

PRILOG PROUČAVANJU DINAMIKE TRANSPORTA SUSPENDOVANOG NANOSA KAO POSLEDICE PROMENA U ŽIVOTNOJ SREDINI

**Sanja Manojlović¹, Tanja Srejić¹, Mikica Sibinović¹,
Ivana Carević¹, Natalija Batočanin¹**

Apstrakt: Prostorno-vremenska dinamika suspendovnog nanosa u rekama širom sveta u fokusu je istraživanja naučnika od sredine 20. veka. Posebna pažnja vidno izražena u protekla dve decenije 21. veka usmerena je na procenu uticaja klimatskih promena i antropogenog faktora na režim nanosa. Razumevanje režima suspendovanog nanosa je ključni preduslov adekvatnog upravljanja vodnim resursima. Pored istraživanja na globalnom novou, pojedine zemlje razvile su adekvatne nacionalne programe upravljanja rečnim geosistemima u kojima su inkorporirale monitoring suspendovanog nanosa kao jedan od primarnih faktora praćenja promena u životnoj sredini. Značaj proučavanja sedimenata u rekama je višestruk. Promene u režimu nanosa imaju direktne reprekusije na stanje i kvalitet vodnih ekosistema, posledice pojave poplavnih talasa, sa posebnim uticajem na povećanje troškova prečišćavanja voda, postojeća energetska postrojenja i vodne akumulacije. U ovom radu dat je novi pristup vremenskoj determinaciji transporta suspendovanog nanosa, kao i uticaj antropogenog faktora sa aspekta promene načina korišćenja zemljišta na režim nanosa za dugoročne vremenske serije.

Ključne reči: vodni resursi, suspendovani nanos, antropogeni uticaji, promene načina korišćenja zemljišta

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DYNAMICS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AS A CONSEQUENCE OF CHANGES IN THE ENVIRONMENT

Abstract: Spatiotemporal dynamics suspendovnog sediment in rivers around the world to focus on the research of scientists from the mid-20th century. Special attention expressed in the past two decades of the 21st century is focused on the assessment of the impact of climate change and anthropogenic factors on the sediment regime. Understanding the suspended sediment regime is a key prerequisite for adequate management of water resources. In addition to research on the global level, some countries have developed national programs for the management of river geosystems which are incorporated monitoring suspended sediment as one of the primary factors for monitoring of environmental changes. The importance of the study of sediments

¹ Univerzitet u Beogradu – Geografski fakultet, Studentski trg 3/3, Beograd, Srbija, E-mail adrese: sanja.manojlovic@gef.bg.ac.rs; tanja.srejjic@gef.bg.ac.rs; mikica.sibinovic@gef.bg.ac.rs; ivana.carevic@gef.bg.ac.rs; natalija.batocanin@gef.bg.ac.rs;

in rivers is multifaceted. Changes in sediment regime have direct repercussions on the condition and quality of aquatic ecosystems, the consequences of the occurrence of flood waves, with special impact on increasing the cost of waste water, the existing power plants and water reservoirs. This study presents a new approach to temporal determination in the transport of suspended sediment, as well as what is the impact of anthropogenic factors from the aspect of land use change on the sediment regime for long-term time series.

Key words: water resources, suspended sediment, anthropogenic factor, land use change

UVOD

Promene u dinamici suspendovanog nanosa tokom vremena proučavane su za mnoge rečne sisteme širom sveta. Prostorna i vremenska varijabilnost koncentracija suspendovanoga nanosa i pronosa suspendovanog nanosa u fokusu su savremenih istraživanja kako na globalnom, tako i na regionalnom i lokalnom nivou. Režim sedimenta u rekama snažno je regulisan sa dva ključna faktora: uticajem klimatskih promena i antropogenim uticajima. Waling ističe da je režim nanosa poslednjih decenija snažno regulisan različitim uticajima antropogenog faktora, a manje klimatskim promenama, što je dovelo do drastičnog smanjenja istog u rečnim sistemima, kao odgovor na značajne promene u životnoj sredini (Walling, 2006). Različite studije širom sveta pokazale su da je smanjenje pronosa nanosa u rekama nastao kao rezultat različitih programa i konzervacijskih mera sprovedenih u slivu u funkciji kontrole sedimanata (Walling, Fang, 2003; Wang et al., 2017). Takođe, kao ključni uticaji izdvajaju se različiti socioekonomski faktori, izgradnja brana, odnosno vodnih akumulacija, rudarske aktivnosti ili preusmeravanje vode i uticaj drugih građevinskih i infrastrukturnih objekata (Bobrovitskaya et al., 2003; Panda et al., 2011; Zhang et al., 2020; Guo et al., 2019; Zhong et al., 2020).

Južna Morava je odabrana kao proučavano područje u ovom istraživanju, kao jedan od najvećih slivova u Srbiji. Sliv zahvata površinu od 15469 km². Nastaje od Binačke Morave i Preševske Moravice na nadmorskoj visini od 392 m u blizini Bujanovca. Ukupna dužina reke Južne Morave je 234,3 km (Langović, 2020). Dolina Južne Morave jedan je od regiona najizloženijih suši sa zabeleženim najdužim toplotnim talasima (Unkašević, Tošić, 2009; Gocić, Trajković, 2014; Urošev et al., 2016; Trajković et al., 2020). Prosečna godišnja količina padavina kreće se u rasponu od 550 mm do 1300 mm (Milovanović et al., 2017). Pritoke Južne Morave imaju karakter bujica, a na njima su registrovane neke od najrazornijih bujičnih poplava u Srbiji u poslednjih sto godina (Petrović et al., 2014). Imajući u vidu geomorfološke, hidrološke i klimatske karakteristike sliva, proučavanje režima nanosa može se definisati kao jedna od fundamentalnih zadataka. Razumevanje režima suspendovanog nanosa je ključni preduslov adekvatnog upravljanja vodnim resursima i fluvijalnim sistemima. Utvrđivanje promena u koncentraciji suspendovanog nanosa u rekama ističe se kao centralna tema, jer može uticati na smanjenje ili povećanje zamućenosti vodotokova, što se reprekusira na stanje i kvalitet vodnih ekosistema, povećanje troškova prečišćavanja voda, može doprineti zapušavanju kanala i uticati na pojavu poplavnih talasa.

U tom kontekstu osnovni cilj ovog rad je: 1. prikaz metodološkog postupka determinacije vremenskih serija za koncentracije suspendovanog nanosa (SSC) i pronosa suspendovanog nanosa (Qs); 2. utvrđivanje trenda navedenih parametara za izdvojene vremenske serije; 3. utvrđivanje veze između promena u režimu nanosa sa jedne strane i socioekonomskih promena, odnosno promena u načinu korišćenja zemljišta i demografskih procesa sa druge strane.

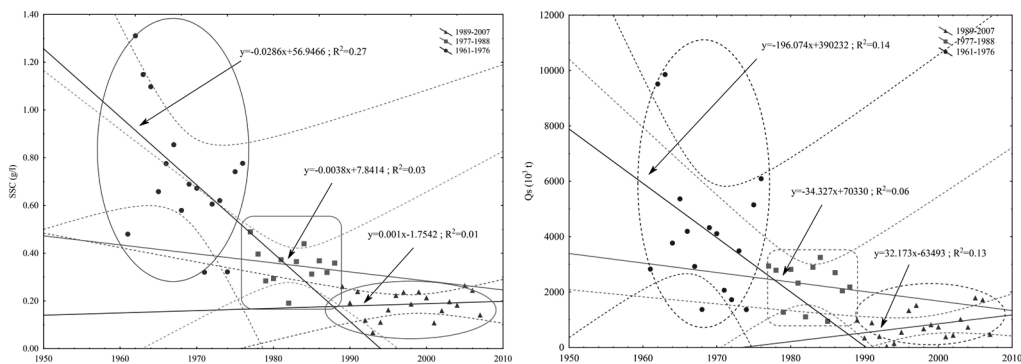
VREMENSKA VARIJABILNOST SUSPENDOVANOG NANOSA

U svetskoj naučnoj literaturi za determinaciju dugoročnih vremenskih serija kod proučavanja dinamike i transporta suspendovanog nanosa figurira nekoliko metoda. Najčešće se široko preporučuje i generalno primenjuje neparametarski Pettitt test za identifikovanje tačke promene

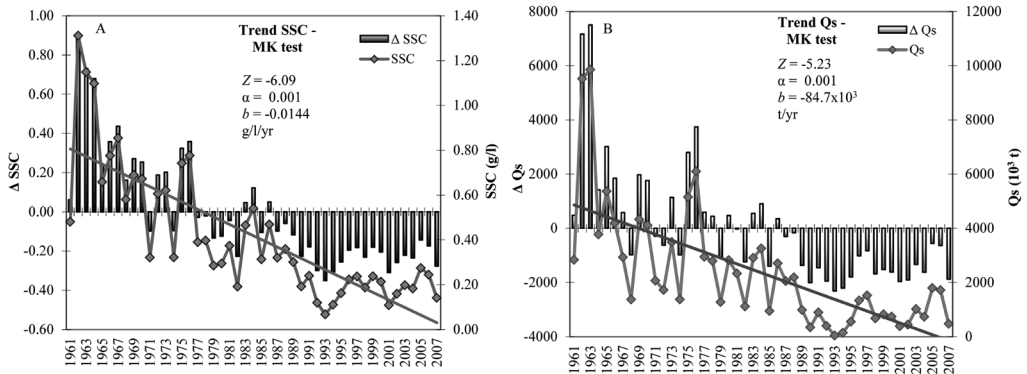
na odredenom nivou statističke značajnosti, koji vremensku seriju deli na dva perioda (Pettitt, 1979). U studiji (Dai et al., 2016) metod percentila korišćen je za determinaciju vremenskih serija za koncentracije (SSC) i pronos suspendovanog nanosa (Qs). Dugoročne serije godišnjih vrednosti SSC i Qs su podeljene na tri perioda prema indeksu 25. i 75. percentila. Godišnji SSC i Qs veći od 75. percentila predstavlja prag visokog intenziteta, dok godišnja vrednost SSC i Qs manja od 25. percentila predstavlja prag niskog intenziteta. Standardna devijacija se široko primenjuje u determinaciji vremenskih serija u klimatološkim i hidrološkim istraživanjima, pre svega za klasifikaciju godina na vlažne, sušne i normalne uzimajući u obzir godišnju količinu padavina (Kutiel et al., 2015), kao i hidrološku kategorizaciju godina prema vrednostima proticaja (Đokić, 2015) preko SDI indeksa (Nalbantis, 2008; Leščešen et al., 2020)

U ovom radu za determinaciju vremenskih serija SSC i Qs izabrani su pragovi prema vrednostima standarde devijacije (δ). Ovaj metodološki postupak determiniše godine na visoke, srednje i niske vrednosti SSC i Qs. Konkretno, godina sa prosečnim godišnjim SSC/godišnjim Qs vrednostima većim od $SSC+0,5\delta/Qs+0,5\delta$ predstavljena je kao događaj visokog intenziteta, odnosno godina sa prosečnim godišnjim SSC/godišnjim Qs vrednostima manjim od $SSC-0,5\delta/Qs-0,5\delta$ predstavljena je kao događaj niskog intenziteta. Drugim rečima, korišćenjem metoda standardne devijacije izvršena je klasifikacija godina u tri kategorije: I godine sa visokim vrednostima SSC ili Qs kada je $\delta < -0,5$; II godine sa srednjim vrednostima SSC ili Qs kada je $-0,5 \leq \delta \leq 0,5$ i III godine sa niskim vrednostima SSC ili Qs kada je $0,5 < \delta$.

Prema navedenoj metodološkom pristupu, godine visokih vrednosti definisane su pragovima za SSC iznad 0,557 g/l, a za Qs iznad 3464×10^3 t. Pragovi za godine niskih vrednosti definisane su iznosom SSC ispod 0,2678 g/l, a za Qs iznosom ispod 1323×10^3 t. U tom kontekstu, dugoročne serije srednjih godišnjih vrednosti SSC i godišnjih vrednosti Qs su podeljene u tri vremenska perioda. Prosečni godišnji SSC i Qs veći od $SSC+0,5\delta$ ili $Qs+0,5\delta$ uglavnom su se javljali pre 1976. godine, a prosečni godišnji SSC i Qs manji od $SSC-0,5\delta$ ili $Qs-0,5\delta$ javljali su se nakon 1988 (grafik 1).



Grafik 1. Skater-plot dijagram vremenske varijabilnosti koncentracija suspendovanog nanosa SSC-mg/l (levo) i pronosa suspendovanog nanosa Qs-t (desno). Rezultati regresione analize na nivou poverenja od 0,99.



Grafik 2. Trendovi koncentracije suspendovanog nanosa i pronosa suspendovanog nanosa. (ΔSSC i ΔQ_s - odstupanje godišnjih vrednosti SSC i Q_s od srednjih višegodišnje vrednosti i trendovi datih parametara; Z - Mann-Kendall trend; α - nivo značajnosti; b - Senov nagib).

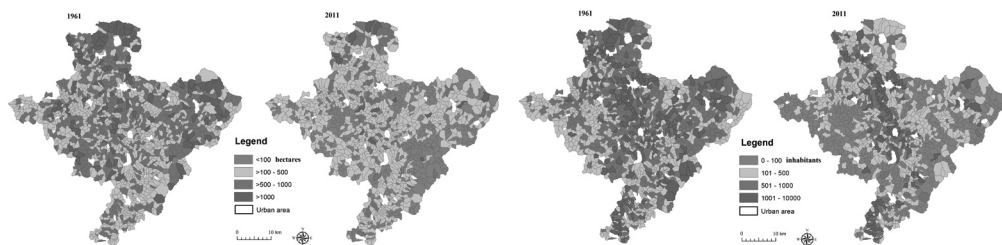
Za određivanje trendova SSC i Q_s u dugoročnom periodu 1961-2007 (grafik 2) i za odvojena tri perioda 1961-1976, 1977-1988 i 1989-1990 (grafik 2) primenjen je Man-Kendal test (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1975) i linearna regresiona analiza. Generalno, godišnja koncentracija suspendovanog nanosa i pronos suspendovanog nanosa u Južnoj Moravi značajno su se smanjili od 1961. godine do 2007. godine. SSC i Q_s smanjili su se na nivou značajnosti $\alpha=0,001$, sa prosečnom godišnjom stopom smanjenja $SSC=0,0144$ g/l/god i $Q_s=84,7 \times 10^3$ t/god (Manojlović et al., 2021). Vrednosti Z statistike ukazuju na izraženiji trend smanjenja SSC. Prosečne vrednosti SSC za navedena tri perioda iznose: $SSC=0,7284$ g/l, $SSC=0,3580$ g/l, $SSC=0,1865$ g/l. Prosečne vrednosti Q_s $Q_s=4260 \times 10^3$ t, $Q_s=2277 \times 10^3$ t, $Q_s=789 \times 10^3$ t. U prvom periodu 1961-1976. SSC i Q_s trendovi nisu u skladu sa hidrološkim i klimatskim uslovima. SSC i Q_s predstavljaju trend smanjenja, sa većim nagibom regresije u SSC. U drugom periodu između 1977. i 1988, SSC i Q_s takođe imaju trend smanjenja, ali nagib linija regresije je neznatan. U trećem periodu 1989-2007, godišnji SSC je stabilan. U istom periodu Q_s pokazuje tendenciju povećanja, što je u skladu sa hidrološkim i klimatskim uslovima. Povećani transport Q_s u ovom trećem periodu povezan je sa godinama u kojima je ispuštanje vode bilo iznad prosečnih dugoročnih vrednosti, koje se klasifikuju kao umereno vlažne i vrlo vodene godine, a prema količini padavina pripadaju vlažnim godinama.

Prosečna koncentracija suspendovanog sedimenta i opterećenje sedimenta je $SSC=0,4148$ g/l i $Q_s=2351 \times 10^3$ t tokom dugoročnog perioda. Varijacija SSC i Q_s od prosečnih vrednosti dugoročnih perioda prikazana je kao vremenska serija (grafik 2A i grafik 2B). Jasno su uočljiva velika odstupanja od prosečnih dugoročnih vrednosti. Naročito je izražen period od 1987. do 2007. godine, u kojem su pojedinačne godišnje vrednosti SSC i Q_s znatno ispod vrednosti višegodišnjeg proseka.

UTICAJ ANTROPOGENOG FAKTORA NA REDUKCIJU SUSPENDOVANOG NANOSA

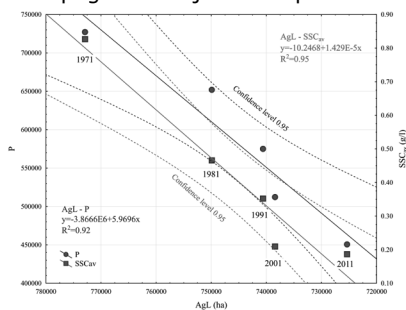
Nedavna istraživanja pokazala su da su promene u pronosu suspendovanog nanosa u reci Južnoj Moravi uglavnom bile pod utjecajem ljudskih aktivnosti (89%), dok su padavine objasnile 11% smanjenja pronosa suspendovanog nanosa (Manojlović et al., 2021). U ovom radu uticaj antropogenog faktora na smanjenje suspendovanog sedimenta u slivu razmatran je sa aspekta procesa deagrarizacije.

Proces deagrarizacije ogleda se u smanjenju poljoprivrednih površina. Zbog intenziviranja industrijske proizvodnje i potrebe za radnom snagom u gradovima, radnosposobno stanovništvo iz ruralnih naselja se preseljavalo u gradove u okruženju ili neke veće regionalne centre sve do početka 1990-ih (Grčić, Ratkaj, 2006; Sibinović, 2018). Zapravo, procesi depopulacije ruralnih naselja započeti su 1960-ih godina (Đurić, 1989), a postali su karakteristično obeležje ovog dela Srbije sredinom 1970-ih i 1980-ih (Jeftić, 2019). U periodu posle 1990. godine, migracije stanovništva na relaciji selo-grad su i dalje izražene, ali znatno slabijeg intenziteta (Martinović et al., 2010). Rezultat višedecenijskog trajanja procesa depopulacije je kontinuirana fragmentacija ruralnih naselja (Lukić, 2013). Prema popisu stanovništva iz 2011. godine u čak 40 % ruralnih naselja u slivu Južne Morave živelo je manje od 100 stanovnika, naspram samo 2% prema popisu iz 1961. godine. S druge strane, udeo naselja sa populacijom većom od 500 stanovnika opao je sa 48 % iz 1961. godine na svega 20% u 2011. godini (grafik 3 levo). Paralelno sa smanjenjem obima poljoprivredne proizvodnje odvijao se i proces napuštanja radnointenzivnih poslova u poljoprivredi uz značajnu redukciju stočarstva (Isaković, Ševarić, 1996). Navedeni procesi imali su za posledicu fragmentaciju ruralnih naselja i sa aspekta udela poljoprivrednog zemljišta. Tako je 509 ruralnih naselja (38 % ruralnih naselja) 1961. godine raspolagalo sa više od 500 ha poljoprivrednog zemljišta, da bi se 2011. godine taj broj drastično smanjio na samo 76 naselja (oko 6% ukupnog broja ruralnih naselja). Specifičnost ovog prostora je izuzetno veliki broj naselja (40% od ukupnog broja ruralnih naselja) gde su površine pod poljoprivrednim zemljištem manje od 100 ha (grafik 3 desno).



Grafik 3. Distribucija ruralnih naselja prema udelu poljoprivrednog zemljišta (levo) i distribucija ruralnih naselja prema broju stanovnika (desno) 1961. i 2011. godine u slivu reke Južne Morave. Za naselja Kosova i Metohije nema dostupnih podataka i oni nisu obuhvaćeno analizom. Analiza je zasnovana na skupu podataka od 1.353 seoska naselja - Statistički godišnjaci Zavoda za statistiku Republike Srbije, za popisne godine 1961. i 2011. godine (RZSS)

Trendovi smanjenja ruralnog stanovništva i poljoprivrednog zemljišta direktno su povezani sa smanjenjem koncentracija suspendovanog nanosa. Statističke interakcije navedenih parametara prikazane su na grafiku 4. Koeficijent determinacije između poljoprivrednog zemljišta i ruralnog stanovništva od $R^2=0,92$ s jedne strane, i poljoprivrednog zemljišta i koncentracija suspendovanog nanosa sa druge strane $R^2=0,95$ pokazuju visok stepen povezanosti između antropogenih varijabli i suspendovanih sedimenata.



Grafik 4. Odnos između poljoprivrednog zemljišta (AgL), ruralnog stanovništva (P) i koncentracija suspendovanog nanosa (SSC). Podaci su bazirani na nivou desetogodišnjih popisnih pokazatelja za AgL i P, i srednjih vrednosti SSC za desetogodišnje vremenske serije. Regresiona analiza je statističke značajnosti od 0,05.

ZAKLJUČAK

Rezultati ovog rada ukazuju na dinamičke odnose između trenda smanjenja koncentracija i pronosa suspendovanog nanosa, promene poljoprivrednog zemljišta i procesa depopulacije ruralnih predela. Determinacija vremenskih serija suspendovanih sedimenata pokazala je koji su to vremenski periodi u kojima su nastale ključne promene u dinamici i transportu suspendovanog nanosa. Može se zaključiti da je smanjenje ruralnog stanovništva direktno uticalo na intenzivan proces deagrarizacije u ruralnim naseljima u slivu Južne Morave, što se na kraju odrazilo na smanjenje intenziteta erozije zemljišta i samim tim i na pronos suspendovanog nanosa. Ovakav interdisciplinarni pristup, koji inkorporira uzročno-posledične veze i odnose između procesa u fizičkoj geografiji i procesa u društvenoj geografiji, u proučavanju režima nanosa može poslužiti kao osnova za integrisano upravljanje rečnim slivovima.

LITERATURA

- Bobrovitskaya, N.N., Kokorev, A.V., & Lemeshko, N.A. (2003). Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 127-146.
- Dai, Z., Fagherazzi, S., Mei, X., & Gao, J. (2016). Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013. *Geomorphology*, 268, 123-132.
- Đokić, M. (2015). Nišava – potamološka studija. Niš: Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za geografiju, Doktorska disertacija.
- Đurić, V. (1989). Strukturne promene u korišćenju zemljišta u Republici Srbiji. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 69, 21-34.
- Gocić, M. & Trajković, S. (2014). Spatio-temporal patterns of precipitation in Serbia. *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 419-431.
- Grčić, M., & Ratkaj, I. (2006). Strukturne promene i regionalna diferencijacija industrije u peritodu tranzicije (1988-2005). *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 86(2), 97-112.
- Guo, L., Su N., Townend, I., Wang, Z.B., Zhu, C., Wang, X., Zhang, Y., & He, Q. (2019). From the headwater to the delta: A synthesis of the basin-scale sediment load regime in the Changjiang River. *Earth-Science Reviews*, 197, 1-19; DOI:10.1016/j.earscirev.2019.102900.
- Isaković, M., & Ševarlić, M. (1996). Neobrađene oranične površine u Srbiji. *Zbornik radova Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*, 46, 49-62.
- Jeftić, M. (2019). Funkcionalno urbani region u prostornom planiranju. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Geografski fakultet.
- Kendall, M.G. (1975). *Kendall Rank Correlation Methods*. London: Griffin.
- Kutić, H., Luković, J., & Burić, D. (2015). Spatial and temporal variability of rain-spells characteristics in Serbia and Montenegro. *International Journal of Climatology*, 35, 1611-1624.
- Langović, M. (2020). Istraživanje procesa lateralnog pomeranja obala na primeru reke Južne Morave (Srbija). *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 100(1), 1-21.
- Leščešen, I., Dolinaj, D., Pantelić, M., Telbisz, T., & Varga, G. (2020). Hydrological Drought Assessment of Tisza River. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA*, 70, 89-100.
- Lukić, V. (2013). Population Trends in Serbia and the Implications for Settlement System. *Forum Geographic*, 12, 67-74.

- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.
- Manojlović, S., Sibinović, M., Srejić, T., Hadud, A., & Sabri, I. (2021). Agriculture Land Use Change and Demographic Change in Response to Decline Suspended Sediment in Južna Morava River Basin (Serbia). *Sustainability*, 13(6), 1-20.
- Martinović, M., Ratkaj, I., & Sibinović, M. (2010). Vikend naselja Sićevačke klisure. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 90(2), 209-216.
- Milovanović, B., Schuster, P., Radovanović, M., Ristić Vakanjac, V., & Schneider, C. (2017). Spatio-temporal and temporal variability of precipitation in Serbia for the period 1961–2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 130, 687-700.
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water*, 23/24, 67-77.
- Panda, D.K., Kumar, A., & Mohanty, S. (2011). Recent trends in sediment load of the tropical (Peninsular) river basins of India. *Global and Planetary Change*, 75, 108-118.
- Petrović, A., Kostadinov, S., & Dragicević, S. (2014). The inventory and characterization of Torrential flood phenomenon in Serbia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23, 823-830.
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of Applied Statistics*, 28, 126–135.
- Republički zavod za statistiku Srbije. (1961–2012). Preuzeto 12. Novembra 2020, sa <http://www.stat.gov.rs>
- Sibinović, M. (2018). How Did Agricultural Patterns Change in Serbia After the Fall of Yugoslavia? *The Geography Teacher*, 15, 33-35.
- Trajković, S., Gocić, M., Mišić, D., & Milanović, M. Spatio-Temporal Distribution of Hydrological and Meteorological Droughts in the South Morava Basin. In: Gocić T., Aronica G.T., Stavroulakis G.E., Trajković S. (Eds.) (2020). *Natural Risk Management and Engineering* (pp. 225-242). Berlin: Springer.
- Unkašević, M., & Tošić, I. (2009). An analysis of heat waves in Serbia. *Global and Planetary Change*, 65, 17–26.
- Urošev, M., Dolinaj, D., & Leščičen, I. (2016). Hydrological droughts in the Južna Morava river basin (Serbia). *Geographica Pannonica*, 20, 197-207.
- Walling, D.E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 111–126.
- Walling, D.E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79, 192–216.
- Wang, H., Wu, X., Bi, N., Li, S., Yuan, P., Wang, A., Syvitski, J., Saito, Y., Yang, Z., Liu, S., & Nittrouer, J. (2017). Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Global and Planetary Change*, 157, 93–113.
- Zhang, L., Li, S., Wu, Z., Fan, X., Li, H., Meng, Q., & Wang, J. (2020). Variation in Runoff, Suspended Sediment Load, and Their Inter-Relationships in Response to Climate Change and Anthropogenic Activities Over the Last 60 Years: A Case Study of the Upper Fenhe River Basin, China. *Water*, 12, 1-17; DOI:10.3390/w12061757.
- Zhong, X., Jiang, X., Li, L., Xu, J. & Xu, H. (2020). The Impact of Socio-Economic Factors on Sediment Load: A Case Study of the Yanhe River Watershed. *Sustainability* 12, 1-18.