

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: Erozijska zemljišta predstavljaju 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.

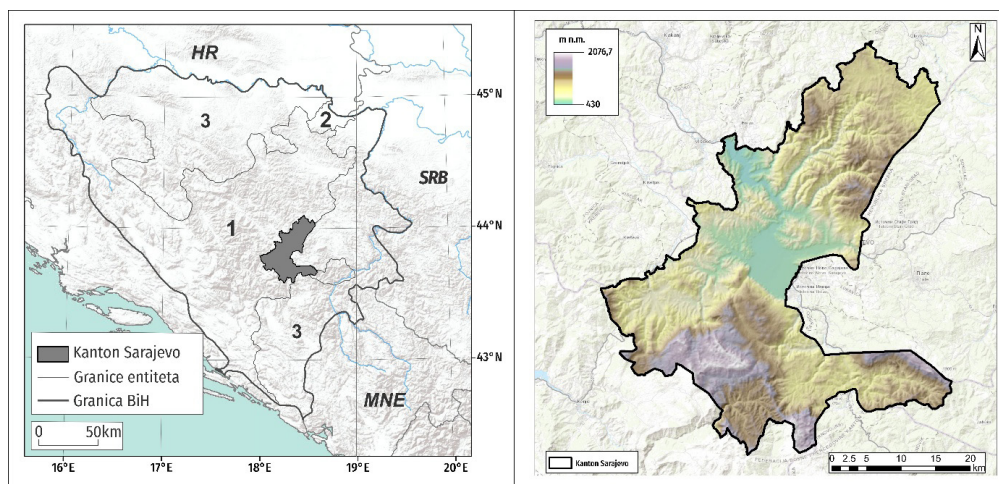
Cilj ovog rada je utvrđivanje prostorne distribucije intenziteta erozionih procesa i produkcija erozionog materijala na području Kantona Sarajeva (Kanton 9). Za procenu degradacije zemljišta usled erozionih procesa, korišćen je Metod Potencijala erozije (Metod prof. Slobodana Gavrilovića) (Gavrilović, 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.

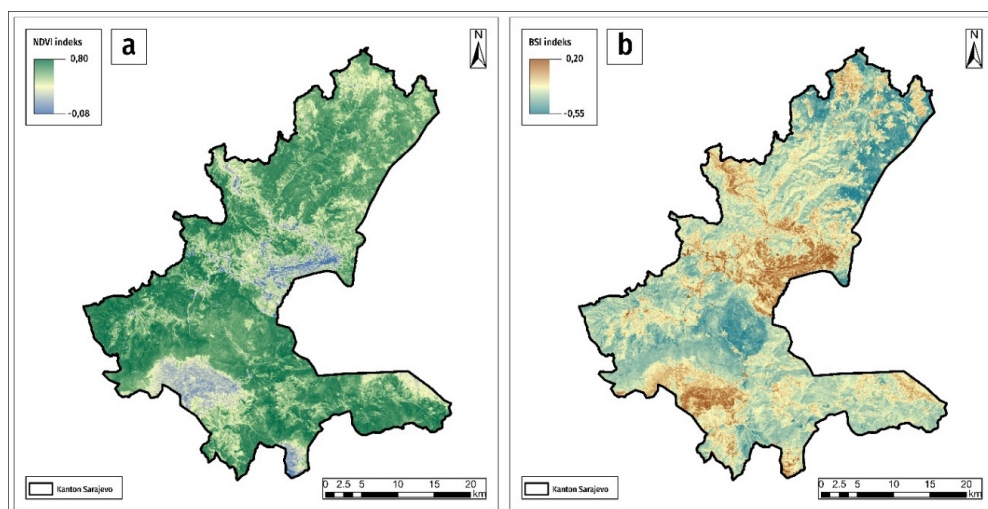
Figure 1. Spatial position of Sarajevo Canton: 1 – Federation of Bosnia and Herzegovina (FBiH); 2 – Brčko District (BD); 3 – Republic of Srpska (RS); SRB – Republic of Serbia; MNE – Montenegro; HR – Croatia.

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;

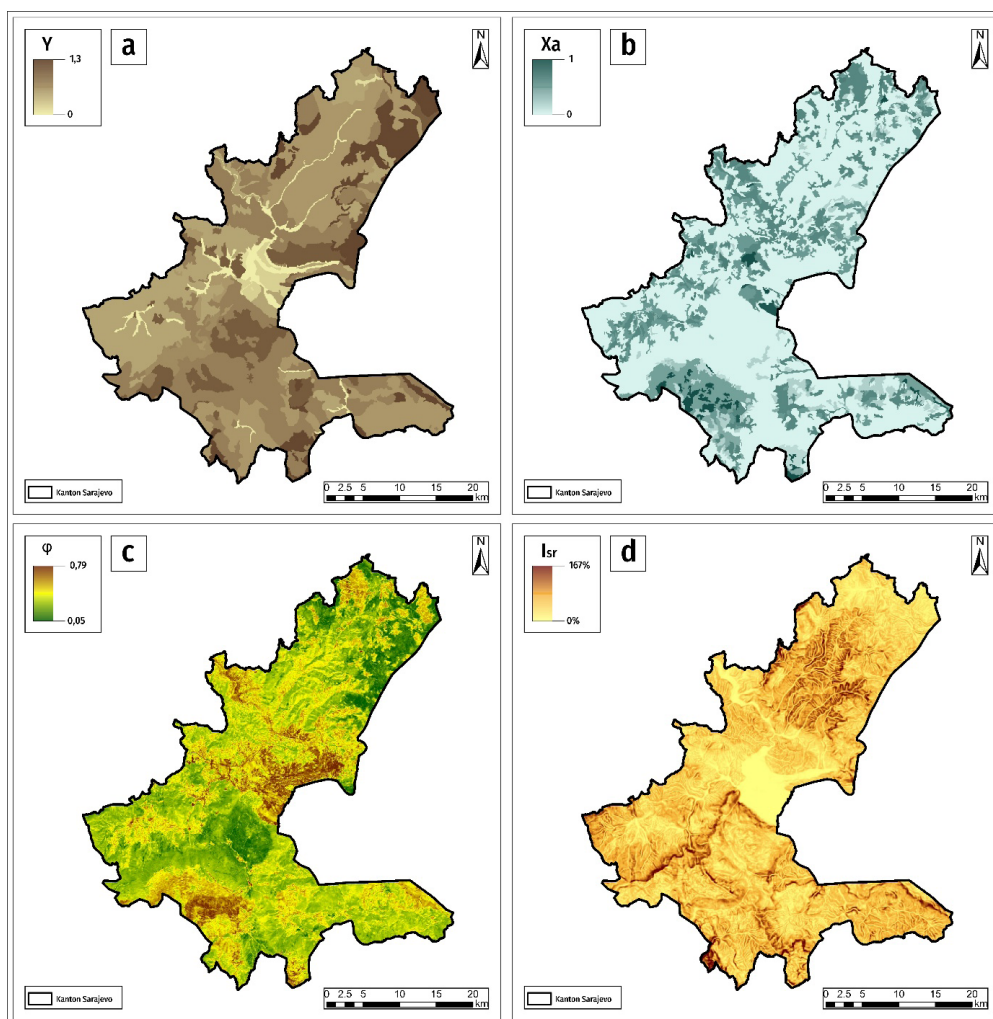
$BSI_{\max}$ – vrednost koja predstavlja golet u sloju indeksa golog zemljišta;

$BSI_{\min}$ – 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).

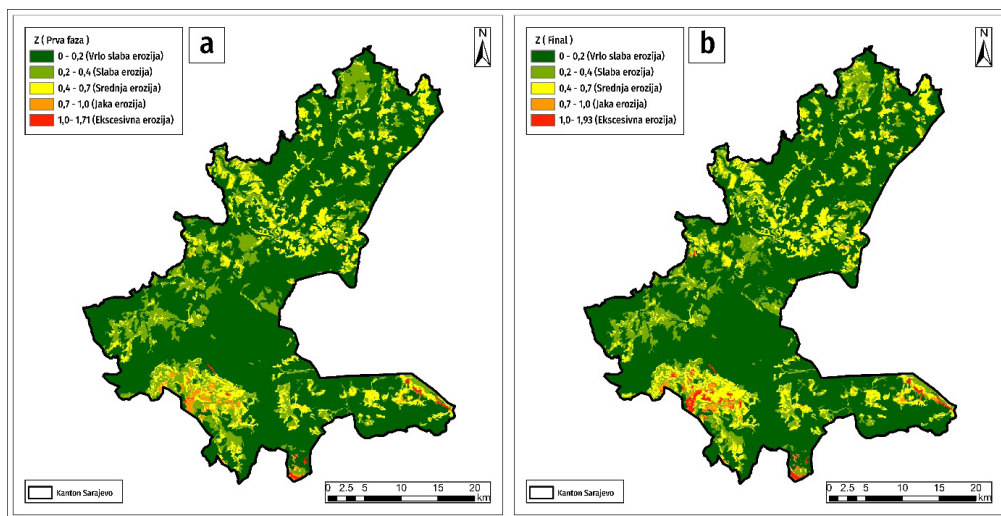


Slika 4. Brazdasta i jaružasta erozija (slike gore), pašnjaci i travnate površine na nagnutim terena (slike dole) na području Kantona Sarajeva (foto: Imširović Š.).

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 ekscresivne 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 ekscresivnom 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

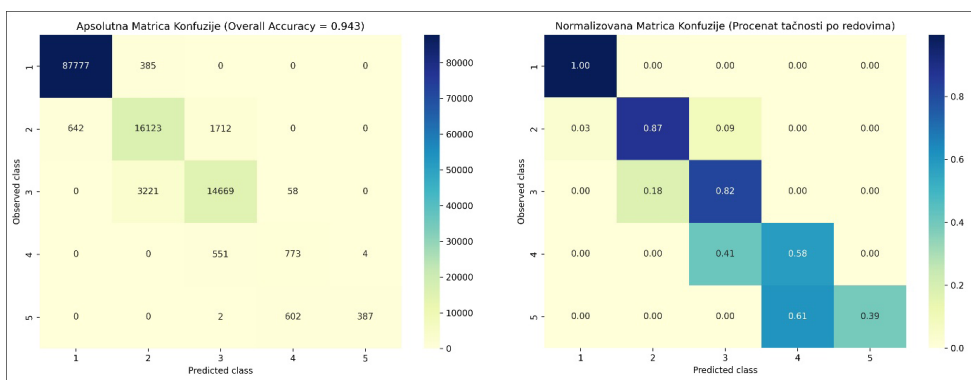
moгуćnost precizne identifikacije manjih, ali morfološki izraženih erozionih formi. Takva prostorna rezolucija dovela je do generalizacije površina i potcenjivanja intenziteta erozionih procesa, naročito u delovima terena sa izraženom mikroreljefnom razuđenošću.

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 reljefnim karakteristikama ili složenim tipovima zemljišta.

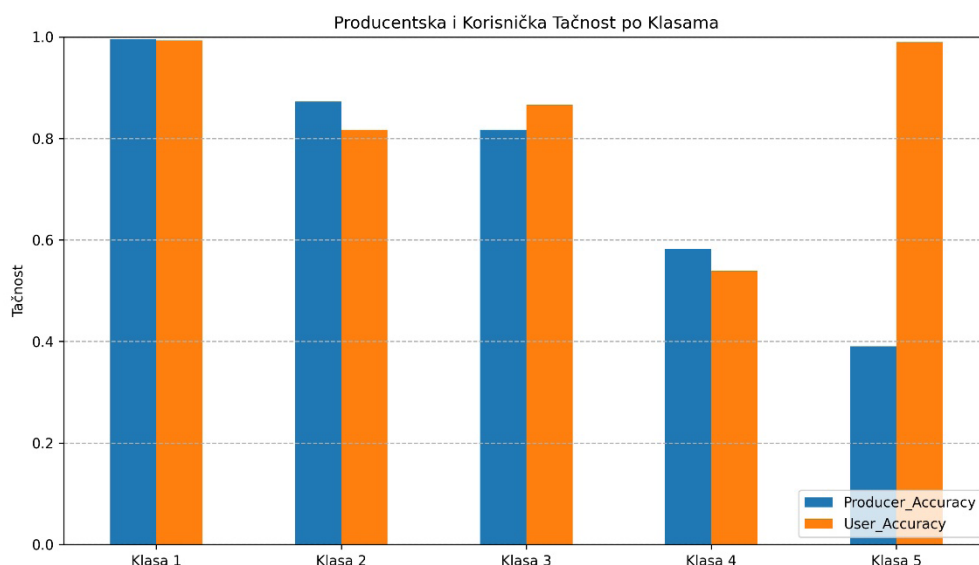


Slika 6. Apsolutna matrica konfuzije i normalizovana matrica konfuzije: **klasa 1**-Vrlo slaba erozija, **klasa 2**-Slaba erozija zemljišta, **klasa 3**-Srednja erozija zemljišta, **klasa 4**-Jaka erozije zemljišta, **klasa 5**-Ekscesivna erozija zemljišta.

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 Karta 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.

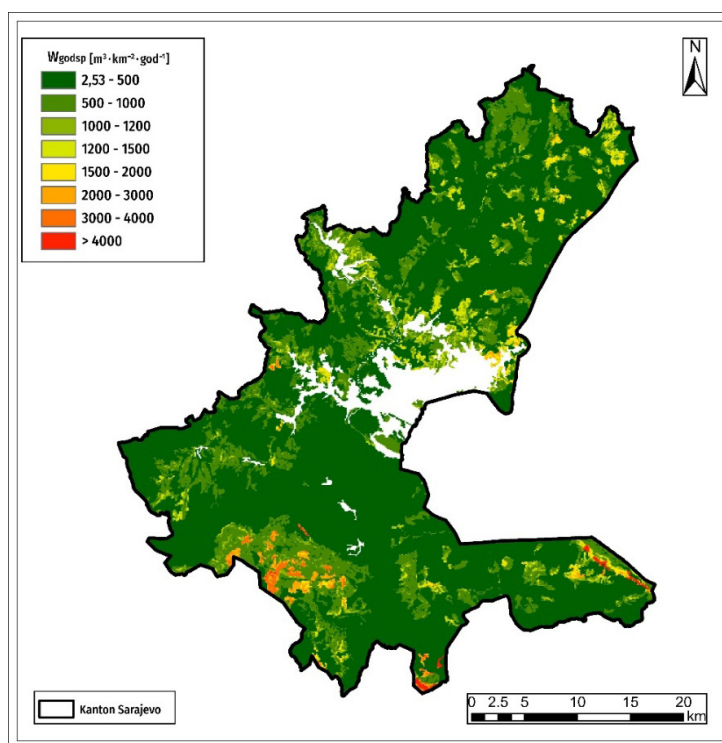
Ukupno posmatrano, rezultati validacije modela i analiza korelacije potvrđuju da je kalibracija parametara na osnovu terenskih istraživanja značajno unapredila pouzdanost procene erozionog potencijala. Dobijena visoka ukupna tačnost i logične korelacione veze između ključnih

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

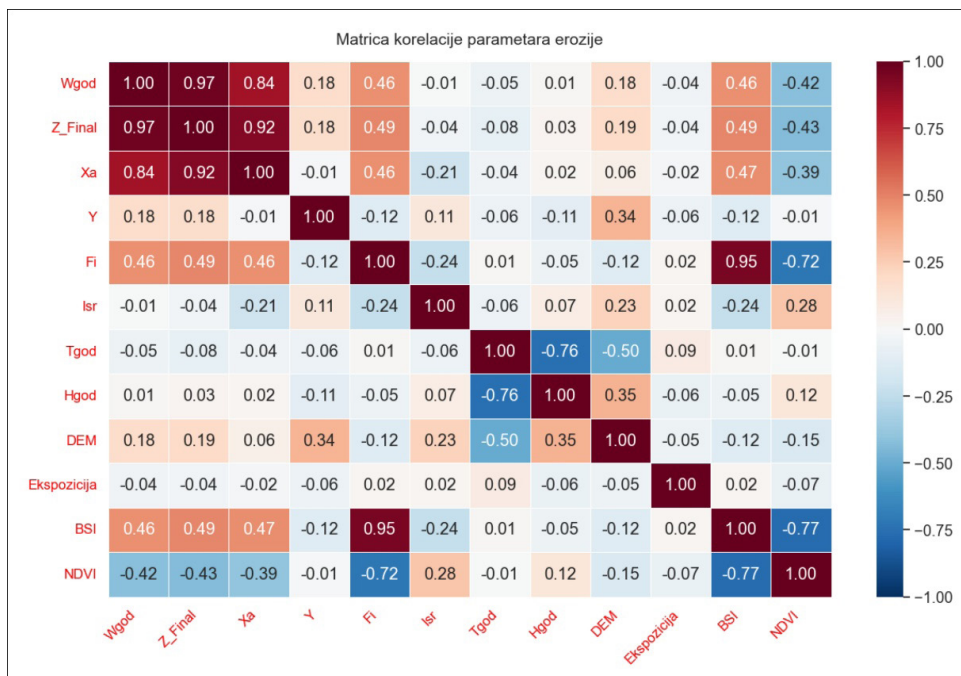


Slika 8 Kategorija specifične produkcije erozionog materijala na području Kantona Sarajevo

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.