

Analiza uticaja erozije rečnog korita u toku izgradnje hidrotehničkih objekta na primeru privremenog prelaza na reci Južnoj Moravi na stacionaži km 2+404,00

Borko Radivojević¹
Dragan Radivojević²
Aleksandra Ilić³

APSTRAKT: Prilikom projektovanja objekata u rečnom koritu važno je pored analize uticaja na izgrađen objekat analizirati i uticaje na objekat u fazi izgradnje. Uticaji u fazi izgradnje mogu biti značajno veći od uticaja na izgrađen objekat, što može stvoriti ozbiljne opasnosti i štete na delimično izgrađenom objektu. U radu su na primeru privremenog prelaza na Južnoj Moravi na stacionaži km 2+404, koji je početkom 2021 godine pretrpeo ozbiljna oštećenja tokom izgradnje, uporedo analizirane hidrauličke veličine i procenjena potencijalna erozija za više različitih scenarija: tečenje u prirodnom koritu, tečenje u okolini izgrađenog objekta u funkciji i tečenje u okolini delimično izgrađenog objekta. Proračuni veličine erozije su sprovedene za različite veličine proticaja, počev od srednjih voda pa do maksimalno registrovanih na stanici Mojsinje (1500 m³/s). Dobijeni rezultati hidrauličkih proračuna pokazuju da se na delimično izgrađenom objektu javljaju znatno veće brzine i vučne sile nego na potpuno izgrađenom objektu. Kao posledica toga je jako uvećan erozioni potencijal, koji je glavni uzrok oštećenja na analiziranom privremenom prelazu u izgradnji, što jasno pokazuje da se moraju pažljivo analizirati i uticaji na objekat u fazi izgradnje.

Ključne reči: lokalna erozija, rečno korito, 1D model, 2D model, privremeni prelaz

Analysis of the impact of riverbed erosion during the construction of hydraulic structures on the example of a temporary crossing on the Južna Morava river at the stationing km 2+404.00

ABSTRACT: When designing in the riverbed, it is important, in addition to the analysis of the loads on the built structure, to analyze the impacts on the structure during the construction phase. Loads in the construction phase can be significantly greater than the impact on the built structure, which can create serious hazards and damage to the partially constructed structure. This paper uses the example of the temporary crossing on the Južna Morava at the stationing km 2+404, which suffered serious damage during construction at the beginning of 2021. The hydraulic values are analyzed and the potential erosion estimated for several different scenarios: flow in the natural bed, flow in the vicinity of the built structure in operation and flow in the vicinity of a partially constructed facility. Erosion range calculations were performed for different discharge values, starting from medium waters to the maximum registered at the Mojsinje station (1500 m³/s). The obtained results of hydraulic calculations show that significantly higher velocities and drag forces occur on a partially constructed structure than on built structure. As a consequence, the erosion potential is greatly increased, which is the main cause of damage at the analyzed temporary transition in construction, which clearly shows that the impacts on the structure during the construction phase must be carefully analyzed.

Keywords: erosion, riverbed, structure

¹Borko Radivojević, mast. inž. građ, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, borko.radivojevic@yahoo.com

²Doc. dr Dragan Radivojević, dipl. inž. građ, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, dragan.radivojevic@gaf.ni.ac.rs

³Aleksandra Ilić, dipl. inž. građ, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

1 Uvod

Prilikom projektovanja objekata, pored analize zatečenog stanja na terenu i očekivanog nakon završetka izgradnje, jako je važno izvršiti analizu uticaja i opasnosti koje objekti mogu pretrpeti u fazi izgradnje. Posebno je to važno za objekte koji se nalaze u vodnim tokovima, gde su stalno prisutne oscilacije nivoa vode, a samim tim i brzina toka i vučne sile. Iako bi potpuno izgrađen objekat bio u stanju da podnese sva predviđena opterećenja, potrebno je izvršiti analize scenarija delimično izgrađenog objekta na incidentne pojave velikih voda. Pri tome treba uzeti u obzir tehnologiju građenja i predvideti mere zaštite objekta od štetnih uticaja tokom izgradnje. Štete koje se mogu pojaviti ne moraju biti spektakularni lomovi i rušenja, već mogu biti i deformacije na delu izgrađenog objekta koje stvaraju ozbiljne probleme ili onemogućavaju normalnu upotrebu objekta u fazi eksploatacije. Posledice su materijalna šteta, jer se delovi ili ceo objekat moraju ukloniti iz rečnog korita, uvećanje troškova gradnje, produžetak rokova i druge štete pored opasnosti koja se stvara po angažovanu radnu snagu i mehanizaciju.

U ovom radu se na primeru oštećenja privremenog prelaza na reci Južnoj Moravi na stacionaži reke km 2+404, prilikom nailaska poplavnog talasa početkom 2021. prikazuje analiza uticaja u periodu izgradnje objekta koji nisu bili uzeti u obzir prilikom izrade projekta privremenog prelaza. Privremeni prelaz je građen za potrebe saobraćajne komunikacije i transporta građevinskog materijala preko Južne Morave tokom izgradnje novog mosta na Moravskom koridoru na stacionaži koridora km 8+519.

U toku gradnje ovog privremenog prelaza početkom 2021. godine usled pojave kišnog perioda, koji je trajao celu sedmicu sa povremenim prekidima, naišao je poplavni talas koji je doveo do loma konstrukcije. Prema javno dostupnim podacima RHMZ registrovan je maksimalni proticaj $Q=777 \text{ m}^3/\text{s}$ na najbližoj mernoj stanici površinskih voda H.S. Mojsinje. Veličina špica poplavnog talasa spada u kategoriju vrlo velikih voda (kategorija statističke analize, kada se u statističku analizu uključuju samo veličine maksimalnih godišnjih proticaja).

Predmet ovog rada je procena i prikaz veličine potencijalne erozije u koritu i u zoni objekta na mikrolokaciji privremenog prelaza u toku izgradnje za uslove kada je polovina poprečnog profila Južne Morave na mestu izgradnje privremenog prelaza bila zatvorena zagatom za omogućavanje izvođenja radova u suvom. Obzirom da tokom oštećenja objekta nije bilo horizontalnih pomeranja delova delimično izgrađenog objekta, prvenstveno zbog njegove velike težine, njegova stabilnost na klizanje i isplivavanje je dokazana na terenu. Delovi objekta su pretrpeli neravnomerno sleganje, što ukazuje na lom tla ispod objekta usled erozije u rečnom koritu, pa je zato izvršena obimna analiza potencijalne erozije u koritu na mestu izgradnje privremenog prelaza.

Hidrauličkim analizama obuhvaćena su četiri scenarija pojave erozije tokom izgradnje objekta:

- Erozija u prirodnom koritu pre postavljanja privremenog prelaza
- Erozija postavljenog privremenog prelaza sa kontinualnom armiranom donjom pločom
- Erozija postavljenog privremenog prelaza sa prekidima donje armirane ploče u srednjem delu objekta na mestu ribljih prolaza
- Erozija na mestu objekta u toku izgradnje za uslove kada je naišao poplavni talas

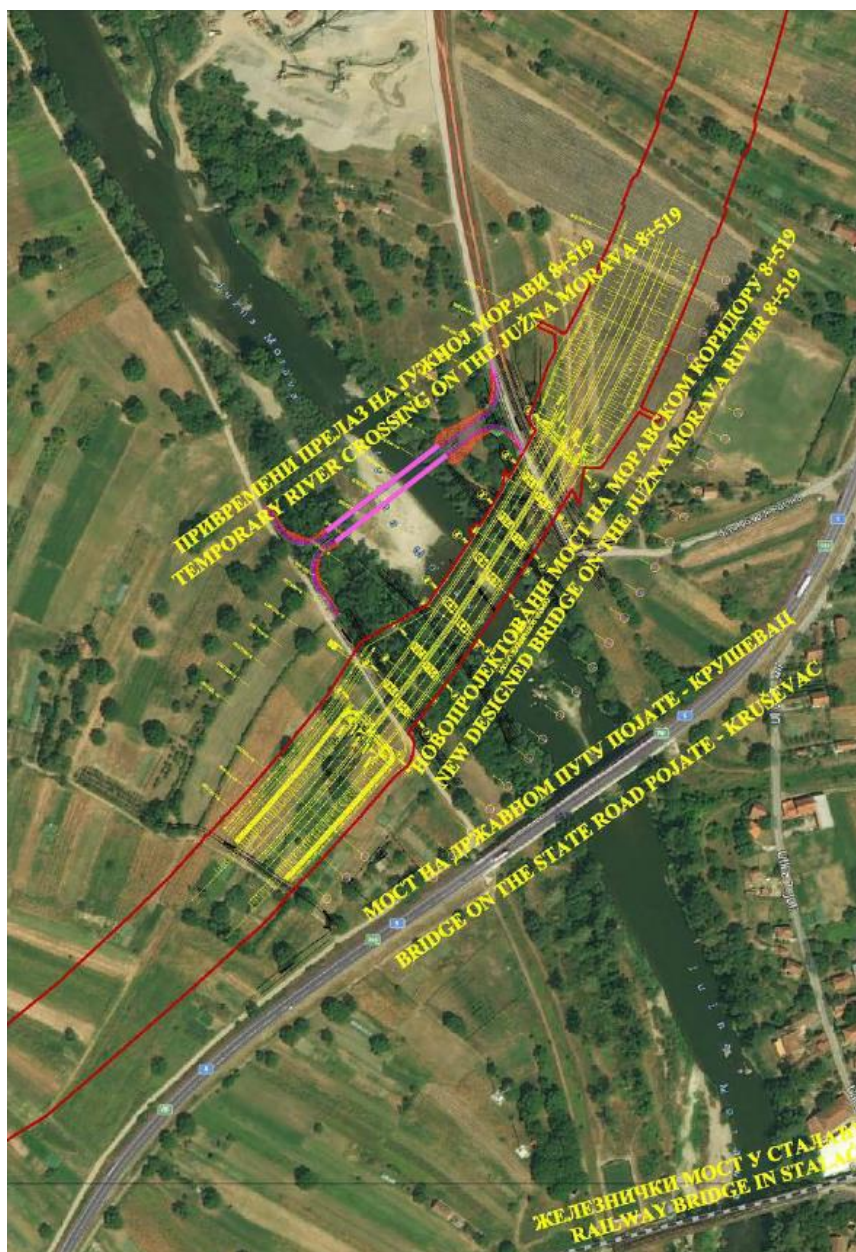
2 Opis lokacije i objekta

2.1.1 Lokacija

Lokacija privremenog prelaza se nalazi na planiranoj trasi Moravskog koridora u izgradnji na apsolutnoj stacionaži duž reke Južne Morave km 2+404, neposredno nizvodno od drumskog mosta na Južnoj Moravi km 2+670 na državnom putu Pojate-Kruševac (Slika 1.). Uzvodno se nalazi i železnički most u Stalaću na stacionaži km 3+010.

Ovo je najnižvodniji deo toka reke Južne Morave pred sastav sa rekam Zapadnom Moravom gde se formira Velika Morava.

Minor korito reke Južne Morave na lokaciji karakteriše velika propusna moć. Na desnoj i levoj obali podignuti nasipi su visine oko 1.8 m. U periodima pojave velikih voda najveći deo proticaja protiče kroz glavno korito, a jako mali kroz inundacije. Obzirom na veliku širinu vodotoka, u periodima povlačenja talasa velikih voda izražene su pojave peščanih i šljunčanih sprudova i formiranje više parcijalnih tokova u osnovnom koritu.



Slika 1. Lokacija postojećih mostova, novoprojektovanog mosta na Moravskom koridoru i privremenog prelaza

2.1.2 Izgled konstrukcije

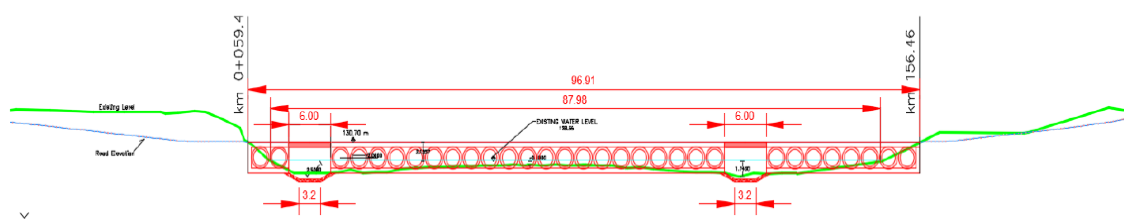
Konstrukcija privremenog prelaza je projektovana u osnovnom koritu reke Južne Morave na profilu sa apsolutnom stacionažom od ušća km 2+404. Pristup privremenom prelazu je formiran i uređen sa obe obale, uz obezbeđenje postojećih prilaza i izgrađenih nasipa.

Izgradnja privremenog prelaza je projektom konstrukcije predviđena na sabijenoj šljunčanoj podlozi nosivosti 40 MPa. Konstrukcija privremenog prelaza sastoji se od donje AB ploče debljine

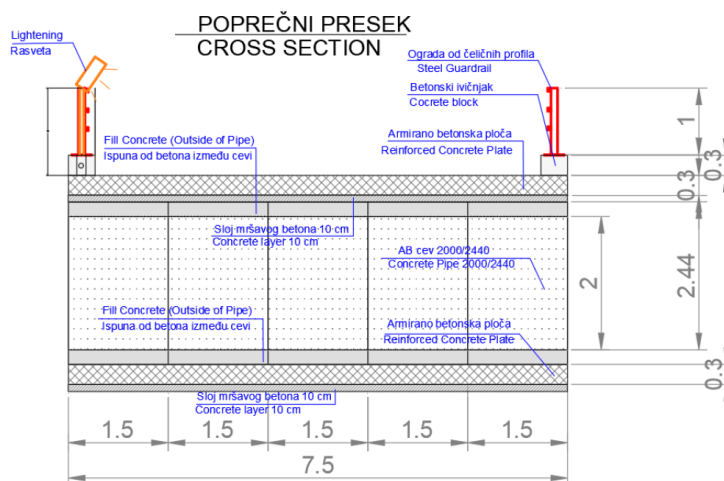
30 cm postavljene na sloju mršavog betona 10 cm za izravnanje, 31 armirano betonske cevi unutrašnjeg prečnika 2000 mm, spoljnog prečnika 2440 mm sa međusobnim razmakom od 25 cm, sloja mršavog betona za izravnanje 10 cm i gornje AB ploče debljine 30 cm (Slika 2. i 3). Na uzvodnoj strani prelaza postavljen je zaštitni prag visine 70 cm.

Na dva mesta na privremenom prelazu, gde je najdublje korito, kako bi se u periodu veoma malih voda omogućila nesmetana migracija rečnog biljnog i životinjskog sveta, projektovani su riblji propusti širine 6 m. Rečno dno na mestu propusta treba da ostane u prirodnom stanju, a delovi pored temeljne ploče prelaza obezbeđeni krupnim kamenom od zarušavanja i erozije.

Zbog konfiguracije korita predviđeno je da levoobalni deo prelaza ima 8, srednji deo 21 i desnoobalni 2 cevi. Na taj način praktično kroz riblje prolaze postoje dva sekundarna toka sa ozbiljnim gabaritima kroz koje se može nesmetano odvijati migracija biljnog i životinjskog sveta tokom čitavog perioda eksploatacije privremenog prelaza.



Slika 2. Podužni presek privremenog prelaza na poprečnom profilu km 2+404



Slika 3. Poprečni presek privremenog prelaza

2.1.3 Zatečeno stanje konstrukcije nakon nailaska poplavnog talasa

U trenutku nailaska poplavnog talasa na desnoj obali Južne Morave bio je postavljen zagat uzvodno i nizvodno od prelaza u izgradnji. Postavljenim zagatom sa desne obale tok reke je bio pregrađen tako da je proticajni profil u koritu bio znatno sužen. U funkciji je bio deo objekta sa 8 cevi na levoobalnom delu, riblji propust, a od ukupno 12 postavljenih na srednjem slobodnostojećem delu objekta u funkciji je bilo 9 cevi. Poplavni talas nije pomerio delimično izgrađen objekat, čime je dokazana njegova otpornost na klizanje, niti je došlo do prevrtanja, ali je izazvao ispiranje tla ispod srednjeg dela objekta koji je još bio u fazi izgradnje (Slika 4).

Ispiranje sabijenog tla ispod srednjeg dela objekta izazvalo je neravnomerno sleganje na uzvodnoj i nizvodnoj strani, usled čega je taj deo objekta delimično potonuo, a neravnomernost sleganja dovela do loma gornje ploče i ozbiljne deformacije konstrukcije.



Slika 4. Oštećen objekat, pogled sa leve obale; srednji deo i ploča preko ribljeg prelaza deformisani do neupotrebljivosti, na levoobalnom delu objekta se ne zapažaju oštećenja

Vizuelnom inspekcijom na terenu na priobalnom delu objekta od leve obale do ribljeg prelaza koji zalazi u levu obalu i koji nije bio izložen dejstvu matice, ne mogu se приметiti oštećenja.

Osovina izgrađenog dela objekta nije pomerena, a na priobalnom delu objekta uz levu obalu nisu zapažena sleganja, tako da on izgleda neoštećen.

3 Primenjena metodologija hidrauličkih analiza i korišćene podloge

Hidrauličke analize su sprovedene na potezu od sastava Južne i Zapadne Morave uzvodno do profila iznad Stalaća km 5+315.59, za srednje, tako i vrlo velike vode, u stanju potopljenog prelaza, kako bi se proverila otpornost korita i konstrukcije na pojavu erozije sabijenog tla ispod objekta. Na taj način obezbeđena je reprezentativna slika strujanja na dužem potezu i obezbedili kvalitetni ulazni podaci za proračun erozije u koritu u zoni privremenog prelaza. Sračunate su sve hidrauličke veličine potrebne za proračun veličine potencijalne erozije koja bi se mogla javiti: kota vodnog ogledala, maksimalna dubina, hidraulički radijus, hidraulička dubina, srednje profilne brzine kao i vučne sile na poprečnim profilima neposredno uz privremeni prelaz.

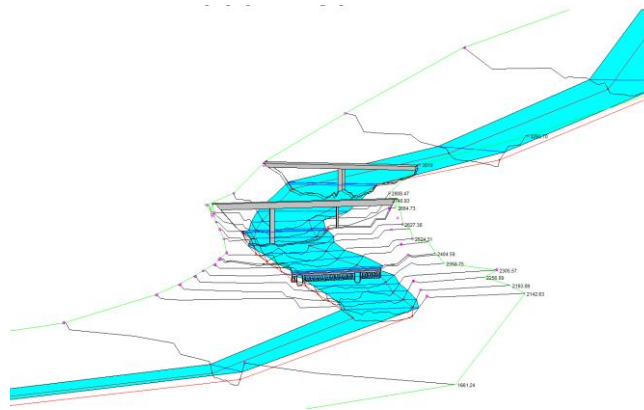
Hidraulički proračuni su sprovedeni primenom softvera HEC-RAS i to za ustaljeno strujanje na linijskom (1D) modelu (Slika 5), a za proveru i detaljniju analizu dobijenih veličina formiran je i ravanski (2D) model .

Maksimalne veličine proticaja sračunate hidrauličkim proračunima koje privremeni prelaz može da propusti uz tečenje sa slobodnom površinom kroz cevi sa slobodnim tečenjem bez opasnosti od preliivanja preko prelaza su $290 \text{ m}^3/\text{s}$. Ove vode su u daljem tekstu označene kao „radni proticaj“.

3.1 Primena softverskog paketa HEC-RAS za proračun hidrauličkih veličina

HEC-RAS je softver za simulaciju tečenja u otvorenim vodnim tokovima, razvijen od strane Inženjerskog Hidrološkog Centra vojnog korpusa inženjera SAD-a. Program je razvijen o trošku Savezne vlade SAD-a i koncipiran je kao javno dostupan. Ovaj program se može besplatno preuzeti sa internet sajta www.hec.usace.army.mil [4].

HEC-RAS sadrži četiri komponente za analizu tečenja u rečnim tokovima:



Slika 5. Prikaz linijskog modela u HEC-RAS-u

- Simulacija za ustaljen režim tečenja u otvorenim tokovima
- Simulacija neustaljenog tečenja u otvorenim tokovima
- Simulacija pokretanja nanosa
- Analiza kvaliteta vode

U trenutnim verzijama su dostupne geoprostorne mogućnosti za efikasnije kreiranje i doradivanje hidrauličke geometrije modela, kao i brzo analiziranje rezultata kroz geoprostornu vizuelizaciju.

3.2 Opis korišćenih jednačina

Za hidrauličku analizu ustaljenog nejednolikog tečenja u HEC-RAS-u korišćene su:

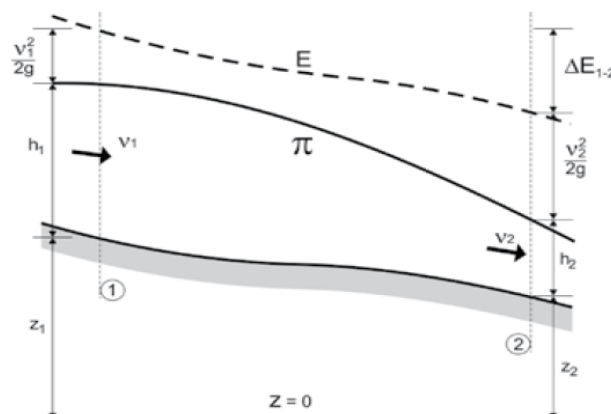
- *Jednačina kontinuiteta:*

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1)$$

- *Jednačina održanja energije ili Bernulijeva jednačina:*

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + Z_2 + \Delta E_{1-2} \quad (2)$$

gde su: V_1 i V_2 - brzine vode u profilima 1 i 2 (m/s), Z_1 i Z_2 – kote dna u profilima 1 i 2 (m), h_1 i h_2 – dubine vode u profilima 1 i 2 (m), ΔE_{1-2} - gubitak energije između profila 1 i 2 (m), g – gravitaciona konstanta (m^2/s).



Slika 6. Postavka Bernulijeve jednačine za otvoren tok ([5,6]).

Iz Bernulijeve jednačine se izvodi izraz za promenu nivoa vode između dva susedna profila:

$$h_1 - h_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g} + \Delta Z + \Delta E_{1-2}$$

u kome prvi član predstavlja promenu brzinske visine, drugi promenu kote dna i treći gubitak energije, koji ima komponentu lokalnog gubitka (ΔE_l) i gubitka na trenje (ΔE_{tr}).

$$\Delta E_{1-2} = \Delta E_l + \Delta E_{tr}$$

gde je:

$$\Delta E_l = \xi \cdot \left| \frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \right| \quad (3)$$

(ξ) - koeficijent lokalnog gubitka energije. Gubitak na trenje se određuje pomoću Šezi-Maningove jednačine:

$$\Delta E_{tr} = J \cdot \Delta x = \frac{n \cdot Q^2}{A_s^2 R_s^{4/3}} \cdot \Delta x \quad (4)$$

gde je: J – pad linije nivoa između profila. Δx – rastojanje između profila (m), n – Maningov koeficijent hrapavosti ($m^{-1/3}$), A_s – srednja vrednost površina proticajnih profila 1 i 2 (m^2), O_s – srednja vrednost okvašenog obima profila 1 i 2 (m) i osrednjeni R_s – osrednjeni hidraulički radijus (m):

$$A_s = \frac{A_1 + A_2}{2}; O_s = \frac{O_1 + O_2}{2}; R_s = \frac{A_s}{O_s} \quad (5)$$

Postupak proračuna je iterativan, jer nije moguće izvesti eksplicitni oblik [5].

Za određivanje dubina erozija u ribljim prolazima korišćena je CSU metoda u HEC-RAS-u. U literaturi postoji veliki broj empirijskih obrazaca za proračun lokalne deformacije oko mostovskih stubova. Najpoznatiji obrazac, koje je godinama potvrđivan u svetskoj praksi, je obrazac CSU (Colorado State University) [3, 5]:

$$\frac{h_e}{h} = 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \left(\frac{b_s}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43} \quad (6)$$

gde je: h_e – najveća eroziona dubina u odnosu na referentno dno korita, h – lokalna dubina u neporemećenom strujnom polju uzvodno od stuba, b_s – širina stuba (m), $Fr = V/\sqrt{g \cdot h}$ - lokalni Frudov broj, V – brzina toka osrednjena po dubini h (m/s), g – gravitaciono ubrzanje, K_1 – koeficijent oblika stuba (Tabela 3.), K_2 – koeficijent koji odražava uticaj napadnog ugla pod kojim tok deluje na stub, K_3 – koeficijent koji opisuje stanje rečnog dna, K_4 – koeficijent koji definiše mogućnost „samopopločavanja dna“.

Tabela 3. Vrednost koeficijenta K_1

Oblik prednjeg dela stuba	K_1
Četvrtast	1.1
Okrugli	1.0
Cilindrični	1.0
Grupa cilindara	1.0
Oštroivični	0.9

Koeficijent K_2 se računa po formuli:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{b_s} \cdot \sin\theta \right)^{0.65} \quad (7)$$

gdje je: θ – ugao koji stubovi zahvataju sa pravcem rečnog toka, L – dužina stubova (m), b_s – širina stuba (m).

Koeficijent K_4 se određuje preko kritične brzine za pokretanje nanosa iz dna. Za proračun lokalne erozije merodavan je protok koji protiče kroz osnovno korito [3, 5].

Tabela 4. Vrednost koeficijenta K_3

Stanje dna	K_3
Erodirano	1.1
Ravno dno ili antidine	1.1
Male dine	1.1
Srednje dine	1.1-1.2
Velike dine	1.3

3.3 Podaci i podloge za hidrauličke proračune

3.3.1 Geodetske podloge

Za sprovođenje hidrauličkih proračuna pripremljene su odgovarajuće geodetske podloge. Izvršeno je snimanje od sastava Južne i Zapadne Morave uzvodno do lokacije Stalaća, na apsolutnoj stacionaži na km 5+315.59 m. Deo poprečnih profila koji se nalazio pod vodom snimljen je ehosonderom iz čamca 03.07.2020 i 09.07.2020. Ostale tačke na profilima su snimljene u suvom, standardnim geodetskim metodama. Na osnovu ovih snimaka, napravljen je digitalni model terena koji pouzdano reprezentuje stvarno stanje na terenu.

Geodetski snimci mostova uzvodno od lokacije privremenog prelaza, drumskog na državnom putu Pojate – Kruševac i železničkog u Stalaću, preuzeti su iz Generalnog projekta uređenja Južne Morave, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi 2006 [2].

3.3.2 Hidrološke podloge

Uslovima JP Srbijavode VPC Morava Niš propisano je da prelaz mora imati minimalnu propusnu moć za merodavne proticaje $Q_{20\%}(5\text{god})=135 \text{ m}^3/\text{s}$.

Usvajanje karakterističnih srednjih dnevnih proticaja je izvršeno sa krive trajanja na najbližoj hidrološkoj stanici površinskih voda H.S. Mojsinje (Vodoprivredna osnova Srbije 2009 [9]), Tabela 1.

Za proračun propusnosti privremenog prelaza korišćeni su merodavni proticaji iz Tabele 1, dok su za određivanje maksimalne hidrauličke propusnosti korita i određivanja maksimalnog uspora i dužine njegovog prostiranja koji se javlja uzvodno od prelaza korišćeni podaci dobijeni statističkom analizom špičeva poplavnih talasa (vrlo velike vode) na H.S. Mojsinje, Tabela 2 [8].

Tabela 1. Srednje dnevni proticaji

T=2god ($Q_{50\%}$)	T=5god ($Q_{20\%}$)	T=10god ($Q_{10\%}$)	T=20god ($Q_{5\%}$)	T=50god ($Q_{2\%}$)	T=100god ($Q_{1\%}$)
m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
58.7	135	205	290	423	542

Tabela 2.

T=2god ($Q_{vv50\%}$)	Q (januar 2021.)	T=5god ($Q_{vv20\%}$)	T=10god ($Q_{vv10\%}$)	$Q_{\text{max,reg}}$
m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
637	777	1019	1276	1450

U hidrauličku analizu je uključena i maksimalna vrednost proticaja $Q=777 \text{ m}^3/\text{s}$ tokom poplavnog talasa iz januara 2021. godine [7], kao i maksimalna vrednost ikada registrovanog proticaja na H.S. Mojsinje, $Q=1450 \text{ m}^3/\text{s}$ [7].

3.3.3 Hidrauličke podloge

Usvajanje koeficijenata hrapavosti izvršeno je nakon prospekcije terena, preporuka iz postojeće literature [1], projektne dokumentacije i dokumentacije [GP Černi] i stečenog iskustva. Za tečenje u osnovnom koritu usvojen je koeficijent hrapavosti $0.034 \text{ s/m}^{1/3}$, a za tečenje u inundaciji $n=0.08 \text{ s/m}^{1/3}$. Ove vrednosti su korišćene i za 1D model i za formiranje zona Manningovog koeficijenta u 2D modelu.

3.3.4 Psamološke podloge

Merodavna krupnoća nanosa za analizu je preuzeta iz brojne literature i dokumentacije urađene za sliv Južne i Zapadne Morave [2].

Veličina moguće erozije sračunata je za merodavni prečnik čestica nanosa sa dna i to:

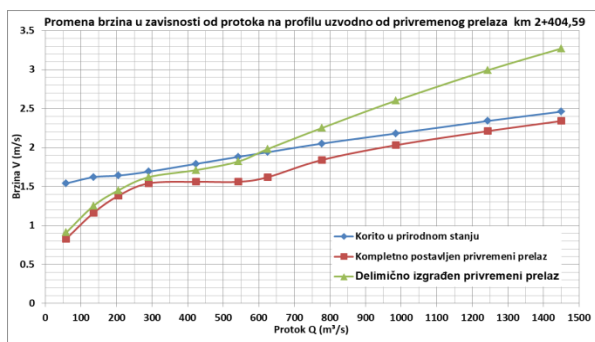
- $d_{50}=25 \text{ mm}$
- $d_{50}=15 \text{ mm}$
- $d_{50}=6 \text{ mm}$
- ugao unutrašnjeg trenja – $\varphi=23^\circ$

4 Rezultati

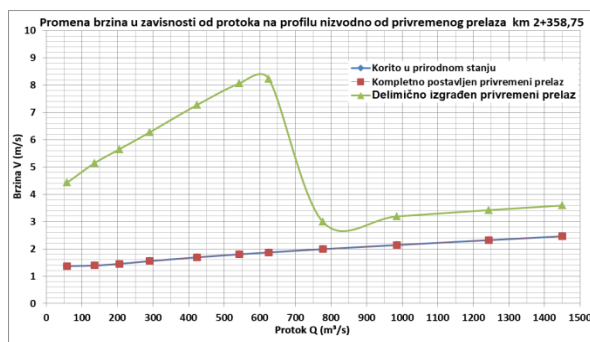
Hidrauličkim analizama i procenom veličine potencijalne erozije zapaženo je da za potpuno izgrađen prelaz nema razlike u vrednostima hidrauličkih veličina bez obzira da li je izgrađen sa kontinualnom temeljnom pločom u dnu ili sa dva prekida temeljne ploče zbog ribljih prelaza. Velika odstupanja u vrednostima hidrauličkih veličina se zapažaju na profilu neposredno nizvodno od privremenog prelaza za objekat u fazi izgrađenosti („delimično izgrađen objekat“) u periodu nailaska poplavnog talasa u odnosu na sve ostale scenarije.

4.1 Sračunate hidrauličke veličine

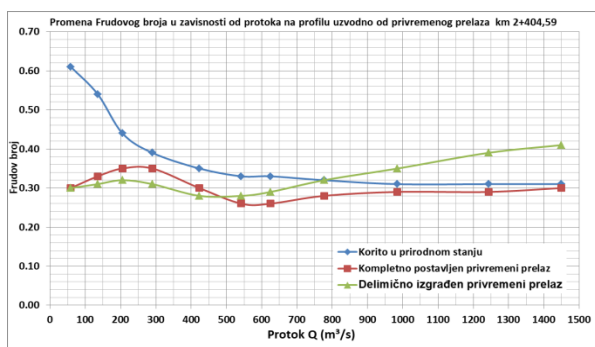
Na Slikama 7.1, 7.3 i 7.5 prikazane su sračunate hidrauličke veličine za 1D hidrauličku analizu u zavisnosti od veličine proticaja – brzine, Frudov broj i vučne sile na profilu neposredno uzvodno od privremenog prelaza, dok su na Slikama 7.2, 7.4 i 7.6 prikazane veličine za nizvodni profil, za scenarije tečenja u prirodnom stanju korita, sa kompletno postavljenim privremenim prelazom i delimično postavljenim privremenim prelazom u fazi izgradnje.



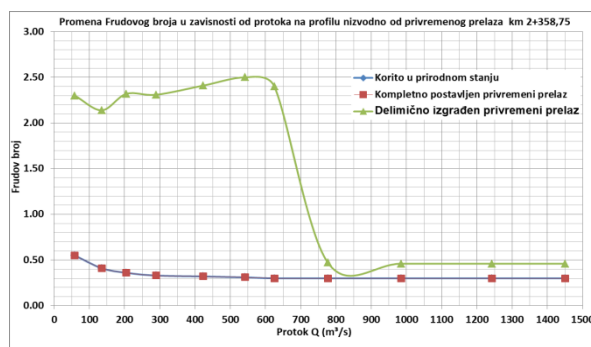
Slika 7.1 Dijagram (Q-v) - profil uzvodno od prelaza



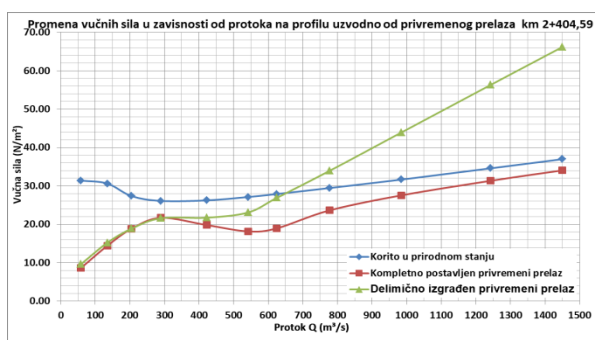
Slika 7.2 Dijagram (Q-v) - profil nizvodno od prelaza



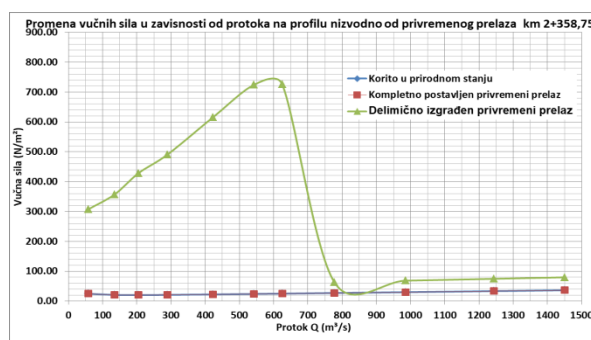
Slika 7.3 Dijagram (Q-Fr) - profil uzvodno od prelaza



Slika 7.4 Dijagram (Q-Fr) - profil nizvodno od prelaza



Slika 7.5 Dijagram (τ-Fr) - profil uzvodno od prelaza



Slika 7.6 Dijagram (τ-Fr) - profil nizvodno od prelaza

Na Slici 7.1 može se zapaziti da brzine kretanja na profilu uzvodno od prelaza nisu velike u svim scenarijima za proticaje do $600 \text{ m}^3/\text{s}$, do 2 m/s . Za scenario delimično postavljenog privremenog prelaza brzine se sa povećanjem proticaja nešto brže povećavaju nego za ostale scenarije do maksimalne vrednosti 3.3 m/s za proticaj $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Brzine kretanja na nizvodnom profilu (Slika 7.2) za slučaj tečenja u prirodnom koritu i sa kompletno postavljenim prelazom su veoma slične, što znači da nakon izgradnje objekta on nema prevelik uticaj na tečenje u samom toku. Očigledno suženje proticajnog profila u rečnom koritu usled postavljanja zagata sa desne obale izaziva veliko povećanje brzina na nizvodnom profilu u odnosu na slučaj potpuno izgrađenog prelaza. Srednje brzine koje se javljaju na profilu nizvodno od prelaza su veće od 4 m/s već za proticaje od $50 \text{ m}^3/\text{s}$ dok za „radni proticaj“ $290 \text{ m}^3/\text{s}$ imaju vrednost oko 6.1 m/s , dok za proticaj $600 \text{ m}^3/\text{s}$ brzine rastu do maksimalnih 8.3 m/s . Sa daljim povećanjem proticaja dolazi do potpunog potapanja delimično izgrađenog objekta i opadanja brzina do 2.6 m/s za veličinu proticaja $800 \text{ m}^3/\text{s}$, nakon čega brzine počinju lagano da rastu sa povećanjem proticaja.

Raspored polja brzina na nizvodnom profilu je jako neujednačen i voda teče najvećom brzinom kroz riblji prolaz, tako da 2D analizom sračunate brzine u njemu dosežu vrednost oko 6.5 m/s već pri „radnom proticaju“ $290 \text{ m}^3/\text{s}$, a sa povećanjem proticaja brzine tečenja u ribljem prolazu brzo rastu. Na taj način se u ribljem prolazu formira lokalni tok u izrazito burnom režimu sa velikom erozionom snagom.

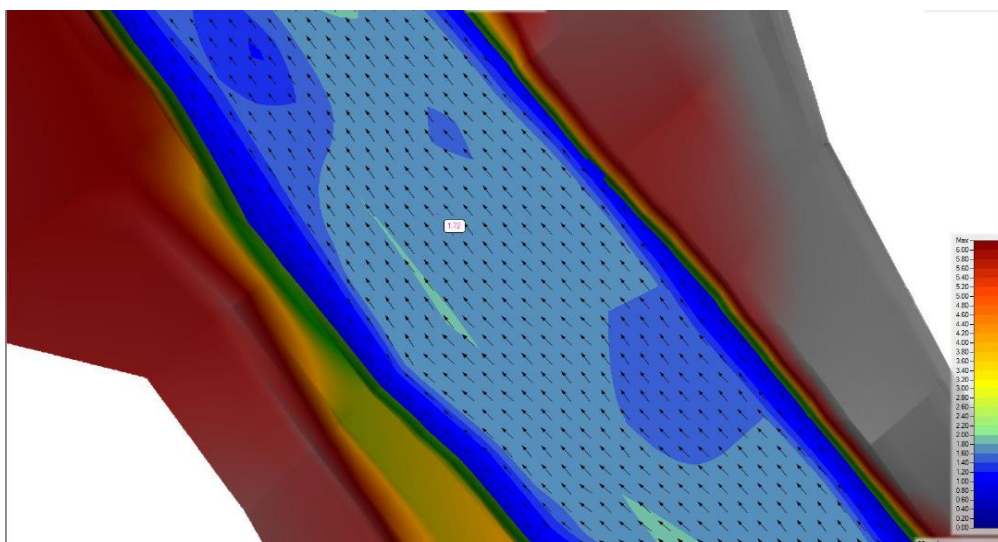
Na Slici 7.3 u zavisnosti od veličine proticaja prikazane su vrednosti Fr-broja na profilu uzvodno od privremenog prelaza. Za sve analizirane scenarije vrednost Fr-broja manja od 1 pokazuje da je tečenje u mirnom režimu, gde najveće vrednosti Fr-broja za korito u prirodnom stanju ukazuju na pojavu uspora uzvodno od privremenog prelaza i umirenje toka.

Na Slici 7.4 prikazana je promena Fr-broja na profilu nizvodno od privremenog prelaza za vrednosti srednjih profilnih brzina. Dok je za scenarije „korita u prirodnom stanju“ i „potpuno izgrađenog objekta“ tečenje u mirnom režimu ($Fr < 1$), za scenario „delimično izgrađen objekat“ tečenje je u burnom režimu ($Fr > 1$), sa najvećom vrednošću Fr-broja za proticaj $600 \text{ m}^3/\text{s}$, nakon čega

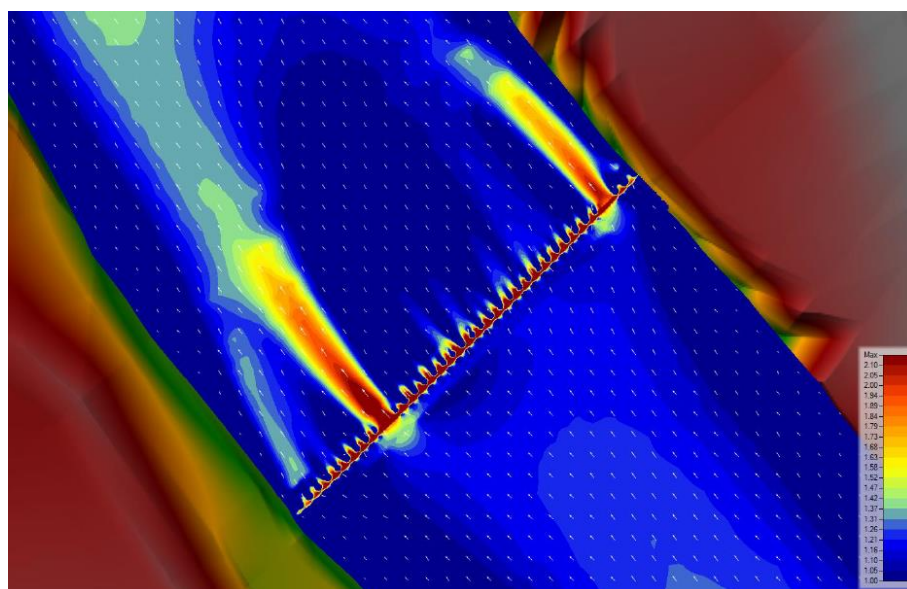
dolazi do umirenja toka i opadanja vrednosti Fr-broja. Potpunim potapanjem prelaza za vrednosti proticaja preko $700 \text{ m}^3/\text{s}$ tečenje prelazi u miran režim.

Na Slikama 7.5 i 7.6 prikazan je dijagram srednjih vučnih sila na profilima uzvodno i nizvodno od privremenog prelaza. Sa dijagrama se može zapaziti da su na nizvodnom profilu vučne sile za scenario „delimično postavljen objekat“ jako uvećane u odnosu na ostale scenarije, oko 20 puta za „radni proticaj“ $Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$ i preko 40 puta za proticaj $600 \text{ m}^3/\text{s}$.

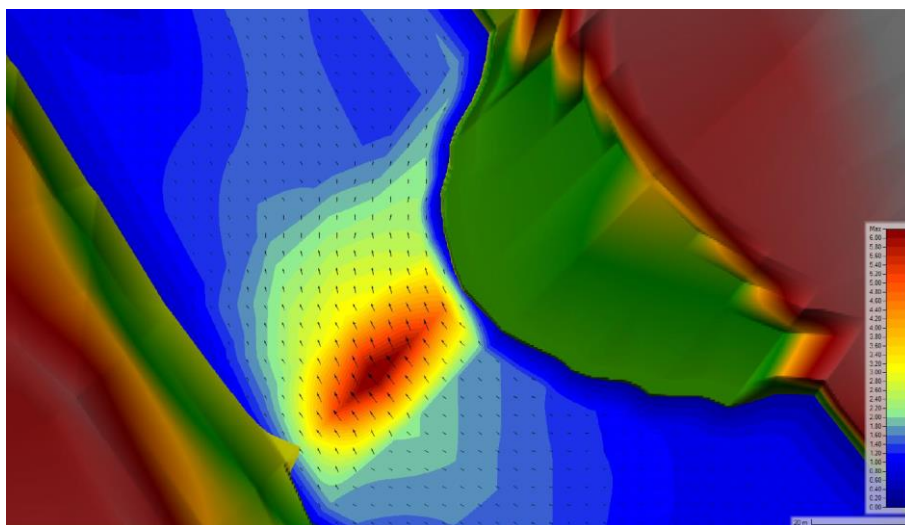
Na Slikama 8, 9, i 10 može se videti strujno polje brzina za „radni proticaj“ $Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$ za sve analizirane scenarije.



Slika 8. Strujno polje – brzine na mestu lokacije privremenog prelaza u rečnom koritu bez izgrađenog objekta za „radni proticaj“ $Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$, brzine vode u matici oko 1.72 m/s



Slika 9. Strujno polje – brzine na mestu lokacije sa kompletno postavljenim privremenim prelazom za $Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$ pri kojima nema prelivanja preko objekta, prikazani vektori brzina; za manje proticaje koji ne prelivaju preko prelaza brzine su najveće u ribljim propustima, oko 2.2 m/s

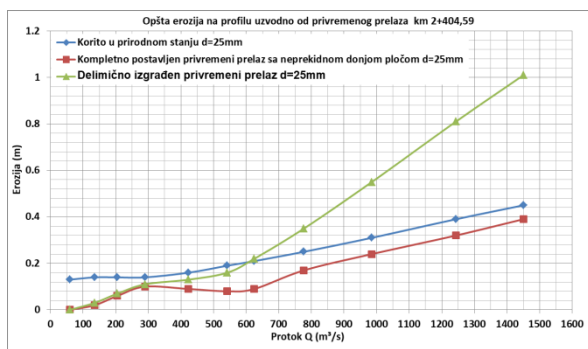


Slika 10. Strujno polje – brzine ($Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$) na lokaciji delimično izgrađenog privremenog prelaza, prikazani vektori brzina (max oko 6.5 m/s) ukazuju na opasnost od erozije tokom izvođenja

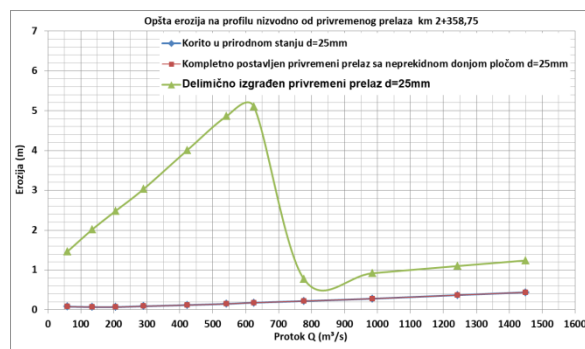
4.2 Sračunata opšta erozija

Na Slikama 11.1 i 11.3 i 11.5 dat je uporedni prikaz opšte erozije dna za sve scenarije na uzvodnom profilu privremenog prelaza za merodavne prečnike čestica nanosa sa dna ($d_{50}=25 \text{ mm}$, $d_{50}=15 \text{ mm}$, $d_{50}=6 \text{ mm}$). Za vučeni nanos svih krupnoća 25 mm procenjena veličina opšte erozije je najveća u koritu u prirodnom stanju do vrednosti proticaja $600 \text{ m}^3/\text{s}$, a zatim vrednost erozije za delimično postavljen objekat dobija veće vrednosti od drugih scenarija i kreće se u rasponu $1.0\text{-}1.6 \text{ m}$.

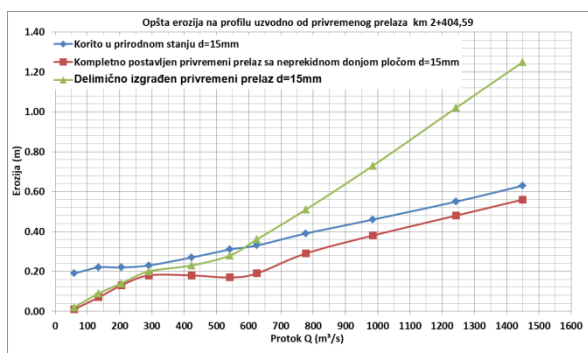
Na Slikama 11.2, 11.4 i 11.6 dat je uporedni prikaz opšte erozije dna za sve scenarije na nizvodnom profilu privremenog prelaza za merodavne prečnike čestica nanosa sa dna ($d_{50}=25 \text{ mm}$, $d_{50}=15 \text{ mm}$, $d_{50}=6 \text{ mm}$). Vrednosti procenjene veličine opšte erozije za korito sa delimično izgrađenim privremenim prelazom imaju maksimalne vrednosti od 5.10 m za nanos krupnoće 25 mm do 5.64 m za nanos krupnoće zrna 6 mm za proticaje manje od špica poplavnog talasa iz januara 2021, dok sa povećanjem proticaja i prelivanjem objekta dolazi do prelaska toka u miran režim i smanjenja brzina i eroziona moći toka, tako da opšta erozija ima vrednost 1.2 m do 2 m . Može se zapaziti veliko povećanje opasnosti od erozije na nizvodnom profilu, koja za analizirane frakcije nanosa za korito u prirodnom stanju pri proticaju $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ima vrednosti $0.1\text{-}0.2 \text{ m}$, dok se za delimično izgrađen prelaz dobijaju jako uvećane vrednosti $5.1\text{-}5.4 \text{ m}$.



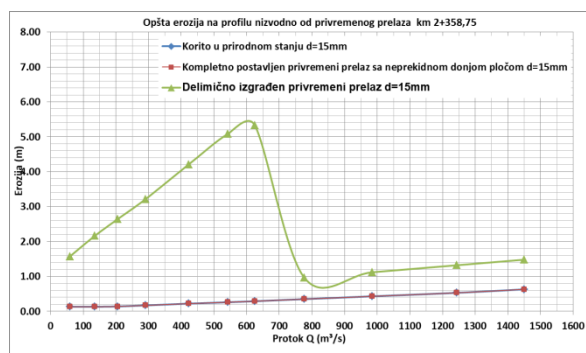
Slika 11.1 Opšta erozija na uzvodnom profilu za $d=25 \text{ mm}$



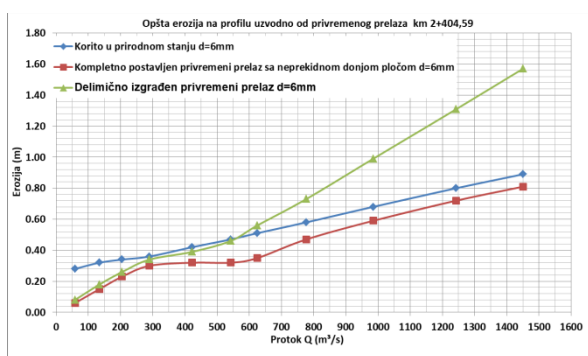
Slika 11.2 Opšta erozija na nizvodnom profilu za $d=25 \text{ mm}$



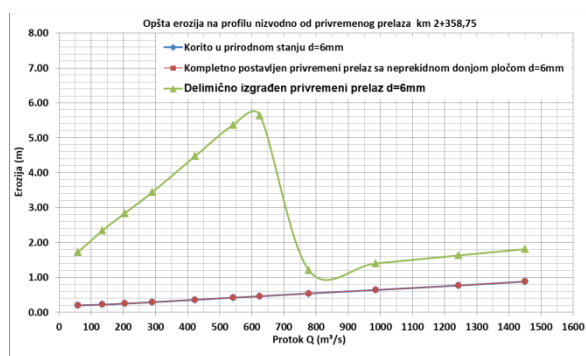
Slika 11.3 Opšta erozija na uzvodnom profilu za d=15 mm



Slika 11.4 Opšta erozija na nizvodnom profilu za d=15 mm



Slika 11.5 Opšta erozija na uzvodnom profilu za d=6 mm



Slika 11.6 Opšta erozija na nizvodnom profilu za d=6 mm

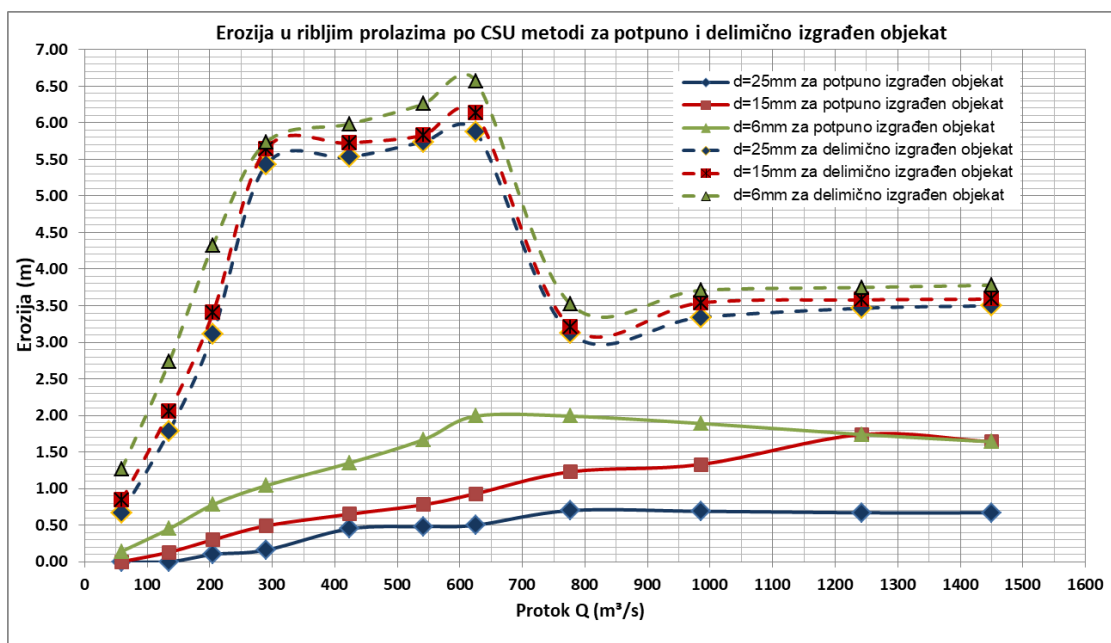
4.3 Sračunata veličina erozije u ribljim propustima

Metodom CSU koja se koristi za procenu vrednosti erozije mostovskih stubova sračunata je potencijalna erozija u ribljim propustima, tako što su ivice srednjeg dela objekta predstavljene kao mostovski stubovi. Iako je ovo malo gruba aproksimacija, upoređenjem sračunatih vrednosti erozije za delimično i potpuno izgrađen objekat za veličine vučenog nanosa 6 mm – 25 mm može se doći do vrlo slikovitog prikaza ugroženosti objekta erozijom u toku izgradnje.

Na Slici 12. prikazana je sračunata erozija u ribljim propustima za scenarije sa potpuno izgrađenim privremenim prelazom i za delimično izgrađen privremeni prelaz. Maksimalne vrednosti sračunate erozije u ribljem propustu za slučaj delimično izgrađenog objekta reda su višestruko veće nego za slučaj potpuno izgrađenog objekta i dostižu maksimalnu vrednost oko 6.80 m.

Ova erozija je moguća ukoliko se ne preduzmu nikakve zaštitne mere.

Očigledno je da je objekat najmanje izložen opasnosti od erozije u stanju potpune izgrađenosti, a da je delimično izgrađen objekat, bez preduzetih adekvatnih mera zaštite od erozije veoma ugrožen ne samo u slučaju nailaska poplavnog talasa, već i za manje proticaje. Najveća opasnost u toku gradnje se ne javlja za vrlo velike vode, već za znatno manje veličine voda, gde već za veličine proticaja od 50 m³/s veličine potencijalne erozije u ribljem propustu iznose preko 70 cm, a maksimalne vrednosti od 6.7 m vode za proticaj 600 m³/s, nakon čega usled potapanja objekta dolazi do opadanja brzina kako u celom poprečnom profilu nizvodno od prelaza, tako i kroz riblji propust, pa dolazi do opadanja erozione moći i njegove stabilizacije na oko 3.5 m.



Slika 12. Grafički prikaz erozije u ribljim prolazima po CSU metodi za potpuno i delimično izgrađen objekat

5 Zaključak

Prilikom projektovanja objekata u rečnom koritu jako je bitno proveriti uticaje koje oni trpe tokom izvođenja radova, jer delovi objekta mogu pretrpeti znatno veća opterećenja nego u fazi eksploatacije, naročito u slučaju nailaska velikih voda.

Na primeru izgradnje privremenog prelaza na reci Južnoj Moravi na stacionaži km 2+404, kada je došlo do ozbiljnog oštećenja objekta usled erozije i potonuća dela objekta prilikom nailaska poplavnog talasa januara 2021 sa špicem od 777 m³/s, prikazane su veličine uticaja koje nisu analizirane u periodu projektovanja prelaza.

Analiziran je veći broj scenarija: tečenje u koritu u prirodnom stanju, tečenje u okolini potpuno izgrađenog objekta bez prekida u temeljnoj ploči i sa prekidom i objekat u stanju izgrađenosti u momentu nailaska poplavnog talasa, kada je sa desne obale bio postavljen zagat koji je značajno smanjio proticajni profil. Rezultati hidrauličkih proračuna su pokazali da nema velikih promena veličina za prirodno korito i potpuno izgrađen objekat, ali da tokom izgradnje objekta usled pregrađivanja korita zagatom dolazi do velikog povećanja brzine nizvodno od objekta i u ribljem prolazu. Usled povećanja brzina, sve do potapanja objekta pri jako velikim proticajima, na nizvodnom profilu tečenje prelazi u buran režim, koji je naročito izražen u ribljem prolazu.

Velike brzine, koje dostižu vrednosti preko 8 m/s na mestu ribljeg prolaza jako povećavaju vučne sile i erozioni potencijal. Upravo je povećanje erozionog potencijala dovelo do ispiranja tla ispod objekta, njegovo neravnomerno sleganje, potonuće i lom dela konstrukcije.

Očigledno je da prilikom projektovanja nije ispravan princip analize samo scenarija zatečenog stanja na terenu i izgrađenog objekta, već se mora voditi računa o uticajima tokom gradnje i mogućnosti nastanka štete na objektu prilikom incidentne pojave velikih voda.

Na projektantu i investitoru je da nakon procene opasnosti od erozije i pojave šteta na objektima u svim fazama gradnje procene troškove mera obezbeđenja rečnog korita i objekta od štetnih uticaja koje mogu finansijski da podnesu i onda svesno preuzmu rizik usled nailaska poplavnog talasa ukoliko su mere potrebne za potpuno obezbeđenje objekta složene i skupe u odnosu na njegovu konačnu i upotrebnu vrednost.

Literatura

1. Dragutin Muškatirović (1991) *Regulacija reka*, 4. izdanje, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
2. *Generalni projekat uređenja Južne Morave* (2006), Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
3. E. Richardson, J. R. Richardson, L. Abed, Estimating Scour at Bridges, Transportation Resresearch Method 1290, <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1290vol1/1290-057.pdf>
4. HEC-RAS River Analysis System, *Users Manual, Version 5.0*, 2016
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>
5. Marina Babić Mladenović (2018) *Uređenje vodotokova*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
6. Olivera Potić, Dragan Radivojević (1999) *Osnovi hidrotehnike, Zbirka rešenih zadataka*, Građevinsko arhitektonski fakultet u Nišu
7. RHMZ, http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/izvestajne/bezprognoza.php?hm_id=47590
8. Stevan Prohaska, Vladislava Bartoš Divac, Aleksandra Ilić (2020) *Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica*, Institut za vodoprivredu 'Jaroslav Černi' i RHMZ Srbije, Beograd
9. *Vodoprivredna osnova Republike Srbije* (2009), Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd