

UDK: 556:004(497.11)
DOI: 10.5937/LSPUPNXI26197V
Pregledni naučni rad

SAVREMENE TEHNOLOGIJE U PLANIRANJU VODNIH RESURSA REPUBLIKE SRBIJE

Aleksandar Valjarević¹

Apstrakt: Rečni sistemi u Srbiji tokom poslednjih decenija izloženi su intenzivnim pritiscima usled urbanizacije, industrijskog razvoja, klimatskih ekstrema i nedovoljne infrastrukture za prečišćavanje otpadnih voda. Ovo istraživanje kombinuje napredne GIS metode i metode daljinske detekcije sa dostupnim prostornim digitalnim i analognim podacima u analizi stanja nadzemnih i podzemnih voda. Analiza je zasnovana na podacima otvorenog koda, digitalnim modelima reljefa, satelitskim snimcima Sentinel-2 i Landsat 9, kao i dugoročnim hidrološkim i demografskim podacima. Primenjene su metode zonalne statistike, Kernel Density Estimation, kriginga i višekriterijumske GIS analize. Rezultati pokazuju da je rečni koridor Dunav–Sava–Morava najugroženija zona hidrološke degradacije i zagađenja, naročito u okolini Beograda, Pančeva, Novog Sada i Niša. Manji slivovi Nišave i Timoka posebno su osetljivi zbog ograničene kontrole i nedekvatnog planiranja vodnih resursa. Projekcije do 2050. godine ukazuju na dalje pogoršanje stanja ukoliko se ne unapredi upravljanje vodama i infrastruktura za prečišćavanje otpadnih voda. Integracija naprednih GIS metoda, daljinske detekcije i numeričke analize pokazuje se kao pouzdana osnova za bolje upravljanje i zaštitu vodnih resursa u Srbiji.

Ključne reči: GIS analiza; daljinska detekcija; zagađenje voda; rečni slivovi Srbije; upravljanje vodnim resursima

SAVREMENE TEHNOLOGIJE U PLANIRANJU VODNIH RESURSA REPUBLIKE SRBIJE

Abstarct: River systems in Serbia have been exposed to intense pressures over recent decades due to urbanization, industrial development, climate extremes, and insufficient wastewater treatment infrastructure. This study combines advanced GIS methods and remote sensing techniques with available spatial digital and analog data to analyze the condition of surface and groundwater resources. The analysis is based on open-access data, digital elevation models, Sentinel-2 and Landsat 9 satellite imagery, as well as long-term hydrological and demographic datasets. Methods applied include zonal statistics, Kernel Density Estimation, kriging, and multi-criteria GIS analysis. The results indicate that the Danube–Sava–Morava river corridor represents the most vulnerable zone of hydrological degradation and pollution, particularly in the vicinity of Belgrade, Pančevo, Novi Sad, and Niš. Smaller catchments such as the Nišava and Timok are especially sensitive due to limited control measures and inadequate water resource planning. Projections up to 2050 suggest

¹ Univerzitet u Beogradu, Geografski fakultet, Studentski trg 3/III, 11000 Beograd, Srbija, email: aleksandar.valjarevic@gef.bg.ac.rs

further deterioration if water management practices and wastewater treatment infrastructure are not improved. The integration of advanced GIS methods, remote sensing, and numerical analysis proves to be a reliable basis for improved management and protection of water resources in Serbia.

Keywords: GIS analysis; remote sensing; water pollution; river basins of Serbia; water resource management

UVOD

U savremenim uslovima globalnih klimatskih promena i intenzivnog socio-ekonomskog razvoja, vodni resursi predstavljaju jedan od ključnih faktora održivog razvoja i ekološke stabilnosti. Rečni i podzemni sistemi u mnogim regionima sveta, pa tako i u Republici Srbiji, izloženi su višestrukim pritiscima koji proizilaze iz urbanizacije, industrijalizacije, poljoprivredne ekspanzije i promena u klimatskim režimima. Ovi procesi dovode do kompleksnih promena u hidrologiji, uključujući smanjenje drenažne gustine, fragmentaciju rečnih mreža, degradaciju kvaliteta voda i povećanu učestalost ekstremnih hidroloških događaja (Zhou, 2014).

Republika Srbija, kao geografski prostor koji se nalazi na preseku tri velika slivna sistema (Crno more, Jadransko more i Egejsko more), poseduje izrazito složen i dinamičan hidrološki sistem. Dominantni deo teritorije pripada slivu Dunava, koji zajedno sa svojim pritokama (Sava, Tisa, Velika Morava, Drina) predstavlja osnovu hidrografske stabilnosti zemlje. Ovi rečni sistemi imaju ključnu ulogu u snabdevanju vodom, razvoju poljoprivrede, energetici, industriji i urbanom razvoju. Međutim, upravo duž ovih koridora dolazi do najveće koncentracije urbanih i industrijskih aktivnosti, što ih čini najugroženijim delovima hidrološkog Sistema (Valjarević i dr. 2025).

U poslednjih nekoliko decenija, proces urbanizacije u Srbiji intenzivno se razvijao, naročito u velikim gradovima kao što su Beograd, Novi Sad i Niš, kao i duž glavnih transportnih i ekonomskih koridora. Ova prostorna koncentracija stanovništva i industrije dovela je do značajnog povećanja pritiska na vodne resurse. Transformacija prirodnih površina u urbane zone uzrokuje povećanje nepropusnih površina, smanjenje infiltracije i povećanje površinskog oticanja, što direktno utiče na hidrološki režim i povećava rizik od poplava. Istovremeno, povećana proizvodnja otpadnih voda, često bez adekvatnog tretmana, dovodi do ozbiljne degradacije kvaliteta površinskih i podzemnih voda.

Poseban problem predstavlja činjenica da se veliki procenat komunalnih i industrijskih otpadnih voda u Srbiji i dalje ispušta direktno u rečne sisteme bez prethodnog prečišćavanja. Ovakva praksa dovodi do akumulacije zagađujućih materija, uključujući teške metale, organske polutante i nutrijente, što ima dugoročne negativne posledice po ekosisteme, biodiverzitet i zdravlje stanovništva. Rečni sistemi, koji su nekada predstavljali prirodne regulatore i samopročišćavajuće sisteme, danas sve više gube tu funkciju usled prekomernog opterećenja (Wang i Yu, 2013).

Pored antropogenih faktora, klimatske promene dodatno komplikuju stanje vodnih resursa. Povećanje temperature, promena režima padavina, učestalije suše i ekstremni hidrološki događaji utiču na raspoloživost vode i stabilnost hidroloških sistema. U Srbiji su u poslednjih nekoliko decenija zabeleženi brojni ekstremni događaji, uključujući dugotrajne suše, nagle poplave i smanjenje rečnih proticaja. Ove promene utiču ne samo na količinu, već i na kvalitet vode, dodatno povećavajući ranjivost vodnih sistema.

U tom kontekstu, savremene tehnologije, posebno Geografski Informacioni Sistem (GIS) i daljinska detekcija (Remote Sensing), predstavljaju ključne alate za analizu, modelovanje i upravljanje vodnim resursima. GIS omogućava integraciju velikog broja

prostornih podataka, uključujući topografske, hidrološke, demografske i industrijske informacije, čime se stvara sveobuhvatan okvir za razumevanje složenih interakcija između prirodnih i antropogenih faktora. Daljinska detekcija, sa druge strane, omogućava kontinuirano praćenje promena u prostoru kroz satelitske snimke visoke rezolucije (Islam, 2014).

Primena naprednih GIS metoda, kao što su Kernel Density Estimation (KDE), zonalna statistika, geostatistička interpolacija i višekriterijumske analize, omogućava preciznu identifikaciju zona visokog rizika, detekciju prostornih obrazaca degradacije i predikciju budućih promena. Integracija ovih metoda sa demografskim i klimatskim podacima omogućava razvoj pouzdanih modela za procenu uticaja urbanizacije na vodne resurse.

Cilj ovog rada je da analizira uticaj urbanizacije i industrijalizacije na vodne resurse Srbije primenom savremenih GIS i Remote Sensing metoda, sa posebnim fokusom na prostorne obrasce degradacije rečnih sistema. Istraživanje obuhvata analizu promena u drenažnoj gustini, identifikaciju industrijskih i urbanih "hotspot" zona, kao i projekcije budućih trendova do 2050. godine. Poseban akcenat stavljen je na integraciju različitih prostornih i vremenskih podataka kako bi se dobila sveobuhvatna slika stanja i dinamike vodnih resursa. Ovaj rad doprinosi razumevanju kompleksnih odnosa između urbanog razvoja i hidroloških sistema i pruža naučnu osnovu za donošenje odluka u oblasti upravljanja vodnim resursima, prostornog planiranja i zaštite životne sredine. Rezultati istraživanja mogu poslužiti kao osnova za razvoj strategija održivog upravljanja vodama, posebno u uslovima sve izraženijih klimatskih promena i rastućih socio-ekonomskih pritisaka (Sharifi i Hosseingholizadeh, 2019).

U poslednjih nekoliko decenija, teritorija Srbije suočava se sa intenzivnim procesima urbanizacije i industrijalizacije koji direktno utiču na hidrografske sisteme. Rečni sistemi, koji predstavljaju osnovu ekološke stabilnosti i ekonomskog razvoja, postaju sve ugroženiji zbog povećanog pritiska ljudskih aktivnosti. Prema dostupnim podacima, više od 80–85% otpadnih voda u Srbiji se ispušta bez tretmana, što značajno utiče na kvalitet površinskih i podzemnih voda. Urbanizacija duž glavnih rečnih koridora dovodi do fragmentacije rečne mreže i smanjenja drenažne gustine.

METODOLOGIJA

Metodološki pristup ovog istraživanja zasniva se na integraciji Geografskog Informacionog Sistema (GIS) i Remote Sensing (RS) tehnika, uz primenu hidrološkog modelovanja, geostatistike i metoda mašinskog učenja u cilju analize prostorno-vremenskih promena vodnih resursa u Republici Srbiji. Korišćeni su višeslojni podaci, uključujući digitalne modele reljefa (DEM, 30 m rezolucije), satelitski snimci (Sentinel-2 i Landsat 9), topografske karte za rekonstrukciju istorijskih rečnih mreža, kao i demografske i industrijske prostorne baze podataka. DEM podaci su obrađeni primenom standardnih hidroloških algoritama (pravac toka, akumulacija toka, ekstrakcija vodotokova i delinacija slivova), dok je rečna mreža analizirana kroz više vremenskih preseka uz primenu Strahlerove klasifikacije i izračunavanje parametara kao što su drenažna gustina, dužina vodotokova i fragmentacija mreže. Prostorni uticaj urbanizacije i industrijalizacije kvantifikovan je kroz zonalnu statistiku unutar definisanih tampon zona (500 m, 1000 m i 2000 m), dok je Kernel Density Estimation (KDE) metoda korišćena za identifikaciju „hotspot“ zona antropogenog pritiska. Višekriterijumska analiza (MCA) omogućila je integraciju prirodnih i antropogenih faktora u jedinstvenu kartu ranjivosti vodnih resursa, uz ponderisanje kriterijuma prema njihovom relativnom značaju. Dodatno, primenjene su regresione i geostatističke metode za analizu odnosa između varijabli i identifikaciju dugoročnih trendova, dok su modeli mašinskog učenja (Random Forest i Support Vector Machine) korišćeni za unapređenje klasifikacije i predikciju budućih promena do 2050. godine, pri čemu je validacija rezultata izvršena poređenjem sa dostupnim hidrološkim i statističkim podacima (Valjarević, 2024).

REZULTATI

Rezultati istraživanja ukazuju na izražene prostorne i vremenske promene u strukturi i stabilnosti rečnih sistema u Republici Srbiji pod uticajem urbanizacije i industrijalizacije. Analiza višedecenijskih podataka (1983–2023) pokazuje značajno smanjenje drenažne gustine i fragmentaciju rečne mreže, posebno u zonama intenzivnog urbanog razvoja. Na nacionalnom nivou, prosečna drenažna gustina smanjena je sa 1.45 km/km² (1983) na 1.32 km/km² (2023), što predstavlja pad od približno 9.0%. Najizraženije promene registrovane su u Vojvodini (-10.4%) i centralnoj Srbiji (-8.1%), dok su planinske oblasti pokazale nešto manji intenzitet degradacije (-7–8%). Ovi rezultati ukazuju na progresivnu simplifikaciju rečnih sistema i gubitak manjih pritoka, posebno u nizijskim, urbanizovanim područjima. Analiza tampon zona oko urbanih i industrijskih centara pokazuje jasnu korelaciju između intenziteta urbanizacije i degradacije hidrografskih parametara. U zonama do 500 m od urbanih centara, drenažna gustina je smanjena u proseku za 12–15%, dok u zonama od 1000–2000 m ovaj pad iznosi između 5–8%. Ovi rezultati potvrđuju da je uticaj urbanizacije prostorno koncentrisan i najizraženiji u neposrednoj blizini naselja i industrijskih zona.

Kernel Density Estimation (KDE) analiza identifikovala je nekoliko ključnih „hotspot” zona hidrološkog pritiska, uključujući područja Beograda, Novog Sada, Pančeva i Niša. U ovim zonama registrovana je visoka koncentracija industrijskih objekata i infrastrukturnih sistema, pri čemu se više od 70% industrijskih kapaciteta nalazi unutar 2 km od rečnih tokova, što značajno povećava rizik od zagađenja i hidromorfoloških promena. Rezultati višekriterijumske analize (MCA) ukazuju da su najugroženije oblasti koncentrisane duž koridora Dunav–Sava–Morava, gde se preklapaju visoka gustina stanovništva, intenzivna industrijska aktivnost i visoka dostupnost vodnih resursa. Ove zone pokazuju najviši indeks ranjivosti, što ih svrstava u kategoriju visokog rizika za buduću degradaciju (Do, 2025).

Regresiona analiza pokazala je statistički značajnu vezu između gustine stanovništva i smanjenja drenažne gustine ($R^2 \approx 0.72$), dok je uticaj industrijskih zona još izraženiji ($R^2 \approx 0.79$). Ovi rezultati potvrđuju dominantnu ulogu antropogenih faktora u transformaciji hidrografskih sistema.

Modeli mašinskog učenja (Random Forest i SVM) pokazali su visoku tačnost u klasifikaciji i predikciji promena, sa ukupnom preciznošću većom od 90%, čime je potvrđena pouzdanost primenjenog metodološkog pristupa. Projekcije do 2050. godine ukazuju na dalji pad drenažne gustine od dodatnih 8–10%, posebno u urbanim i industrijskim zonama, uz povećan rizik od gubitka manjih vodotokova i smanjenja hidrološke otpornosti. Ovi trendovi ukazuju na mogućnost dostizanja kritičnih pragova degradacije ukoliko se ne primene adekvatne mere upravljanja vodnim resursima (Tabela 1; Tabela 2; Tabela 3).

Tabela 1.

Region	1983 (km/km ²)	2023 (km/km ²)	Promena (%)
Vojvodina	1.25	1.12	-10.4
Centralna Srbija	1.48	1.36	-8.1
Južna Srbija	1.62	1.49	-8.0

Tabela 2.

Region	1983 (km/km ²)	2023 (km/km ²)	Promena (%)
Vojvodina	1.25	1.12	-10.4
Centralna Srbija	1.48	1.36	-8.1
Južna Srbija	1.62	1.49	-8.0

Tabela 3.

Udaljenost od reke	Udeo (%)
< 500 m	42
500–1000 m	28
1000–2000 m	18
> 2000 m	12

DISKUSIJA

Dobijeni rezultati jasno ukazuju na to da su urbanizacija i industrijalizacija dominantni faktori transformacije hidrografskih sistema u Republici Srbiji. Smanjenje drenažne gustine od približno 9% u periodu 1983–2023 potvrđuje dugoročni trend degradacije rečne mreže, koji je posebno izražen u nizijskim i urbanizovanim regionima. Ovakvi rezultati su u skladu sa savremenim istraživanjima koja ukazuju da intenzivna urbanizacija dovodi do fragmentacije vodotokova, gubitka manjih pritoka i promene prirodne hidromorfologije rečnih sistema. Posebno značajan nalaz odnosi se na prostornu koncentraciju negativnih uticaja u zonama neposredno uz urbana i industrijska područja. Rezultati zonalne statistike pokazuju da se najveće promene javljaju unutar 500 m od urbanih centara, što potvrđuje hipotezu da je antropogeni uticaj lokalno intenzivan i direktno povezan sa prostornim rasporedom naselja i industrije. Ova pojava se može objasniti povećanjem nepropusnih površina, regulacijom vodotokova, kao i infrastrukturnim intervencijama koje menjaju prirodne tokove i smanjuju infiltraciju. Identifikacija „hotspot” zona pomoću KDE metode dodatno potvrđuje da se hidrološki pritisci prostorno grupišu duž glavnih razvojnih koridora, posebno u zoni Dunav–Sava–Morava. Ovi koridori predstavljaju ključne ekonomske i demografske osovine razvoja, ali istovremeno i najranjivije delove hidrološkog sistema. Visoka koncentracija industrijskih objekata u blizini vodotokova (više od 70% unutar 2 km) ukazuje na nedostatak adekvatnog prostornog planiranja i zaštitnih zona, što značajno povećava rizik od zagađenja i degradacije vodnih resursa (Habersack i dr. 2016; Zhao i dr. 2022).

Rezultati višekriterijumske analize ukazuju na kompleksnu interakciju prirodnih i antropogenih faktora u određivanju ranjivosti vodnih resursa. Dok prirodni faktori, kao što su reljef i geološka struktura, određuju osnovne karakteristike hidrološkog sistema, antropogeni faktori imaju ključnu ulogu u ubrzavanju procesa degradacije. Ova interakcija posebno dolazi do izražaja u nizijskim i periurbanim zonama, gde se preklapaju visoka gustina stanovništva, intenzivna industrijska aktivnost i visoka dostupnost vodnih resursa. Statistički rezultati ($R^2 \approx 0.72\text{--}0.79$) potvrđuju snažnu povezanost između antropogenih faktora i promena u hidrografskom sistemu, što dodatno naglašava potrebu za integrisanim

pristupom upravljanju vodnim resursima. U tom kontekstu, primena GIS i Remote Sensing tehnologija pokazuje se kao izuzetno efikasan alat za identifikaciju rizičnih zona i podršku donošenju odluka. Važan aspekt diskusije odnosi se i na buduće projekcije, koje ukazuju na nastavak negativnih trendova do 2050. godine. Očekivani dodatni pad drenažne gustine i povećanje hidrološke nestabilnosti ukazuju na mogućnost dostizanja kritičnih pragova degradacije, što može imati ozbiljne posledice po ekosisteme, poljoprivredu i vodosnabdevanje. Klimatske promene dodatno pojačavaju ove procese kroz povećanu učestalost suša, ekstremnih padavina i varijabilnost hidroloških režima.

U poređenju sa sličnim istraživanjima u Evropi i svetu, rezultati ovog rada potvrđuju univerzalni obrazac degradacije rečnih sistema pod uticajem urbanizacije, ali istovremeno ukazuju na specifične izazove karakteristične za Srbiju. Neki od njih su nedovoljno razvijena infrastruktura za prečišćavanje otpadnih voda i slab institucionalni okvir za upravljanje vodnim resursima. Ovi faktori dodatno povećavaju ranjivost hidroloških sistema i zahtevaju hitne i sistemske mere (Prodanova i dr. 2024).

ZAKLJUČAK

Rezultati ovog istraživanja jasno potvrđuju da urbanizacija i industrijalizacija predstavljaju ključne pokretače degradacije vodnih resursa u Republici Srbiji. U periodu 1983–2023 zabeležen je značajan pad drenažne gustine i fragmentacija rečne mreže, posebno u zonama intenzivnog urbanog razvoja i duž glavnih ekonomskih koridora. Prostorna analiza pokazuje da su najugroženiji regioni koncentrisani duž ose Dunav–Sava–Morava, gde dolazi do preklapanja visoke gustine stanovništva, industrijskih aktivnosti i dostupnosti vodnih resursa. Primena savremenih GIS i metoda daljinske detekcije omogućila je preciznu identifikaciju prostornih obrazaca degradacije, kao i kvantifikaciju uticaja antropogenih faktora na hidrografski sistem. Dobijeni rezultati ukazuju na snažnu povezanost između urbanog razvoja i promena u strukturi rečnih mreža, što potvrđuju i statistički i modelni pristupi. Projekcije do 2050. godine dodatno naglašavaju rizik od nastavka negativnih trendova, uključujući dalji gubitak manjih vodotokova i smanjenje hidrološke otpornosti. Istraživanje ukazuje da bez implementacije adekvatnih mera upravljanja, uključujući razvoj infrastrukture za prečišćavanje otpadnih voda, unapređenje prostornog planiranja i primenu savremenih tehnologija za monitoring, može doći do dostizanja kritičnih pragova degradacije vodnih resursa. Integracija GIS, daljinske detekcije i modelovanja predstavlja ključni alat za održivo upravljanje vodama i donošenje pravilnih odluka.

LITARATURA

- Do, A.N.T. (2025) GIS and remote sensing for landscape fragmentation and disaster risk. *J Indian Soc Remote Sens*. <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02282-0>
- Habersack, H., Hein, T., Stanica, A., et al. (2016) Challenges of river basin management: the Danube. *Sci Total Environ* 543:828–845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.123>
- Islam, M.S., Rana, M.M.P., Ahmed, R. (2014) Environmental perception during rapid population growth and urbanization. *Environ Dev Sustain* 16:443–453. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9486-5>
- Prodanova, H., Nedkov, S., Petrov, G. (2024) GIS-based modelling of landscape patterns using climate indices. *Environ Model Softw* 180:106160. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106160>
- Sharifi, A., Hosseingholizadeh, M. (2019) Urban expansion and destruction of green space in Tehran. *J Indian Soc Remote Sens* 47:1063–1071. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00966-y>

Valjarević, A. (2024) GIS-based methods for identifying river network types and changing river basins. *Water Resour Manage* 38:5323–5341. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03916-7>

Valjarević, A., Morar, C., Brasanac-Bosanac, L., et al. (2025) 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>

Wang, C., Yu, C. (2013) Detection of chemical pollutants in water using gold nanoparticles as sensors: A review. *Rev Anal Chem* 32(1):1–14. <https://doi.org/10.1515/revac-2012-0023>

Zhao, P., Masoumi, Z., Kalantari, M., et al. (2022) GIS-based landslide susceptibility mapping using AI. *Remote Sens* 14(1):211. <https://doi.org/10.3390/rs14010211>

Zhou, Q. (2014) A review of sustainable urban drainage systems considering climate change and urbanization impacts. *Water* 6(4):976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>