

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

ЕРОЗИЈА

Број 51

UDK 626

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



Београд, 2025. 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, Сениша 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 Jakanović, 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 Visaslava 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

Šemsa Imširović, Siniša Polovina, Armin Hadžialić, Boris Radić, Ratko Ristić, Vukašin Milčanović
Prostorna identifikacija erozionih procesa na području kantona Sarajevo
Spatial identification of erosion processes in the Sarajevo canton 7

Мандић Теодора, Лазаревић Катарина, Тодосијевић Мирјана, Миљковић Предраг
Хидросетва – зелено решење у борби против деградације земљишта
Hydroseeding – a green solution to soil degradation 31

Јована Здравковић, Тијана Вулевић, Нада Драговић, Александар Баумгертел
Примена механизације у експлоатацији и рекултивацији површинског копа Колубара
Application of mechanization in the mining operations and land reclamation of the Kolubara surface mine 49

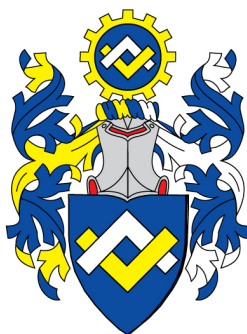
Соња Брауновић, Вељко Перовић, Филип Јовановић, Наталија Момировић,
Ненад шурјанац, јована цветковић, вања стојановић
Унапређена методологија за прорачун фактора ерозионе снаге кише (r)
Improved methodology for estimating the rainfall erosivity factor (r) 65

Немања Ристић, Анђела Ратковић, Јована Ратковић
Примена гис-а у утврђивању угрожености процесом клижења тла на примеру општине Гроцка
Application of gis in determining the endangerment by the process of soil sliding on the example of the municipality of Grocka 75

Ненад Шурјанац, Ненад Јаник, Соња Брауновић, Наталија Момировић, Јована Цветковић
Специфичности и изазови у изучавању урбаних бујица
Specificities and challenges in the study od urban flash floods 96

II СТРУЧНИ РАДОВИ PROFESSIONAL PAPERS

Штампање часописа ЕРОЗИЈА број 51 омогућили су:



ИНЖЕЊЕРСКА КОМОРА СРБИЈЕ



MKD d.o.o
Nova Pazova
Crnogorska 7
Servis Cara Dušana 139

Фотографије на насловној страни:

Слика 1. Преграда од бетона на Јовачкој реци, аутор: Нада Драговић

Слика 2. Регулација реке Ликотре, Крупањ, аутор: Марко Спасић

Слика 3. Заштита косина плетерима у сливу реке Камишне, аутор: Марко Спасић

**PROSTORNA IDENTIFIKACIJA EROZIONIH PROCESA
NA PODRUČJU KANTONA SARAJEVO**
**SPATIAL IDENTIFICATION OF EROSION PROCESSES
IN THE SARAJEVO CANTON**

Šemsa Imširović¹, Siniša Polovina^{2*}, Armin Hadžialić¹, Boris Radić²,
Ratko Ristić², Vukašin Milčanović²

¹ Higrakon d.o.o. Sarajevo, Bosna i Hercegovina, Hiseta 3, 71000 Sarajevo

² Univerzitet u Beogradu Šumarski fakultet, Kneza Višeslava 1, 11030 Beograd

Apstrakt: Erozija zemljišta predstavlja jedan od ključnih oblika degradacije životne sredine sa izraženim posledicama po poljoprivredu, vodne resurse i stabilnost ekosistema. U ovom radu analizirana je prostorna distribucija intenziteta erozionih procesa i produkcija erozionog materijala na području Kantona Sarajevo primenom Metoda Potencijala erozije. Metod je unapređen upotrebom Geografskih Informacionih Sistema (GIS), daljinske detekcije i terenskih istraživanja, čime je omogućena kvantifikacija erozionih procesa i izrada Karte erozije zemljišta visoke pouzdanosti. Analiza je zasnovana na integraciji digitalnog modela terena (DEM), pedoloških karakteristika, klimatskih podataka, načina korišćenja zemljišta (CORINE Land Cover 2018), vegetacionog indeksa (NDVI) i indeksa golog zemljišta (BSI). Prostorni proračuni izvršeni su u raster formatu sa prostornom rezolucijom od 100 m. Validacija modela sprovedena je poređenjem preliminarne i finalne Karte erozije zemljišta nakon terenske verifikacije, pri čemu su izračunate mere tačnosti na osnovu matrice konfuzije. Dobijeni rezultati pokazuju visoku ukupnu tačnost klasifikacije (Overall Accuracy = 0,943; Kappa = 0,88), što potvrđuje pouzdanost modela i stabilnost kategorizacije erozionih procesa. Na istraživanom području dominantna je kategorija vrlo slabe erozije (oko 70% površine), dok su jake i ekscesivne forme erozije prostorno ograničene, ali jasno izražene. Prosečna specifična produkcija erozionog materijala iznosi $339,31 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$, što ukazuje na umerenu degradaciju zemljišta u većem delu područja. Povećanje površina pod ekscesivnom erozijom u finalnoj fazi rezultat je unapređenja metodologije, više prostorne rezolucije i preciznije terenske verifikacije, a ne realnog porasta procesa. Rezultati potvrđuju da integracija daljinske detekcije, GIS analiza i terenskih istraživanja omogućava pouzdanu procenu erozionih procesa i predstavlja osnovu za planiranje mera zaštite zemljišta i voda. Ovakav pristup pruža značajan doprinos unapređenju sistema monitoringa i održivom upravljanju prirodnim resursima.

Ključne reči: erozija zemljišta, Metod Potencijala erozije, GIS, daljinska detekcija, NDVI, BSI, matrica konfuzije, Kanton Sarajevo

Abstract: Soil erosion represents one of the key forms of environmental degradation, with pronounced impacts on agriculture, water resources, and ecosystem stability. This study analyzes the spatial distribution of erosion intensity and the production of eroded material in the Sarajevo Canton area using the Erosion Potential Method. The method was enhanced through the application of Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and field surveys, enabling the quantification of erosion processes and the creation of a highly reliable Soil Erosion Map. The analysis integrated a Digital Elevation Model (DEM), pedological characteristics, climatic parameters, land use data (CORINE Land Cover 2018), and vegetation

¹ * e-mail: semsa@higrakon.ba, sinisa.polovina@sfb.bg.ac.rs

index (NDVI) and bare soil index (BSI). Spatial calculations were performed in raster format with a spatial resolution of 100 m. Model validation was carried out by comparing preliminary and final erosion maps after field verification, with accuracy metrics calculated based on the confusion matrix. The results indicate a high overall classification accuracy (Overall Accuracy = 0.943; Kappa = 0.88), confirming the model's reliability and the stability of erosion process categorization. The study area is predominantly characterized by very weak erosion (about 70% of the total area), while strong and excessive erosion forms are spatially limited but clearly expressed. The average specific production of eroded material is $339.31 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, indicating moderate land degradation across most of the territory. The observed increase in areas affected by excessive erosion in the final mapping phase is a result of methodological improvements, higher spatial resolution, and more precise field verification rather than a real expansion of the processes. The results confirm that the integration of remote sensing, GIS analysis, and field research provides a reliable approach for assessing erosion processes and forms a sound basis for planning soil and water protection measures. This approach contributes significantly to improving erosion monitoring systems and supports sustainable management of natural resources.

Keywords: soil erosion, Erosion Potential Method, GIS, remote sensing, NDVI, BSI, confusion matrix, Sarajevo Canton

UVOD

Erozija zemljišta je jedan od važnijih savremenih problema degradacije zemljišta i značajan faktor ugrožavanja životne sredine širom sveta (Jain et al., 2010). Na osnovu rezultata GLASOD mape (Global Assessment of Soil Degradation) (Oldeman et al., 1991) zasnovane na kolekciji eksperimentalnih podataka u periodu od 1987. do 1990. godine, procenjena je površina u vrednosti od 114 miliona hektara koja se odnosi na zastupljenost vodne erozije u Evropi. Ta površina odgovara 17% od ukupne površine evropskog kopna. Primenom modela RUSLE2015 u državama na području Evropske unije je registrovan prosečan gubitak zemljišta u vrednosti od $2,46 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ godišnje, na osnovu kojeg ukupan gubitak zemljišta na godišnjem nivou iznosi 970 Mt (Panagos et al., 2015) i odnosi se na poljoprivredne, šumske i polu-prirodne površine. Erozija zemljišta se ne može povezivati samo sa poljoprivrednim površinama, ona postaje i fenomen koji je povezan i sa urbanizovanim površinama.

Prognoze Ujedinjenih nacija su da će do 2050. godine čak 70% svetske populacije živeti u urbanim sredinama (United Nations, 2004), a 2004. godine ta vrednost je iznosila 48% svetske populacije (United Nations, 2012). Eksplozivni rast brojnosti ljudske populacije i ekspanzija urbanizacije doveli su i do promena u strukturi zemljišnog pokrivača gde poljoprivredne i prirodne površine postaju pretvorene u neporozne površine (asfaltirane, betonirane). Ovakav način gubitka zemljišta se teško može nadoknaditi, a pokušaj vraćanja u prvobitno stanje iziskuje velike troškove. Smanjenjem infiltraciono-retencionog kapaciteta zemljišta, koje prouzrokuju neporozne površine, dolazi do povećanja rizika od pojave intenzivnih erozionih procesa i brzog površinskog oticaja (Ristić et al., 2001, Szendrene-Koren et al., 2007, Herslund et al., 2015).

Nagla pojava velike vode u rečnom koritu, sa visokom koncentracijom čvrste faze, naziva se bujičnom poplavom (Ristić, 2000), dok bujični sliv predstavlja prirodnu hidrografsku celinu koja obuhvata korita glavnog toka i pritoka, kao i njima gravitirajuće površine, na kojima su prisutni erozioni procesi u određenom stadijumu razvoja (Ristić, Nikić 2007). Usled jakih kišnih padavina, topljenja snega ili u slučaju istovremenog delovanja ove dve pojave dolazi do površinskog oticanja usled kojeg se vrši transport erozionog materijala sa padina u

hidrografsku mrežu, naglog nadolaska vode i formiranja bujičnog poplavnog talasa. Svaki sliv u kojem dolazi do naglog nadolaska velikih voda koje sa sobom nose velike količine nanosa dobija atribut “buični”, bez obzira koju veličinu poseduje i kojoj kategoriji vodotoka pripada (Ristić, Malošević, 2011).

Većina bosanskohercegovačkih reka su planinske reke. Takođe, većina ih je usečena između strmih brda uz čije su brze vodotokove u dolinama nastajale bujice gde je dolazilo do naglog podizanja vodostaja i isto tako naglog opadanja i povlačenja vode u korita. Na osnovu “Katastra bujičnih tokova i erozionih područja u Bosni i Hercegovini” konstatovana je zastupljenost čak 935 bujičnih tokova na području Bosne i Hercegovine (2012). Problem područja Bosne i Hercegovine jeste nedostatak podataka o bujičnim poplavama kao zasebnoj celini. Opis bujičnih poplava, kao i štete koje su prouzrokovale se daju u podacima za kompletan sliv neke veće reke. Jako mali procenat datih izveštaja od strane opština, kantona, entiteta ili izveštaja za nivo države, je izdvojio bujične vodotoke kao posebnu kategoriju i dao podatke o njima. Još od perioda 1889. godine provlači se problem nastanka poplava čiji su uzročnik bujični vodotoci pa i nesretna 2014. godina kada su nastale neviđene štete. Vodostaji koji su izmereni na rekama tokom poplava 2014. godine te količina štete koja je načinjena u tom period razlog su da te poplave budu proglašene istorijskim, stogodišnjim i katastrofalnim. Prema podacima Evropske komisije, prirodne katastrofe iz 2014. godine izazvale su razorne poplave i klizišta, uništavajući infrastrukturu, stambene objekte i poslovne resurse, čime je prouzrokovana šteta u vrednosti od skoro 4 milijarde konvertibilnih maraka (KM) (Federacija BiH – 2.000.000.000,00 KM, Republika Srpska - 1.888.000.000,00 KM, i Brčko distrikt – 57.000.000,00 KM) (2016a).

Jasno je da poplave nije moguće u potpunosti sprečiti, ali je neophodno preduzimanje preventivnih radova i mera da bi se redukovalo njihovo štetno delovanje. Nakon poplave umesto ulaganja i u prevencije, novac se samo ulaže u sanaciju nastalih šteta. Posledice poplava iz 2014. godine bi bile uveliko manje da su proteklih godina sprovedeni preventivni radovi i mere. A pod preventivnim radovima podrazumeva se primena tehničkih, biotehničkih i bioloških radova dok preventivne mere podrazumevaju primenu administrativnih mera kao što su pravila uređenja, način korišćenja zemljišta i zaštita zemljišta, izrade planova za proglašenje erozionih područja, operativnih planova za odbranu od bujičnih vodotokova i izrade Karte erozije zemljišta.

Evidentno je da su aktivnosti na rekonstrukciji i održavanju postojećih i izgradnji novih zaštitnih objekata nedovoljne i da je zastupljena stagnacija. Što se tiče donošenja strateških, zakonskih i drugih planskih dokumenata, evidentan je mali napredak, ali koji nije dovoljan. Ne prati se preduzimanje aktivnosti prevencije od poplava po prioritetima. Takođe, evidentan je nedostatak, kako koordinacije, tako i uključenosti različitih nivoa pri planiranju i sprovođenju mera za postizanje povećanja nivoa zaštite od poplava. Radovi koji su do sada izvedeni po pitanju uređenja bujica i zaštite od erozije bazirani su na zaštiti nekog objekta, kao što su to delovi autoputeva ili akumulacionih prostora.

Prvi korak u delovanju protiv bujičnih poplava i zaštiti od erozije zemljišta jeste planiranje uspešne odbrane. Bez prethodno organizovanog i planskog pristupa planiranju ne može se postići efikasan i jedinstven sistem odbrane od poplava i smanjiti uticaj erozije zemljišta.

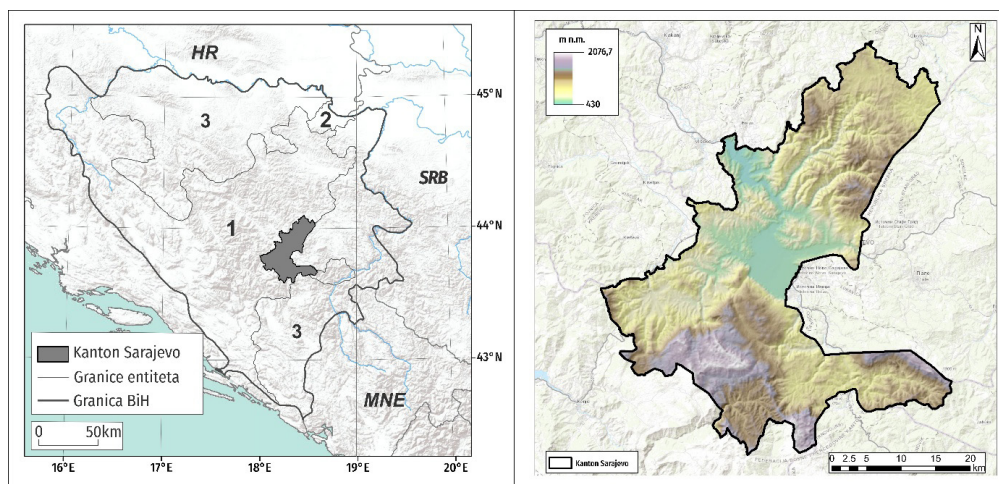
Cilj ovog rada je utvrđivanje prostorne distribucije intenziteta erozionih procesa i produkcija erozionog materijala na području Kantona Sarajeva (Kanton 9). Za procenu degradacije zemljišta usled erozionih procesa, korišćen je Metod Potencijala erozije (Metod prof. Slobodana Gavrilovića) (Gavrilović, 1972) koji je ujedno i najzastupljeniji metod za kvantifikaciju erozije zemljišta u svim zemljama bivše Jugoslavije. Takođe, primena ove metode je značajno

unapređena korišćenjem savremenih alata iz domena Geografskih Informacionih Sistema (GIS) sa kombinacijom daljinske detekcije i kartiranjem erozionih procesa na terenu. Dobijena Karta erozije zemljišta na istraživanom području predstavlja osnovu geobazu za potrebe inženjerskog rešavanja problema projektovanje protiverozionih radova, zaštita od erozije zemljišta i bujičnih poplava, kao i u izradu strateških, planskih i tehničkih dokumenata.

MATERIJAL I METODE RADA

Opšte karakteristike istraživanog područja

Kanton Sarajevo (Kanton 9) je jedan od deset kantona na području Federacije Bosne i Hercegovine (FBiH) i nalazi se u jugoistočnom delu Bosne i Hercegovine (Slika 1). Sa površinom od 1.276,9 km² sedmi je po veličini, dok je drugi u FBiH po broju stanovnika (444.851). Sa prosečnom gustinom naseljenosti od 348,3 stanovnika po km² pripada najgušće naseljenom kantonu. Položaj Kantona Sarajevo je između 43°35' i 44°07' severne geografske širine i između 18°00' i 18°38' istočne geografske dužine (2016b).



Slika 1. Prostorni položaj Kantona Sarajevo: 1–Federacije Bosne i Hercegovine (FBiH); 2–Brčko Distrikt (BD); 3–Republika Srpska (RS); SRB–Republika Srbija; MNE–Crna gora; HR–Hrvatska.

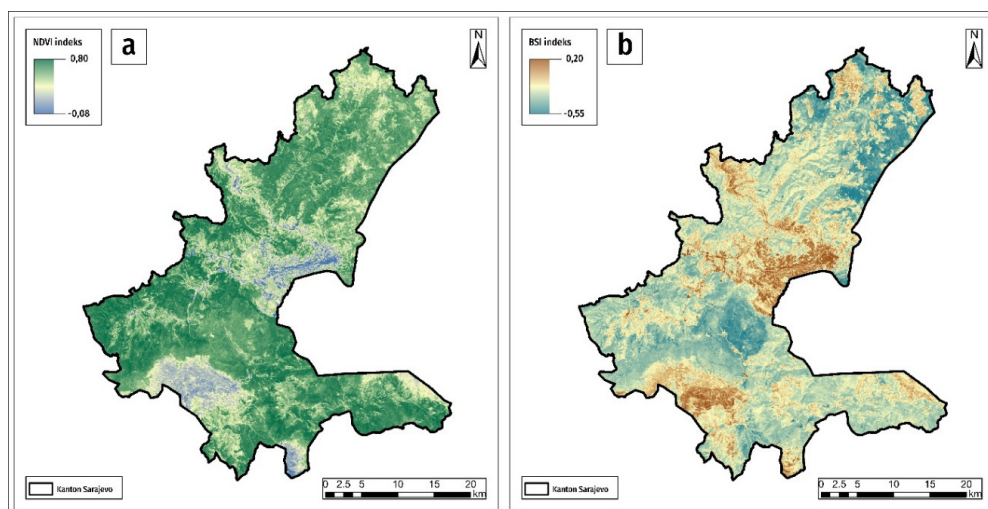
Figure 1. Spatial position of Sarajevo Canton: 1 – Federation of Bosnia and Herzegovina (FBiH); 2 – Brčko District (BD); 3 – Republic of Srpska (RS); SRB – Republic of Serbia; MNE – Montenegro; HR – Croatia.

Sastoji se od Grada Sarajeva i sedećih opština: Centar, Novi Grad, Novo Sarajevo, Stari Grad, Vogošća Ilidža, Hadžići, Ilijaš i Trnovo. Reljef je dosta razuđen i pripada brdsko-planinskom tipu sa rasponom nadmorske visine od 430 do 2.076,7 m n.m, dok dva klimatska tipa karakterišu prostor Kantona Sarajevo. Za prvi deo, do 600 metara nadmorske visine, karakteristična je kontinentalna klima, a za područja iznad 600 metara nadmorske visine karakterističan je kontinentalno-planinski i alpski tip klime. Najznačajniji prirodni resursi Kantona Sarajevo su pitke, mineralne, termalne i termomineralne vode koje su ujedno i osnov za razvoj niza delatnosti (2016b). Kroz Kanton Sarajevo protiču reke Željeznica, Zujevina, Ljubina, Misoča,

i Stavnja, a glavni grad kantona, Sarajevo, je okruženo planinama Igman, Bjelašnica, Trebević, Treskavica i Jahorina. Reljef značajno utiče na razvoj erozionih procesa, posebno kada se radi o vodnoj eroziji. Količina i brzina površinskog oticanja, od kojih direktno zavisi intenzitet erozije, uslovljene su karakterom i oblikom reljefa (Kostadinov, 2008). Analiza reljefa za ovaj rad je dobijena na osnovu DEM-a (digitalnog elevacionog modela) sa prostornom rezolucijom od 100 metara. Najznačajniji elementi reljefa koji utiču na kvalitet i kvantitet erozionih procesa su pad, dužina, oblik i ekspozicija padine. Uticaj reljefa, klimatskih karakteristika, geološke podloge i prisustva živih bića (mikroorganizama), predstavljaju jedan od osnovnih parametara za razvoj različitih tipova zemljišta. Na osnovu pedološke karte u razmeri 1:50.000 na istraživanom području dominantni su sledeći pedološki tipovi: kalkomelanosol, kalkokambisolom, regosol, zatim eutrični kambisol i distrični kambisol.

Način korišćenja zemljišta i struktura zemljišnog pokrivača na istraživanom području analizirani su na osnovu Corine Land Cover (CLC) baze podataka, koja svojom metodologijom obezbeđuje dovoljnu potpunost i ujednačenost za države na prostoru Evrope (EEA, 2018). Na osnovu analize Corina Land Cover baze podataka iz 2018. godine, koja je u prostornoj rezoluciji od 100 metara, na istraživanom području je identifikovano 19 klasa iz kategorije veštačkih površina, poljoprivredne površine i šume i polu prirodna područja. Veštačke površine zauzimaju najmanji procenat, svega 6,64% i to čine kontinuirani i isprekidani objekti, industrijski odnosno privredni objekti, putna i železnička mreža, aerodrom, mineralna nalazišta, deponije, gradilišta i sportsko-rekreativni objekti. Poljoprivredne površine pokrivaju 23,58% od ukupne istraživane površine, gde se u okviru područja Kantona Sarajevo izdvajaju sledeći tipovi: obradivo zemljište, pašnjaci, kompleksi agrarnih prostora, agrošumski prostori. Kategorija šumskog i polu prirodnog područja zauzima ukupno 69,78% istraživane površine i obuhvata sledeće tipove: lišćarske šume, četinarske šume, mešovite šume, prirodne travnjake, močvarno zemljište, žbunasta vegetacija, ogoljene stene i površine sa retkom vegetacijom.

Kako bi se kreirala Karta erozije zemljišta koja u što većem stepenu odgovara realnom prostoru i vremenu, primenjene su metode daljinske detekcije tokom kojih je izvršeno prikupljanje i analiza dostupnih i relevantnih satelitskih snimaka. Korišćeni su Landsat satelitski snimci misije 7 i 8, prostorne rezolucije od 30 m koje su preuzete sa zvanične internet stranice US Geological Survey (USGS) (2024a) pomoću platforme Google Earth Engine (GEE) (2024b). Satelitski snimci Landsat misije za potrebe kreiranja Karte erozije zemljišta su preuzeti za period od 10 godina (od 01. januara 2010. godine do 31. decembra 2020. godine). Izbor scena satelitskih snimaka je biran za svaki mesec u toku godine koji ima najmanji procenat oblačnosti. Kako bi se dobili što relevantniji rezultati korišćeni su satelitski snimci u vegetacionom i vanvegetacionom periodu. Pre preuzimanja izvršena je i digitalna obrada snimaka, odnosno predporcesiranje snimka koja je predstavljalo primenu geometrijske, atmosfenske i radiometrijske korekcije (Gulch, 1991; Levin, 1999, Khorram et al., 2016). Nakon primarne obrade satelitskih snimaka korišćeni su i odgovarajući produkti izvedeni iz raspoloživih spektralnih kanala u vidu spektralnih indeksa. Korišćeni su spektralni indeksi kao što su NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Deering, 1978) i BSI (Bare Soil Index) (Rikimaru et al., 2002). Spektralni indeks NDVI koristi se za identifikaciju vegetacije i primenjen je pri korekciji ulaznih parametara za proračun erozije zemljišta. Pored NDVI (Slika 2a), primenjen je i BSI (Slika 2b) koji je u funkciji za detekciju vidljivih erozionih procesa i identifikacije urbanizovanih i neporoznih površina. BSI indeks primenjen je takođe u korekciji ulaznih parametara za proračun erozije zemljišta.



Slika 2. Prostorni raspored NDVI indeksa (a) i BSI indeksa (b)
na području Kantona Sarajeva

Figure 2. Spatial distribution of the NDVI index (a) and the BSI index (b)
in the area of Sarajevo Canton.

Metod Potencijala erozije (MPE)

Metod Potencijala erozije (Metod prof. Slobodana Gavrilovića) pripada skupu empirijskih metoda za procenu gubitka zemljišta, erozionu produkciju i pronos nanosa. Razvijen je u laboratorijama Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ u Beogradu i predstavlja alat za izradu Karte erozije zemljišta, proračuna produkcije erodiranog materijala i transporta nanosa (Gavrilović, 1972). Ova metoda se danas najčešće koristi u svim zemljama bivše Jugoslavije (Srbija, Crna Gora, Makedonija, Bosna i Hercegovina, Slovenija, Hrvatska), kao i u mnogim zemljama Azije, Južne Amerike, Afrike i Evrope (Ristić, et al., 2012, Globevnik et al., 2003, De Cesare et al., 1998, Amini et al., 2014, Rafaelli et al., 1998, Spalević et al., 2014). Ovaj metod se koristi za određivanje i kvantifikaciju erozionih procesa na različitim prostornim i institucionalnim nivoima, te se kao takav preporučuje za sve inženjerske aspekte povezane sa erozijom zemljišta i bujičnim tokovima u oblasti upravljanja vodama. Posebna primena obuhvata izradu strategija, studija, projekata i naučnih istraživanja. U primeni je više od pola veka, i sam metod se vremenom usavršava prema novijim istraživanjima i saznanjima o erozionim procesima kao i ekspanzijom primene geografskih informacionih sistema (GIS). Korišćen je u različitim uslovima, može se primenjivati u GIS okruženju i zahteva mali broj ulaznih podataka. Primena Metoda Potencijala erozije zasniva se na korišćenju analitičkog obrasca podataka koji se odnose na faktore koji utiču na procese erozije. Nakon prikupljenih podataka o faktorima životne sredine, potrebnim za proračune ulaznih parametara, pristupa se proračunu koeficijentu erozije Z , ukupnoj i srednje godišnjoj vrednosti produkcije erozionog materijala W_{god} , Kao i vrednostima srednje godišnje zapremine vučenog i suspendovanog nanosa G_{god} . Vrednosti navedenih koeficijenata prikazane su u vidu pojedinačnih piksela ili grupe piksela sa sličnim vrednostima. Osnovna jedinica rasterskog podatka (piksel) za potrebe izrade ovog rada je u prostornoj rezoluciji od 100 metara.

Koeficijent erozije (Z)

Budući da je erozija zemljišta prostorni fenomen, ona se može predstaviti u dvodimenzionalnom referentnom sistemu, a prema klasifikaciji koja je definisana na osnovu analitički izračunatog koeficijenta Z, koji predstavlja glavni eksponent intenziteta i kategorije erozije zemljišta. Vrednosti koeficijenta Z se kreću od 0,1 do 1,5, tj. od područja koji su blago zahvaćeni erozionim procesima do područja koja su ekstremno degradirana od strane erozionih procesa. Koeficijent erozije Z zavisi o karakteristikama zemljišta, reljefu, načinu korišćenja zemljišta i strukturi zemljišnog pokrivača, kao i prisustva erozionih formi i procesa i računa se prema izrazu (Gavrilović,1972):

$$Z = Y \cdot X \cdot a \cdot (\varphi + \sqrt{I_{sr}})$$

gde je:

Y – recipročna vrednost koeficijenta otpornosti zemljišta na eroziju,

X · a – koeficijent uređenja sliva ili područja,

φ – brojni ekvivalenti vidljivih i jasno izraženih procesa erozije u slivu,

I_{sr} – srednji pad sliva.

Koeficijent otpora zemljišta na eroziju (Y)

Koeficijent otpora zemljišta na eroziju zavisi pre svega o tipu zemljišta, zatim od geološkog sastava i klimatskih karakteristika. Vrednosti koeficijenta su utvrđene u Laboratoriji za bujice i eroziju, Odseka za eroziju i melioracije na Šumarskom fakultetu u Beogradu. Ove vrednosti se odnose na otpornost zemljišta i stena na udare (ili dejstvo) kišnih kapi, kao i na eroziju izazvanu tekućom vodom i vetrom (eolsku eroziju). Prema Metodi Potencijala erozije te vrednosti se kreću od 0,25 (gole i kompaktne stene) do 2,0 (nevezana zemljišta) (Gavrilović,1972). Vrednosti koeficijenta Y na području Kantona Sarajeva je definisana na osnovu digitalizovane pedološke karte u razmeri 1:50.000 (Slika 3a).

Koeficijent uređenja sliva (X·a)

Koeficijent uređenja sliva sastoji se od prvobitne (nepromenjene) strukture površina (X) i stepena uređenosti pre i posle primene protiverozionih radova. Ovaj koeficijent se odnosi na otpornost zemljišta na atmosferske uticaje (ekstremne temperature, intenzivne padavine). Vrednosti koeficijenta se kreću od 0,05 (šume dobrog sklopa) do 1,0 (prisustvo goleti) (Gavrilović,1972). Standardno određivanje koeficijenta X·a oslanja se na kategorizaciju pokrivenosti zemljišta, strukturu zemljišnog pokrivača i načina korišćenja zemljišta. U ovom istraživanju, za utvrđivanje osnovne klasifikacije korišćen je set podataka CORINE Land Cover (CLC). Međutim, kako bi se postigla veća prostorna i tematska preciznost, posebno u prelaznim zonama, i kako bi se objektivnije kvantifikovalo stanje vegetacije, primenjen je i vegetacioni indeks NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Vegetacioni indeks NDVI predstavlja jedan od najčešće korišćenih indeksa za mapiranje vegetacije. Vrednosti NDVI mogu da budu u rasponu od -1 do +1. Negativne vrednosti pokazuju prisustvo vode, snega i oblaka, dok su pozitivne vrednosti bliske +1 ukazuju na postojanje guste vegetacije. Ove vrednosti su korišćene za kalibraciju i precizno dodeljivanje vrednosti koeficijenta X·a u formi atributske tabele vektorskoj CORINE Land Cover bazi podataka (Slika 3b).

Koeficijent vidljivih i jasno izraženih erozionih procesa (φ)

Koeficijent φ predstavlja numerički ekvivalent vidljivih i jasno izraženih procesa erozije zemljišta na slivu ili ugroženom području. Vrednosti koeficijenta se kreću od 0,1 (vrednosti za područja bez vidljivih tragova erozije do 1,0 (vrednosti za područja koja su zahvaćena dubinskom erozijom) (Gavrilović, 1972). Za potrebe ovog istraživanja, pored terenskih istražnih radova korišćeni su produkti daljinske detekcije u vidu satelitskih snimaka Landsat misije za određivanje vidljivih i jasno izraženih procesa erozije. Na osnovu raspoloživih satelitskih snimaka proračunat je BSI indeks, koji je predstavljao primarni produkt za dobijanje koeficijenta vidljivih i jasno izraženih procesa prema formuli (Slika 3c) (Polovina et al., 2024):

$$\varphi = \frac{BSI - BSI_{\min}}{BSI_{\max} - BSI_{\min}}$$

φ – koeficijent vidljivih i jasno izraženih erozionih procesa;

BSI – ponderisani sloj indeksa golog zemljišta;

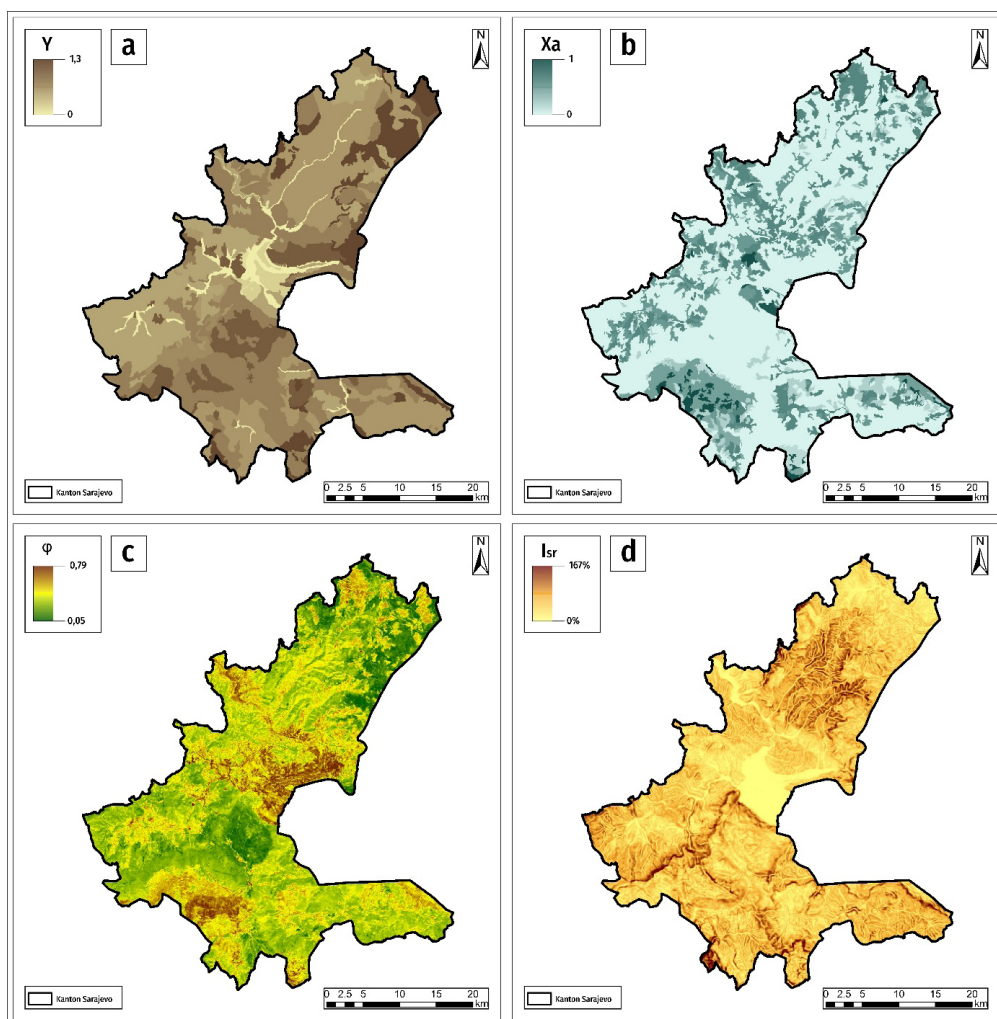
$BSI_{\max}$ – vrednost koja predstavlja golet u sloju indeksa golog zemljišta;

$BSI_{\min}$ – vrednost koja predstavlja vegetaciju u sloju indeksa golog zemljišta.

Vrednost spektralnog indeksa golog zemljišta (BSI) kreće se u rasponu između -1 i +1, gde pozitivne vrednosti prikazuju veće prisustvo golog zemljišta i neporoznih površina, dok negativne vrednosti prikazuju prisustvo vegetacije i poroznih površina.

Srednji nagib terena (I_{sr})

Koeficijent I_{sr} predstavlja topološku karakteristiku istraživanog područja. Njime se prikazuje stanje glavnog reljefa i geomorfoloških karakteristika. Prema Metodi Potencijala erozije srednji nagib terena predstavljen je ponderisanom aritmetičkom sredinom površina između dve izohipse (Gavrilović, 1972). Ova vrednost je dobijena na osnovu digitalnog elevacionog modela u prostornoj rezoluciji od 100, korišćenjem alata za kreiranje nagiba u GIS okruženju (Slika 3d).



Slika 3. Prostorni raspored koeficijenta Y (a), Prostorni raspored koeficijenta $X-a$ (b), Prostorni raspored koeficijenta ϕ (c), Prostorni raspored koeficijenta I_{sp} (d).

Figure 3. Spatial distribution of coefficient Y (a), spatial distribution of coefficient $X-a$ (b), spatial distribution of coefficient ϕ (c), spatial distribution of coefficient I_{mean} (d).

Srednja godišnja produkcija erozionog materijala

Koeficijent erozije Z predstavlja osnovu za proračune vrednost produkcije erozionog materijala i transporta erozionog nanosa. Produkcija erozionog materijala (W_{god}) predstavlja ukupnu količinu erozionog materijala. Transport nanosa, sa druge strane, čini onaj deo produkcije erozionog materijala koji dospeva u hidrogrfsku mrežu i učestvuje u pronosu (transportu) izazvanom aktivnošću tekuće vode.

Proračun srednje godišnje produkcije erozionog materijala vrši se pomoću sledeće formule (Gavrilović, 1972):

gde je: $W_{\text{god}} = T \cdot H_{\text{god}} \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \cdot A$

W_{god} – ukupna produkcija erozionog materijala na slivu ili području [$\text{m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$],

T – temperaturni koeficijent područja,

$$T = \sqrt{\frac{t}{10} + 0,1}$$

t – srednja godišnja temperatura vazduha na istraživanom području [$^{\circ}\text{C}$],

H_{god} – srednja godišnja količina padavina na istraživanom području [mm],

π – 3,14,

Z – koeficijent erozije,

A – površina sliva ili područja [km^2].

Ukupna produkcija erozionog materijala na istraživanom području predstavlja gubitak zemljišnog materijala, ili zemljišta raspoloživog za odvajanje, usled delovanja erozionih faktora i izražen je u metrima kubnim za posmatrani period. Može se izraziti i kao specifična vrednost (po kilometru kvadratnom istraživanog područja) prema formuli:

– specifična produkcija erozionog materijala na slivu ili području [$\text{m}^3 \text{km}^{-2} \text{god}^{-1}$].

Validacija dobijenih rezultata (Ocena tačnosti)

Procena tačnosti (eng. accuracy assessment) je ključna komponenta i fokus značajnih studija u okviru problematike ocene tačnosti klasifikacije. U osnovi, procena tačnosti određuje kvalitet informacije koja je proistekla primenom terenskih istražnih radova, daljinske detekcije, laboratorijskih istražnih radova i slično. Ove procene, mogu da budu kvalitativne i kvantitativne. Kvalitativne procene predstavljaju poređenje dobijenih podataka u odnosu na stvarno stanje na terenu. Kvantitativne procene pokušavaju da identifikuju i kvantifikuju grešku. U ovim procenama, porede se podaci dobijenih tematskih karata sa referentnim podacima (eng. ground truth) koji su prikupljeni adekvatnim obilaskom terena. Najefikasniji i najčešći način prikazivanja tačnosti klasifikacije podataka je u formi matrice konfuzije (eng. confusion matrix) ili matrica greške (eng. error matrix), na osnovu koje se računaju mere tačnosti (Levin, 1999; Tempfli et al., 2009; Radić, 2014; Dobrota, 2018; Abdi, 2020). Matrica konfuzije predstavlja osnovu za dobijanje različitih mera tačnosti kao što su: ukupna tačnost (eng. overall accuracy), korisnička tačnost (eng. user's accuracy), producerska tačnost (eng. producer's accuracy), Kappa statistika (Cohen J.A., 1960; Landis, Koch, 1977; Tempfli et al., 2009; Olofsson et al., 2014; Khorram et al., 2016):

- Ukupna tačnost predstavlja odnos ukupnog broja tačnih (suma svih elemenata sa glavne dijagonale) sa ukupnim brojem piksela u matrici konfuzije. Ukupna tačnost se najčešće koristi kao stepen uspešnosti klasifikacije.

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N}$$

- Korisnička tačnost predstavlja odnos ukupnog broja korektno klasifikovanih piksela u i-toj kategoriji sa ukupnim brojem svih klasifikovanih piksela u ovoj kategoriji (i+). Korisnička tačnost se odnosi na interes korisnika mape da utvrdi njenu reprezentativnost (tačnost).

$$UA_i = \frac{x_{ii}}{x_{i+}}$$

- Producentska tačnost predstavlja odnos ukupnog broja ispravno klasifikovanih uzoraka u i-toj kategoriji sa ukupnim brojem referentnih uzoraka. Producentska tačnost se odnosi na kreatora mape koji je zainteresovan da proizvede maksimalno kvalitetnu mapu.
- Kappa statistika predstavlja diskretnu multivarijacionu tehniku za procenu tačnosti koju je uveo Cohen (1960) i računa se iz matrice konfuzije prema formuli:

$$\bar{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}$$

gde je r broj redova u matrici, x_{ii} je broj uzoraka u redu i i koloni i (dijagonalni članovi matrice), x_{i+} su sume reda i , x_{+i} sume kolone i , N je ukupan broj svih uzoraka.

Kappa statistika ($\bar{K}$) prikazuje statističku veličinu K koja predstavlja ocenu tačnosti između klasifikovanih podataka i referentnih podataka sa terena. Vrednosti tačnosti statističke veličine K su predložili autori Landis i Koch (Landis, Koch, 1977) (tabela 1.).

Tabela 1. Interpretacija vrednosti Kappa statistike

Table 1. Interpretation of Kappa statistic values

Vrednosti Kappa statistike	Tumačenje vrednosti
$0,81 \leq \bar{K} \leq 1,00$	Zadovoljavajuće slaganje
$0,61 \leq \bar{K} \leq 0,80$	Značajno slaganje
$0,41 \leq \bar{K} \leq 0,60$	Umereno (osrednje) slaganje
$0,21 \leq \bar{K} \leq 0,40$	Slabo slaganje
$0,0 \leq \bar{K} \leq 0,20$	Vrlo slabo slaganje

REZULTATI

Primarni zadatak za potrebe izrade Karte erozije zemljišta je formiranje geobaze, koja predstavlja osnovni informacioni i geometrijski skup relevantnih prostornih baza podataka koji predstavljaju faktore uticaja na pojavu i razvoj procesa erozije zemljišta. Baze podataka koje se integrišu u formiranu geobazu predstavljaju elemente koji su neophodni za primenu analitičkog modela za kvantifikaciju i prostornu identifikaciju kategorija erozije zemljišta. Formirana geobaza predstavlja početni korak koji će voditi ka sukcesivno izrađivanoj operativnoj bazi koja će između ostalog voditi ka materijalu koji je neophodan za pripremu terenskih istražnih radova. Dobijeni podaci predstavljaju značajnu vezu i mehanizam pri procesu dobijanju relevantnih ulaznih parametara za determinaciju Karte erozije i produkcije erozionog materijala na istraživanom području. Preliminarna baza erozije zemljišta predstavlja narednu fazu nakon formiranja geobaze i ključni korak u procesu planiranja terenskih istražnih radova. U okviru preliminarne baze erozije zemljišta, koeficijent erozije Z se dobija primenom analitičkog izraza na osnovu parametara Y , X_a , ϕ i I_{sr} . Generisanjem preliminarne baze erozije zemljišta sa prikazanim vrednostima koeficijenta erozije Z predstavlja osnovni korak u procesu planiranja terenskih istražnih radova, kako bi se izvršila kalibracija ulaznih parametara i validacija dobijenih intenziteta erozionih procesa. Preliminarna baza erozije zemljišta je kreirana u GIS okruženju, i izlazni rezultat koeficijenta erozije Z je prikazan u rasterskoj formi sa prostornom rezolucijom od 100 m.

Terenski radovi podrazumevaju rekognosciranje odnosno istraživanje terena sa detaljnim prikupljanjem odgovarajućih podataka o elementima koji ukazuju na pojavnu određene kategorije erozije - vidljivi tragovi erozije, stanje bilnog pokrivača, način korišćenja zemljišta i strukture zemljišnog pokrivača koji se dalje unose u odgovarajuće terenske obrasce. Struktura terenskih obrazaca je ključni element u kreiranju Karte erozije zemljišta, jer sadrži osnovne elemente iz prethodne studijske kolekcije podataka i rezultata analize, ali i relevantne elemente koji se mogu utvrditi samo terenskim putem. U sklopu terenske kolekcije podataka zastupljeni su elementi za kalibraciju ulaznih parametara, kao što su vidljivi tragovi erozionih procesa, struktura zemljišnog pokrivača i načina korišćenja zemljišta (Slika 4).

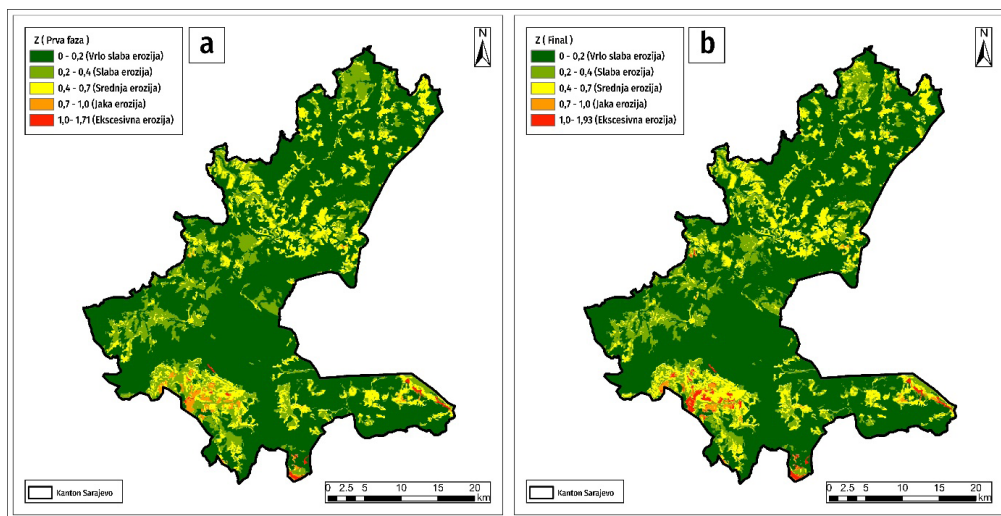


Slika 4. Brazdasta i jaružasta erozija (slike gore), pašnjaci i travnate površine na nagnutim terena (slike dole) na području Kantona Sarajeva (foto: Imširović Š.).

Figure 4. Rill and gully erosion (upper images), and pastures and grasslands on sloping terrain (lower images) in the area of Sarajevo Canton (photo: Imširović Š.).

Terenski obrasci sa pratećom foto dokumentacijom imaju značajnu funkciju u oceni tačnosti i korekciji ulaznih parametara, odnosno rezultata preliminarne Karte erozije, radi dobijanja kvantitativnih smernica za kreiranje reprezentativne Karte erozije zemljišta. Izbor lokacija za obilazak je određen na osnovu zastupljenih kategorija erozije zemljišta koje su detektovane tokom izrade preliminarne karte, kao i na osnovu dostavljenih podataka koje utiču na karakter terenskog rada kao što su zone minskih polja, putna infrastruktura, zone zaštićenih područja, hidrografska mreža, naseljena mesta i sl. Nakon izvršenih terenskih radova i kolekcije relevantnih podataka, izvršena je korekcija studijske (preliminarne) geobaze erozije zemljišta („**Z_I faza**“) (Slika 5a) i dobijena je finalna geobaza erozije zemljišta („**Z_Final**“) (Slika 5b). Prema analizama preliminarne i finalne karte erozije zemljišta, utvrđene su sve kategorije razornosti od ekscesivne do vrlo slabe erozije. Prosečna vrednost koeficijenta erozije Z na osnovu preliminarne Karte erozije zemljišta, iznosi $Z_{sr}=0,17$, što svrstava istraživano područje

u kategoriju vrlo slabe erozije, sa rasponom vrednosti koeficijenta $Z=0,01-1,71$ (Slika 5a). Prosečna vrednost koeficijenta erozije Z nakon izvršenih terenskih radova iznosi takođe $Z_{sr} = 0,17$, sa rasponom vrednostima $Z=0,009-1,93$ (Slika 5b).



Slika 5. Preliminarna (a) i finalna karta erozije zemljišta (b) na području Kantona Sarajeva

Figure 5. Preliminary (a) and final (b) soil erosion maps in the area of Sarajevo Canton.

Analizirajući promene između studijske (preliminarne) Karte erozije („ Z_I faza“) i nakon terenskih istraživačkih radova („ Z_{Final} “), u tabeli 2 prikazana je površinska zastupjenost prema koeficijent Z na istraživanom području. U odnosu na studijsku (preliminaru) kartu erozije zemljišta, najveći deo površine pripada kategoriji vrlo slabe erozije, koja zauzima 69,47% istraživanog područja (884,19 km²). Nakon terenskih istražnih radova udeo ove kategorije ostaje gotovo nepromenjen, sa 69,67% (884,19 km²), što ukazuje na prostornu stabilnost i pouzdanost izrade Karte erozije zemljišta pod ovom kategorijom. Kategorija slabe erozije obuhvata 15,55% površine (197,29 km²) u prvoj fazi, dok se u finalnoj karti (nakon izvršenih terenskih radova) njen udeo smanjuje na 14,56% (184,77 km²). Ova promena ukazuje na blagi prelazak dela površina nakon kalibracije ulaznih parametara i obavljenih terenskih istražnih radova, što može biti posledica lokalno izraženijih procesa spiranja površinskog sloja zemljišta. Srednja erozija zemljišta pokazuje povećanje prostornog učešća sa 13,34% (169,34 km²) u prvoj fazi na 14,14% (179,48 km²) u finalnoj fazi. Ovaj porast ukazuje na prostorno širenje područja umerene erozije, što je karakteristično za prelazne zone između stabilnih i intenzivnije degradiranih delova istraživanog područja koja su uočena na terenu. Površine zahvaćene jakom erozijom smanjuju se sa 1,13% (14,33 km²) u prvoj fazi na 1,05% (13,28 km²) u finalnoj fazi. Ova kategorija zadržava relativno mali, ali stabilan udeo, što ukazuje na ograničenu prostornu distribuciju intenzivnih erozionih procesa.

Kategorija ekscesivne erozije pokazuje povećanje učešća sa 0,31% (3,91 km²) u prvoj fazi na 0,78% (9,91 km²) u finalnoj fazi. Povećanje površina pod ekscesivnom erozijom u finalnoj fazi kartiranja u odnosu na prvu fazu rezultat je unapređenja ulaznih podataka i detaljnije verifikacije terenskim istraživanjima. U prvoj fazi kartiranja korišćene su grupisane baze prostornih podataka sa prostornom rezolucijom od 100 m po pikselu, što je ograničilo

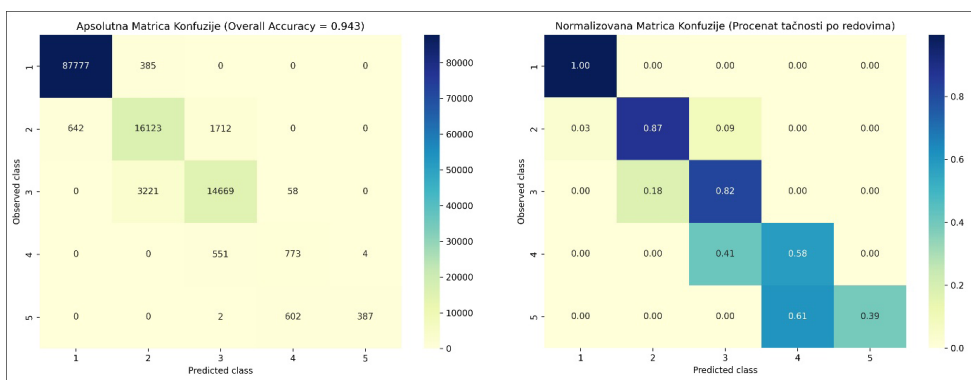
moгуćnost precizne identifikacije manjih, ali morfološki izraženih erozionih formi. Takva prostorna rezolucija dovela je do generalizacije površina i potcenjivanja intenziteta erozionih procesa, naročito u delovima terena sa izraženom mikoreljefnom razuđenošću.

Tabela 2. Koeficijent erozije Z na istraživanom području

Table 2. Erosion coefficient Z in the study area

Kategorija razornosti	Jačina erozionih procesa	Koeficijent erozije Z	Z (I faza)		Z (final)	
			km ²	%	km ²	%
I	Ekscesivna erozija	>1,01	3,91	0,31	9,91	0,78
II	Jaka erozija	0,71-1,00	14,33	1,13	13,28	1,05
III	Srednja erozija	0,41-0,70	169,34	13,34	179,48	14,14
IV	Slaba erozija	0,20-0,40	197,29	15,55	184,77	14,56
V	Vrlo slaba erozija	0,01-0,19	881,62	69,47	884,19	69,67
Ukupno			1269,06	100	1269,06	100

Kako bi se izvršila ocena tačnosti između ove dve karte erozije zemljišta, primenjena je apsolutna matrica konfuzije i normalizovana matrica konfuzije (Slika 6). Apsolutna matrica konfuzije prikazuje broj tačno i pogrešno klasifikovanih piksela za svaku klasu odnosno kategoriju erozivnosti, poredeći kartu erozije zemljišta dobijenu u prvoj fazi (pre terenskih istraživanja) sa finalnom, kalibrisanom kartom erozije zemljišta. Dijagonalni elementi matrice predstavljaju broj piksela koji su ispravno klasifikovani, dok ostale vrednosti ukazuju na pogrešne klasifikacije, odnosno preklapanja između različitih kategorija erozije zemljišta. Prema prikazanim rezultatima, model pokazuje visoku ukupnu tačnost klasifikacije, što potvrđuje visok stepen podudarnosti između predviđenih i stvarno mapiranih kategorija. Najveći broj tačno klasifikovanih piksela zabeležen je u kategorijama vrlo slabe, slabe i srednje erozije, koje zauzimaju najveće površine na istraživanom području. Pojedina odstupanja prisutna su kod kategorije jake erozije zemljišta, gde se uočava delimično pogrešno razvrstavanje prema susednim klasama odnosno kategorijama. Ukupna tačnost modela (Overall Accuracy) iznosi 0,943, dok Kappa statistika iznosi 0,88 što predstavlja zadovoljavajuće slaganje (prema tabeli 1), između ove dve Karte erozije zemljišta. Ove metričke vrednosti ukazuju na visoku pouzdanost klasifikacije i dobro usklađivanje početne odnosno studijske Karte erozije zemljišta sa rezultatima terenske validacije i kalibracije ulaznih parametara (finalne Karte erozije zemljišta). Ovakvi rezultati potvrđuju da je primenjeni pristup efikasan za procenu prostorne distribucije erozionih procesa, uz manja odstupanja u zonama sa izraženim reljevnim karakteristikama ili složenim tipovima zemljišta.

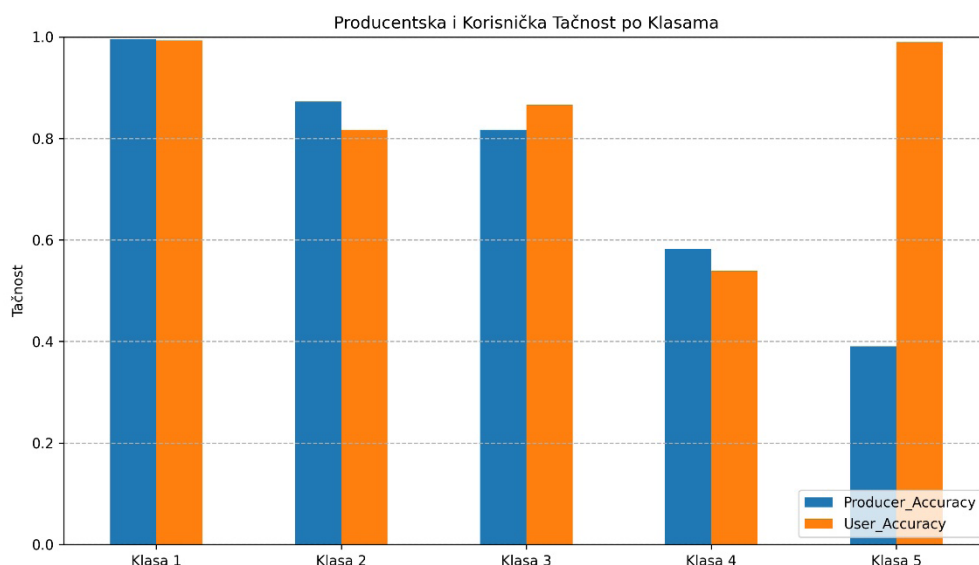


Slika 6. Apsolutna matrica konfuzije i normalizovana matrica konfuzije: **klasa 1**-Vrlo slaba erozija, **klasa 2**-Slaba erozija zemljišta, **klasa 3**-Srednja erozija zemljišta, **klasa 4**-Jaka erozije zemljišta, **klasa 5**-Ekscesivna erozija zemljišta.

Figure 6. Absolute confusion matrix and normalized confusion matrix: **class 1** – Very slight erosion, **class 2** – Slight soil erosion, **class 3** – Moderate soil erosion, **class 4** – Severe soil erosion, **class 5** – Excessive soil erosion.

Normalizovana matrica konfuzije prikazana na slici 6. izražava procenat tačnosti modela po pojedinačnim klasama erozionog intenziteta. Vrednosti su normalizovane po redovima, čime se omogućava procena koliko uspešno model prepoznaje svaku klasu u odnosu na ukupan broj piksela koji za nju stvarno pripadaju. Najveća tačnost klasifikacije postignuta je za kategoriju vrlo slabe erozije (Klasa 1), gde je model ostvario gotovo potpunu prepoznatljivost (100%), što ukazuje na jasnu razliku u odnosu na ostale kategorije erozije zemljišta. Kategorije slabe erozije zemljišta (Klasa 2) i srednje erozije zemljišta (Klasa 3) takođe su pokazale visoku tačnost, sa vrednostima od približno 87% i 82%, što potvrđuje da model pouzdano razlikuje umerene kategorije erozionih procesa. Niža tačnost uočena je kod kategorije jake erozije zemljišta (Klasa 4) i naročito kategorije ekscesivne erozije zemljišta (Klasa 5), gde dolazi do delimičnog preklapanja i pogrešne klasifikacije prema susednim kategorijama. Takva odstupanja mogu se objasniti izraženom prostornom neujednačenosti terena, varijabilnošću morfoloških uslova i ograničenom mogućnošću spektralnog razdvajanja površina u zonama sa složenim reljefnim oblicima i kombinovanim tipovima zemljišnog pokrivača. U celini posmatrano, normalizovana matrica potvrđuje da model pouzdano procenjuje dominantne kategorije erozije, dok su njegove najveće nesigurnosti u proceni područja sa najvećim intenzitetom erozije i najmanjom površinskom zastupljenošću. Ovakva pojava je tipična za modele koji koriste prostorne i spektralne podatke.

Na osnovu rezultata matrice konfuzije, određene su vrednosti producerske i korisničke tačnosti za svaku klasu erozije. Rezultati su prikazani na grafikonu koji poredi tačnosti po klasama (Slika 7). Producerska tačnost (eng. Producer's Accuracy) pokazuje koliko je dobro određena klasa prepoznata od strane klasifikacionog algoritma (odnosno od studijske Karte erozije zemljišta), odnosno meri verovatnoću da se referentni piksel određene klase ispravno klasifikuje. Drugim rečima, ona ukazuje na stepen potpunosti klasifikacije određene kategorije. Sa druge strane, korisnička tačnost (eng. User's Accuracy) pokazuje verovatnoću da piksel koji je klasifikovan u određenu klasu zaista i pripada toj klasi u stvarnosti (nakon terenskih istražnih radova), što predstavlja meru pouzdanosti klasifikovanog rezultata iz perspektive krajnjeg korisnika.



Slika 7. Producerska i korisnička tačnost po kategorijama erozije zemljišta: **klasa 1**–Vrlo slaba erozija, **klasa 2**–Slaba erozija zemljišta, **klasa 3**–Srednja erozija zemljišta, **klasa 4**–Jaka erozije zemljišta, **klasa 5**–Ekscesivna erozija zemljišta.

Figure 7. Producer's and user's accuracy by soil erosion categories: **class 1** – Very slight erosion, **class 2** – Slight soil erosion, **class 3** – Moderate soil erosion, **class 4** – Severe soil erosion, **class 5** – Excessive soil erosion.

Analiza prikazanih rezultata pokazuje da su najveće vrednosti tačnosti ostvarene za klase koja pripada kategorija vrlo slabe erozije, gde su i producerska i korisnička tačnost iznad 0,95, što ukazuje na visoku pouzdanost klasifikacije ovih kategorija između ove dve Karte erozije zemljišta. To se može objasniti njihovom izraženom spektralnom razlikom u odnosu na ostale klase i manjom mogućnošću mešanja tokom procesa klasifikacije. Kategorije slabe erozije (Klasa 2) i srednje erozije (Klasa 3) pokazuju uravnotežene i visoke vrednosti producerske i korisničke tačnosti, koje su iznad 0,8. Ove klase karakterišu prelazne zone između stabilnih i erodiranih područja, pa je moguće delimično preklapanje spektralnih karakteristika, što utiče na blago smanjenu tačnosti između studijske i finalne Karte erozije zemljišta. Blaga odstupanja od savršene tačnosti posledica je prethodno identifikovane međusobne konfuzije između ove dve susedne kategorije. Kod kategorije jake erozije (Klasa 4) primećuje se značajna disproporcija između ove dve tačnosti. Prema slici 7, producerska tačnost je prilično niska (0,58) što ukazuje da studijska Karte erozije zemljišta je identifikovala veći procenat jake erozije, nego što je zaista na terenu. Kategorija ekscesivne erozije (Klasa 5), pokazuje najveću i najkritičniju disproporciju. Njena producerska tačnost je izuzetno niska (0,39), što direktno znači da studijska Karta erozije zemljišta bila nepouzdana, jer nije identifikovala preko 60% stvarnih područja sa ekscesivnom erozijom, odnosno da je površine pod ekscesivnom erozijom kategorisao u površine sa manjim stepenom erozionih procesa.

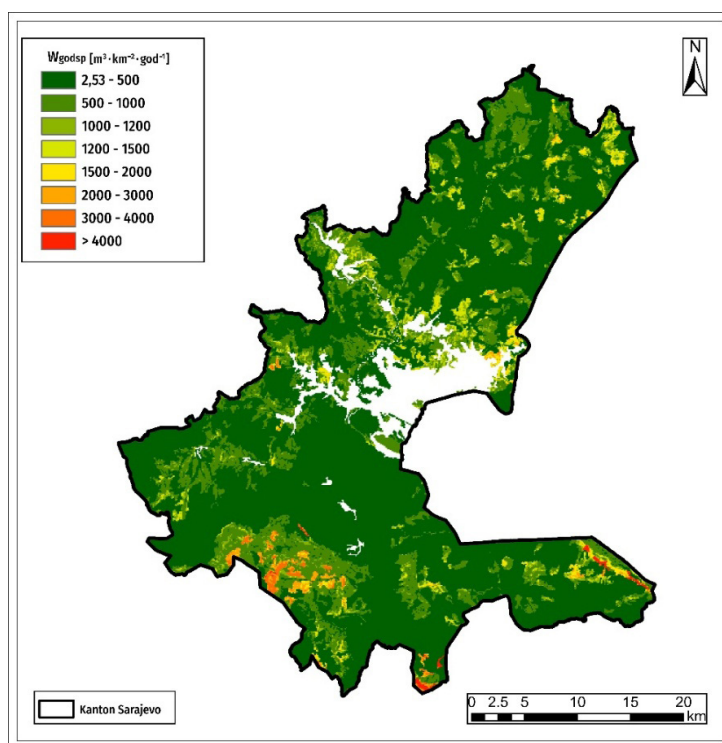
Ukupno posmatrano, rezultati validacije modela i analiza korelacije potvrđuju da je kalibracija parametara na osnovu terenskih istraživanja značajno unapredila pouzdanost procene erozionog potencijala. Dobijena visoka ukupna tačnost i logične korelacione veze između ključnih

varijabli potvrđuju adekvatnost izabranog metodološkog pristupa i predstavljaju dobru osnovu za dalji proračun produkcije erozionog materijala na istraživanom području. Nakon što je izvršena ocena tačnosti između ove dve Karte erozije zemljišta, naredni korak je proračun produkcije erozionog materijala. Primenom formule za proračun specifične produkcije erozionog materijala u GIS okruženju, dobijena je karta specifične produkcije u rasterskoj bazi sa prostornom rezolucijom od 100 m (Slika 8), dok je u tabeli 3, prikazana procentualna zastupljenost produkcije nanosa na području Kantona Sarajevo. U analizi produkcije erozionog materijala, uočeno je da se raspon vrednosti specifične produkcije erozionog materijala kreće od $2,53 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ do $8.388,11 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Prosečna specifična vrednost za celokupno istraživano područje iznosi $W_{\text{godsp}} = 339,31 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Bitno za napomenuti da je za proračun produkcije erozionog materijal analiziran samo na površinama koje su izložene delovanju intenzivnih erozionih procesa (poljoprivredne površine, šume, livade, žbunasta i niska vegetacija, polu-prirodna područja i sl.). Urbanizovana područja sa izraženim učešćem neporoznih površina, reke, jezera, vlažnih staništa i slično su isključena iz analize.

Tabela 3. Površinska zastupljenost produkcije nanosa na području Kantona Sarajevo

Table 3. Spatial distribution of sediment production in the area of Sarajevo Canton

Klasa produkcije nanosa	Kategorija produkcije nanosa	Jačina erozionih procesa	Tip vladajuće erozije	Specifična produkcija $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$	km^2	%
1	I-1	Područje ekscesivne erozije	dubinskog (preteranog) tipa	> 4000	2,89	0,24
2	I-2	Područje ekscesivne erozije	površinskog tipa	3000 – 4000	6,19	0,52
3	II-1	Područje jake erozije	dubinskog tipa	2000 – 3000	10,96	0,93
4	II-2	Područje jake erozije	površinskog tipa	1500 – 2000	14,10	1,19
5	III-1	Područje srednje erozije	dubinskog tipa	1200 – 1500	31,50	2,66
6	III-2	Područje srednje erozije	površinskog tipa	1000 – 1200	48,32	4,08
7	IV	Područje slabe erozije	mešovito tipa	500 – 1000	226,72	19,16
8	V	Područje vrlo slabe erozije	mešovito tipa	2,53 – 500	842,61	71,21
Ukupno					1183,29	100,00

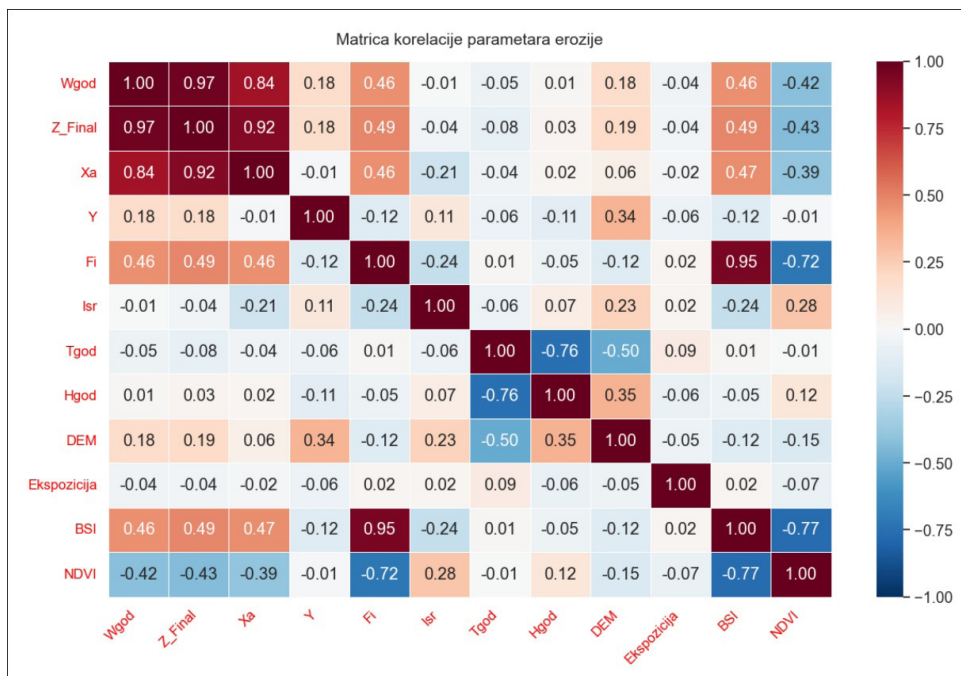


Slika 8 Kategorija specifične produkcije erozionog materijala na području Kantona Sarajevo

Figure 8. Category of specific soil erosion material production in the area of Sarajevo Canton.

Na osnovu prikazane matrice Pirsonove korelacije može se uočiti stepen međusobne povezanosti između različitih parametara koji učestvuju u proračuni intenziteta erozionih procesa (Slika 9). Analiza kvantifikuje linearne odnose između varijabli, gde vrednosti bliske +1 ukazuju na jaku pozitivnu, a bliske -1 na jaku negativnu korelaciju. Najveće vrednosti korelacije registrovane su između produkcije erozionog materijala (W_{god}), koeficijenta erozije zemljišta (Z) i koeficijenta uređenja sliva i načina korišćenja zemljišta ($X \cdot a$), što ukazuje na njihovu snažnu međuzavisnost i dominantan uticaj na izradu Karte erozije zemljišta. Ova povezanost je očekivana, s obzirom na to da su ovi parametri direktno zavisni od tipa zemljišnog pokrivača, stepena antropogenog uticaja i intenziteta površinskog oticanja. Umereno pozitivna korelacija zabeležena je između koeficijenta vidljivih erozionih procesa (φ) i indeksa golog zemljišta (BSI), što ukazuje da su područja sa većim procentom golih i ogoljenih površina predstavljaju zone sa izraženim erozionim procesima i izvorima produkcije erozionog materijala. Nasuprot tome, NDVI pokazuje negativnu korelaciju sa koeficijentima φ , Z i W_{god} , što potvrđuje da vegetacioni pokrivač ima značajnu zaštitnu ulogu u smanjenju intenziteta erozije zemljišta. Topografski parametri, poput srednjeg nagiba terena (I_{sr}) i digitalnog modela terena (DEM), pokazuju umerenu do slabu povezanost sa erozionim koeficijentima, što ukazuje da reljef ima posredan, ali ne presudan uticaj na ukupni erozioni proces. Klimatski faktori (T_{god} i H_{god}) beleže negativnu korelaciju sa nagibom i delimično sa produkcijom erozionog materijala, što može ukazivati na složenu interakciju između klimatskih činioca, nagiba terena i stepena prisustva vegetacionog pokrivača. Ukupno posmatrano, rezultati Pirsonove korelacije ukazuju da su

najznačajniji faktori koji utiču na intenzitet erozionih procesa upravo oni koji opisuju stanje i karakteristike zemljišnog pokrivača, dok topografski i klimatski parametri imaju sekundarni, ali ne zanemarljiv efekat. Ovakvi odnosi potvrđuju da kombinovanje pokazatelja vegetacije i načina korišćenja zemljišta daje najstabilniju osnovu za procenu intenziteta erozije zemljišta i pouzdanu procenu prostorne distribucije erozije.



Slika 9. Matrica Pirsonove korelacije parametara erozije zemljišta

Figure 9. Pearson correlation matrix of soil erosion parameters.

DISKUSIJA

Erozija zemljišta predstavlja jedan od najznačajnijih oblika degradacije životne sredine, sa ozbiljnim posledicama po poljoprivrednu proizvodnju, kvalitet voda i vodene ekosisteme (Peter Heng et al., 2010). Proces erozije zemljišta dovode do gubitka plodnog površinskog sloja, smanjenja produktivnosti zemljišta i ugrožavanja stabilnosti ekosistema. Glavni faktori koji uslovljavaju eroziju zemljišta obuhvataju klimatski uslovi, morfološke karakteristike terena, fizičko-hemijska svojstva zemljišta, tip i način korišćenja zemljišta, kao i stepen vegetacionog pokrivača (Terefe, 2023). Tačno modeliranje erozionih procesa ima ključnu ulogu u planiranju i sprovođenju mera zaštite i održivom upravljanju zemljišnim resursima. Preciznost modela erozije u velikoj meri zavisi od prostorne rezolucije ulaznih podataka, posebno digitalnih modela terena (DEM), koji omogućavaju određivanje topografskih parametara bitnih za proračun erozije (Ristić et al., 2017, Duraes et al., 2020). Prostorna rezolucija DEM-a direktno utiče na tačnost izračunavanja dužine padine i nagiba terena, a samim tim i na procenu erozionih gubitaka u različitim geomorfološkim uslovima (Li et al., 2021). Pored topografskih parametara, prostorna rezolucija podataka o zemljišnom pokrivaču ima značajan uticaj na modeliranje erozije. Ona određuje način predstavljanja površinske hrapavosti, gustine i strukture vegetacionog pokrivača, kao i hidroloških puteva, koji su ključni

elementi za realistično modeliranje erozionih procesa (Bircher et al., 2019). Viši nivo prostorne preciznosti doprinosi boljem razumevanju uticaja različitih praksi korišćenja zemljišta i prirodnih vegetacionih tipova na intenzitet erozionih procesa, naročito u složenim terenskim uslovima (Duraes et al., 2020). Pored geoprostorne baze podataka, za izradu karte erozije zemljišta, terenski istražni radovi predstavljaju ključnu ulogu u ovom procesu.

Analiza matrice tačnosti pokazala je visoku pouzdanost modela u klasifikaciji erozionih klasa, uz manja odstupanja u prepoznavanju intenzivnijih kategorija. Niža tačnost uočena je kod jakih (4) i naročito ekscesivnih erozionih klasa (5), gde dolazi do delimičnog preklapanja i pogrešne klasifikacije prema susednim klasama. Takva odstupanja mogu se objasniti prostornom heterogenošću, izraženim kontrastima u reljefu i vegetacionom pokrivaču, kao i složenim prelazima između erozionih zona. Rezultati druge faze istraživanja, u poređenju s početnom analizom, ukazuju na povećanje površina pod ekscesivnom erozijom (klasa 5). Na prvi pogled, takav rezultat može sugerisati porast intenziteta erozionih procesa, ali detaljnija interpretacija ukazuje da se radi prvenstveno o posledici unapređenja metodološkog pristupa i većeg kvaliteta ulaznih podataka. U prvoj fazi, upotreba baza podataka prostorne rezolucije od 100 m po pikselu ograničila je mogućnost detekcije manjih, ali značajnih erozionih formi. Ovakva prostorna generalizacija često dovodi do potcenjivanja intenziteta procesa jer mikro reljefne strukture, poput jaruga i brazda, ostaju prikrivene unutar većih rastera. U drugoj fazi istraživanja, kombinacijom daljinske detekcije visoke prostorne rezolucije i verifikacije na terenu, omogućena je preciznija klasifikacija i identifikacija erozionih oblika koji ranije nisu bili uočeni.

Terenski istražni radovi potvrdila su prisustvo izraženih oblika linearne erozije, naročito jaruga i brazda, koje predstavljaju najrazvijeniji stadijum površinske erozije. Njihov razvoj je uslovljen kombinacijom prirodnih faktora – erodibilnim litološkim sastavom, strmim nagibima, degradiranim zemljišnim pokrivačem i smanjenom vegetacionom zaštitom – i antropogenim uticajima, pre svega nepravilnim korišćenjem zemljišta i intenzivnim padavinama. Ovi faktori zajednički doprinose prostornoj koncentraciji erozionih procesa i povećanju vizuelno uočljivih erozionih formi na terenu. Stoga, povećanje površina pod ekscesivnom erozijom ne treba tumačiti kao realno širenje procesa, već kao rezultat poboljšane metodologije, preciznije detekcije i integrisanog pristupa analizi. Ovakav pristup omogućava dublje razumevanje stvarne prostorne distribucije erozionih klasa i značajno doprinosi verifikaciji modela. Preciznija identifikacija erozionih formi ima ključne implikacije za planiranje mera zaštite zemljišta i voda. Tačno prostorno razgraničenje zona intenzivne erozije olakšava usmeravanje preventivnih aktivnosti, naročito u područjima visokog nagiba i degradiranog zemljišta. Rezultati potvrđuju važnost integracije daljinske detekcije, GIS analiza i terenskih istraživanja u proceni i praćenju erozionih procesa, čime se povećava pouzdanost modela i stvaraju osnove za preciznije prostorno planiranje i održivo upravljanje zemljišnim resursima, kao i postizanje efikasnog i jedinstvenog sistema odbrane od poplava i smanjenja uticaja erozije zemljišta.

ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedenog istraživanja potvrdili su da integracija daljinske detekcije, GIS analiza i terenskih istražnih radova predstavlja pouzdan pristup za procenu prostorne distribucije erozionih procesa. Analiza koeficijenta Z i evaluacija tačnosti klasifikacije pomoću matrice konfuzije pokazale su visoku usklađenost između modelovanih i zabeleženih podataka, uz manja odstupanja kod intenzivnijih erozionih klasa. U poređenju s početnom analizom, finalna karta ukazuje na veće površine pod ekscisivnom erozijom. Ovakvo povećanje nije posledica realnog širenja procesa, već unapređenja metodološkog pristupa i primene baza podataka više prostorne rezolucije, kao i sprovedenih terenskih verifikacija. Na taj način omogućena je preciznija identifikacija erozionih formi, naročito jaruga i brazda, koje u nižim prostornim rezolucijama nisu bile jasno detektovane.

Dobijeni rezultati naglašavaju važnost kombinovanja prostornih podataka različite rezolucije i savremenih geoprostornih alata u analizi erozionih procesa. Buduća istraživanja trebalo bi usmeriti na razvoj dinamičkih modela koji uključuju vremensku komponentu i klimatske scenarije, kao i na primenu LiDAR i dron tehnologija i tehnika mašinskog učenja radi detaljnije validacije i mapiranja erozionih formi. Takav pristup predstavlja osnovu za razvoj preciznog sistema monitoringa erozije i za unapređenje planiranja mera zaštite zemljišta i voda u skladu sa principima održivog upravljanja prirodnim resursima.

LITERATURA

1. (2012): Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, Društvo za istraživanje, studije, projektiranje i konzalting – Zavod za vodoprivredu d.o.o. Mostar (2012): Strategija upravljanja vodama Federacije Bosne i Hercegovine 2010. – 2022., Sarajevo.
2. (2016a): BRANA mreža (2016): Izvještaj o realizaciji sredstava za sanaciju posljedica poplava u BiH iz 2014. godine, Sarajevo.
3. (2016b): Strategija razvoja Kantona Sarajevo do 2020., Zavod za planiranje razvoja Kantona Sarajevo. https://zpr.ks.gov.ba/sites/zpr.ks.gov.ba/files/2024-11/i_strategija_razvoja_kantona_sarajevo_do_2020._prijedlog.pdf
4. (2024a): USGS (United States Geological Survey), <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed on 24 May 2024).
5. (2024b): GEE. Google Earth Engine Data Catalog. Available online: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat> (accessed on 24 May 2024).
6. Abdi M A. (2020): Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data, GIScience & Remote Sensing, DOI: 10.1080/15481603.2019.1650447
7. Amini H., Honarjoo N., Jalaliyan A., Khalilizadeh M., Baharlouie J. (2014): A comparison of EPM AND WEPP models for estimating soil erosion of Marmeh watershed in the South Iran, Agriculture & Forestry, Vol. 60 Issue 4: 299-315, 2014, Podgorica.
8. Bircher P., Liniger H.P., Prasuhn, V. (2019): Comparing different multiple flow algorithms to calculate RUSLE factors of slope length (L) and slope steepness (S) in Switzerland, Geomorphology, Volume 346, 2019, 106850, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106850>.
9. Cohen J.A. (1960): A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurements. 20:37–46.
10. De Cesare G., Beyer Portner N., Boillat J., Scleiss A. (1998): Modelling of erosion and sedimentation based on field investigation in Alpine reservoirs of hydropower schemes. German Coastal Engineering Research Council, parallel session 34.
11. Deering D. W. (1978): Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station.
12. Dobrota M. (2018): Statistički pristup definisanja zone osjetljivosti u metodama daljinskog uzorkovanja. Doktorska disertacija, Fakultet Organizacionih nauka, Univerzitet u Beogradu.
13. Duraes, M. F., Sirtoli, A. E., & dos Santos, J. S. (2020): Effects of DEM resolution on the RUSLE-LS factor and its implications on soil and water management policies through the land cover seasonality. African Journal of Agricultural Research, 16(12), 1755-1765.
14. EEA. (2018): Corine land cover datasets (2018). European Environmental Agency. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (accessed /приступљено
15. Gavrilović S. (1972): Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Izgradnja, Specijalno izdanje, Beograd
16. Globevnik L., Holjević D., Petkovček G., Rubinić J. (2003): Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques, Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques.

- Proceedings of symposium HS01 held during IUGO2003 at Sapporo. July 2003. IAHS Publ. no. 279, Sapporo
17. Gulch E. (1991): Extraction of Geometric Features from Digital Imagery, Digital Photogrammetric Systems, Wichmann
 18. Herslund L. B., Jean-Baptiste N., Jalayer F., Jørgensen G., Kabisch S., Lindley S., Nyed P. K., Pauleit S., Printz A., Vedeld T. (2015): Developing multiple-dimensional assessment of urban vulnerability to climate change in sub-Saharan Africa. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15002>
 19. Jain M.K., Das D. (2010): Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and remote sensing. *Water Resources management*, 24 (10), 2091–2112.
 20. Khorram S., Wiele C. F., Koch F. H., Nelson S. A., Potts M. D. (2016): Principles of Applied Remote Sensing. New York: Springer Science+Business Media LLC.
 21. Kostadinov S. (2008): Bujični tokovi i erozija, Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
 22. Landis J.R., Koch G.G. (1977): The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, Vol. 33, pp.159-174.
 23. Levin N. (1999): Fundamentals of Remote Sensing. Tel Aviv, Israel: Remote Sensing Laboratory, Geography Department, Tel Aviv University.
 24. Li Ao, X.C. (John) Zhang, Baoyuan Liu (2021): Effects of DEM resolutions on soil erosion prediction using Chinese Soil Loss Equation, *Geomorphology*, Volume 384, 2021, 107706, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107706>.
 25. Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. (1991): GLASOD World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation. ISRIC, Wageningen UNEP, Nairobi (second revised ed.).
 26. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. (2014): Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.* 148, 42–57.
 27. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. (2015): A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water, *Geosciences*, 5 (2): 117–126
 28. Peter Heng, B.C., Chandler, J.H. and Armstrong, A. (2010), Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. *The Photogrammetric Record*, 25: 240-265. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00584.x>
 29. 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>
 30. Radić B. (2014): Erozija kao faktor degradacije predela u skijaškim centrima Srbije, doktorska disertacija. Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, UDK: 502.17 : [796.9:551.3.053 (497.11)(043.3)]
 31. Rafaelli S., Peviani M., Perez Ayala F. (1998): Study of sediment yield on the mountain Cuenca del Rio Iruya (Argentina). IARH AMH, Hydraulic XVIII Latin American Conference, Oaxaca, Mexico.

32. Rikimaru, A.; Roy, P.; Miyatake, S. Tropical Forest Cover Density Mapping. *Trop. Ecol.* 2002, 43, 39–47.
33. Ristić R, Polovina S, Malušević I, Radić B, Milčanović V, Ristić M (2017): Disaster Risk Reduction Based on a GIS Case Study of the Čađavica River Watershed. *South-east Eur for* 8 (2): 99-106. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.17-12>
34. Ristić R., Kostadinov S., Abolmasov B., Dragičević S., Trivan G., Radić B., Trifunović M., Radosavljević Z. (2012): Torrential floods and town and country planning in Serbia, *Natural Hazards and Earth System Sciences* (ISSN: 1561-8633).
35. Ristić R., Kostadinov S., Malošević D., Spalević V. (2001): Erosion aspect in estimation of hydrologic soil group and determination of runoff curve number CN.
36. Ristić R., Malošević D. (2011): Hidrologija bujičnih tokova, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1–221 str.)
37. Ristić R., Nikić Z. (2007): Održivost sistema za vodosnabdijevanje Srbije sa aspekta ugroženosti erozionim procesima, Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
38. Ristić, R. (2000): Režim pojave i karakteristike velikih voda na bujičnim slivovima u Srbiji, doktorska disertacija, Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
39. Spalević V., Čurović M., Billi P., Fazzini M., Frankl A., Nyssen J. (2014): Soil erosion in the Zim potok watershed Polimlje river basin, Montenegro, *Agrosym 2014: book of proceedings: fifth international scientific agricultural symposium 'Agrosym 2014'*. p
40. Szendrene-Koren E., Nemeskeri I. (2007): Water Management of forest soils below different soil types, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*
41. Tempfli K., Kerle N., Huurneman G. C., Janssen L. L. (2009): *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook*. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).
42. Terefe, B., Melese, T., Tsegaye, A. et al. (2025): Soil loss estimation in Ethiopia: a comprehensive review of the RUSLE model integrated with geospatial technologies. *Discov Sustain* 6, 334 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01037-8>
43. United Nations (2004): *World Urbanization Prospects (the 2003 revision)*. Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.
44. United Nations (2012): *World urbanization prospects: The 2011 revision*. Presentation at the Center for Strategic and Urbanization.

ХИДРОСЕТВА – ЗЕЛЕНО РЕШЕЊЕ У БОРБИ ПРОТИВ ДЕГРАДАЦИЈЕ ЗЕМЉИШТА

HYDROSEEDING – A GREEN SOLUTION TO SOIL DEGRADATION

Мандић Теодора¹, Лазаревић Катарина¹, Тодосијевић Мирјана¹, Миљковић Предраг¹

¹Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Апстракт: Убрзана деградација земљишта услед климатских промена, урбанизације и интензивне експлоатације природних ресурса представља један од најозбиљнијих еколошких изазова савременог доба. У циљу очувања и обнове земљишних ресурса, развијају се приступи засновани на конзервацији и еколошкој рестаурацији. Хидросетва се истиче као ефикасна техника која омогућава брзо озелењавање и стабилизацију еродираних и тешко приступачних терена. Комбинујући семе, воду, хранљиве материје и стабилизујуће компоненте, ова метода доприноси успостављању вегетационог покривача, смањењу ерозије и унапређењу биодиверзитета. Рад анализира примену хидросетве у свету и Србији, са освртом на њене техничке карактеристике, еколошке ефекте и могућности за даљу примену у контексту борбе против деградације земљишта.

Кључне речи: хидросетва, травњаци, деградација земљишта, конзервација, ерозија, еколошка рестаурација

Abstract: Accelerated soil degradation due to climate change, urbanization and intensive exploitation of natural resources is one of the most serious environmental challenges of our time. To preserve and restore soil resources, approaches based on conservation and ecological restoration are being developed. Hydroseeding stands out as an effective technique that allows for rapid greening and stabilization of eroded and difficult-to-access terrain. By combining seeds, water, nutrients and stabilizing components, this method contributes to the establishment of vegetation cover, reducing erosion and improving biodiversity. The paper analyzes the application of hydroseeding in the world and in Serbia, with a focus on its technical characteristics, environmental effects and possibilities for further application in the context of combating soil degradation.

Keywords: hydroseeding, lawns, soil degradation, conservation, erosion, ecological restoration

УВОД

Интензиван развој индустрије и ширење урбаних подручја, праћено повећаном експлоатацијом природних ресурса довели су до дубоких поремећаја у функционисању екосистема широм света. Земљиште, као основа копнених екосистема и носилац биолошке продуктивности, све је више изложен утицају ових процеса. Деградација земљишта, кроз ерозију, губитак органске материје, контаминацију, збијање и смањење биолошке активности, представља један од најозбиљнијих еколошких изазова 21. века (FAO, 2020; Montanarella, 2007). Последице ових процеса угрожавају безбедност хране, климатску стабилност, водне ресурсе и здравље животне средине.

У циљу ублажавања негативних ефеката деградације, научна и стручна заједница развиле су два основна приступа: конзервацију и еколошку рестаурацију земљишта. Конзервација представља превентивни систем управљања који обухвата конкретне технологије и праксе за спречавање ерозије, губитка плодности и деградације структуре земљишта, доприносећи тиме очувању екосистема и економској одрживости (Kadović,

¹ *manditeodora033@gmail.com

1999). Она укључује агрономске мере (нпр. противерозиони плодореци, малчирање, заснивање травњака), техничке мере (терасирање, водопутеви, ободни канали) и мере управљања земљиштем (конвенционална и конзервациона обрада).

С друге стране, еколошка рестаурација представља намерну активност усмерену ка опоравку деградираних екосистема у погледу њиховог здравља, интегритета и одрживости (SERI, 2004). Према Конвенцији УН о биолошкој разноврсности, то је процес који покреће или убрзава еколошки ток ка референтном стању, уз циљ да се успостави самоодржив, функционалан екосистем који пружа кључне екосистемске услуге и подржава одржива средства за живот. Еколошка рестаурација обухвата процену почетног стања, планирање интервенција, спровођење активности (уклањање инвазивних врста, реинтродукција аутохтоних, стабилизација терена), мониторинг и дугорочну заштиту (Gann et al., 2019; Santini & Miquelajauregui, 2022).

У оквиру ових приступа, хидросетва се издваја као савремена, технолошки напредна и еколошки прихватљива метода која комбинује агрономске и техничке принципе. Хидросетва подразумева апликацију хомогене смеше воде, семена, ђубрива, лепкова и малча под притиском, чиме се омогућава равномерно озелењавање великих, нагнутих и тешко приступачних површина. Њена примена доприноси стабилизацији земљишта, смањењу ерозије, унапређењу микроклиме и обнови биодиверзитета, што је чини важним алатом у борби против деградације и унапређењу одрживог управљања земљиштем. Хидросетва се може сврстати у категорију интегрисаних конзервационих мера, јер обједињује биолошке, техничке и управљачке аспекте у једној интервенцији. Њена примена у инфраструктурним пројектима, санацији депонија, рударским зонама и урбаним срединама показује да она не само да спречава даљу деградацију, већ и активно доприноси обнови функција земљишта и екосистема.

Циљ овог рада је да се истраже могућности и ефекти примене хидросетве као мере еколошке рестаурације и конзервације земљишта, кроз анализу примера из света и Србије, са посебним освртом на њену техничку примену, еколошке добити и потенцијал за даљи развој у контексту одрживог управљања земљиштем.

МЕТОДОЛОГИЈА

Овај рад заснива се на анализи доступне литературе, техничких извештаја и примера из праксе који се односе на примену хидросетве за брзо озелењавање деградираних површина. Методологија рада обухватила је систематску претрагу научних радова, стручних публикација и интернет извора који се баве хидросетвом. Коришћени су извори који садрже опис технике хидросетве, начине и услове примене и резултате постигнуте у рачзичитим условима (климатским и географским), са посебним освртом на примену у Србији. Коришћени су квалитативни и квантитативни показатељи како би указали на потенцијал хидросетве као зеленог решења у борби против деградације земљишта.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом одељку приказани су резултати анализе метода заснивања травњака, са посебним освртом на примену хидросетве као ефикасног решења за озелењавање деградираних површина.

Заснивање травњака

Травњаци представљају земљишне површине које су углавном прекривене природним травним слојем, са занемарљивим присуством дрвећа или његовим потпуним одсуством. Састављени од врста из породице Роасаеае, као и других траволиких и зељастих биљака, које формирају

биљне заједнице, травне фитоценозе, и најчешће се користе за узгој сточне хране, али могу имати и друге специфичне намене (декоративна, рекреативна, за заштиту земљишта) (Letić, 2002; Erić i sar., 2016). Инжењерско-технички значаји зелених површина су спречавање ерозије земљишта, контрола саобраћаја, заштита од снежних наноса, контрола бљештања (рефлексија), учвршћење клизишта, противпожарни значај и пречишћавање отпадних вода (Erić i sar., 2016). У оквиру мера за спречавање и ублажавање ерозије у сливовима и речним коритима, посебно је истраживана улога вегетације. Међу различитим природним решењима, травнати покривач се показао као једна од најефикаснијих и финансијски најприступачнијих опција. Његова способност да стабилизује земљиште, смањи утицај падавина и успори површинско отицање чини га кључним елементом у борби против ерозивних процеса (Gavrilović, 1972).

Сејани травњаки могу да се заснују на различите начине, али данас се најчешће користе следећи поступци (Kadović, 1999; Erić i sar., 2016):

I Сетва семена трава – генеративно (ручно сејање, хидросетва, или у/на техничку, разградиву/неразградиву подлогу)

II Постављање травног тепиха

III Садња живића столона, ризома и травних чепова – вегетативно

У наставку је приказана табела која сумира кључне параметре за избор методе заснивања травњака, узимајући у обзир техничке, економске и еколошке аспекте (Табела 1). Овај приказ омогућава брзу процену применљивости сваке методе у различитим условима терена и потребама озелењавања.

Табела 1. Упоредна анализа метода заснивања травњака у Србији

Table 1. Comparative analysis of lawn establishment methods in Serbia

Критеријум	Сетва семеном	Травни тепих	Столони / ризоми	Хидросетва
Оптимално доба године	август–септембар / април–мај	септембар–март	рана јесен / рано пролеће	пролеће / рана јесен
Оквирна цена (по m ²)	1–2 €	6–10 €	4–6 €	3–5 €
Површина примене	>1000 m ²	500–1000 m ²	>500 m ²	>500 m ²
Погодност за нагибе	мање погодна	веома погодна	умерено погодна	веома погодна
Захтеви за водом	средњи–високи	средњи	високи	средњи
Време формирања травњака	1–3 месеца	2–3 недеље	2–3 месеца	1–3 месеца
Изддржљивост	добра	висока	висока	висока
Еколошки утицај	позитиван	умерен	позитиван	позитиван
Предности	ниска цена, природна регенерација	брз визуелни ефекат, стабилност	отпорност, природна метода	равномерна дистрибуција, погодна за нагибе
Ограничења	ризик од спирања, неравномерна покривеност	висока цена, потребан транспорт	технички захтевна, високи водени захтеви	захтева опрему, умерени трошкови

Извор: прилагођено од Erić i sar., 2016

На основу приказаних параметара у табели 1, избор методе заснивања травњака зависи од више фактора: морфологије терена, финансијских могућности, доступности опреме и утицаја на животну средину. Најприступачнија метода, ручна сетва, погодна је за мање површине, али показује ограничења на нагнутим теренима и захтева дужи период за стабилизацију травњака. Насупрот томе, травни тепих омогућава тренутну визуелну трансформацију, али је финансијски најзахтевнији и подразумева производњу ван локације примене. Хидросетва се издваја као оптималан компромис између техничке ефикасности и еколошке одрживости. Њена примена на површинама под нагибом показује значајне предности у спречавању ерозије, а равномерна дистрибуција семена омогућава брзо и уједначено озелењавање. Коришћење вегетативних делова трава, као што су столони и ризоме, препоручује се у ситуацијама када је потребно брзо формирати густ травни покривач отпоран на сушу, гажење и друге спољашње утицаје.

У поређењу са другим методама, хидросетва захтева умерене ресурсе, али пружа високу издржљивост и позитиван утицај на животну средину, нарочито у контексту рекултивације након грађевинских радова или природних катастрофа. С обзиром на наведене карактеристике, хидросетва се може сматрати стратешки важном методом у управљању деградираним земљиштем, нарочито у условима који захтевају брзу, ефикасну и еколошки прихватљиву интервенцију.

Преглед хидросетве као технике

Хидросетва (или хидромалчирање) представља технику наношења мешавине семена, воде, ђубрива, малча и везива на голе површине земљишта помоћу специјализованих машина (слика 1). Развијена је у САД током 1940-их као одговор на потребу за брзом регенерацијом земљишта након изградње путева и насипа. Првобитно се користила ватрогасна опрема за распршивање, а касније су додати влакнасти материјали ради боље стабилизације. Термин „хидросетва” увео је Чарли Фин 1953. године, када је конструисао прву хидросејалицу (<https://www.finnncorp.com/>). Техника је током 1960-их усавршена додавањем малчева, стабилизатора и развојем професионалне опреме за примену на великим површинама.



Слика 1. Процес хидросетве (<https://classiclawnandtree.com/commercial-hydroseeding/>)

Figure 1. Hydroseeding process (<https://classiclawnandtree.com/commercial-hydroseeding/>)

Основу хидросетве чини хидросејалица, уређај који складишти и равномерно распршује мешавину семена, воде и ђубрива у слоју дебљине 0,5–2 mm (Maiti, 2013). Примењује се у различитим условима: од стамбених травњака до великих инфраструктурних и еколошких пројеката, као што су изградња аутопутева, санација након пожара и рекултивација рударских површина.

Ефикасна примена хидросетве захтева обученог оператера и правилно припремљену опрему. Модерне хидросејалице имају резервоаре капацитета од неколико стотина до преко 10.000 литара, што омогућава примену на различитим типовима терена (слика 2). Опремљене су системима за мешање који обезбеђују хомогену смешу семена, малча, ђубрива и лепкова, спречавају стварање грудви и омогућавају равномерну примену. Пре употребе, нарочито након складиштења, потребно је проверити техничку исправност, укључујући акумулаторе и вентиле.



Слика 2: Хидросејалице различитих капацитета резервоара (лево – модел HS-50 запремине 55 галона (208 литара); десно – модел HM-1000-HARV запремине 1000 галона (3785 литара) (<https://turboturf.com/hs-50-p/>; <https://turboturf.com/hm-1000-harv/#>)

Figure 2: Hydroseeders with different tank capacities (left – model HS-50 with a capacity of 55 gallons (208 liters); right – model HM-1000-HARV with a capacity of 1000 gallons (3785 liters) (<https://turboturf.com/hs-50-p/>; <https://turboturf.com/hm-1000-harv/#>)

Количина воде у хидросејалици зависи од модела, али просечно износи око 190 литара (50 галона). Након пуњења, потребно је очистити цеви ради уклањања остатака и спречавања блокада. Материјали се додају по утврђеном редоследу: најпре семе, затим малч, па ђубриво, уз строго поштовање препорука произвођача. Добро помешана смеша, често називана „муљ”, мора бити хомогена пре примене. Стандардна спецификација укључује 100 kg/ha семена, 50 kg/ha ђубрива и 3000 kg/ha малча (Maiti, 2013). Након припреме опреме, процес хидросетве започиње прскањем мешавине, при чему се, у зависности од модела хидросејалице, прска са црева или са торња (слика 3).

Ефикасност технике зависи од квалитета хидросетвене смеше, која се састоји од семена, воде, малча, ђубрива, везива и адитива. Свака компонента има специфичну улогу у успостављању стабилне и отпорне вегетације.



Слика 3. Хидросејалица Т90 са цревом (лево) и хидросејалица Т330 са торњем (десно)
(<https://www.finnncorp.com/>)

Figure 3. T90 hydroseeder with hose (left) and T330 hydroseeder with tower (right)
(<https://www.finnncorp.com/>)

Семе представља основни елемент хидросетвене смеше, а избор врста директно утиче на брзину клијања, стабилност травњака и дугорочну покривеност терена. У хидросетви се могу користити различите врсте семена, од траве и дивљег цвећа до мешавина за контролу ерозије. Не захтевају се специјалне сорте, већ се примењују комерцијално доступна семена као код класичне сетве. Избор зависи од климе, типа земљишта и намене површине. Аутохтоне врсте доприносе очувању биодиверзитета и отпорности на локалне стресоре, па се често комбинују са брзклијајућим врстама и стабилизаторима са дубоким кореном. Добро осмишљена мешавина омогућава брз раст, ефикасну стабилизацију земљишта и дуготрајну отпорност на сушу, сенку или гажење. Најчешће коришћене врсте у свету и Србији су *Poa Pratensis* L., *Festuca rubra* L., *Festuca arundinacea* Schreb, *Lolium perenne* L. и *Trifolium repens* L. (слика 4).



Слика 4. Траве које се најчешће користе за хидросетву: а) *Poa pratensis*, б) *Festuca arundinacea*, в) *Trifolium repens* (<https://www.inaturalist.org/>)

Figure 4. Grasses most commonly used for hydroseeding: а) *Poa pratensis*, б) *Festuca arundinacea*, в) *Trifolium repens* (<https://www.inaturalist.org/>)

Малч је важна компонента хидросетвене смеше, јер доприноси задржавању влаге, стабилизацији земљишта и подстицању клијања семена. Малчирање је посебно неопходно на теренима са нагибом већим од 3:1, током сушних периода и на неповољним земљиштима — плитким, каменим или песковитим (Maiti, 2013). У хидросетви се користе различити типови малчева, у зависности од услова терена и климатских захтева:

- 1) Малчеви на бази папира: Најчешће се користе због приступачности и лаког мешања са водом. Направљени су од рециклираних целулозних влакана и формирају привремени слој који задржава влагу и подстиче клијање, нарочито на равним и благо нагнутим површинама (до нагиба 4:1). Међутим, трају око три месеца и нису погодни за дугорочну контролу ерозије. Добро функционишу са већином система за хидросетву, укључујући млазнице и лопатике (Maiti, 2013).
- 2) Биоразградиви малчеви: Израђени од природних материјала као што су слама, травна влакна и биљни полимери. Временом се разграђују, побољшавају структуру земљишта и не остављају штетне остатке. Идеални су за еколошку обнову и одрживу конзервацију земљишта (Verma et al., 2024).
- 3) Малчеви на бази хидрогела: Садрже супстанце које апсорбују воду и постепено је отпуштају у земљиште. Омогућавају примену хидросетве у аридним и полуаридним срединама, где је рационално управљање водом од пресудног значаја. Поред уштеде воде, доприносе смањењу испаравања и подстицању здравог раста биљака (Verma et al., 2024).
- 4) Компост и органски **малчеви**: Добијени од разграђених биљних материјала или зеленог отпада. Побољшавају плодност и структуру земљишта, регулишу температуру, смањују испаравање и подстичу активност корисних микроорганизама (Maiti, 2013; Verma et al., 2024).

Лепкови (таксификатори) су дуголанчана једињења угљеника која се користе за стабилизацију земљишта и у хидросетви, али и као средство за обнову биолошког покривача (Blankenship et al., 2019). Најчешће се користе:

- 1) **Гуар** је беличасти прах, природни полисахарид добијен из семених опни биљке *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.. Представља биоразградиво средство које повезује честице земљишта, семе и малч, формирајући заштитну мрежу која задржава влагу и спречава ерозију. Делује одмах након наношења и подстиче здрав раст вегетације.
- 2) **Псилијум** је браон прах, такође полисахарид, добијен из семених опни више врста рода *Plantago*. Јефтин и еколошки прихватљив, али мање ефикасан од гуара. Често се користи за контролу прашине, али се ређе примењује у хидросетви због слабијег стабилизационог ефекта.
- 3) **РАМ (Polyacrylamide)** је синтетички, биоразградиви полимер у облику кристалног праха. Одликује се високом ефикасношћу, дуготрајношћу и способношћу задржавања воде. За разлику од природних лепкова, не делује као лепак већ повезује честице у стабилне структуре, што побољшава услове за укореењавање. Користи се у мањим количинама, што га чини економичним за велике пројекте.

Сва три таксификатора већ се деценијама користе у хидромалчирању, сетви и контроли ерозије, али се разликују по трајности: до 3 месеца за гуар, и до 12 месеци за псилијум и РАМ (CalTrans 2003).

Примена ђубрива представља један од кључних фактора за успешно успостављање и развој вегетације у хидросетви. Ђубрива обезбеђују неопходне хранљиве материје за клијање и раст биљака, а истовремено утичу на стабилност екосистема, продуктивност земљишта и дугорочну еколошку одрживост. Најчешће се користе минерална ђубрива, која садрже основне макронутријенте као што су азот (N), фосфор (P) и калијум (K). Њихова добра растворљивост омогућава лако мешање у хидросетвене суспензије и брзу апсорпцију, али носи ризик од испирања и оптерећења животне средине. Све чешће се примењују ђубрива са спорим ослобађањем, која захваљујући технологијама премазивања или

капсулирања обезбеђују постепenu и контролисану испоруку хранљивих материја током дужег периода, што је посебно корисно на неприступачним теренима (Verma et al., 2024). Поред тога, у оквиру еколошки оријентисаних пројеката користе се специјализована ђубрива, формулисана на основу анализа земљишта и потреба биљних врста. Она могу садржати микронутријенте, биостимулансе и микоризне гљивице, који доприносе бољој адаптацији биљака, отпорности на стрес и дугорочној стабилизацији екосистема. Иако се органска ђубрива ређе користе у класичној хидросетви због своје густине и сложеније примене, у течном облику или као екстракти могу бити додатак мешавини, нарочито када је циљ подстицање микробиолошке активности и побољшање структуре земљишта.

Адитиви представљају важан део хидросетвене смеше, јер доприносе стабилности, ефикасности примене и успешном успостављању вегетације. Најчешће коришћени су везива и суперапсорбери. Везива служе за фиксирање семена на површини земљишта, нарочито на нагнутим теренима, док суперапсорбери задржавају влагу и формирају танак заштитни слој који спречава испаравање и ерозију. Препоручена количина суперапсорбера износи око 80 kg/ha (Maiti, 2013). Поред техничке функције, у хидросетву се често додају и боје, најчешће зелена, које имају двоструку улогу: визуелну контролу током наношења и естетски ефекат. Боја омогућава оператерима да лакше уоче покривеност терена, избегну преклапања и непокривене зоне, а истовремено ствара визуелни утисак озелењене површине одмах након апликације. Овај ефекат је посебно важан у урбаним срединама и на јавним инфраструктурним пројектима, где је визуелна презентација често део захтева пројекта.

Правилна нега након примене хидросетве је од пресудног значаја за успешно клијање семена и успостављање стабилног травњака. У првих 48 сати након апликације не препоручује се заливање, како би се омогућило фиксирање смеше на терену. Након тог периода, препоручује се често и лагано заливање, без употребе директног млаза, како би се избегло испирање семена. У подручјима са довољно природних падавина, киша може бити довољна за подршку почетном расту (Maiti, 2013; Parsakhoo et al., 2018). Прво кошење се препоручује када трава достигне висину од 7–10 cm, што се обично дешава у року од 3 до 4 недеље, у зависности од климатских услова. Приликом кошења, важно је да косилица буде правилно подешена како би се избегло оштећење младих биљака. У првим месецима након хидросетве, треба избегавати употребу хербицида и препарата за сузбијање корова, јер могу негативно утицати на развој новог травњака. Природна конкуренција и постепено јачање травне покривке представљају ефикаснији приступ у раним фазама.

Ограничења и фактори успешности хидросетве

Хидросетва представља ефикасну технику за озелењавање деградираних површина, али њена успешност не зависи искључиво од квалитета мешавине и начина наношења. Успешно клијање, укоренавање и развој вегетације у великој мери условљени су спољашњим факторима као што су климатски услови, структура земљишта, конфигурација терена и начин извођења радова. Управо због тих утицаја, хидросетва у неким ситуацијама представља златни стандард, док у другим може бити мање погодна или захтевнија за примену. Да би се обезбедила ефикасност процеса, неопходно је пратити научно утврђене кораке и прилагодити технику конкретним условима терена. Успешна примена хидросетве подразумева интеграцију техничких, еколошких и климатских аспеката, уз пажљиву процену свих фактора који могу унапредити или ограничити њен ефекат.

Клима је један од најзначајнијих спољашњих фактора који утичу на успех хидросетве. Температура ваздуха и земљишта мора бити у оптималном распону за брзо и равномерно

клијање. Превисоке температуре доводе до исушивања мешавине, док ниске успоравају метаболичке процесе и одлажу укорјењавање. Влажност ваздуха и количина падавина такође играју важну улогу, умерене падавине подстичу клијање, али обилне кише могу испрати семе и нарушити стабилност процеса. Најбољи периоди за хидросетву су пролеће и јесен, када блага и влажна клима подржава развој биљака. Пролећна хидросетва треба да се изводи након ризика од мраза, док јесења може бити посебно успешна за врсте које воле хладније услове. У летњем периоду хидросетва је могућа, али захтева интензивније одржавање и веће трошкове. Ветар је додатни фактор који може утицати на равномерност наношења и испаравање воде, посебно на отвореним теренима.

Облик и нагиб терена директно утичу на избор технике и потребу за додатним стабилизационим мерама. На равним теренима примена је једноставна и равномерна, док стрми нагиби захтевају употребу лепкова, малча или мрежа за фиксацију како би се спречило спирање мешавине (Maiti, 2013). Изложеност терена сунцу, ветру и падавинама додатно компликује примену, па је неопходно пажљиво планирање и прилагођавање мешавине конкретним условима. Припремни кораци као што су чишћење, нивелација и грабљење доприносе бољој адхезији и стабилности.

Карактеристике земљишта (текстура, порозност и рН вредност) имају пресудан утицај на успех хидросетве. Песковита земљишта брзо губе воду, па захтевају чешће наводњавање и употребу хидрогелова. Глиновита земљишта задржавају влагу, али могу отежати продор корена, те захтевају додатну аерацију. рН вредност утиче на доступност хранљивих материја, па се често примењују специјализована ђубрива прилагођена киселим или алкалним условима. Добра припрема земљишта је предуслов за успешно укорјењавање и дугорочну стабилност травњака.

Људски фактор игра кључну улогу у квалитету примене хидросетве. Стручност оператера, избор одговарајуће опреме и прецизност у припреми терена директно утичу на резултате озелењавања. Савремене хидросејалице са GPS навођењем омогућавају високу тачност наношења, чак и на сложеним теренима, док ручна примена захтева више времена, труда и искуства. Недовољна припрема терена, неправилно дозирање компоненти или лоша координација могу довести до неравномерног раста, испирања семена или потпуног неуспеха процеса. Због тога је интеграција техничке опреме и обученог кадра од суштинског значаја за ефикасну и одрживу примену хидросетве. Само уз добро планирану и професионално изведену процедуру могу се постићи стабилни, функционални и еколошки прихватљиви резултати.

Примена хидросетве у пракси

Хидросетва се данас успешно примењује широм света у различитим климатским условима и на бројним типовима терена. Захваљујући брзини, ефикасности и могућности примене на великим и нагнутим површинама, све више се користи у пројектима озелењавања, заштите земљишта од ерозије и обнове деградираних подручја. У овом поглављу биће приказани примери примене хидросетве у свету и Србији, са посебним освртом на њене предности, техничке карактеристике и резултате постигнуте на терену.

Примена хидросетве у свету

Транспортна инфраструктура

Током изградње, проширења и одржавања аутопута (Interstate 70 (I-70)) у Колораду, САД, хидросетва је примењена за стабилизацију земљишта и успостављање вегетације на стрмим косинама и насипима (слика 5). I-70 је кључна саобраћајница која пролази

кроз разне врсте терена, укључујући планинске области са стрмим падинама које су подложне ерозији, где је хидросетва омогућила брзо и равномерно озелењавање великих и тешко доступних површина, посебно у делу West Vail Pass (<https://www.codot.gov/projects/i70westvailauxiliarylanes/>).



Слика 5. Хидросетва и мере заштите земљишта на коридору I-70 West Vail Pass у Колораду; а) и б) процес хидросетве, в) примена мрежа за фиксацију (<https://www.codot.gov/projects/i70westvailauxiliarylanes/>)

Figure 5. Hydroseeding and soil conservation measures on the I-70 West Vail Pass corridor in Colorado; a) and b) hydroseeding process, c) application of fixation nets (<https://www.codot.gov/projects/i70westvailauxiliarylanes/>)

Урбанистички пројекти

У урбаним срединама, хидросетва се користи за озелењавање паркова, игралишта, стамбених комплекса и “зелених” кровова. Пример из Девона, Велика Британија, показује успешну примену хидросетве на крову центра за обуку Краљевских маринаца, где су тешки климатски услови превазиђени комбинацијом малча и природних лепкова (слика 6). Овај приступ омогућио је задржавање супстрата и успешну ревегетацију у условима јаког ветра са мора (<https://www.cdtshydroseeding.co.uk/green-roof-at-instow-devon/>).



Слика 6. Примена хидросетве на зеленом крову центра за обуку Краљевских маринаца у Девону (Devon, UK) (<https://www.cdtshydroseeding.co.uk/green-roof-at-instow-devon/>)

Figure 6. Application of hydroseeding on the green roof of the Royal Marines Training Center in Devon (Devon, UK) (<https://www.cdtshydroseeding.co.uk/green-roof-at-instow-devon/>)

Еколошка и конзервациона примена

Хидросетва се све чешће користи као ефикасна мера у еколошкој обнови и конзервацији земљишта, нарочито на деградираним подручјима насталим услед пожара, рударских активности или грађевинских интервенција. Њена способност да брзо успостави вегетациони покривач чини је изузетно погодном за спречавање ерозије, стабилизацију терена и подстицање природне сукцесије биљних заједница. Према истраживању Vourlitis et al. (2017), хидросетва након пожара не само да смањује ризик од ерозије, већ и доприноси повећању садржаја азота у земљишту током раних фаза обнове екосистема, али на рачун регенерације аутохтоног грмља и богатства врста.

У Северној Калифорнији, након великог пожара Glass Fire 2020. године, хидросетва је примењена на површини од 4,8 хектара као део интегрисаног програма санације (слика 7). Комбинацијом биоразградивих влакнастих ролни, прилагођене мешавине семена и темељног чишћења терена, створени су услови за регенерацију шумске вегетације и дугорочну стабилизацију екосистема. Више од 5.000 линеарних стопа влакнастих ролни постављено је дуж контурних линија како би се спречило испирање супстрата и убрзало укоренавање биљака (<https://www.hanfordarc.com/all-projects/post-fire-recovery-hydroseeding>).



Слика 7. Примена хидросетве након пожара у Калифорнији 2020. године (<https://www.hanfordarc.com/all-projects/post-fire-recovery-hydroseeding>)

Figure 7. Application of hydroseeding after the 2020 California wildfires (<https://www.hanfordarc.com/all-projects/post-fire-recovery-hydroseeding>)



Слика 8. Примена хидросетве на напуштеном руднику угља у Индонезији; а) заснивање травњака хидросејалицом, б) предео пре примене хидросетве и в) предео након примене хидросетве (Pratiwi et al., 2021)

Figure 8. Application of hydroseeding at an abandoned coal mine in Indonesia; a) establishment of a lawn with a hydroseeder, b) landscape before application of hydroseeding and c) landscape after application of hydroseeding (Pratiwi et al., 2021)

У Индонезији, хидросетва се примењује у процесу рекултивације површина након експлоатације угља, посебно у регионима источног и јужног Калимантана и Јужне Суматре (слика 8). Брзо успостављање покровних усева доприноси контроли ерозије, побољшању структуре и плодности земљишта, као и припреми услова за садњу аутохтоних врста. Овај приступ убрзава еколошку обнову и омогућава повратак функција шума, биодиверзитета и локалне продуктивности (Pratiwi et al., 2021).

Спортски и рекреативни објекти

Спортски терени (фудбалски и рагби терени, атлетске стазе, школске дворишне површине, терени за бејзбол и голф терени) захтевају специфичне услове у погледу травног покривача: велику густину, еластичност, отпорност на хабање и визуелну уједначеност. Хидросетва се примењује на спортским теренима који захтевају густ, еластичан и отпоран травни покривач. У Јужној Аустралији, током припрема за AFL Gather Round, техника је коришћена за озелењавање преко 13.000 m² терена у комплексу Barossa Park Wetland (слика 9). Захваљујући прилагођеној мешавини семена и прецизној апликацији, терен је био спреман за употребу у предвиђеном року, уз висок степен естетске уједначености и стабилности травњака (<https://www.ecodynamics.com.au/case-study/afl-gather-round-barossa-park-wetland-hydroseeding-project/>).



Слика 9. Примена хидросетве при реконструкцији спортског комплекса Barossa Park Wetland (<https://www.ecodynamics.com.au/case-study/afl-gather-round-barossa-park-wetland-hydroseeding-project/>)

Figure 9. Application of hydroseeding in the reconstruction of the Barossa Park Wetland sports complex (<https://www.ecodynamics.com.au/case-study/afl-gather-round-barossa-park-wetland-hydroseeding-project/>)

Примена хидросетве у Србији

У Републици Србији хидросетва је током последње две деценије нашла своју примену као метода брзог и ефикасног озелењавања различитих типова терена. Најчешће се користи за стабилизацију бочних страна великих путева, санацију деградираних екосистема, уређење јавних зелених површина и решавање еколошких изазова у индустријским зонама.

Транспортна инфраструктура

Током изградње аутопута „Милош Велики“ (Е-763), који повезује Београд са југозападним деловима Србије, хидросетва је примењена као једна од најефикаснијих техника за стабилизацију терена. Нарочито је била значајна на деоницама које пролазе кроз планинске

пределе са стрмим падинама, где је земљиште изложено интензивној ерозији. Примена хидросетве омогућила је равномерно наношење семенске смеше и брзо формирање вегетационог покривача, чак и на тешко приступачним површинама. Посебно се истичу деонице између Прелјине и Пожеге, као и код искључења за Обреновац (слика 10), где су радови на озелењавању обухватили израду травњака на косинама насипа и раздельним тракама саобраћајнице, применом хидросетве и ручне сетве (2023. и 2018. година).



Слика 10. Примена хидросетве на аутопуту Милош Велики код искључења за Обреновац (лево) и на потезу Прелјина-Пожега, деоница 3 (десно) (фото Т. Мандић)

Figure 10. Application of hydroseeding on the Miloš Veliki highway at the Obrenovac exit (left) and on the Preljina-Požega stretch, section 3 (right) (photo T. Mandić)

Осим на траси аутопута „Милош Велики“, хидросетва је коришћена и на другим значајним инфраструктурним пројектима. На обилазници око Београда (сектори 4, 5 и 6), у оквиру деонице од моста преко Саве код Остружнице до Бубањ Потока, изведени су обимни радови на озелењавању, који су обухватили набавку и садњу шибља, припрему терена за ручну сетву, хидросетву, као и радове на одржавању новоформираних зелених површина (2023). Слични радови су изведени и на деоници Сурчин – Нови Београд, као делу аутопута Е-763, где је такође примењена хидросетва у оквиру радова на озелењавању.

На траси Рума – Шабац – Лозница, посебно на деоници Рума – Шабац, реализовани су радови озелењавања у оквиру ширег пројекта изградње брзе саобраћајнице, при чему је примењена комбинација садње шибља и хидросетве.

Поред тога, хидросетва је примењена и на више деоница Коридора 10, као што су: деоница Станичење – Пирот (Исток), у оквиру аутопута Е-80 (2019), и обилазница око Димитровграда (2018), где су радови обухватили садњу високих лишћара, четинара, жбуња и заснивање травњака методом хидросетве.

Ови примери указују на све ширу примену хидросетве као стандардне технике у пројектима изградње путне инфраструктуре у Србији, посебно у условима захтевног терена и потребе за брзом и ефикасном стабилизацијом насипа и падина.

Урбанистички пројекти

У Кошутњаку, једном од најпознатијих београдских паркова, хидросетва је примењена ради санације еродираних и огољених површина насталих услед интензивне употребе и климатских утицаја (слика 11). Коришћена је мешавина локално прилагођених травних

врста отпорних на сушу и хабање, уз додатак ђубрива и стабилизатора. На местима са појачаним пешачким саобраћајем примењени су додатни слојеви малча ради заштите биљака током фазе раста. Резултати су показали значајно побољшање биодиверзитета, обнову станишта за инсекте и птице, као и унапређење визуелног доживљаја посетилаца. Травната површина добијена хидросетвом показала се отпорнијом на интензивну употребу и захтева минимално одржавање (<https://hidrosetva.rs/kosutnjak/>).



Слика 11. Примена хидросетве у Кошутњаку (<https://hidrosetva.rs/kosutnjak/>)
Figure 11. Application of hydroseeding in Košutnjak (<https://hidrosetva.rs/kosutnjak/>)

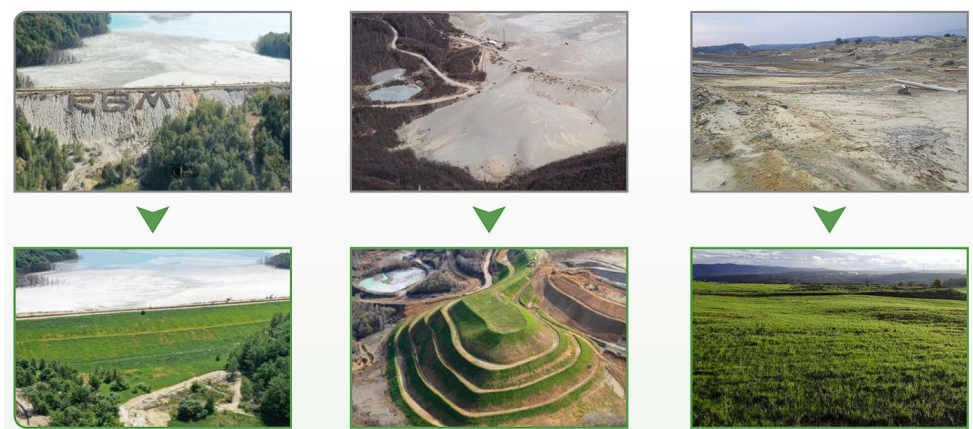
Еколошка и конзервациона примена

Депонија пепела у Обреновцу, настала као резултат рада термоелектрана, представљала је озбиљан еколошки изазов због ерозије ситних честица ветром и водом. Хидросетва је примењена као иновативно решење за стабилизацију и озелењавање ових површина (слика 12). Употреба стабилизатора допринела је смањењу спирања семена током иницијалне фазе клијања, док је вегетациони покривач умањио емисију прашине и побољшао микроклиму. Овај приступ показао се као одрживо решење које захтева минимално одржавање, уз значајно унапређење визуелног и еколошког квалитета рељефа (<https://hidrosetva.rs/deponija-pepela-obrenovac/>).



Слика 12. Примена хидросетве на депонију пепела у Обреновцу (<https://hidrosetva.rs/deponija-pepela-obrenovac/>)
Figure 12. Application of hydroseeding at the ash landfill in Obrenovac (<https://hidrosetva.rs/deponija-pepela-obrenovac/>)

У рударским регионима Бора и Мајданпека, хидросетва је примењена као део програма рекултивације земљишта након експлоатације (слика 13). Кинеска компанија Зиђин користила је ову технику за озелењавање стрмих падина, зона око транспортних система, дробилица и приступних путева. У руднику бакра у Мајданпеку, до прве половине 2024. године, озелењено је преко 130.000 m² површина, укључујући и 2.000 m² неприступачног терена код радионице електромашинског одржавања. Укупно је у последње четири године рекултивисано преко пола милиона квадратних метара земљишта, при чему је озелењено 80% јаловишта (CSR REPORT 2023).



Слика 13. Примена хидросетве у Бору и Мајданпеку, пре и после примене (CSR REPORT 2023)

Figure 13. Application of hydroseeding in Bor and Majdanpek, before and after implementation (CSR REPORT 2023)

Спортски и рекреативни објекти

Неколико домаћих компанија које се баве озелењавањем и уређењем спортских површина, попут Green Decor, Super Green и Hidrosetva.rs, наводе да хидросетва представља ефикасну технику за брзо и равномерно заснивање травњака на спортским теренима, школским двориштима и јавним површинама. Ова метода се препоручује за терене који захтевају високу отпорност на хабање, густину траве и брзу регенерацију, што је посебно важно за фудбалске и рекреативне терене. Међутим, у погледу голф терена, иако постоје фирме у Србији које се баве њиховим пројектовањем и одржавањем, као што су Superior Green и Super Green Plus, нема доступних података који потврђују да је хидросетва коришћена као примарна техника озелењавања на тим објектима. Уместо тога, чешће се користе класичне методе сетве, пескирања и наводњавања, које омогућавају прецизнију контролу над саставом и изгледом травњака.

Примена хидросетве у Србији показала је низ позитивних ефеката:

- Брзина успостављања вегетације: омогућава брзо озелењавање и стабилизацију терена.
- Трошкови: економичнија од класичних метода на великим и неприступачним површинама.
- Еколошки утицај: смањује ерозију, побољшава микроклиму и подстиче биодиверзитет.
- Одрживост: захтева минимално одржавање, уз дугорочну стабилност травног покривача.

Хидросетва има велики потенцијал за ширу примену у Србији, нарочито у контексту

климатских промена, урбанизације и санације деградираних екосистема. Да би се ова техника системски примењивала, неопходно је унапређење законског оквира, изградња техничких капацитета и подизање свести јавности и стручњака о њеним предностима. Интеграција хидросетве у планове озелењавања, инфраструктурне пројекте и еколошке интервенције може значајно допринети одрживом управљању земљиштем и заштити животне средине.

У оквиру даљег развоја и примене хидросетве у Србији, неопходно је усмерити пажњу на будућа истраживања која би омогућила дубље разумевање њених дугорочних ефеката. Посебан значај има систематско праћење стабилности вегетационог покривача, динамике укорјењавања и утицаја на локалне екосистеме током више година након примене. Истовремено, потребна је адаптација семенских мешавина у складу са специфичностима домаћих климатских услова, типова земљишта и степена деградације терена, како би се постигла већа ефикасност и отпорност покривача. Додатно, интеграција хидросетве са другим еколошким мерама представља перспективан приступ који може допринети свеобухватној и одрживој рехабилитацији угрожених подручја.

ЗАКЉУЧАК

У светлу све израженијих процеса деградације земљишта и потребе за очувањем природних ресурса, хидросетва се показала као једна од најефикаснијих техника у оквиру еколошке рестаурације и конзервације земљишта. Њена примена омогућава брзо и стабилно формирање вегетационог покривача на ерозивним, нагнутим и тешко приступачним теренима, чиме се значајно смањује ризик од губитка плодног слоја и убрзава процес обнове биодиверзитета. Као техника која комбинује семе, воду, ђубрива, лепкове и малч, хидросетва не само да обезбеђује оптималне услове за клијање, већ и омогућава равномерно покривање великих и сложених површина, уз високу прецизност и ефикасност. Њена примена у Србији, као и у развијеним земљама широм света, потврђује свестраност ове методе, од санације депонија, паркова и рударских зона, до великих инфраструктурних пројеката. Иако захтева скупу опрему, техничку стручност и пажљив избор компоненти, предности хидросетве (брзина заснивања травњака, еколошка вредност, економичност и дугорочна стабилност) чине је незаменљивом у савременом приступу заштити и обнови земљишта. У контексту глобалних еколошких изазова, урбанизације и климатских промена, хидросетва представља одрживо решење које спаја технолошки напредак са природним процесима, доприносећи дугорочној стабилизацији, ревитализацији екосистема и унапређењу квалитета животне средине.

LITERATURA

- 1) Blankenship, W. D., Condon, L. A., & Pyke, D. A. (2019). Hydroseeding tackifiers and dryland moss restoration potential. *Restoration Ecology*, **28**(S2), S127–S138. <https://doi.org/10.1111/rec.12997>
- 2) CalTrans (California Department of Transportation) (2003) Guidance for temporary soil stabilization. <http://www.dot.ca.gov/hq/construc/stormwater/tempsoilstabilizationguide.pdf>
- 3) CSR - Corporate Social Responsibility Report. Zijin Copper Serbia, 2023.
- 4) Erić, P., Čupina, B., Krstić, Đ., Vujić, S. (2016): Travnjaci, udžbenik. Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet.
- 5) FAO (2020): FAO Soils Portal Key definitions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- 6) Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., Dixon, K. W., (2019): International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restor Ecol*, **27**: S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- 7) Gavrilović, S. (1972): Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Izgradnja, Specijalno izdanje, Beograd.
- 8) Kadović, R. (1999): Protiverozioni agroekosistemi, udžbenik. Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.
- 9) Letić, Lj. (2002): Korišćenje voda u šumskim područjima: Uređivanje voda - Bioregulacije. Deo 1 – udžbenik. Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.
- 10) Maiti, S. K. (2013): Ecorestoration of the coalmine degraded lands – book. Springer, India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-0851-8>
- 11) Montanarella, L. (2007): Trends in land degradation in Europe, *Climate and Land Degradation*. Springer, Berlin, Heidelberg, (83-104). https://doi.org/10.1007/978-3-540-72438-4_5.
- 12) Parsakhoo, A., Jajouzadeh, M., Rezaee Motlagh, A., 2018, Effect of hydroseeding on grass yield and water use efficiency on forest road artificial soil slopes. *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*, **64**, 2018 (4): 157–163. <https://doi.org/10.17221/2/2018-JFS>
- 13) Pratiwi, Narendra, B.H.; Siregar, C.A.; Turjaman, M.; Hidayat, A.; Rachmat, H.H.; Mulyanto, B.; Suwardi; Iskandar; Maharani, R.; et al. Managing and Reforesting Degraded Post-Mining Landscape in Indonesia: A Review. *Land* **2021**, *10*, 658. <https://doi.org/10.3390/land10060658>
- 14) Santini, N.S., Miquelajauregui, Y. (2022): The Restoration of Degraded Lands by Local Communities and Indigenous Peoples. *Front. Conserv. Sci.* **3**:873659. <https://doi.org/10.3389/fcsc.2022.873659>
- 15) SERI - Society for Ecological Restoration International and IUCN Commission on Ecosystem Management (2004): Ecological Restoration, a means of conserving biodiversity and sustaining livelihoods. Society for Ecological Restoration International, Tucson, Arizona, USA and IUCN, Gland, Switzerland.
- 16) Verma, J., Singh, S., Singh, N., Talwar, D. (2024): Advancements in Hydroseeding Materials and Techniques. *Agri Roots*, Volume 2, Issue 8.
- 17) Vourlitis, G. L., Griganavicius, J., Gordon, N., Bloomer, K., Grant, T., & Hentz, C. (2017). Hydroseeding increases ecosystem nitrogen retention but inhibits natural vegetation regeneration after two years of chaparral post-fire recovery. *Ecological Engineering*, **102**, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.041>

4. <https://www.finncorp.com/>
5. <https://classiclawnandtree.com/commercial-hydroseeding/>
6. <https://turboturf.com/hs-50-p/>
7. <https://turboturf.com/hm-1000-harv/#>
8. <https://www.inaturalist.org/>
9. <https://www.codot.gov/projects/i70westvailauxiliarylanes/>
10. <https://www.cdtshydroseeding.co.uk/green-roof-at-instow-devon/>
11. <https://www.hanfordarc.com/all-projects/post-fire-recovery-hydroseeding>
12. <https://www.ecodynamics.com.au/case-study/afl-gather-round-barossa-park-wetland-hydroseeding-project/>
13. <https://hidrosetva.rs/kosutnjak/>
14. <https://hidrosetva.rs/deponija-pepela-obrenovac/>

**ПРИМЕНА МЕХАНИЗАЦИЈЕ У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ И РЕКУЛТИВАЦИЈИ
ПОВРШИНСКОГ КОПА КОЛУБАРА****APPLICATION OF MECHANIZATION IN THE MINING OPERATIONS AND
LAND RECLAMATION OF THE KOLUBARA SURFACE MINE****Јована Здравковић¹*, Тијана Вулевић¹, Нада Драговић¹, Александар Баумгертел¹**¹ Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Кнеза Вишеслава**Апстракт**

Рударски басен Колубара, који се налази у централном делу Србије, представља један од најзначајнијих извора угља у земљи. У раду су анализирани основни радови на површинским коповима, који обухватају откопавање угља, транспорт и одлагање јаловине, као и пратеће радове, међу којима су чишћење терена, обликовање косина и рекултивација.

Разматрана је улога основне рударске механизације (роторни багери, тракасти транспортери и одлагачи) и помоћне механизације (дозери, грејдери, камиони и др.), која је од кључног значаја за повећање ефикасности и смањење трошкова радова. Међутим, експлоатација угља доводи до значајних еколошких проблема, као што су деградација земљишта, због чега је процес рекултивације који обухвата техничку и биолошку рестаурацију нарушених површина од пресудне важности. Указано је на поступак и значај рекултивације површина у оквиру рударског басена Колубара, у циљу стабилизације терена, заштите од ерозије и поновног укључивања површина у природне или економске системе, као што су пољопривреда или шумарство.

Кључне речи: механизација, површински коп, Колубара, рекултивација**Abstract**

The Kolubara Mining Basin, located in central Serbia, is one of the most significant coal sources in the country. This paper analyzes the main surface mining operations, including coal excavation, transport, and overburden disposal, as well as accompanying works such as land clearing, slope shaping, and reclamation. The role of primary mining machinery (bucket wheel excavators, belt conveyors, and spreaders) and auxiliary equipment (dozers, graders, trucks, etc.) is considered crucial for increasing efficiency and reducing operational costs. However, coal exploitation leads to significant environmental problems, such as soil degradation, making the reclamation process which includes both technical and biological restoration of disturbed areas critically important. The paper highlights the procedure and importance of reclamation in the Kolubara Mining Basin, aimed at stabilizing terrain, preventing erosion, and reintegrating the land into natural or economic systems, such as agriculture or forestry.

Keywords: mechanization, surface mine, Kolubara, reclamation

УВОД

Угаљ представља један од најважнијих енергената који се користе у Србији, а лигнит (меки мрки угаљ) је доминантни тип угља, који чини 97% укупних резерви угља у земљи. Највећа лежишта лигнита у нашој земљи се налазе у Косовско-метохијском басену (76%), Колубарском басену (14%) и Костолачком басену (3,3%). Ова лежишта су кључна за производњу енергије у земљи, али експлоатација угља носи са собом значајне еколошке изазове.

Експлоатација угља доводи до деградације земљишта, уништавања пољопривредних и шумских површина, као и до расељавања животињског света. Лигнити се често налазе на најплоднијим земљиштима, што доводи до ширења негативног утицаја на много веће површине него што сама рударска подручја заузимају. Због тога је од кључне важности да се након искоришћења угља земљиште врати у првобитно стање путем техничке и биолошке рекултивације. Закон о рударству и геолошким истраживањима прописује да се мора извршити рекултивација како би се заштитила животна средина и омогућила регенерација деградираних површина.

Процес рекултивације укључује техничке и биолошке мере, а у зависности од врсте површине која се рекултивира, може се применити пољопривредна или шумска рекултивација (Аничих и сар. 2023). Механизација која се користи за експлоатацију минералних сировина и реализацију радова на рекултивацији земљишта има негативан утицај на животну средину, попут буке, вибрација, загађења ваздуха (прашина, CO , CO_2 , NO) и воде, као и физичког збијања земљишта, што нарушава његову структуру и капацитет за задржавање воде (Willis et al., 2004). Међутим, примена механизације је од посебног значаја јер омогућава оптимизацију радних услова и квалитета рада (Willis et al. 2004). Остварење великог учинака и повећање продуктивности остварује се применом савремене механизације великих капацитета радних делова. У раду је дат преглед основне и помоћне механизације која се користи при експлоатацији угља у колубарском басену. Основна механизација се примењује за откопавање, транспорт и одлагање јаловине и угља. Роторни багери се користе за експлоатацију угља и откопавање отквивке, а затим се угаљ преко тракастих транспортера транспортује до погона за прераду. Прерађени угаља се испоручује термоелектранама у Обреновцу, Великим Црљенима и Свилајнцу. У раду је истакнут и значај одлагача као машина које се користе за одлагање отквивке. За адекватно искоришћење одлагача и друге основне механизације, потребно је благовремено ангажовање и помоћне механизације која обавља помоћне послове и ту спадају: багери, дозери, грејдери, утоваривачи и др. Посебно је анализирана и механизација која се примењује за биолошку рекултивацију, као и технологија одвијања ових радова.

ПОДРУЧЈЕ ИСТРАЖИВАЊА

Рударски басен Колубара налази се у централном делу Србије, обухвата површину од 600 km^2 и игра кључну улогу у стабилном снабдевању српских термоелектрана угљем (Слика 1). У овом басену експлоатише се угаљ на четири површинска копа, на подручју општина Лазаревац, Лајковац и Уб, на површини од око 80 km^2 , (<https://www.eps.rs/cir/Poslovanje-ugalj/Pages/Korovi.aspx>). Овде се производи 26 милиона тона угља годишње, што чини 50% електричне енергије у Србији (<https://www.eps.rs/cir/kolubara/Pages/default.aspx>). Међутим, ова експлоатација доводи до деградације земљишта, уништавања пољопривредних и шумских површина, као и значајних геоморфолошких промена.



Слика 1. Земљишни простор у непосредној близини колубарског копа
(Извор: Ј. Здравковић)

Figure 1. Land area in the immediate vicinity of the Kolubara mine (Source: J. Zdravković)

ОСНОВНИ И ПОМОЋНИ РАДОВИ НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА

Ефикасност површинских копова зависи од основне и помоћне механизације. Основни радови укључују откопавање, транспорт и одлагање јаловине и угља, за које се користе роторни багери и транспортери (Мирковић, 2012).

Помоћни радови изводе се истовремено са основним и обухватају чишћење терена, обликовање косина, рекултивацију и друге активности. Механизација која се користи за ове радове укључује дреглајне, дозере, ваљке, дизалице и машине за транспорт (Мирковић, 2012).

Претходни радови укључују припрему терена, измештање инфраструктуре и монтажу основних машина. За ову врсту радова користе се дреглајни, дозери, ваљци и дизалице (Игњатовић и сар., 2021). Пратећи радови подразумевају изградњу и одржавање путне мреже, стабилизацију тла и транспортне активности уз употребу ваљака, дозера и цевопологача. Дизалични радови укључују демонтажу и монтажу делова машина, као и претовар масивних терета уз помоћ дизалица и кранова. За транспортне радове користе се камиони, цистерне, теренска возила и плато кола.

Накнадни радови се односе на обнављање деградираних површина. Иако су важни, овај део радова често се занемарује због недостатка ресурса. Механизација која се користи за ову врсту радова укључује багере, машине за бушење и опрему за рекултивацију, али је потребно више пажње посветити овим активностима ради очувања животне средине.

Основна механизација

Основна механизација се користи за откопавање, транспорт или одлагање јаловине и угља. Маchine основне механизације су багери, тракасти транспортери и одлагачи.

Багери су самоходне грађевинске машине које могу бити са једном кашиком као радним органом, који врше рад у циклусу или багери са више радних елемената (кашика) који врше рад у континуитету. Код багера који врше рад у континуитету откопавање

материјала се обавља у току целог радног циклуса и то помоћу кашика (ведрица) распоређених на бесконачном ланцу или роторном точку. У првом случају, реч је о багерима ведричарима, а у другом о роторним багерима.

Багери ведричари користе бесконачни ланац са више ведрица за копање материјала (Слика 2). Они имају већу продуктивност од багера који врше рад у циклусу. Основни делови ових багера су: основна машина - трактор гусеничар, бескрајни ланац са ведрицама, стрела и распонска греда, ужадно когурачни систем, транспортер, контратег, погонски мотор и механизам управљања (Драговић, 2011). Предности укључују дубинско копање (до 40м), селективно копање и могућност профилисања косина без потребе за додатном механизацијом за чишћење (Драговић, 2011). На основу багера ведричара, немачка фирма Humbolt је за потребе рудника лигнита Bergwitz конструисала први роторни багери на шинама (Petrović, 2016).



Слика 2. Багер ведричар (Извор: <https://rudarbalkan.blogspot.com/2016/02/ukratko-o-bageru-vedricaru.html>)

Figure 2. Multibucket chain excavator (Source: <https://rudarbalkan.blogspot.com/2016/02/ukratko-o-bageru-vedricaru.html>)

Роторни багери су самоходне машине које се могу користити за грађевинске радове, као и за откопавање јаловине на површинским коповима (Слика 3). Роторни багери се користе на површинском копу Колубара за откоп угља и у просеку ове машине су високе око 35 метара и тешке око 3.000 тона (<https://www.eps.rs>). Ове машине раде у модерним БТО (багер-транспортер-одлагач) системима. Откопавање се врши ведрицама на роторном точку, одакле се материјал празни и предаје транспортеру који је постављен на стрелу ротора, који треба да обави на даљи транспорт. Основни делови су трактор-гусеничар, ротациони точак са стрелом, попречни транспортер и погонски механизам. Разликују се конструкције стреле багера пуних зидова и конструкције стрела багера у облику решетке.

Према немачким националним стандардима (Deutsches Institut für Normung - DIN), роторни багери могу припадати класи А (кратка стрела и конструкција од пуних зидова), класи В (решеткаста стрела и капацитет до 6.000 m³/h) или класи С (решеткаста стрела и капацитет преко 6.000 m³/h). Повећањем дужине стреле стварају се повољни услови за откопавање,

али у исто време се и повећава и маса багера и смањује ефикасност и безбедност рада (Petrović, 2016). Пример роторног багера типа С који се користи за откоп лигнита је багер типа Srs2000 немачке компаније TAKRAF. Такав је багер SRs 2000.28/3.0+VR чији је капацитет откопа $4.900 \text{ m}^3/\text{h}$, који има пречник роторног точка од 11,2 метара на којем се налази 14 ведрица (запремина једне ведрице 1.700 l) (Слика 4). Капацитет и облик зависе од услова рада на копу, као и од чврстоће материјала и нагиба косина (Митровић, 2023). Неке предности ових багера су висока сигурност у раду, мала специфична потрошња енергије ($0,15 - 0,5 \text{ kWh/m}^3$), висок коефицијент корисног дејства радног органа ($0,8 - 0,9$) (Petrović, 2016).



Слика 3. Роторни багер
(<https://itinzenering.rs/u-rb-kolubara-pusten-u-rad-rekonstruisani-rotorni-bager-schrs630-g4/>)

Figure 3. Bucket-wheel excavator
(<https://itinzenering.rs/u-rb-kolubara-pusten-u-rad-rekonstruisani-rotorni-bager-schrs630-g4/>)



Слика 4. Роторни багер SRs
2000.28/3.0+VR

(Извор: <https://www.directindustry.com/>)
Figure 4. Bucket-wheel excavator SRs
2000.28/3.0+VR (Source: <https://www.directindustry.com/>)

Тракасти транспортери су машине које се примењују за непридни транспорт материјала од откопних машина до одлагалишта. Транспортери се састоје од гумене траке и ваљака, а капацитет може да варира од пар тона до више од 20.000 тона на сат (Слика 5).

Одлагачи врше истовар и плански распоређују материјал на одлагалишту. Велика распрострањеност ових транспортера заснована је на њиховој ефикасности и великом капацитету (Банковић, 2018).

Одлагачи су по конструкцији слични багерима, али због своје функције немају јединицу за ископавање. Уместо тога, имају истоварну стрелу која одлаже ископани материјал на депоније и њихов капацитет достиже и до 20.000 m^3 јаловине на сат (Rusiński et al. 2017).

Тракасти одлагачи користе се у површинским коповима за нагомилавање ископане јаловине, која се одлаже на спољне или унутрашње депоније на површинском копу. Спољне депоније налазе се у издвојеним зонама, обично у близини површинског кора, где се јаловина одлаже у насипе. Унутрашње депоније налазе се у деловима копа у којима је ископ већ завршен. Материјали који се најчешће одлажу укључују јаловину ископану багерима или нуспроизводе сагоревања угља у термоелектранама, нпр. пепео, који се обично транспортује из енергетских блокова помоћу транспортних трака, или, ређе, железницом или камионима.

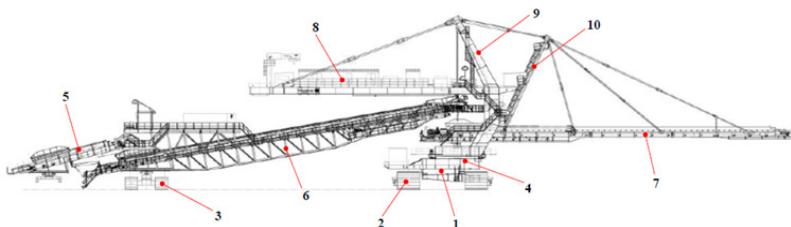


Слика 5. Тракасти транспортер (Извор: <https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/iT7biXaEaQ04/v1/1800x1202.webp>)

Figure 5. Belt conveyor (Source: <https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/iT7biXaEaQ04/v1/1800x1202.webp>)

Одлагачи се могу класификовати према различитим критеријумима (РБ Колубара):

- Начин одлагања (дубинско и висинско одлагање),
- Конструкција пријемног органа (ведрице или траке),
- Конструкција одложног органа (ведрице или траке),
- Број саставних делова (једноделни или дводелни),
- Тип транспортног уређаја (шине, корачајући, на гусеницама).
- Основни делови одлагача су (РБ Колубара):
- Доња градња са транспортним уређајем,
- Обртна платформа са централним стубом,
- Стрела противтега и пријемни део одлагача.
- Конструкција одлагача са свим важнијим компонентама приказана је на Слици 6.



Слика 6. Конструкција одлагача (Извор: РБ Колубара)

1. доња градња одлагача; 2. уређај за кретање основне машине (гусенични); 3. уређај за кретање помоћне машине-пријемни део (гусенични); 4. обртно постоље; 5. пријемни транспортер; 6. међутранспортер; 7. одложна стрела транспортера; 8. катарка противтега са електроопремом; 9. централни стуб; 10. конзолни носач одложне стреле

Figure 6. Reclaimer structure (Source: MB Kolubara)

1. Lower structure of the reclaimer; 2. Movement device of the main machine (crawler), 3. Movement device of the auxiliary machine – receiving part (crawler), 4. Slewing pedestal, 5. Receiving conveyor, 6. Intermediate conveyor, 7. Reclaim conveyor boom, 8. Counterweight pulley with electrical equipment, 9. Central column, 10. Cantilever support of the reclaim conveyor boom.

На копу Тамнава - Западно поље користе се одлагач дужине 130 метара и тежине око 2.000 t који има капацитет одлагања 12.000 m³ по часу (Слика 7).



Слика 7. Одлагач на копу Тамнава-Западно поље (Извор: <https://www.eps.rs/eng/vesti/Pages/5-3.aspx>)

Figure 7. Reclaimer at the Tamnava-West Field mine (Source: <https://www.eps.rs/eng/vesti/Pages/5-23.aspx>)

Помоћна механизација

Помоћну механизацију чине машине које се користе приликом обављање помоћних радова, као што су рушење објеката, вађења пањева, транспорт материјала, укључујући и радове на техничкој и биолошкој рекултацији. У ове машине се убрајају: багери, дозери, грејдери, камиони кипери, утоваривачи, грејдери и др.

Дозери су машине на површинским коповима и користе се за разне помоћне радове, за припрему терена, транспорт и планирање материјала, изградњу и одржавање саобраћајница и монтажних платоа, чишћење и одржавање етажа, као и за помоћне радове као што су вуча опреме, рушење објеката и рекултација (Ђурић, 2016). Основна конструкција дозера састоји се од базе (трактора на гусеницама или пнеуматичима) и радног органа са ножем (Слика 8). Класификују се по различитим критеријумима: по вучној сили, снази мотора, транспортном уређају, начину управљања и положају ножа (Ђурић, 2016). Дозери се деле по вучној сили, снази мотора, транспортном уређају, начину управљања, положају ножа и др.

Дозери опште намене користе се за ископ, формирање призми и транспорт материјала, планирање и делимично сабијање, док се специјализовани дозери користе за специфичне операције (Ђурић, 2016).



Слика 8. Булдозер (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/CatD9T.jpg/800px-CatD9T.jpg>)

Figure 8. Bulldozer (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/CatD9T.jpg/800px-CatD9T.jpg>)

Грејдери се примењују за планирање и профилисање терена, за изградњу и одржавање приступних путева и платоа (Слика 9). Могу бити вучени или самоходни (мотогрејдери). Главни радни елемент је нож постављен између предњих и задњих точкова. Грејдери се класификују по снази мотора, маси, дужини ножа и систему управљања (Ђурић, 2016).

Према снази и маси, грејдери се могу сврстати у три групе: лаке грејдере (снага до 70 kW, маса до 7 t), средње грејдери (снага од 70 до 110 kW, маса преко 14 t) и тешке грејдери (снага изнад 110 kW, маса преко 14 t).

На коповима се користе грејдери са моторима до 110 kW (Ђурић, 2016).



Слика 9. Грејдер (Извор: Ј. Здравковић)
Figure 9. Grader (Source: J. Zdravković)



Слика 10. Утоваривач (<https://www.urogroup.rs/wp-content/uploads/2022/08/utovarivac-862h-1.jpg>)
Figure 10. Loader (<https://www.urogroup.rs/wp-content/uploads/2022/08/utovarivac-862h-1.jpg>)

Утоваривачи служе за утовар материјала у транспортна возила (Слика 10). Поред тога, користе се за ископ земљишта и истовар. Постоје утоваривачи са циклусним и континуираним радом. Циклусни утоваривачи користе једну кашику, док континуирани користе више кашика (Драговић, 2011).

Утоваривачи могу бити са гусеницама или пнеуматикама. У зависности од шасије, могу бити са крутом или зглобном шасијом, при чему зглобна шасија побољшава маневрисање. Кашике имају различите запремине, а начин истовара може бити челни, бочни или преко главе (Драговић, 2011).

Камиони кипери служе за транспорт разних материјала. Имају челичне или комбиноване металне и дрвене кошеве, а запремина им је од 6 до 20 m³. Истовар се врши хидрауличним системом, а може бити кроз дно, преко задњег дела или бочно (Ђурић, 2016). Камиони кипери су брзо покретне машине са транспортним брзинама од 50 до 100 km/h (Ђурић, 2016).



Слика 11. Камион кипер, истовар на страну (<https://isuzu.co.rs/kamioni-specijalne-nadgradnje/isuzu-p75-k-kiper/>)

Figure 11. Truck, side dump (<https://isuzu.co.rs/kamioni-specijalne-nadgradnje/isuzu-p75-k-kiper/>)

РЕКУЛТИВАЦИЈА

Рекултивација, ревитализација и рестаурација нарушеног земљишта, насталог услед развоја рударских радова, нуде бројне могућности. Након техничке и биолошке рекултивације, успоставља се нови екосистем на нарушеним површинама, који се уклапа у постојећи екосистем или се мења његова намена за нове потребе (Димитријевић, 2014). Истраживања показују да је могуће створити нове пољопривредне, шумске, акваторне и друге екосистеме на овако нарушеним подручјима. Рекултивација има мултидисциплинарни и интердисциплинарни карактер, укључујући рударско-технолошке, инжењерскогеолошке и биоинжењерске мере како би се земљиште трансформисало у стање погодно за различите намене (Димитријевић, 2014).

Према плановима на површинском копу Колубара, значајан део површине ће морати да се рекултивише због експлоатације минералних сировина. Без рекултивације, ове површине би биле трајно изгубљене за пољопривреду и шумарство, што би изазвало велике економске губитке. Техничка и биолошка рекултивација представљају низ мера којима се деградиране површине враћају својој намени (РБ Колубара, 2022.).

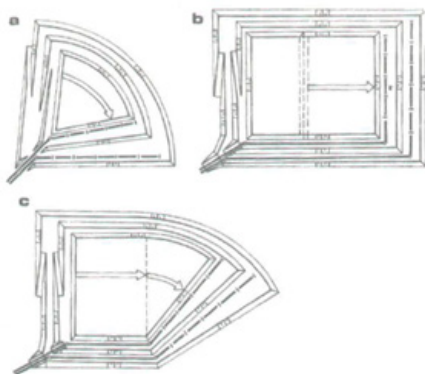
Техничка рекултивација обухвата планирање и извођење низа радова усмерених на припрему деградираних површина за будућу употребу. Основни циљ је успостављање стабилне и функционалне земљишне површине, најчешће у пољопривредне или шумске сврхе. Поменути радови укључују нивелацију терена, осигурање косина од обрушавања, наношење плодног земљишта ради успостављања вегетације, израду система за регулисање површинских и подземних вода, као и изградњу комуникација (Вујић и сар. 2009).

Рекултивација започиње када се формира завршна нивелета на одлагалишту, простору за одлагање некорисног материјала, у довољно великој површини за рационално обављање радова. Ове површине морају бити уједначено равне, како би се омогућило равномерно наношење хумуса и коначно обликовање терена (РБ Колубара, 2022.).

Кључни услови за избор локације и изградњу одлагалишта обухватају: довољну запремину за смештај материјала, близину месту ископа ради смањења трошкова транспорта, позицију која не омета даље развијање копа и безбедне услове рада за људе и механизацију (РБ Колубара, 2022.).

У погледу конструкције, одлагалишта се могу развијати на радијалан, паралелан или комбинован начин, у зависности од теренских услова и врсте коришћене механизације (Слика 12). За ефикасан рад неопходно је обезбедити континуирано одлагање са минималним застојима, што доприноси већој продуктивности (РБ Колубара, 2022.).

При пројектовању рекултивације површинског копа „Колубара“ поштоване су смернице из Дугорочног програма експлоатације угља, а површине које су деградирале биће рекултивисане након завршетка експлоатације (РБ Колубара, 2022.).



Слика 12. А) лепезасти начин одлагања; Б) паралелни начин одлагања; Ц) комбиновани начин одлагања Извор: (Архив Сектора за заштиту животне средине РБ Колубара Лазаревац)

Figure 12. A) Fan-shaped dumping method; B) Parallel dumping method; C) Combined dumping method (Source: Archive of Environmental protection sector of MB Kolubara Lazarevac)

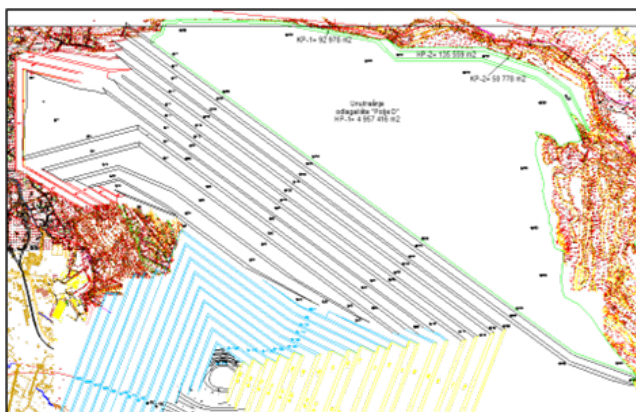
Откопани материјали из површинског копа транспортују се транспортерима са траком и одлажу на унутрашња одлагалишта. Ова одлагалишта су у континуитету са другим одлагалиштима, што резултује мешавином материјала са различитим физичко-механичким и хемијским својствима (РБ Колубара, 2022.).

Одлагалиште има укупну површину од 14.442.795 m². Радови на техничкој рекултивацији почињу након формирања завршне етаже на висини од 200 мнв у зони унутрашњег одлагалишта и на нивелети од 170 до 210 мнв (РБ Колубара, 2022.).

Циљ рекултивације је припрема површина за пољопривредну и шумску производњу. На Сликама 13 и 14 су приказане контуре површина које ће бити рекултивисане, као и контуре одлагалишта предвиђене за исту намену. Рекултивација ће обухватити све

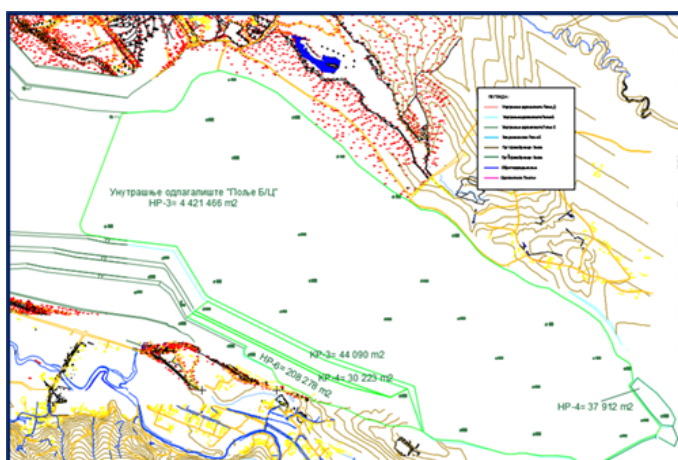
деградиране површине настале експлоатацијом угља, кроз техничке и биолошке фазе. Простор унутрашњег одлагалишта биће искоришћен за пољопривредну производњу, али ће бити разматране и друге могућности. Радови ће бити завршени пре и после 2049. Године (РБ Колубара, 2022.) (РБ Колубара, 2022.).

Укупна површина предвиђена за рекултивацију износи 1444,27 хектара од чега 1376,7 хектара чине хоризонталне површине, а 67,5 хектара су косе површине (РБ Колубара, 2022.).



Слика 13. Приказ површине предвиђене за рекултивацију (Извор: Архив Сектора за заштиту животне средине РБ Колубара Лазаревац)

Figure 13. View of the area designated for reclamation (Source: Archive of Environmental protection sector of MB Kolubara Lazarevac)



Слика 14. Приказ контуре одлагалишта, са површинама предвиђеним за рекултивацију ((Извор: Архив Сектора за заштиту животне средине РБ Колубара Лазаревац)

Figure 14. Contour view of the dump site with areas designated for reclamation (Source: Archive of Environmental protection sector of MB Kolubara Lazarevac)

Биолошка рекултивација

Земљиште је кључни природни ресурс, али је подложно уништењу услед људске активности, посебно током експлоатације сировина. Рекултивација деградираних површина, нарочито након рударских активности, укључује биолошку рекултивацију како би се успоставили нови екосистеми. Она обухвата садњу вегетације и потребне педомелиоративне мере, као и примену агротехничких поступака.

Радови на затрављивању обухватају: ручно и машинско сејање, ваљање површина, ђубрење и наводњавање. Сејање се обавља ручно на косинама и машински на равним површинама (Микић и сар. 2021). Радни процеси у сејалицама укључују припрему површине, постављање семена и сабијање земљишта око њих. Постоје различите врсте сејалица, чији сетвени апарати регулишу распоред семена и обезбеђују квалитетну сетву (Ухларик, 2017) (Слика 15).

После сетве, земљиште се сабија ваљцима (Слика 16) који могу бити глатки или ребрасти, у зависности од фазе припреме (Живковић и сар. 2010). Ваљци имају хидраулични систем за подешавање радног положаја. За прихрањивање се користе расипачи ђубрива, који могу бити ношени или вучени и могу се покретати преко возних точкова или прикључног вратила (Грбић, 2010).

Биолошка рекултивација на површинским коповима обавља се у две фазе (Табела 1). Прва фаза подразумева сетву грахорице и оваса као зеленишног ђубрива, након чега се заснива луцериште, а трећи откос се заорава у четвртој години. Друга фаза обухвата гајење ратарских култура у плодореду, што побољшава структуру земљишта и смањује ризик од болести и штеточина. Плodoreд омогућава боље гајење усева и стабилнију приноса (РБ Колубара, 2022.).



Слика 15. Сејалица, извор: „Агравис“ <https://www.technikboerse.com/sr/gebraucht/sejalice-za-direktnu-setvu-58/horsch-534>

Figure 15. Seeder, source: “Agravis” <https://www.technikboerse.com/sr/gebraucht/sejalice-za-direktnu-setvu-58/horsch-534>



Слика 16. Глатки ваљак, извор: https://www.gorenc.si/wp-content/uploads/2022/04/Katalog_-Gorenc_2022_SI_web.pdf

Figure 16. Smooth roller, source: https://www.gorenc.si/wp-content/uploads/2022/04/Katalog_-Gorenc_2022_SI_web.pdf



Слика 17. Расунач, извор: https://www.agrotech.land/sites/default/files/portfolio/rauch_axis_20-2-r.jpg

Figure 17. Spreader, source: https://www.agrotech.land/sites/default/files/portfolio/rauch_axis_20-2-r.jpg

Табела 1. Преглед култура у процесу рекултивације

Table 1. Overview of crops in the reclamation process

Ред. број	Култура	Дужина вегетације
Прва фаза (мелиоративна фаза)		
1.	Грахорица	1 година
2.	Луцерка	
Друга фаза (ратарске културе)		
3.	Кукуруз	1 година
4.	Пшеница	1 година
5.	Соја	1 година
6.	Кукуруз	1 година
7.	Јечам	1 година

Пошумљавање као метод биолошке рекултивације има три основна циља: обнова земљишта, заштита од ерозије и побољшање квалитета ваздуха. Избор врста за пошумљавање зависи од састава супстрата, рељефа и климатских услова. Пошумљавање на површинама „Поља Е“ обухвата садњу четинарских и лишћарских врста које су добре за развој шумских биљних заједница (Табела 2) (РБ Колубара, 2022.).

Табела 2. Изабране врсте дрвећа за биолошку рекултивацију на површинском копу „Поље Е“

Table 2. Selected tree species for biological reclamation at the “Polje E” surface mine

Ред.број	Врста садног материјала	Старост садног материјала
1.	Pinus nigra - Црни бор	2+0
2.	Prunus mahaleb - Рашељка	2+0
3.	Cerasus avium -Дивља трешња	2+0
4.	Juglans nigra - Црни орах	2+0
5.	Betula- Бреза	2+0



Слика 18. Пример рекултивисане површине у сврху расадника (Ј. Здравковић)

Figure 18. Example of a reclaimed area used as a nursery (J. Zdravković)

Процес пошумљавања захтева припрему терена, садњу садница и примену мера неге и заштите, као што су заливање, прихрањивање, окопавање и заштита од штетних инсеката и болести. Ова технологија осигурава добар прираст и функционални развој засада у првим годинама (РБ Колубара, 2022.).

ЗАКЉУЧАК

У раду је приказана механизација које се користи на површинским коповима за откоп, транспорт и одлагање јаловине и угља. Она обухвата роторне багере, тракасте транспортере, одлагаче, као и помоћну механизацију као што су: багери, дозери, грејдери и камиони. У раду је дат приказ рекултивације земљишта након експлоатације са посебно наглашеним значајем биолошке рекултивације са примерима избора врста и процеса пошумљавања на површинском копу Колубара.

Механизација игра кључну улогу у експлоатацији минералних сировина. Механизација на површинским коповима олакшава експлоатацију минералних сировина, ствара радна места и доприноси економији. Такође, коришћење механизације у процесу рекултивације земљишта чини овај процес ефикаснијим, бржим и економичнијим, што доводи до бољих резултата у обнављању деградираних површина.

Међутим, рударска индустрија, поред значајне економске добити, има и многе негативне социјалне и еколошке последице. Због тога је важно да будућа истраживања буду усмерена на постизање равнотеже између технолошког напретка и очувања природних ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Banković, M. (2018): Optimizacija utovarno-transportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
2. Mirković, S. (2012): Razvoj integrisanog procesa upravljanja operativnim radom i održavanjem pomoćne mehanizacije na površinskom kopu uglja sa podrškom informaciono komunikacionih tehnologija, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd
3. Petrović, B. (2016): Optimizacija dužine strele rotornih bagera u funkciji stabilnosti kosina i efektivnosti rada na površinskim kopovima lignita Srbije, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
4. Rusiński, E., Czmochoowski, J., Moczko, P., Pietrusiak, D. (2017): Surface Mining Machines. Problems of Maintenance and Modernization, Springer International Publishing AG.
5. Willis, R.P.H., Dixon, J.R., Cox, J.A. & Pooley, A.D. (2010): A framework for the introduction of mechanized mining. International Platinum Conference 'Platinum Adding Value', The South African Institute of Mining and Metallurgy, (255-258).
6. А.Д. ЕПС, РБ Колубара, „Поље Е“
7. Академија техничких струковних студија, Универзитет у Београду, Србија. Преузето 08.05.2024. са <https://atssb.edu.rs>
8. Аничих, Х., Бојовић, Х., Медак, Х. (2023): Студија о процени утицаја на животну средину пројекта експлоатације кречњака из лежишта Бојовића крш, 34 стр
9. Архив Сектора за заштиту животне средине РБ Колубара Лазаревац
10. Вујић, С., Цвејић, Ј., Миљановић, И., Дражић, Д. (2009): Пројектовање рекултивације и уређења површинских копова, Београд.
11. Грбић, М. (2010): Производња садног материјала – Технологија производње украсних садница, Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Београд.
12. Димитријевић, Б. (2014): Оптимизација управљања процесима рекултивације површинских копова угља, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
13. Драговић, Н. (2011): Механизација у противерозионим радовима., Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Београд.
14. Ђурић Д. Р. (2016): Концепт расположивости при дефинисању ефикасног одржавања помоћне механизације на површинским коповима, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
15. Електропривреда Србије (ЕПС). Преузето 26.12.2023. са <https://www.eps.rs>
16. Живковић, Д. Вељић, М., Диховички, Ђ. (2010): Оперативна готовост код хидрауличног система ваљка, Техничка дијагностика 4 (19-24)
17. Извештај о стању животне средине за период јануар-децембар 2022.године, РБ Колубара Лазаревац
18. Микић, М., Урошевић, Д., Рајковић, Р., Јовановић, М. (2021): Рекултивација деградираних површина насталих одлагањем флотацијске јаловине на локацији Мајданпек, Србија. У: Зборнику радова Одрживи развој у рударству и енергетици, (202-210)

19. Ухларик, А. (2017): Технологија сетве пилираног семена луцерк, мастер рад, Пољопривредни факултет, Нови Сад

<https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/iT7biXaEaQ04/v1/1800x1202.webp>

<https://www.urogroun.rs/wp-content/uploads/2022/08/utovarivac-862h-1.jpg>

<https://isuzu.co.rs/kamioni-specijalne-nadgradnje/isuzu-p75-k-kiper/>

<https://itinzenjering.rs/u-rb-kolubara-pusten-u-rad-rekonstruisani-rotorni-bager-schrs630-g4/>

<https://rudarbalkan.blogspot.com/2016/02/ukratko-o-bageru-vedricaru.html>

https://www.agrotech.land/sites/default/files/portfolio/rauch_axis_20-2-r.jpg

https://www.gorenc.si/wp-content/uploads/2022/04/Katalog_-Gorenc_2022_SI_web.pdf

<https://www.technikboerse.com/sr/gebraucht/sejalice-za-direktnu-setvu-58/horsch-534>

УНАПРЕЂЕНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОРАЧУН ФАКТОРА ЕРОЗИОНЕ СНАГЕ КИШЕ (R) IMPROVED METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE RAINFALL EROSIVITY FACTOR (R)

Соња Брауновић¹, Вељко Перовић², Филип Јовановић¹, Наталија Момировић¹,
Ненад Шурјанац¹, Јована Цветковић¹, Вања Стојановић¹

¹Институт за шумарство, Београд

²Институт за биолошка истраживања „Синиша Станковић” Универзитет у Београду

Извод: У раду је приказана унапређена методологија за одређивање вредности фактора ерозионе снаге кише R, најзначајнијег фактора једначине USLE за прорачун губитака земљишта (Universal Soil Loss Equation). Унапређење методологије огледа се кроз увођење ерозивности падавина слабијих интензитета и дужег трајања у облику кише или снега, у периоду када не раде плувиографи (новембар – март). Вредности фактора R_{god} омогућавају поређење са резултатима добијеним у европским земљама, где се последњих 60 година интензивно ради на прилагођавању поменуте методологије локалним условима. Вредности емпиријског коефицијента b_0 који омогућава једноставнији обрачун коришћењем сума средњих месечних падавина, су у нашим истраживањима неправилно коришћене (усвајане су вредности из опсега који је дефинисан за Италију). Вредности b_0 добијене на основу података читаних са плувиографских трака и увођењем ерозивности падавина у зимским месецима за 3 климатолошке станице у Србији крећу се од 1,34 до 1,75. Правилно одређивање вредности фактора R је од изузетног значаја за примену методологије USLE у нашим условима и израду Карте ерозије Србије.

Кључне речи: R – фактор ерозионе снаге кише, емпиријски коефицијент b_0 , интензитет падавина, губици земљишта, Србија

IMPROVED METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE RAINFALL EROSIVITY FACTOR (R)

Abstract: In this paper, an improved methodology for estimating the rainfall erosivity factor (R), the most important factor in the USLE (Universal Soil Loss Equation) equation for calculating soil loss, is proposed. The improvement of the methodology is reflected in the introduction of the erosiveness of precipitation with lower intensity and longer duration in the form of rain or snow, during the period when pluviographs are not operating (November–March). The values of the R_{year} factor allow for comparison with the results obtained in European countries, where intensive work has been carried out over the past 60 years to adjust the aforementioned methodology to local conditions. On the other hand, the values of the empirical coefficient b_0 , which allows for a simpler calculation using the sum of average monthly precipitation, were incorrectly used in Serbia (i.e., values from the range defined for Italy were adopted). Based on the data read from pluviographic strips charts and the introduction of precipitation erosivity for the winter months from three climatological stations in Serbia, the b_0 values ranged from 1.34

to 1.75. The correct determination of the R-factor is of utmost importance for the application of the USLE methodology in local conditions and the preparation of the Erosion Map of Serbia.

Keywords: R – Rainfall erosivity factor, empirical coefficient b_0 , Rainfall intensity, Soil losses, Serbia

УВОД

Ерозивност падавина је динамички индикатор губитака земљишта, а њена просторна и временска расподела одређује интензитет и распрострањеност ерозионих процеса. Отицање и ерозија земљишта одређени су кинетичком енергијом падавина у облику кише, максималним тридесетоминутним интензитетом кишних епизода и сезонским распоредом падавина. Међутим, и кише са малим ерозионим индексом (EI), могу изазвати веће губитке земљишта од киша са високим (EI) које падају у периоду добре заштите вегетационог покривача или повећане стабилности земљишне структуре (Lal, 1988).

Адекватан начин за поменута истраживања представља Универзална једначина ерозије (USLE) - најпознатија методологија за прорачун губитака земљишта. Један од кључних фактора у овој једначини је фактор ерозионе снаге кише (R), који представља климатску компоненту модела и изражава укупну енергију падавина способну да иницира ерозионе процесе.

Пионирска истраживања фактора ерозионе снаге кише за Србију, читавањем интензитета падавина са плувиографских трака, урађена су за подручје Смедеревске Паланке (Stefanović, 1992), подручје Београда (Braunović, 1996) и Враћа (Braunović et al., 2010). Ови радови представљају прве покушаје емпиријске квантификације ерозивности падавина на националном нивоу и полазну основу за даље просторно моделирање фактора R у Србији.

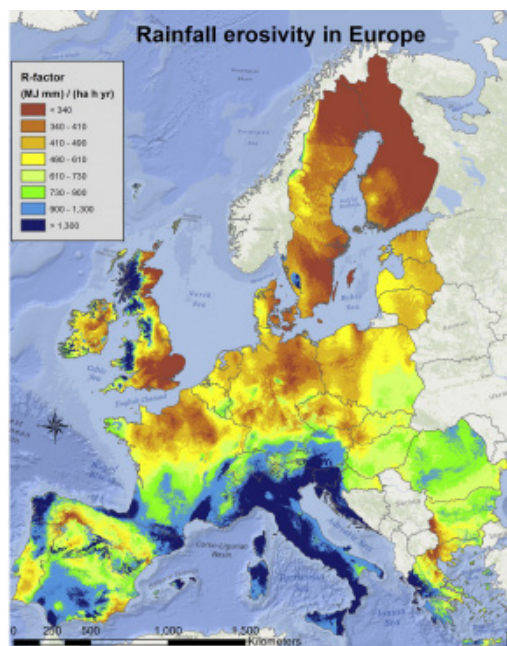
На европском нивоу, студије Panagos et al. (2015) и Ballabio et al. (2017) први пут су пружиле интегрисан приказ просторне варијабилности ерозивности падавина за државе Европске уније. Србија и земље Западног Балкана нису биле обухваћене моделом, али су ове анализе поставиле важне методолошке стандарде и референтни оквир за будућа истраживања у региону. Управо у том контексту, успостављање националне базе вредности фактора R представља кључни корак ка њиховом усклађивању са европским приступима процене ерозивности падавина.

За квантификацију ерозивности падавина најадекватнији је прорачун кишног фактора тј. средњегодишње ерозивности падавина датог подручја (Universal Soil Loss Equation). У фактору $R = EI_{30}$ садржани су кинетичка енергија (E) и максимални тридесетоминутни интензитет кише (I_{30}), чиниоци који дефинишу комбинацију утицаја кишних капи на нарушавање структуре земљишта и покретање честица.

Класичан приступ прорачуну ерозивности падавина дефинисао је Wischmeier (1959), који је предложио индекс EI_{30} као производ укупне кинетичке енергије кише и њеног максималног тридесетоминутног интензитета. Ова формула представља основу за одређивање климатског фактора R у USLE моделу и задржала је методолошки значај у савременој процени губитака земљишта. Међутим, у пракси постоје ограничења, јер само мали број метеоролошких станица у Србији располаже подацима о падавинама са довољно високом временском резолуцијом и дугим серијама запажања неопходним за прецизан прорачун овог параметра.

У почетним студијама утврђено је да највећи део губитака потиче од неколико изузетно интензивних кишних епизода (Wischmeier, 1959; Wischmeier Smith, 1958). Каснија дугорочна мерења у бројним државама показала су, међутим, да се укупан ефекат ерозивности не може приписати искључиво екстремним догађајима, већ и кумулативном утицају умерених кишних епизода које се јављају током године (Wischmeier, 1962).

Због тога фактор R представља кључну климатску компоненту у моделима ерозије, јер интегрише утицај падавина различитог интензитета и трајања у јединствен показатељ који омогућава њихову просторну и временску упоредивост.



Слика 1. Карта ерозивности падавина у Европи
Figure 1. Map of rainfall erosivity in Europe (Panagos et al., 2015)

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ РАДА

Обрачун фактора ерозионе снаге кише R урађен је на основу анализе плувиографских трака за климатолошке станице (КС) Врање, период 1974–1993. године (надморска висина 458 m.n.m, географска ширина 42° 33', географска дужина 21° 55') и за Београд, период 1968–1992. године (надморска висина 132 m, географска ширина 44° 48', географска дужина 20° 28') (Braunović, 1996; Braunović et al., 2010; Perović et al., 2019).

За обрачун вредности фактора R коришћена је једначина:

$$R = \sum_{j=1}^n \frac{(210.3 + 0.89 \log I_j) I_j T_j \max I_{30}}{100} \text{ MJ cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

Фактор R обрачунат је за све кишне епизоде висине преко 5 mm и минималног трајања од 30 минута, уз услов да се кише обрачунавају као посебне целине ако је интервал између њих минимум 6 часова, а висина падавина у том интервалу не прелази 1 mm. Укупно је анализирано 1018 кишних епизода које испуњавају наведене критеријуме (402. за КС Врање и 616 за КС Београд) (Braunović, 1996; Braunović et al., 2010). Обрачун је спроведен тако што је свака кишна епизода подељена на временске сегменте трајања од 5 до 10 минута, са приближно једнаким интензитетом падавина. За сваки сегмент кишне епизоде очитане су количина падавина и време трајања, на основу којих је срачуната кинетичка енергија сваког сегмента. Сума кинетичких енергија свих сегмената представља укупну кинетичку енергију кише, која помножена максималним тридесетоминутним интензитетом очитаним са плувиографских трака даје фактор ерозионе снаге кише. Збир вредности фактора R за све кише у једном месецу представља месечну вредност, а збир месечних, годишњу. Просечна вредност фактора за одређени период добијена је аритметичком средином годишњих вредности (Wischmeier, Smith, 1978).

Значајан проблем за правилан обрачун средње годишње вредности фактора R_{god} јесте чињеница да на подручју Србије плувиографи не раде током зимских месеци, што онемогућава директно праћење ерозивних процеса у овом периоду. Иако су зимске падавине углавном мањег интензитета, њихов кумулативни ефекат нарочито у условима топљења снега или продужених киша може допринети губицима земљишта. Овај недостатак је неопходно надоместити увођењем субфактора R_s (фактора киша слабог интензитета и дугог трајања или воде од топљења снега у периоду од 1. новембра до 31. марта, за период године у коме није радио плувиограф) (Wischmeier, Smith, 1978).

$$R_s = 1,5 \cdot P_m$$

P_m – просек локалних месечних падавина у виду снега или дуготрајних киша слабог интензитета.

Фактор 1.5 у једначини представља емпиријски корекциони коефицијент који компензује недостатак података о зимским падавинама, а не директно повећање њиховог енергетског ефекта. Његова примена омогућава приближно укључивање ерозивног потенцијала дуготрајних киша и падавина од топљења снега у укупну годишњу вредност фактора R . Овај приступ се показао погодним у условима умерено-континенталне климе, где се део ерозивних процеса јавља и током зимског периода, посебно на нагнутим теренима са слабо везаним површинским слојем земљишта.

Процењене средње годишње вредности фактора R (R_{god}) за климатолошке станице Београд, Врање и Смедеревска Паланка обрачунате су на основу једначине

$$R_{\text{god}} = R_s + R$$

Просечне месечне суме падавина висине преко 5 mm, минималног трајања 30 минута разликују се од укупне суме падавина за 20–35%, тако да у обрачуну фактора R падавине регистроване од 01. априла до 31. октобра треба умањити.

На основу добијених резултата усвојене су вредности емпиријских коефицијената b_0 ($\text{MJ h}^{-1} \text{month}^{-1}$) који садрже разлику месечних суме падавина и суме падавина $>5\text{mm}$, и корекциони фактор 1.5 за падавине у зимском периоду (од новембра до марта).

$$R_{\text{god}} = b_0 \cdot P_m \quad (4)$$

где је:

P_m – средња годишња количина падавина (mm)

b_0 – емпиријски коефицијент ($\text{MJ h}^{-1} \text{ month}^{-1}$), који према Grimm et al., 2003 има вредности у распону од 1.1 до 1.5.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Вредност фактора ерозионе снаге кише, за део године у коме је радио плувиограф (од 1. априла до 31. октобра), за КС Београд износи $R = 856,9 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ($85,69 \text{ MJ cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$). Процењена вредност годишњег фактора ерозионе кише добијена увођењем субфактора R_s (фактора киша слабог интензитета и дугог трајања или воде од топљења снега у периоду од 1. новембра до 31. марта), R_{god} iznosi $1218,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$.

Вредност фактора ерозионе снаге кише, за део године у коме је радио плувиограф (1. април – 31. октобар), за КС Врање износи $R = 343,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ($34,36 \text{ MJ cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$). Процењена вредност годишњег фактора ерозионе R_{god} iznosi $678,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$.

Према Стефановић, 1992, Вредност фактора ерозионе снаге кише, за део године у коме је радио плувиограф за КС Смедеревска Паланка износи $R = 842 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ($84,2 \text{ MJ cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$), а процењена вредност годишњег фактора ерозионе R_{god} iznosi $1165,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (Табела 1).

Табела 1: Вредности емпиријског коефицијента b_0 и процењене вредности фактора R_{god} за КС Врање, Београд и Смедеревска Паланка

Table 1. Values of the empirical coefficient b_0 and estimated values of the factor R_{year} for climate station Vranje, Beograd i Smederevska Palanka

КС	Надморска висина	Период	R	Падавине XI–III	R_s	R_{god}	P_m	b_0
Београд	132	1968–1992	856,9	241,1	361,6	1218,5	696,1	1,75
Врање	458	1974–1993	343,6	223,1	334,6	678,2	506,1	1,34
Смедеревска Паланка	121	1972–1979	842,0	215,8	328,3	1165,8	693,6	1,63

Извор: Аутор

Вредности коефицијента b_0 прате градијент континенталности и показују јасан тренд опадања са порастом надморске висине, што показује да однос између количине падавина и ерозионе енергије није линеаран, већ резултат сложене интеракције атмосферских процеса и локалних топографских услова који модификују кинетички интензитет падавина.

На основу добијених вредности R_{god} могуће је извршити калибрацију за остале климатолошке и кишомерне станице на подручју Београда и Смедеревске Паланке. За

подручје Врањске котлине је калибрација урађена на основу резултата за КС Врање и приказана у раду Perović et al., 2019.

База података о ерозивности падавина на европском нивоу (Rainfall Erosivity Database at European Scale - REDES) обухвата 1541 климатолошку станицу у 28 држава, са којих су расположиви подаци са плувиографских трака о интензитетима падавина од 3 КС у Литванији (низ 16 година, доступни I_{30}), до 251. КС у Италији (Panagos et al., 2015). У Италији, која има већи број доступних КС (>500), одабрана је 251 станица како се не би утицало на паневропске резултате. Одабран је узорак КС који покрива све климатске услове (медитерански, континентални и алпски) и све нивое надморске висине.

Развој базе података о ерозивности падавина на европском нивоу (REDES) и њено ажурирање из 2015. године са проширењем на месечну компоненту омогућили су развој месечних и сезонских мапа R фактора и процену ерозивности падавина и просторно и временски.

Током зимских месеци, значајна ерозивност падавина присутна је само у делу медитеранских земаља. Нагли пораст ерозивности јавља се у већем делу Европске уније (осим медитеранског басена, западног дела Британије и Ирске) у мају, а највише вредности су регистроване током летњих месеци. Почевши од септембра, R фактор има тренд опадања. Просечна ерозивност падавина лети је скоро 4 пута већа ($315 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$) у поређењу са зимом ($87 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$) (Panagos et al., 2015).

Према Zhu et al., 2021, просечна годишња ерозивност падавина у јужној Кини је $5130,00 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, са распоном од $3964,24$ до $6425,87 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, и значајно варира између различитих провинција. Ерозивност падавина такође неравномерно варира између сезона, при чему је средња ерозивност падавина током лета скоро 15 пута већа него зими. Ова студија је укључила анализу ерозивности падавина на више просторних и временских скала, на основу података о дневним падавинама посматраним на 223 метеоролошке станице, током 58 година (1960–2017).

Приликом процене ерозионе опасности падавина на основу средњих вишегодишњих вредности фактора R неопходно је познавати њихову месечну расподелу. Месечна расподела вредности фактора R значајна је нарочито у пролећним месецима, када су падине слабо заштићене вегетационим покривачем.

Месечна расподела вредности фактора R за подручје Врања показала је да се највеће вредности јављају у јуну, јулу и мају. У осталом делу вегетационог периода ниже вредности фактора ерозионе снаге кише условљене су чешћом појавом киша слабијег интензитета. На подручју Београда је нешто другачији распоред максималних вредности фактора R. Највеће вредности јављају се у јуну, мају и августу. Просечна ерозивност падавина у летњем периоду износи $298,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (КС Врање) и $627,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (КС Београд), док података за зимски период године нема, јер од 1. новембра до 31. марта плувиографи не раде.

Као што је наведено, због захтева за детаљним подацима за стандардни USLE прорачун R фактора, могу се користити и алтернативне једначине са мање детаљним подацима, у зависности од њихове доступности. Van der Knijff et al. 1999, 2002. године развили су једноставан метод за рачунање фактора R применом регресионе анализе на подацима са 47 климатолошких станица. Grimm et al. 2003. године унапредили су наведено

истраживање анализом података са 366 KC лоцираних широм Италије, тако да се приликом израчунавања фактора ерозивности често користи методолошки приступ GJRM (Grimm-Jones-Rusco-Montanarella). Према овој методи вредности средњих месечних падавина су довољан улазни податак, при чему емпиријски коефицијент b_0 има вредности од 1,1 до 1,5 и служи као корекциони фактор. Емпиријски коефицијент b_0 коришћен је у истраживачким радовима и студијама на подручју Републике Србије (нпр. Belanović-Simić et al., 2013; Miljković, Simić, 2020), али без претходних истраживања.

На основу истраживања која су спровели Braunović et al., 2010. године и касније Perović et al., 2019. године, а која су укључивала анализе плувиографских трака за метеоролошку станицу Врање, у периоду од 20 година (402 кишне епизоде висине >5 mm, минималног трајања 30 минута, интервал између две епизоде минимум 6 часова), извршена је калибрација корекционог фактора поменуте једначине за део југоисточне Србије (општина Врање). Наведена истраживања су утврдила вредност емпиријског коефицијента b_0 на 1,1 ($\text{MJ h}^{-1}\text{mesec}^{-1}$), са корекцијама за суме падавина од 20 % (разлика месечне суме падавина и суме падавина $>5\text{mm}$) и корекционим фактором 1,5 за падавине у периоду године када не ради плувиограф (од новембра до марта). На исти начин би требало урадити калибрацију корекционог фактора b_0 и за остале делове Србије.

Упоређивањем добијених вредности за Србију са резултатима савремених истраживања на европском и регионалном нивоу уочава се да домаће вредности фактора ерозионе снаге падавина (R) добро кореспондирају са опсегом карактеристичним за југоисточну Европу. Према REDES бази, просечна вредност R фактора за Европску унију и Швајцарску износи око $722 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, уз изражену просторну хетерогеност од преко $100 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ у северној Европи до преко $3000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ у медитеранском појасу (Panagos et al., 2015). Допунска анализа REDES базе показала је да је највећа ерозивност регистрована у јужној Европи, нарочито у северној Италији, на Јадранској обали и у деловима Пиринејског полуострва (Ballabio et al., 2017). Недавна студија за подручје Западног Балкана (Micić Ponjiger et al., 2023) показала је да просечне вредности R фактора, израчунате на основу ERA5 анализе и вишегодишњих серија падавина, износе око $850 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, са опсегом од приближно 300 до $1700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, што потврђује изражену регионалну варијабилност између приобалних и континенталних области. Аутори су показали да су највише вредности концентрисане у јадранском и динарском појасу, док су најниже у Панонској низији и југоисточној Србији. Према студији Micić Ponjiger et al. (2021), која је анализирала просторну и временску променљивост ерозивности падавина у централном и јужном делу Панонског басена, вредности R фактора варирају између 700 и $2100 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$, уз благ пораст током последње деценије посматраног периода (2010–2019), нарочито у југозападним деловима басена. У том контексту, вредности добијене у овом истраживању где је $R_{\text{god}} = 1218,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ за Београд, $678,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ за Врање и $1165,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$ за Смедеревску Паланку, позиционирају Србију у средње-висок ерозивни режим падавина, типичан за умерено-континенталне услове југоисточне Европе. Ове вредности су упоредиве са онима за Румунију (око $785 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$), Бугарску (око $695 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$) и Мађарску (око $683 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$), али ниже од вредности карактеристичних за хрватске медитеранске и планинске регионе (више од $1200 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ god}^{-1}$) (Panagos et al., 2015) (Табела 2).

Табела 2. Средње годишње вредности фактора R у земљама у окружењу
 Table 2. Average annual R -factor values in surrounding countries

Држава	Вредности фактора R $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$			Пројекција 2050. год.
	Средња	Минимална	Максимална	
Бугарска	695,0	79,8	1447,1	838,2
Хрватска	1276,2	523,4	3522,7	1297,6
Мађарска	683,3	361,4	1000,8	759,3
Румунија	785,0	462,2	1150,1	930,2

Извор: Panagos et al., 2015.

ЗАКЉУЧЦИ

Истраживања и приказани резултати представљају почетни корак ка систематском увођењу научно утемељене методологије за прорачун фактора ерозионе снаге кише (R) и његову примену у оквиру USLE модела на простору Србије. Прецизно дефинисање вредности фактора R и његово прилагођавање специфичним климатским и орографским условима наше земље захтева обимна и дугорочна истраживања, посебно имајући у виду израду нове карте ерозије Републике Србије засноване на квантитативним принципима USLE једначине. За сада је препорука да се за подручје Србије усвајају вредности емпиријског коефицијента b_0 у распону од 1,34 до 1,75.

Увођење вредности фактора R за период године када не раде плувиографи је значајан помак који омогућава поређење резултата земаља Европске уније. Постављање 27 аутоматских метеоролошких станица на територији R Србије у периоду од 2006. године до данас, отвара нове могућности за читавање максималних тридесетоминутних интензитета кишних епизода и проверу резултата добијених читавањем поменутих вредности са плувиографских трака.

Остварени резултати омогућавају реалнију процену и детаљније мапирање ерозионог потенцијала падавина, што представља значајан корак ка интегрисаном разумевању просторне динамике ерозије у Србији.

Захвалница: Истраживање је подржало Министарство за науку, технолошки развој и иновације Републике Србије (уговор бр. 451-03-136/2025-03/200027 и 451-03-136/2025-03/200007). Посебно се захваљујемо Предрагу Петровићу и Дубравки Јовановић.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Beguería, S., Klik, A., Petan, S., Janecek, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Tadić, M. P., Nazzareno, D., Kostalova, J., Rousseva, S., Banasik, K., L., Alewell, C., Panagos, P. (2017): Mapping monthly rainfall erosivity in Europe, *Science of the Total Environment*, 579:1298–1315.
2. Belanović-Simić, S., Perović, V., Vidojević, D., Kostadinov, S., Knežević, M., Kadović, R., Košanin, O. (2013): Assessment of soil erosion intensity in Kolubara district, Serbia, *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(5a):1556–1563.
3. Braunović, S. (1996): Calculation of rain erosivity in the region of Belgrade, First European Conference, and Trade Exposition on Erosion Control, IECA, Sitges, Barcelona, 29–31. May 1996.
4. Braunović, S. (1997): Determination of rainfall factor for the region of Belgrade at the application of USLE method in our conditions, The 3rd international conference on the development of forestry and Wood science/tehnology, Belgrade, 176–183.
5. Braunović S., Bilibajkić S., Ratknić M. (2009): Determination of rain erosive power factor (R) for the region of Vranje aiming at the application of USLE method in our conditions, International Conference “Land Conservation”- Landcon 0905 Global Change – Challenges for Soil Management”. 26–30. May 2009, Tara Mountain, Conference Proceedings CD ROM.
6. Braunović S., Bilibajkić S., Ratknić M. (2010): Calculation of rainfall erosivity factor in the region of Vranje (South-Eastern Serbia), in *Global Change – Challenges for Soil Management*, ed. Miodrag Zlatić, *Advances in Geoecology* 41:184–191.
7. Grimm, M., Jones, R.J.A., Rusco, E., Montanarella, L. (2003): Soil erosion risk in Italy: a revised USLE approach. European Soil Bureau Research Report No.11, EUR20677 EN, (2002). Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, (28)
8. Lal, R. (1988): Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA.
9. Micić Ponjiger, T., Lukić, T., Basarin, B., Jokić, M., Wilby, R.L., Pavić, D., Mesaroš, M., Valjarević, A., Milanović, M., Morar, C. (2021): Detailed Analysis of Spatial–Temporal Variability of Rainfall Erosivity and Erosivity Density in the Central and Southern Panonian Basin, *Sustainability*, 13(23):13355. <https://doi.org/10.3390/su132313355>
10. Micić Ponjiger, T., Lukić, T., Wilby, R.L., Marković, S.B., Valjarević, A., Dragičević, S., Gavrilov, M.B., Ponjiger, I., Durlević, U., Milanović, M. et al. (2023): Evaluation of Rainfall Erosivity in the Western Balkans by Mapping and Clustering ERA5 Reanalysis Data, *Atmosphere*, 14:104. <https://doi.org/10.3390/atmos14010104>
11. Milijkovic, P., Belanovic Simic, S. (2020): Soil loss data comparison using usle and water/sediment model in the Polomska river catchment, Serbia, *Fresenius Environ. Bull.*, 29: 5012–5020.
12. Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Perčec Tadić

- M., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymszewicz, A., Dumitrescu, A., Santiago Beguería, A., Alewell, C. (2015): Rainfall erosivity in Europe, *Science of The Total Environment*. 51:801–814.
13. Perović V., Kadović R., Djurdjević V., Braunović S., Čakmak D., Mitrović M., Pavlović P. (2019): Effects of changes in climate and land use on soil erosion: a case study of the Vranjska Valley, Serbia, *Regional Environmental Change* 19(4):1035–1046.
 14. Stefanović, J. (1992): Integralna istraživanja procesa geneze i transporta nanosa u malim slivovima na primeru Topčiderske reke. Magistarska teza. Šumarski fakultet, Beograd.
 15. Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1958): Rainfall energy and its relationship to soil loss, *American Geophysical Union Transactions* 39:285-291.
 16. Wischmeier, W. H. (1959): A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation, *Soil Science Society of America, Proceedings* 23:246-249.
 17. Wischmeier, W. H. (1962): Storms and soil conservation, *Journal of Soil Water and Conservation*, 17(2):55-59.
 18. Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1958): Rainfall energy and its relationship to soil loss, *Eos Trans. AGU*, 39:285-291.
 19. Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agriculture handbook no. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
 20. Zhu, D., Xiong K., Xiao, H. (2021): Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China, 1960–2017, *Catena*, 197.
 21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816220305270>
 22. (1968–1993): Meteorološki godišnjak 1. Klimatološki podaci. Republika Srbija, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd.
 23. https://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php (приступљено 31. октобра 2025).
 24. (1977): Guidelines for watershed management. FAO conservation guide. Food and agriculture organization of the United nations, Rome.

ПРИМЕНА ГИС-А У УТВРЂИВАЊУ УГРОЖЕНОСТИ ПРОЦЕСОМ
КЛИЖЕЊА ТЛА НА ПРИМЕРУ ОПШТИНЕ ГРОЦКА
APPLICATION OF GIS IN DETERMINING THE ENDANGERMENT BY THE
PROCESS OF SOIL SLIDING ON THE EXAMPLE OF THE MUNICIPALITY OF
GROCKA

Немања Ристић¹, Анђела Ратковић², Јована Ратковић³

¹Brooks Hannas & Partners, ²Приватна средња школа ЕПА, ³Приватна основна и средња
школа Владислав Петковић Дис

Апстракт: Овај рад приказује примену Географских информационих система (ГИС) у процени предиспонираности терена на појаву клизишта на подручју градске општине Гроцка. Као примарни просторни податак коришћен је дигитални модел терена (DEM) резолуције 25 m, преузет са USGS EarthExplorer платформе. На основу DEM-а изведене су три основне морфометријске варијабле нагиб, закривљеност и експозиција рељефа које представљају најзначајније факторе у процесу иницирања клизишта. Аналитички модел је додатно обогаћен подацима о геолошкој грађи, удаљености од хидрографске мреже и наменама земљишта (CLC 2018), како би се обухватили сви битни услови који утичу на стабилност терена. Процена подложности спроведена је применом Probability Method (PM), којом је израчунат индекс подложности клизиштима (LSI) и класификован у четири нивоу ризика: низак, средњи, висок и веома висок. Просторна расподела добијених вредности указује да више од две трећине територије Гроцке припада зонама високог и веома високог степена подложности, што потврђује да ово подручје има изражене природне предиспозиције за настанак клизишта. Добити резултати представљају значајан инструмент за доносиоце одлука, јер могу послужити у раном препознавању ризичних подручја, планирању инфраструктурних интервенција и дефинисању превентивних мера усмерених на умањење штета изазваних клизиштима..
Кључне речи: ГИС, клизишта, Гроцка

Abstract: This paper presents the application of Geographic Information Systems (GIS) for assessing terrain predisposition to landslide occurrence in the municipality of Grocka. A 25 m resolution Digital Elevation Model (DEM), obtained from the USGS EarthExplorer platform, was used as the primary spatial input. Based on the DEM, three key morphometric variables slope, curvature, and aspect were derived, representing dominant factors influencing landslide initiation. The analytical model was further enriched with geological structure, distance to watercourses, and land-use data (CLC 2018), ensuring the inclusion of all major conditions affecting terrain stability. Landslide susceptibility was evaluated using the Probability Method (PM), which produced a Landslide Susceptibility Index (LSI) subsequently classified into four categories: low, moderate, high, and very high susceptibility. The spatial distribution of LSI values indicates that more than two-thirds of the Grocka municipality fall within high and very high susceptibility zones, confirming that the area possesses strong natural predispositions for landslide formation. The findings provide a valuable decision-support tool for identifying high-risk zones, planning infrastructure interventions, and defining preventive measures aimed at reducing the impact of future landslides.

Keywords: GIS, landslides, Grocka

1 nemanjaristic00@gmail.com

УВОД

Градска општина Гроцка налази се на контакту шумадијског побрђа и војвођанске равнице на десној обали Дунава. Због својих природних карактеристика представља подручје од значаја за проучавање клизишних процеса. Десна обала Дунава, посебно њен део који се простире северо - источном границом општине Гроцка, представља подручје на којем су клизишта изражена и посебно активна.

Клизишта представљају посебан геоморфолошки процес и једну од значајнијих природних непогода на нашој планети. Манифестују се клижењем растреситих слојева на одсесима и стрмим падинама. Иако се клизишта појединачно дешавају на релативно малом простору, клижењем тла могу бити захваћени и велики простори, па овој природној непогоди треба посветити посебну пажњу у научним истраживањима али и у пракси, како би се спречио њихов настанак, ублажиле последице, али и санирао терен који је већ захваћен овим процесом. Последице које клизишта носе са собом могу се поделити на директне и индиректне (Новковић, 2016):

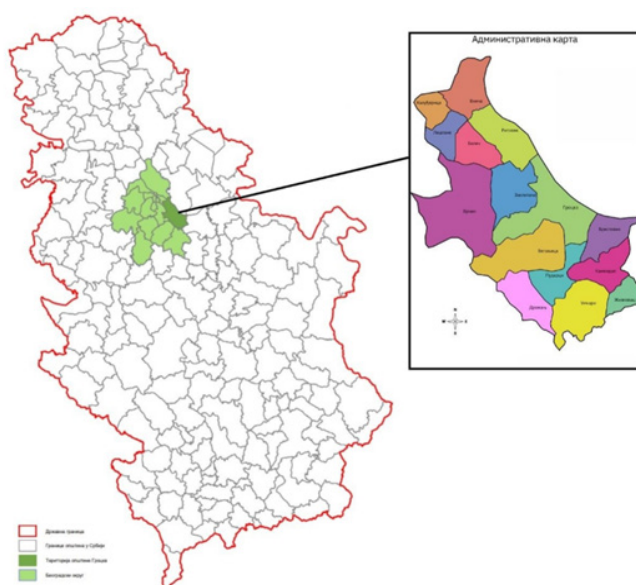
- Директне последице су оне које се јављају на самим падинама које су покренуте, а ту се пре свега мисли на морфолошке промене на терену, оштећења и рушења објеката, како стамбених, тако и привредних и јавних, оштећења на инфраструктури, као и на повреди људи, од којих неке могу бити и са смртним исходом.
- Индиректне последице је много теже сагледати. Ту спадају нпр. штете од поплава, које су настале узводно од места где је клизиште преградило водоток, дуготрајно погоршање здравственог стања људи због лошијих санитарно - хигијенских услова у угроженим подручјима, проблеми који настају у срединама где се раселило становништво које је било принуђено да мигрира са простора захваћених овом катастрофом итд.
- Употреба савремених алата, као што су географски информациони системи и обрада сателитских података, све се више користи широм света (Valjarević, 2024). Географски информациони систем (ГИС) је један од најмоћнијих алата који помаже да се разуме природа простора. Он је успео да обједини оно што је најбоље из два некада одвојена подручја – картографије (слике света) и информатике (света података) (Кукрика, 2000).

У раду су ГИС алати нашли велику примену у израчунавању предиспонираности терена општине Гроцка клизишним процесом. ГИС и моделовање података су врло моћни алати за израчунавање и опис неких података о ефектима потенцијалних опасности (Valjarević et al., 2018).

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Подручје истраживања

Општина Гроцка је једна од 17 општина Административног подручја Града Београда. Градска општина Гроцка пружа се од 20°32'18" до 20°49'30" источне географске дужине и од 44°32'37" до 44°47'55" северне географске ширине и заузима површину од 289,23 km². Према попису становника из 2022. године имала је 83,435 становника. Подручје општине обухвата 15 насеља: Гроцка, Ритопек, Винча, Брестовик, Камендол, Живковац, Умчари, Дражањ, Пударци, Бегаљца, Заклопача, Врчин, Болеч, Лештане и Калуђерица.



Слика 1. Географски положај општине Гроцка
Figure 1. Geographic position of the Municipality of Grocka

Општина Гроцка је оивичена на северу и североистоку реком Дунав (24 километара обале и Грочанском адом) и граничи се са општинама Панчево и Ковин на северу, Смедерево на истоку, са југа се граничи Младеновцем, док је са западне стране оивичена општинама Сопот, Вождовац, Звездара и Палилула, које такође припадају београдском административном подручју (Слика 1). Градска општина Гроцка налази се на контакту шумадијског побрђа и војвођанске равнице. Ограничена је Дунавом са североистока, долином Завојничке реке, Авалом и „Шумадијском гредом”² са запада и долином реке Раље са југа.

Природне карактеристике

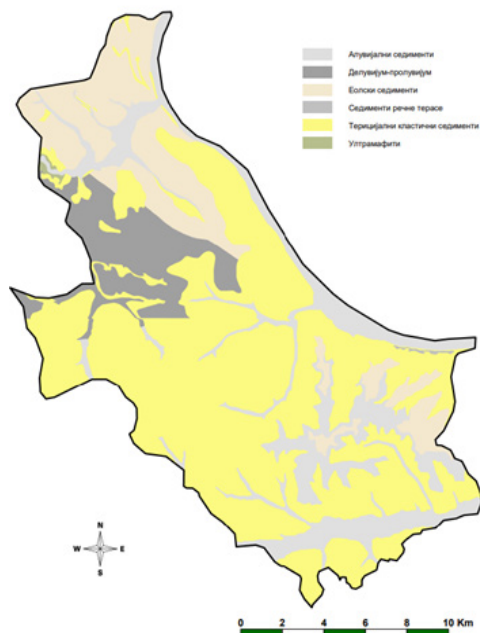
Геолошке карактеристике

На геолошкој карти општине Гроцка (Слика 2) примећују се различити типови стена, од којих су најдоминантније заступљени терцијални кластични седименти. Кластичне седиментне стене имају **кластичне** структуре и настају од остатака распадања. Њихова одлика је да се стена састоји од фрагмената алотигених зрна, који могу, али и не морају да буду везани са неком цементном материјом. Терцијални кластични седименти највише су заступљени у насељима: Гроцка, Бегаљница, Ритопек, Врчин, Заклопача, Дражањ и Умчари. Алувијални седименти су заступљени највећим делом уз Дунав, али се пружају и око река Грочице, Болечице и Раље. Делувијум-пролувијум највише је заступљен у северо-западном делу општине у насељима Лештане и Врчин, где сачињавају нешто мање од половине површине насеља. Еолски седименти карактеристични су за северни део општине, где у насељима Винча и Калуђерица чине доминантан тип стене, а такође су приступни на мањој површини у јужном делу општине. Седименти речне терасе

² Шумадијска греда представља заостали део Панонског копна меридијанског правца пружања, настао приликом разламања и спуштања копна са кога се дижу планине: Авала, Космај, Букуља, Венчац и Рудник (Павловић, 2019).

примећују се јужно од насеља Гроцка, на десној обали Дунава на свега 0,30 km², што представља 0,10% од укупне површине општине. Ултрамафити који уз седimente речне терасе заузимају најмању површину општине, налазе се северо-западном делу општине у насељу Лештане и чине само 0,16% од укупне површине општине.

Карта геолошке грађе истраживаног простора добијена је дигитализацијом садржаја основних геолошких карата, листови: Смедерево и Панчево размера 1 : 100.000, издатих од стране Савезног геолошког завода 1975. године. Након дигитализације и издвајања појединачних геолошких формација, сачињена је табела са њиховим површинама унутар општине, као и уделом у укупној површини општине (Табела 1).



Слика 2. Геолошка карта

Figure 2. Geological map

Табела 1. Тип стена, њихова површина и удео на територији општине Гроцка

Table 1. Rock types, their area and share in the territory of the Municipality of Grocka

Геолошка формација	Површина (km ²)	Удео у укупној површини (%)
Алувијални седименти	51,03	17,32
Делувијум-пролувијум	27,63	9,38
Еолски седименти	47,47	16,12
Седименти речне терасе	0,30	0,10
Терцијални кластични седименти	167,66	56,92
Ултрамафити	0,46	0,16
Укупно	294,55	100

Педолошке карактеристике

Између басена речног слива Бегаљице и Болечице протеже се у дужини од 10 km ритопечки урвинки појас. Општину карактерише рецентна ерозија – клижење земљишта на одсеку према Дунаву. Басен речног слива Болечице се састоји од два котлинска проширења (Завојничког и Болечког) и лештанске клисуре која има лактаст облик. Управо тај појас који је директно упућен на тржиште Београда, уско је специјализован у повртарству, ратарству. У тој зони заступљено је квалитетно, плодно земљиште. Преко стена миоцене старости је извијен лес, чије су моћне наслаге у атару Винче и Ритопека. У Винчи где су моћне наслаге леса створен је плодни чернозем. Алувијум је карактеристичан за долину Болечице, заступљен је дуж речних токова или у њиховој непосредној близини, где заузима равне или благо нагнуте падине. Одсек према Дунаву у атару Ритопека састављен је од скелетног земљишта, док је у осталом делу атара према Смедеревдком путу и Болечу плитки и деградирани чернозем, који је заступљен и у Калуђерици. У сектору Винче, од Болечице ка Ритопеку и Гроцкој, површине под черноземом заузимају блаже рељефне облике изнад Дунава и смеђује се еродираним черноземом. Смоница није знатније распрострањена, али се може срести на подручју Врчина, затим Бегаљице, и то еродирана. Североисточно шумадијско побрђе, којем припада Дражањ, Пудраци, Умчари, Камендол и Живковац карактерише благо заталасан рељеф у којем доминира долина реке Раље. Педолошки састав земљишта развио се под утицајем разноврсне петролошке подлоге. Поред тога што се јављају у партијама у насељима Подунавља (Врчин, Лештане и Калуђерица), карактеристичне су за атар насеља Дражањ и Брестовик. У тој ниској Шумадији преовлађују гајњаче и параподзоласте гајњаче. Заступљена је и смоница, али знатно мање, у атару насеља Пудараца и Дражњу („Просторни план за део градске општине Гроцка“, 2012).

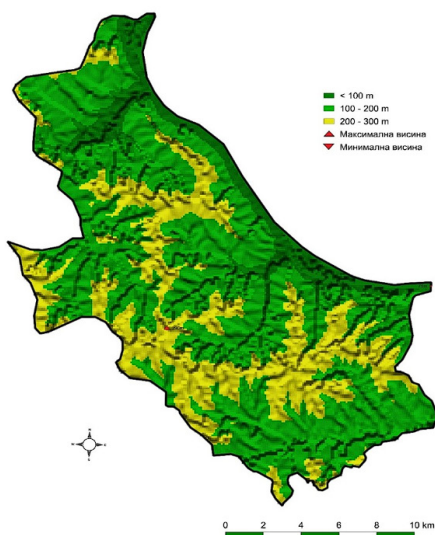
Морфометријске карактеристике

Морфометријске карактеристике добијене су из растерског дигиталног модела терена (Digital Elevation Model – DEM) резолуције 25 m. На основу овог DEM-а у програму QGIS изведене су три основне морфометријске карте: карта нагиба, хипсометријска карта, карта експозиције и закривљености рељефа.

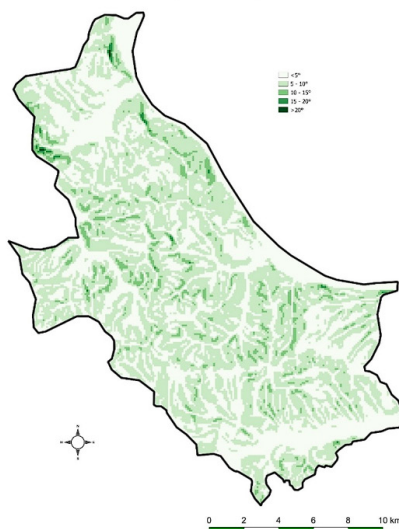
Најнижа тачка у општини Гроцка износи 71 m и налази се на југо-источној страни општине дуж реке Дунав, док се највиша тачка општине налази у централном делу и износи 290 m. Средња надморска висина општине је 169,3 m. Висинска зона од 100 до 200 m заузима највећу површину и чини 60,68 % територије (Слика 3).

Нагиб терена има значајну улогу у одређивању предиспонираности неке територије геохазардима. Када су клизишта у питању, он утиче на димензије, брзину кретања и последице ове непогоде (Новковић, 2016). Ако је угао падине мали, онда је за појаву клизишта неопходан услов да су слојеви растреситих стена нагнути у правцу нагиба падине. Ако је угао велики, чак и преко 40°, онда се клизишта могу образовати независно од тога да ли су неотпорне стене слојевите и какав је правац и износ пада слојева у односу на правац и вредност нагиба падине (морфогена клизишта). Природно, клизишта ће бити већих димензија ако се подудари правац пада стране и слојева и уколико је падни угао већи (Лазаревић, 2000).

Угао нагиба топографске површине представља један од основних фактора појаве клижења терена. Истраживања су показала да се клизишта могу јавити већ на нагибима од 5°, али су најчешћа на нагибима од преко 20°. Анализом вредности углова нагиба рељефа Србије, утврђено је да су углови нагиба од 10° распрострањени на 65% територије, док на нагибе од 10-20° отпада 28,4% (25.100 km²) (Драгићевић, Филиповић, 2016).



Слика 3. Хипсометријска карта
Figure 3. Hypsometric map



Слика 4. Карта нагиба терена
Figure 4. Slope map

Нагиб терена у општини Гроцка варира у опсегу 0-22° (Слика 4). Најмањи нагиби заступљени су у долинама река Дунав, Грочица, Болечица и Раља, док су највећи нагиби присутни у насељима Винча и Ритопек. Нагиби до 10° заузимају 94% територије и представљају један од главних разлога због којих је Гроцка као општина позната по воћарству (Табела 2). Средњи нагиб терена износи 5,37°.

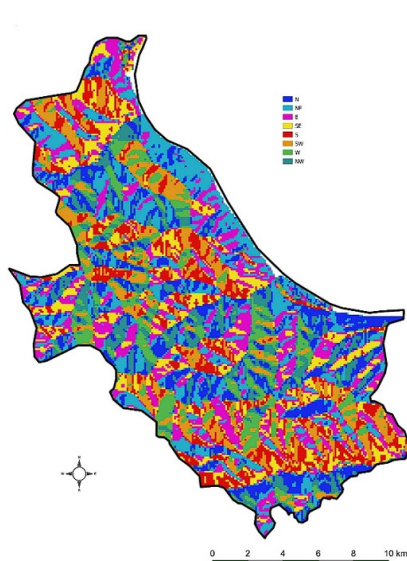
Табела 2. Нагиб терена, његова површина и удео у укупној површини општине
Table 2. Slope classes, their area and share in the total surface of the municipality

Нагиб терена (°)	Површина (km ²)	Удео у укупној површини општине
0 – 5	134,49	45,66
5 – 10	143,67	48,78
10 – 15	15,61	5,30
15 – 20	0,69	0,23
>20	0,07	0,02
Укупно	294,55	100

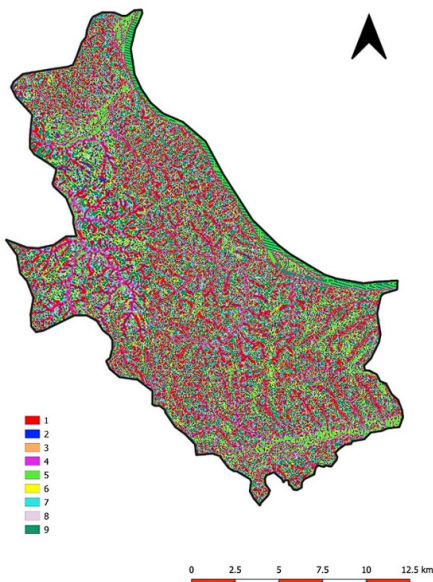
Експозиција рељефа представља његову значајну карактеристику која посредно утиче на карактеристике природних услова и интензитет различитих процеса у природној средини, али и на степен антропогене делатности. Она има улогу веома важног модификатора ерозивних процеса. Од експозиције терена зависи пријем и дужина трајања Сунчевог сјаја, температурне суме и њихове амплитуде, а све то директно и индиректно утиче на процесе распадања стена и денудације. Експозиција модификује значај висине Сунца изнад хоризонта тако што присојне стране омогућавају повећање упадног угла његових зрака, а осојне њихово смањење. На северним експозицијама влажност је већа него на

јужним што условљава добру пошумљености и дебљину земљишног покривача, а самим тим и густину речне мреже. Према овим карактеристикама и интезитет денудације је мањи него на јужним падинама (Драгићевић и Филиповић, 2016).

Експозиција рељефа представља веома важан фактор када се говори о морфометријским карактеристикама терена. Она представља оријентисаност нагиба терена у односу на стране света. Може имати вредности од 0° (правац севера) до 360° (опет правац севера). На територији општине Гроцка доминира северо-источна експозиција, поготово у насељима покрај којих протиче река Дунав (Слика 5) (Табела 3).



Слика 5. Карта експозиције рељефа
Figure 5. Aspect map



Слика 6. Карта закривљености терена
Figure 6. Curvature map

Табела 3. Експозиција општине, површина и удео у укупној површини
Table 3. Aspect of the municipality, area and share in the total surface

Страна света	Азимут ($^{\circ}$)	Површина (km^2)	Удео у укупној површини општине (%)
N (север)	0-22,5 ; 337,5-360	39,43	13,54
NE (северо-исток)	22,5-67,5	51,23	17,59
E (исток)	67,5-112,5	43,7	15,01
SE (југо-исток)	112,5-157,5	34,57	11,87
S (југ)	157,5-202,5	33,25	11,42
SW (југо-запад)	202,5-247,5	33,57	11,53
W (запад)	247,5-292,5	27,20	09,34
NW (северо-запад)	292,5-337,5	28,27	09,71
Укупно		294,55	100

Закривљеност терена је карактеристика рељефа која је изведена из других његових одлика најчешће нагиба и експозиције, посматрано у одређеном правцу (Слика 6). Представља однос између стварне површине терена и идеалне равни у одређеној тачки. Реципрочна је полупречнику кривине терена у датој тачки, па терени благе закривљености имају мање вредности и обрнуто. Најчешће се рачунају следећи типови закривљености терена:

- Планарна (хоризонтална, контурна) – закривљеност изохипсе у хоризонталној равни. Представља стопу променеекспозиције дуж изохипсе и користи се за идентификовање узвишења, гребена, депресија и долина. Позитивне вредности ове закривљености су при вододелници, где се наилази на дивергенцију водених токова, и тада се говори о такозваној конвексној планарној закривљености, док су негативне вредности карактеристичне за терене са конвергентним воденим токовима, као што су долине, и тада се говори о конкавној планарној закривљености, док се у случају када је вредност једнака нули ради о нормално нагнутој равни;
- Профилна (вертикална) – закривљеност падне линије у вертикалној равни. Представља стопу промене нагиба дуж падне линије. Користи се за уочавање промена у брзини кретања воде и у транспорту наноса, као и за идентификацију зона са појачаном ерозијом и акумулацијом. Вредности закривљености веће од нуле добијају се за профиле код којих нагиб расте идући низбрдо (конвексни профили), а негативне вредности за профиле код којих нагиб опада идући низбрдо (конкавни профил), док је у случају нормално нагнуте равни вредност једнака нули;
- Укупна (тотална) – мера закривљености површине терена у било ком правцу. Углавном се користи за добијање уопштене представе о закривљености терена. Може имати позитивне вредности (конвексни терени), негативне вредности (конкавни терени) или вредности једнаке нули (Новковић, 2016).

Хидролошке карактеристике

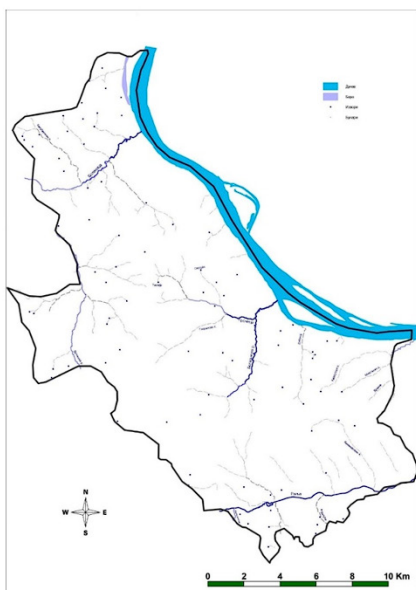
Кроз градску општину Гроцка протиче Дунав у дужини од 24,25 km и представља право природно богатство ове општине. У Дунав се уливају мање реке Болечица и Грочица, док се у јужном делу општине налази река Раља која је притока Језаве, левог рукавца Велике Мораве. Укупна дужина свих водених токова који протичу кроз градску општину Гроцка је 214,68 km (*Карта 7*).

Грочица је поток у насељу Гроцка, настала је спајањем Бегаљичког и Заклопачког потока. Од њиховог спајања до ушћа у Дунав, дужине је око једног километра. Њен лагани ток кроз насеље се мења када водостај на Дунаву порасте. Тада често плави, најчешће на излазу из Гроцке према Бегаљници, а не тако ретко и у самој Грочанској чаршији.

Болечица је кратка река која прилази кроз три београдске општине, дужине 12 km. Извор Болечице се налази у Врчину, даље тече ка северу, подно источних падина Авале, пролазећи између општина Гроцка и Вождовац, кроз села Врчин и Зуце, где се спаја са потоком Врановцем. Потом улази у долину Бубањ Поток где чини источну границу шуме Степин Луг, окреће се на североисток и пролази кроз најјужнији део општине Звездара, где јој се са леве стране уливају још два потока - Бубањ Поток и Завојничка река. Болечица затим наставља кроз јужни део Лештана где јој се са леве стране улива Калуђерички поток и чини границу 4 београдска предграђа: Лештане, Болеч, Ритопек и Винча. У Винчи се Болечица улива у Дунав, источно од археолошког налазишта винчанске културе Бело Брдо.

Дунав је највећа и најважнија река црноморског слива на територији Србије. Дунав је

и друга најдужа река Европе, после Волге. Настаје спајањем две мање реке – Брег и Бригах, на источним падинама планине Шварцвалд код града Донауешинген у Немачкој. Укупна дужина Дунава је 2.783 km, од чега 588 km припада Србији.



Карта 7. Хидролошка карта Гроцке
Map 7. Hydrological map of Grocka



Карта 8. Карта рецентних и палео клизишта у општини Гроцка
Map 8. Map of recent and paleo landslides in the Municipality of Grocka

Рецентна и палео клизишта у општини Гроцка

Клизишта се појављују у готово свим земљама света, у мањој или већој мери. Поједине земље издвајају значајна финансијска средства за санацију клизишта, што је увек исплатљивије него дозволити да дође до њиховог штетног утицаја.

Процес клижења почиње оног момента када напонско стање у стенским масама надмаши њихову отпорност на смицање. На промену напонског стања у стенским масама најчешће утичу следећи чиниоци: продубљивање вододерина и јаруга, подлокавање подножја падина, деловање таласа или матице површинских токова, повећање хидростатичког или хидрауличког притиска подземне воде, засецање, усецање и подсецање подножја падина и косина, повећање оптерећења делова падина изнад подножја (израдом насипа и платоа или формирањем депонија или јаловишта), динамички потреси, минирање, кретање возила, рад машина и земљотреси (Влаховић, 2008).

Сам механизам кретања урвинске масе одвија се, најчешће, на следећи начин. Прво се, током сушног лета, у земљишту створе бројне пукотине, често знатне ширине и дубине. Те пукотине се сваке године, услед наизменичног деловања кише и летње суше, све више проширују и продубљују. То омогућава кишници да све више натапа и све дубље продире у урвинску масу. Истицање подземне воде врши се у подножју падине и том приликом она из тела будућег клизишта износи најситније честице. На тај начин се, на дубини од 5-30 m, ствара зона смањене кохезије. Тај процес стварања зоне смањене кохезије између

повлатних и подинских слојева обнавља се више пута у току године, нарочито у време топљења снега и обилних падавина. Коначно, једном приликом, када растресита повлатна маса буде веома расквашена и више засићена водом, а њен контакт са подинским слојем, представљен клизном равни, изузетно мале кохезије, доћи ће до поремећаја равнотеже и због тога, до кретања урвинске масе (Петровић, Манојловић, 2003).

Геолошки састав преставља примаран чинилац клизишног процеса јер се клизишта јављају само у растреситим, слабо везаним и пластичним стенама, а у чврстим, компактним најчешће их нема. Рељеф представља други примарни фактор, а посебно су важни енергија рељефа и нагиб. Осим геолошког састава и љељефа, клима представља трћи одредишни фактор за појаву клизишта. Као потврда тога може се констатовати да се клизишни процес најчешће активира у пролећним месецима, када је на нашој територији максимална количина падавина. Човек може бити и узрочник и модификатор самог процеса. Као узрочник човек најчешће иницира појаву клизишног процеса својим непланским деловањем на оним теренима који су предиспонирани или означени потенцијалним зонама клизишног процеса. Биљни и животињски свет у великој мери ремети динамику клизишног процеса. Биљни свет својим кореновим системом и бујношћу вегетације везује површински слој земљишта и регулише отицај воде. Са друге стране животињски свет повећава порозност растреситог слоја, а то доводи до брже инфилтрације атмосферске воде и његовог отежавања, односно иницирања интензитета процеса (Драгићевић, Филиповић, 2016).

Као најзначајнији природни хазарди на подручју општине Гроцка издвајају се сеизмизам, клизишта, одрони, поплаве и бујичне поплаве. Стање укупног система заштите од природних непогода у општини Гроцка није задовољавајуће, посебно у односу на просторне аспекте управљања ризиком („Просторни план за део градске општине Гроцка“, 2012).

На карти рецентних и палео клизишта у општини Гроцка јасно се уочава широка распрострањеност присуства овог процеса на територији општине (*Карта 8*). Такође, може се видети да су највеће површине под клизиштима у приобалном делу Дунава, десна обална страна. То су општине: Винча, Ритопек, Гроцка и Брестовик.

Методологија

Методологија истраживања заснива се на интегрисаној примени ГИС алата и техника даљинске детекције ради свеобухватне процене подложности терена клизиштима на простору општине Гроцка. Као основни просторни слој коришћен је дигитални модел терена (DEM) резолуције 25 m, из којег су изведене морфометријске карте нагиба, експозиције и закривљености рељефа, од пресудног значаја за разумевање топографских услова који погодују иницирању клизишта. Геолошка грађа добијена је дигитализацијом основних геолошких карата, док је хидрографска мрежа издвојена путем дигитализације водотокова и просторне анализе бафер зона различитих удаљености, што омогућава процену утицаја ерозионих и акумулационих процеса. Подаци CORINE Land Cover (CLC 2018) коришћени су за идентификацију типова земљишног покривача и антропогених модификација простора, док су сателитски снимци и подаци даљинске детекције послужили за препознавање рецентних клизишта, проверу промена у вегетацији и процену стања земљишног покривача кроз време (Valjarević et al., 2014). Сви просторни параметри рекласификовани су и конвертовани у растерски формат, након чега је примењена Probability Method (PM) ради израчунавања тежинских коефицијената (W_{ij}) и добијања индекса подложности LSI (Landslide Susceptibility Index), који је класификован у четири категорије ризика. ГИС је омогућио прецизно преклапање, моделовање и

визуелизацију односа између геолошких, хидролошких и морфометријских фактора, чиме се добија јасна и свеобухватна слика зона повећане угрожености, што овај приступ чини поузданим, применљивим и веома корисним за просторно планирање, мониторинг и управљање ризицима од клизишта.

Специфичне методе

За прорачун предиспонираности терена за настанак процеса клижења тла коришћен је Probability method (PM) који се заснива на претпоставци да клизишта настају деловањем одређених фактора и да ће будућа клизишта настати под истим условима као постојећа. Могућност појаве клизишта у одређеној класи се рачуна по формули (Van Westen, 1997):

$$W_{ij} = (A_{ij}' \cdot (A - A')) / (A' \cdot (A_{ij} - A_{ij}')),$$

где је W_{ij} – вредност вредност класе i параметра j ; A_{ij}' – површина клизишта у одређеној класи i параметра j ; A_{ij} – површина одређене класе i параметра j ; A' – укупна површина клизишта на посматраној територији; A – укупна површина посматране територије.

Затим се врши интеграција различитих фактора и класа у јединствени индекс подложности процесу клижењу тла (Landslide Susceptibility Index – LSI), што се постиже на основу формуле (Voogd, 1983):

$$LSI = \sum_{i=1}^n W_{ij},$$

где је W_{ij} – вредност сваке класе. На крају се све добијене вредности индекса класификују у четири категорије могућности појаве клизишта (ниска, средња, висока и врло висока). За примену овог метода потребни су пре свега подаци о постојећим клизиштима на простору истраживане територије, који су у векторском формату преузети из базе података о клизиштима у Источној Србији (Dragičević et al, 2011).

Приликом прорачуна подложности терена за настанак клизишног процеса параметри који су коришћени су: геолошка грађа, морфометријске карактеристике терена (нагиб, експозиција и закривљеност), намена земљишта (CORINE Land Cover 2018), као и удаљеност од водотока. Карта геолошке грађе истраживаног простора добијена је дигитализацијом садржаја основних геолошких карата, листови: Смедерево и Панчево размера 1 : 100.000. Релјефне карактеристике добијене су из растерског дигиталног модела терена (DEM) резолуције 25 m. Нагиб терена представљен је рекласификацијом вредности нагиба у 6 класа. Експозиција релјефа класификована је на 4 главне и 4 помоћне стране света, док је закривљеност представљена у виду комбинације профилне и планарне закривљености у 9 класа. Речни токови дигитализовани су са топографских карата размера 1:50.000, затим су одређене бафер зоне удаљености од самих водотока и подељене у 6 класа, прва класа износи испод 100 m, затим следи од 100 до 200 m, 200 до 300 m од 300 до 400 m, од 400 до 500 m и преко 500 m. Након преклапања свих параметара са већ постојећим клизиштима приступа се додели тежинских коефицијената, за сваки параметар појединачно, прорачунат применом PM методе, као и растеризацији векторских лејера (геолошка грађа удаљеност од водотока и CORINE Land Cover 2018) и рекласификацији растерских лејера (нагиба експозиције и закривљености), како би се сумом свих класа рекласификованих параметара добио просторни распоред LSI на територији истраживања. Добијене вредности LSI индекса се затим рекласификују на 4 класе подложности терена клижењу тла: ниска, средња, висока и врло висока.

РЕЗУЛТАТИ

На основу прикупљених и обрађених података који су приказани (табела 5) примећује се да је класа високе подложности клизиштима заступљена на скоро половини територије општине Гроцка, тачније на 48,53% површине. Уколико би класи високе подложности клижењу додали класу врло високе подложности добијамо да је 69,3% територије угрожен овим процесом. Ниска подложност је заступљена на само 6,7% територије. Из приложене табеле (табела 4) може се уочити да се више него 2/3 простора који је предиспониран за развој овог процеса налази на терцијалним кластичним седиментима, односно чак 69,60%. Такође, на еолским седиментима налази се 15,58%. Ови подаци иду у прилог ранијој тврдњи о вези између геолошке подлоге и клизишног процеса. На нагибу од 5-10° налази се преко половине терена који је предиспониран за развој овог процеса, тачније 55,29% од укупне површине. Уколико упоредимо добијене податке за предиспонираност терена појави клизишта и тренутно коришћење простора (CORINE Land Cover класе), на воћњацима, комплексу пољопривредних површина и пољопривредним површинама са значајним уделом природне вегетације налази се 78,16%, од укупне предиспонираности (Табела 4). Највећи проценат клизишта налази се на удаљености даљој од 500m од водотока (Valjarević et al., 2025c).

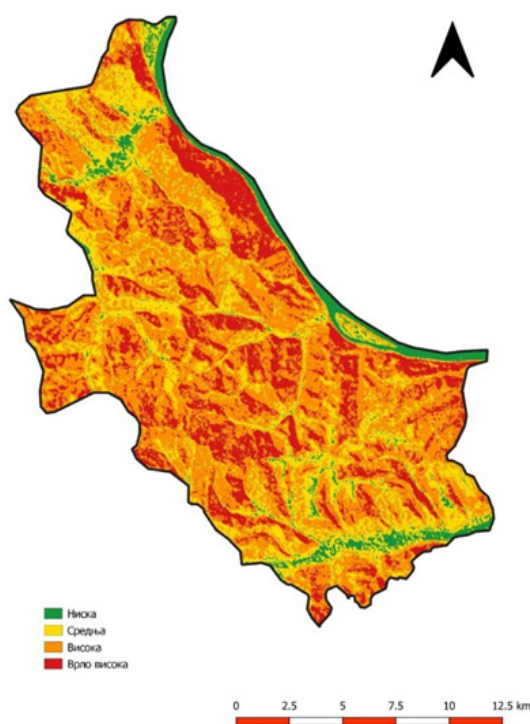
Табела 4. Удео класа параметара на територији општине Гроцка
Table 4. Share of parameter classes in the territory of the Municipality of Grocka

	Површина		Клизишта		W _{ij} PM
	km ²	%	km ²	%	
Клизишта	20,92	7,10			
Геолошка формација					
Алувијални седименти	51,03	17,33	1,06	5,07	0,2774
Седименти речне терасе	0,30	0,10	0,30	1,43	1,5436
Терцијарни кластични седименти	167,65	56,92	14,56	69,60	1,2439
Делувијум-пролувијум	27,63	9,38	1,74	8,32	0,8790
Ултрамафити	0,46	0,16	0,00	0,00	0,0000
Еолски седименти	47,47	16,12	3,26	15,58	0,9645
Нагиб [°]					
<2	37,99	12,88	0,52	2,49	0,1820
2-5	81,59	27,67	4,63	22,16	0,7891
5-10	138,44	46,94	11,55	55,29	1,1939
10-15	33,47	11,35	3,72	17,81	1,6402
15-20	3,09	1,05	0,39	1,87	1,8946
20-30	0,32	0,11	0,08	0,38	4,3723
Експозиција					
N	39,53	13,51	4,41	21,24	1,6440
NE	49,73	17,00	6,12	29,48	1,8373
E	41,76	14,27	3,79	18,26	1,3068
SE	32,46	11,10	1,32	6,36	0,5550

S	34,16	11,68	0,88	4,24	0,3462
SW	32,19	11,00	1,21	5,83	0,5114
W	28,13	9,62	0,91	4,38	0,4377
NW	30,83	10,54	2,12	10,21	0,9668
неекспонирано	3,77	1,29	0,00	0,00	0,0000
Класе закривљености					
1 - V/V	65,90	22,36	6,62	31,74	1,4658
2 - Ge/V	20,23	6,87	1,78	8,53	1,2663
3 - X/V	13,41	4,55	1,08	5,18	1,1497
4 - V/Gr	28,21	9,57	2,09	10,02	1,0502
5 - Ge/Gr	34,68	11,77	1,70	8,15	0,6766
6 - X/Gr	22,39	7,60	1,40	6,71	0,8755
7 - V/X	16,35	5,55	1,18	5,66	1,0210
8 - Ge/X	21,89	7,43	1,29	6,18	0,8219
9 - X/X	71,60	24,30	3,72	17,83	0,7193
Удаљеност од река [m]					
<100	38,33	13,01	2,69	12,86	0,9872
100-200	36,99	12,56	2,46	11,76	0,9318
200-300	35,60	12,09	2,47	11,81	0,9751
300-400	33,04	11,22	2,44	11,66	1,0429
400-500	29,48	10,01	2,21	10,56	1,0600
>500	121,10	41,11	8,65	41,35	1,0061
CLC 2018					
112	34,34	11,62	1,85	8,84	0,7473
121	1,59	0,54	0,02	0,10	0,1672
131	0,25	0,08	0,00	0,00	0,0000
132	0,52	0,18	0,03	0,14	0,8035
211	7,30	2,47	0,33	1,58	0,6213
221	5,12	1,73	0,58	2,77	1,6765
222	59,14	20,02	5,44	26,00	1,3294
231	2,44	0,83	0,02	0,10	0,1085
242	66,07	22,36	3,57	17,07	0,7496
243	84,69	28,66	7,34	35,09	1,2453
311	19,23	6,51	1,47	7,03	1,0862
313	0,08	0,03	0,00	0,00	0,0000
324	4,23	1,43	0,17	0,81	0,5495
331	0,28	0,09	0,00	0,00	0,0000
411	0,87	0,29	0,01	0,05	0,1526
511	9,31	3,15	0,09	0,43	0,1281

Табела 5: Подложност клизиштима
Table 5. Landslide susceptibility

Подложност клизиштима	Површина (km ²)	Удео (%)
врло висока	61,12	20,77
висока	142,80	48,53
средња	72,48	24,63
ниска	17,85	6,07
укупно	294,25	100,00



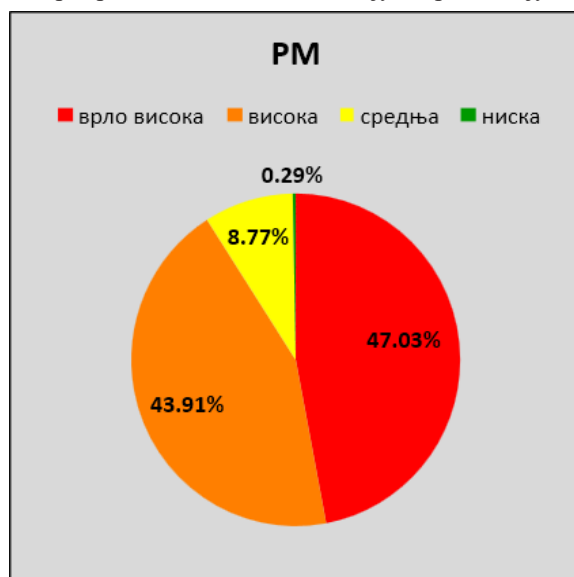
Карта 9. Класе подложности терена клижењу тла
Map 9. Classes of terrain susceptibility to landslides

На основу карте (Слика 9) и података добијених применом географских информационих система (GIS), може се закључити да су централни део општине и приобални појас уз Дунав најизложенији процесу клижења. Посебно су угрожена насеља која се налазе у овим зонама — Ритопек, Заклопача, Врчин, Бегаљица и Гроцка — где је ризик од појаве клизишта класификован као висок до врло висок.

Додатна анализа морфометријских карактеристика указује да се најинтензивнији процеси клижења јављају на теренима са већим нагибима, што је у складу са очекиваним геоморфолошким условима. Посебно се издваја североисточни део општине, ближе десној

обали Дунава, где су активна клизишта већ евидентирана у претходним истраживањима. Овај простор је и иначе познат по учесталости и интензитету клизишта, што додатно потврђује потребу за континуираним мониторингом и превентивним мерама.

Све је интензивнији утицај климатских промена и човекове активности на екосистеме (Ристић et al., 2025). Уочени просторни обрасци ризика од клизишта указују на потребу за интеграцијом ових резултата у локалне планове управљања ризицима и просторног развоја. Посебна пажња треба да буде усмерена на зоне са високим степеном нагиба и интензивном урбанизацијом, где је потенцијал за активирање нових клизишта значајно повећан. У том контексту, препоручује се спровођење детаљних геотехничких истраживања и дефинисање приоритетних зона за санацију и превенцију.



Слика 10. Удео класа подложности процесу клижења тла у клизиштима
Figure 10. Share of susceptibility classes in landslide processes

Резултати добијени у овом истраживању показују да је простор општине Гроцка изразито предиспониран за појаву клизишта, што је у складу са природним карактеристикама терена, анализом морфометријских параметара и стањем регистрованих рецентних клизишта (Слика 10). Просторна дистрибуција вредности LSI индекса јасно показује да се зоне највеће подложности налазе у централном делу општине и дуж десне обале Дунава, при чему најугроженијим подручјима припадају насеља Ритопек, Винча, Заклопача, Бегалица, Врчин и сама Гроцка. Ове зоне одговарају синергији високих нагиба, нестабилних терцијалних кластичних седимената и присуству рељефних јединица које фаворизују ерозију, акумулацију влаге и развијање клизних површина. Доминантна североисточна експозиција падина додатно утиче на влажност, осунчаност и сезонску динамику влажења тла, што даље појачава предиспозицију за иницирање клизишта.

Важан резултат представља чињеница да се више од 90% свих евидентираних клизишта налази у класама високе и врло високе подложности. Овај податак указује на високу корелацију између регистрованих клизишта и просторних параметара укључених у

модел, што потврђује да је примењена Probability Method (PM) поуздана и применљива на општинском нивоу. За просторе као што је Гроцка, где не постоји свеобухватан катастар клизишта и где се мониторинг опасних процеса ретко спроводи у реалном времену, овакви методолошки приступи представљају значајан инструмент за подршку одлучивању и просторном планирању.

ДИСКУСИЈА

Независно од механизма њиховог настанка, клизишта представљају један од најнепријатнијих догађаја који геолошка средина може да нам приреди. Падине захваћене клизањем мењају свој изглед, мења се режим вода у површинским деловима терена, а због стварања забарених површина мења се и карактер вегетацијског покривача. Такође је, услед обарања стабала, могуће уништавање шумских ресурса, а и пољопривредна земљишта трпе промене које утичу на њихову намену. Уколико дође до клизања на обалама мањих водотокова, покренуте масе могу да доспеју у речно корито и на тај начин да спрече даље отицање воде. На овај начин стварају се могућности за локалне појаве плављења (Jovanović, Carević, 2009)

Оно са чиме морамо да се суочимо је чињеница да смо за овакве експецесе често сами одговорни. До повећања тежине клизног тела на нестабилним падинама долази и због неопрезне изградње нових објеката. Уз нове зграде долази и до постављања нових водоводно-канализационих система, септичких јама или изградње локалних саобраћајница. Кишна канализација не одводи се посебним каналима, већ се најчешће проводи у терен око објеката, што повећава количину воде у тлу. Додавањем оптерећења од објеката и нових количина воде (уз спречавање њеног отицања низ падину) често се убрзо долази до граничне тежине коју кохезионе силе могу да апсорбују. Трасе саобраћајница се, услед непознавања проблема, постављају и изводе тако да често долази до подсецања ножичног дела потенцијалног клизишта, што ремети дотадашњу стабилност. Нажалост, због уштеда приликом израде планске и пројектне документације или нестручног формирања пројектних задатака за израду геолошко-геотехничке документације, овакви пропусти су релативно чести (Ivetić et al., 2005).

Подаци говоре да сваке године клизишта усмрте у просеку 5-7 људи у Норвешкој, 18 у Италији, 25-50 у САД, 186 у Непалу, 170 у Јапану и 150 у Кини (Sidle i Ochiai, 2006). У периоду од 1969. до 1993. године, клизишта су проузроковала просечно 1.550 смртних случајева годишње (Hyndman, Hyndman, 2006). Обилне кише из 1999. године проузроковале су 28 клизишта у Каракасу и Венецуели, која су обухватила материјал укупне запремине 58.500 m³. Преко 8000 кућа и 700 стамбених зграда је уништено или оштећено. Укупна штета износила је 1,8 милијарди америчких долара (Bryant E., 2005). Процењени губици услед клизишта, укључујући директне трошкове због штета, као и индиректне трошкове због дуготрајних ефеката по локалну привреду, у Јапану износе око 3 милијарде еура, у САД и Канади 52 милиона, а у Италији око 4 милиона еура, на годишњем нивоу (De Blasio, 2001).

Ови подаци јасно показују да клизишта представљају глобални ризик са озбиљним последицама по људске животе, инфраструктуру и економију. Иако су наведени примери из различитих делова света, они указују на то да ниједна средина није имуна на овај процес. Управо зато је значајно да се и на локалном нивоу, као што је општина Гроцка, спроведу детаљне анализе подложности. Резултати добијени применом ГИС метода показују да централни део општине и приобални појас уз Дунав имају изразиту предиспозицију за

настанак клизишта, што потврђује да се глобални трендови ризика одражавају и у локалним условима (Valjarević et al., 2025a).

Добијени просторни обрасци подложности клизиштима указују да је централни и североисточни део општине највише угрожен, што је последица истовременог деловања неповољне геолошке подлоге (терцијални седименти), повећаних нагиба и интензивних процеса подлокавања обале Дунава. Комбинација ових фактора фаворизује засићење земљишта водом током кишних периода, што смањује његову стабилност и повећава вероватноћу активирања клизишта. Ове закономерности су у складу са општеприхваћеним механизмима иницирања клизишта описаним у домаћој и међународној литератури (Sidle & Ochiai, 2006; Dragičević & Filipović, 2016).

Израчунато је у коликом проценту сваке класе подложности се јављају клизишта, у класама високе и врло високе подложности се налази чак 90,94% клизишта и то је приказано на слици 10. Статистичка Probability method-a (PM) се показала као јако добра је се постојећа клизишта углавном и налазе у оним класама подложности у којима је висока и врло висока предиспонираност за настанак процеса клижења тла. Применом ове методе јасно се види колико су геолошка грађа, нагиби терена и коришћење истог битни за настанак и развој овог процеса (Valjarević et al., 2025b).

Иако се Probability Method (PM) показао као добар, његова примена и израчунавање индекса LSI имају одређена ограничења која је важно нагласити. Пре свега, коришћени дигитални модел терена (DEM) резолуције 25 m не омогућава детаљну анализу мањих локалних појава, па се резултати могу сматрати поузданим углавном на општинском нивоу, али не и за микро-локације. Друго, методологија се заснива на статичким просторним факторима (морфометрија, геологија, намена земљишта), док динамички фактори као што су интензитет падавина, промене у хидролошком режиму или антропогене интервенције (грађевински радови, крчење шума) нису укључени. Ово значи да добијени резултати представљају процену предиспонираности, али не и стварну прогнозу појаве клизишта у конкретном временском периоду. Поред тога, примена PM методе подразумева одређени степен генерализације и статистичке претпоставке, што може довести до прецењивања или потцењивања ризика у појединим зонама.

Вредност овог истраживања додатно потврђују резултати студије Ćurić et al. (2022), у којој је примењена идентична методологија (PM метода) и исти сет просторних параметара — геолошка грађа, нагиб, експозиција, закривљеност рељефа, намена земљишта и удаљеност од водотока — за процену подложности клизиштима у сливу Сврљишког Тимока. Конзистентност резултата два независна истраживања, спроведених на различитим просторним целинама, указује на поузданост и применљивост овог приступа у анализи геохазарда у Србији. Ово додатно подржава валидност добијених резултата и оправдава избор методологије у овом раду. Резултати истраживања могу бити од значаја за локалну самоуправу и институције које се баве просторним планирањем. Најпре, зоне високе и врло високе подложности треба третирали као приоритетне у мониторингу и превентивним мерама. Препоручује се:

- забрана или ограничење градње на падинама са високим LSI вредностима, посебно у насељима уз Дунав и у зонама са терцијалним кластичним седиментима;
- пошумљавање и стабилизација падина у критичним зонама, како би се смањила ерозија и повећала стабилност тла;
- успостављање система мониторинга који би укључивао сензоре за померање тла и праћење падавина;
- информисање и едукација становништва о ризицима и мерама заштите, посебно у насељима која су најугроженија;

- интеграција rezultata у просторне планове и стратегије развоја општине, како би се ризичне зоне избегле у будућим инвестицијама.

На нивоу општине Гроцка, клизишта су дугорочан и добро документован проблем, посебно у зонама које захватају десну обалу Дунава. Подручја Ритопека, Брестовика и у појединим деловима Винче карактеришу честе активације клизишта, нарочито након периода интензивних падавина или подизања водостаја. Ова клизишта често угрожавају локалну инфраструктуру, стамбене објекте и пољопривредне површине, што додатно потврђује да се добијени обрасци подложности добро поклапају са реалним теренским стањем. Спој геолошке грађе, нагиба падина и хидролошких услова у овом делу општине даје високу вероватноћу будућих нестабилности, што указује на важност континуалног мониторинга и примене превентивних мера.

Овај рад може представљати основу за даља истраживања која би додатно унапредила процену клизишне опасности. Пре свега, интеграција климатских сценарија и анализа екстремних падавина омогућила би да се процени динамички аспект ризика, односно вероватноћа појаве клизишта у условима климатских промена. Друго, употреба прецизнијих дигиталних модела терена (DEM) високе резолуције, добијених LiDAR технологијом или дронским снимањем, омогућила би детекцију мањих локалних нестабилности које нису уочљиве на моделу резолуције 25 m. Треће, укључивање социо-економских фактора – густине насељености, вредности инфраструктуре и економске активности – допринело би свеобухватнијој процени ризика, јер би показало не само где постоји геолошка предиспозиција, већ и где су потенцијалне последице највеће. На тај начин, будућа истраживања могу да комбинују природне и друштвене параметре, чиме би се добила интегрална процена ризика и дефинисале приоритетне зоне за превентивне мере.

Поред предности, неопходно је указати и на ограничења. DEM резолуције 25 m представља релативно груб модел топографије, који није погодан за анализу микротеренских осетљивости, као што су уске јаруге, понори, мањи локални нестабилни потези или антропогено измењени терени. То значи да модел даје верну општеразмерну слику подложности, али не и прецизне информације за појединачне парцеле. Слично томе, РМ методологија се заснива на статичким факторима—геологији, нагибу, експозицији, удаљености од водотока и земљишном покривачу—док динамички процеси као што су интензивне падавине, промене подземних вода, сезонске флукуације влаге или утицај грађевинских активности нису били моделовани. Познато је да управо ови фактори могу играти кључну улогу у активирању клизишта, па се добијени резултати морају тумачити као процена предиспонираности, а не као временска прогноза појаве клизишта.

Додатно, антропогени утицаји имају све већи значај за покретање нестабилности терена. Урбанизација у Гроцкој напредује брже него систем просторне контроле, што доводи до изградње на падинама које немају одговарајућу стабилизацију, неретко без геотехничке анализе, што у комбинацији са климатским екстремима повећава ризик од урушавања терена. Такође, крчење вегетације, нелегално проширивање пољопривредних површина и интервенције на речним токовима (регулације, насипања, скретање водотока) доводе до измене природне равнотеже и значајно повећавају осетљивост терена на клижење.

Практичне импликације резултата су вишеструке. Зоне високог ризика морају бити приоритетне за интервенције, санацију и стални мониторинг. Посебан значај има приобални појас Дунава, где се утицај ерозије, подлокавања и флукуације водостаја повезује са геолошком подлогом и морфометријом терена, стварајући услове за велика клизишта која могу угрозити инфраструктуру, стамбене зоне и саобраћајнице. Из тог

разлога неопходно је спровести и детаљније геотехничке анализе на најугроженијим локацијама, као и дефинисати зоне забрањене или ограничене градње.

Ово истраживање такође отвара простор за унапређење будућих студија. Примена DEM модела високе резолуције (нпр. LiDAR), анализе великих падавинских епизода, интеграција климатских сценарија и развој динамичких модела који могу симулирати кретање маса, значајно би допринели прецизнијој процени ризика. Исто тако, укључивање социо-економских индикатора густине становништва, вредности објеката и квалитета инфраструктуре омогућило би израду свеобухватног модела ризика, који не би указивао само на вероватноћу појаве клизишта, већ и на њихов потенцијални утицај. Сагледано у целини, добијени резултати представљају драгоцену основу за даље праћење, управљање и планирање простора у општини Гроцка, а истовремено потврђују да интеграција ГИС-а и статистичких метода представља поуздан и ефикасан оквир за анализу геохазарда у урбаним и приградским срединама.

ЗАКЉУЧАК

Ово истраживање показало је да општина Гроцка има изразиту подложност појави клизишта, што је последица специфичне комбинације геолошких, морфометријских и хидролошких карактеристика терена. Више од две трећине посматране територије налази се у зонама високе и врло високе предиспонираности, што указује на значајан геохазардан потенцијал који захтева систематичан приступ у управљању ризицима. Резултати су потврдили да кључне улоге у настанку клизишта имају терцијални кластични седименти, нагиби падина изнад 5° , као и близина речних токова и ерозивних процеса.

ГИС је показао изузетну ефикасност у интеграцији просторних података и идентификацији најугроженијих зона, што омогућава локалној самоуправи да предузме правовремене превентивне мере, планира инфраструктурне интервенције и избегне градњу на ризичним подручјима. С обзиром на интензивну урбанизацију која последњих година карактерише општину Гроцка, ови резултати представљају неопходан инструмент за одрживи развој и дугорочно управљање простором.

Иако РМ метода има одређена ограничења, пре свега у погледу резолуције просторних података и изостанка динамичких фактора, она даје поуздану основу за иницијалну процену ризика. Будућа истраживања треба усмерити на прецизније изворе података, интеграцију климатских сценарија и примену динамичких модела стабилности тла.

Уз систематичан мониторинг, формирање катастра клизишта и примену савремених ГИС метода, општина Гроцка може значајно смањити ризике и обезбедити сигурнији и стабилнији простор за своје становништво и будући развој.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bryant E. (2005): *Natural hazards*. Cambridge University Press. Melbourne, Australia.
2. Valjarević, A. (2024). Long-term remote sensing-based methods for monitoring air pollution and cloud cover in the Balkan countries. *Environ Sci Pollut Res* 31, 27155–27171. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32982-y>.
3. Valjarević, A., Djekić, T., Stevanović, V., Ivanović, R., & Jandžiković, B. (2018). GIS numerical and remote sensing analyses of forest changes in the Toplica region for the period of 1953–2013. *Applied geography*, 92, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.016>.
4. Valjarević, A., Živković, D., Valjarević, D., Stevanović, V., & Golijanin, J. (2014). GIS analysis of land cover changes on the territory of the Prokuplje municipality. *The scientific world journal*, 2014(1), 805072. <https://doi.org/10.1155/2014/805072>
5. Valjarević, A., Šiljeg, A., Šiljeg, S., Vujović, F., & Sahay, A. (2025a). GIS-based water stress analysis in North African drylands. *Journal of Arid Environments*, 230, 105427. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105427>.
6. Valjarević, A. (2025b). GIS and remote sensing methods in predicting the dissipation time of rural settlements under the influence of climate change in the Republic of Serbia. *Journal of Urban Management*, 14(2), 500-511. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.12.002>.
7. Valjarević, A., Morar, C., Brasanac-Bosanac, L., Cirkovic-Mitrovic, T., Djekic, T., Mihajlović, M., ... & Kaplan, G. (2025c). Sustainable land use in Moldova: GIS & remote sensing of forests and crops. *Land Use Policy*, 152, 107515. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107515>.
8. Влаховић М. (2008): *Геологија у грађевинарству, четврто издање*. Академска мисао, Београд.
9. Van Westen C. (1997): *Statistical Landslide Hazard Analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide*. ITC Publication, Enschede: 73-84;
10. Voogd H. (1983). *Multi-criteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London;
11. De Blasio F. V. (2001): *Introduction to the Physics of Landslides*. Springer, Heidelberg.
12. Dragičević S., Novković I., Carević I., Živković N., Tošić R. (2011): Geohazard Assessment in the Eastern Serbia, *Forum Geografic*, 10 (1): 10-19.
13. Драгићевић С., Филиповић Д. (2016): *Природни услови и непогоде у планирању и заштити простора, друго допуњено издање*. Географски факултет, Универзитет у Београду;
14. Ćurić, V., Durlević, U., Ristić, N., & Novković, I. (2022). GIS application in analysis of threat of forest fires and landslides in the Svrliški Timok Basin (Serbia). *Glasnik srpskog geografskog društva*, 102(1), 107–130. <https://doi.org/10.2298/GSGD2201107C>
15. Ivetić, M., Petović, V., Ilić, M., Naučno-stručni skup: „Planska i normativna zaštita prostora i životne sredine“ (2005) 431-436.
16. Jovanović, V., Carević, I. (2009). *Klizišta – nastanak i zaštita [Landslides – origin and protection]*. XVII Naučno-stručni skup „Ekološka istina 09“. Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu. Retrieved from. https://gery.gef.bg.ac.rs/bitstream/id/3542/bitstream_3542.pdf
17. Кукрика М. (2000): *Географски информациони системи*. Београд: Географски факултет, Универзитет у Београду;
18. Лазаревић Р. (2000): *Клизишта*, Друштво бујичара Југославије, Београд;

19. Новковић И. (2016): *Природни услови као детерминенте геохазарда на примеру сливова Љига, Јошаничке и Врањскобањске реке*, Докторска дисертација, Универзитет у Београду - Географски факултет, Београд;
20. Павловић М. (2019): *Географија Србије*. Београд: Географски факултет, Универзитет у Београду;
21. Петровић Д., Манојловић П. (2003): *Геоморфологија*. Универзитет у Београду – Географски факултет, Београд;
22. Просторни план за део градске општине Гроцка, Београд: Службени лист Града Београда бр 54/12.
23. Ристић Н., Ратковић А., Ратковић Ј., (2025). Процена деградације вегетације у СРП Брзанско Моравиште применом сателитских вегетационих индекса (2017-2024). Гласник Српског географског друштва, ISSN:0350-3593, број 105.
24. Sidle C., Ochiai H., (2006): *LANDSLIDES Processes, Prediction, and Land Use*. American Geophysical Union Washington, DC
25. Hyndman D., Hyndman D. (2006): *Natural hazards and disasters*. Thompson Brooks/Cole, USA.

СПЕЦИФИЧНОСТИ И ИЗАЗОВИ У ИЗУЧАВАЊУ УРБАНИХ БУЈИЦА SPECIFICITIES AND CHALLENGES IN THE STUDY OF URBAN FLASH FLOODS

Ненад Шурјанац¹, Ненад Јаник², Соња Брауновић¹, Наталија Момировић¹,
Јована Цветковић¹

¹Институт за шумарство, Београд

²ЈП Београд Воде, Београд

Извод: Урбане бујице представљају један од најсложенијих облика поплавног ризика у савременим градовима, јер настају као последица интеракције интензивних падавина, непропусних површина и ограничених капацитета одводних система. Ефикасно управљање овим ризиком захтева интеграцију високорезолутивних просторних података, ажурних информација о канализационо-дренажној мрежи и примени спрегнутих 1D–2D хидрауличких модела који реалистично представљају површинско и подземно струјање воде. Показано је да детаљна топографија, укључујући микро-рељеф улица, ивичњака, прагова и уличних депресија, значајно утиче на путање отицаја и формирање локалних зона задржавања воде. Истовремено, тачност модела у великој мери зависи од квалитета и геореференцираности података о одводном систему, посебно о положају и капацитету сливника и шахтова, који одређују размену протока између површине и цеговода.

У савременом приступу, LiDAR подаци, UAV-фотограмметрија и даљинска детекција омогућавају брзо и поуздано генерисање DEM/DSM модела и LULC класификација, што је посебно важно у динамичним урбаним срединама. Фузија ових података са хидрауличким моделима омогућава прецизније симулације сценарија екстремних падавина, рано упозоравање и доношење информисаних одлука. Закључно, успешна анализа и управљање урбаним бујицама захтевају усаглашене просторне и инфраструктурне податке високе резолуције, стално ажурирање модела и примену интегрисаних 1D–2D приступа који обезбеђују реалистичан приказ хидродинамичког понашања у градском окружењу.

Кључне речи: урбане бујице, беспилотни системи, подаци високе резолуције, LiDAR, Object Based Image Analyses, даљинска детекција.

Abstract: Urban flash floods represent one of the most complex forms of flood risk in modern cities, arising from the interaction of intense rainfall, impervious surfaces, and the limited capacity of drainage infrastructure. Effective management of this risk requires the integration of high-resolution spatial data, up-to-date information on drainage networks, and the application of coupled 1D–2D hydraulic models capable of realistically representing both surface and subsurface water flows. Detailed topography—including micro-relief features such as street curbs, thresholds, and depressions—significantly influences flow paths and the formation of localized water accumulation zones. At the same time, model accuracy greatly depends on the quality and georeferencing of drainage system data, particularly the position and capacity of inlets and manholes, which govern the exchange of flow between the surface and pipe networks. In modern practice, LiDAR data, UAV photogrammetry, and remote sensing enable rapid

and reliable generation of DEM/DSM surfaces and LULC classifications, which is especially important in dynamic urban environments. The fusion of these datasets with hydraulic models allows for more accurate simulations of extreme rainfall scenarios, early warning, and informed decision-making. In conclusion, successful analysis and management of urban flash floods require harmonized, high-resolution spatial and infrastructural datasets, continuous model updates, and the use of integrated 1D–2D approaches that provide a realistic representation of hydrodynamic behavior in urban settings.

Keywords: urban flash floods, unmanned aerials systems, LiDAR, Object Based Image Analyses, remote sensing

1. УВОД

Урбане бујице (urban flash floods) представљају краткотрајне, али врло интензивне поплавне догађаје изазване високо-интензивним, често краткотрајним падавинама које се јављају над претежно изграђеним и непропусним површинама, при чему се вода задржава и/или тече по површини јер је капацитет инфилтрације и одводње ограничен (Guo, Guan, & Yu, 2021, Rosenzweig et al, 2021, Skougaard Kaspersen et al., 2017). За разлику од поплава које се јављају у природним сливовима, урбане бујице имају знатно краће време реакције слива. Време реакције слива (енг. Catchement response time, runoff response time), често повезано са „time of concentration“– T_c) представља интервал између почетка интензивних падавина и тренутка када вода са најудаљенијих тачака слива достигне излазну тачку (посматрани профил, улични канал, сливник или део реке). У урбаним срединама време реакције је обично изразито кратко, и креће се од неколико минута до неколико десетина минута, због великог удела непропусних површина и високе брзине површинског отицања, односно просторних карактеристика урбаних сливова и елемената урбане инфраструктуре. (Berne et al., 2005; Ogden et al., 2000).

У хидрологији бујичних поплава време реакције слива је кључни индикатор колико брзо слив одговара на падавински инпут, и директно одређује:

- време до појаве вршног протока,
- интензитет и динамику бујичног таласа,
- простор и време потребне интервенције,
- степен раног упозорења и припремљености.

Бројни аутори наводе да је за урбане бујичне поплаве карактеристично екстремно кратко време реакције, често краће од 15 минута, јер непропусне површине елиминису инфилтрацију, а микро-топографија улица убрзава конвергенцију отицаја (Smith et al., 2007; Ochoa-Rodriguez et al., 2015).

Berne et al. (2005) показују да код јаких конвективних олуја, време реакције може бити краће од доминантног трајања кишних ћелија, што доводи до врло наглог раста протока и отежане прогнозе. У урбаним сливовима, чак и мали пораст непропусних површина (нпр. 10–20%) може смањити време реакције за 30–50%, што драстично повећава ризик од бујичних поплава (Miller & Hutchins, 2017).

Ogden et al. (2000) наглашавају да време реакције у бујичним системима није само хидраулички параметар већ и динамичка функција кише, LULC-а, нагиба, инфилтрационог капацитета, канализационе мреже и микро-рељефа. У урбаним подручјима, интеракција између 2D површинског отицања и 1D канализационог система може додатно убрзати или успорити реакцију зависно од тога да ли се систем пуни или прелива (Leandro et al., 2009). Другим речима, краће време реакције → бржа

бујица → мањи простор за интервенцију и упозорење, што је кључни разлог због ког се урбане бујице сматрају најопаснијим обликом краткотрајних поплавних догађаја.

Познавање времена реакције слива након кишних епизода представља срж примењене хидрологије, при чему су време кашњења и време концентрације две повезане мере за одређивање колико брзо водотоци реагују на падавине које формирају површински отицај у сливу (Allnutt et al., 2020, McEnroe et al., 2016.).

Поред овога, урбане бујице се одликују и изразито просторно неуједначеним интензитетом и веома су осетљиве на локалну микро-топографију, тип земљишног покривача и стање канализационо-дренажне мреже (Leitão et al., 2010). Због тога се у литератури истиче потреба за улазним подацима високе резолуције, како о земљишном покривачу, тако и о дигиталном моделу терена (Digital terrain Model -DTM) и дигиталном моделу површина (Digital Surface Model - DSM) јер генерализовани подаци доводе до потцењивања дубина, брзина и праваца течења (Fewtrell et al., 2011).

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Циљ рада је да прикаже: специфичности урбаних бујица у односу на поплаве у природним сливовима; да покаже зашто је детаљан LULC (land use/land cover – земљишни покривач и начин коришћења земљишта) пресудан за прорачун површинског отицаја у граду; да анализира захтеве у погледу резолуције и тачности DTM/DSM у урбаном окружењу; да прикаже како инфилтрација, формирање површинског отицаја и транспорт наноса утичу на ток бујица; и да објасни међудејство са канализационом мрежом и разлоге због којих је неопходно 1D–2D спрежање модела (Carr & Smith, 2006; Chen, Djordjević, Leandro, & Savić, 2007; Simões et al., 2011).

Овај рад представља студију чији циљ је да систематизује савремене изазове и приступе моделирању урбаних бујица са посебним нагласком на важност просторне резолуције улазних података (LULC, DTM/DSM) и интеграције површинског и подземног одводног система. Методологија је заснована на принципима систематских прегледних истраживања како их описују Tranfield, Denyer и Smart (2003) и Petticrew и Roberts (2006), уз прилагођавање специфичностима хидролошким анализама и моделирањима.

2.1. Извори података и библиографске базе

Претрага литературе спроведена је у следећим научним базама података:

- Web of Science Core Collection,
- Scopus,
- ScienceDirect (Elsevier),
- Taylor & Francis Online,
- SpringerLink,
- Google Scholar (допунски, за идентификацију цитата и најновијих радова).

Осим тога, додатно је извршено усаглашавање са доступним релевантним стандардима, смерницама и техничким документима у области урбаног управљања водама.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

3.1. Специфичности урбаних бујица

У урбаним срединама однос између количине падавина и отицаја фундаментално је измењен у односу на природне (руралне) или мање изграђене сливове, пре свега због

високог учешћа непропусних површина (асфалт, бетон, кровови, паркинг простори) које имају занемарљив капацитет инфилтрације и одмах генеришу површински отицај (Berndtsson, 2010; Salvatore, Bronders, & Batelaan, 2015).

Истраживања у Европи и Азији показују да повећање непропусних површина са приближно 30% на 50–60% резултује нелинеарним повећањем максималног протицаја током интензивних падавина (Skougaard Kaspersen et al., 2017; Yin et al., 2016; Yang et al., 2017). У таквим окружењима време концентрације је веома кратко, па се у њима чак и релативно кратке и локализоване олује директно пресликавају у површинско отицање (Ochoa-Rodriguez et al., 2015). Урбане бујице настају и развијају се унутар самог градског подручја, најчешће у року од неколико минута до сати након почетка падавине (Ochoa-Rodriguez et al., 2015).



Слика 1. и 2. Урбана бујица Београд, Ваљевска улица (извор: YouTube)
Figure 1. and 2. Urban Flash Flood in Belgrade, Valjevska Street (source: YouTube)

До поплава изазваних кишним епизодама најчешће долази као последица локалних олуја, које се услед ограниченог сливног подручја појављују нагло и веома брзо се интензивирају. Резултат овога је непропорционално угрожавање живота и инфраструктуре у односу на количину падавина услед специфичности окружења односно урбане средине (Falconer et al., 2009). Сlike 1. и 2. приказују урбану бујицу у Београду, у градској општини Чукарица.

Урбанизација мења природни земљишни покривач непропусним материјалима попут асфалта и бетона, који се поред непропусности одликују и формирањем урбаних топлотних острва. Ова појава доводи до повећања температуре у односу на окружење која уз повећану рапавост структура у урбаним срединама мења правце ветрова унутар и околу урбаних средина. Последица овога су појачано формирање олуја и дуже задржавање облака изнад великих градова које у комбинацији са непропусним површинама резултују у појачавању директног отицаја, повећању врха и волумена поплавног таласа уз смањење времена кашњења (Liu & Niyogi, 2019).

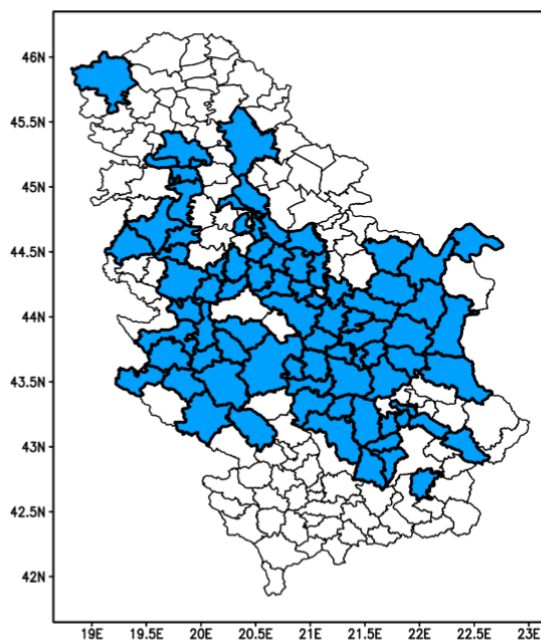
Процес урбанизације значајно мења локалне климатске услове у градовима и њихову интеракцију са атмосферским процесима. Изградња великих површина под бетоном, асфалтом и другим материјалима који имају ниску рефлектанцу и високу акумулацију топлоте ствара тзв. урбана топлотна острва (Урбан Хеат Исланд – УХИ), при чему температура ваздуха у градским зонама често износи око 1–5 °Ц више него у околним руралним подручјима (Oke, 1982). Тај температурни градијент мења

локалну циркулацију ваздуха, влажност и микроклиматске процесе, што може довести до појачаног конвективног развоја облака и учесталијих краткотрајних, али врло интензивних пљускова (Bornstein & Lin, 2000; Shepherd, 2005).

Бројне емпиријске студије показале су да урбана подручја могу утицати на редистрибуцију падавина. На пример, студија за више великих градова показује да падавине над или низ-ветар урбаних зона могу бити приближно 5% или више веће него у околним руралним подручјима (Shepherd et al., 2002). Шири преглед студија показује да повећања од ~10-20 % нису неуобичајена (Liu et al., 2019).

Механизам утицаја на падавине укључује комбинацију термалног уздицања ваздуха узрокованог УНІ ефектом, повећану концентрацију аеросола и честица прашине које делују као тачке кондензације, као и промене у брзини и правцу ветрова које настају због зграда и урбаног рељефа (Rosenfeld et al., 2008; Han et al., 2014).

Повећање интензитета и учесталости пљускова додатно је појачано глобалним климатским променама, које мењају расподелу енергије у тропосфери. Модели пројекција показују да градови постају жаришта екстремних падавина јер се локални микроклиматски ефекти (УНІ, аеросоли, турбуленција) преклапају са глобалним порастом водене паре у атмосфери (Trenberth et al., 2015; Allan & Soden, 2008). Због тога се у последњој деценији све више користи термин „урбани пљускови високе учесталости“ (High-Frequency Urban Rainstorms – HFURs) као нова категорија метеоролошких појава (Yang et al., 2019, Yang et al., 2014, Westra et al., 2014, Zhang et al., 2014).

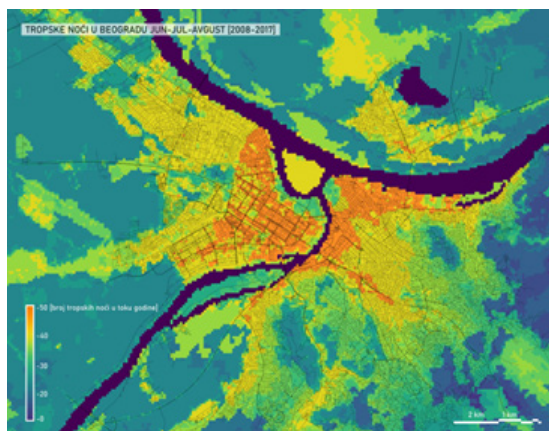


Слика 3. Општине у Републици Србији које су погођене поплавама, бујицама и плављењем улица од 17. маја до 17. јуна 2023. године (<https://klima101.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/>)

Figure 3. Municipalities in the Republic of Serbia Affected by Floods, Flash Floods, and Urban Street Inundation from May 17 to June 17, 2023 (<https://klima101.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/>)

У хидролошком смислу, ова појачана учесталост краткотрајних, али интензивних падавина директно повећава ризик од урбаних бујица. Будући да већина канализационих система у старим градовима није пројектована за такве екстреме, вода се брзо акумулира на површини и ствара локалне поплаве. Овај проблем додатно погоршавају смањена инфилтрација и топлотно зрачење површина које убрзава исушивање тла између падавина, повећавајући иницијалну непропусност (Fletcher et al., 2013; Alves et al., 2018). Слика 3. приказује општине погођене поплавама у периоду од месец дана у Републици Србији.

У урбаним срединама капацитет за складиштење воде је смањен до занемарљивих количина (од 1–2 mm) на крововима, путевима и трговима, што доприноси генерално недовољним капацитетима за складиштење атмосферских вода у систему канализације (Todini, 2025). Уопштено, урбанизација не утиче само на хидрологију, већ активно мења локалне климатске процесе који генеришу падавине. Тиме се затвара повратна спрега између климатологије града, површинске модификације тла и интензитета атмосферских догађаја, чинећи урбане средине све подложнијим екстремним хидроклиматским појавама. Слика 4. приказује просторни распоред броја тропских ноћи у урбаој средини на примеру Београда.

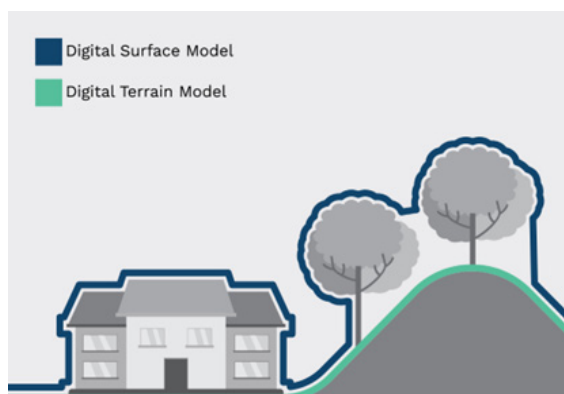


Слика 4. Мапа тропских ноћи Београда. (Извор: Filipović & Djurdjević, 2023)

Figure 4. Map of tropical nights in Belgrade. (Source: Filipović & Djurdjević, 2023)

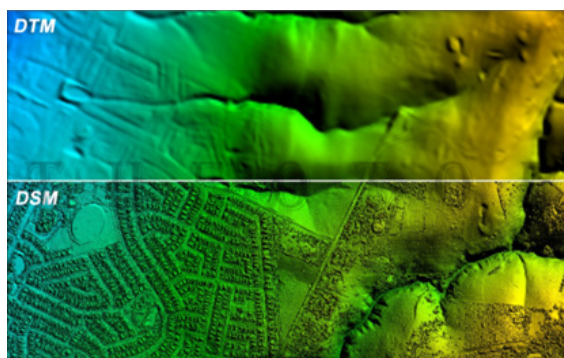
3.2. Земљишни покривач и начин коришћења земљишта (LULC), Дигитални модел терена (DTM) и Дигитални модел површине (DSM)

Дигитални модел терена (Digital Terrain Model) - DTM приказује „голи“ терен, односно површину без објеката и вегетације, док дигитални модел површина (Digital Surface Model) односно DSM приказује терен заједно са свим надземним структурама, као што су зграде, дрвеће, ограде, мостови и урбани елементи микротопографије, што је приказано на сликама 5. и 6. У контексту урбаних бујица DSM је често једнако важан, а у многим случајевима и хидраулички доминантнији у односу на DTM, јер управо објекти и микро-рељеф улица усмеравају и задржавају ток површинске воде (Fewtrell et al., 2011; Schubert & Sanders, 2012). Ако се користи само DTM, без приказа зграда и ивица коловоза, 2D модел „види“ урбану површину као више или мање равну топографију, и вода се шири нереално дифузно, уместо да се води улицама, каналима и удубљењима (Chen et al., 2010; Jamali, Löwe, Bach & Arnbjerg-Nielsen, 2018).



Слика 5. Дигитални модел површине (DSM) и Дигитални модел терена (DTM)
(Извор: www.Geoimage.com.au)

Figure 5. Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Model (DTM)
(source: www.Geoimage.com.au)



Слика 6. Растерски приказ Дигитални модел терена (DTM)
Дигитални модел површине (DSM) (извор: www.theotop.ro)

Figure 6. Raster Representation of the Digital Terrain Model (DTM)
and the Digital Surface Model (DSM)
(source: www.theotop.ro)

У односу на бујичне поплаве у природним сликовима, урбане бујице су под већим утицајем топографије малих размера и инфраструктуре (улице, ивичњаци, прагови, подвожњаци, решетке сливника), што значи да је моделирање могуће само ако је та топографија експлицитно присутна у DTM/DSM (Fewtrell et al., 2011; Schubert & Sanders, 2012). У случају примене грубог Digitalnog модела висина – DEM (нпр. 10–30 m), улице и одводни канали „нестају“, вода се шири по погрешним правцима и модел приказује лажне плављене површине (Jamali, Löwe, Bach, & Arnbjerg-Nielsen, 2018). Емпиријске студије у урбаним срединама показале су да без прецизног приказивања објеката као што су локалне депресије, ивичњаци, прагови и уски улично кањонски пролази може значајно нарушити тачност симулација дубина воде и путања течења. На пример, у неким студијама и моделима грешке предвиђене максималне дубине и

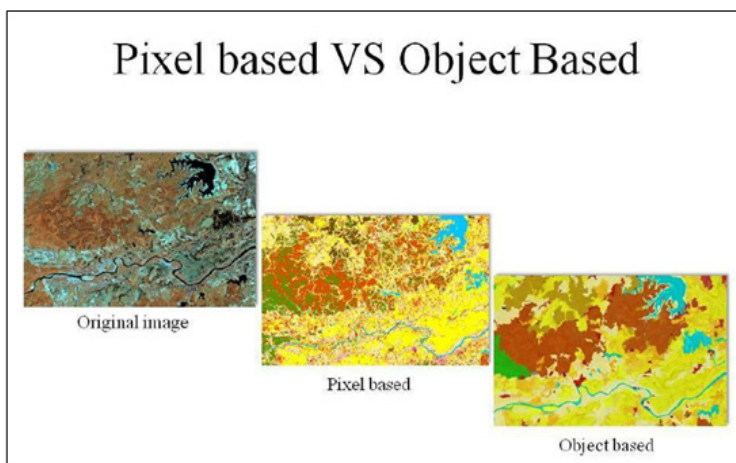
размака поплавних зона су уочене као знатне (нпр. разлике између мрежа високе и ниске резолуције (Neal et al. 2013, Ozdemir et al., 2013, Shen et al., 2018).

Реалистично представљање зграда, ивичњака и других локалних препрека у 2D моделима урбаног плавлeња пресудно утиче на предвиђене путање и дубине: занемаривање ових елемената систематски искривљује токове и дубине, док „building-blockage“ и специјализовани „building treatments“ значајно побољшавају предиктивну тачност. Поред тога, осетљивост на просторну резолуцију мреже је велика - финије резолуције боље детектују и дефинишу микрорељеф и каналисање токова. (Chen et al., 2012; Schubert & Sanders, 2012; Yu & Lane, 2006a, 2006b).

Schubert & Sanders (2012) додатно су утврдили да тачност предвиђања урбаног плавлeња зависи не само од хоризонталне резолуције растера, већ да је критично и присуство реалистичних препрека и канала у DSM-у, при чему се, без њих, губи могућност репродуковања стварних путања и задржавања бујичне воде у микро-депресијама.

Дакле, DTM је нужен за пад терена, али DSM је пресудан за путању и концентрацију тока. У пракси, модели урбаних бујица најбоље резултате дају када се користи фино обрађен и дефинисан LiDAR DSM (≤ 1 m) или UAV-фотограметријски DSM, који садрже праве геометрије зграда, вегетације и саобраћајне инфраструктуре (Gallien, Schubert & Sanders, 2011; Neal et al., 2011).

Прелазак са растера резолуције 5–10 m на 1–2 m значајно побољшава могућност модела да ухвати микротопографију улица, уске канале, депресије и ивице саобраћајница, што директно утиче на формирање проточних путева и зона задржавања воде у урбаним срединама (Neal et al., 2011). У студијама тестирања урбаних 2D модела над LiDAR подацима високе резолуције, показано је да модели са резолуцијом 1–2 m боље одражавају локалне варијације дубина, ширину проточних фронтва и положај „депресија“ уз зграде и ивичњаке, док резолуције 5–10 m „губе“ ове детаље, што доводи до вештачког ширења плавних површина (Fewtrell et al., 2011; Jamali et al., 2018).



Слика 7. Object Based Image Analyses (Извор: Pandiwijaya et al, 2013)

Figure 7. Object Based Image Analyses (Source: Pandiwijaya et al, 2013)

За практичну примену при моделирању бујица у урбаним подручјима треба имати податке о земљишном покривачу и начину коришћења земљишта који разликују типове

површина као што су: кровови, асфалтне коловозе, тротоаре, парковне површине, неизграђена земљишта, зелене кровне површине и површинске воде. Односно, потребна је финија класификација типова земљишног покривача. Без таквог раздвајања модел ће системски потценити или преценити отицај (Walsh et al., 2012; Miller & Hutchins, 2017). У урбаним срединама хидраулично понашање пљуска одређују веома ситне просторне карактеристике: ширине коловоза и тротоара, висине ивичњака, улази у сливнике, преливи, као и фино „спајање“ мозаика површина (кровови, асфалт, поплочања, травњаци). Ако LULC слој нема довољно фину резолуцију да разликује ове објекте и њихове рубове, хидродинамички модели погрешно распоређују коефицијенте отицаја/инфилтрације и добијају нетачне путање и дубине течења. Прегледна студија о урбаном плављењу експлицитно истиче да квалитет и резолуција улазних података о површини (укључујући LULC) пресудно утичу на перформансе 2D модела у градовима (Gou et al., 2021).

Груба просторна резолуција (нпр. 10–30 m) и генерална LULC класификација у урбаним подручјима спајају више различитих категорија земљишног покривача у један пиксел, што узрокује систематске грешке у моделима отицања, посебно због губитка информација о малим објектима као што су уски травнати појасеви, ивичњаци и асфалтне површине. Истраживања показују да употреба података високе резолуције (1–2 m и мање) може значајно изменити расподелу симулираних дубина и локације задржавања воде у урбаним срединама, али само уз довољно детаљну и тачну LULC класификацију (Su et al., 2022; Andualet et al., 2023; Ozdemir et al., 2013).

За поуздано разликовање „хидраулички релевантних“ класа (кровови по материјалу, асфалт vs. поплочање, ниски/високи травњаци, земљиште у радовима, вегетација) најбоље резултате дају снимци врло високе резолуције (VHR – very high resolution) и/или LiDAR скенови у комбинацији са OBIA (Object-Based Image Analysis). Више радова потврђује да OBIA над VHR снимцима уз помоћ LiDAR-а повећава укупну тачност урбаних LULC мапа и омогућава увођење финеса (нпр. класификацију објеката по висини/nDEM), што је пресудно за хидрауличке прорачуне (Williams et al., 2018; Li & Shao, 2014; Zou et al., 2016). Примена OBIA приступа смањује могућност грешке при класификацији појединачних пиксела и шум који долази од обраде појединачних пиксела при снимцима високе резолуције (Šurjanac et al., 2022). Слика 7. приказује резултате класификације на основу објеката и пиксела.

Као што је поменуто многа истраживања истичу утицај резолуције и дигиталног елевационог модела (DEM) на хидролошка моделирања (Vaze et al., 2010; Li and Wong, 2010; Saksena and Marwade, 2015). Неки аутори наводе да дигитални елевациони модел (DEM) високе резолуције има значајнији утицај на процену штете од поплава него на процену ризика од поплава, услед бољег представљања инфраструктуре. На пример, Jang et al. (2021) су утврдили да повећање резолуције DEM знатно повећава прецизност мапа ризика од поплава и смањује грешку у анализама ризика по становништво за приближно 53% (Su et al., 2022), Jang et al., 2021).

У урбаним студијама је показано да повећање просторне резолуције DSM/DTM (нпр. са 10 m ка 2 m и финије) може значајно утицати на резултате 2D моделовања поплава — промену расподеле симулисаних дубина, подручја инундације и детекцију локалних депресија/уличних „цепова“; ефекат је посебно изражен у зонама малих нагиба и у „street-canyon“ морфологији. Ово је документовано у више радова који експлицитно проучавају резолуцију DEM-а, за разлику од Ochoa-Rodriguez et al. (2015) који се бави резолуцијом падавина.

У студији Muthusamy et al., (2021) показано је да употреба квалитетнијег DEM-а смањује грешку у просечној дубини поплаве са ~90 % на ~4 % и RMSE са 2.6 м на 0.9 м. Још једна студија (Jiang et al., 2022) потврђује да побољшање резолуције DEM-а значајно утиче на расподелу дубина и грешке симулација поплава.

Утицај просторне резолуције DEM-а на симулације урбаних поплава добро је документован у више студија. Истраживања показују да груби DEM (10–30 m) може довести до великих грешака у симулираним дубинама и ширини поплављене зоне јер не репродукује урбане микротопографске структуре као што су ивичњаци, рампе, локалне депресије и канали. Насупрот томе, DEM високе резолуције (1–2 m или финији) значајно унапређује репрезентацију површинских токова, укључујући токове дуж ивица коловоза и зграда. Уз то, висока резолуција омогућава тачније позиционирање улазних тачака канализације (сливници, шахтови), што побољшава 1D/2D спрезу и смањује хидрауличку грешку (Leandro et al., 2009; Chen et al., 2010; Jiang et al., 2022; Muthusamy et al., 2021).

Студије у урбаним подручјима у Европи показују да детаљнија просторна резолуција дигиталних модела терена (или података топографије) доприноси прецизнијем моделовању урбаних поплава. На пример, Jamali et al. (2018) развијају брзи модел урбане инундације и указују на значај резолуције података, а Skougaard Kaspersen et al. (2017) указују на улогу урбане морфологије у излагању плувијалним поплавама. Ово су подаци који указују да већа резолуција (нпр. испод ~5 m) може бити критична за уочавање морфолошких детаља и побољшање резултата модела.

Висока резолуција DEM-а је од нарочитог значаја за израду топографских индекса. Топографски индекс представља хидролошко квантификовање које описује природну тенденцију земљишта на одређеним тачкама пејзажа за засићење водом као резултат топографске позиције (Marthens et al., 2015). Најчешће коришћени топографски индекси су TPI – Topographic Position Index, и TWI – Topographic Water Index.

Метод Topographic Position Index (TPI) класификује положај сваког пиксела у односу на околину на основу висине. Индекс Topographic Wetness Index (TWI) процењује потенцијал акумулације воде на основу дефинисаног површинског подручја и нагиба. При томе, за урбаном моделирање поплава, неке студије указују да је коришћење модела са просторном резолуцијом бољом од ~5 m по пикселу значајно побољшава резултате (Yang et al., 2014; Su et al., 2022).

Студија у граду Guangzhou-у (Huang et al., 2019) користила је LiDAR DEM резолуције 0.5 m да би се испитала улога топографије у урбаним плувијалним поплавама. Уводи индекс TCI (Topographic Control Index) који показује где се вода може задржати у урбаном рељефу. Резултати показују да DEM високе резолуције и TCI анализа могу побољшати идентификацију зона акумулације воде и подршку моделовању, мада бројчане вредности (нпр. густина тачака, праг TCI, подударане %) нису специфично наведене у том раду.

У најновијим студијама, UAV (дрон) фотограметрија и UAV-LiDAR постају кључни извори за LULC и DSM/DTM високе густине у градовима. Примене са резолуцијом око 1 m (или финије) показују да управо такви подаци дају стабилније и реалистичније симулације плављења на равним и комплексним урбаним теренима, јер комбинују тачне рубове објеката са поузданим висинама (Trekli et al., 2022; Emrah, 2018). Сlike 8. и 9. приказују разлику у резолуцији између сателитског снимка резолуције 10 m/pix, и снимка беспилотним системом – дроном (UAV) резолуције 1.5 cm/pix.



Слика 8. Трг Николе Пашића у Београду,
резолюција 10m/pix (извор: Sentinel 2)
Figure 8. Nikola Pašić Square in Belgrade,
resolution 10 m/pixel (source: Sentinel-2)



Слика 9. Трг Николе Пашића у Београду,
резолюција 1,5cm/pix (извор: приватна архива)
Figure 9. Nikola Pašić Square in Belgrade,
resolution 1.5 cm/pixel (source: private archive)

За урбане бујице „критична“ је хидраулички ефикасна непропусна површина (EIA) која представља део изграђених површина који је заиста хидраулички повезан са сливницима/ канализацијом. Ако LULC нема довољну резолуцију и/или методу да разликује ефективне од неефективних „impervious“ површина (површине са којих се површински отицаји не сливају у сливник), модели значајно греше у вршним протицајима и времену концентрације. Методологије које полазе од фино класификованог VHR LULC-а дају боље процене EIA и смањују несигурности у урбаном отицању (William & Jack, 1983; Gulliver, 2015).

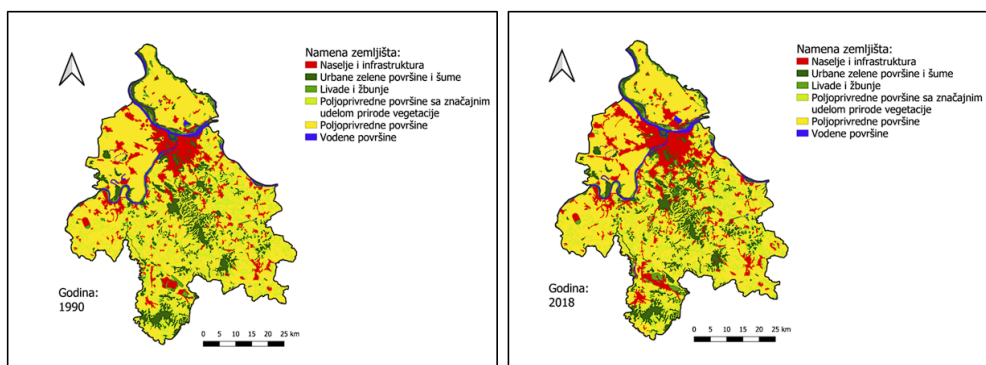
Подаци високе просторне резолуције, као што су LiDAR модели или други извори са великим детаљем, значајно побољшавају урбане modele поплава јер омогућавају бољу репрезентацију микроинфраструктуре и микротопографије (Meesuk et al., 2015). Међутим, студије истичу да у брзо мењајућим урбаним срединама важност има и ажурност и обнављање података, јер нове површине, градилишта и реконструкције могу убрзо учинити старом моделу неадекватним.

У литератури се истиче да модели терена високе резолуције (нпр. LiDAR) дају значајну предност у репрезентацији микро-инфраструктуре и топографских детаља у урбаним моделима поплава. При томе, неке студије истичу да брзи темпо урбаних промена (грађевински радови, нови путеви/паркинзи) захтева често обновљиве податке како би модели остали релевантни. (Meesuk et al., 2015; Leandro et al., 2009)

Један од важних аспеката анализе урбаних бујица представља и динамика промена карактеристика терена који се посматра. Промене у начину коришћења земљишта у урбаним срединама – на пример претварање зелених површина у интензивно изграђене зоне – имају директан утицај на хидрологију отицања. Студије у Пекингу и Шангају показују да пораст удела непропусних површина значајно повећава максимални површински отицај и скраћује време настанка бујице (Yang et al., 2019; Yin et al., 2016). На примеру Београда, видимо да је за период од 1990. до 2018. године дошло до смањења

зелених урбаних површина за 13%, док су се насеља и инфраструктура повећали за 33% (www.klima101.rs) што је приказано на слици 10.

Новији прегледи о урбаним поплавама изазваним кишним падавинама истичу да су управо нетачни или застарели LULC подаци један од највећих извора грешака у моделима урбаних бујица (Islam et al, 2025;).



Слика 10. Промена земљишног покривача/начина коришћења земљишта на територији Београда (извор: www.klima101.rs)

Figure 10. Land cover/land use change in the territory of Belgrade (source: www.klima101.rs)

Промене у начину коришћења земљишта у урбаним срединама, као што су претварање зелених и полупропусних површина у зоне високе изграђености, замена травнатих или земљишних површина бетоном, асфалтом и крововима, имају директан и квантитативно мерљив утицај на хидрологију отицања. Такве промене утичу на смањење инфилтрације, повећање брзине површинског отицања и скраћење времена концентрације, чиме се појачава интензитет и убрзава формирање урбаних бујица (Fletcher et al., 2013; Miller & Hutchins, 2017).

Промене у начину коришћења земљишта у урбаним подручјима утичу на хидролошки одзив читавог слива, не само кроз повећање непропусних површина, већ и кроз промену просторне конфигурације урбаних блокова, дренажних канала и зелених зона. Урбанизација доводи до фрагментације природних површина, уклањања вегетације и стварања повезаних површина са ниским инфилтрационим капацитетом, што повећава површинско отицање и доводи до наглашенијег вршног протицаја и већег ризика од настанка урбаних бујица (Fletcher et al., 2013). Ови процеси су посебно изражени у градским зонама које пролазе кроз интензивне реконструкције и ширење транспортне инфраструктуре, што доводи до брзих микро-топографских промена и измена путева отицања (Zölch et al., 2017).

Урбанизација у Пекингу добар је пример овог тренда. Анализе на основу Landsat сцена и просторног моделирања показале су да је постепени раст непропусних површина у централним деловима града током последњих деценија довео до приметног повећања површинског отицања током интензивних падавина и промене динамике одвода воде у локалним сливовима (Hu et al., 2020). Аутори истичу да је при моделирању урбаних сливова потребно узети у обзир временске серије промена начина коришћења земљишта, јер чак и умерена урбанизација може значајно утицати на укупни хидролошки биланс. SWMM (Storm Water Management Model), развијен од стране EPA-е (Environmental Protection Agency), представља један од најфлексбилнијих и најчешће коришћених

модела за анализу урбаног отицања. Модел може да интегрише различите врсте података: топографске моделе, LULC класификације, падавине, структуру канализационе мреже, инфилтрационе параметре и хидрауличке карактеристике материјала (Rossman, 2015). Симулациони оквир SWMM-а омогућава кориснику да анализира како промене у површинама (нпр. замена пропусних површина непропусним), реконфигурација мреже канала или имплементација LID/SuDS мера утичу на динамику отицања током различитих падавинских догађаја.

SWMM се у литератури описује као модел који даје поуздане резултате у анализама урбаних бујица, посебно зато што подржава динамичко моделирање 1D протока у цевоводима, преливању у шахтовима и појави локалних површинских плављења у условима преоптерећења система. У комбинацији са ажурним просторним подацима, овај модел омогућава процену ефеката урбанизације, климатских сценарија, измена у начину коришћења земљишта и примене зелене инфраструктуре (Hamel et al., 2020).

Урбанизација – нарочито раст непропусних површина (асфалт, бетон, кровови) и фрагментација зелених зона – доводи до смањења инфилтрације, повећања запремине и брзине површинског отицаја, бржег формирања вршних протока и скраћивања времена одзива урбаних сливова. Ово је конзистентно показано у синтетичким прегледима урбане хидрологије и моделисања (нпр. систематизован преглед стања области) (Fletcher et al., 2013).

Студија за Пекинг показује да се промена начина коришћења земљишта (LULC) током деценија може поуздано пратити Landsat сценама (1984–2019) и да је раст непропусних површина у централним деловима града повезан са повећањем површинског отицаја (рачунато SCS-CN методом), што потврђује везу урбанизације и интензивнијег одзива слива на падавине (Hu et al., 2020).

SWMM омогућава спајање хидролошких процеса (падавина, инфилтрација, евапотранспирација, акумулација на површини) са 1D хидрауличким током у канализационој мрежи (цевоводи, шахтови, преливи, пумпе, резервоари) и подржава анализу LID/SuDS мера, сценарија урбанизације и климе (EPA, 2025).

Тачност урбаних симулација поплава осетљива је на просторну резолуцију и квалитет топографских и LULC улаза. Показано је да прелазак са грубљих DEM-ова на финије (нпр. од 10–30 m ка 1–2 m) мења расподелу симулираних дубина и простор поплаве; истраживања такође наглашавају да третман зграда и друге урбане инфраструктуре (мрежа улица/ивичњаци/преливи) знатно утичу на резултате. Додатно, поређења fine (0,5 m) и грубље (5–20 m) топографије у урбаним условима показују погоршања метрика поплаве при деградацији резолуције (Muthusamy et al, 2021).

У контексту микротопографије, за град Гуангџоу је предложен TCI (Topographic Control Index) који, заснован на LiDAR DEM-у резолуције 0,5 m, квантитује топографску контролу над плувијалним поплавама и боље кореспондира са историјским записима поплављивања него класични TWI у густо изграђеним зонама. Ово наглашава значај врло високих резолуција за препознавање локалних депресија и „цепова“ задржавања воде у урбаном ткиву (Huang et al., 2019).

Паралелно, недавне синтезе урбаног поплавног моделирања истичу потребу усклађивања просторних резолуција улазних слојева (DEM/DTM, LULC, инфраструктура) јер неслагања у резолуцији и квалитету уносе структурне грешке у расподелу дубина/брзина и у идентификацију критичних локација (нпр. улазне тачке, преливи, уске уличне депресије).

LiDAR високе густине (≥ 8 тачака/ m^2) тренутно се сматра најпоузданијим извором

за изградњу DTM и DSM високог квалитета у урбаним подручјима, јер омогућава прецизно раздвајање висина објеката, кровишта, вегетације и коловозних површина, и тиме додаје хидраулички релевантне баријере и канале у 2D моделе (Gallien, Schubert & Sanders, 2011). Међутим, висока цена и ограничена доступност чине овакве податке често недоступним, нарочито у срединама које немају редовне LiDAR кампање.

Због тога се у најновијим радовима развијају хибридни приступи, где се грубљи DEM (нпр. Copernicus 5 m, ALOS, SRTM) комбинује са машинским учењем, LULC класификацијом и морфометријским параметрима како би се кориговале грешке висине у урбаним зонама, посебно дуж рубова зграда, падних линија улица и насипа (Okolie, Mills, Adeleke & Smit, 2023). Овакве технике демонстрирале су смањење RMS грешке висине за 30–40%, што значајно побољшава усмеравање тока у хидрауличким моделима.

Ови наводи показују да није пресудна само количина (TIA), већ хидрауличка повезаност тј. EIA, јер управо она контролише колико падавина заиста моментално улази у мрежу и формира отицај/вршне протицаје. Зато висока просторна резолуција и фино класификован LULC (VHR + LiDAR/UAV) омогућавају да боље разликујемо површине које заиста теже сливницима од оних које не теже (нпр. дворишта, перивоји, пропусни платои), као и да уведемо „тежинско повезивање“ (нпр. удаљеност до најближе цеви/сливника) уместо грубог третмана „све је исто“. Резултат овога су реалнији коефицијенти отицаја и мање грешке у вршним протоцима и времену концентрације (Wiliam & Jack, 1983; Gulliver, 2015).

3.3. Инфилтрација површинско отицање и нанос

Урбанизација током последњих деценија у великој мери је изменила хидролошко функционисање урбаних сливова. Повећање непропусних површина доводи до значајног смањења инфилтрације, раста површинског отицаја и бржег достизања вршних протицаја, што је у потпуности потврђено у прегледним радовима урбане хидрологије (Fletcher, Andrieu & Hamel, 2013). Непропусни материјали као што су асфалт, бетон и збијене пешачке површине стварају услове у којима је инфилтрација минимална, а површински водени филм формира се готово одмах након почетка падавине, чиме се генерише тренутни површински отицај (Fletcher et al., 2013).

Иако се често претпоставља да су „зелене“ урбане површине способне за ефикасну инфилтрацију, бројне студије показују да су травњаци и паркови у градским условима често подвргнути јаком збијању земљишта услед пешачког саобраћаја, одржавања, или недостатка дебљег вегетационог слоја, што може значајно умањити њихову инфилтрациону способност (Gregory, Dukes, Jones & Miller, 2006). Наведено значи да картографски зелена зона не мора хидраулички да функционише као пропусна површина, што је чест узрок грешака у моделима који користе један или неколико „просечних“ инфилтрационих параметара за цело урбано подручје (Elliott & Trowsdale, 2007).

Поред тога, у урбаним условима током интензивних пљускова долази до мобилизације финог и средње крупног наноса са улица, градилишта и површина без вегетације. Овај материјал може да се акумулира у сливницима и улазним решеткама, смањујући њихов проточни капацитет. Експерименталне студије показују да делимично зачепљење решетки може смањити њихов хидраулички капацитет и до 55%, што изазива локална задржавања воде и појаву површинских плављења чак и када је капацитет цевовода формално довољан (Hao, Mu & Shi, 2021). Ово се често јавља у старијим урбаним зонама са густом инфраструктуром, где моделисање поплава захтева увођење параметара

везаних за стање сливника и наноса (Löwe & Arnbjerg-Nielsen, 2020).

Због наведених ограничења, савремени приступи управљању урбаним отицајем све више укључују комбиновање традиционалне „сиве“ инфраструктуре са системима зелене и плаве инфраструктуре (LID/SuDS мере), као што су пропусни коловози, инфилтрационе јаме, кишне баште и биосвејл-системи (Bioswale). Систематски прегледи показују да овакве мере могу значајно умањити вршни проток и укупни обим отицаја, при чему ефекти зависе од типа мере и удела третиране непропусне површине (Ahiablame, Engel & Chaubey, 2012). Мета-анализа моделских истраживања на нивоу сливова показује да сваки додатни процентни поен третиране непропусне површине LID/SuDS мерама у просеку доводи до око 0,60% смањења вршног протока и око 0,43% смањења укупног отицаја (Bell et al., 2020).

3.4. Интеракција урбаних бујица и канализационих/дренажних система

Урбани сливови представљају комплексно хидролошко-хидраулично окружење у коме се спрезају процеси површинског отицаја (2D) и подземне дренажно-канализационе мреже (1D). Како наводи Guo и сарадници (2021), „дренажна мрежа игра кључну улогу у одвођењу површинског отицаја у урбаним срединама; занемаривање или лоша процена може довести до погрешних симулација дубина површинског протицаја, зоне плављења, и трајања“. То значи да модели који посматрају само 2D ток без укључивања 1D мреже често прецењују обим површинског плављења, јер нема реалног одвода воде кроз цеви (Guo et al., 2021).

Супротно томе, студије попут Leandro, Chen, Djordjević и Savić (2009) пореде моделе 1D/1D и 1D/2D и показују да спрезање површинског и подземног тока доводи до значајно реалистичнијих резултата: „спрегнути 1D/2D модел показао је да поплавни талас може стићи до центра града четири сата раније у односу на модел који не садржи 1D компоненту.“ (Leandro et al., 2009). Ово указује да искључивање подземне мреже може довести до значајног закашњења у предвиђању поплава или чак потцењивања ризика.

Моделирање слива у пракси захтева адекватне податке о површинској топографији, мрежи улица и канала, као и дубинским и геометријским карактеристикама дренажне/канализационе мреже. Истраживање Bertsch, Glenis и Kilsby (2017) указује да „недостатак података о улазним тачкама (сливницима) спречава кориснике да у потпуности искористе могућности ових алата за моделирање“. То је посебно важно у густо изграђеним урбаним срединама где „уличне депресије, шахтови и преливи представљају кључне тачке размене између 2D и 1D домена“.

У том контексту, новији модели интегрисаног карактера представљају фазирану архитектуру: 2D модул за површински ток, модул за размену протока између површине и шахтова, и 1D модул за транспортовање воде кроз мрежу. На пример, Dong и сарадници (2022) наводе: „Комплетан хидродинамички модел за урбане поплаве састоји се од 2D модула површинског отицаја, модула за размену протока, и модула канализационе мреже“.

Овакав интегрисани приступ омогућава реалистичан приказ динамике урбаних бујица: од формирања брзих токова улицама и подвожњацима, преко улаза у шахтове и канализацију, до евентуалног преливања цеви и повратног пуњења улица. Међутим, без тачних и ажурних података о улазима у мрежу, пречницима цеви, kotaма дна и круна, стању филтрирања и зачепљења, чак и сложени модели 2D/1D не могу дати поуздане резултате (Bertsch et al., 2017).

У пракси, због изазова у добијању детаљних података мреже, препоручује се фазни приступ: прво 1D/2D модел са „добром“ топографијом и површинским подацима, а затим поступно ажурирање мреже када су подаци доступни. Студија Весеиро-а (2016) наглашава да „традиционални 1D модели урбане канализационе мреже треба користити када је капацитет цевовода адекватан или ради спровођења почетне анализе за идентификацију зона потенцијалног плављења”.

3.5. Приступи решавању и смањењу ризика

Савремени приступи ублажавању ризика од урбаних бујица ослањају се на скуп комплементарних мера које делују од „извора“ отицаја до дренажно-канализационе мреже и оперативног управљања. У домену „изворишног управљања“ (LID/SuDS), зелена инфраструктура као што су зелени кровови, пермеабилни коловози, кишне баште и биосвејл-системи показано смањује вршне протицаје и укупни отицај, при чему је величина ефекта контекстуално зависна (клима, димензионисање, распоред мера). Мета-анализа моделских истраживања на нивоу сливова показује да сваки додатни процентни поен третиране непропусне површине у просеку доводи до $\approx 0,60\%$ смањења вршног протока и $\approx 0,43\%$ смањења укупног отицаја (Bell et al., 2020), док прегледни радови систематски документују функционалне механизме (задржавање, инфилтрација, евопотранспирација) и широку примену LID мера у пракси (Ahiablame, Engel & Chaubey, 2012).

Паралелно са „зеленим“ мерама, кључно је унапређење и одржавање канализационо-дренажних система: повећање капацитета, увођење ретенционих/балансних базена и редовно одржавање улаза (сливника, решетки). Експериментална студија показује да делимично зачепљење улазних решетки мерљиво повећава нивое воде уз улаз и смањује проточни капацитет, што директно повећава локалне дубине и трајање плављења (Hao, Mu & Shi, 2021). Када недостају или су непоуздани подаци о улазима/сливницима, могуће је прибегнути методама синтетичког картирања улазних тачака ради спровођења у потпуности спрегнутих 1D/2D симулација; показано је да добро калибрисане синтетичке мреже могу приближити поље струјања (површина + захват улаза) резултатима добијеним са стварном, снимљеном мрежом (Bertsch, Glenis & Kilsby, 2017).

Све већу улогу има интегрисано 1D–2D моделирање, у коме су површински ток (2D) и подземна мрежа цеви/шахтова (1D) хидраулички повезани. Преглед најсавременијих модела наглашава да изостављање или поједностављивање дренажне мреже води ка погрешној симулацији дубина, обима и трајања инундације, нарочито на локалном нивоу (Guo, Guan & Yu, 2021). Упоредне студије показују да 1D/2D спрезање у односу на неспрегнуте приступе даје реалистичније временско-просторне обрасце плављења и може значајно променити процену времена доласка поплавног таласа у кључне делове града (Leandro, Chen, Djordjević & Savić, 2009).

За поуздано моделирање и оперативно управљање потребни су ажурни и довољно детаљни просторни и инфраструктурни подаци. У урбаном окружењу где се површине и објекти брзо мењају, све чешће се комбинују подаци високе резолуције (DEM/DSM, LULC) са радарским/плувиографским падавинама и мониторингом у реалном времену (real-time). Даљинска детекција уз помоћ UAV (дронов) користи се за израду ортофото-снимака, детаљних DSM-ова и LULC класификација, али и за валидацију резултата модела упоређивањем са стварним записима догађаја; нови рад показује управо валидацију моделских резултата UAV производима и записима о стварним поплавама (Clasing,

Muñoz & Arumí, 2023). На стратешком нивоу, приступ „sponge city“ у Кини експлицитно ставља приоритет на контролу отицаја на извору, као меру која смањује укупан отицај и оптерећење ценовода, уз додатне ко-бенефите (Yin et al., 2022; Yin et al., 2021).

4. ЗАКЉУЧАК

Управљање ризиком од урбаних бујица захтева много више од класичног димензионисања одводне инфраструктуре. Савремена истраживања показују да кључ успеха лежи у интеграцији просторних података високе резолуције, детаљних података о канализационо-дренажној мрежи, као и у употреби спрегнутих 1D–2D хидрауличких модела. Истраживање Fewtrell и сарадника (2008) указује да модел урбаних поплава мора да садржи микротопографске елементе, јер груба резолуција доводи до значајних грешака у процени дубина и динамике плављења. Слично томе, Dottori, Di Baldassarre & Todini (2013) наглашавају да подаци високе резолуције јесу неопходни, али да морају бити коришћени „са опрезом“, јер висока прецизност без валидних улазних података може довести до „лажне сигурности“ у резултатима модела.

Поред површинских података, квалитет и ажурност података о канализационој мрежи имају пресудан значај. Интеграција 2D површинског тока и 1D подземне мреже показано унапређује реалистичност модела, док занемаривање канализационе мреже доводи до систематских грешака у процени инундације (Leandro et al., 2009). Овај закључак додатно потврђује свеобухватни преглед Guo, Guan & Yu (2021), који истиче да комбинација 1D–2D приступа најбоље репродукује механизме преливања, интеракцију површинског и подземног тока и локалне хидрауличке појаве.

У домену прикупљања података, значајан напредак постигнут је употребом LiDAR технологије, посебно у урбаним срединама. LiDAR обезбеђује детаљне DEM/DSM моделе са јасним приказом зграда, улица и микрорељефа, који су од суштинске важности за симулације површинског тока (Zhang et al., 2019). У комбинацији са UAV-фотограметријом, која омогућава брзо и флексибилно ажурирање података у зонама где се инфраструктура динамично мења, могуће је добити висококвалитетне ортопроизводе и DSM-ове који служе као поуздана основа за моделирање (Clasing, Muñoz & Arumí, 2023). Даљинска детекција (Remote Sensing - RS), укључујући сателитске сензоре високе резолуције, игра све значајнију улогу у аутоматизованој LULC класификацији, праћењу промена и детекцији узрока и последица урбаних бујица (Tian et al., 2022). Када се подаци из LiDAR-а, UAV-а и сателитских платформи унакрсно комбинују, добија се фузија која значајно подиже поузданост улазних слојева, што је неопходно за сложене хидрауличке моделе.

Узимајући у обзир наведено, будући развој урбане хидрологије треба да се креће ка:

1. стандардизацији минималних резолуција за DEM/DSM и LULC у урбаним зонама,
2. операционализацији аутоматизоване LiDAR/UAV/RS фузије,
3. увођењу реално-временских 1D–2D модела за рано упозоравање,
4. континуираном развоју инфраструктурних база података.

Такви модели не само да повећавају научну тачност симулација, већ и омогућавају поуздано доношење одлука, правовремену интервенцију и ефикасно управљање урбаним ризицима.

Захвалница: Истраживање је подржало Министарство за науку, технолошки развој и иновације Републике Србије (бр. уговора 451-03-136/2025-03/ 200027, датум 04.02.2025. године).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 4253–4273.
2. Afifi, Z., Chu, H.-J., Kuo, Y.-L., Hsu, Y.-C., Wong, H.-K., & Ali, M. Z. (2019). Residential flood loss assessment and risk mapping from high-resolution simulation. *Water*, 11(4), 751.
3. Agonafir, C., Farhadi, H., & He, J. (2023). A review of recent advances in urban flood research. *Urban Climate*, 47, 101–215.
4. Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481–1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
5. Allnutt, C., Gericke, O., & Pietersen, J. (2020). Estimation of time parameter proportionality ratios in large catchments: Case study of the Modder–Riet river catchment, South Africa. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12627.
6. Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z., & Sanchez, A. (2018). Assessing the co-benefits of green–blue–grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management*, 239, 244–254.
7. Bacchi, B., Balistocchi, M., and Grossi, G. (2008). “Proposal of a semi-probabilistic approach for storage facility design.” *Urban Water J.*, 5(3), 195–208.
8. Bakhtiari, V., Piadeh, F., Behzadian, K., & Kapelan, Z. (2023). A critical review for the application of cutting-edge digital visualisation technologies for effective urban flood risk management. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104958.
9. Beceiro, P. M. G. (2016). 1D/2D integrated modelling and performance. (Unpublished doctoral thesis). Universidade Técnica de Lisboa
10. Bell, C. D., Panos, C. L., Bhaskar, A. S., Gilliom, R. L., Hogue, T. S., Hopkins, K. G., Jefferson, A. J., & Wolfand, J. (2020). Stormwater control impacts on runoff volume and peak flow: A meta-analysis of watershed modeling studies. *Hydrological Processes*, 34(11), e13784.
11. Bertsch, R., Glenis, V., & Kilsby, C. (2017). Urban flood simulation using synthetic storm drain networks. *Water*, 9(12), 925.
12. Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J. D., & Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166-179.
13. Berndtsson, R. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 70, 351–360.
14. Bornstein, R., & Lin, Q. (2000). Urban heat island and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment*, 34(3), 507–516. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)
15. Carr, R. S. & Smith, G. P. (2006) Linking of 2D and pipe hydraulic models at fine spatial scales. 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design, 2-7 April 2006, Melbourne, Australia, 2, 361-368.
16. Cea, L., Cerqueira, M., & Pinho, J. (2025). Recent advances and future challenges in urban pluvial flood modelling. *Urban Water Journal*.
17. Chen, A. S., Djordjević, S., Leandro, J., & Savić, D. A. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer

- networks. In 11th International Conference on Urban Drainage (pp. 1–10).
18. Chen, A. S., Evans, B., Djordjević, S., & Savić, D. (2010). A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 18–28.
 19. Clasing, R., Muñoz, E., & Arumí, J. L. (2023). Remote sensing with UAVs for flood modeling: A validation with actual flood records. *Water*, 15(21), 3813.
 20. Dong, B., et al. (2022). Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles. *Science of The Total Environment*.
 21. Dottori, F., Di Baldassarre, G., & Todini, E. (2013). Detailed data is welcome, but with a grain of salt: Accuracy, precision, and uncertainty in flood inundation modelling. *Water Resources Research*, 49(9), 6079–6085.
 22. Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394–405.
 23. Emrah, Y. (2018). Generation of high-resolution digital surface models for urban flood modelling using UAV imagery. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 215, 357–366.
 24. EPA – United States Environmental Protection Agency (2025) Storm Water Management Model Software and Documentation <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (приступљено 7. новембар 2025)
 25. Falconer, R. H., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J., & Golding, B. (2009). Pluvial flooding: New approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 198–208.
 26. Fewtrell, T., Duncan, A., Sampson, C., Neal, J., & Bates, P. (2011). Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high-resolution terrestrial LiDAR data. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7–8), 281–291.
 27. Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
 28. Gallien, T. W., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2011). Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements. *Coastal Engineering*, 58(6), 567–577.
 29. Gregory, J. H., Dukes, M. D., Jones, P. H., & Miller, G. L. (2006). Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3), 117–124.
 30. Gulliver, J. (2015). Determination of Effective Impervious Area in Urban Watersheds (Research Project). University of Minnesota.
 31. Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2021). Urban surface water flood modelling—A comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2843–2860.
 32. Hamel, P., Daly, E., & Fletcher, T. D. (2020). Which green infrastructure types have the greatest hydrological benefit? A systematic review. *Ecological Engineering*, 143, 105–106.
 33. Han, J.-Y., Baik, J.-J., & Lee, H. (2014). Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 17–30.
 34. Hao, X., Mu, J., & Shi, H. (2021). Experimental study on the inlet discharge capacity under different clogging conditions. *Water*, 13(6), 826.
 35. Huang, H., Chen, X., Wang, X., Liu, L., & (остали) (2019). A depression-based index to represent topographic control in urban pluvial flooding: Case study in Guangzhou, China.

36. Hu, S., Fan, Y., & Zhang, T. (2020). Assessing the effect of land use change on surface runoff in a rapidly urbanized city: A case study of the central area of Beijing. *Land*, 9(10), 343.
37. Islam, T., Zeleke, E. B., Afroz, M., & Melesse, A. M. (2025). A systematic review of urban flood susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 17(3), 524.
38. Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2018). A comprehensive approach to urban flood modeling. *Urban Water Journal*, 15(4), 298–312.
39. Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., & Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, 564, 1085–1098.
40. Jiang, W., Li, X., & Zhang, Q. (2022). Understanding the effects of digital elevation model resolution and building treatment for urban flood modelling. *Geoscience Frontiers*, 13(6), 101424.
41. Kim, Y. D., Tak, Y. H., Park, M. H., & Kang, B. (2020). Improvement of urban flood damage estimation using a high-resolution digital terrain. *Journal of Flood Risk Management*, 13(S1), e12575.
42. Klimal01.<https://klimal01.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/> (accessed 07.11.2025.год.)
43. Komolafe, A. A., Herath, S., & Avtar, R. (2018). Sensitivity of flood damage estimation to spatial resolution. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S370–S381.
44. Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 495–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037)
45. Leitao, J. P., Simões, N. E., Maksimović, Č., Ferreira, F., Prodanović, D., Matos, J. S., & Marques, A. S. (2010). Real-time forecasting urban drainage models: full or simplified networks? *Water Science and Technology*, 62(9), 2106–2114. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.382>
46. Li, J., & Wong, D. W. S. (2010). Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(3), 251–261.
47. Li, X., & Shao, G. (2014). Object-based land-cover mapping with high-resolution aerial photography at a county scale in Midwestern USA. *Remote Sensing*, 6(11), 11372–11390. <https://doi.org/10.3390/rs6111372>
48. Liu, J., Niyogi, D., Berardi, A., Halder, S., & Mishra, V. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Earth's Future*, 7(11), 1317–1335.
49. Liu, J., & Niyogi, D. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports*, 9(1), 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43162-4>
50. Löwe, R., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2020). Urban pluvial flood risk assessment – Data resolution and spatial scale when developing screening approaches on the microscale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 981–997.
51. Ma, Y., Cui, Y., Tan, H., & Wang, H. (2022). Case study: Diagnosing China's prevailing urban flooding—Causes, challenges, and solutions. *Journal of Flood Risk Management*, 15(3), e12822. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12822>
52. Marthews, T. R., Dadson, S. J., Lehner, B., Abele, S., & Gedney, N. (2015). High-resolution global topographic index values. NERC Environmental Information Data Centre. <https://doi.org/10.5285/f8f98678-43dd-4ca0-8ec1-5fde3e964b0e>
53. Mason, D. C., Horritt, M. S., Dall'Amico, J. T., Scott, T. R., & Bates, P. D. (2009).

- Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 248–252. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2019269>
54. McEnroe, B. M., Young, C. B., & Gamarra Zapata, R. A. (2016). Estimation of watershed lag times and times of concentration for the Kansas City Area (Report No. KS-16-01). Kansas Department of Transportation.
 55. Meesuk, V., Vojinovic, Z., Mynett, A., & Abdullah, A. F. (2015). Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations. *Advances in Water Resources*, 75, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.008>
 56. Miao, S., Chen, F., LeMone, M. A., Tewari, M., Li, Q., & Wang, Y. (2011). An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(4), 806–825. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2518.1>
 57. Miller, J. D., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
 58. Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088
 59. Neal, J. C., Bates, P. D., & Fewtrell, T. J. (2013). Urban flood modelling. In G. Di Baldassarre (Ed.), *Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling* (pp. 69–77). Cambridge University Press.
 60. Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.-P., Gires, A., Pina, R., Reinoso, R., Bruni, G., Cristiano, E., van Assel, J., Kroll, S., Muthusamy, M., Simões, N., Marques, A., Onof, C., Maksimović, Č., Willems, P., & ten Veldhuis, M.-C. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling. *Journal of Hydrology*, 531, 389–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.035>
 61. Ogden, F. L., Sharif, H. O., Senarath, S. U. S., Smith, J. A., Baeck, M. L., & Richardson, J. R. (2000). Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. *Journal of Hydrology*, 228(1–2), 82–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00146-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00146-3)
 62. Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
 63. Okolie, C., Mills, J., Adeleke, A., & Smit, J. (2023). Digital elevation model correction in urban areas using extreme gradient boosting, land cover and terrain parameters. *arXiv:2308.06545*. <https://arxiv.org/abs/2308.06545>
 64. Ozdemir, H., Sampson, C. C., de Almeida, G. A. M., and Bates, P. D. (2013) Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4015–4030,
 65. Pandiwijaya, A., Anjani, V., Ekadinata, A., Dewi, S., Prasetyo, A. (2013). Hierarchical Object-Based Classification System For Land Use/Cover Mapping Of Vietnam, *Asian Conference of Remote Sensing 2013*
 66. Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing.
 67. Rangari, V., Prashanth, Sriramoju, Umamahesh, N., Patel, A. (2108) Simulation of urban drainage system using a Storm Water Management Model (SWMM), *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, Vol 7, no. S1, p. 7-10.

68. Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., & Andreae, M. O. (2008). Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321(5894), 1309–1313. <https://doi.org/10.1126/science.1160606>
69. Rosenzweig, B. R., Herreros Cantis, P. L., Kim, Y., Cohn, A., Grove, K., Brock, J., Palmer, M., McPhearson, T., ... Solecki, W. (2021). The value of urban flood modeling. *Earth's Future*, 9, e2020EF001739. <https://doi.org/10.1029/2020EF001739>
70. Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual – Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency.
71. Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194.
72. Salvatore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62–81.
73. Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 49–64.
74. Seyoum, S.D., Vojinovic, Z., Price, R.K., & Weesakul, S. (2012). Coupled 1D and Noninertia 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 23-34.
75. Shepherd, J. M., Burian, S. J., Hartmann, D. L., Hjelmfelt, M. R., Chow, F. K., & Hong, S.-Y. (2002). Rainfall modification by major urban areas: Observations from TRMM. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 689-701.
76. Shepherd, J. M. (2005). A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, 9(12), 1–27. <https://doi.org/10.1175/EI156.1>
77. Shen, J., Tan, F., & Zhang, Y. (2018). Improved Building Treatment Approach for Urban Inundation Modeling: A Case Study in Wuhan, China. *Water*, 10(12), 1760.
78. Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R. D., & de Sousa, L. M. (2011). Integrated modelling of urban drainage networks and surface flooding. *NOVATECH Proceedings*, 1–8.
79. Skougaard Kaspersen, P., Sonne, M. K., Høegh Ravn, N., Arnbjerg-Nielsen, K., Thorsen, M., Hesselbjerg Christensen, J., & Jensen, M. B. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 4131–4147. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>
80. Smith, J. A., Baeck, M. L., Meierdiercks, K. L., Miller, A. J., & Krajewski, W. F. (2007). Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30(10), 2087–2097. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.09.007>
81. Su, Y.-F., Lin, Y.-T., Jang, J.-H., & Han, J.-Y. (2022). High-resolution flood simulation in urban areas through the application of remote sensing and crowdsourcing technologies. *Frontiers in Earth Science*, 9, 756198
82. Šurjanac, N., Milčanović, V., Polovina, S., Cvetković, J., Živanović, I. (2022), Application of Multispectral Sensor in Quantification of Soil Protection Coefficient (Xa) in Erosion Potential Method, *Sustainable Forestry*
83. Tian, Y., Li, X., & Gong, P. (2022). Urban land-cover classification and change analysis using high-resolution satellite imagery: A review. *Remote Sensing*, 14(3), 547.
84. Todini, E. (2025). Understanding and mitigating urban flood risk. *Hydrology*, 12(6), 146.
85. Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British*

- Journal of Management, 14(3), 207–222.
86. Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
 87. Trepekli, K., Balstrøm, T., Friborg, T., Fog, B., Allotey, A., Kofie, R., & Møller-Jensen, L. (2022). UAV-borne, LiDAR-based elevation modelling: A method for improving local-scale urban flood risk assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113, 423–451.
 88. Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(9), 1086–1098.
 89. Walsh, C. J., Fletcher, T. D., & Burns, M. J. (2012). Urban stormwater runoff: A new class of environmental flow problem. *PLOS ONE*, 7(9), e45814.
 90. Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., ... & Kharin, V. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522–555. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
 91. William, A., & Jack, A. (1983). Effective impervious area in urban runoff modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), 134–152.
 92. Williams, D. J., Matasci, G., Coops, N. C., & Gergel, S. E. (2018). Object-based urban landcover mapping methodology using high spatial resolution imagery and airborne laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4), 046020.
 93. Wilson, J. P. (2018). *Environmental applications of digital terrain modeling*. John Wiley & Sons.
 94. Winzeler, H. E., Owens, P. R., Read, Q. D., Libohova, Z., Ashworth, A., & Sauer, T. (2022). Topographic Wetness Index as a proxy for soil moisture in a hillslope catena: Flow algorithms and map generalization. *Land*, 11(11), 2018.
 95. Xu, Z., & Zhao, G. (2016). Impact of urbanization on rainfall–runoff processes: Case study in the Liangshui River Basin in Beijing, China. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 7–12. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-7-2016>
 96. Yang, P., Ren, G., & Yan, P. (2017). Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. *Journal of Climate*, 30(15), 5851–5870.
 97. Yang, L., Li, Z., Chen, J., & Zhang, Q. (2019). Long-term variations in short-duration rainfall extremes associated with urbanization in Beijing. *International Journal of Climatology*, 39(1), 342–356. <https://doi.org/10.1002/joc.5790>
 98. Yang, L., Deng, X., Li, Z., & He, S. (2014). Response of high-frequency rainy season storms to urbanization in Beijing. *Hydrology Research*, 45(4–5), 636–653. <https://doi.org/10.2166/nh.2014.111>
 99. Yang, P., Ren, G., & Yan, P. (2017). Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. *Journal of Climate*, 30(15), 5851–5870.
 100. Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M., & He, Q. (2016). Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road networks: A case study in Shanghai, China. *Journal of Hydrology*, 537, 138–145.
 101. Yu, D., & Lane, S. N. (2006a). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment—Part 1: Mesh resolution effects. *Hydrological Processes*, 20(7), 1541–1565.
 102. Yu, D., & Lane, S. N. (2006b). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment—Part 2: Development of a sub-grid model. *Hydrological Processes*, 20(7), 1567–1583.

103. Zhang, W., Villarini, G., Scoccimarro, E., & Napolitano, F. (2019). Urbanization exacerbated the rainfall–runoff response of extreme precipitation events. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6463–6471. <https://doi.org/10.1029/2019GL082120>.
104. Zölch, T., Wamsler, C., & Pauleit, S. (2017). Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – An assessment at the micro-scale. *Environmental Pollution*, 224, 585–597.
105. Zou, X., Zhao, G., Li, J., Yang, Y., & Fang, Y. (2016). Object-based image analysis combining high spatial resolution imagery and laser point clouds for urban land cover. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, 733–739.

