengineering for erosion control in Malaysia: Progress, challenges, and future directions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **23**, 319. https://doi.org/10.1007/s13762-026-07080-w

19. Sangalli, P., Fernandes, J.P., & Tardío, G. (2021). Soil and Water Bioengineering as Natural-Based Solutions. In: Catalano, C., Andreucci, M.B., Guarino, R., Bretzel, F., Leone, M., Pasta, S. (eds) Urban Services to Ecosystems . Future City, vol 17.

Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2_17

20. F. Rey, C. Bifulco, G.B. Bischetti, F. Bourrier, G. De Cesare, F. Florineth, F. Graf, M. Marden, S.B. Mickovski, C. Phillips, K. Peklo, J. Poesen, D. Polster, F. Preti, H.P. Rauch, P. Raymond, P. Sangalli, G. Tardio, & A. Stokes. (2019). Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration, Science of The Total Environment, Volume 648, Pages 1210-1218, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217.
21. Schwarz, M., Dorren, L., & Suda, J. (2023). *Using timber to counter natural hazards: Erosion, Landslides, Torrent, Avalanches*. EcorisQ - Lignatec.
22. Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., & Rudolf-Miklau, F. (2009). Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Ernst & Sohn
23. Bischetti G.B., Chiaradia E.A., D'Agostino V., & Simonato T. (2010). Quantifying the effect of brush layering on slope stability, Ecological Engineering, Volume 36, Issue 3, Pages 258-264, ISSN 0925-8574, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.019.
24. Bischetti G.B., De Cesare G., Mickovski S.B., Rauch H.P., Schwarz M., Stangl R. (2021). Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements, Ecological Engineering, Volume 169, , 106309, ISSN 0925-8574, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106309.
25. Kuschel, E., Obriejetan, M., Kuzmanić, T., Mikoš, M., Seifert, L., Conevski, S., Wirth, M., Canga, E., Fernandes, S., Hübl, J., & Stangl, R. (2025). A Systematic Framework for Assessing the Temporally Variable Protective Capacity of Nature-Based Solutions Against Natural Hazards. *Infrastructures*, *10*(12), 318. https://doi.org/10.3390/infrastructures10120318
26. Polster, D.F. (1997). Restoration of Landslides and Unstable Slopes: Considerations for Bioengineering in Interior Locations, The 21st Annula British Columbia Mine Reclamation Symposium, Cranbrook, BC, Technicak and Research Commitee on Reclamation
27. Polster, D.F. (2016). Natural Processes for the Restoration of Drastically Disturbed Sites, Journal American Society of Mining and Reclamation, Volume 5, Issue 2 pp 77-90 DOI: http://doi.org/10.21000/JASMR16020077
28. Stangl, R. (2007). Hedge brush layers and live crib walls—stand development and benefits. In: STOKES, A., SPANOS, I., NORRIS, J.E., CAMMERAAT, E. (eds) Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 103. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5593-5_28
29. Zeedyk B., & Jansens J.W. (2009). An introduction to Erosion Control, A Joint Publication from Earth Works Institute, the Quivira Coalition, and Zeedyk Ecological Consulting, Third Edition
30. Институт за водопривреду Јарослав Черни д.о.о. (2014): Заштита насеља Текија од бујичних вода
31. Институт за водопривреду Јарослав Черни д.о.о. (2018): **Пројекат хитних радова за санацију оштећења на брани „Бусур" након поплавног догађаја у јуну 2018. год.**

DOI: 10.5937/eroz52-72623 REVIEW PAPER

WOODY PLANTS IN THE MONITORING AND RESTORATION OF CHEMICALLY DEGRADED SOILS IN POLAND: FROM DENDROMONITORING TO DENDROREMEDIATION AND ECOSYSTEM RESTORATION

MONITORING DRVENASTIH BILJAKA I SANACIJA HEMIJSKI DEGRADIRANIH ZEMLJIŠTA U POLJSKOJ: OD DENDROMONITORINGA DO DENDROREMEDIJACIJE I OBNOVE EKOSISTEMA

Marlena Baranowska[1*1], Sylwia Budzyńska[2*], Miodrag Zlatić[3]

[1] Poznań University of Life Sciences, Department of Silviculture, Wojska Polskiego 69, 60-625 Poznań, Poland
[2] Poznań University of Life Sciences, Department of Chemistry, Wojska Polskiego 75, 60-625 Poznań, Poland,
[3] University of Belgrade, Faculty of Forestry, Kneza Višeslava 1, RS-11000 Belgrade, Serbia

Received: 10.09.2026 / ***Reviewed:*** 28.09.2026 / ***Accepted:*** 13.10.2026

ABSTRACT

Chemical degradation of soils is a complex environmental problem involving changes in soil properties, contaminant mobility and bioavailability, and interactions between contaminants, plants, and soil microorganisms. Woody plants may play a dual role: they can serve as long-term indicators of environmental change and contribute to the restoration of degraded soils and ecosystems. This narrative review integrates evidence on dendromonitoring, dendroremediation, and ecosystem restoration, with particular emphasis on chemically degraded, post-industrial and post-mining sites in Poland. The synthesis is based on peer-reviewed studies addressing woody plants in contaminated environments, with particular attention to research conducted in Poland and to studies relevant to the assessment, monitoring, and restoration of chemically degraded soils.

The literature indicates that woody plants provide valuable information on the spatial and temporal variability of soil contamination, including long-term environmental signals recorded in tree tissues and annual growth increments. Their effectiveness in dendroremediation depends on tree species, contaminant type, soil properties, pH, substrate characteristics, tree age, and exposure duration. Therefore, phytoremediation potential should not be assessed solely on contaminant concentrations in plant tissues or bioconcentration and translocation factors. Biomass production, plant survival, whole-plant accumulation and temporal changes should also be considered. The retention of contaminants in the root zone may represent a desirable feature in phytostabilisation.

The selection of woody species for degraded sites should consider both tolerance to adverse conditions and the ability to modify habitat properties and facilitate ecosystem development.

[1] *Marlena Baranowska, email: marlena.baranowska@up.poznan.pl, ORCID 0000-0001-9915-3776; Sylwia Budzyńska ORCID 0000-0001-7085-7876; Miodrag Zlatić ORCID 0000-0001-9754-7173

On post-industrial and post-mining sites, natural succession and artificial afforestation should be regarded as complementary approaches. Overall, dendromonitoring, dendroremediation and ecosystem restoration are interconnected components of long-term management of chemically degraded soils, aiming to restore ecosystem functions, ecological stability and self-sustaining ecosystems.

Keywords*:* soil pollution; phytostabilisation; post-industrial landscapes; natural succession; woody biomass

APSTRAKT

Hemijska degradacija zemljišta predstavlja složen problem zaštite životne sredine koji obuhvata promene fizičkih, hemijskih i bioloških svojstava zemljišta, pokretljivosti i biodostupnosti zagađujućih materija, kao i njihove interakcije sa biljkama i zemljišnim mikroorganizmima. Drvenaste biljke mogu imati dvostruku ulogu: kao dugoročni bioindikatori promena u životnoj sredini i kao aktivni činioci u sanaciji degradiranih zemljišta i obnovi ekosistema. Ovaj pregledni rad narativnog tipa objedinjuje dosadašnja saznanja o dendromonitoringu, dendroremedijaciji i obnovi ekosistema, sa posebnim osvrtom na hemijski degradirana zemljišta i područja pod uticajem industrijskih aktivnosti i rudarstva u Poljskoj. Pregled obuhvata naučne radove koji su prošli recenzentski postupak i bave se ulogom drvenastih biljaka u zagađenim sredinama, pri čemu je poseban naglasak stavljen na istraživanja sprovedena u Poljskoj, kao i na studije relevantne za procenu stepena zagađenosti, praćenje promena i sanaciju hemijski degradiranih zemljišta.

Pregled literature pokazuje da drvenaste biljke pružaju značajne informacije o prostornoj i vremenskoj promenljivosti zagađenosti zemljišta, uključujući dugoročne pokazatelje promena u životnoj sredini sačuvane u biljnim tkivima i godišnjim prirastima stabala. Efikasnost dendroremedijacije zavisi od vrste drvenastih biljaka, vrste zagađujućih materija, svojstava zemljišta, pH vrednosti, karakteristika supstrata, starosti stabala i trajanja izloženosti zagađenju. Stoga se potencijal fitoremedijacije ne može procenjivati isključivo na osnovu koncentracija zagađujućih materija u biljnim tkivima ili vrednosti faktora biokoncentracije i translokacije. Pri proceni je potrebno uzeti u obzir i produkciju biomase, stopu preživljavanja biljaka, ukupnu akumulaciju zagađujućih materija u biljci i promene ovih pokazatelja tokom vremena. U procesu fitostabilizacije, zadržavanje zagađujućih materija u zoni korenovog sistema može predstavljati poželjno svojstvo, jer doprinosi smanjenju njihove pokretljivosti i rizika od daljeg širenja u životnoj sredini.

Pri izboru drvenastih vrsta za obnovu degradiranih područja potrebno je razmotriti kako njihovu tolerantnost na nepovoljne uslove staništa tako i sposobnost da menjaju svojstva supstrata i staništa i podstiču razvoj ekosistema. Na područjima degradiranim industrijskim aktivnostima i rudarstvom, prirodnu sukcesiju i veštačko pošumljavanje treba posmatrati kao međusobno dopunjujuće pristupe obnovi. Dendromonitoring, dendroremedijacija i obnova ekosistema predstavljaju povezane komponente dugoročnog upravljanja hemijski degradiranim zemljištima, usmerene na ponovno uspostavljanje funkcija ekosistema, povećanje ekološke stabilnosti i razvoj samoodrživih ekosistema.

Ključne reči: zagađenje zemljišta; fitostabilizacija; industrijski degradirana područja; prirodna sukcesija; drvenasta biomasa

INTRODUCTION

Soil degradation results from interacting physical, biological, and chemical processes that progressively reduce soil quality and impair ecosystem functioning. Chemical degradation is particularly persistent because contaminants introduced through mining, metallurgy, industrial activity, transport, and urbanization are not necessarily removed from the environment but may instead be redistributed among soil, water, and biota (Mukhtarov et al., 2026). Metals and metalloids are of particular concern because of their persistence, potential toxicity, and capacity to accumulate within biological systems (Krzesłowska et al., 2021). In mining-affected and post-industrial areas, contaminant enrichment frequently coincides with substantial changes in soil properties, including pH, salinity, nutrient balance, organic matter content, microbial activity, and water availability. Consequently, chemical soil degradation should not be understood simply as an increase in contaminant concentrations, but as a broader disturbance of the physicochemical environment controlling soil functioning and vegetation development (Pérez-Aguilar et al., 2026; Popek et al., 2025; Yashchenko et al., 2025).

The environmental significance of soil contamination cannot be adequately assessed from total elemental concentration alone. Mobility, environmental availability, and toxicity depend on soil pH, redox conditions, organic matter, mineral phases, interactions among co-occurring elements and, for elements occurring in multiple chemical forms or oxidation states, their speciation (Jiao et al., 2026; Kumar et al., 2019). This is relevant to several environmentally important elements, including chromium (Cr), mercury (Hg), and arsenic (As). The latter provides a particularly illustrative example because its inorganic and organic forms differ markedly in mobility, toxicity, and plant uptake. Moreover, contaminant speciation is dynamic rather than fixed – transformations may occur in soil, the rhizosphere, and plant tissues and may be affected by both plant metabolism and microorganisms (Budzyńska, Niedzielski, et al., 2024). Thus, contaminated soils are better viewed as dynamic soil-plant-microorganism systems than as passive reservoirs of contaminants.

Phytoremediation provides a nature-based approach for managing such environments by using plants to extract, immobilize, stabilize, or transform contaminants while maintaining soil structure and biological activity (Mahmud et al., 2026). Although much phytoremediation research has traditionally focused on herbaceous hyperaccumulators, the use of woody plants represents a complementary functional strategy, commonly referred to as dendroremediation (Khan et al., 2025; Mleczek, Gąsecka, et al., 2018a). Their large biomass, extensive and often deep root systems, long lifespan, and capacity to tolerate multiple environmental stresses allow them to interact with contaminated substrates over much longer periods. These characteristics are particularly relevant in post-industrial and mining-affected environments, where restoration often requires persistent vegetation cover, substrate stabilization, and gradual improvement of ecosystem functions rather than rapid contaminant removal alone.

However, dendroremediation potential is not an intrinsic property of a plant species. A recent global synthesis based on 2,766 observations from 243 studies showed that the response of woody plants to metal(loid) contamination is strongly controlled by plant taxon, contamination type, and exposure level, as well as environmental pH (Du et al., 2026). Species differ substantially in contamination uptake, root retention, translocation, tolerance, and biomass production, and the same species may display different remediation strategies under different soil conditions or when exposed to different chemical forms of the same elements (Budzyńska, Mleczek, et al., 2019; Mleczek et al., 2016). Plant age and exposure duration further modify these relationships (Lyubenova et al., 2024; Mleczek et al., 2019). Consequently, selecting

woody plants for remediation should integrate contaminant chemistry, soil conditions, species-specific traits, and the intended remediation endpoint.

A second limitation of conventional phytoremediation assessment is the frequent reliance on contaminant content in individual tissues or on indices such as the bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) (Sharma et al., 2022). These parameters are useful for describing uptake and internal distribution, but do not fully represent remediation capacity in long-lived plants. The total quantity of an element a tree accumulates depends on both its content in plant tissues and its biomass production. This distinction becomes increasingly important with time, as woody plants continue to develop large root and shoot systems over successive growing seasons. Multi-year studies have shown that whole-plant accumulation, and even relative differences among tree species, may change markedly over time, indicating that short-term screening may not reliably predict long-term dendroremediation performance (Budzyńska, Niedzielski, et al., 2024; Budzyńska, Rudnicki, et al., 2024; Panka et al., 2025).

The longevity of woody plants provides another important function that extends beyond remediation. Because wood forms incrementally, trees can retain temporally structured information on environmental conditions in their annual growth rings. Dendrochemical analysis can therefore complement conventional soil and environmental monitoring by providing retrospective information on long-term changes in elemental deposition and environmental pressure (Balraju et al., 2026; Budzyńska et al., 2023). At the same time, interpreting tree-ring chemistry requires caution because elemental distribution in wood is affected by species-specific physiology, wood anatomy, radial translocation, water availability, and site conditions (Górska, 2024; Górska & Roszyk, 2019). Recent studies from urban environments indicate that long-lived trees can integrate multi-decadal signals of anthropogenic pressure and provide valuable information on temporal environmental change (Balraju et al., 2025; Budzyńska et al., 2026; Sensuła & Fagel, 2023).

These two functions of woody plants – as recorders of environmental change and active agents of remediation and restoration – are usually considered separately, although they arise from closely related soil-tree interactions. A tree growing in a chemically degraded environment may simultaneously respond to contaminant mobility and speciation, modify rhizosphere chemistry, accumulate or immobilize elements, preserve environmental signals in wood, and ultimately become a structural component of a recovering ecosystem. This perspective directly links dendromonitoring, environmental chemistry, dendroremediation, and forest restoration.

Poland provides a useful case-study framework for examining these relations because of its mining-affected and post-industrial soils, long-term contaminated sites undergoing natural revegetation, and urban environments subjected to prolonged anthropogenic pressure (Mukhtarov et al., 2026; Popek et al., 2025; Robakowski et al., 2025). This review therefore aims to integrate chemical and forestry perspectives on the use of woody plants to monitor and restore chemically degraded soils in Poland. First, the chemical characteristics of soil degradation and the roles of contaminant mobility, speciation, and environmental availability are examined. Woody plants are then considered as long-term environmental indicators through dendromonitoring, followed by a discussion of contaminant uptake, transport, transformation, and accumulation in relation to dendroremediation. These processes are subsequently linked with species selection, site conditions, stand functioning, and forest ecosystem recovery (Drzewiecka et al., 2019; Kowalkowski et al., 2025; Lyubenova et al., 2024). Particular attention is given to the temporal scale - from short-term chemical transformations, through multi-year remediation, to multi-decadal environmental records preserved in wood. Finally,

recommendations are provided for integrating chemical monitoring, silvicultural practice, and long-term assessment of restoration outcomes in degraded environments.

CHEMICAL DEGRADATION OF SOILS IN POLAND

Major sources and contaminants

Chemical soil degradation in Poland reflects both natural geochemical variability and long-term anthropogenic pressure associated with mining, metallurgy, industrial production, waste disposal, transport and urban development (Wdowczyk et al., 2023; Zając et al., 2025). The national Monitoring of the Chemistry of Arable Soils, conducted by the Chief Inspectorate for Environmental Protection since 1995 at 216 permanent sites, evaluates changes in a broad range of soil properties, including trace element contents, pH, electrical conductivity, organic carbon, exchangeable cations and cation-exchange capacity (Chief Inspectorate for Environmental Protection, 2026). The program therefore shows that assessing soil quality requires considering the broader soil chemical environment rather than contaminant contents alone. At the same time, because this monitoring network focuses on arable soils, highly transformed mining, post-industrial, and urban sites require complementary site-specific investigations.

Among anthropogenic sources, mining and metallurgical activities are particularly important because they can introduce large and chemically complex mixtures of metals and metalloids into soils and generate waste materials with physicochemical properties markedly different from those of natural soils (Mazurek et al., 2025; Mu, 2025). The Polish national monitoring framework identifies industrial emissions, particularly those associated with mining and metallurgy, together with inappropriate industrial waste management, as major anthropogenic sources of trace element contamination of soils (Chief Inspectorate for Environmental Protection, 2026). Contaminants of particular environmental relevance include cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn), while metalloids such as As become especially important in areas influenced by mining and ore-processing activities. These elements differ substantially in mobility, plant availability, and toxicity. Their environmental significance therefore depends on both their abundance and the properties of the receiving soil (Mazurek et al., 2025; Zając et al., 2025).

Polish post-industrial and mining-affected environments further demonstrate that chemical degradation rarely results from a single contaminant. In a post-industrial area colonized by woody vegetation, elevated contents of trace elements occurred together with unusually high calcium (Ca) and sodium (Na) levels, strongly alkaline soil reaction, increased electrical conductivity, reduced soil organic matter, and unfavorable water-retention and cation-exchange properties. Such conditions generated simultaneous elemental, nutritional, salinity, and water stress, illustrating that the biological response of trees may be governed by the entire chemical matrix rather than by the concentration of an individual toxic element (Budzyńska et al., 2022). Similarly, mining residues may contain several potentially toxic elements simultaneously. Experimental studies using mining sludges have demonstrated simultaneous exposure to As, Cd, Hg, Pb, Zn, and other toxic elements (Budzyńska, Rudnicki, et al., 2024; Drzewiecka et al., 2019; Górska, 2024; Świątek et al., 2024).

Consequently, chemically degraded soils in Poland should be considered heterogeneous systems in which contaminant mixtures interact with altered soil properties and site history. Identifying the elements present is therefore only the first step. Evaluating their environmental

toxicity and transport strongly depend on their chemical form, speciation provides additional information necessary to understand their behavior in the soil–plant system.

Speciation and multi-element interactions

When contaminants occur in several chemical forms, environmental behavior cannot be explained solely on the basis of total concentration or even a general assessment of mobility. Speciation determines the chemical form in which a given element occurs and thus influences its solubility, adsorption, toxicity, and availability to plant roots. This is particularly important for redox-sensitive metalloids such as arsenic, whose inorganic forms, As(III) and As(V), and methylated forms differ significantly in their environmental behavior and biological impact (Budzyńska et al., 2025).

Studies on woody plants have shown that As speciation can strongly influence both uptake and the plant's subsequent response. In the case of Norway maple (*Acer platanoides*), the form of As supplied to the substrate affected uptake, translocation, morphology, and survival, demonstrating that total As concentration alone may not provide sufficient information to assess phytoremediation potential (Budzyńska et al., 2025). Furthermore, it should not be assumed that the form of As initially present in the environment will remain unchanged during exposure. Experiments with *Quercus robur* and *Tilia cordata* showed time-dependent transformations of inorganic and organic forms of As in both the culture medium and plant tissues, with microbial activity contributing to these processes (Budzyńska et al., 2021; Budzyńska, Izdebska, et al., 2024). Long-term field observations further showed that changes in total As content in soil were accompanied by significant changes in its speciation over five years, including a decreasing proportion of As(III) and an increasing proportion of organic forms of As (Budzyńska, Niedzielski, et al., 2024).

The environmental behavior of contaminants is further complicated by the simultaneous presence of other elements. Mining and post-industrial soils often contain mixtures of potentially toxic elements along with essential macro- and microelements. Interactions between these components can modify sorption, root uptake, translocation, and plant nutrition through competitive, antagonistic, or synergistic effects. Therefore, the response observed for a given element under experimental conditions with a single impurity may differ significantly from its behavior in a chemically complex field substrate.

Therefore, chemical characterization of degraded soils intended for monitoring or woody plant rehabilitation should go beyond total contaminant concentrations and include the main soil properties controlling mobility, relevant chemical species where speciation is environmentally important, and interactions created by co-occurring elements. This information provides the chemical context necessary to interpret the signals recorded by trees and distinguish environmental exposure from species- and site-specific responses.

DENDROMONITORING OF CHEMICALLY DEGRADED ENVIRONMENTS IN POLAND

Polish dendromonitoring studies on chemical degradation have focused mainly on environments subjected to long-term industrial, mining, and urban pressure. Although many of these studies primarily reconstruct atmospheric pollution rather than soil pollution itself, they are particularly relevant for degraded terrestrial environments because trees integrate long-term exposure to multiple contaminant transport pathways and simultaneously record changes in

growth. Available data cover industrial regions of southern Poland, historical mining areas, and more recently urban environments exposed to traffic and other anthropogenic factors.

A significant number of dendrochronological and dendrochemical studies using Scots pine (*Pinus sylvestris*) have been carried out in the highly industrialized Silesian region. Sensuła et al. (2017) combined tree-ring width measurements with radial profiles of Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn, and Pb determined in pine trees growing near chemical factories. The analyzed chronology extended from the 1920s to 2010 and indicated changes in the elemental composition of wood, largely corresponding to periods of increased industrial activity and dust deposition. Complementary stable-isotope studies have shown that tree rings may also preserve physiological responses to industrial pressures. In *P. sylvestris* growing near a combined heat and power plant and steelworks in Silesia, variability in δ13C and internal water use efficiency in 1975–2012 reflected the combined influence of diffuse pollutants and local environmental conditions (Sensuła et al., 2017; Sensuła, 2016). More recent work from the same industrial region further illustrates both the potential and the complexity of dendrochemical interpretation. Sensuła and Fagel (2023) compared the radial contents of Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb in pines growing near the steelworks with pines from a reference site. Despite comparison with the content of elements in atmospheric precipitation recorded at the monitoring station in Katowice, no simple linear relationship was found between the content of elements in individual tree rings. The authors concluded that wood chemical composition reflects the combined influence of regional and local pollution sources, atmospheric deposition, environmental conditions, and plant physiological processes, rather than a single external-exposure variable. This is particularly important for interpreting chemically degraded environments, where several sources of pollutants and environmental stressors typically operate simultaneously.

Dendrochemical approaches have also been applied to historical mining contaminants. In the Old Copper District near Iwiny in southwestern Poland, Dobrzańska et al. (2021) used tree rings of English oak (*Quercus robur*) to investigate the long-term impact of former copper mining and a historic tailings dump failure. Differences in trace element content and tree-ring width between industrial and control sites confirmed the persistent impact of mining-related disturbances, but the study also demonstrated methodological difficulties in attributing individual changes in wood chemistry to specific historical contaminants. This example is particularly significant because it demonstrates that dendrochemistry can identify long-term contrasts between degraded and reference environments, even when the precise year-to-year reconstruction remains uncertain.

Urban dendromonitoring in Poland subsequently extended this approach to diffuse, multi-source pollution. In Poznań, tree cores of Norway maple (*Acer platanoides*), silver birch (*Betula pendula* Roth) and black poplar (*Populus nigra*) growing near main roads were analyzed for 22 elements. Over a period of about three decades, a general increase in the content of most elements was observed from the pith towards the cambium, despite differences between tree species and sampling locations. No single species accumulated the highest content of all elements: *A. platanoides* showed the highest values for 13 of the elements analyzed, *B. pendula* for three, and *P. nigra* for six, which emphasizes that the effectiveness of dendromonitoring is specific to a given element and species (Budzyńska et al., 2023). The broadly similar temporal direction observed across species and locations was interpreted as evidence of increasing anthropogenic pressure during the analyzed period.

Another study extended the time perspective by analyzing *Picea abies* and *Quercus robur* growing along the main roads of Poznań. Elemental contents generally increased in younger

wood, particularly in sapwood, while changes in ring width and density provided additional information on how trees responded to the urban environment. In the oldest *Q. robur*, over 150 years old, the temporal patterns could be linked to the main phases of urban and industrial development, although climate and local hydrological conditions also contributed to the observed signal. Importantly, *Q. robur* individuals growing in different urban locations showed similar long-term trends in element deposition, whereas *P. abies* was more influenced by site-specific factors such as water availability and exposure to environmental stressors (Budzyńska et al., 2026).

In summary, Polish dendromonitoring studies (Table 1) show that tree rings can provide retrospective information in significantly different types of chemically transformed environments – from industrial forests and historical mining areas to contemporary urban systems. Their greatest value appears to lie not in reconstructing precise annual pollutant concentrations, but in identifying long-term trajectories, major environmental changes, and differences between sites or periods. Evidence from Poland also shows that combining elemental composition with tree-ring width, wood properties, stable isotopes, or independent monitoring records strengthens the environmental interpretation. At the same time, differences between species and localities must remain part of this interpretation and not be treated merely as analytical variation. This species-specific uptake and retention of elements, which underlies dendromonitoring, also determines whether woody plants can actively immobilize, translocate, or remove contaminants from degraded soils. The same case studies therefore show a natural transition from trees as environmental recorders to trees as active remediation agents.

Table 1. Selected Polish dendromonitoring studies using tree rings to assess long-term chemical environmental change, including study context, analyzed indicators, temporal coverage, major findings, and their interpretative significance for dendromonitoring

Tabela 1. Odabrana istraživanja dendromonitoringa u Poljskoj koja koriste godove drveća za procenu dugoročnih promena hemijskih karakteristika životne sredine, sa prikazom konteksta istraživanja, analiziranih pokazatelja, vremenskog obuhvata, glavnih rezultata i njihovog značaja za tumačenje nalaza dendromonitoringa

Study area, environmental pressure	Tree species	Analysed indicators	Temporal coverage	Main findings relevant to dendromonitoring	Interpretative significance	Reference
Silesia; heat and power plant and steelworks	*Pinus sylvestris*	$\delta^{13}C$ in glucose in tree rings, carbon isotope discriminati on, internal water use efficiency (iWUE)	1975-2012	$\delta^{13}C$ and iWUE varied by industrial emitter type and local environmental conditions; iWUE increased over the analyzed period.	Tree rings can record not only exposure to pollutants but also long-term physiological responses to combined industrial and environmenta l stress.	Sensuła et al., 2016
Silesia; vicinity of chemical factories	*Pinus sylvestris*	Tree-ring width; Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb	1920-2010	Radial element profiles and tree-ring widths reflected long-term changes related to industrial development and dust deposition	Combining chemical composition with tree growth allows for a multi-decadal record of anthropogenic	Sensuła et al., 2017

Study area, environmental pressure	Tree species	Analysed indicators	Temporal coverage	Main findings relevant to dendromonitoring	Interpretative significance	Reference
				around the study area.	pressure on the environment.	
Iwiny, Old Copper District, SW Poland; former Cu mining and tailings storage facility impact	*Quercus robur*	Tree-ring width; Cd, Mn, Ni, Zn, Cr, Co, Pb, Cu, Fe, Al, and Ag	1959-2014	Trees in industrial facilities had higher contents of several elements and narrower rings than control trees. However, the 1967 tailings dam failure was not recorded as a clear chemical or growth signal.	Dendrochemistry can help identify long-term mining impacts, whereas short-term historical events may remain unresolved when contaminant bioavailability is low.	Dobrzańska et al., 2021
Southern Poland; steelworks and reference forest	*Pinus sylvestris*	Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb; comparison with atmospheric wet-deposition records	1999-2012	Elemental patterns in wood did not show a simple linear relationship with element loads in rainfall.	Wood chemistry integrates several influences – including regional and local pollution sources, deposition and tree physiology – and should not be treated as a direct proxy for a single monitoring variable.	Sensuła & Fagel, 2023
Poznań; major urban roads and traffic-related anthropogenic pressure	*Acer platanoides*, *Betula pendula*, *Populus nigra*	Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sr, Ti, Tl, and Zn; number of annual increments; wood density	1986-2019	Most analyzed elements showed increasing contents from pith towards cambium. Species differed markedly: *A. platanoides* had the highest contents for 13 elements, *B. pendula* for 3 and *P. nigra* for 6. A similar general temporal direction occurred across city locations.	Demonstrates strong species × element specificity, while the common temporal trend indicates the potential of multiple urban tree species for reconstructing longer-term environmental trajectories.	Budzyńska et al., 2023
Poznań; major urban roads,	*Picea abies*,	Al, Ba, Ca, Cr, Cs, Cu, Fe, K, Mg,	1850-2019	Elemental contents generally increased towards	Long-lived *Q. robur* appears particularly	Budzyńska et al., 2026

Study area, environmental pressure	Tree species	Analysed indicators	Temporal coverage	Main findings relevant to dendromonitoring	Interpretative significance	Reference
urbanization, traffic and changing climate	*Quercus robur*	Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr., Ti, Tl, Zn, and Zr; tree-ring width; wood density		younger wood, especially sapwood. Long-lived *Q. robur* individuals from different locations showed relatively consistent temporal patterns, whereas *P. abies* was more strongly affected by local site conditions.	useful for integrating multi-decadal urban environmenta l change, but site hydrology and species-specific element redistribution remain important for interpretation.	

Dendroremediation of chemically degraded soils in Poland

Polish studies on woody plants growing in conditions contaminated with metalloids show that the dendroremediation potential cannot be attributed to a species regardless of the pollutant in question, its chemical form, substrate properties, and exposure time (Budzyńska et al., 2025; Budzyńska, Rudnicki, et al., 2024; Mleczek, Gąsecka, et al., 2018b). Experiments conducted under controlled conditions and on mining and post-industrial substrates revealed significant inter-species differences in the uptake and distribution of pollutants between plant organs. A common feature of many tree species studied is the preferential retention of potentially toxic elements in underground tissues, although the scale of this retention and the extent of translocation to stems and leaves vary considerably between species and elements. Studies conducted on *Acer platanoides*, *A. pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Quercus robur*, *Tilia cordata* and *Ulmus laevis* have shown that species that show relatively efficient uptake of one pollutant do not necessarily show a similar pattern for another. Consequently, the same woody species may contribute primarily to contaminant stabilization under one set of conditions while exhibiting greater translocation and removal potential under another (Budzyńska et al., 2017; Budzyńska, Krzesłowska, et al., 2019; Budzyńska, Mleczek, et al., 2019; Drzewiecka et al., 2019; Krzesłowska et al., 2021; Mleczek et al., 2016, 2019, 2022; Mleczek, Gąsecka, et al., 2018b; Mleczek, Goliński, et al., 2018).

These differences become particularly visible under complex chemical conditions. In mining residues, trees are simultaneously exposed to several potentially toxic elements, and their distribution in plants does not follow a single, species-specific pattern. Similarly, field observations in a Polish post-industrial area showed that *B. pendula*, *P. sylvestris* and *Salix viminalis* differed significantly in their element accumulation despite growing in the same highly alkaline, calcium- and sodium-rich conditions (Budzyńska et al., 2022). The reaction therefore reflected not only the biological characteristics of the species, but also the chemical environment controlling the availability of elements. This confirms that remediation strategies should not be inferred solely on the basis of total soil contamination.

Another important feature emerging from Polish dendroremediation research is that the apparent remediation efficiency of woody plants may change with plant age and exposure duration (Budzyńska, Izdebska, et al., 2024; Mleczek et al., 2019). Short-term hydroponic and pot experiments are particularly useful for identifying species-specific uptake patterns, toxicity

thresholds, and contaminant transformation, but provide only a partial picture of the long-term remediation capacity of trees. In woody plants, the amount of pollutant retained in the whole organism depends both on its content in individual tissues and on the amount of biomass produced. Therefore, a high content of elements in a small plant does not necessarily translate into a larger amount of contamination retained from the substrate. Conversely, a tree with lower contaminant content in its tissues may accumulate a greater total amount of the contaminant as root and shoot biomass increases over time. This distinction is particularly important when comparing woody plants with short-lived phytoremediation species and when extrapolating results from seedlings to older trees.

The importance of this temporal component was demonstrated in a three-year experiment with *T. cordata* and *Q. robur* growing in soil enriched with mining sludge contaminated with many elements (Budzyńska, Rudnicki, et al., 2024). Both species maintained growth under contaminated conditions, but their element accumulation patterns developed differently in subsequent growing seasons. *T. cordata* generally accumulated higher amounts of several elements studied in whole plants, including As, Hg, Mn, Pb, and Zn, while the importance of individual uptake and translocation processes varied between years. For some elements, significant accumulation became visible only after the second or third growing season. Therefore, an assessment based on a single, early sampling point may have resulted in a different species classification than an assessment after several years. Importantly, increasing biomass and increasing element accumulation in whole plants occurred simultaneously, demonstrating why tissue content and conventional uptake rates should be interpreted in conjunction with plant growth rather than in isolation.

A five-year study of naturally established *Q. robur* and *T. cordata* growing in an As-contaminated environment provided an even longer perspective (Budzyńska, Niedzielski, et al., 2024). The As concentration in soil decreased from 37.0 to 10.5 mg kg^{-1} under *Q. robur* and from 34.7 to 9.51 mg kg^{-1} under *T. cordata* during the observation period, corresponding to a maximum reduction of about 71.8%. At the same time, however, the relative productivity of both tree species was not constant. *T. cordata* showed stronger As accumulation in the first years, while *Q. robur* became more effective later in the study. In the fifth year, whole-plant As accumulation reached approximately 38.2 mg per individual of *Q. robur* compared to 30.6 mg per individual of *T. cordata*. If the assessment had been completed after only two or three growing seasons, *T. cordata* would have appeared to be the more effective species, illustrating the risk of extrapolating long-term dendroremediation results from short-term observations.

The same study also illustrates the need to distinguish between contaminant accumulation and effective transfer to harvestable biomass. Translocation coefficients remained below one for both species throughout the five-year period, indicating dominant As retention in the underground organs. From a classical phytoextraction perspective, limited transport to aboveground tissues may limit contaminant removal during harvest. However, in degraded landscapes, root retention can be beneficial when phytostabilization is the primary goal, as it can reduce contaminant movement through the soil-plant system and limit transfer to leaves. Therefore, a low translocation rate should not automatically be interpreted as poor remediation efficacy. Its meaning depends on the intended management objective.

In summary, Polish research indicates that dendroremediation should be viewed as a dynamic process, dependent on species and location, rather than a constant feature of individual tree species (Table 2). Early screening is still necessary to determine pollutant tolerance and uptake patterns, but long-term assessment requires simultaneous consideration of pollutant distribution, biomass production, plant survival, and changes occurring in subsequent growing

seasons. In the case of long-lived woody plants, accumulation in whole plants and its time course may therefore provide more reliable data on remediation potential than tissue content or BCF and TF values considered separately. These findings also shift the question from whether a tree can accumulate or stabilize pollutants to whether it can maintain these functions while continuing to grow under the specific conditions of a degraded site. This broader criterion links dendroremediation to selecting species that can contribute to long-term ecosystem restoration.

Table 2. Selected Polish studies illustrating species-, substrate-, contaminant-, and time-dependent variation in dendroremediation performance of woody plants in chemically degraded environments

Tabela 2. Odabrana istraživanja u Poljskoj koja prikazuju zavisnost efikasnosti dendroremedijacije drvenastih biljaka u hemijski degradiranim sredinama od biljne vrste, supstrata, vrste zagađujućih materija i trajanja izloženosti

Contaminant, degraded substrate	**Tree species**	**Study system**	**Key result**	**Dendroremediation implication**	**Reference**
As(III)	*Acer platanoides, Betula pendula, Quercus robur, Ulmus laevis*	Hydroponic experiment	Strong species-specific partitioning was observed. *A. platanoides* accumulated >80% of whole-plant As in the stem (TF = 10.8), whereas *Q. robur* retained >85% in roots (TF = 0.1).	The same contaminant can induce contrasting remediation strategies: effective translocation in *A. platanoides* versus predominantly root-based stabilization in *Q. robur.*	Budzyńska et al., 2017
Multi-element hazardous mining sludge	*Acer platanoides, Acer pseudoplatanus, Betula pendula, Quercus robur, Tilia cordata, Ulmus laevis*	Field experiment	All species accumulated and translocated more than one potentially toxic element. For Zn, BCF and TF exceeded 1 in all species, with particularly high values in *A. platanoides*, *U. laevis* and *A. pseudoplatanus*. Uptake patterns differed markedly from those previously obtained under controlled conditions.	Remediation capacity is both species- and element-specific and may change substantially with environmental conditions; controlled screening cannot be transferred directly to more realistic substrates.	Mleczek et al., 2016
As-contaminated mining sludge	*Acer platanoides, Acer pseudoplatanus, Betula pendula, Quercus robur, Tilia cordata, Ulmus laevis*	Pot experiment	Total As was accumulated predominantly in roots in all six species. Organic As forms dominated in many tree organs despite occurring at low concentration in the original mining sludge.	Root retention is a common response under highly contaminated conditions, while As transformation demonstrates that total As alone does not adequately describe plant–contaminant interactions.	Budzyńska, Mleczek et al., 2019

Contaminant, degraded substrate	Tree species	Study system	Key result	Dendroremediation implication	Reference
Mixture of flotation tailings and sewage sludge; multi-element contamination	*Tilia cordata, Ulmus laevis*	Pot experiment	One-year-old *T. cordata* failed to grow successfully, whereas two-year-old *T. cordata* showed the highest overall accumulation efficiency in the waste mixture; two-year-old *U. laevis* was less effective. Many elements were retained predominantly in roots.	Plant age can substantially alter both survival and apparent phytoextraction efficiency and should be considered together with species identity when selecting woody plants for degraded substrates.	Mleczek et al., 2019
Post-industrial soil with high Ca, Na, and trace element content	*Betula pendula, Pinus sylvestris , Salix viminalis*	Naturally established plants	Whole-plant biomass and accumulated amounts of most analyzed elements generally increased with plant age; the oldest specimens showed the greatest total element accumulation. Soil chemistry simultaneously restricted uptake of some trace elements.	Long-term remediation potential cannot be assessed from tissue content alone: increasing biomass can substantially increase the total amount of elements retained by woody vegetation.	Budzyńska et al., 2022
Mining sludge; multi-element contamination	*Tilia cordata, Quercus robur*	Field experiment	Both species maintained growth, but whole-plant accumulation of As, Hg, In, Mn, Mo, Pb, Ti and Zn was higher in T. cordata. After three years, T. cordata accumulated 68.7 mg As, 158 mg Mn and 157 mg Zn per plant.	Remediation performance develops over successive growing seasons and must be evaluated as the interaction between tissue content, biomass production, and duration of exposure.	Budzyńska, Rudnicki et al., 2024
As-contaminated soil near mining sludge deposits	*Tilia cordata, Quercus robur*	Naturally established plants	Soil As concentration decreased by up to 71.8%. *T. cordata* was more effective during the early years, whereas *Q. robur* became more effective in year 5; TF remained <1, indicating dominant root retention.	Species ranking is time-dependent. Multi-year assessment can lead to a different conclusion than short-term screening and shows the importance of biomass development and long-term contaminant retention.	Budzyńska, Niedzielski et al., 2024

FROM SPECIES SELECTION TO ECOSYSTEM RESTORATION

Post-industrial areas encompass various forms of anthropogenic transformation of the Earth's surface, including areas associated with extractive and processing industries as well as waste storage. Particularly prominent landscape features include spoil heaps and waste dumps

resulting from mining activities, which, due to their size, origin, extensively altered vegetation cover, and unnatural topography, substantially transform the landscape (Kistowski, 2008; Lamparska-Wieland & Waga, 2003). At the same time, many post-industrial areas are characterized by severe soil and vegetation disturbance or their complete removal, consequently resulting in a substantial reduction in biological activity. Their recolonization may occur spontaneously as a result of natural succession or may be supported by deliberate human interventions, including reclamation.

Natural succession is a directional process in which the colonization of an area by successive groups of organisms leads to gradual changes in habitat conditions (Czerepko, 2008; Faliński, 1988). Primary succession occurs in areas previously devoid of developed biological life, whereas secondary succession takes place in locations where the former ecosystem has been destroyed or severely transformed, including as a result of human activity (Adamowski & Bomanowska, 2011; Faliński, 1988). During the initial stages, pioneer species emerge. These species are characterized by broad tolerance to climatic and soil conditions, a high light requirement, rapid juvenile growth, early and abundant fruiting, and the ability to reproduce vegetatively (Faliński, 1990). Their presence gradually modifies the habitat, creating conditions suitable for species characteristic of later stages of succession, which are better adapted to competition than to severe environmental stress (Connell & Slatyer, 1977)

In temperate climates, the final, stable stage of succession is represented by a forest community. Forests and woodland communities constitute the potential natural vegetation over more than 99% of Poland's land area (Matuszkiewicz, 2008). The development of woody vegetation can therefore be regarded as one of the key stages in the restoration of the ecological functions of post-industrial areas. However, the rate of tree colonization varies and depends on habitat type. The first woody plants may appear within the first ten years of succession; however, post-mining areas are among the habitats colonized by woody vegetation at the latest stages (Prach et al., 2001; Prach & Pyšek, 1994). In the process of spontaneous succession on post-industrial sites silver birch occurs particularly frequently (Prach & Pyšek, 1994, 2001; Woźniak et al., 2003). Poplars and willows, which also represent a group of pioneer species, colonize many other pioneer habitats, including river valleys, abandoned fields, windthrow areas, and burned areas (Adamowski & Bomanowska, 2011; de Chantal & Granström, 2007; Jagodziński et al. 2014; Faliński, 1988, 1997; Myking et al., 2011).

Species selection and the properties of degraded habitats

The long duration of natural succession is one of the main reasons for undertaking reclamation measures. Their aim is to accelerate the recovery of areas transformed by human activities. The most common reclamation approaches include recreational, agricultural, and forestry uses. However, the choice between leaving an area to spontaneous succession and implementing technical reclamation remains a widely discussed issue in research on the management of post-industrial areas. (Krzaklewski et al., 2016) indicates that natural successional processes can be used to develop desired plant communities, including forest stands, by appropriately directing the course of succession. At the same time, the high costs of comprehensive technical reclamation limit the feasibility of its widespread application. Technical measures should primarily be aimed at ensuring the stability of the reclaimed site, for example by reinforcing unstable slopes (Bradshaw, 2000).

In the case of contaminated and degraded areas, species selection should not, however, be based solely on their ability to survive under harsh conditions. Their potential to modify the habitat and initiate further ecosystem changes should also be taken into account. Pioneer

species can stabilize the substrate, increase the input of organic matter, influence nutrient cycling, and create conditions conducive to the development of subsequent groups of plants. Therefore, species selection should consider the type and degree of degradation, the physicochemical properties of the substrate, the availability of water and nutrients, light conditions, and, in the case of contaminated areas, also the type, mobility, and bioavailability of contaminants.

In the reclamation of post-industrial land, the conventional typology of forest habitats may be an insufficient tool for assessing habitat potential and making silvicultural decisions. The soil is often undeveloped, poorly developed, or severely altered, while the absence of an existing forest stand prevents its site index from being used as an indicator of habitat quality. Moreover, the floristic composition of pioneer phytocoenoses may have little correspondence with the diagnostic species used in conventional forest habitat classification. Under such conditions, direct assessment of substrate properties and observation of the natural course of succession become particularly important.

The importance of pioneer species

Pioneer species are particularly well suited to areas characterized by high light availability and heterogeneous access to water and nutrients. Due to their biological and ecological characteristics, they should play an important role in the reclamation of post-mining land (Dutta & Agrawal, 2001). Species frequently used in reclamation include *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, and *Alnus glutinosa*. Scots pine is one of the most commonly used species; however, abiotic and biotic risks associated with monocultures indicate the need for greater use of broadleaved species. *A. glutinosa* and *B. pendula* may be of particular importance due to their rapid growth and ability to improve the availability of N and P in the substrate. Broadleaved species also exert a greater influence on soil biological properties than conifers, while soils in broadleaved forests are generally more fertile than those in coniferous forests (Józefowska et al., 2016; Rahmonov et al., 2020). As the forest stand develops, light conditions also change, which may limit the regeneration and growth of light-demanding species (Mudrák et al., 2010).

The importance of pioneer species is also related to their resource-use strategies. Light availability is one of the key factors determining the composition and structure of plant communities (Gravel et al., 2010; Zavala et al., 2011). Species characteristic of early successional stages generally exhibit rapid growth and efficient acquisition of available resources. Their root systems are often adapted to rapid uptake of water and nutrients, and early-successional species are generally more deeply rooted than species characteristic of later successional stages (Casper & Jackson, 1997; Chen & Brassard, 2013; Hernández et al., 2010; Schenk, 2006). They also exhibit greater potential for nutrient acquisition (Chen & Brassard, 2013; Comas et al., 2002). These characteristics may be particularly important in degraded areas, where the availability of water and nutrients is limited and highly heterogeneous in space.

The root system is also important for substrate stabilization and the development of the soil environment. Roots, together with microorganisms and ectomycorrhizal fungi, participate in the transformation of biotic and abiotic components. *Betula pendula*, *Alnus glutinosa*, and *Pinus sylvestris* exhibited high levels of mycorrhizal colonization during growth on spoil heaps, exceeding 95% and reaching nearly 100% in the case of Scots pine (Ostonen et al., 2006). This indicates that, when selecting species for reclamation, their ability to establish functional interactions with soil microorganisms should also be taken into account.

Species improving soil properties

In the process of restoring degraded environments, particular importance may be attributed to species that not only tolerate adverse conditions but also actively contribute to their modification. Examples include *Alnus glutinosa* and *Robinia pseudoacacia*, which are capable of fixing atmospheric nitrogen through symbiotic associations with nodule-forming bacteria (Danso et al., 1995). In the case of black locust, the annual N_2 fixation capacity, depending on site conditions and stand age, ranges from 30 kg·ha^{-1} in a four-year-old stand to 274 kg·ha^{-1} in stands aged 5–18 years (Danso et al., 1995). These species may therefore contribute to increasing nitrogen availability and the gradual development of the humus layer.

Black locust is also characterized by considerable plasticity in its root system, which can develop different architectures depending on site conditions (Degomez & Wagner, 2001). This trait may enhance its ability to stabilize the substrate and function under highly heterogeneous environmental conditions. Consequently, the occurrence of *Alnus glutinosa* or *Robinia pseudoacacia* during natural succession may promote the development of upper soil horizons on degraded post-mining sites.

Example of post-mining areas

A particular example of environments in which the relationship between species selection and the course of ecosystem restoration can be observed is provided by post-mining spoil heaps. The substrate of external spoil heaps, composed of overburden excavated during coal mining, differs substantially in its biological, chemical, and physical properties from the soils of natural forest ecosystems (Fettweis et al. 2005; Jagodziński et al., 2014). It is characterized, among other features, by low organic matter content, low porosity and water-holding capacity, and often high toxicity (Helingerová et al., 2010; Shrestha & Lal, 2011). Spoil heaps can therefore be regarded as large-scale systems in which the course of natural succession can be observed (Urbanová et al., 2014).

The observed species composition is consistent with earlier recommendations concerning the management of areas affected by industrial activity. As early as the 1950s, based on studies conducted in the Upper Silesian Industrial District, an increase in the proportion of birch, pedunculate, sessile, and red oak, lime, and beech at the expense of Scots pine and Norway spruce was recommended (Latocha, 1989). In subsequent decades, particular emphasis was placed on native tree and shrub species (Latocha, 1989; *Zasady Techniczno−hodowlane Obowiązujące w Państwowym Gospodarstwie Leśnym*, 1953). In the 1970s, the reconstruction of forest stands on post-industrial areas involved, among others, pedunculate oak, sessile oak and red oak, aspen and other poplar species, downy and silver birch, beech, hornbeam, maples, alder, and black locust (Latocha & Hawryś, 1976).

Silver birch is a species characterized by a broad ecological amplitude and resistance to industrial emissions, whereas black and grey alder are classified as pollution-tolerant species with phytomeliorative properties (Latocha, 1989). Alders, birches, aspen, goat willow, and black locust are classified as species forming the preparatory stand phase on post-mining spoil heaps (Zubikowska-Skawinowa, 1965). During the transitional phase, some poplar cultivars, European larch, and red oak can be used alongside pioneer species (Strzelecki & Sobczak, 1972). Black locust was also considered by Morawski (Morawski, 1968) to be highly suitable for afforestation of spoil heaps associated with hard-coal mining. The main woody species reported in the literature as important for spontaneous succession, reclamation, and subsequent reconstruction of vegetation on degraded and post-mining sites are summarized in Table 3. The

table highlights their role in habitat development, successional stage, and characteristics relevant to their use under degraded site conditions.

Table 3. The role of woody species in the reclamation and natural succession of degraded and post-mining sites

Tabela 3. Uloga drvenastih vrsta u rekultivaciji i prirodnoj sukcesiji degradiranih i rudarskim aktivnostima narušenih područja

Tree species	Role / significance on degraded sites	Successional stage / application	Key characteristics	Reference
Acer spp.	Used in stand reconstruction; sycamore maple occurred on the Turów spoil heap	Later stages / stand reconstruction	Supplementing stand species composition	Latocha & Hawryś,1976
Acer pseudoplatanus	Recorded on older parts of the Turów spoil heap	Later stages of succession / stand reconstruction	Occurrence in more developed stands	Latocha & Hawryś, 1976
Alnus glutinosa	One of the most important reclamation species; its proportion increased in young stands on the Turów spoil heap and it was dominant in some stands Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Pioneer species; preparatory stand; initiation of site improvement Early stages of succession	Resistance to pollution; phytomeliorative properties; atmospheric nitrogen fixation; high degree of mycorrhizal colonization Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Latocha 1989; Latocha & Hawryś,1976; Zubikowska-Skawinowa, 1965; Danso et al., 1995; Ostonen et al., 2006 Prach & Pyšek 1994, 2001
Alnus incana	Pollution-tolerant species used in reclamation Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Pioneer species / preparatory stand Early stages of succession	Resistance to pollution; phytomeliorative properties Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Latocha, 1989; Zubikowska-Skawinowa, 1965 Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Betula pendula	One of the most important species in spontaneous succession on post-industrial sites; colonizes post-mining areas Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Pioneer species; early stages of succession; preparatory stand Early stages of succession	Broad ecological amplitude; resistance to industrial emissions; rapid growth; very common in spontaneous succession; high degree of mycorrhizal colonization Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Prach $& Pyšek, 1994, 2001; Woźniak et al., 2003; Latocha, 1989; Ostonen et al., 2006 Faliński ,1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Betula pubescens	Species used in the reclamation of post-	Pioneer species /	Tolerance of harsh conditions; used	Latocha & Hawryś, 1976; Zubikowska-

Tree species	Role / significance on degraded sites	Successional stage / application	Key characteristics	Reference
	industrial and post-mining areas Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	preparatory stand Early stages of succession	together with *B. pendula* Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Skawinowa, 1965 Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Carpinus betulus	Used in stand reconstruction	Later stages / stand reconstruction	Component of the target stand composition	Latocha & Hawryś, 1976
Fagus sylvatica	Indicated as a desirable species for stand reconstruction on industrial sites	Later stages	Species used to promote the restoration of more complex forest communities	Latocha & Hawryś, 1976; Latocha, 1989
Populus spp.	Important pioneer species; spontaneously colonize degraded sites Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Early stages of succession; preparatory stand and transitional phase	Rapid growth; colonization of open habitats; occur in river valleys, abandoned fields, windthrow areas, and burned areas Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Faliński, 1988; Jagodziński et al., 2014; Adamowski & Bomanowska, 2011; Myking et al., 2011; de Chantal & Granström, 2007; Zubikowska-Skawinowa, 1965; Strzelecki & Sobczak 1979 Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Populus tremula	Pioneer species used in reclamation Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Early stages of succession / preparatory stand	Rapid growth and ability to colonize pioneer habitats Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Latocha & Hawryś, 1976; Zubikowska-Skawinowa ,1965 Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Quercus petraea	Used in stand reconstruction on post-industrial sites	Later stages / stand reconstruction	Native species, used in stand reconstruction	Latocha & Hawryś,1976
Quercus robur	Species recommended for stand reconstruction and restoration on industrial sites	Later stages / stand reconstruction	Native species, indicated as desirable in reclamation	Latocha & Hawryś, 1976; Latocha 1989
Quercus rubra	Used in reclamation and stand reconstruction; occurred on the Turów spoil heap	Transitional phase / stand reconstruction	Adaptation to use on post-industrial sites	Latocha & Hawryś, 1976; Strzelecki & Sobczak, 1979; Latocha, 1989
Robinia pseudoacacia	Important colonizing and reclamation species; one of the dominant species on older parts of the Turów spoil heap	Pioneer species / preparatory stand	Rapid growth; high plasticity of the root system; atmospheric nitrogen fixation; potential to improve substrate fertility	DeGomez & Wagner 2001; Morawski, 1968; Latocha & Hawryś, 1976; Zubikowska-Skawinowa, 1965
Salix caprea	Species recommended for the	Preparatory stand	Pioneer species, suitable for	Zubikowska-Skawinowa, 1965;

Tree species	Role / significance on degraded sites	Successional stage / application	Key characteristics	Reference
	reclamation of post-mining spoil heaps Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Early stages of succession	colonizing degraded areas Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Salix spp.	Pioneer species colonizing heavily transformed habitats Main group of pioneer trees in succession on degraded sites	Early stages of succession / preparatory stand	Rapid growth; colonization of pioneer habitats Broad ecological tolerance; rapid growth; ability to colonize open habitats	Faliński, 1988; Jagodziński et al., 2014; Adamowski & Bomanowska, 2011; Myking et al., 2011; de Chantal & Granström, 2007; Zubikowska-Skawinowa, 1965 Faliński, 1990; Prach & Pyšek, 1994, 2001
Tilia spp.	Indicated in recommendations to increase the proportion of broadleaved species	Later stages / stand reconstruction	Native species, component of more complex forest communities	Latocha, 1989; Latocha & Hawryś, 1976
Larix decidua	Species used in the reclamation of post-mining areas	Transitional phase	Suitable for introduction after the pioneer phase	Latocha & Hawryś, 1976; Strzelecki & Sobczak, 1979
Picea abies	In historical recommendations, its proportion was to be reduced in favor of broadleaved species	Not indicated as a preferred reclamation species in the cited recommendations	Reduced proportion compared with broadleaved species	Latocha, 1989
Pinus nigra	Occurred on older parts of the Turów spoil heap	Later stages / stand component	Recorded as a component of older stands	Latocha & Hawryś, 1976
Pinus sylvestris	Species occurring on spoil heaps and used in reclamation, but its significance is assessed in the context of the limitations of monocultures	Succession / reclamation	Tolerance of site conditions; very high degree of mycorrhizal colonization on spoil heaps	Ostonen et al., 2006; Latocha, 1989

From reclamation to ecosystem restoration

Experience gained from post-mining areas can be applied more broadly to other contaminated and degraded sites; however, it should be borne in mind that there is no universal set of species suitable for all such sites. An individual spoil heap may constitute a unique experimental setting, for which the appropriate management approach requires detailed investigation (Strzelecki & Sobczak, 1972). Before making decisions regarding species selection, it is necessary to assess the surrounding conditions, soil type, physicochemical properties of the substrate, and processes occurring in the transformed environment. In the case of contaminated

sites, the type of contaminants, their mobility, and their availability to plants must additionally be taken into account.

Artificial regeneration should be adapted to the mosaic character of the substrate and its spatial variation in site conditions (Harabiš et al., 2013). At the same time, natural succession can serve as an important tool supporting the reclamation process. Combining spontaneous succession with artificial afforestation adapted to site conditions may enhance ecosystem stability and accelerate naturalization processes (Sroka et al., 2018), while also having beneficial effects on plant diversity, soil properties, and ecosystem stability (Vachova et al., 2021).

Consequently, species selection on contaminated and degraded sites should be regarded as the first stage of a long-term ecosystem restoration process rather than as a one-time reclamation measure. A species suitable for this process should not only tolerate the existing conditions but also be capable of growth and reproduction, substrate stabilization, influencing nutrient cycling and soil development, and creating conditions conducive to subsequent stages of succession. In contaminated areas, an additional criterion should be the ability to reduce contaminant mobility, or to promote their accumulation or stabilization, depending on the remediation objectives.

Such an approach makes it possible to integrate species selection, natural succession, phytoremediation, and the restoration of ecosystem functions. The objective should therefore not be merely to introduce trees into a degraded area, but rather to create conditions under which vegetation can gradually assume stabilizing and regenerative functions, ultimately leading to the development of a more complex and self-sustaining ecosystem.

CONCLUSIONS

Chemical degradation of soils should be regarded as a complex disturbance of the soil–plant–microorganism system, involving contaminant mobility, bioavailability, chemical speciation and interactions among elements, rather than solely their total concentrations.

Woody plants are valuable tools for long-term environmental monitoring. Dendromonitoring enables assessment of spatial and temporal changes in soil contamination and may provide information extending beyond conventional soil sampling.

Dendroremediation depends on tree species, contaminant type, soil and substrate properties, pH, tree age and exposure duration. Its effectiveness should therefore be assessed using not only contaminant concentrations or BCF and TF indices, but also biomass production, plant survival, whole-plant accumulation and temporal changes.

From a phytostabilisation perspective, contaminant retention in the root zone may be advantageous; high concentrations in roots should not automatically indicate ineffective remediation.

Species selection for chemically degraded sites should consider both tolerance to adverse conditions and the ability to improve habitat properties and facilitate subsequent vegetation development. Direct assessment of soil and substrate is particularly important on highly transformed post-industrial and post-mining sites, where conventional forest habitat classification may be insufficient.

Pioneer species can initiate ecosystem development by contributing to soil formation, improving microclimatic conditions and facilitating subsequent vegetation establishment. Natural succession and artificial afforestation should therefore be regarded as complementary approaches.

Overall, dendromonitoring, dendroremediation and ecosystem restoration form interconnected components of long-term management of chemically degraded soils. Restoration should aim beyond contaminant reduction or tree establishment towards the recovery of ecosystem functions, ecological stability and long-term self-sustaining ecosystems.

Acknowledgement

This research was funded in whole by the National Science Centre, Poland (Grant no. 2023/51/D/NZ9/00817)

References

1. Adamowski, W., & Bomanowska, A. (2011). Forest Return on an Abandoned Field – Secondary Succession Under Monitored Conditions. *Folia Biologica et Oecologica*, *7*, 49–73. https://doi.org/10.2478/v10107-009-0016-z
2. Balraju, W., Shekhar, M., Pandey, P., Lal, D., Dhyani, R., Bhattacharyya, A., & Sharma, A. (2026). Integrated dendrochemical analyses and standardized environmental indicators for reconstructing historical trace elemental pollution in Asia: a systematic review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *144*, 104523. https://doi.org/10.1016/j.pce.2026.104523
3. Balraju, W., Upadhyay, K. K., Dhyani, R., Joshi, R., Sharma, A., & Tripathi, S. K. (2025). Dendrochemical analysis of heavy metals in Magnolia champaca tree rings in Mizoram, Northeast India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(4), 421. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13903-z
4. Bradshaw, A. (2000). The use of natural processes in reclamation — advantages and difficulties. *Landscape and Urban Planning*, *51*(2–4), 89–100. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00099-2
5. Budzyńska, S., Budka, A., Roszyk, E., Niedzielski, P., & Mleczek, M. (2023). Trace of negative changes in environment recorded in cores of trees growing near busy city roads in Poznań, Poland – dendromonitoring of urban pollution. *Ecological Indicators*, *149*, 110198. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110198
6. Budzyńska, S., Izdebska, A., Bierła, K., Budka, A., Niedzielski, P., Mocek-Płóciniak, A., Starzyk, J., & Mleczek, M. (2024). Temporal arsenic form changes dynamics and accumulation patterns in Tilia cordata Mill. seedlings: Insights into metalloid transformation and tolerance mechanisms in trees. *Chemosphere*, *356*, 141925. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141925
7. Budzyńska, S., Krzesłowska, M., Niedzielski, P., Goliński, P., & Mleczek, M. (2017). Arsenite phytoextraction and its influence on selected nutritional elements in one-year-old tree species. *Microchemical Journal*, *133*, 530–538. https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.04.022
8. Budzyńska, S., Krzesłowska, M., Niedzielski, P., Goliński, P., & Mleczek, M. (2019). Arsenate phytoextraction abilities of one-year-old tree species and its effects on the nutritional element content in plant organs. *International Journal of Phytoremediation*, *21*(10), 1019–1031. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1594684

9. Budzyńska, S., Kubiak, A., Szostek, M., Budka, A., Gąsecka, M., Niedzielski, P., Zheng, L., & Mleczek, M. (2022). Trees and shrubs from a post-industrial area high in calcium and trace elements: the potential of dendroremediation. *International Journal of Phytoremediation*, *24*(5), 493–506. https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1954877
10. Budzyńska, S., Mleczek, P., Kosowska, J., Niedzielski, P., Budka, A., Roszyk, E., & Mleczek, M. (2026). Urban Trees as Environmental Archives: Multi-Decadal Trends in Tree-Ring Chemistry and Growth of <scp> *Picea abies* </scp> and <scp> *Quercus robur* </scp> Along Major Roads in Poznań, Poland. *Land Degradation & Development*. https://doi.org/10.1002/ldr.70714
11. Budzyńska, S., Mleczek, P., Szostek, M., Goliński, P., Niedzielski, P., Kaniuczak, J., Rissmann, I., Rymaniak, E., & Mleczek, M. (2019). Phytoextraction of arsenic forms in selected tree species growing in As-polluted mining sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *54*(9), 933–942. https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1609322
12. Budzyńska, S., Niedzielski, P., Bierła, K., & Mleczek, M. (2024). Natural restoration of arsenic-contaminated environment with Quercus robur L. and Tilia cordata Mill.: 5-Year longitudinal study of dendroremediation dynamics. *Journal of Environmental Management*, *369*, 122315. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122315
13. Budzyńska, S., Niedzielski, P., & Mleczek, M. (2021). Time-dependent changes of arsenic and its selected forms in a hydroponic experiment with Quercus robur L. *Journal of Hazardous Materials*, *405*, 124244. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124244
14. Budzyńska, S., Nowicka, M., Nguyen, V., Salam, M. M. A., Wojciechowska, Z., & Mleczek, M. (2025). Arsenic uptake and accumulation in trees: Evaluating potential of dendroremediation for contaminated environments. *Science of The Total Environment*, *998*, 180296. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180296
15. Budzyńska, S., Rudnicki, K., Budka, A., Niedzielski, P., & Mleczek, M. (2024). Dendroremediation of soil contaminated by mining sludge: A three-year study on the potential of Tilia cordata and Quercus robur in remediation of multi-element pollution. *Science of The Total Environment*, *944*, 173941. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173941
16. Casper, B. B., & Jackson, R. B. (1997). Plant Competition Underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *28*(1), 545–570. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.545
17. Chen, H. Y. H., & Brassard, B. W. (2013). Intrinsic and Extrinsic Controls of Fine Root Life Span. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *32*(3), 151–161. https://doi.org/10.1080/07352689.2012.734742
18. Chief Inspectorate for Environmental Protection. (2026). *Monitoring of the Chemistry of Arable Soils*. Https://Gios.Gov.Pl/Chemizm_gleb/.
19. Comas, L., Bouma, T., & Eissenstat, D. (2002). Linking root traits to potential growth rate in six temperate tree species. *Oecologia*, *132*(1), 34–43. https://doi.org/10.1007/s00442-002-0922-8
20. Connell, J. H., & Slatyer, R. O. (1977). Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization. *The American Naturalist*, *111*(982), 1119–1144.
21. Czerepko, J. (2008). A long-term study of successional dynamics in the forest wetlands. *Forest Ecology and Management*, *255*(3–4), 630–642. https://doi.org/10.1016/j.

foreco.2007.09.039
22. Danso, S. K. A., Zapata, F., & Awonaike, K. O. (1995). Measurement of biological N2 fixation in field-grown *Robinia pseudoacacia* L. *Soil Biology and Biochemistry*, *27*(4–5), 415–419. https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)98612-R
23. de Chantal, M., & Granström, A. (2007). Aggregations of dead wood after wildfire act as browsing refugia for seedlings of *Populus tremula* and *Salix caprea*. *Forest Ecology and Management*, *250*(1–2), 3–8. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.035
24. DeGomez, T., & Wagner, M. R. (2001). Comprehensive Crop Reports Culture and Use of Black Locust. *Hort Technology*, (2), 279–288. https://journals.ashs.org
25. Dobrzańska, J., Lochyński, P., Kalbarczyk, R., & Ziemiańska, M. (2021). Challenges in the Application of Dendrochemistry in Research on Historical Environmental Pollution in an Old Copper Mining Area. *Forests*, *12*(11), 1505. https://doi.org/10.3390/f12111505
26. Drzewiecka, K., Piechalak, A., Goliński, P., Gąsecka, M., Magdziak, Z., Szostek, M., Budzyńska, S., Niedzielski, P., & Mleczek, M. (2019). Differences of Acer platanoides L. and Tilia cordata Mill. Response patterns/survival strategies during cultivation in extremely polluted mining sludge – A pot trial. *Chemosphere*, *229*, 589–601. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.051
27. Du, Z., Jiang, Y., Wang, S., Xiao, J., Budzyńska, S., & Chen, G. (2026). Global synthesis reveals how initial concentrations, metal types, and acidity control woody plant phytoremediation efficacy. *Communications Earth & Environment*. https://doi.org/10.1038/s43247-026-03637-2
28. Dutta, R. K., & Agrawal, M. (2001). Litterfall, litter decomposition and nutrient release in five exotic plant species planted on coal mine spoils. *Pedobiologia*, *45*(4), 298–312. https://doi.org/10.1078/0031-4056-00088
29. Faliński, J. B. (1988). Succession, regeneration and fluctuation in the Białowieża forest (NE poland). *Vegetatio*, *77*(1–3), 115–128. https://doi.org/10.1007/BF00045757
30. Faliński, J. B. (1990). *Wierzby. Salix fragilis L., Salix alba L.* (Stefan. R. Białobok & P. A. Nauk. I. Dendrologii, Eds.; Vol. 13). Państwowe Wydawnictwo Naukowe. http://rcin.org.pl/id/dlibra/publication/154522
31. Faliński, J. B. (1997). Declines in populations of *Salix caprea* L.during forest regeneration after strong herbivore pressure. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, *66*(1), 87–109. https://doi.org/10.5586/asbp.1997.014
32. Fettweis, U., Bens, O., Hüttl, R.F. (2005). Accumulation and propertiesof soil organic carbon at reclaimed sites in the Lusatian lignite miningdistrict afforested with *Pinus* sp. *Geoderma, 129,* 81–91. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.034
33. Górska, M. (2024). Effect of heavy metal pollution on the wood structure and tracheidcharacteristics in Scots pine trees from flotation tailings. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*, *128*, 57–68. https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2078
34. Górska, M., & Roszyk, E. (2019). Wood structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on flotation tailings. *Folia Forestalia Polonica*, *61*(2), 112–122. https://doi.org/10.2478/ffp-2019-0011
35. Gravel, D., Canham, C. D., Beaudet, M., & Messier, C. (2010). Shade tolerance, canopy gaps and mechanisms of coexistence of forest trees. *Oikos*, *119*(3), 475–484. https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17441.x
36. Harabiš, F., Tichanek, F., & Tropek, R. (2013). Dragonflies of freshwater pools in lignite spoil heaps: Restoration management, habitat structure and conservation value.

Ecological Engineering, *55*, 51–61. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.007
37. Helingerová, M., Frouz, J., Šantrůčková, H. (2010). Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post-mining sites near Sokolov (Czech Republic). *Ecological Engineering, 36,* 768–776. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.01.007
38. Hernández, E. I., Vilagrosa, A., Pausas, J. G., & Bellot, J. (2010). Morphological traits and water use strategies in seedlings of Mediterranean coexisting species. *Plant Ecology*, *207*(2), 233–244. https://doi.org/10.1007/s11258-009-9668-2
39. Jagodziński, A.M., Kałucka, I., Horodecki, P., Oleksyn, J. (2014). Above-ground biomass allocation and accumulation in a chronosequenceof young *Pinus sylvestris* stands growing on a lignite mine spoil heap. *Dendrobiology, 72,* 139–150. http://dx.doi.org/10.12657/denbio.072.012
40. Jiao, W., Wu, M., Hu, T., & Qi, C. (2026). Global ecological risk assessment of soil contamination by heavy metal(loid)s based on machine learning. *Journal of Environmental Management*, *398*, 128435. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128435
41. Józefowska, A., Woś, B., & Pietrzykowski, M. (2016). Tree species and soil substrate effects on soil biota during early soil forming stages at afforested mine sites. *Applied Soil Ecology*, *102*, 70–79. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.02.012
42. Khan, A. H. A., Budzyńska, S., Zine, H., Vázquez-Núñez, E., Talpur, S. A., Hassan, M., & Barros, R. (2025). Dendroremediation: A sustainable nature-based solution for management of abandoned mining sites and brownfields. *Journal of Cleaner Production*, *501*, 145342. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145342
43. Kistowski, M. (2008). Koncepcja równowagi krajobrazu-mity i rzeczywistość. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, (21), 81–91.
44. Kowalkowski, W., Jagiełło, R., Baranowska, M., & Barzdajn, W. (2025). Silver fir restitution: The role of seedling stock type in adapting to various environmental conditions. *Journal of Forest Science*, *71*(7), 358–371. https://doi.org/10.17221/28/2025-JFS
45. Krzaklewski, W., Pająk, M., Pietrzykowski, M., & Wójcik, J. (2016). Rozwój metod rekultywacji leśnej zwałowiska zewnętrznego Pola Eksploatacyjnego Bełchatów. In M. Sierpiński (Ed.), *Węgiel brunatny gwarantem bezpieczeństwa energetycznego* (pp. 285–292). Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST.
46. Krzesłowska, M., Goliński, P., Szostek, M., Mocek-Płóciniak, A., Drzewiecka, K., Piechalak, A., Ilek, A., Neumann, U., Timmers, A. C. J., Budzyńska, S., Mleczek, P., Suski, S., Woźny, A., & Mleczek, M. (2021). Morphology and Physiology of Plants Growing on Highly Polluted Mining Wastes. In *Phytoremediation for Environmental Sustainability* (pp. 151–200). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5621-7_7
47. Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., & Cerda, A. (2019). Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, *216*, 449–462. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.066
48. Lamparska-Wieland, M., & Waga, J. M. (2003). Znaczenie hałd poeksploatacyjnych w krajobrazie Górnego Śląska. *Archives of Environmental Protection*, *29*(No 2), 107–113. http://journals.pan.pl/Content/123736/PDF/13_AE_VOL_29_2003_Lamparska_Wieland_Znaczenie.pdf
49. Latocha, E. (1989). Możliwości i sposoby zagospodarowania terenów leśnych w okręgach przemysłowych. In S. Białobok (Ed.), *Nasze drzewa leśne. Życie drzew w*

skażonym środowisku. Monografie popularnonaukowe (Vol. 21, pp. 443–466). Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
50. Latocha, E., & Hawryś, Z. (1976). Wzrost i rozwój introdukowanych gatunków drzew w rejonach przemysłowych . *Sylwan*, *2*, 29–38.
51. Lyubenova, A., Baranowska, M., Menkis, A., Davydenko, K., Nowakowska, J., Borowik, P., & Oszako, T. (2024). Prospects for Oak Cultivation in Europe Under Changing Environmental Conditions and Increasing Pressure from Harmful Organisms. *Forests*, *15*(12), 2164. https://doi.org/10.3390/f15122164
52. Mahmud, Md. N., Al Kafi, A., Sharmin, S., Muniza, N. T., Tahara, T., Raidah, R., Batool, R., & Islam, Md. M. (2026). Phytoremediation of contaminated soils: Current trends and future prospects. *Earth Critical Zone*, *3*(1), 100072. https://doi.org/10.1016/j.ecz.2026.100072
53. Matuszkiewicz, J. M. (2008). *Potential natural vegetation of Poland* . Https://Www.Igipz.Pan.Pl/Roslinnosc-Potencjalna-Zgik.Html.
54. Mazurek, S., Derkowska, K., Januszewska, A., & Sroga, C. (2025). Towards sustainable resource management: A national assessment of historical mining waste in Poland. *Resources Policy*, *102*, 105482. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105482
55. Mleczek, M., Budka, A., Gąsecka, M., Budzyńska, S., Drzewiecka, K., Magdziak, Z., Rutkowski, P., Goliński, P., & Niedzielski, P. (2022). Copper, lead and zinc interactions during phytoextraction using Acer platanoides L.—a pot trial. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(10), 27191–27207. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23966-x
56. Mleczek, M., Gąsecka, M., Kaniuczak, J., Goliński, P., Szostek, M., Magdziak, Z., Rutkowski, P., & Budzyńska, S. (2018). Dendroremediation: The Role of Trees in Phytoextraction of Trace Elements. In *Phytoremediation* (pp. 267–295). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99651-6_12
57. Mleczek, M., Goliński, P., Waliszewska, B., Mocek, A., Gąsecka, M., Zborowska, M., Magdziak, Z., Cichy, W. J., Mazela, B., Kozubik, T., Mocek-Płóciniak, A., Moliński, W., & Niedzielski, P. (2018). The importance of substrate compaction and chemical composition in the phytoextraction of elements by *Pinus sylvestris* L. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *53*(11), 1029–1038. https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1471116
58. Mleczek, M., Rutkowski, P., Kaniuczak, J., Szostek, M., Budka, A., Magdziak, Z., Budzyńska, S., Kuczyńska-Kippen, N., & Niedzielski, P. (2019). The significance of selected tree species age in their efficiency in elements phytoextraction from wastes mixture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(7), 3579–3594. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1996-0
59. Mleczek, M., Rutkowski, P., Niedzielski, P., Goliński, P., Gąsecka, M., Kozubik, T., Dąbrowski, J., Budzyńska, S., & Pakuła, J. (2016). The role of selected tree species in industrial sewage sludge/flotation tailing management. *International Journal of Phytoremediation*, *18*(11), 1086–1095. https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1183579
60. Morawski, S. (1968). Afforestation of coal tips. *Sylwan*, *112*(4), 59–64.
61. Mu, H. (2025). Research on the disaster mechanism and control technology of large section high waste dump slope in open pit mines. *Scientific Reports*, *15*(1), 8909. https://doi.org/10.1038/s41598-025-93268-y
62. Mudrák, O., Frouz, J., & Velichová, V. (2010). Understory vegetation in reclaimed and unreclaimed post-mining forest stands. *Ecological Engineering*, *36*(6), 783–790.

https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.02.003
63. Mukhtarov, S., Selcuk, H., Aziziov, M., Jabiyev, F., & Aslan, D. H. (2026). Do geo-political risks affect environmental degradation in Poland? New evidence from an autometrics-based framework. *Environmental Economics and Policy Studies*. https://doi.org/10.1007/s10018-026-00469-4
64. Myking, T., Bohler, F., Austrheim, G., & Solberg, E. J. (2011). Life history strategies of aspen (Populus tremula L.) and browsing effects: a literature review. *Forestry*, *84*(1), 61–71. https://doi.org/10.1093/forestry/cpq044
65. Ostonen, I., Lõhmus, K., Alama, S., Truu, J., Kaar, E., Vares, A., Uri, V., & Kurvits, V. (2006). Morphological adaptations of fine roots in scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and black alder (*Alnus glutinosa* (l.) Gaertn.) stands in recultivated areas of oil shale mining and semicoke hills. *Oil Shale*, *23*(2), 187–202. https://doi.org/10.3176/oil.2006.2.11
66. Panka, S., Sierota, Z., Pietka, S., Baranowska, M., & Meres, B. (2025). Growth potential and yield of Thuja plicata Donn ex D. Don in Northeastern Poland: A 130-year perspective. *Sylwan*, *169*(6), 381–402.
67. Pérez-Aguilar, L. Y., López-Osorio, R. F., Zambrano-Medina, Y. G., Avila-Aceves, E., Monjardin-Armenta, S. A., Plata-Rocha, W., Quintero-Morales, M. A., Mora-Ramírez, M. A., & Bernal-Guadiana, R. (2026). Soil Degradation: Causes, Impacts, and Mitigation Strategies in the Context of Climate Change. In E. Saljnikov, L. Mueller, A. Lavrishchev, & F. Eulenstein (Eds.), *Advances in Understanding Soil Degradation. Innovations in Landscape Research* (pp. 3–36). Springer, Chem. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00704-9_1
68. Popek, R., Przybysz, A., Łukowski, A., Baranowska, M., Bułaj, B., Hauke–Kowalska, M., Jagiełło, R., Korzeniewicz, R., Moniuszko, H., Robakowski, P., Zadworny, M., & Kowalkowski, W. (2025). Shields against pollution: phytoremediation and impact of particulate matter on trees at Wigry National Park, Poland. *International Journal of Phytoremediation*, *27*(4), 448–461. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2426771
69. Prach, K., & Pyšek, P. (1994). Spontaneous Establishment of Woody Plants in Central European Derelict Sites and their Potential for Reclamation. *Restoration Ecology*, *2*(3), 190–197. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1994.tb00066.x
70. Prach, K., & Pyšek, P. (2001). Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe. *Ecological Engineering*, *17*(1), 55–62. https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00132-4
71. Prach, K., Pyšek, P., & Bastl, M. (2001). Spontaneous vegetation succession in human-disturbed habitats: A pattern across seres. *Applied Vegetation Science*, *4*(1), 83–88. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2001.tb00237.x
72. Rahmonov, O., Krzysztofik, R., Środek, D., & Smolarek-Lach, J. (2020). Vegetation- and Environmental Changes on Non-Reclaimed Spoil Heaps in Southern Poland. *Biology*, *9*(7), 164. https://doi.org/10.3390/biology9070164
73. Robakowski, P., Jagiełło, R., Baranowska, M., Bułaj, B., Dering, M., Hauke-Kowalska, M., Korzeniewicz, R., Łukowski, A., Szmyt, J., Zadworny, M., Wierzbicka, A., Popek, R., Przybysz, A., & Kowalkowski, W. (2025). Climate warming, ecological dynamics and nature conservation drive tree diversity in Wigierski National Park, Poland. *Dendrobiology*, *94*, 73–88. https://doi.org/10.12657/denbio.094.005
74. Schenk, H. J. (2006). Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology*, *94*(4), 725–739. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01124.x

75. Sensuła, B., & Fagel, N. (2023). Analysis of Trace Elements in Tree Rings of Pines Growing Nearby Steelwork in Southern Poland during the Industrial and Post-Industrial Periods. *Forests*, *14*(5), 964. https://doi.org/10.3390/f14050964
76. Sensuła, B. M. (2016). δ13C and Water Use Efficiency in the Glucose of Annual Pine Tree Rings as Ecological Indicators of the Forests in the Most Industrialized Part of Poland. *Water, Air, & Soil Pollution*, *227*(2), 68. https://doi.org/10.1007/s11270-016-2750-1
77. Sensuła, B., Wilczyński, S., Monin, L., Allan, M., Pazdur, A., & Fagel, N. (2017). Variations of tree ring width and chemical composition of wood of pine growing in the area nearby chemical factories. *Geochronometria*, *44*(1), 226–239. https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0064
78. Sharma, P., Singh, S. P., & Tong, Y. W. (2022). Phytoremediation of metals: Bioconcentration and translocation factors. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 19–37). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99907-6.00002-5
79. Shrestha RK, Lal R. 2011. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. Geoderma 161: 168–176. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.015
80. Sroka, K., Chodak, M., Klimek, B., & Pietrzykowski, M. (2018). Effect of black alder (*Alnus glutinosa*) admixture to Scots pine (*Pinus sylvestris*) plantations on chemical and microbial properties of sandy mine soils. *Applied Soil Ecology*, *124*, 62–68. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.031
81. Strzelecki, W., & Sobczak, R. (1972). *Zalesianie nieużytków i gruntów trudnych do odnowienia*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
82. Świątek, B., Kraj, W., & Pietrzykowski, M. (2024). Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(1), 52. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12134-4
83. Urbanová, M., Šnajdr, J., Brabcová, V., Merhautová, V., Dobiášová, P., Cajthaml, T., Vaněk, D., Frouz, J., Šantrůčková, H., Baldrian, P. (2014). Litter decomposition along a primary post-mining chronosequence. *Biology and Fertility of Soils, 50*, 827–837. https://doi.org/10.1007/s00374-014-0905-z
84. Vachova, P., Vach, M., Skalicky, M., Walmsley, A., Berka, M., Kraus, K., Hnilickova, H., Vinduskova, O., & Mudrak, O. (2021). Reclaimed Mine Sites: Forests and Plant Diversity. *Diversity*, *14*(1), 13. https://doi.org/10.3390/d14010013
85. Wdowczyk, A., Tomczyk, P., Szymańska-Pulikowska, A., Wiatkowska, B., & Rosik-Dulewska, C. (2023). Copper and cadmium content in Polish soil: Analysis of 25-year monitoring study. *Land Degradation & Development*, *34*(16), 4857–4868. https://doi.org/10.1002/ldr.4814
86. Woźniak, G., Pasierbiński, A., & Rostański, A. (2003). The diversity of spontaneous woodland vegetation on coals mineheaps ofupper-silesian industrial region. *Archives of Environmental Protection*, *29(2)*, 93–105.
87. Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., & Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*, *15*(1), 18–27. https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3
88. Zając, E., Smreczak, B., Skalski, T., Oleszczuk, R., Ukalska-Jaruga, A., & Scharenbroch, B. C. (2025). Changes in Soil Organic Carbon Stocks and Chemical Proper-

ties in Organogenic Soils Under Long-Term Agricultural Use in Central Europe, Poland. *Land Degradation & Development*, *36*(11), 3756–3768. https://doi.org/10.1002/ldr.5597

89. *Zasady techniczno−hodowlane obowiązujące w Państwowym Gospodarstwie Leśnym*. (1953). PWRiL.
90. Zavala, M. A., Espelta, J. M., Caspersen, J., & Retana, J. (2011). Interspecific differences in sapling performance with respect to light and aridity gradients in Mediterranean pine–oak forests: implications for species coexistence. *Canadian Journal of Forest Research*, *41*(7), 1432–1444. https://doi.org/10.1139/x11-050
91. Zubikowska-Skawinowa, L. (1965). Dobór roślinności dla przedplonowego zagospodarowania zwałowisk kopani węgla brunatnego „Turów". In *Biuletyn ZBN GOP PAN* (Vol. 5).

UPUTSTVO ZA AUTORE

Časopis Erozija objavljuje radove iz uže naučne oblasti ekološki inženjering u zaštiti zemljišnih i vodnih resursa. Radovi su usmereni na oblast upravljanja bujičnim slivovima, zaštitu zemljišta i voda od degradacije i prevenciju od prirodnih nepogoda sa aspekta bioloških, ekoloških, ekonomskih i društvenih posledica. Tematski se izdvajaju: erozija zemljišta, integralno uređenje bujičnih slivova, smanjenje rizika i prevenciju od bujičnih poplava, šumske melioracije i melioracije zemljišta, transportni i sedimentacioni procesi u bujičnim slivovima, zaštita zemljišta i voda od degradacije, odlučivanje u zaštiti zemljišnih i vodnih resursa, ekonomski i ekološki aspekti uređenja bujičnih slivova i dr.

Časopis Erozija objavljuje sledeće kategorije naučnih radova: **originalan naučni rad** (rad u kome se prikazuju prethodno neobjavljeni rezultati sopstvenih istraživanja); **pregledni rad** (rad koji sadrži originalan, detaljan i kritički prikaz istraživačkog problema u kome je autor ostvario određeni doprinos); **kratko ili prethodno saopštenje** (originalni naučni rad manjeg obima ili preliminarnog karaktera); **naučna kritika**, odnosno polemika.

Časopis Erozija objavljuje i: **stručni rad** (prilog u kome se nude iskustva korisna za unapređenje profesionalne prakse, ali koja nisu nužno zasnovana na naučnom metodu) i **prikaz** (knjige, računarskog programa, slučaja, naučnog događaja i sl.).

Kategoriju članka mogu predlagati recenzenti i članovi uredništva, ali odgovornost za kategorizaciju snosi isključivo glavni urednik.

Časopis objavljuje radove najmanje jedanput godišnje (oktobar). Rok za predaju radova je 20. juli tekuće godine. Po potrebi, časopis objavljuje radove i dva puta godišnje pri čemu je drugi broj tematski određen.

Radovi se štampaju na srpskom i engleskom jeziku. Ukoliko je rad pisan na srpskom, obavezno mora da sadrži apstrakt i ključne reči na engleskom jeziku, a naslov rada i naslove priloga (slike, tabele, grafikoni, šeme i dr.) dvojezično napisane. Radovi štampani na engleskom imaju apstrakt i ključne reči na srpskom jeziku, a naslov rada i naslove priloga dvojezične. Za autore kojima srpski nije maternji jezik ceo rad se štampa na engleskom jeziku.

Naslovna strana

Naslov rada treba da bude kratak, koncizan i da izrazi suštinu rada. Piše se velikim slovima, na srpskom i engleskom jeziku, podebljano (bold), veličina slova (Font Size) 12 i centrirano (Center).
Autori - Ime i prezime autora se piše centrirano (Center) ispod naslova rada, veličina slova (Font Size) 12 (mala slova, bold).
Ispod imena autora navesti zvaničan naziv institucije (afilijacija) u kojoj je autor zaposlen. Ako je autora više, a neki potiču iz iste ustanove, mora se, posebnim oznakama naznačiti iz koje od navedenih ustanova potiče svaki od navedenih autora.
Pored prezimena autora navesti i identifikacioni broj autora ID, ORCID.
Autora odgovornog za korespodenciju označiti dodavanjem zvezdice (*) pored imena. E-adresa autora navedenog za korespodenciju daje se u fusnoti na prvoj stranici članka.
Izvod/Abstract - treba da sadrži maksimalno 250 reči. Piše se dvojezično, na srpskom i en-

gleskom jeziku. U izvodu koncizno navesti predmet istraživanja, korišćene metode, rezultate i zaključke istraživanja. U ovom delu ne treba navoditi reference.

Ključne reči daju se neposredno ispod apstrakta i na jeziku apstrakta (4-8 reči).

Struktura rada

Osnovna poglavlje originalnog naučnog rada su: **UVOD, MATERIJAL I METODE, REZULTATI, DISKUSIJA I ZAKLJUČCI.** Kod ostalih kategorija radova, pojedina poglavlja mogu biti modifikovana ili izostavljena iz strukture rada.

U uvodu se daju osnovne smernice rada. Materijal i metode su deo u kome se opisuju primenjene metode i tehnike. U poglavlju rezultati iznose se podaci dobijeni ispitivanjima na koje se rad odnosi, a u diskusiji autor svoja istraživanja dovodi u vezu sa već postignutim rezultatima u datoj oblasti odnosno sa predmetom rada, mogućnostima za dalja istraživanja, otkriva teoretske i praktične implikacije svojih otkrića i ukazuje na nedovoljno ispitane aspekte i tvrdnje koje zahtevaju dodatna ispitivanja. U zaključku se taksativno iznose rezultati istraživanja, tvrdnje zasnovane na dobijenim rezultatima, stavovi, preporuke i slično.

U okviru pojedinih poglavlja (Materijal i metode, Rezultati i Diskusija) mogu postojati podnaslovi prvog i drugog reda (mala slova, bold).

Tabele, grafikoni, slike i crteži treba bitno da doprinesu boljem razumevanju i interpretaciji rezultata rada. Označavaju se rednim brojem i naslovom na srpskom i engleskom sa redosledom u zavisnosti od jezika na kome je rad pisan. Dostavljaju se u posebnom prilogu. U tekstu je potrebno naznačiti mesto na kome će biti štampani navođenjem naslova ili druge oznake. Fotografije i grafikoni se prilažu u nekom od standardnih formata (.tif, .jpg, ili .gif), u rezoluciji najmanje 300 dpi, poželjno 600 dpi. Naslov se piše veličinom slova 11pt, kurzivom (italic) i centrirano (center). Između naslova na dva jezika ne ostavlja se razmak. Razmak između naslova i tabele, slike i dr. iznosi 6pt. Tekst u tabelama piše se veličinom slova 11pt (10pt za tabele veće veličine).

Zahvalnica

Zahvalnica treba da sadrži naziv i broj projekta, odnosno naziv programa u okviru koga je rad nastao, kao i naziv institucije koja je finansirala projekat ili program.

LITERATURA - Samo reference navedene u tekstu navode se u odeljku Literatura. Za citiranje literature koristiti stil APA-Priručnik za publikovanje, Američko psihološko društvo (http://www.apastyle.org). Reference se numerišu i navode po abecednom redu, prema prezimenu prvog autora. U popisu referenci, svi navodi su na izvornom jeziku citiranog rada, odnosno reference se ne prevode na jezik rada. U spisku literature navesti DOI broj za one reference za koje on postoji.

Primeri:

Članak u časopisu:

Polovina, S., Radić, B., Ristić, R. & Milčanović V. (2024). Application of Remote Sensing for Identifying Soil Erosion Processes on a Regional Scale: An Innovative Approach to Enhance the Erosion Potential Model. Remote Sensing. 2024; 16(13):2390. https://doi.org/10.3390/rs16132390. U tekstu: (Polovina et al., 2024)

Erić, R., Đukić, V., & Anđelić, N. (2019). Poređenje metoda Clark-ovog i Snyder-ovog jediničnog hidrograma za modeliranje površinskog oticaja. Erozija, 45, 31-46. https://doi.org/10.5937/erozija1945031E. U tekstu: (Erić i sar., 2019)

Knjiga, monografska publikacija:
Zlatić, M., Todosijević, M., Lazarević, K. & Momirović, N. (2022). Natural and Socio-Economic Effects of Erosion and Its Control in Serbia. u: Li, R., Napier, T.L., El-Swaify, S.A., Sabir, M., Rienzi, E. [ur.] Global Degradation of Soil and Water Resources, Singapore: Springer Nature Singapore, 399-414. U tekstu: (Zlatić et al., 2022)

Dragović, N. & Vulević, T. (2020). Soil Degradation Processes, Causes, and Assessment Approaches. u: Leal Filho Walter, Azul Anabela Marisa, Brandli Luciana, Lange Salvia Amanda, Wall Tony [ur.] Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals, Cham: Springer International Publishing. U tekstu: (Dragović & Vulević, 2020)

Rad objavljen na skupu:
Zlatanović, N., Drobnjak, A., Milovanović, I., Puzović, R. (2015). Application of open source GIS algorithms for erosion mapping. u: 21th Conference and Exhibition, YUinfo conference, 08.-11.03.2015., Kopaonik, 131-134. U tekstu: (Zlatanović et al. 2015)

Bez autora:
Izvore bez autora navoditi prema prvom slovu naslova rada a ispred naslova se navodi godina izdanja.
(2018) Zakon o vodama. *Službeni glasnik RS*, br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. zakon. U tekstu: (2018)

Web stanica:
FAO (2020): FAO Soils Portal Key definitions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), https://www.fao.org/soils-portal/en/ . U tekstu: (FAO, 2020)

OSTALE NAPOMENE
Uredništvu se dostavljaju radovi u elektronskom formi (e-mail) urađeni u MS Word-u, formata A4 sa marginama 2,5cm sa posebnim prilozima (tabele, slike, grafikoni i dr,). Merne jedinice se izražavaju u Internacionalnom sistemu jedinica (SI). Matematičke formule se rade u editoru formula u Word-u ili MathType-u.
Uređivački odbor određuje recenzente u odnosu na temu rada. Svim radovima se dodeljuju dve nezavisne recenzije.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The journal ***Erozija*** publishes papers in the specialized scientific field of ecological engineering for soil and water resources protection. The papers focus on management in torrential catchments, soil and water protection against degradation, and the prevention of natural hazards from biological, ecological, economic, and social perspectives. The main thematic areas include: soil erosion; integrated management of torrential catchments; risk reduction and prevention of flash floods; forest and land reclamation; transport and sedimentation processes in torrential catchments; protection of soil and water from degradation; decision-making in soil and water resource protection; economic and ecological aspects of torrential watershed management, among others.

The journal ***Erozija*** publishes the following categories of scientific papers: **original scientific papers** (papers presenting previously unpublished results of the authors' own research); **review papers** (papers containing an original, detailed, and critical overview of a research problem to which the author has made a specific contribution); **short or preliminary communications** (original scientific papers of a smaller scope or preliminary character); and **scientific critiques or polemics**.

The journal ***Erozija*** also publishes: **professional papers** (contributions offering experience useful for improving professional practice, though not necessarily based on the scientific method) and **reviews** (of books, software, case studies, scientific events, etc.).

The article category may be proposed by reviewers and members of the Editorial Board; however, full responsibility for the final categorization rests solely with the Editor-in-Chief.

The journal publishes papers at least once a year (in October). The submission deadline is July 20 of the current year. If necessary, the journal may publish two issues per year, with the second issue being thematically defined.

Papers are published in Serbian and English. If a paper is written in Serbian, it must include an abstract and keywords in English, while the title of the paper and the titles of appendices (figures, tables, graphs, schemes, etc.) must be presented bilingually. Papers published in English must include an abstract and keywords in Serbian, and the title and captions must be bilingual. For authors whose native language is not Serbian, the entire paper is published in English.

TITLE PAGE

The title of the paper should be short, concise, and clearly reflect the essence of the work. It should be written in capital and bold letters, in both Serbian and English, font size 12, and centered.

Authors – The first and last name of the author(s) should be written centered below the title, in font size 12 (lowercase letters, bold). Below the author's name, state the official name of the institution (affiliation) where the author is employed. If there are multiple authors and some are from the same institution, special markers must be used to indicate which of the listed institutions each author is affiliated with. The author's identification number (ID), ORCID, should be provided next to the author's surname.

The corresponding author should be indicated by adding an asterisk (*) next to the name. The e-mail address of the corresponding author should be provided in a footnote on the first page of the article.

Abstract – The abstract must contain a maximum of 250 words. It should be written bilingually, in Serbian and English. The abstract should concisely state the subject of the research, the methods used, the results, and the conclusions of the research. References should not be cited in this section.

Keywords should be provided immediately below the abstract, in the language of the abstract (4–8 words).

STRUCTURE OF THE PAPER

The main sections of an original scientific paper are: **INTRODUCTION, MATERIALS AND METHODS, RESULTS, DISCUSSION,** and **CONCLUSIONS**. For other categories of papers, certain sections may be modified or omitted from the structure of the manuscript.

The Introduction provides the basic framework and background of the study. The Materials and Methods section describes the applied methods and techniques. The Results section presents the data obtained from the research to which the paper refers. In the Discussion, the author relates the research findings to previously achieved results in the given field or to the subject of the study, considers possibilities for further research, identifies theoretical and practical implications of the findings, and points out insufficiently examined aspects and statements that require additional investigation. The Conclusions section lists the research results in a clear and concise manner, including statements based on the obtained results, positions, recommendations, and similar outcomes.

Within certain sections (Materials and Methods, Results, and Discussion), first- and second-level subheadings may be used (lowercase letters, bold, font size 12, left aligned).

Tables, graphs, figures, and drawings should significantly contribute to a better understanding and interpretation of the research results. They should be marked with a serial number and a title in Serbian and English, with the order depending on the language in which the paper is written. They should be submitted as a separate attachment. In the text, the place where they will be printed must be indicated by stating the title or another appropriate reference.

Photographs and graphs should be submitted in one of the standard formats (.tif, .jpg, or .gif), with a resolution of at least 300 dpi, preferably 600 dpi. The title font size should be 11pt, italic, centered, without spacing between the titles in the two languages, and with 6pt spacing between the title and the table, figure, etc. The font size within tables should be 11pt (10pt for larger tables).

Acknowledgment

The acknowledgment should include the name and number of the project, or the name of the program under which the paper was produced, as well as the name of the institution that funded the project or program.

REFERENCES - Only references cited in the text should be listed in the References section. For citation formatting, use the APA style – *Publication Manual of the American Psychological Association* (http://www.apastyle.org). References should be numbered and listed in alphabetical order according to the surname of the first author (font size 11pt). In the reference list, all entries must be given in the original language of the cited work; references are not translated into the language of the articles. The DOI number should be provided for all references for which it is available.

Example of citations:

Journal article:

Polovina, S., Radić, B., Ristić, R. & Milčanović V. (2024). Application of Remote Sensing for Identifying Soil Erosion Processes on a Regional Scale: An Innovative Approach to Enhance the Erosion Potential Model. Remote Sensing. 2024; 16(13), 2390. https://doi.org/10.3390/rs16132390. U tekstu: (Polovina et al., 2024)

Erić, R., Đukić, V., & Anđelić, N. (2019). Poređenje metoda Clark-ovog i Snyder-ovog jediničnog hidrograma za modeliranje površinskog oticaja. Erozija, 45, 31-46. https://doi.org/10.5937/erozija1945031E. U tekstu: (Erić i sar., 2019)

Book chapter:

Zlatić, M., Todosijević, M., Lazarević, K. & Momirović, N. (2022). Natural and Socio-Economic Effects of Erosion and Its Control in Serbia. u: Li, R., Napier, T.L., El-Swaify, S.A., Sabir, M., Rienzi, E. [ur.] Global Degradation of Soil and Water Resources, Singapore: Springer Nature Singapore, 399-414. U tekstu: (Zlatić et al., 2022)

Dragović, N. & Vulević, T. (2020). Soil Degradation Processes, Causes, and Assessment Approaches. u: Leal Filho Walter, Azul Anabela Marisa, Brandli Luciana, Lange Salvia Amanda, Wall Tony [ur.] Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals, Cham: Springer International Publishing. U tekstu: (Dragović & Vulević, 2020)

Conference article:

Zlatanović, N., Drobnjak, A., Milovanović, I., Puzović, R. (2015). Application of open source GIS algorithms for erosion mapping. u: 21th Conference and Exhibition, YUinfo conference, 08.-11.03.2015., Kopaonik, 131-134. U tekstu: (Zlatanović et al. 2015)

No author:

Sources without authors should be listed according to the first letter of the title of the work, and the year of publication should be mentioned before the title.

(2018) Zakon o vodama. *Službeni glasnik RS*, br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. zakon. U tekstu: (2018)

Web reference:

FAO (2020): FAO Soils Portal Key definitions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), https://www.fao.org/soils-portal/en/ . U tekstu: (FAO, 2020)

SUPPORTING INFORMATION

Manuscripts should be submitted to the Editorial Board in electronic form (by e-mail), prepared in MS Word, A4 format, with 2.5 cm margins, and with separate attachments (tables, figures, graphs, etc.). Measurement units must be expressed in the International System of Units (SI). Mathematical formulas should be prepared using the equation editor in Word or in MathType.

The Editorial Board appoints reviewers according to the topic of the paper. All manuscripts are subject to two independent reviews.

ISSN 0350-9648

