

**TREND OF SUSPENDED SEDIMENT LOAD
IN THE VELIKA MORAVA RIVER IN THE PERIOD 1967-2007**

SANJA MUSTAFIĆ^{1*}, PREDRAG MANOJLOVIĆ¹, MILENA NIKOLIĆ²,
TANJA DOBROSAVLJEVIĆ¹

¹ *University of Belgrade – Faculty of Geography, Studentski trg 3/3, 11000 Belgrade, Serbia*

² *University of Niš – Faculty of Science and Mathematics, Department of Geography, Niš*

Abstract: The paper is concerned with identifying changes in the time series of discharge (Q), suspended sediment concentration (SSC) and sediment load (Qs) of the Velika Morava River. The catchment area on farthest hydrological profile Ljubičevski most on Velika Morava River is approximately 35,496 km². In this profile were carried out daily measurements of flow and concentration of silt in the period from 1967 to 2007. Average perennial transport of suspended sediment is $2.57 \cdot 10^6$ t (72.4 t/km²/yr) and ranged from $0.17 \cdot 10^6$ t (4.8 t/km²/yr) to $10.02 \cdot 10^6$ t (282.2 t/km²/yr). Trends determined for Q, SSC and Qs are statistically obtained using the non-parametric Mann-Kendall test. Results of Mann-Kendall test show that Q has a slight declining trend of annual values which do not show statistical significance. Decline in trendline SSC and Qs is a significant at the level of 0.01. Calculating the standardized regression coefficients, it was found that the relative impact of SSC on sediment load is 3.1 time higher than the impact of discharge. From 1967 to 2007 the average decrease in sediment load at the mouth of the Velika Morava into the Danube was 3.1 t/km²/yr.

Key words: trend of discharge, suspended sediment concentration, suspended load, Velika Morava, Serbia

Introduction

Erosion and sediment transport processes are sensitive to changes in climate and land cover and to a wide range of human activities (Walling D.E., 2006). Anthropogenic influence includes: forest cutting and land-clearance, the expansion of agriculture, land use practices, mineral extraction, urbanization and infrastructural development, sand mining, dam and reservoir construction, soil and water conservation and sediment control programs (Walling D.E. and Fang D., 2003; Walling D.E., 2006). The significance of studying the trends of suspended sediment in rivers is manifold, depending on the aspect observed. From a global perspective, changes in erosion rates

* E-mail: sanjam@gef.bg.ac.rs

This paper is part of the project “The Research on Climate Change Influences on Environment: Influence Monitoring, Adaptation and Mitigation” (43007), subproject No. 9: “Torrential Floods Frequency, Soil and Water Degradation as the Consequence of Global Changes,” financed by Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia

have important implications for the global soil resource, especially for changes in global biogeochemical cycles, since sediment plays an important role in the transport of nutrients (Walling D.E., 2009). Soil erosion is integrally linked to land degradation, and excessive soil loss resulting from poor land management has important implications for crop productivity and food security – and thus for the sustainable use of the global soil resource (Montgomery D.R., 2007). At the regional and local levels, changes in erosion rates can have important implications for the sustainability of agricultural production, water quality, channel morphology and the aquatic ecosystems and habitats supported by the river (Walling D.E., 2009).

Determining temporal variation in suspended sediment transport on the Velika Morava at the regional level is significant for the studying of sedimentation processes on the River Danube upstream from the Iron Gate I reservoir. The influence of this reservoir on sedimentation processes in Serbia should be emphasized. Namely, this reservoir traps about 80% of the total sediment transport of the River Danube and it is probably the greatest sediment storage reservoir in Europe (Petković S. et al., 1999). It has been estimated that the overall amount of sediment which goes into the reservoir downstream from the Velika Morava is comprised of 41% of the sediment coming from the Danube, 26% from the Tisa, 21% from the Sava and 12% from the Velika Morava (Babić-Mladenović M., 2007). Namely, from the aspect of sedimentation and sediment transport in the zone of the reservoir, especially in the lowest section of the mouth, this is largely influenced by the ratio between the water flow and sediment discharge of the Velika Morava.

The Main Characteristics of the Velika Morava River Basin

The Velika Morava basin covers an area of 37,561 km², which is 42.5% of the territory of the Republic of Serbia. The basin is comprised of three hydrographic sections: immediate catchment of the Velika Morava River basin (6,242 km²), the Južna Morava basin (15,469 km²) and the Zapadna Morava basin (15,850 km²) (Gavrilović Lj., Dukić D., 2002). The river regime of the Velika Morava is mostly determined by the river regimes of its tributaries. As a result, the Velika Morava receives most water from the Zapadna Morava (45.7%), as well as from the Južna Morava (43.4%), while the Velika Morava River constitutes only 10.9% of the total drainage basin (Gavrilović Lj., 2006). About 21% of the Velika Morava basin is affected by excessive and strong erosion, 27.4% by moderate erosion, while 51.3% is affected by mild or very mild erosion (Kostadinov S. et al., 2000).

According to the Integral Vulnerability Map of the Natural Hazards in the Territory of Serbia (Dragičević S. et al., 2011), the part of the Velika Morava River Valley from Stalać to its mouth on the Danube is a potentially floodable area. Flooding on the Velika Morava River and its tributaries is mostly of the torrential kind, which can have devastating consequences on the environment. For instance, during the great floods in 2002, 2006 and 2009, between 10,000 and 30,000 ha of arable farmland was under water (Milanović A. et al., 2010). The destructive power of catastrophic floods is reflected in the fact that the period from 1950 to 2010 has seen loss of human life at five locations and severe material damage at 28 locations on the Velika Morava River and its immediate tributaries. Most of the main tributaries of the Velika Morava exhibit maximum water discharge whose frequency is dependent on a particular season. The period from May until the first half of June is known as the primary maximum, while another critical period is at the end of winter (from February until the first half of March) (Ristić R., 2000; Ristić R. et al., 2009; Ristić R. et al., 2012). The Great Morava River has the widest fluctuations in water discharge. The annual coefficient of variation is

0.30, which depends on the continental precipitation regime, high evaporation levels and the precipitation regimes of its tributaries (Ocokoljić M., 1994).

Data Settings and Methodology

The data used for the purposes of this paper regarding daily water discharge (Q) and suspended sediment concentration (SSC) were collected by the Republic Hydrometeorological Service of Serbia for the period from 1960 to 2007 based on the hydrological profile of the Ljubičevo Bridge (F=35,496 km²). Consequently, suspended sediment transport (Qs) can be obtained from the following equation:

$$Q_s(t) = Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times \text{SSC (g/l)} \times 86.4$$

Monitoring the changes in suspended sediment transport rates on a long-term basis has been done by performing a simple analysis of trends, together with the application of linear regression in order to determine trend lines and form cumulative mass plots (Walling D.E., 2006). Based on long-term observation, the trend lines for Q and Qs have been determined. By linking the cumulative values of Q and Qs within a cumulative double mass plot, it is possible to observe the extent to which the value of suspended sediment transport is in accordance with the values of water discharge, while it is also possible to identify the points at which changes have occurred.

Based on the obtained change points, the decomposition of time series has been performed. By introducing partial elasticity coefficients (pke) and standardized elasticity coefficients (β coefficients) into the equation, through the analysis of time series, it has been determined how one variable can affect another, i.e. to what extent the dependent variable follows the changes of the independent variables.

The statistical significance of the established trends for Q, SSC and Qs has been obtained through the use of the nonparametric Mann-Kendall test.

Results

The average perennial water discharge of the Velika Morava on the Ljubičevo Bridge hydrological profile for the period from 1960 to 2007 is 220.3 m³/s, which means that the value of the specific runoff is 6.2 l/s/km². The average minimum annual water discharge is 101.1 m³/s (2.85 l/s/km²), while the average maximum annual water discharge is 348.9 m³/s (9.83 l/s/km²). The average suspended sediment concentration is 0.2173 g/l, and it ranges from 0.0466 g/l to 0.6909 g/l. The average perennial suspended sediment transport is 2.57×10⁶ t (72.4 t/km²/yr), and it ranges from 0.17×10⁶ t (4.8 t/km²/yr) to 10.02×10⁶ t (282.2 t/km²/yr). When it comes to intra-annual distribution, sediment transport is highest in springtime: during March (18%), in April (17.9%), and in May (11.7%), which constitutes almost half the annual sediment transport. Sediment transport is usually at its lowest at the end of summer and in the fall. To be specific, September contributes 2.1%, August 2.4%, October 2.8%, and November 2.9% to the total annual distribution.

The established longitudinal trends for Q and Qs are presented in Figure 1. As seen from the given diagrams, the suspended sediment transport trend line is in sharp fall, while water discharge is on a slight downward trend. The statistical verification of the trends is performed with the Mann-Kendall test (Table 1). The results of the Mann-Kendall test show that the midyear values of Q exhibit a mild downward trend, which does not seem statistically significant. The average decline rate of Q is 0.82 m³/s/yr. The fall of SSC and Qs trend lines is considerable and statistically significant for both

parameters equaling 0.001. The average decrease in suspended sediment concentration is 0.0096 g/l/yr, while the average decrease in suspended sediment transport is 111,094.5 t/yr, which means that the specific average decrease rate is 3.13 t/km²/yr.

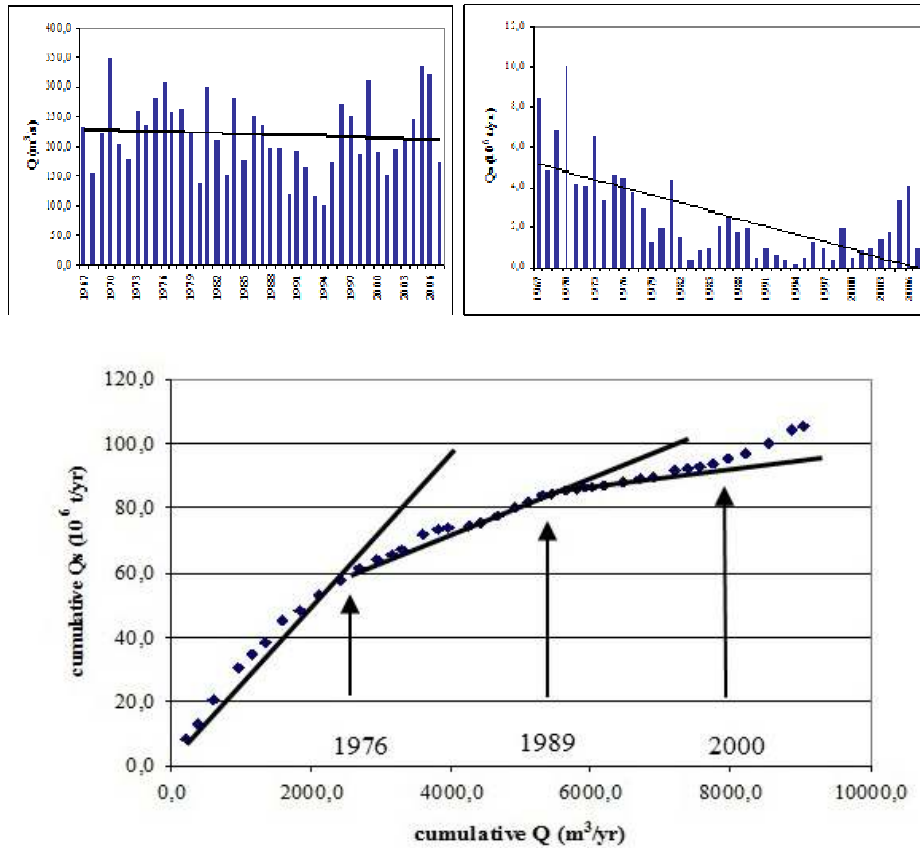


Fig. 1. Recent change in the annual water discharge (a) annual suspended sediment load (b) and associated double mass plots (c) in time series 1967-2007 in hidrological profile Ljubičevski most (Velika Morava river).

Through a comparative analysis of inter-annual values of Q and Q_s , established on the cumulative diagram, dramatic changes in the trend lines of water discharge and sediment transport are visible for the years 1976, 1989 and 2000 (Fig 1c). Based on the changes in the relation between water discharge and suspended sediment transport, four time series have been isolated for the periods 1967–1976, 1977–1989, 1990–2000 and 2001–2007.

As demonstrated by previous research (Wang H. et al., 2007; Peng J. et al., 2010), the interannual variation rates of Q_s can be best observed by establishing a point of reference, which can serve as a benchmark for the arising changes. The period from the beginning of suspended sediment measuring until the first change point was taken as a reference point for this research, which is the period from 1967 to 1976 (Table 2). From Table 2, it is evident that the isolated time series exhibit a decrease in Q , SSC and Q_s values. And while the water discharge values are decreased by 8.6% (1st period), 22% (2nd period) and 3.8% (3rd period), the decrease in suspended sediment concentration for

the respective periods is 67.7%, 84.9% and 70.3% with regard to the reference point. The exceptionally high percentage of decrease is characteristic of suspended sediment transport, which is decreased with regard to the reference point by 64.5% in the first, by 87.1% in the second and by 66.9% in the third period.

Table 1. Results of the Mann-Kendall test for water discharge (Q), suspended sediment concentration (SSC) and sediment load (Qs)

| Period | Q | | | SSC | | | Qs | | |
|--------|---------------------------------|-------|----------|-------------------|-------|----------|------------------|-------|----------|
| | <i>b</i> (m ³ /s/yr) | Z | <i>a</i> | <i>b</i> (g/l/yr) | Z | <i>a</i> | <i>b</i> (t/yr) | Z | <i>a</i> |
| Annual | -0,82 | -0,75 | 0 | -0,0096 | -4,14 | 0,001 | -111094,5 | -4,21 | 0,001 |

Legend: *b* - San's slope estimate; Z - significance testing; *a* - significance level

Table 2. Stepwise decrease in annual water discharge (Q), suspended sediment concentration (SSC) and sediment load (Qs). The average Q, SSC and Qs (1967-1976) are used as the reference levels (100 %)

| Period | Q (m ³ /s) | | | SSC (g/l) | | | Qs (10 ⁶ t) | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------|--------------|-----------|---------|--------------|------------------------|------|--------------|
| 1967-1976 ; reference level | 242,9 | D | 100% | 0,4966 | D | 100 % | 5,7 | D | 100 % |
| 1977-1989 ; I period | 221,9 | -21,0 | -8,6 | 0,1603 | -0,3363 | -67,7 | 2,0 | -3,7 | -64,5 |
| 1990-2000 ; II period | 189,5 | -53,4 | -22,0 | 0,0749 | -0,4217 | -84,9 | 8,2 | -5,0 | -87,1 |
| 2001-2007 ; III period | 233,7 | -9,2 | -3,8 | 0,1477 | -0,3490 | -70,3 | 1,9 | -3,8 | -66,9 |

Legend: D - decrease of annual Q, SSC and Qs from the reference level

For the purpose of determining the influence of water discharge and suspended sediment concentration on suspended sediment transport rates, partial elasticity coefficients (pke) and standardized elasticity coefficients (β coefficients) have been introduced into the statistical analysis. Defining the relation $Q_s=f(Q,SSC)$ quantitatively through pke shows a change in percentage of Q_s when Q and SSC are changed by 1%. On the other hand, establishing the potential influence of the given parameters on suspended sediment transport can be observed through β coefficients. The values of pke and β coefficients are given in Table 3.

Based on the pke of water discharge as a factor in the decrease of suspended sediment transport, it can be concluded that the change of Q by 1% causes the decrease of suspended sediment transport by merely 0.87% (Table 3). The decrease of suspended sediment transport defined by the relation $Q_s=(pke Q)$ is given in Table 4. From Table 4, it can be deduced that the decrease rate of suspended sediment transport is considerably higher in comparison with the rate defined by pke with respect to all isolated time series. As a result, in the first period the decrease in suspended sediment transport was 7.6 times higher than predicted by the decrease in water discharge using pke, while in the second and third period, the decrease of Q_s was respectively 3.5 and 19 times higher than the predicted values.

On the other hand, the decrease in suspended sediment transport defined by the relation $Q_s=(pke SSC)$ shows similar values corresponding to its actual decrease. This indicates that the decrease of suspended sediment concentration is not determined by the decrease of water discharge, but rather demonstrates that its decrease is determined by other factors from the geographic environment.

Table 3. Regresioni model zavisnosti $Q_s = f(Q, SSC)$ sa parcijalnim koeficijentima elastičnosti (pke) i standardizovanim koeficijentima elastičnosti (β koeficijenti).

| Regresioni model | R^2 | pke Q | pke SSC | β q | β SSC |
|---|-------|---------|-----------|-----------|-------------|
| $Q_s = -2000243 + 10093 \times Q + 10693914 \times SSC$ | 0,93 | 0,87 | 0,90 | 0,27 | 0,84 |

Table 4. Stepwise decrease in annual sediment load (Q_s , %) prema prema pke Q i pke SSC

| Period | Decrease Q_s (%) = f(ref. level) | Decrease Q_s (%) = f(pke Q) | Decrease Q_s (%) = f(pke SSC) |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1967-1976 ; reference level | 100 % | | |
| 1977-1989 ; I period | -64,5 | - 7,5 | -60,9 |
| 1990-2000 ; II period | -87,1 | -19,1 | -76,4 |
| 2001-2007 ; III period | -66,9 | -3,3 | -63,3 |

The fact that the downward trend of sediment discharge Q_s is not under direct influence of natural factors, interpreted in this case as water discharge, can be observed from the following example. Generally speaking, the estimated influence of water discharge on suspended sediment transport can be seen from the following relations:

$$\Delta Q_s = f(\Delta Q) \quad \rightarrow \quad \Delta Q_s = a \Delta Q \pm b$$

This kind of linear relationship, in fact, represents how the annual values of the variables Q and Q_s deviate from their average value. The illustration of this relation is best shown on the Moran scatter plot (Walford N., 2011) (Figure 2). The given data can be viewed in terms of two categories: the decrease of suspended sediment transport together with the decrease of water discharge, and the increase of suspended sediment transport together with the increase of water discharge. When it comes to strong linear relationships, the majority of data should be situated in quadrants I and III. The data in the first quadrant indicate an increase in suspended sediment transport with an increase in water discharge, while the data in the third quadrant indicate a decrease in suspended sediment transport with a decrease in water discharge.

The influence of water discharge on suspended sediment transport is illustrated by a relatively weak linear relationship between the interannual variability of Q and Q_s ($R^2=0.29$). Namely, the scattering of data from quadrant I into quadrant IV suggests that suspended sediment transport does not follow the rate of increase of water discharge. An amount of data present in quadrant II indicates that suspended sediment transport has a considerably higher value than water discharge, while the significant deviation from the trend line in quadrant I reveals marked variability of suspended sediment transport in relation to the increase of water discharge. The β coefficients of Q and SSC indirectly point to the influence of other factors. By calculating β coefficients, i.e. standardized elasticity coefficients, it has been established that the relative influence of SSC on sediment discharge is 3.1 time higher than the influence of water discharge (Table 3). This implies that sudden changes in suspended sediment concentration (which would not be determined by precipitation), rather than the same changes in water discharge, would have a greater effect on changes in suspended sediment transport

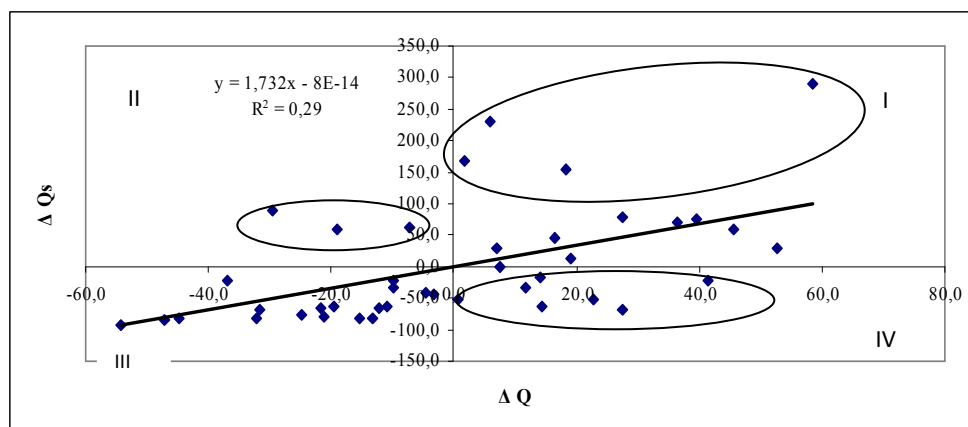


Fig. 2. Moran scatter plot diagram. The relationship between annual variability of flow (ΔQ) and transport of suspended sediment (ΔQ_s) in the period 1967-2007

The evident interannual downward trends of suspended sediment concentration and suspended sediment transport in relation to the water discharge trend can be accounted for by different aspects of anthropogenic influence. These are, first and foremost, the effects of anti-erosion activities conducted in the drainage basins of the Zapadna and Južna Morava in the second half of the 20th century, as well as hydrotechnical works on the riverbed of the Velika Morava River and its tributaries (Petković S. et al., 1995; 1996). On the other hand, in the mountainous parts of the drainage basin, there have been changes in land use practices, which include abandonment and grassing of arable land. These changes are a result of negative demographic and socio-economic development tendencies. The rapid demographic recession in the last 50 years has resulted in the continual process of depopulation, demographic depletion and reduction of the rural settlement, population ageing and spontaneous rural-urban migration (Martinović M., 2012), causing a 15 to 17-fold decrease in agrarian population per unit area (Martinović M., Matijević D., 2006). These changes have led to the decrease of soil erosion rates and the production of sediment by 25–30% (Mustafić S. et al., 2008).

Conclusion

This paper has examined the temporal variation of suspended sediment transport on the most downstream hydrological profile of the Velika Morava. From the presented research, the following can be concluded:

- The average perennial suspended sediment transport for the period from 1967 to 2007 is 2.57×10^6 t (72.4 t/km²/yr), ranging from 0.17×10^6 t (4.8 t/km²/yr) to 10.02×10^6 t (282.2 t/km²/yr).
- The average decrease of suspended sediment is 3.1 t/km²/yr.
- A marked interannual downward trend of suspended sediment concentration and suspended sediment transport in relation to the discharge trend.
- A decrease in SSC and Q_s is evident in all isolated time series and it is several times higher than the decrease of discharge.

- The significant downward trends of suspended sediment concentration and suspended sediment transport can be explained by the changes in land use practices, negative demographic development tendencies (depopulation of rural settlements), conservation works in the drainage basin and hydrotechnical works on the riverbed of the Velika Morava.

Reference

- Babić-Mladenović M. (2007): Sediment regime of the Danubie River. Beograd: Zadužbina Andrejević, 1-124
- Dragičević, S., Filipović, D., Kostadinov, S., Ristić, R., Novković, I., Živković, N., Anđelković, G., Abolmasov, B., Sećerov, V., Đurđić, S. (2011): Natural Hazard Assessment for Land-use Planning in Serbia. *International Journal of Environmental Research*, 5(2): 371-380.
- Gavrilović Lj. (2006): Morava and its tributaries. In (ed: Nebojša Jovanović): "The Morava River". Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 47-118
- Gavrilović Lj., Dukić D., (2002): The Rivers in Serbia. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 1-218
- Kostadinov S., Zlatić M., Dragović N. (2000): Uredjenje bujičnih slivova uslov uravnoteženog režima voda i nanosa u slivu Velike Morave. U "Vodni resursi sliva Velike Morave i njihovo korišćenje". Beograd: Zadužbina Andrejević, 195-199
- Martinović M. (2012): Types of Population Dynamics in Settlements of Zaplanje Area. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, XCII (2), 133-152
- Martinović M., Matijević D. (2006): Some Spatial-demographic Development Tendencies of the Settlements on Mountain Suva planina. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, LXXXVI (1), 133-140
- Milanović A., Urošev M., Milijašević D. (2010): Floods in Serbia in the 1999 - 2009 period – hydrological analysis and flood protection measures. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, XC (1), 93-121
- Mustafić S., Kostadinov S., Manojlović P. (2008): Risk of Artificial lake "Zavoji" to Processes of Erosion-methodological, knowing and protecting aspect. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, LXXXVIII (1), 29-42
- Montgomery, D.R. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 04, No. 13. Washington D.C., PNAS, pp. 268–272.
- Ocokoljić M., (1994). *Cyclicity of drought and aquatic period in Serbia*. Beograd: Srpska akademija nauka i umetnosti - Geografski institut "Jovan Cvijić", 41, 1-110
- Peng J., Chen S., Dong P., (2010). Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin, China, and its impact on the lower reaches and river delta. *Catena* 83, 135-147
- Petković S., Kostadinov S., Zlatić M., Dragović N., Popović M., Potić O., Marković S., Veličić M. (1995): The genesis and sediment transport in the basin of the Južna Morava and conditions of its use. Beograd: Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1-216
- Petković S., Kostadinov S., Petković S., Zlatić M., Djeković V., Dragović N., Popović M., Potić O., Marković S., (1996): The genesis and sediment transport in the basin of the Zapadna Morava. Beograd: Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1-158
- Petković S., Dragović N., Marković S. (1999): Erosion and sedimentation problems in Serbia. *Hidrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 44 (1), 63-77
- Ristić R., Kostadinov S., Abolmasov B., Dragičević S., Trivan G., Radić B., Trifunović M. and Radosavljević Z. (2012): Torrential floods and town and country planning in Serbia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 23–35
- Ristić R., (2000): Characteristics of torrential regime of high water on the main tributaries of the Velika Morava. In „Water resources of the Velika Morava river basin and their use". Beograd: Zadužbina Andrejević, 190-194
- Ristić R., Radić B., Vasiljević N. (2009): Characteristics of high water on the torrential river basins in Serbia. *Glasnik srpskog geografskog društva*, LXXXIV (4), 161-176
- Walford N., (2011): *Practical Statistic for Geographers and Earth Scientists*. Wiley - Blackwell, 1-415
- 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
- Walling D.E. (2009) The Impact of Global Change on Erosion and Sediment Transport by Rivers: Current Progress and Future Challenges. In *Studying the Impact of Global Change on Erosion and Sediment Dynamics*, The United Nations World Water Assessment Programme, 1-26 ISBN 978-92-3-104135-8
- Wang H., Yang Z., Saito Y., Liu J.P., Sun X., Wang Y. (2007): Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change* 57, 331-354

ТРЕНД ПРОНОСА СУСПЕНДОВАНОГ НАНОСА НА ВЕЛИКОЈ МОРАВИ У ПЕРИОДУ 1967-2007

САЊА МУСТАФИЋ¹, ПРЕДРАГ МАНОЈЛОВИЋ¹, МИЛЕНА НИКОЛИЋ²,
ТАЊА ДОБРОСАВЉЕВИЋ

¹ *Универзитет у Београду – Географски факултет, Студентски трг 3/3, 11000 Београд, Србија*
² *Универзитет у Нишу – Департман за географију, Ниш, Србија*

Сажетак: Рад се бави индентификовањем промена у временским серијама протицаја (Q), концентрације суспендованог наноса (SSC) и проноса суспендованог наноса (Qs) на Великој Морави. Велика Морава на најнизовнијем хидролошком профилу Љубичевски мост захвата површину слива од 35496 km². На том профилу вршена су свакодневна мерења протицаја и концентрација силта у периоду од 1967-2007. године. Средњи вишегодишњи транспорт суспендованог наноса износи $2,57 \times 10^6$ t ($72,4$ t/km²/god), а кретао се у распону од $0,17 \times 10^6$ t ($4,8$ t/km²/god) до $10,02 \times 10^6$ t ($282,2$ t/km²/god). Утврђени трендови за Q, SSC и Qs статистички су добијени коришћењем непараметарског MannKendall теста. Резултати Манн-Кендалл теста показују да Q има благ тренд опадања средњегодишњих вредности, које не показују статистичку значајност. Пад линије тренда SSC и Qs статистички је значајан на нивоу од 0,001. У периоду 1967-2007 год. просечно опадање проноса наноса на ушћу Велике Мораве у Дунав је $3,1$ t/km²/god.

Кључне речи: тренд протицаја, концентрација суспендованог наноса, пронос наноса, Велика Морава, Србија

Увод

Ерозија и процеси транспорта седимената највише зависе од климатских промена, промена у коришћењу земљишта и људских активности (Walling D.E., 2006). Антропогени утицаји обухватају (Walling D.E. and Fang D, 2003, Walling, 2006): сечу шума и оголићење земљишта, ширење пољопривреде, промене у намени земљишта, ископавање руде, урбанизацију и инфраструктурни развој, експлоатацију песка, бране и вештачка језера, конзервацију земљишта и воде и програме контроле седимената. Значај проучавања трендова суспендованог наноса у рекама је вишеструк, у зависности са ког аспекта се посматра. Из глобалне перспективе, промене интензитета ерозије имају значајне импликације на глобалне земљишне ресурсе. Посебно на промене у глобалним биохемијским циклусима, пошто седименти играју важну улогу у транспорту хранљивих материја (Walling D.E., 2009). Ерозија земљишта је интегрално повезана са деградацијом земљишта, а ексцесиван губитак земљишта је последица лошег управљања земљиштем што се одражава на продуктивност усева и сигурност хране, а тиме и на одрживо коришћење земљишта као глобалног ресурса (Montgomery, 2007). На регионалном и локалном нивоу промене у интензитету ерозије могу имати важне импликације на одрживост пољопривредне производње, квалитет вода, морфологију корита, као и водених екосистема и станишта поред реке (Walling, 2009).

Утврђивање временских варијација у проносу суспендованог наноса на Великој Морави на регионалном нивоу значајно је за проучавање режима наноса на сектору Дунава узводно од акумулације ХЕ "Ђердап I". Ова акумулација задржава око 80% укупног транспорта седимента на Дунаву и вероватно представља највећи резервоар складиштења седимената у Европи (Petković S. et al., 1999). Процењено је да у укупној количини наноса, који улази на сектор акумулације низводно од Велике Мораве, нанос који је доспео Дунавом учествује са 41 %, Тисом 26 %, Савом 21 % и Великом Моравом 12 % (BabićMladenović M., 2007). Наиме, са аспекта процеса транспорта и таложења наноса у зони акумулације, посебно на најнижем сектору успора, велики утицај имају односи протока воде и проноса наноса Велике Мораве.

Основне карактеристике Велике Мораве

Слив Велике Мораве захвата површину од 37561 km^2 , што чини 42,5 % територије Републике Србије. Слив чине три хидрографске целине: непосредни слив Велике Мораве (6242 km^2), слив Јужне Мораве (15469 km^2) и слив Западне Мораве (15850 km^2) (Gavrilović LJ., Dukić D., 2002). Водни режим Велике Мораве углавном је одређен режимом њених саставница. Тако највише воде Велика Морава добија од Западне Мораве (45,7 %), затим од Јужне Мораве (43,4 %) док непосредни део слива Велике Мораве учествује са свега 10,9 % укупног отицаја (Gavrilović LJ., 2006). Око 21% површине слива Велике Мораве захваћено је процесом ексцесивне и јаке ерозије, 27,4 % је под средњом ерозијом, док је 51,3 % под слабом и врло слабом ерозијом (Kostadinov S. i dr., 2000).

Према Карти природних хазарда територије Србије (Dragičević et al., 2011) долина Велике Мораве од Сталаћа до ушћа у Дунав припада потенцијалним поплавним зонама. Поплаве у непосредном делу слива Велике Мораве и њених притока су углавном бујичарског карактера, остављају снажне последице на стање животне средине. Тако је током великих поплава 2002., 2006. и 2009. године поплављено између 10000 ha и 30000 ha пољопривредних површина (Milanović A. i dr., 2010). Разорна моћ катастрофалних поплава огледа се у чињеници да је у периоду 1950-2010. на Великој Морави и њеним непосредним притокама забележено 5 локација са губитком људских живота и 28 локација са изузетним материјалним разарањима (Ristić et al., 2012). На већини главних притока Велике Мораве појава учесталости максималног протицаја има сезонски карактер. Период од маја то до прве половине јуна означен је као примарни максимум, док је други критичан период крај зиме (од фебруара до прве половине марта) (Ristić R., 2000; Ristić R. i dr. 2009., Ristić et al., 2012). Велика Морава је река са највећим колебањем протицаја. Годишњи коефицијент варијације износи 0,30, а условљен је континенталним режимом падавина, великим испаравањем и плувионивалним режимом њених притока (Osokoljić M., 1994)

База података и методологија

За потребе овог рада коришћени су подаци о дневним вредностима протицаја (Q) и концентрација суспендованог наноса (SSC) у периоду 1960-2007. година на хидролошком профилу Љубичевски мост ($F=35496 \text{ km}^2$), који су мерени од стране РХМЗа. Пренос суспендованог наноса Q_s израчунат је према формули:

$$Q_s(t) = Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times \text{SSC (g/l)} \times 86,4$$

Праћење промена у интензитету проноса суспендованог наноса на дугорочном нивоу извршено је применом једноставне анализе трендова, уз коришћење линеарне регресије за успостављење линије тренда и формирање кумулативних масплот дијаграма (Walling D.E., 2006). На основу дугорочних осматрања успостављени су трендови за Q и Q_s . Повезивањем кумулативних вредности Q и Q_s у кумулативни двоструки масплот дијаграм омогућено је сегледавање у коликој мери је вредност проноса суспендованог наноса у сагласности са вредностима протицаја, при чему је омогућена идентификација тачака насталих промена.

На основу добијених тачака промена, извршена је декомпозиција

времеских серија. Увођењем у поступак парцијалних коефицијената еластичности (ρ) и стандардизованих коефицијената еластичности (β коефицијенти), кроз анализу временских серија, извршено је утврђивње колико једна варијабла утиче на промену друге, односно у којој мери зависна компонента прати промене независних варијабли.

Статистичка значајност утврђених трендова за Q, SSC and Qs добијена је коришћењем непараметарског MannKendall теста.

Резултати истраживања

Средњи вишегодишњи протицаји на Великој Морави на хидролошком профилу Љубичевски мост у периоду 19602007. година износи $220,3 \text{ m}^3/\text{s}$, што даје вредност специфичног отицаја од $6,2 \text{ l/s/km}^2$. Минимална средња годишња вредност протицаја износила је $101,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,85 \text{ l/s/km}^2$), а максимална средња годишња вредност $348,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ($9,83 \text{ l/s/km}^2$). Просечна концентрација суспендованог наноса износи је $0,2173 \text{ g/l}$, а креће се у распону од $0,0466 \text{ g/l}$ до $0,6909 \text{ g/l}$. Средњи вишегодишњи транспорт суспендованог наноса износи $2,57 \times 10^6 \text{ t}$ ($72,4 \text{ t/km}^2/\text{god}$), а кретао се у распону од $0,17 \times 10^6 \text{ t}$ ($4,8 \text{ t/km}^2/\text{god}$) до $10,02 \times 10^6 \text{ t}$ ($282,2 \text{ t/km}^2/\text{god}$). У унутаргодишњој расподели највећи пронос наноса оствари се у пролеће: током марта (18 %), у априлу (17,9 %), у мају (11,7 %) што чини скоро половину годишњег проноса наноса. Најмањи пронос наноса везује се за јесен и крај лета. Тако септембар учествује са 2,1 %, август 2,4 %, октобар 2,8 %, новембар 2,9 % у укупној годишњој расподели.

Успостављени дугорочни трендови за Q и Qs дати су на графику 1. Као што се може видети из приложених графика присутна је изразито опадајућа линија тренда проноса суспендованог наноса, док линија тренда протицаја показује веома слабо изражен тренд пада. Статистичка верификација трендова дата је коришћењем MannKendall теста (табела 1.) Резултати MannKendall теста показују да Q има благ тренд опадања средњегодишњих вредности, које не показују статистичку значајност. Просечна стопа смањења Q износи $0,82 \text{ m}^3/\text{god}$. Пад линије тренда SSC и Qs показује високу сигнификантност, и за оба параметра статистички је значајан на нивоу од 0,001. Просечно смањење концентрација суспендованог наноса износи $0,0096 \text{ g/l/god}$, а проноса суспендованог наноса $111094,5 \text{ t/god}$, односно специфична просечна стопа смањења износи $3,13 \text{ t/km}^2/\text{god}$.

График 1. Дугорочни трендови протицаја (Q, m^3/s) и проноса суспендованог наноса (Qs, 10^6 t/god) повезани кумулативним масплот дијаграмом на нивоу временске серије 19602007. на хидролошком профилу Љубичевски мост, Велика Морава.

Компаративном анализом између интергодишњих вредности Q и Qs, успостављеном преко кумулативног дијаграма, јасно се виде преломне тачке између водности и проноса наноса: 1976, 1989 и 2000. година. На основу тачки промена у односу између протицаја и проноса суспендованог наноса издвојене су четири временске серије: 19671976, 19771989, 19902000 и 20012007. година.

Како ранија истраживања показују (Wang H. et al., 2007; Peng. et al., 2010), интензитет интрегодишње варијабилности Qs најбоље се могу сагледати

успостављањем референтног нивоа, који ће послужити као репер насталих промена. У овом истраживању за референтни ниво узет је период од почетка мерења суспендованог наноса до прве успостављене тачке промене, односно период 1967-1976. година (табела 2). Из табеле 2 може се видети да је у свим издвојеним временским серијама дошло да смањења Q , SSC и Q_s . И док су протицаји смањени за 8,6 % (I период), 22 % (II период) и 3,8 % (III период), процентуално смањење концентрација суспендованог наноса за исте периоде износио је 67,7 %, 84,9 % и 70,3 % у односу на референтни ниво. Изразито висок проценат смањења карактеристичан је за пронос суспендованог наноса, а у односу на референтни ниво у I периоду смањен је за 64,5 %, у II периоду за 87,1 %, а у III периоду за 66,9 %.

Табела 1. Резултати MannKendall теста за протицај (Q), концентрацију суспендованог наноса (SSC) и проноса наноса (Q_s)

Табела 2. Степенасто смањење годишњег протицаја (Q), концентрације суспендованог наноса (SSC) и проноса наноса (Q_s). Просечне вредности Q , SSC и Q_s (1967-1976) су коришћене као референтни нивои (100 %)

У циљу детерминаније утицаја протицаја и концентрација суспендованог наноса на интензитет проноса суспендованог наноса, у статистичку анализу су уведени парцијални коефицијенти еластичности (r_{ke}) и стандардизовани коефицијенти еластичности (β коефицијенти). Квантитативно дефинисање зависности $Q_s=f(Q,SSC)$ преко r_{ke} показује процентуалну промену Q_s ако се Q или SSC промене за 1 %. С друге стране, утврђивање потенцијалних могућности утицаја наведених параметара на пронос суспендованог наноса сагледан је преко β коефицијента. Вредности r_{ke} и β коефицијента дати су у табели 3.

Табела 3. Регресиони модел зависности $Q_s = f(Q,SSC)$ са парцијалним коефицијентима еластичности (r_{ke}) и стандардизованим коефицијентима еластичности (β коефицијент)

Табела 4. Степенасто смањење годишњег проноса наноса (Q_s , %) према $r_{ke} Q$ и $r_{ke} SSC$

Према $r_{ke} Q$ као фактора смањења проноса суспендованог наноса, закључује се да промена Q за 1 % утиче на смањење проноса суспендованог наноса за свега 0,87 % (табела 3). Смањење проноса суспендованог наноса дефинисаног преко зависности $Q_s=(r_{ke} Q)$ дато је у табели 4. Из табеле 4. произилази да је ниво смањења проноса суспендованог наноса знатно већи у односу на ниво који је дефинисан r_{ke} и то на нивоу свих издвојених временских серија. Тако је за I период смањење проноса суспендованог наноса за 7,6 пута веће него што је предвиђено смањењем протицаја преко r_{ke} , а за II и III период смањење Q_s је 3,5, односно 19 пута веће од предвиђених вредности.

С друге стране, смањење проноса суспендованог наноса које је дефинисано преко зависности $Q_s=(r_{ke} SSC)$ показује приближне вредности које одговарају његовом реалном смањењу. То указује да смањење концентрација суспендованог наноса није детерминисано смањењем протицаја, већ посредно показује да је његово смањење детерминисано преко других фактора географске средине.

Да тренд смањења проноса Q_s није под директним утицајем прородних фактора, интерпретираних у овом случају преко водности, може се сагледати и на следећем примеру. Генерално, процена утицаја протицаја на пронос суспендованог наноса може се показати преко зависности:

$$\Delta Q_s = f(\Delta Q) \rightarrow \Delta Q_s = a\Delta Q \pm b$$

На овај начин узражена линеарна зависност, заправо, представља одступање годишње вредности варијабли Q и Q_s у односу на њихову средњу вредност. Визуализацију односа најбоље је приказати преко Морановог скатер плот дијаграма (Walford N., 2011) (график 2). Представљени подаци могу бити посматрани кроз две категорије: смањење прноса суспендованог наноса са смањењем протицаја, и повећање прноса суспендованог наноса са повећењем протицаја. За јаке линеарне везе већина података треба да се налази у квадрантима I и III. Подаци у квадранту I указују на повећење прноса наноса са повећењем протицаја, док подаци у квадранту III указују на смањење прноса наноса са смањењем протицаја.

График 2. Моранов скатер плот дијаграм односа између интергодишње варијабилности протицаја (ΔQ) и прноса суспендованог наноса (ΔQ_s) у периоду 1960-2007. год.

Утицај протицаја на пренос суспендованог наноса показује релативно слаба линеарна веза између интергодишње варијабилности Q и Q_s ($R^2 = 0,29$). Наиме, расипање података из квадранта I у квадрант IV указује да пренос суспендованог наноса не прати темпо повећања протицаја. Један број података присутан у квадранту II указује да је пренос наноса знатно већи у односу на вредност протицаја, а велики степен одступања изнад линије тренда у квадранту I говори о великој варијабилности прноса суспендованог наноса у односу на повећање протицаја.

На утицај других фактора посредно указују β коефицијенти Q и SSC. Израчунавањем β коефицијената, односно стандардизованих коефицијената еластичности, утврђено је да је релативни утицај SSC на пренос наноса 3,1 пута већи у односу на утицај протицаја (табела 3). То посредно указује да би нагле промене концентрација суспендованог наноса (које не би биле детерминисане падавинским условима), у односу на исте промене протицаја, знатно више утицале на промене у преносу суспендованог наноса.

Веома изражен интергодишњи тренд смањења концентрација суспендованог наноса и прноса суспендованог наноса у односу на тренд протицаја, генерално се могу се објаснити различитим видовима антропогеног утицаја. То су у првом реду ефекти изведених антиерозивних радова у сливовима Западне и Јужне Мораве у другој половини XX века, као и хидротехничким радовима у речном кориту Велике Мораве и њених притока (Petković S. i dr., 1995; 1996). С друге стране, у планинским деловима слива дошло је до извесне промене у начину коришћења земљишта, које се огледају у напуштању обрадивих површина и затрављивању истих. Ове промене резултат су негативних демографских и социоекономских развојних тенденција. Услед убрзане демографске рецесије у последњих 50 година, дошло је до континуираних промена које се огледају у процесу депопулације, демографског пражњења и уситњавања насеља, демографског старења и спонтаног расељавања села (Мартиновић М., 2012), што је за последицу имало смањење аграрног становништва на јединици површине за 1517 пута (Martinović M., Matijević D., 2006). Овакве промене у појединим деловима слива одразиле су се на смањење интензитета ерозивних процеса и продукцију наноса за 2530 % (Mustafić S. et al., 2008).

Закључак

У раду је разматрана временска варијабилност проноса суспендованог наноса на најнизовнијем хидролошком профилу Велике Мораве. Из наведених истраживања може се закључити следеће:

- Средњи вишегодишњи транспорт суспендованог наноса за период 1967-2007 износи $2,57 \times 10^6$ t ($72,4$ t/km²/god), а кретао се у распону од $0,17 \times 10^6$ t ($4,8$ t/km²/god) до $10,02 \times 10^6$ t ($282,2$ t/km²/god).
- Просечно смањење суспендованог наноса износи $3,1$ t/km²/god.
- Веома изражен интергодишњи тренд смањења концентрација суспендованог наноса и проноса суспендованог наноса у односу на тренд протицаја.
- Смањење SSC и Qs евидентно је у свим издвојеним временским серијама и вишеструко је веће од смањења протицаја.
- Изузетно висок тренд смањења концентрација суспендованог наноса и проноса суспендованог наноса, генерално се могу се објаснити променама у начину коришћења земљишта, негативним демографским развојним тенденцијама (депопулација руралних насеља), конзервацијским радовима у сливу и хидротехничким радовима у речном кориту Велике Мораве.

Видети литературу на страни 42