UDK: 627.157.1/627.42 Originalni naučni rad

PRORAČUN LOKALNE DEFORMACIJE REČNOG KORITA U BLIZINI PROTOČNOG NAPERA

Dr Miodrag JOVANOVIĆ, dipl. građ. inž. mjovanov@grf.bg.ac.rs

REZIME

Protočni naperi se koriste za stabilizaciju rečne obale ili za smanjenje zasipanja ulaza u lučke bazene. Sastoje se od niza razmaknutih, različito raspoređenih elemenata - najčešće cevastih šipova - između kojih struji voda. U ovom radu se, kroz ilustrativni primer, prikazuje računski pristup u predviđanju uticaja protočnog napera na strujno polje i lokalnu deformaciju rečnog dna. Pokazano je kako numerički 2D i 3D modeli mogu poslužiti projektantima da kvalitativno (a u nekim slučajevima i pouzdano, kvantita-tivno) predvide hidrauličke i psamološko-morfološke posledice korišćenja protočnih napera.

Ključne reči: protočni naperi, lokalna deformacija rečnog korita, numerički 2D i 3D modeli

1. UVOD

Poznato je da su naperi regulacione građevine za sužavanje proticajnog profila na pravolinijskim deonicama i u rečnim krivinama, sa ciljem stabilizacije potojeće obale ili formiranja nove obale u vidu zasutih međunaperskih polja. *Protočni naperi* su specifični po tome što se sastoje od niza razmaknutih konstruktivnih elemenata (najčešće cevastih šipova) između kojih slobodno struji voda (Slika 1).

Za razliku od konvencionalnih napera, protočni naperi ne stvaraju karakterističnu recirkulacionu zonu neposredno nizvodno od napera, koja izaziva taloženje nanosa. To čini protočne napere regulacionim građevinama za smanjenje *koncentrisanog* taloženja nanosa, što je, na primer, poželjno kod ulaza u lučke bazene.

Ustanovljeno je da primenom protočnih napera, stepen zasipanja lučkih bezena može biti značajno smanjen [9], što redukuje učestalost i troškove bagerovanja. Kod nas je razmatrana mogućnost primene sistema protočnih napera na reci Savi, neposredno uzvodno od ulaza u Čukarički zaliv (Slika 2).



Slika 1. Tipičan usamljeni protočni naper od cevastih šipova [10]. Figure 1. A typical single pile groyne [10].



Slika 2. Numerička simulacija recirkulacionog strujanja na ulazu u Čukarički zaliv na reci Savi [6] i jedna od razmatrnih konfiguracija protočnih napera za smanjenje uvlačenja nanosa u zaliv.

Figure 2. Numerical simulation of recirculating flow at the entrance of the Čukarički Bay on the Sava river [6], and one considered configuration of pile groynes for reducing silting of the bay.

Za širu primenu protočnih napera u praksi, neophodno je da se ispita mogućnost predviđanja hidrauličkih i psamološko-morfoloških efekata ovog tipa napera. Za to je projektantima na raspolaganju korišćenje: (i) empirijskih izraza, (ii) numeričkih modela i (iii) fizičkih modela. Svaki od ovih pristupa ima svoje prednosti i nedostatke. U ovom radu se razmatra računski pristup (ii), jer daje neuporedivo više informacija od pristupa (i), a zahteva lakši i ekonomičniji rad od pristupa (iii).

2. RAČUNSKE PROMENLJIVE

Na Slikama 3 i 4 dat je shematski prikaz protočnog napera sa oznakama računskih promenljivih.



Slika 3. Protočni naper; gore: poprečni presek, dole: uzdužni profil. Figure 3. Pile groyne; above: cross-section, below:







Pre izgradnje napera, površina dela poprečnog preseka koji zauzima konstrukcija napera je:

$$A_{1} = n_{1}(\delta + s)h \cdot \sin\phi \tag{1}$$

gde je: δ – prečnik cevi, *s* – razmak cevi (Slika 3), n_{Γ} broj cevastih elemenata, ϕ – inklinacioni ugao napera u odnosu na rečni tok (Slika 4). (Kod upravnih napera je $\phi = 90^{\circ}$, sin $\phi = 1$.)

Posle izgradnje napera, deo površine A_1 više nije hidraulički aktivan – protočan, pri čemu je površina neprotočnog dela: $A_2 = n_1 \cdot \delta \cdot h \cdot \sin \phi$.

Stepen opstrukcije (zagušenja) koje naper izaziva u poprečnom preseku je:

$$p = \frac{A_2}{A_1} = \frac{n_1 \cdot \delta \cdot h \cdot \sin \phi}{n_1 (\delta + s) h \sin \phi} = \frac{\delta}{\delta + s}.$$
 (2)

Iz ovog izraza se jasno vidi da, za usvojeni tip cevastih elemenata, manji razmak (s) daje veće zagušenje. Za $\delta = s, p = 0, 5$, a ako je $p \ge 0,67$, naper se može tretirati kao neprotočan. Preporuka je da stepen zagušenja bude ograničen: p = 0,2 - 0,25 [2].

U literaturi [2, 8] mogu se naći empirijski izrazi za osnovne promenljive – pijezometarski pad Δh , nizvodnu brzinu V_{niz} , najveću erozionu dubinu h_{se} i dužinu deformacije rečnog dna *L*. Ovi izrazi važe za cevaste šipove u koherentnom i peščanom tlu ($d_{50} = 0,14$ mm).

3. NUMERIČKI MODEL

Savremeni softver omogućava da se analiza uticaja protočnih napera obavi na osnovu numeričkih simulacija. Na taj način se dobija neuporedivo više informacija nego kada se primeni neki empirijski pristup, a sa manjim utroškom vremena i materijalnih sredstava nego kada se preduzmu ispitivanja pomoću fizičkog modela.

U ovom radu je za numeričke simulacije korišćen poznati softverski sistem Telemac2D i Telemac3D. Teorijske osnove ovih računskih modela mogu se naći u literaturi [3].

3.1 Kalibracija numeričkog modela

Za kalibraciju modela je razmatran slučaj usamljenog cilindričnog stuba pri ustaljenom strujanju. Opstrujavanje cilindričnih stubova i lokalna erozija oko njih je veoma eksperimentalno i računski istražena tema [1, 3, 4, 6]. Desetine radova, koji se uglavnom bave erozijom u "čistoj vodi" (sa brzinama toka do kritične brzine za masovno pokretanja zrna), predlažu empirijske izraze koji se mogu svrstati u četiri katogorije, prema broju promenljivih koje u njima figurišu: (1) samo oblik i veličina stuba; (2) stub+dubina toka; (3) stub+dubina+brzina toka; (4) stub+dubina+brzina+krupnoća zrna.

Ovde su korišćeni rezultati eksperimenata iz kategorije (4), objavljeni u radu [1]. Eksperimenti su obavljeni u kanalu dužine 17,5 m, širine 0,3 m, u opsegu protoka 8,5–10,5 L/s i opsegu dubina 0,10–0,16 m. Ispitivani su usamljeni i upareni cilindrični stubovi prečnika 3–7 cm, na peščanom dnu, srednje krupnoće zrna 0,9 mm.

Na Slici 5 prikazani su rezultati numeričke 3D simulacije eksperimenta sa stubom prečnika 5 cm, pri protoku od 10,5 L/s, kao i kalibracioni dijagram koji pokazuje dobro slaganje rezultata proračuna i merenja.

Napominje se da je u proračunima korišćena vrednost rapavosti $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}$ s. Primenjeni su k- ε model turbulencije i obrazac van Rijna [5] za pokretanje i pronos nanosa na dnu.



Slika 5. Strujanje oko usamljenog cilindričnog stuba; sleva na desno: računska mreža i raspored tangencijalnog napona na dnu; vektori brzine i strujnice po dubini toka; kalibracija modela poređenjem izračunatih vrednosti ("num") i izmerenih vrednosti ("eksp") odnosa najveće erozione dubine h_{se} i dubine toka h [1].

Figure 5. Flow around a single circular pier; left to right: computational mesh and distribution of bed shear stress; velocity vectors and streamlines over flow depth; model calibration by comparing the calculated values ("num") with the measured values ("eksp") of the ratio of the maximum scour depth h_{se} and the flow depth h [1].

3.2 Rezultati proračuna

Mogućnosti primene numeričkog modela ispitane su na jednom hipotetičkom primeru. Razmatrano je rečno korito pravougaonog poprečnog preseka širine B = 80 m, uzdužnog nagiba dna $I_d = 1\%$ i rapavosti n=0,020 m^{-1/3}s. Dno je od peščanog materijala krupnoće $d_{50} = 0,14$ mm, sa kritičnom brzinom pokretanja zrna: $V_c = 0,4$ m/s. Pod pretpostavkom jednolikog tečenja, hidraulički uslovi pre postavljanja napera su; Q = 300 m³/s, h = 1,71 m, V = 2,2 m/s. Zadatak je da se procene efekti protočnog upravnog napera sačinjenog od 4 čelične cevi prečnika $\delta = 1$ m, na razmaku s = 4 m (Slika 6).

Za usvojenu dužinu napera $L_n=20$ m, sledi: $L_n / B = 0.25$ i $p = \delta/(\delta + s) = 0.2$. Na Slici 6 prikazan je detalj računske mreže sa položajem uzdužnih profila u kojima se prikazuju rezultati proračuna. Na istoj slici je posebno dat i raspored kota nivoa po celoj širini korita, iz koga se vidi da je poremećaj nivoa izazvan prisustvom napera ograničen na oko 20 m nizvodno od napera. Denivelacija u zoni napera iznosi u proseku 0,10 m.

Kvantifikovanje poremećaja dubine i brzine toka prikazano je pomoću karakterističnih uzdužnih profila na Slici 7. Evidentno je lokalno povećanje dubine izvodno, a smanjenje dubine nizvodno od napera. Najveća denivelacija po osovini šipa br. 3 iznosi 0,12 m, a najveće smanjenje brzine, 0,8 m/s. Između šipova, najveće povećanje brzine iznosi oko 0,5 m/s.

Slika 8 prikazuje vektorsko polje brzine oko napera i oko razmatranog šipa. Kao na prethodnim dijagramima, jasno se uočavaju oblasti intenzivnog strujanja između šipova i "mrtve" zone u zaleđu šipova.



Slika 6. Gore: računska mreža sa numeracijom cevi, položajem uzdužnih profila i poremećaj linije nivoa; u sredini: raspored dubine u zoni napera i oko šipa br. 3 (Y=14,5 m) pri protoku 300 m^3/s ; dole: raspored brzine pri istom protoku.

Figure 6. On the top: computational mesh with pile numeration, location of longitudinal profiles, and water surface disturbance; in the middle: water depth distribution around the groyne and the pile no. 3 (Y=14,5 m) at the flow rate of $300 \text{ m}^3/\text{s}$; at the bottom: velocity distribution at the same flow rate.



Slika 7. Uzdužni profili dubine i brzine po osovini šipa 3 i između šipova 2 i 3. Figure 7. Longitudinal profiles of depth and velocity at the axis of pile 3 and between piles 2 and 3.



Slika 8. Vektorsko polje brzine u zoni napera i oko šipa br. 3 (Y=14,5 m) pri protoku od 300 m³/s. Figure 8. Vector velocity filed around the groyne and around the pile no. 3 (Y=14,5 m) at the flow rate of 300 m³/s.

Interesantna je vrtložna struktura iza izabranog šipa, prikazana na Slici 9. Primećuje se da oblik vrloga u dva vremenska preseka nije isti. Radi se o primeru koji (još jednom) podstiče pitanje stohastičkog karaktera rezultata rešavanja sistema osnovnih determinističkih San Venanovih jednačina. Naime, pitanje je šta uzrokuje slučajni oblik računskih vrtloga koji proizilaze iz jednačina koje u sebi ne sadrže slučajnu komponentu? Odgovor se krije u osnovama numeričkog rešavanja jednačina, inherentno povezanog sa "greškom zaokruživanja". Ova geška se javlja u svakom računskom koraku i propagirajući se tokom proračuna predstavlja svojevrsno "seme" (engl. *seed*) za generisanje slučajnih brojeva. Tako, paradoksalno, numeričko, *približno* rešenje podražava stvarnost bolje od tačnog rešenja kada bi ovo, za dati sistem jednačina, uopšte postojalo.



Slika 9. Vrtlžna zona iza šipa br. 3 (Y=14,5 m). Figure 9. Vorticity zone behind the pile no. 3 (Y=14,5 m).

Morfološki efekti protočnih napera ogledaju se u lokalnoj deformaciji korita. Rezultat pristustva protočnog napera je specifična konfiguracija rečnog dna u obliku naizmeničnih izduženih "perjanica" erozijom odnetog materijala između stubova i nagomilanog zasutog materijala u zaleđu šipova. Na ovakav karakter deformacije rečnog korita jasno ukazuju dijagrami na Slikama 10 i 11. Prva slika daje raspored smičuće brzine (odnosno tangencijalnog napona na dnu), a druga slika, batimetriju rečnog dna.

Konfiguracija rečnog dna u zoni napera zavisi od brojnih faktora: brzine toka (protoka), relativne dužine napera (u odnosu na širinu korita), oblika, širine i rasporeda elemenata koji čine protočni naper, kao i vrste i granulometrijskog sastava nanosa na dnu. U tom smislu, prikazani raspored smičuće brzine može se razmatrati samo u kontekstu zadatog protoka (Q=300 m³/s), srednjeg prečnika zrna d_{50} = 0,14 mm i uslova za njegovo pokretanje, definisanog obrascima Van Rijna [5].

Deformacija korita u zoni protočnog napera prikazana je na Slici 11.

Uočljivo je da ona nije ista kod svih šipova. Sniženje kota dna je izraženo na sredini napera, između šipova 2 i 3, kao i duž obale. Nagomilavanje nanosa (izdizanje kota dna) je prisutno ispred šipova, kao i u njihovom zaleđu, a najviše je izraženo kod poslednjeg šipa u nizu (br. 4), najudaljenijeg od obale.

Kvantifikacija deformacije rečnog dna prikazana je pomoću uzdužnih profila na Slici 12. Najveće produbljenje korita iznosi $0,27 \approx 0,3$ m ($h_{se}/h = 0,17$). I pored kalibracije računskog modela, ovu dubinu erozije treba uzeti sa rezervom, zbog toga što svaki razmatrani, konkretni slučaj (sa svojom granulometrijom rečnog nanosa) unosi odredjenu neizvesnost u pogledu izbora jednačine za pronos nanosa i vrednosti parametara u izabranom modelu turbulencije. Generalno, morfološki efekti protočnog napera, mogu se predvideti pomoću (ne)kalibrisanog 2D ili 3D numeričkog modela veoma dobro u kvalitativnom smislu, dok je apsolutna kvantitativna tačnost rezultata moguća samo ako su vrednosti ulaznih podataka (rapavosti, granulometrije, tubulentne viskoznosti) iste ili veoma bliske vrednostima sa kojima je izvršena kalibracija modela.



Slika 10. Strujanje oko usamljenog protočnog napera pri protoku od 300 m³/s: raspored brzine smicanja (tangencijalnog napona na dnu) u zoni napera i oko šipa br. 3 (Y=14,5 m).





Slika 11. Konfiguracija rečnog dna u zoni usamljenog protočnog napera pri protoku od 300 m³/s. Figure 11. River bed configuration in the zone of the single pile groyne at the flow rate of 300 m³/s.

VODOPRIVREDA 0350-0519, Vol. 53 (2021) No. 309-310 p. 1-9



Slika 12. Uzdužni profili rečnog dna po osovini stuba (šipa) br. 3 i između stubova 2 i 3.

Figure 12. The longitudinal section of the river bed along the axis of the pile no. 3, and between piles 2 and 3.

4. ZAKLJUČCI

- Hidrauličko-morfološki efekti protočnih napera mogu se veoma efikasno ispitati pomoću 2D ili 3D numeričkog modela.
- Kvalitativni rezultati koje daje (ne)kalibrisani 2D ili 3D numerički model, mogu projektantu korisno poslužiti da ustanovi kakve sve lokalne hidrauličke i morfološke promene u rečnom koritu može očekivati u slučaju postavljanja protočnih napera.
- Računski 2D ili 3D model daje pouzdanu strujnu sliku (raspored lokalnih kota nivoa, dubina i brzina u zoni napera).
- 4. U kvalitatitnom smislu, strujna slika je tipična za protočne napera od cevastih šipova i ne zavisi mnogo od njihove konfiguracije. Neposredno uzvodno od šipova javljaju se polukružne zone usporenog toga, sa nultom brzinom u zaustavnim tačkama duž vertikalnih izvodnica šipova, a nizvodno od šipova su dubine smanjene, pri čemu denivelacija nije ista kod svih šipova. Sračunati raspored brzine ukazuje na izdužene zone ("perjanice") intenzivnog strujanja između šipova i zone usporenog toka u zaleđu šipova.
- 5. Pri odnosu dužine upravnog napera i širine korita 0,25 i stepenu zagušenja poprečnog preseka usled prisustva napera 0,20, može se očekivati da dužina poremećaja nivoa iznosi oko 20 m nizvodno od napera, a da prosečna denivelacija u zoni napera bude oko 0,10 m.

- 6. U kvalitativnom smislu, rezultati proračuna pokazuju da deformacija rečnog korita nije ista kod svih šipova protočnog napera. Erozija je izražena između šipova, kao i duž obale. Zasipanje korita je prisutno ispred šipova, kao i u njihovom zaleđu, a najviše je izraženo kod šipa najudaljenijeg od obale.
- U konkretnom razmatrnom slučaju, pri odnosu dužine napera i širine korita 0,25 i stepenu zagušenja poprečnog preseka 0,20, može se očekivati najveća eroziona dubina od 0,3 m, što daje odnos erozione dubine i dubine toka 0,17.
- 8. Kvantitativna pouzdanost rezultata psamološkomorfološkog proračuna je moguća samo ako su vrednosti ulaznih podataka (granulometrije, rapavosti, tubulentne viskoznosti) iste ili veoma bliske vrednostima sa kojima je izvršena kalibracija modela. Drugim rečima, numerički 2D ili 3D model, kalibrisan u jednim uslovima ne daje nužno pouzdane rezultate u drugim uslovima, zbog komponente za pronos nanosa koja nije univerzalna.

LITERATURA

- Abouzeid, G., Muhamed H., Ali, Sh. (2006) 3-D Numerical Simulation of Flow and Clear Water Scour by Interaction Between Bridge Piers, *Tenth International Water Technology Conference IWTC10 2006*, Alexnadria, Egypt.
- [2] Gjurović, M. (1967) *Regulacija reka*, Tehnička knjiga, Zagreb.

- [3] Hervouet, J-M. (2007) Hydrodynamics of Free Surface Flows -- modelling with the finite element method, Wiley, Chichester, England.
- [4] Jain, S., Fischer, E.. (1980) Scour Around Circular Bridge Piers at High Froude Numbers, FHWA Buletin RD-79-104.
- [5] Jovanović, M. (2008) Regulacija reka rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd.
- [6] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B., Rosić, N. (2011) Studija hidrotehničkog uređenja ulaza u Čukarički zaliv u uslovima nastalim izgradnjom novog mosta na reci Savi, Gradjevinski fakultet, Beograd.
- [7] Olsen, N.R.B., Kjellesvig (1998) Threedimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth, *J. of Hydraulic Research*, IAHR, 36, 207-227.
- [8] Przedwojski, B., Blazejewski, R., Pilarczyk, K.W. (1995) *River Training Techniques -* Fundamentals, *Design and Applications*, Balkema, Rotterdam.
- [9] Van Schijndel, S., Kranenburg, C. (1998) Reducing the siltation of a river harbour, Journal of Hydraulic Research, Vol. 36, No. 5, pp 803-814.
- [10] http://envirohistorynz.com/2012/05/

COMPUTATION OF THE LOCAL SCOUR AROUND PILE GROYNES

by

Dr Miodrag JOVANOVIĆ

Summary

Pile groynes are used to stabilize river banks or to reduce siltation at the harbor entrances. Various configurations of pile groynes are possible, as long as water flows freely between piles. In this paper, through an ilustrative example, the numerical approach is presented for evaluation of the pile groynes impact on the flow field and the local deformation of the river bed. Possibilities of the 2D and 3D numerical modeling are presented and discussed. The obtained results are used for formulating conclusions which can be useful to designing engineers in practice.

Key words: pile groynes, local river bed deformation, numerical 2D and 3D models

Redigovano 4.9.2021.