

Primljen / Received: 23.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2018.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2018.

Dostupno online / Available online: 10.10.2020.

Simulacija podlokavanja na potpornjima mostova

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Yasser Moussa**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Jazanu, Saudijska Arabija

Odjel za građevinarstvo

ymoussa@jazanu.edu.sa

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Mahoud Atta**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Jazanu, Saudijska Arabija

Odjel za strojarstvo

mibrahim@jazanu.edu.sa

Prethodno priopćenje

Yasser Moussa, Mahoud Atta

Simulacija podlokavanja na potpornjima mostova

Na mostovima se koriste skupine stupova kako bi se na minimum svelo podlokavanje oko potpornih elemenata. Predviđanje podlokavanja oko stupova uslijed interakcije vrtloga oko stupova mosta složenije je od predviđanja podlokavanja na pojedinačnim stupovima. U radu se istražuju četiri rasporeda stupova s različitim razmacima u bočnom i uzdužnom smjeru kako bi se analizirala pojava vrtloga oko temelja mosta u uvjetima bistrice vode. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje u pravokutnom otvorenom kanalu i trodimenzionalno numeričko ispitivanje bazirano na dinamici fluida. Rezultati pokazuju da se u raznim rasporedima stupova postižu manje dubine podlokavanje nego što je to slučaj kod samo jednog stupa.

Ključne riječi:

lokalno podlokavanje, hidraulička građevina, stupovi, skupina pilota, SSIM

Research Paper

Yasser Moussa, Mahoud Atta

Simulation of Scour at Bridge Supports

Groups of piers are used on bridges to minimise scour around bridge supports. The prediction of scour around piers due to interaction of vortices around bridge piers is more complex compared to scour prediction around a single pier. Four arrangements of bridge piers with different spaces in the lateral and longitudinal directions are investigated under clear water conditions to observe scour generation around bridge foundations. The experimental study is performed in a rectangular open channel. A 3D numerical study based on fluid dynamics is also conducted. Results show that different pier group arrangements produce smaller scour holes than a single pier.

Key words:

local scour, hydraulic structure, piers, group of piles, SSIM

Vorherige Mitteilung

Yasser Moussa, Mahoud Atta

Simulation der Unterwaschung von Brückenträgern

Bei Brücken werden Pfeilergruppen verwendet, um die Unterwaschung um die Stützelemente herum zu minimieren. Die Vorhersage der Unterwaschung um Säulen aufgrund von Wirbelwechselwirkungen um Brückenpfeiler ist komplexer als die Vorhersage der Unterwaschung einzelner Pfeiler. Die Arbeit untersucht vier Pfeileranordnungen mit unterschiedlichen Abständen in Seiten- und Längsrichtung, um das Auftreten von Wirbeln um das Brückenfundament bei klarem Wasser zu analysieren. Eine experimentelle Prüfung in einem rechteckigen offenen Kanal und eine dreidimensionale numerische Prüfung basierend auf der Fluidodynamik wurden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei verschiedenen Pfeileranordnungen eine geringere Tiefe erreicht wird als bei nur einem Pfeiler.

Schlüsselwörter:

lokale Unterwaschung, hydraulische Struktur, Pfeiler, Pfahlgruppe, SSIM

1. Uvod

Pretjerano podlokavanje oko potporanja mostova može dovesti do znatnijeg slijeganja temelja te uzrokovati oštećenja na stupovima i upornjacima mostova. U SAD-u je zbog problema podlokavanja uništeno više od 1400 mostova u razdoblju od 1996. do 2005. godine [1]. Izraz podlokavanje označava odnošenje materijala iz korita i/ili obale zbog erozivnog djelovanje vode u pokretu [2]. Općenito uzevši, podlokavanje između stupova mosta može se podijeliti u tri tipa: opće podlokavanje, kontrakcijsko podlokavanje i lokalno podlokavanje. Opće podlokavanje je degradacija i agradacija riječnog korita [3]. Kontrakcijsko podlokavanje nastaje zbog smanjenja poprečnog presjeka korita. Ta je pojava posljedica građenja hidrotehničkih građevina duž vodnih tokova [4]. Lokalno podlokavanje javlja se u temeljima mosta.

Postoje dva tipa lokalnog podlokavanja: podlokavanje djelovanjem bistrice vode i podlokavanje djelovanjem vode zamučene vučenim nanosom. Podlokavanje temelja mosta dinamički je proces koji varira ovisno o karakteristikama i obliku toka, te o rasporedu stupova i upornjaka mosta [5].

Skupine pilota često se koriste za temeljenje riječnih i pomorskih građevina. Podlokavanjem tih pilota most postupno gubi sposobnost preuzimanja raznih opterećenja [6]. Atilla i Magnus Larson (2000.) [7] analizirali su na obali Tihog oceana u području Japana podatke o podlokavanju oko skupine pilota pod utjecajem oscilirajućih valova te su ustanovili da je širina podlokane zone tek u maloj mjeri podudarna s Keulegan-Carpenterovim brojem. Mnogi istraživači analizirali su pojavu podlokavanja na jednom stupu mosta [8-12]. Richardson i Davis (2001.) [13] predložili su jednadžbu HEC-18 za predviđanje dubine lokalnog podlokavanja na jednom pilotu. S druge strane, manji broj studija bavi se podlokavanjem skupine pilota [14-17].

Sumer i dr. (2005.) [18] izvještavaju da se podlokavanje oko skupina pilota raspoređenih na različite načine javlja u obliku tanjurastih udubina. Amini i dr. (2012.) [16] odredili su dubinu lokalnog podlokavanja na skupini pilota u uvjetima plitkog toka. Ispitane su različite metode za određivanje dubine lokalnog podlokavanja skupine pilota

[19]. Podlokavanje oko osam raznih rasporeda pilota ispitano je numerički i eksperimentalno [17]. Bočni i uzdužni razmak između pilota bio je konstantan. Osim toga, utvrđeno je da se dubina podlokavanja smanjuje za 42 % kod tandemskih pilota u usporedbi s dubinom podlokavanja jednog pilota. Proračunski modeli dinamike fluida korišteni su za simuliranje podlokavanja oko stupova i upornjaka mostova [12, 17, 20-22]. U ovom se radu eksperimentalnim i numeričkim putem pokušava odrediti utjecaj variranja bočnog i uzdužnog razmaka između stupova na podlokavanje koje se javlja u temeljima mosta.

2. Eksperimentalni postupak

Eksperiment je provede u pravokutnom otvorenom kanalu s trajnim cirkuliranjem vode. Postav eksperimenta sastoji se od dva eksperimentalna žlijeba: donji služi za mjerenje protoka/istjecanja, a gornji za modelska ispitivanja (slika 1.). Dimenzije gornjeg žlijeba pravokutnog presjeka iznose: 16,2 m (dužina), 65 cm (širina) i 66 cm (dubina). Žlijeb je po dužini podijeljen na tri dijela, a to su: ulazni segment, radni segment i izlazni segment. Na ulaz u gornji žlijeb brižljivo je postavljen kameni materijal raznih dimenzija kako bi se ublažili poremećaji u protoku. Dimenzije donjeg žlijeba iznose: 99 cm (širina), 100 cm (dubina) i 18 m (dužina). Na tom se žlijebu nalazi prethodno baždareni pravokutni preliv koji služi za mjerenje protoka. Protok varira od 15 l/s do 30 l/s.



Slika 1. Pogled na laboratorijski uređaj s naznakama smjera toka

	2x1	1x2	2x2
$w = 3,5, 4, 6, 9 \text{ cm}$ $l = 4, 6, 9, 10 \text{ cm}$	(x, y) za različite skupine pilota cm, $w/L = 1$		
$w/l = 0,34, 0,43, 1, 2,25$	$(3,5, 3,5) - (7,0, 3,5) - (3,5, 10,5) - (10,5, 3,5) - (3,5, 7,0)$		$(9, 3) - (3, 3) - (3, 6) (3, 9) - (6, 3)$
$F_t = 0,2 \text{ do } 0,6$			

Slika 2. Raspored eksperimentalnih modela

Pokretno korito sastoji se od jednoliko graduiranog pijeska srednje veličine zrna od 1,4 mm te od žlijeba za ispunjavanje čija dubina iznosi 0,12 m. Geometrijsko standardno odstupanje (σ_g) iznosi 1,28. Eksperiment je proveden u uvjetima bistre vode. Za svako ispitivanje provedeno u okviru eksperimentalnog programa, razina pijeska poravnava se po čitavoj dužini pomoću drvene ravnalice širine jednake širini žlijeba. Razina pijeska kontrolira se u slučajno odabranim točkama pomoću mjerne letvice. Žlijeb se polako puni vodom do tražene visine. Nakon toga se uključuje crpka čija se brzina polako povećava sve do postizanja traženog protoka. Nakon toga se podešava visina pregrade kako bi se dobila potrebna dubina vode. Po završetku ispitivanja crpka se isključuje i iz žlijeba se polako ispušta voda bez narušavanja topografije podlokavanja. Mjerna letvica s dopuštenim odstupanjem od 0,10 mm koristi se za mjerenje topografije korita i dubine vode.

Varirana je dubina donje vode ($v_t = 8$ cm do 14 cm) kako bi se obuhvatio raspon Froudeovih brojeva ($F = 0,20-0,6$). Ukupan presjek stupova u skupini jednak je površini mjerodavnog stupa. Širina stupova (3,5, 4, 6 i 9 cm), w (poprečni smjer kanala) i dužina stupova (4, 6, 9 i 10 cm), l (uzdužni smjer kanala) mijenjaju se kako bi se dobili sljedeći omjeri w/l (0,34, 0,43, 1,0 i 2,25). Razni rasporedi skupina stupova prikazani su na slici 2.: jedan stup (mjerodavni slučaj), trokutasti 2×1 i 1×2 (tri stupa) i 2×2 (četiri stupa). Varirane su linijske udaljenosti između stupova (u smjeru toka) te udaljenosti poprečno na smjer toka (tj. x i y , slika 2.). Širina modela bila je za 12 % manja od širine kanala kako bi se izbjegli utjecaji kontrakcije [9]. Svaki eksperiment trajao je 6 sati, i u tom je vremenu postignuto više od 85 % ravnotežne dubine podlokavanja na bazi preliminarnih eksperimenata. Mia i Nago (2003.) [23] i Yanmaz i Altinbilek (1991.) [24] izvjestili su da se najveći dio podlokavanja odvija tijekom prva tri do četiri sata pokusa.

3. Numerički model

Model SSIIM je trodimenzionalni program za simuliranje kretanja vode i nanosa. Razvio ga je Olsen 2009. godine [25]. Model za proračunavanje dinamike fluida temelji se na metodi konačnih volumena (FVM) i njime se rješavaju Navier-Stoksove jednačbe primjenom modela vrtloženja. Odnos između vrtloga i viskoznosti može se izračunati kako slijedi:

$$V_T = c_u \left(\frac{k}{\varepsilon^2} \right) \quad (1)$$

gdje je k kinetička energija vrtloženja koja se modelira prema izrazu (2):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{V_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + V_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (2)$$

Raspršivanje vrijednosti k pripisuje se kao (ε) kako slijedi:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{V_T}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

Koeficijenti " $C_{\varepsilon 1,2}$ " su konstantni, a model vrtloženja zadan u SSIIM iznosi $k-\varepsilon$.

Mjerodavne jednačbe u numeričkom modelu za nestišljivi i konstantni tok mogu se modelirati na sljedeći način:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (5)$$

Izrazi (4) i (5) predstavljaju jednačbe kontinuiteta, tj. jednačbu momenta. U je komponenta brzine, ρ je gustoća fluida, P je ukupni tlak, a $-\overline{\rho u_i u_j}$ je Reynoldsov član naprezanja koji se određuje pomoću modela vrtloženja $k-\varepsilon$. Van Rijin (1987) [26]. razvio je formulu za određivanje ravnotežne koncentracije nanosa (C_{bed}) u blizini korita:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{D^{0.3}}{a} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (6)$$

U izrazu (6), D je promjer čestice nanosa, a je mjerodavna razina koja odgovara visini hrapavosti, τ i τ_c su posmično naprezanje na koritu, tj. kritično posmično naprezanje na koritu za kretanje čestica nanosa prema Shieldovom dijagramu, ρ_w i ρ_s su gustoća vode tj. gustoća nanosa, v je kinematička viskoznost vode, a g je ubrzanje sile teže. Vučeni nanos (q_b) se može odrediti prema Van Rijinovoju formuli iz 1987. [26]:

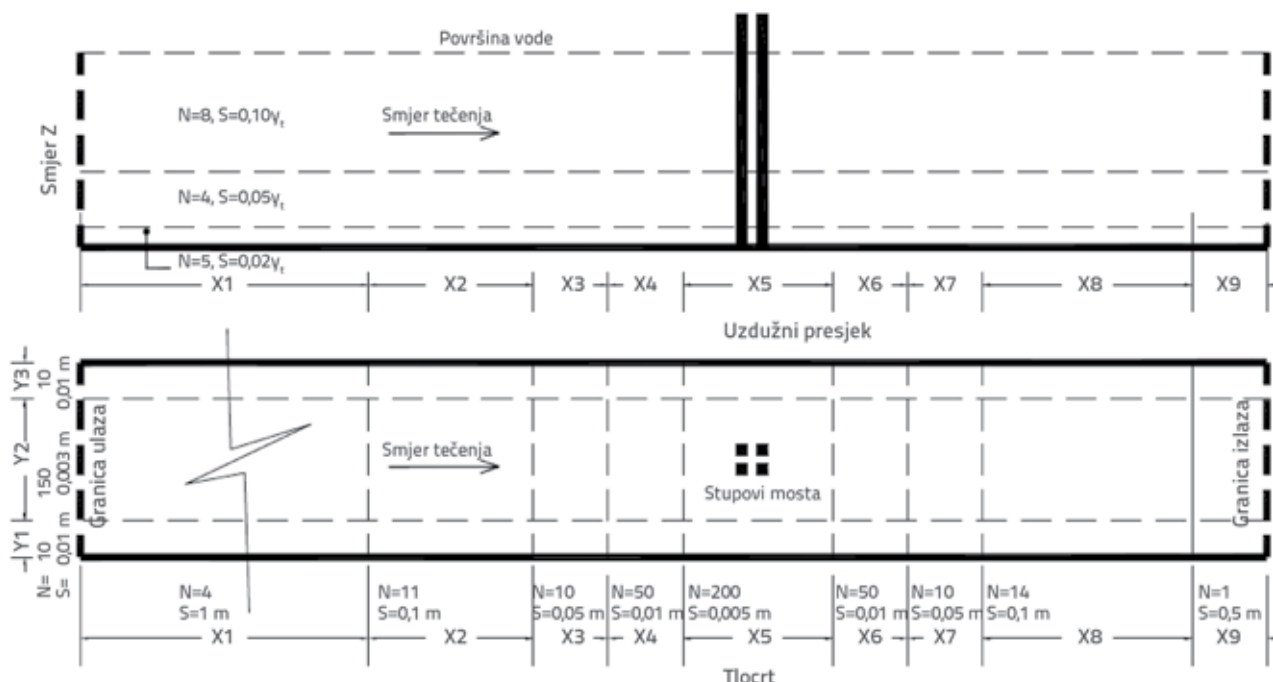
$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{d^{0.3}}{D_{50}^{0.3}} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left[\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (7)$$

Gdje je D_{50} srednja veličina nanosa.

Hrapave granice modelirane su uvođenjem zakona zida, Schlichting, 1979. [27]:

$$\frac{U}{U_*} = K^{-1} \ln \left(\frac{30z}{k_s} \right) \quad (8)$$

gdje je k_s visina hrapavosti, K je von Karmenova konstanta, U je srednja brzina, U_* je posmična brzina, a z je visina iznad korita.



Slika 3. Prikaz mreže modela

3.1. Geometrija i svojstva numeričkog modela

Trodimenzionalna mreža s 350 elemenata u smjeru X, 170 elemenata u smjeru Y i 17 elemenata u smjeru Z korištena je u programu CFD (SSIIM). Raspored linija u mreži prikazan je na slici 3. Na slici su polja u blizini stupova mosta prikazana detaljno kako bi se dobili precizni rezultati tijekom simulacije, dok su u zonama udaljenijima od stupova korištena manje detaljna polja kako bi se optimaliziralo vrijeme potrebno za proračun. U rubnim uvjetima, sljedeće su vrijednosti definirane kao ulazni podaci za SSIIM: početna razina vode, brzina toka i veličina nanosnog materijala. Multi gradijent primijenjen je kao nizvodni granični uvjet kako bi se spriječile nestabilnosti modela. Korišten je vremenski korak od 20 sekundi. Promjene u koritu kritično su bile ovisne o vrijednosti k_s iz odnosa prema zakonitosti zida. Vrijednosti visine hrapavosti varirale su od D_{50} do $100D_{50}$ [25]. Nakon postupka pokušaja i pogreške, ustanovljena je dobra podudarnost visine hrapavosti $10D_{50}$ (0,014 m) s promjenama korita koje su zabilježene u eksperimentu.

4. Analiza i rasprava

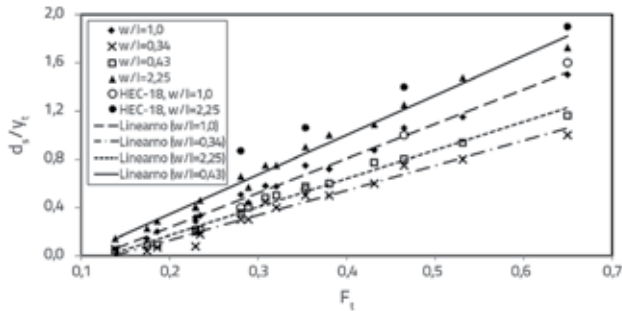
4.1. Konfiguracija s jednim stupom

Ovdje se istražuje utjecaj variranja omjera širine i dužine stupova na podlokavanje u slučaju samo jednog stupa. Relativne širine pilota (w/l) su 0,34, 0,43, 1,0 i 2,25. Dubina podlokavanja smanjuje se usporedo s relativnom širinom pilota (w/l) (slika 4.). Dubina podlokavanja smanjuje se za 32 % i 20 % za $w/l = 0,34$ tj. 0,43. U slučaju velike vrijednosti w/l ($= 2,25$),

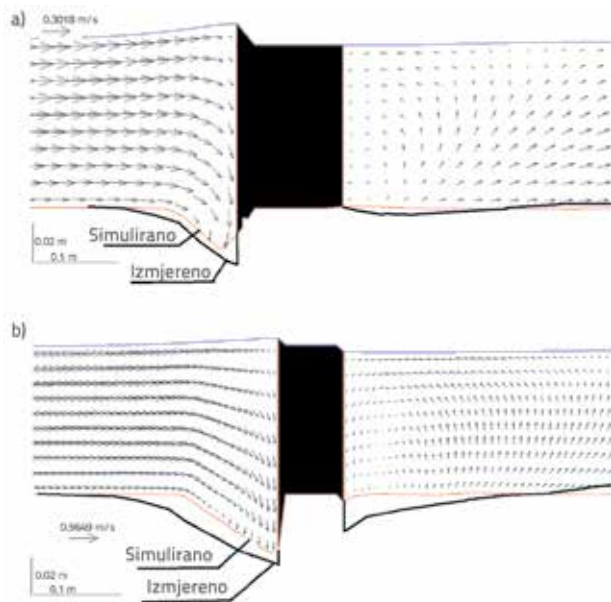
dubina lokalnog podlokavanja povećava se za 18 % u odnosu na mjerodavni stup ($w/l = 1,0$). Lokalno podlokavanje oko stupa uzrokovano je silaznim tokom vode s gornje strane stupa te potkovičastim vrtlogom u bazi stupa. Povećanje relativne širine stupa dovelo je do koncentracije silazne brzine uzvodno od stupa, što je uzrokovalo veće dimenzije podlokane zone na potpornju mosta. Uzdužne prosječne vrijednosti vektora brzine za tipične slučajeve $w/l = 1$ i 0,34 prikazane su na slici 5. Silazni vektori brzine utječu na uzvodni stup i generiraju jamu nastalu podlokavanjem u uzvodnom dijelu. Osim toga, vrtlozi u tragu generiraju se nizvodno od stupa, te podlokavanjem formiraju malu jamu. Snaga potkovičastog vrtloga smanji se kod nižih vrijednosti $w/l = 0,34$. Jednadžba predviđanja za jedan stup (HEC-18) prema Richardson-u i Davis-u (2001.) [13] usvojena je u ovom radu za tipične slučajeve, tj. za $w/l = 1$ i 2,25 (slika 4.). Jednadžbom HEC-18 dobiveni su pouzdani rezultati za $w/l = 1$ dok su rezultati za $w/l = 2,25$ precijenjeni. Stoga je za eksperimentalne podatke primijenjena višestruka linearna regresija kako bi se predložila empirijska jednadžba u kojoj se povezuje dubina lokalnog podlokavanja s odnosom širine i dužine (w/l) i Froudeov broj ($F_t = u/(gy_t)^{0,5}$, gdje je u prosječna brzina, y_t je dubina donje vode, a g je ubrzanje sile teže), i to kako slijedi:

$$d_s / y_t = -1,45 + 0,17 (w/l) + 2,65 F_t \quad (9)$$

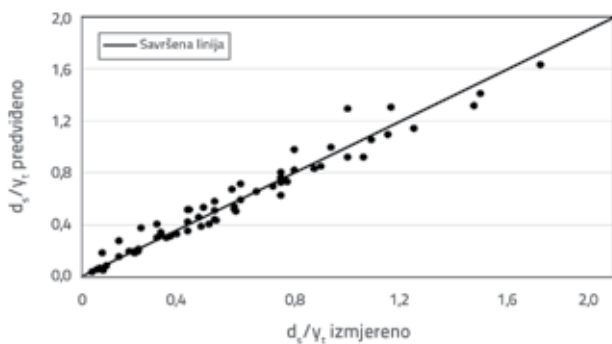
Rezultati predviđeni za predloženu jednadžbu uspoređeni su s izmjerenim vrijednostima (slika 6.). Koeficijent determinacije (R^2) i standardna greška za jednadžbu (9) iznosili su 0,95 tj. 0,08. Ova je jednadžba prikladan odraz izmjerenih vrijednosti.



Slika 4. Slučaj samo jednog stupa: odnos između F_t i d_s/y_t za različite vrijednosti w/l



Slika 5. Prosječna uzdužna brzina za različite omjere w/l pri $F_t = 0,52$, (za slučaj jednog stupa): a) $w/l = 0,43$; b) $w/l = 1$



Slika 6. Odnos rezultata predviđenih prema jednadžbi (9) i izmjerenih vrijednosti za različite w/l

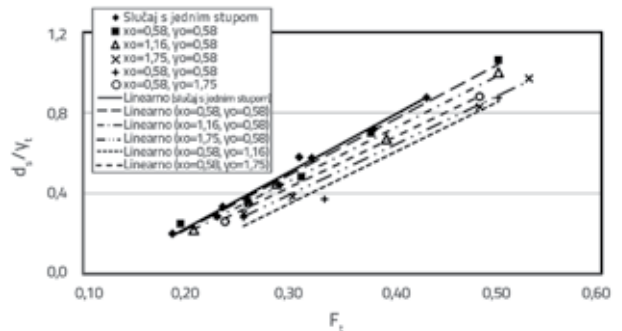
4.2. Rasporedi skupina stupova

Istražuje se utjecaj variranja udaljenosti između stupova u različitim skupinama na dubinu lokalnog podlokavanja. Raspored stupova u tim skupinama prikazan je na slici 2.

Relativne udaljenosti u liniji toka ($x_o = x$ /bočna dužina stupa) i poprečno na liniju toka ($y_o = y$ /bočna dužina stupa), varirane su prema definiranim eksperimentalnim modelima (2x1, 1x2 i 2x2).

4.2.1. Trokutasti raspored 2x1

Odnosi između Froudeovog broja (F_t) i relativne dubine podlokavanja (d_s/y_t) za raspored 2 x 1, i različitim udaljenosti između stupova (x_o i y_o), prikazani su na slici 7.

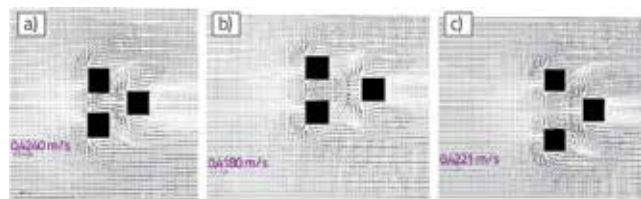


Slika 7. Odnos između F_t i d_s/y_t za raspored 2x1 i za različite vrijednosti x_o i y_o

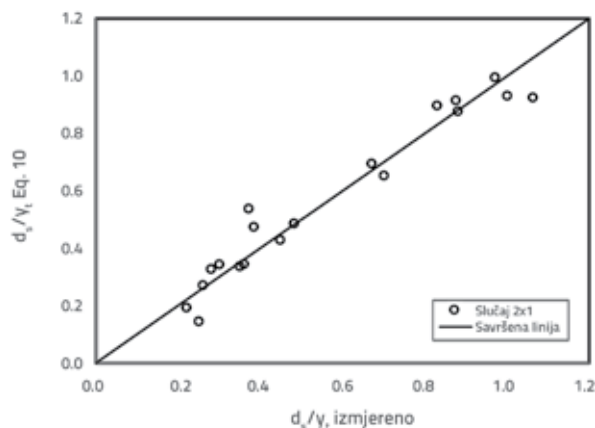
U svim rasporedima skupine stupova 2 x 1 bilježe se vrijednosti d_s/y_t koje su niže od vrijednosti zabilježenih za samo jedan stup. Uočen je mali utjecaj razmaka između stupova na podlokavanje kod temelja mosta za slučajeve $x_o = 0,58$ i $y_o = 0,58$. Prosječni vektori brzine za posljednji slučaj pokazuju da je između stupova generirana značajna koncentracija vrtloga, što objašnjava visoke vrijednosti dubine lokalnog podlokavanja (slika 8.a). Vrtlozi između stupova smanjuju se ($x_o = 0,58$, $y_o = 1,16$, slika 8.c) s povećanjem relativnog vertikalnog razmaka između pilota (y_o). Horizontalni vektori brzine formirani nizvodno od uzvodnih stupova utječu na one generirane uzvodno od posljednje pilota. Stoga je zabilježeno smanjenje energije potkovičastih vrtloga na skupini stupova. Za velike vrijednosti y_o ($= 1,75$), interakcija između stupova je nešto niža, a dubina lokalnog podlokavanja raste u odnosu na slučaj s $y_o = 1,16$. Za razmak stupova $y_o = 0,58$, dubina lokalnog podlokavanja malo se smanjuje s povećanjem vrijednosti x_o . Dubine lokalnog podlokavanja za $x_o = 0,58$ i $1,16$ smanjuju se za 3 % tj. 6 %. Na sici 8.b vidi se formiranje vrtloga oko stupova za slučaj $x_o = 1,16$ i $y_o = 0,58$, što znači da dubina podlokavanja raste s porastom udaljenosti udjela x_o u akumuliranju toka prema nizvodnom stupu. I, konačno, za raspored stupova 2 x 1 udaljenost između stupova poprečno na liniju toka (y_o) smatra se dominantnim faktorom koji utječe na dubinu lokalnog podlokavanja. Najbolje udaljenosti između pilota u ovom rasporedu su $x_o = 0,58$ i $y_o = 1,16$, pri kojima se dubina lokalnog podlokavanja smanjuje za 30 %. Kako bi se ocijenila dubina maksimalnog podlokavanja za trokutasti raspored stupova (2x1), razvijena je sljedeći prognostički izrez (10):

$$d_s / y_t = -1,45 + 0,3 (x_0/y_0)^{0,03} + 2,9 F_t^{0,5} \tag{10}$$

U izrazu (10) prilično vjerno su iskazane vrijednosti dobivene mjerenjem. Predviđene i izmjerene vrijednosti adekvatno su raspoređene oko savršene linije, kako je to prikazano na slici 9. Koeficijent determinacije iznosi 94 % a standardna pogreška je 0,06.



Slika 8. Prosječni vektori brzina oko stupova (za raspored 2x1) dalje od korita, dubina vode 0,01, za $F_t = 0,50$: a) $x_0 = 0,58$, $y_0 = 0,58$; b) $x_0 = 1,16$, $y_0 = 0,58$; c) $x_0 = 0,58$, $y_0 = 1,16$



Slika 9. Odnos izmjerenih i predviđenih vrijednosti (izraz (10)) za raspored stupova 2 x 1

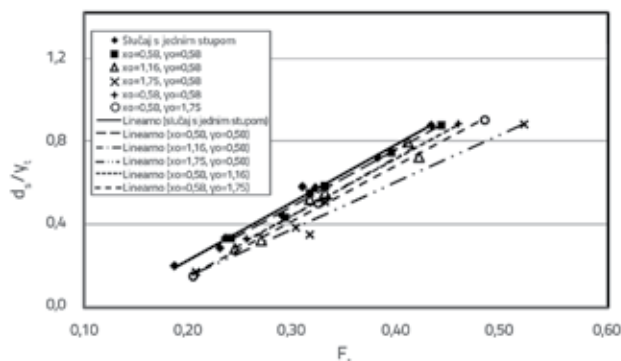
4.2.2. Trokutasti raspored 1 x 2

Na slici 10. prikazana je relativna dubina podlokavanja u odnosu na Froudeov broj za različite slučajeve rasporeda 1 x 2. Mali razmak između stupova u liniji i poprečno na smjer toka, tj. ($x_0 = 0,58$, i $y_0 = 0,58$), dovodi do smanjenja dubine podlokavanja za 2,5 % u odnosu na slučaj sa samo jednim stupom. Dubina podlokavanja smanjuje se za 8 % tj. 20 % za $x_0 = 1,16$ tj. 1,75 pri $y_0 = 0,58$. Osim toga, utjecaj promjene y_0 na dubinu lokalnog podlokavanja kod $x_0 = 0,58$ dosta je nizak. Postoci smanjenja podlokavanja za $y_0 = 0,58$ i 1,16 pri $x_0 = 0,58$ iznose 2,5 % tj. 7 %. Vektori brzine oko skupina pilota prikazani su na slici 11. Jasno je da se jaki vrtlozi generiraju između stupova kod malih udaljenosti između stupova, što uzrokuje veće dubine podlokavanja u odnosu na ostale veće prostore između stupova (slika 11.a). Povećanjem udaljenosti x_0 uzvodni stup u skupini preuzima ulogu "žrtvenog" pilota, pa se tako postiže smanjenje snage vrtloga uzvodno od posljednjih stupova, te se generira manja dubina lokalnog podlokavanja (slika 11.c). Povećanje y_0 (1,16) s $x_0 = 0,58$ omogućuje koncentraciju vektora brzine uzvodno od svakog stupa u skupini (slika 11.b). Vrtlozi se naročito generiraju ispred

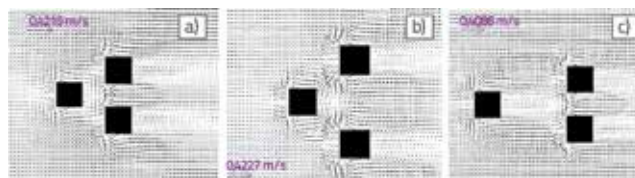
nizvodnih stupova te se između tri stupa podlokavanjem formiraju veće udubine. Predložena jednačba za procjenu maksimalne dubine podlokavanja za slučaj (1 x 2) glasi:

$$d_s / y_t = -2,40 - 0,56 (x_0/y_0)^{0,05} + 4,6 F_t^{0,25} \tag{11}$$

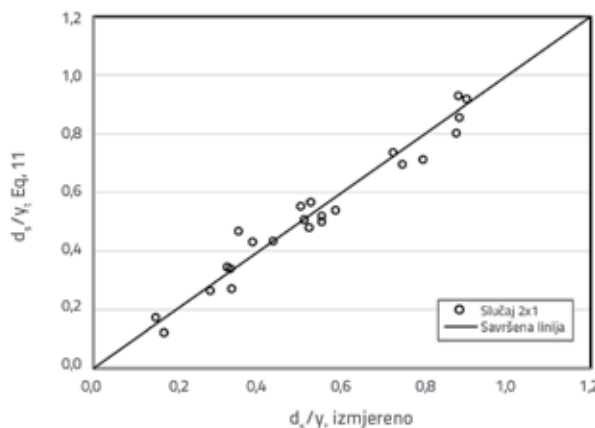
Koeficijent determinacije i standardna pogreška iznose 96 % tj. 0,051. Odnos između vrijednosti predviđenih u izrazu (11) i izmjerenih vrijednosti prikazan je na slici 12. Utvrđeno je da su predviđeni rezultati podudarni s rezultatima ispitivanja.



Slika 10. Odnos između F_t i d_s/y_t za raspored 1x2 i za različite vrijednosti x_0 i y_0 .



Slika 11. Prosječni vektori brzina oko pilota (raspored 1x2) dalje od korita, dubina vode 0,01, za $F_t = 0,50$: a) $x_0 = 0,58$, $y_0 = 0,58$; b) $x_0 = 0,58$, $y_0 = 1,16$; c) $x_0 = 1,75$, $y_0 = 0,58$

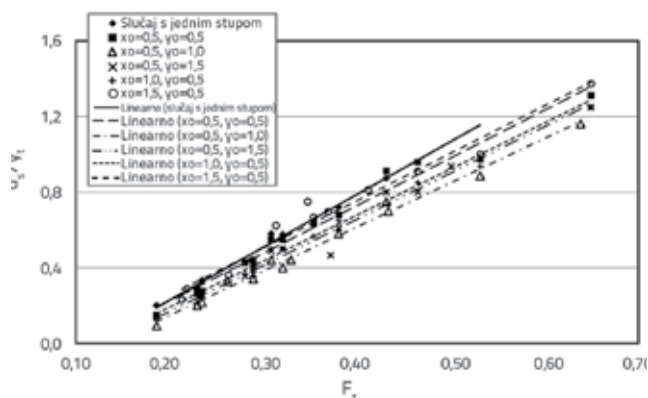


Slika 12. Izmjerene vrijednosti i predviđene vrijednosti (izraz (11)) za raspored 1 x 2

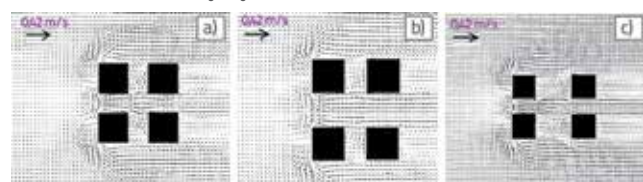
4.2.3. Pravokutni raspored 2 x 2

Odnos između relativne dubine podlokavanja i Froudeovog broja prikazan je na slici 13. za različite udaljenosti između stupova u

skupini 2 x 2. Raspored stupova pokazuje da se određivanjem relativne udaljenosti u smjeru toka ($x_0 = 0,5$) dubina lokalnog podlokavanja smanjuje usporedo s porastom udaljenosti y_0 . Relativna dubina podlokavanja smanjuje se za 8 %, 15 % i 24 %, za rasporede $y_0 = 0,5, 1,5$ i $1,0$ pri vrijednosti $x_0 = 0,5$ u odnosu na slučaj u kojem se analizira samo jedan stup. Vektori brzine oko stupova prikazani su na slici 14.



Slika 13. Odnos između F_t i d_s/y_t za raspored 2x2 i za različite vrijednosti x_0 i y_0



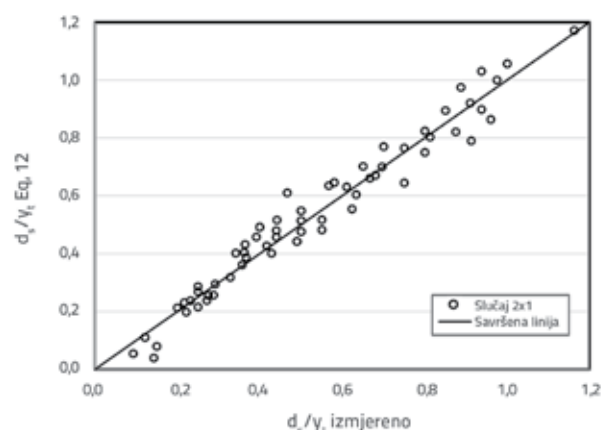
Slika 14. Prosječni vektori brzine oko stupova (za raspored 1x2) dalje od korita, dubina vode 0,01, za $F_t = 0,50$: a) $x_0 = 0,5, y_0 = 0,5$; b) $x_0 = 0,50, y_0 = 1,0$; c) $x_0 = 1,5, y_0 = 0,50$

Male udaljenosti između stupova u liniji toka i poprečno na smjer toka dovode do pojave većeg broja vrtloga ispred i između skupina stupova u odnosu na veće udaljenosti između stupova, naročito u slučaju kada je $x_0 = 0,5$ i $y_0 = 1$ (slike 14.a, 14.b). Iz razmatranog rasporeda stupova može se zaključiti da variranje

udaljenosti između stupova poprečno na tok dominantno utječe na smanjenje dubine podlokavanja oko stupova u odnosu na takvo variranje u smjeru toka. Na slici 14.c možemo vidjeti da je podlokavanje formirano u $x_0 = 1,5$ i $y_0 = 0,5$ podložno velikoj koncentraciji vrtloga ispred i u središnjoj zoni između stupova, što dovodi do velike dubine podlokavanja u ovoj skupini stupova. Predložena je sljedeća statistička jednačba kako bi se odredila maksimalna dubina podlokavanja u rasporedu stupova (2 x 2):

$$d_s / y_t = -0,37 + 0,06 (x_0/y_0)^{0,5} + 2,45 F_t^{0,33} \quad (12)$$

U izrazu (12) uspostavlja se veza između relativne dubine podlokavanja i ostalih neovisnih parametara. Koefficient determinacije i standardna pogreška iznose 95 % tj. 0,057. Izraz (12) prikladan je odraz izmjerenih vrijednosti (slika 15).



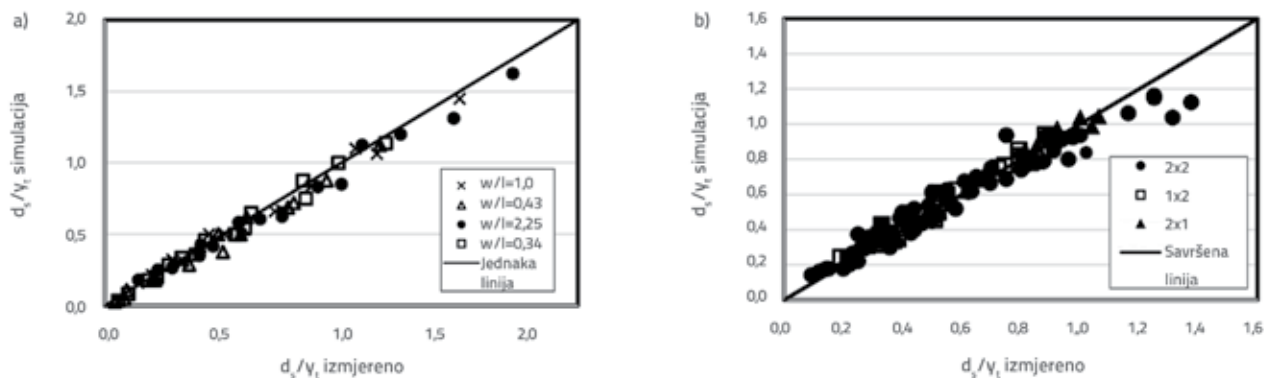
Slika 15. Izmjerene vrijednosti i predviđene vrijednosti (izraz (12)) za raspored 2 x 2

5. Provjera numeričkog modela

Numerički rezultati bazirani na modelu SSIM provjereni su pomoću eksperimentalnih podataka za različite rasporede skupina stupova. Usporedba između simuliranih i izmjerenih

Tablica 1. Usporedba simuliranih i registriranih dubina podlokavanja

Vrsta modela	x [cm]	y [cm]	y_t [cm]	Q [l/s]	Simulirano podlokavanje [cm]	Registrirano podlokavanje [cm]	Apsolutna greška = apsolutna (registrirana-simulirana) / registrirana
Jedan stup	-	-	14	15	0,8	0,75	0,07
	-	-	14	20,1	2,8	2,9	0,03
	-	-	14	24	4	3,8	0,05
	-	-	14	30	7,1	7,4	0,04
Skupina stupova 1 x 2	3,5	3,5	10	20,6	5,5	5,8	0,05
	3,5	3,5	8	20,6	7	6,6	0,06
	3,5	3,5	12	20,6	4	3,8	0,05
	7	3,5	10,3	16,6	2,9	3,2	0,09
	7	3,5	7,3	16,6	5,8	6	0,03
	7	3,5	12,1	23,4	3,9	3,85	0,01



Slika 16. Provjera numeričkog modela za različite: a) w/l (relativne širine za slučaj samo jednog stupa); b) rasporede skupina stupova

dubina podlokavanja prikazana je u tablici 1. Prosječna apsolutna pogreška u tipičnim simulacijama (slučaj samo jednog stupa i slučaj skupine stupova 1×2) iznosi otprilike 5 %. Ti rezultati pokazuju da se model SSIIM može koristiti za simuliranje podlokavanja oko stupova mosta. Odnos između simuliranih vrijednosti i izmjerenih podataka prikazan je na slici 16. za sve analizirane slučajeve. Osim toga, izmjereni i simulirani profili korita prikazani su na slici 4. za tipične slučajeve $w/l = 0,43$ i $1,0$. Jasna podudarnost između numeričkih i izmjerenih podataka pokazuje da se model SSIIM može koristiti za simuliranje dubine lokalnog podlokavanja za različite rasporede skupina stupova. Koeficijent determinacije i standardna pogreška za simulirane podatke iznose 97 % i 0,04.

6. Zaključak

Provedeno je eksperimentalno i numeričko ispitivanje kako bi se istražilo na koji način na dubinu lokalnog podlokavanja utječe razmak između stupova u smjeru toka i poprečno na smjer toka. Modeli korišteni u eksperimentu sastojali su se od: jednog stupa, tri stupa (2×1 i 1×2) i četiri stupa (2×2). Proračunski modeli za područje dinamike fluida, utemeljeni na metodi konačnih volumena, korišteni su za rješavanje Navier-

Stokesovih jednadžbi pomoću programa SSIIM. Na temelju postignutih rezultata izvedeni su sljedeći zaključci:

- Jednadžbom HEC-18 (Richardson i Davis, 2001. [13]) ostvarena su pouzdana predviđanja lokalnog podlokavanja za $w/l = 1$, dok su vrijednosti predviđanja precijenjene za ostale omjere w/l .
- U najboljim rasporedima skupina stupova 1×2 , 2×1 i 2×2 , dubina lokalnog podlokavanja manja je za 20 %, 30 % tj. 24 % u odnosu na slučaj sa samo jednim stupom.
- U slučaju skupine stupova 1×2 , na dubinu lokalnog podlokavanja bitno utječe udaljenost u smjeru tijekom, dok na skupine stupova 2×1 i 2×2 utječe udaljenost u smjeru poprečno na tok.
- Simulacije modela 3D CFD dobivene pomoću programa SSIIM podudarne su s eksperimentalnim vrijednostima različitih modela.
- Rezultati predloženih empirijskih jednadžbi u skladu su s izmjerenim vrijednostima.

Zahvale

Ovo je istraživanje provedeno uz podršku Povjerenstva za znanstvenoistraživački rad pri Sveučilištu u Jazanu.

LITERATURA

- [1] Hunt, B.: Monitoring Scour at Critical Bridges, Washington, D.C, 2009.
- [2] Hamill, L.: Bridge hydraulics, London: E& FN Spon, 1999.
- [3] Melville, B.W., Coleman, S.E.: Bridge Scour. Water resources publications. Highlands Ranch, Colorado, 2000.
- [4] Briaud JL, Ting F., Chen, H.C., Gudavalli R., Perugu S., Wei G., Sricos.: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (1999) 4, pp. 237-46.
- [5] Fischenich, J.C., Landers, M.: Computing Scour, Technical Note EMRRPSR-05, <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs>, 2000.
- [6] Lanca, R., Fael, C., Maia, R., Joao P. Pego, P.J.: Clear-water scour at pile groups. J. Hydraul. Eng., 139 (2013) 10, pp.1089 - 1098.
- [7] Bayram, A., Larson, M.: Analysis of scour around a group of vertical piles in the field, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 126 (2000) 4, pp.125-220.
- [8] Ettema, R.: Scour at Bridge Piers, Report No. 216, School of Engineering, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, 1980.
- [9] Melville, B.W., Sutherland, A.J.: Design method for local scour at bridge piers, J. Hydraul. Eng., 114 (1988)10, pp. 1210-1226.

- [10] Dey, S., Bose, S.K., Sastry, G.N.: Clear-water scour at circular piers: a model, *J. Hydraul. Eng.*, 121 (1995) 12, pp. 869–876.
- [11] Kumar, V., Ranga Raju, K.G., Vittal, N.: Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar, *J. Hydraul. Eng.*, 125 (1999) 12, pp.1302-1305
- [12] Mohamed, Y.A., Saleh, Y.K., Ali, A.M.: Experimental investigation of local scour around multi-vents bridge piers. *Alexandria Engineering Journal*, 54 (2015) 2, pp.197–203.
- [13] Richardson, E.V., Davis, S.R.: *Evaluating Scour at Bridges*, Hydraulic Engineering Circular No. 18, Federal Highway Administration, Washington, D.C, 2001.
- [14] Hannah, C.R.: *Scour at pile groups*, Research Report No. 28-3, Civil Engineering Department, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1978.
- [15] Ataie-Ashtiani, B., Beheshti, A.: Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups, *J. Hydraul. Eng.*, 132 (2006) 10, pp.1100–1104.
- [16] Amini, A., Melville, B.W., Ali, T.M., Ghazali, A.H.: Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow, *J. Hydraul. Eng.*, 138 (2012) 2, pp. 177-185.
- [17] Moussa, Y.A., Atta, M.: Effect of Pile Arrangement on Local Scour Depth, *Proceedings of the 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 338-347, 2017.
- [18] Sumer, B.M., Bundgaard, K., Fredsøe, J.: Global and Local Scour at Pile Groups, *Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, pp.577-583, 2009.
- [19] Rashed-Hosseini, Amini, A.: Scour depth estimation methods around pile groups, *KSCE, Journal of Civil Engineering*, 19 (2015) 7, pp. 2144-2156.
- [20] Morales, R., Ettema, R.: Insights from depth-averaged numerical simulation of flow at bridge abutments in compound channels. Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming Laramie, WY 82071, 2011.
- [21] Mohamed, Y.A., Abdel-Aal, G.M., Nasr-Allah, T.H, Awad, A.S.: Experimental and theoretical investigations of scour at bridge abutment, *Journal of King Saud University- Engineering Sciences*, 28 (2016) 1, pp. 32–40
- [22] Nasr-Allah, T.H., Mohamed, Y.A, Abdel-Aal, G.M., Awad, A.S.: Experimental and numerical simulation of scour at bridge abutment provided with different arrangements of collars, *Alexandria Engineering Journal*, 55 (2016) 2, pp.1455–1463.
- [23] Mia, M., Nago, H.: Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (2003) 6, pp. 420-427
- [24] Yanmaz, M., Altinbilek, H.D.: Study of time-dependent local scour around bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (1991) 10, pp.1247–1268.
- [25] Olsen, N.: A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option. Department of Hydraulic and Environmental Engineering: the Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- [26] Van Rijn, L.C.: *Mathematical Modeling Of Morphological Processes In The Case Of Suspended Sediment Transport*, Thesis, Delft Tech. Univ., Delft, The Netherlands, 1987.
- [27] Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*, 7th edition. McGraw-Hill, New York, 1979.