

primljen: 17.01.2023.
korigovan: 31.01.2023.
prihvaćen: 01.03.2023.

pregledni rad

UDK : 627.4/5:004.4(497.11)

KONCEPCIJA UREĐENJA REKE JUŽNE MORAVE U ZONI MOSTA GRAOVO U GRDELIČKOJ KLISURI

Aleksandra Ilić¹, Dragan Radivojević², Borko Radivojević³

Rezime: U osnovi svakog koncepta uređenja vodotoka je osiguravanje efekata za duži vremenski period kao i fleksibilnost koja daje mogućnost adaptacije novonastalim uslovima. Tečenje u otvorenim tokovima zavisi od hidroloških, meteoroloških, geoloških, psamoloških, hidrauličkih i morfoloških parametara. Čijom se kombinacijom dobija širok dijapazon rezultata hidrauličkih proračuna. Modeliranje počinje ocenom tipa tečenja i postavljanjem graničnih uslova. Za postavljanje granica oblasti proračuna tečenja ne postoji univerzalna procedura već je to postupak kojim se pažljivo uzimaju u obzir svi navedeni faktori i vrši izbor potrebne dužine deonice kako bi se postigla nepristranost proračuna hidrauličkih veličina. U ovom radu je proučavan sektor reke Južne Morave na ulazu u Grdeličku klisuru u zoni mosta u mestu Graovo u Jugoistočnoj Srbiji. Specifičnost problema se ogleda u značajno izmenjenoj geometriji rečnog korita nizvodno od deonice koja bi trebalo da se reguliše sa ciljem zaštite mostovske konstrukcije od uticaja velikih voda i erozivnih procesa u rečnom koritu. Za hidrauličko modeliranje i analizu je korišćen softver HEC-RAS.

Ključne reči: uređenje vodotoka, tečenje u otvorenim tokovima, erozivni procesi, velike vode, HEC-RAS

THE CONCEPT OF THE SOUTH MORAVA RIVER TRAINING WORKS IN THE GRAOVO BRIDGE ZONE IN THE GRDELICA GORGE

Abstract: The basis of each concept of the river training works is the provision of effects for a long period of time, as well as of the flexibility that gives the possibility of adaptation to new conditions. Flow in open channel depends on hydrological, meteorological, geological, psamological hydraulic and morphological parameters, the combination of which gives a wide range of results of hydraulic calculations. Modeling begins with an assessment of the type of flow and the setting of boundary conditions. There is no universal procedure for setting the boundaries of the flow calculation area, but it is a procedure that carefully takes into account all mentioned factors and selects the required length of the section in order to ensure the unbiased calculation of hydraulic parameters. In this paper, the sector of the South Morava River at the entrance to the Grdelička Gorge in the area of the bridge Graovo in Southeast Serbia was studied. The specificity of the problem is reflected in the significantly changed geometry of the river bed downstream of the section, which should be trained with the aim of protecting the bridge structure from the influence of flood flows and erosive processes in the river bed. HEC-RAS software was used for hydraulic modeling and analysis.

Key words: River Training Works, Flow in Open Channels, Erosive Processes, Flood Flows, HEC-RAS

¹ Doktor, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

² Doktor, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, dragan.radivojevic@gaf.ni.ac.rs

³ Master inženjer, doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, borko_995@hotmail.com

1 UVOD

Uređenje rečnih tokova je hidrotehnička disciplina, koja datira iz 3100. godine pre nove ere [8] i obuhvata niz aktivnosti na prirodnim i veštačkim vodotokovima u cilju smanjenja šteta od poplava, erozije i bujica, obezbeđivanja dobrih uslova korišćenja ali i zaštite vodotoka od zagađenja [1]. Osnovni motiv u regulaciji reka jeste zaštita od štetnog dejstva voda pri čemu se vrši stabilizacija osnovnog korita i povećava njegova propusna moć kako korekcijom trase i morfoloških karakteristika tako i zaštitom dna i obala od erozije.

Inovacije i tendencije razvoja pomenute discipline se vezuju za konstruktivne elemente, napredak u modeliranju hidrodinamike i morfodinamike i održivost već izvedenih radova u prošlosti [4], [7], [9-10]. Sve tendencije idu u pravcu fleksibilnog uređenja vodotoka koje se odnosi na implementaciju konstrukcijskih rešenja zajedno sa regulacionim radovima (prosecanje rečnih krivina, bagerovanje, biotehnički radovi itd.).

Polazna tačka prilikom projektovanja objekata u rečnom koritu je obezbeđivanje adekvatnih, sveobuhvatnih podloga vezanih za lokaciju, bližu i širu okolinu objekta. Tečenje u vodocima je složen proces koji zavisi od karakteristika rečnog toka koje se menjaju tokom vremena (hidrološki, meteorološki, geološki, psamološki, hidraulički, morfološki i drugi faktori).

Razvoj matematičkih simulacionih modela omogućio je složene proračune kojima se pokriva veliki broj neizvesnosti koje su se prevazilazile uvođenjem pretpostavki u modeliranje. Na pouzdanost hidrauličkog modela direktno utiče dužina računске deonice i postavljanje graničnih uslova. Na kratkim računskim deonicama granični uslov ima dominantan uticaj na sračunate vrednosti hidrauličkih veličina. Na predugačkim deonicama nepotrebno se povećavaju troškovi priprema podloga, tako da dužina računске donice treba da bude racionalna. Granični uslov treba postaviti tako da ima zanemarljiv uticaj na sračunate vrednosti nivoa vodnog ogledala u blizini objekta, kako bi se dobili pouzdani rezultati hidrauličkih proračuna [2].

U ovom radu je predstavljen simulacioni model deonice reke Južne Morave u zoni mosta Graovo u Grdeličkoj klisuri. Takođe su prikazane analize rezultata hidrauličkih analizuza i opšte i lokalne erozije u zoni mosta na osnovu kojih se usvaja koncepcija rešenja uređenja osnovnog korita sa ciljem održivosti u dužem vremenskom periodu.

2 MATERIJALI I METODE

2.1 ULAZNI PODACI U ZONI MOSTA GRAOVO U GRDELIČKOJ KLISURI

Novo projektovani most Graovo preko Južne Morave nalazi se u zoni mosta 5 (km 876+973) autoputa E75 (Slika 1) [6]. Na lokaciji su konstatovane značajne oscilacije nivoa vode koje se javljaju usled većih padavina, naglog ispuštanja vode iz HE „Vrla“ i nekontrolisane eksploatacije rečnog materijala uzvodno od novog mosta. Ovakvi poremećaji mogu dovesti do opšte deformacije rečnog korita kao i lokalne deformacije oko mostovskih stubova S2 i S3 koji se nalaze u rečnom toku, a samim tim ugroziti stabilnost konstrukcije mosta (Slike 2 i 3).

Na širem području predmetne deonice snimljeno je prirodno korito reke, dužine $L=1.544,29$ m i obala, kao i 32 poprečna profila. Na Slici 1 naznačen je položaj predmetne deonice. Poprečnim profilima prirodnog korita vodotoka, koji su snimljeni jula 2022. god. obuhvaćeno je minor korito vodotoka i deo inundacija na levoj i desnoj obali. Profili su snimljeni, u ukupnoj dužini 1.544,29 m na prosečnom rastojanju od 10 – 20 m.

Za hidrauličke proračune usvojeni su računski protoci na hidrološkoj stanici Grdelica:

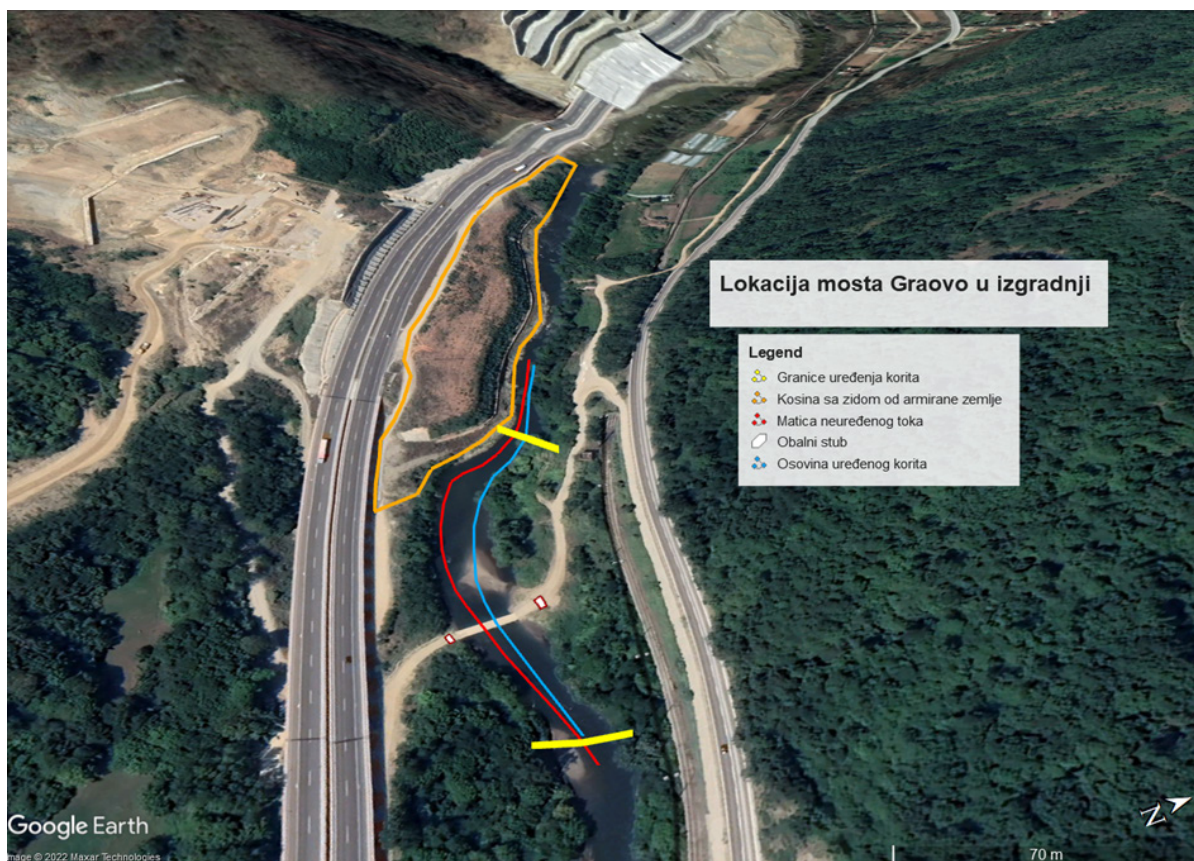
- Merodavni: pedesetogodišnja velika voda $Q_{2\%}=604$ m³/s,
- Kontrolni: stogodišnja velika voda $Q_{1\%}=687$ m³/s.

Parametri aluvijalnog materijala, obzirom da se radi o regulaciji osnovnog korita su:

$$\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3; \varphi = 23^\circ; c = 5 \text{ kPa.}$$

Karakteristični prečnici zrna nanosa su utvrđeni na osnovu granulometrijskih krivih materijala iz Elaborata geotehničkih terenskih istraživačkih radova i laboratorijskih ispitivanja [6]:

- $d_{50}=20$ mm; $d_{90}=44$ mm – na desnoj obali,
- $d_{50}=2,5 - 12,5$ mm; $d_{90}=25 - 38$ mm – na levoj obali.



Slika 1 – Aerofotometrijski prikaz lokacije mosta u izgradnji [6]



Slika 2a – Profil mosta Graovo, pogled sa autoputa [6]



Slika 2b – Profil mosta Graovo, pogled sa leve obale [6]

Kako su nizvodno i uzvodno od lokacije mosta na reci Južnoj Moravi već izvedene regulacije u zoni mostova na udaljenosti 1 – 1,5 km, opravdan je pristup zadržavanja kontinuiteta regulisanja reke u zoni autoputa E75 i sprečavanje mogućnosti ugrožavanja stabilnosti mosta.

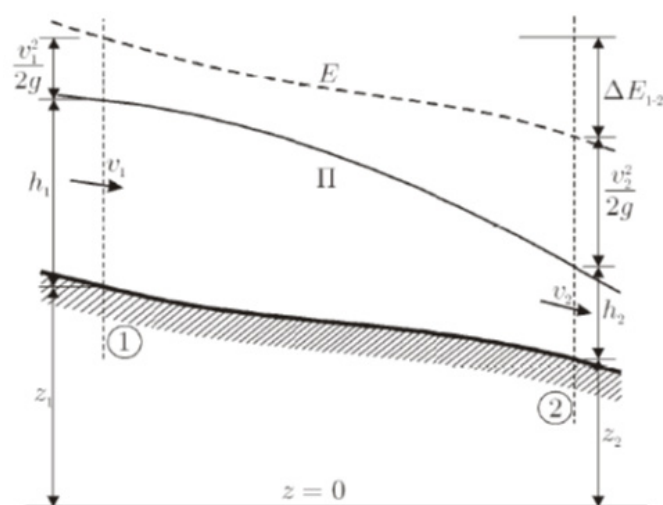
2.2 SIMULACIONI MODEL TEČENJA

Za modeliranje i analizu hidrauličkih veličina primenjen je softver HEC-RAS [5]. Nivo vodnog ogledala se sračunava od početnog poprečnog profila prema susednom rešavanjem jednačine energije (1), primenom iterativne procedure pod nazivom „standardna step metoda“ (Slika 3.)

$$Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \Delta E_{1-2} \quad (1)$$

Gde je:

- Z_1, Z_2 - kota dna u koritu reke,
- Y_1, Y_2 - dubina vode u poprečnom preseku,
- v_1, v_2 - srednje profilske brzine (ukupan proticaj/ukupna površina preseka),
- α_1, α_2 - koeficijenti brzinske visine,
- g - gravitaciona konstanta,
- ΔE_{1-2} - gubitak energije.



Slika 3 – Proračunska šema [1]

Kako bi se sproveli proračuni, granični uslov mora biti postavljen na najnižvodnijem profilu u slučaju mirnog tečenja, ili na najuzvodnijem za slučaj burnog tečenja. Granični uslov treba postaviti na način da se mogu nepristrasno sračunati nivoi vode na analiziranoj deonici u zoni objekta.



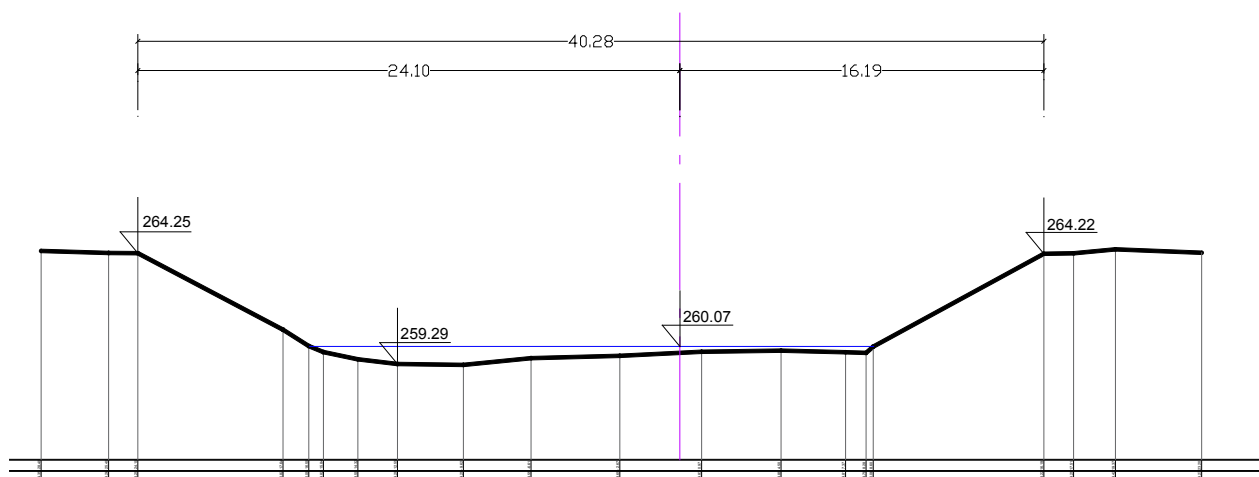
Slika 4 – Granični uslov 140 m nizvodno od mosta [2]



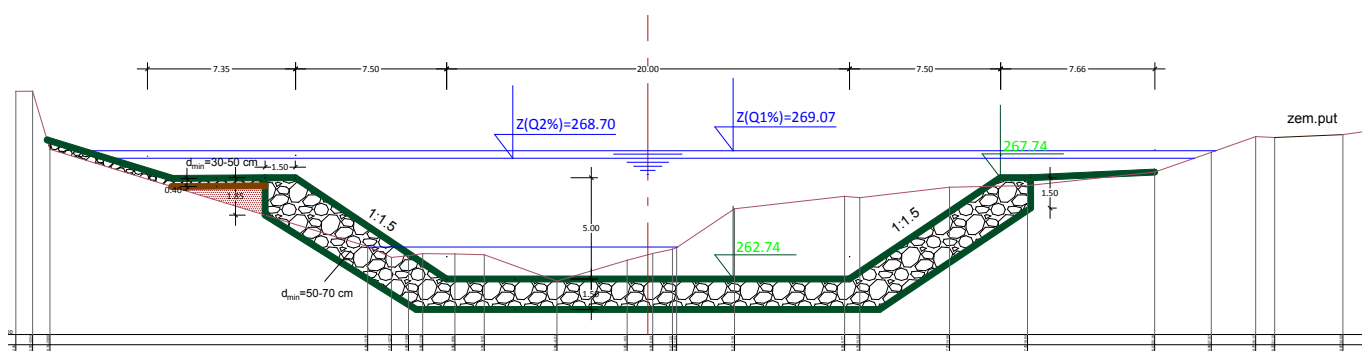
Slika 5 – Granični uslov 1,3 km nizvodno od mosta [2]

Tabela 1- Analizirani scenariji za proračun nivoa vode [2]

Scenario 1 – Prirodno korito kratka deonica (PKKD)	Prirodno korito – granični uslov u zoni mosta Graovo, radi se hidraulička analiza deonice na kojoj treba izvršiti uređenje korita (Slika 4)
Scenario 2 - Prirodno korito dugačka deonica (PKDD)	Prirodno korito – granični uslov je udaljen nizvodno od mosta tako da se uticaj graničnog uslova praktično gubi do mosta usled neprizmatičnosti korita i otpora kretanja vode u njemu (Slika 5)
Scenario 3 - Regulisano korito kratka deonica (RKKD)	Regulisano korito - granični uslov u zoni mosta Graovo, radi se hidraulička analiza deonice na kojoj treba izvršiti uređenje korita (Slika 4)
Scenario 4 - Regulisano korito dugačka deonica (RKDD)	Regulisano korito - granični uslov je udaljen nizvodno od mosta tako da se uticaj graničnog uslova praktično gubi do mosta usled neprizmatičnosti korita i otpora kretanja vode u njemu (Slika 5)



Slika 6 – Granični uslov (Scenario 1 i 2)



Slika 7 – Granični uslov (Scenario 3 i 4)

Za Scenarije 1 i 3 na najnižvodnijem poprečnom profilu PP1 (Slika 6), 1300 m nizvodno od mosta, postavljen je granični uslov „normalna dubina“, a nivoi vode sračunati za miran režim tečenja do najuzvodnijeg profila.

Za Scenarije 2 i 4 granični uslov „normalna dubina“ je postavljen na PP11 (Slika 7), oko 140 m nizvodno od mosta, a nivoi vode sračunati za miran režim tečenja do najuzvodnijeg profila.

Između poprečnih profila PP1 i PP11 postoje značajne promene morfologije korita, koje se naročito ogledaju u velikom suženju korita na deonici između njih.

2.3 EROZIONI PROCESI

Sračunavanje veličine moguće opšte erozije i erozije oko mostovskih stubova je važan korak pri određivanju regulacionih radova kojima se obezbeđuje zaštita korita reke i osiguranje mostovske konstrukcije.

Opšta erozija rečnog dna (h_e) je sračunata za sve scenarije, za veličinu zrna 15 mm i 20 mm, primenom jednačine Breusers-a u obliku:

$$h_e = 0,14 \cdot (\overline{h_{\max}})^{0,25} \cdot (k \cdot v - v_c)^{1,5} \quad (2)$$

gde je k – faktor turbulencije ($k=1,32$).

Potrebni podaci:

- Granulometrijske karakteristike materijala sa rečnog dna, srednji prečnik nanosa d_{sr} , ugao unutrašnjeg trenja φ .
- Hidraulički parametri pri merodavnom računskom protoku: v_{\max} , maksimalna dubina vode ($h_{sr\max}$, R_{\max}).

Kritična brzina pokretanja nanosnog materijala sa dna korita vodotoka, za srednji prečnik vučenog nanosa sa granulometrijske krive, može se sračunati na osnovu Šezijeve relacije i relacije Šildsa:

$$v_c = C \cdot \sqrt{R_{\max} \cdot J_{cr}} = \frac{1}{n} \cdot R_{\max}^{2/3} \cdot J_{cr}^{1/2} \quad (3)$$

Maksimalna erozija oko mostovskih stubova se sračunava metodom CSU (Colorado State University Equation).

$$\frac{d}{y_1} = 2.0 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_1} \right)^{0,65} \cdot F_r^{0,45} \quad (4)$$

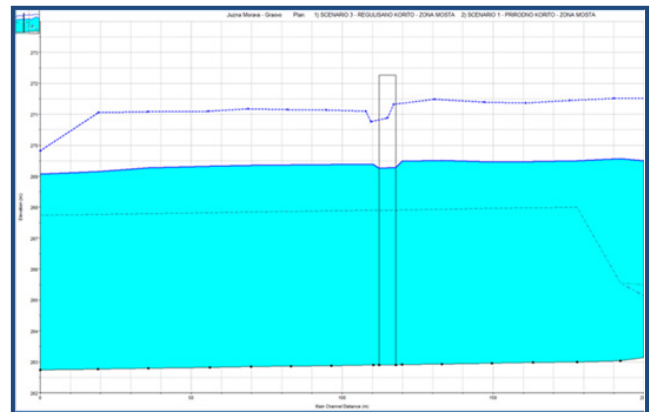
gde je $d = h_e$ najveća dubina erozije oko stubova mosta, y_1 – lokalna dubina u neporemećenom strujnom polju uzvodno od stuba, b – širina stuba (m), F_r – lokalni Frudov broj, K_1 – koeficijent oblika stuba [3], K_2 – koeficijent koji odražava uticaj

napadnog ugla pod kojim tok deluje na stub [3], K_3 – koeficijent koji opisuje stanje rečnog dna [3], K_4 – koeficijent koji definiše mogućnost “samopopločavanja tla” [1] i koji se određuje preko kritične brzine.

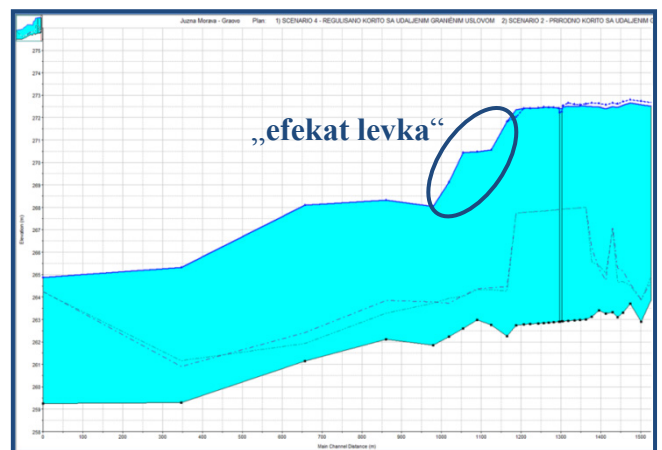
3 REZULTATI I DISKUSIJA

Primenom softvera HEC – RAS modelirani su procesi u slivu kako je to opisano u Poglavlju 2 i sračunati nivoi vode, erozioni potencijal u rečnom koritu i potencijalna erozija oko mostovskih stubova. Hidraulički proračuni su sprovedeni za velike vode $Q_{1\%} = 697 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{2\%} = 604 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rezultati proračuna prikazani su na Slici 8 za Scenarije 1 i 3 i Slici 9 za Scenarije 2 i 4 a za računsku protok $Q_{1\%}$.



Slika 8 – Računski nivoi vodnog ogledala za Scenarije 1 i 3



Slika 9 – Računski nivoi vodnog ogledala za Scenarije 2 i 4

Numerički rezultati proračuna su prikazani u Tabelama 2 i 3.

- Za $Q_{1\%}=687 \text{ m}^3/\text{s}$ sračunati nivoi vode za neuređeno korito u zoni mosta za Scenario 1 i 2, neuređeno korito, zbog načina postavljanja graničnog uslova razlikuju se 1,32 m.
- Za $Q_{2\%}=687 \text{ m}^3/\text{s}$ sračunati nivoi vode za uređeno korito u zoni mosta za Scenario 1 and 2, neuređeno korito, zbog načina postavljanja graničnog uslova razlikuju se 3,07 m.

Zbog značajnog suženja korita između poprečnih profila PP2-PP11, javlja se efekat levka i značajnog uspora na uzvodnoj deonici (Slika 9).

Iako granični uslov „normalna dubina“ postavljen na PP11 izgleda logično, u oba scenarija 1 i 3 neprimetan je efekat levka i uspora koji se propagira

uzvodno, tako da se stvara utisak da most ima jako dobru hidrauličku propustljivost, ali realno konstrukcija mosta može biti poplavljena prilikom nailaska talasa velikih voda.

Postavljanjem graničnog uslova kao u Scenariju 2 i 4 mogu se dobiti nepristrasni rezultati hidrauličkih proračuna.

Činjenica da ne postoji značajna razlika u nivoima vode za Scenarije 2 i 4, iako postoji opasnost od preliivanja vode preko mosta, vodi do koncepta stabilizacije rečnog korita u pogledu fluvijalne erozije. U tu svrhu potrebno je sračunati veličine moguće opšte erozije i erozije oko mostovskih stubova.

Tabela 2- Analizirani scenariji za proračun nivoa vode za $Q_{1\%}$

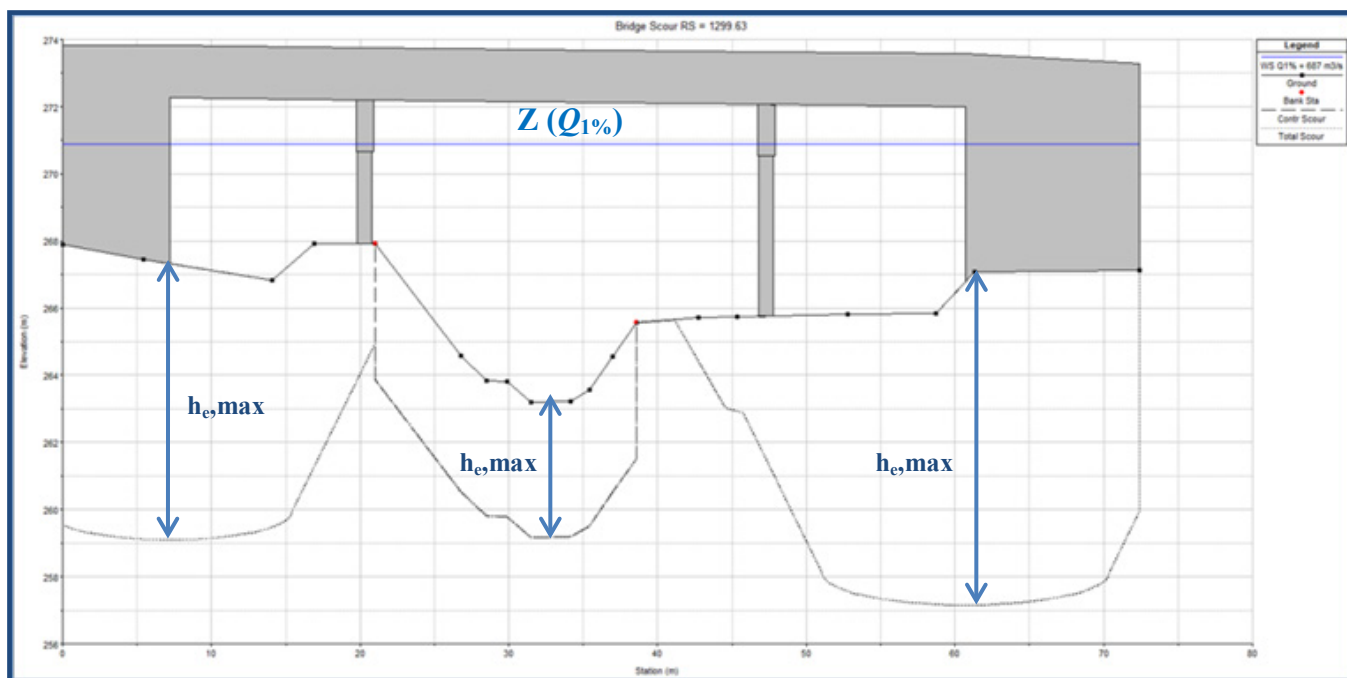
$Q_{1\%} = 687 \text{ m}^3/\text{s}$	Poprečni profil 18	Δ	Most Graovo	Poprečni profil 19	Δ
	Nivo vode	(m)		Nivo vode	(m)
SCENARIO 1	271,09	1,32		271,33	1,08
SCENARIO 2	272,41			272,41	
SCENARIO 3	269,37	3,07		269,48	3,00
SCENARIO 4	272,44			272,48	

Tabela 3- Analizirani scenariji za proračun nivoa vode za $Q_{2\%}$

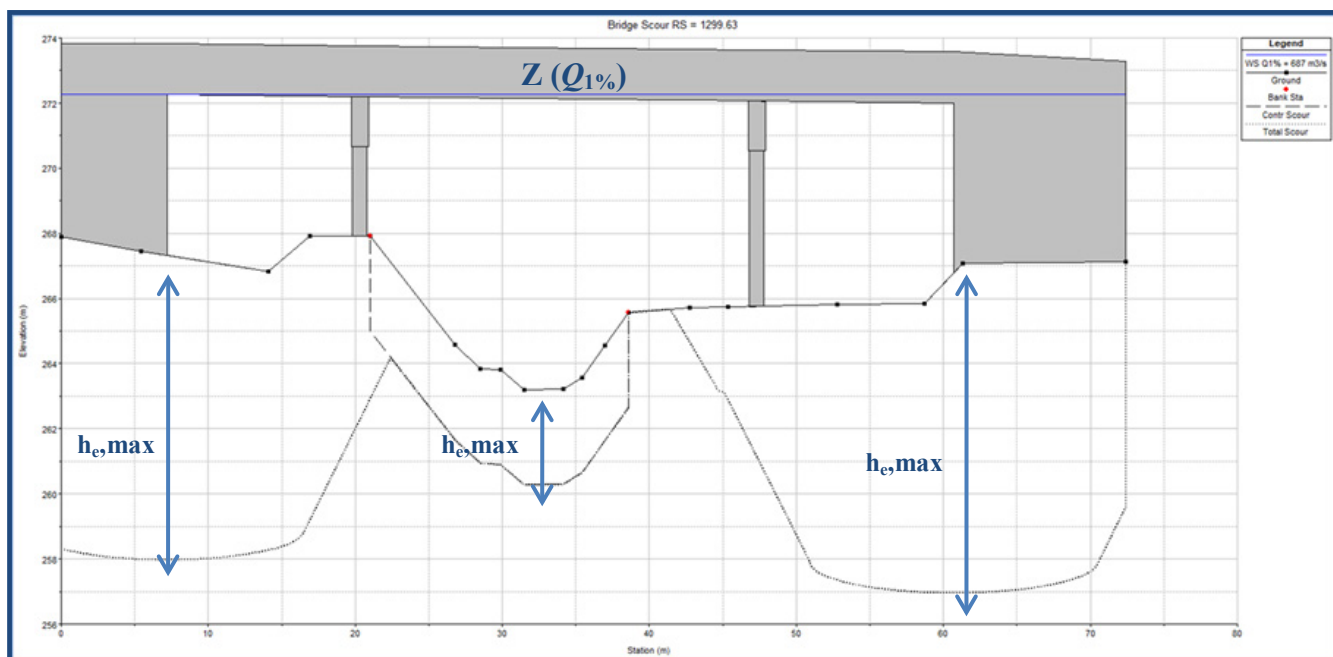
$Q_{2\%} = 604 \text{ m}^3/\text{s}$	Poprečni profil 18	Δ	Most Graovo	Poprečni profil 19	Δ
	Nivo vode	(m)		Nivo vode	(m)
SCENARIO 1	270,64	1,09		270,84	1,03
SCENARIO 2	271,73			271,87	
SCENARIO 3	268,97	2,79		269,07	2,72
SCENARIO 4	272,44			272,48	

Opšta erozija rečnog dna (h_e) i erozija oko stubova mosta je sračunata za sve scenarije, za veličinu zrna 15 mm i 20 mm, primenom jednačina (2) i (3) respektivno. Rezultati proračuna za računski protok

$Q_{1\%}$ a za scenarije 1 i 2 prikazani su na Slikama 10 i 11. U oba slučaja, za Scenarije 1 i 2, postoji značajan erozioni potencijal, pa je neophodno izvesti radove na uređenju korita i sprečiti pojavu erozije.



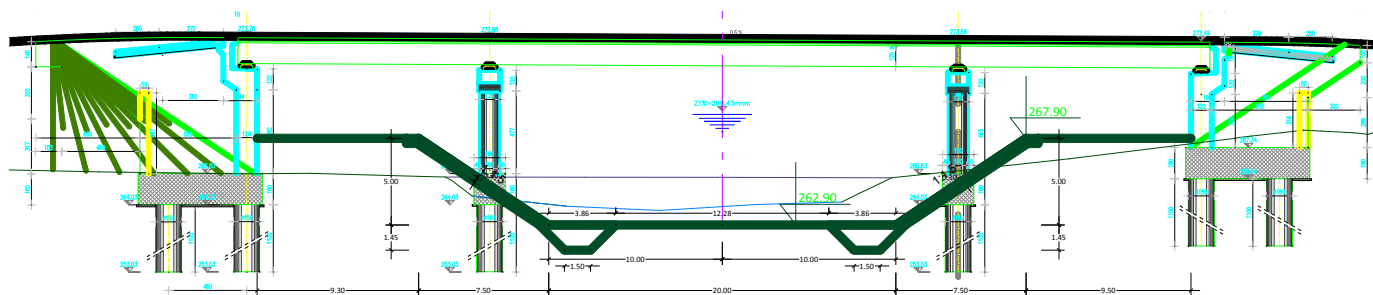
Slika 10 – Opšta i lokalna erozija za Scenario 1



Slika 11 – Opšta i lokalna erozija za Scenario 2

Na Slici 12 prikazana je koncepcija uređenja vodotoka u samom profile mosta. Poprečni profil je usvojen sa sledećim elementima:

- širina minor korita $B = 20$ m,
- nagib kosine obala 1:1,5,
- visina $h = 5$ m.



Slika 12 – Profil mosta “Graovo” [6]

Nakon usvajanja tipskog poprečnog profila urađen je proračun opšte erozije i oko mostovskih stubova za Scenarije 1 i 3. Rezultati proračuna su prikazani u Tabelama 4 i 5. Sagledavajući prikazane rezultate

proračuna, očigledno je da uređenje korita ima vrlo povoljan uticaj na veličinu erozije u zoni mosta, koja je daleko manja.

Tabela 4- Proračun opšte erozije u zoni mosta

	Q	Podaci iz hidrauličkog modela			$d_{50}=20\text{mm}$			$d_{50}=15\text{mm}$		
		V_{sr}	R	h_{max}	J_c	V_c	$h_{e,max}$	J_c	V_c	$h_{e,max}$
Scenario 1 - PKKD	(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m)	($\text{m/m}'$)	(m/s)	(m)	($\text{m/m}'$)	(m/s)	(m)
	604	3,17	4,22	7,64	0,000368	1,32	3,43	0,000276	1,14	3,18
	687	3,27	4,5	8,13	0,000345	1,33	4,04	0,000259	1,15	3,58
Scenario 3 - RKKD	(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m)	($\text{m/m}'$)	(m/s)	(m)	($\text{m/m}'$)	(m/s)	(m)
	604	3,39	3,38	6,57	0,00046	1,27	1,04	0,00034	1,10	1,13
	687	3,69	4,40	7,85	0,00035	1,33	1,35	0,00026	1,15	1,46

Tabela 5- Proračun potencijalne erozije u zoni mostovskih stubova

	Q	$d_{50}=20\text{mm}$		$d_{50}=15\text{mm}$	
		V_c	d	V_c	d
		(m^3/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
Scenario 1 - PKKD	604	1,32	2,83	1,14	2,83
	687	1,33	2,90	1,15	2,90
Scenario 3 - RKKD	604	1,25	2,77	1,08	2,78
	687	1,27	2,84	1,10	2,85

4 ZAKLJUČAK

U radu su prikazani osnovni koraci prilikom usvajanja koncepcije rešenja uređenja vodotoka na primeru deonice reke Južne Morave u zoni mosta Graovo u Grdeličkoj klisuri.

Rezultati hidrauličkog modela pokazuju da u zoni objekta u rečnom koritu treba obratiti pažnju na dužinu deonice i postaviti granični uslov na dovoljno udaljenosti kako on ne bi imao dominantan uticaj na vrednosti računskih nivoa vode u blizini objekta. Na slučaju predmetne deonice Južne Morave pokazalo se da se računski nivoi vode mogu znatno razlikovati u zavisnosti od toga na koji način se postavlja granični uslov, zbog značajnih promena morfologije korita na nizvodnoj deonici, čiji uticaj preblizu postavljen granični uslov (što je vrlo čest slučaj) jednostavno ne prepoznaje.

Nekada, u slučaju nailaska poplavnog talasa, zbog prakse usvajanja kratke računске deonice može doći do preliivanja vode preko mostovske konstrukcije.

Proračun erozije je sproveden za sve usvojene Scenarije, za uslove korita u zatečenom stanju kao i korita sa usvojenom projektovanom geometrijom. Kao što je pokazano u svim slučajevima je reka pokazala izuzetan erozivni potencijal, ali se taj potencijal znatno smanjuje samo planiranjem geometrije profila.

Usvajanjem koncepcije rešenja uređenja vodotoka u zoni mosta pomoću obaloutvrda od kamena u cementnom malteru i pragova, erozija dna i oko mostovskih stubova i kegli se praktično eliminiše kao opasnost. Stoga je potrebno nakon kompletiranja radova na stubovima mosta pažljivo izvršiti oblaganje projektovanih kosina oko njih, tj. izvršiti povezivanje konstrukcije stubova i formiranih obaloutvrda.

LITERATURA

- [1] Babić Mladenović Marina: **Uređenje vodotoka**. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 2018.
- [2] Ilić Aleksandra, Radivojević Dragan, Radivojević Borko: **Influence of the length of river bed section and the boundary condition on the accuracy of the calculated water surface level for designing structure in the river bed**, *International Jubilee Scientific Conference “80th Anniversary of „UACEG”*, 11-14 November, Sofia, Bulgaria, 2022.
- [3] Jovanović Miodrag: **Regulacija reka**. Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.

- [4] Havinga, H. **Towards sustainable river management of the Dutch Rhine river**. *Water*, 2020, 12, 1827.
- [5] HEC-RAS River Analysis System: **Users Manual, Version 5**. 2016. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf5>, (12.12.2021.)
- [6] Radivojević Dragan, Ilić Aleksandra, Radivojević Borko: **Projekat za izvođenje uređenja korita reke Južne Morave u zoni mosta Graovo u dužini od 177,80 m.** „Koridori Srbije“, 2022.
- [7] Rodríguez-Amaya Carlos; Durán-Ariza Argelino; Duarte-Méndez Santiago: **Submerged vane technology in Colombia: Five representative projects**. *Water*, 12, 984, 2020.
- [8] Mosselman Erik: **Studies on River Training**. *Water*, 12(11):3100, doi: 10.3390/w12113100, 2020.
- [9] Oberhagemann, Knut; Aminul, H.A.M.; Thompson, Angela: **Riverbank protection and river training in Bangladesh**. *Water*, 12, 3018, 2020.
- [10] Van der Wal Maarten: **Bank protection structures along the Brahmaputra-Jamuna River, a study of flow slides and other geotechnical instabilities**. *Water*, 12, 2588, 2020.