

Pristup istraživanju prostornog i vremenskog razvoja odbačene kaverne uz riprap zaštitu od podlokavanja

Antonija Cikojević¹, doc.dr.sc. **Gordon Gilja²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, acikojevic@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, ggilja@grad.hr

Sažetak

Morfordinamički razvoj riječnog korita potencijalno narušava sigurnost mostova te je potrebno periodički iznova procijeniti erozivno djelovanje toka tijekom uporabnog vijeka konstrukcije. Jedna od specifičnosti mostova u Hrvatskoj je izgradnja riprap zaštite od podlokavanja čijom se izvedbom utjecaj erozije propagira nizvodno u korito na mjesto odbačene kaverne. Cilj je ovog istraživanja razviti funkcionalnu zavisnost vremenskog i prostornog razvoja kaverne nastale podlokavanjem oko riprap zaštite i hidrauličkih karakteristika toka pristupom hibridnog modeliranja.

Ključne riječi: most, podlokavanje, riprap, odbačena kaverna, hibridno modeliranje

Research approach for spatial and temporal development of deflected scour hole next to riprap scour protection

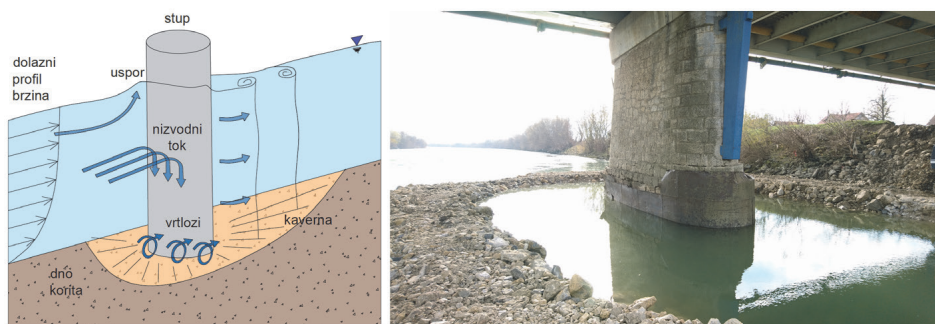
Abstract

Morphodynamic changes in riverbeds potentially affect the safety of bridges, and therefore erosive capacity in the vicinity of structures needs to be periodically reassessed during the service life of structures. Bridges in Croatia are traditionally protected from scour using the riprap protection, which deflects the scour hole further away from the bridge. The aim of this research is to develop an empirical equation for the spatial and temporal development of deflected scour holes next to riprap scour protection zones using the hybrid modelling approach.

Key words: bridge, scour, riprap, deflected scour hole, hybrid modelling

1 Uvod

Aluvijalna riječna korita podložna su stalnim morfodinamičkim promjenama uslijed djelovanja vremenski i prostorno promjenjivog režima voda i nanosa, a pod utjecajem prirodnih i antropogenih djelovanja [1]. Morfodinamičke promjene u rijekama najviše dolaze do izražaja u blizini građevina smještenih u vodotoku, najčešće mostova, oko kojih dolazi do erozije koja potencijalno narušava njihovu sigurnost. Izgradnja temelja i stupova mosta u riječnom koritu lokalno utječe na polje tečenja: smanjena je protočnost u mostovskom profilu, lokalno se stvara uspor na stijenka-ma konstrukcije, povećava se intenzitet turbulencije i remeti strujna slika. Posljedica povećanja energije uz stup je podlokavanje i pojava kaverni u njihovoj neposrednoj blizini. U takvim uvjetima stabilnost mosta može biti značajno narušena [2]. Ovom fenomenu su podložnije rijeke s velikim pronosom vučenog nanosa, ponajviše one s pješčanim i šljunčanim koritom, što je slučaj s velikim rijekama u Hrvatskoj [3]. Nedavni poplavni događaji u Hrvatskoj pokazuju značajan utjecaj klimatskih promjena na režim voda koji rezultiraju razornim posljedicama [4], kao i manjkavost tradicionalnih metoda za procjenu mjerodavnih protoka povezanih s nekim povratnim razdobljem [5]. Do sada su na hrvatskim rijekama evidentirane globalne [2] i lokalne [6] promjene u koritu povezane s izgradnjom mostova, identificiran antropogeni utjecaj na režim voda i nanosa te utjecaj na stabilnost temelja stupova mostova. Za procjenu potencijalnog razvoja kaverni oko konstrukcije potrebni su pouzdani ulazni podaci jer dubina podlokavanja ovisi o brojnim hidrauličkim i hidrološkim parametrima: brzini i dubini toka, širini i duljini stupa, granulometrijskoj krivulji dna korita, kutu odklona toka u odnosu na smjer pružanja stupa, lokaciji mosta s obzirom na zakrivljenost rijeke, itd. [7].



Slika 1. Opstrujavanje oko stupa i proces nastanka kaverne (lijevo, prilagođeno iz [7]); uklanjanje riprap zaštite od podlokavanja tijekom sanacije temelja stupa mosta (desno)

Kaverna nastala podlokavanjem nije dugoročno stabilna, već se pri svakom hidrološkom događaju razvija do ravnotežnog stanja ovisnog o trenutačnom režimu voda

i nanosa. Prilikom prolaska većeg vodnog vala kaverna se nastavlja produbljivati jer su zbog veće dubine vode i posmičnih naprezanja te jedinične snage toka stvoreni uvjeti za intenzivnije odnošenje materijala s dna korita [8]. Nakon opadanja vodnog vala kaverna se puni vučenim nanosom i tako se privremeno smanjuje [9]. Zato je potrebno mjerenja hidrauličkih parametara provoditi u mjerodavnim uvjetima, tj. pri nailasku vodnih valova kada su dimenzije kaverni najveće. Mjerenja u ovakvim uvjetima su nepogodna zbog utjecaja naplavina pokrenutih sa sliva na mjernu opremu, kao i povećane dubine i brzine toka što utječe na pouzdanost izmjerenih veličina. Iz tog razloga se najčešće analize vezane uz podlokavanje provode u kontroliranim, laboratorijskim uvjetima, a točnost rezultata se verificira s povremenim terenskim mjerenjima.

Većina dosadašnjih istraživanja bila je usmjerena na određivanje dubine podlokavanja oko stupova mostova smještenih u korito [10], pri čemu se izračunane dimenzije kaverne koriste za projektiranje zaštite od podlokavanja. Prilikom projektiranja često se predviđa izvedba riprap zaštite od podlokavanja zbog niza prednosti kao što su cijena, jednostavnost izvedbe, prilagodljivost uvjetima na terenu i lako održavanje [11]. U praksi se pokazalo da najčešće tijekom i nakon izgradnje riprapa dolazi do pojave kaverni na nizvodnoj nožici riprapa nakon čega se ono počinje urušavati u novonastalu odbačenu kavernu [12]. Budući da pojava odbačenih kaverni u koritu posredno ugrožava stabilnost mosta, može se zaključiti da riprap ne rješava problem podlokavanja nego ga samo pomiče nizvodno pri čemu je položaj kaverne nepoznanica jer se formira u interakciji toka i građevine u uvjetima specifičnim za svaku lokaciju. Uzevši u obzir da su istraživanja urušavanja riprap zaštite rijetka, a nedavna istraživanja upućuju na potrebu proširivanja znanja iz tog područja [13], predmet ovog istraživanja bit će problem podlokavanja oko već izvedene riprap zaštite mosta i izrada metodologije za njegov pouzdani izračun na temelju karakteristika polja tečenja. Cilj je unaprijediti empirijske zavisnosti za određivanje ravnotežnih karakteristika kaverne nastale podlokavanjem oko riprap zaštite. U tu svrhu primijenit će se pristup hibridnog modeliranja koji obuhvaća ispitivanja na fizičkom modelu (faza I) i numeričke simulacije (faza II) čiji će se združeni rezultati koristiti za analizu funkcionalne zavisnosti vremenskog i prostornog razvoja kaverne i hidrauličkih karakteristika toka.

2 Pregled stanja

Terenska istraživanja podlokavanja su vremenski zahtjevna, potrebna je specijalizirana oprema te ovise o trenutku nailaska i trajanju vodnog vala, što unosi niz nepoznanica u istraživanje. Iz tog razloga većina istraživanja je provedena u laboratorijskim uvjetima pri čemu se pokazalo da se rezultati ne mogu vjerno preslikati u prirodu [14]. Empirijske zavisnosti proizašle iz ovakvih istraživanja davale su pro-

cjenu dubine podlokavanja oko nezaštićenih stupova i kao rezultat se izvodila zaštita od podlokavanja, od kojih je jedna od najraširenijih metoda riprap zaštita [11]. Istraživanje urušavanja riprap zaštite u kavernu i povezane opasnosti za stabilnost i sigurnost mosta rijetko su istraživane, uključujući riprap u obliku kakav se tradicionalno primjenjuje u Hrvatskoj [15].



Slika 2. Riprap zaštita od podlokavanja savskog mosta u Jasenovcu, pogled nizvodno prema stupu (lijevo) i detalj iste lokacije (desno)

Do značajnijeg napretka u istraživanju podlokavanja dolazi nakon naglog razvoja hidroakustičke opreme, kao i numeričkih modela za opisivanje karakteristika polja tečenja krajem 20. stoljeća. Nedavna istraživanja preporučaju upotrebu daljinskog mjerenja za praćenje podlokavanja uz pomoć raznih tipova senzora, no uglavnom se temelje na senzorima koji su pričvršćeni na most i zahtijevaju poznavanje točne lokacije na kojoj će se pojaviti kaverna, a u protivnom nisu upotrebljivi [16-18]. Zaid i dr. [19] razvili su numerički model temeljen na podacima iz prethodno provedenih eksperimenata. Osnovna svrha izrade modela je bila analizirati karakteristike turbulentnog polja brzine oko kružnog stupa i procjena povećanja posmičnog naprezanja na dno korita oko stupa mosta. Odgovarajući numerički rezultati dobro se slažu s rezultatima dobivenim iz dostupnih eksperimentalnih podataka. Guven i Guna [20] razvili su hibridni model za simulaciju vremenskog razvoja kaverne i pripadnog polja tečenja nad njim. Hibridni model su verificirali eksperimentalnim podacima preuzetim iz literature. Vremenski razvoj kaverne simuliran hibridnim modelom pokazao je dobro poklapanje s eksperimentalnim podacima u uvjetima izražene turbulencije. Iskustva dobre prakse numeričkog modeliranja također se mogu usvojiti iz rada Hunga i Yaua [21] koji su ispitivali osjetljivost podlokavanja oko stupova mostova u uvjetima velikih voda.

3 Metodologija

Pojava poplava je relativno česta u prirodi, no intervali njezinog pojavljivanja nadilaze uobičajeno razdoblje potrebno za provođenje znanstvenog istraživanja. Mjerenje hidrauličkih parametara u stvarnim uvjetima tijekom nailaska vodnih valova pod kojim dolazi do značajnog razvoja kaverne nužno je za razumijevanje morfodinamičkog razvoja korita u blizini građevina, no istovremeno i opasno zbog velike snage vode u blizini građevina. Iz tog razloga su podaci s terenskih mjerenja rijetki i ne obuhvaćaju dovoljan raspon hidrauličkih parametara. Stoga je za opis pojave podlokavanja u prirodi potrebno replicirati uvjete u manjem mjerilu koje omogućava simuliranje željenih uvjeta u modelu. U tu svrhu koristit će se laboratorijska ispitivanja na fizičkom modelu smještenom u hidrauličkom kanalu. Adekvatno mjerilo modela odredit će se na temelju postojećih snimanja mostova u Hrvatskoj i predstavljaju pogodne studije slučaja. Na temelju podataka snimljenih terenskim mjerenjima verificirat će se fizički model na način da se potvrdi mjerilo modela, protok crpke koja simulira tečenje te hrapavost korita i pripadna krupnoća nanosa riječnog korita koji repliciraju stvarne uvjete u prirodi.

Mjerenje karakteristika polja brzine i batimetrije riječnog korita planira se izvesti u stvarnim uvjetima tijekom poplava na lokacijama pilot-istraživanja. Mjerenje polja brzine bit će izvedeno pomoću akustičnog strujomjera ADCP i višesnog dubinomjera ODOM ES3 koje posjeduje Građevinski fakultet montiranih na brodicu. Rezultat mjerenja bit će oblak točaka dna riječnog korita s pripadnom geopozicijom i karakteristikama trenutačne brzine toka kroz cijeli vodni stupac diskretiziran u ćelije. Građevinski fakultet u Zagrebu ima dugu tradiciju razvoja algoritama za obradu ovakvog tipa podataka [22].

Mjerenje karakteristika polja brzine u fizičkom modelu bit će izvedeno pomoću akustičnog strujomjera prikladnog za laboratorijska ispitivanja, ADV Vectrino (engl. Acoustic Doppler Velocimetry), a batimetrija korita laserskim 3D profilerom. Ako u signalu postoje šumovi, potrebno ih je filtrirati čime se smanjuje amplituda frekvencije šuma i poboljšava kvaliteta signala. Prilikom uporabe ADV uređaja emitira se Dopplerov signal čija je razina buke karakteristična bijelom šumu. Dobar pokazatelj pouzdanosti podataka je parametar SNR (engl. Signal to Noise Ratio) koji definira odnos željenog signala prema pozadinskom šumu te korelacijski parametar COR. Kako bi se osigurala kvaliteta zvučnog signala ADV-a, preporuča se da parametri COR i SNR budu veći od 70 % i 15 dB [23]. Prikupljanje podataka laboratorijskim ispitivanjem zahtijeva dugotrajnu pripremu modela kako bi se korito deformiralo do konačnog ravnotežnog stanja u odnosu na hidrauličke rubne uvjete [24]. Stoga se mjerenje batimetrije u fizičkom modelu može izvesti i pomoću laserskog mjerača jer omogućava snimanje batimetrije kroz vodu [25]. Time se hidrotehnički kanal nakon generiranja kaverne ne bi morao prazniti i omogućilo bi se neprekidno prikupljanje podataka u stvarnom mjerilu za vrijeme provođenja pokusa.

Upotrebom numeričkog modeliranja planira se napraviti numerički model u mjerilu prototipa kojim se ispitivanje karakteristika polja brzine i morfodinamičkog razvoja korita može ubrzati u odnosu na fizički model, promatrati veća dionica vodotoka te preuzeti trenutačne vrijednosti polja brzine i batimetrije korita u svakoj točki u svakom vremenskom koraku. Numerički model bit će kalibriran korištenjem podataka s terenskih mjerenja pomoću statističkih metoda u skladu s verifikacijom fizičkog modela. Korištenjem numeričkih simulacija planira se nadopuniti bazu eksperimentalnih podataka izmjerenim fizičkim modelom primjenjujući metodu kompilacije kako bi se dobila dovoljno velika baza podataka za formiranje zaključaka. Ovaj pristup se naziva hibridno modeliranje, a podrazumijeva komplementarno prikupljanje podataka eksperimentalnim fizičkim modelom (I. faza) i numeričkim simulacijama (II. faza), pri čemu svaki od modela svojim prednostima nadopunjava nedostatke drugoga. Hibridno modeliranje je nužno jer se njime mogu istovremeno kvalitetno opisati karakteristike lokalnog polja brzine oko stupa i karakteristika polja tečenja na široj dionici koja je ujedno i rubni uvjet fizičkog modela. Hibridni modeli bit će koncipirani na način da se usrednjene hidrauličke karakteristike preuzimaju iz numeričkog modela, a karakteristike lokalnog polja brzine oko stupa i kaverne preuzmu iz fizičkog modela.

Na temelju generirane baze podataka analizirat će se uzročno posljedična veza između karakteristika toka i razvoja kaverne uslijed podlokavanja [26] definiranjem empirijskih jednadžbi izvedenih upotrebom dimenzionalne analize. Dimenzionalna analiza se temelji na činjenici da se iz mjernih jedinica fizičkih veličina koje djeluju u promatranom sustavu može iznaći fizički zakon. Primjenom dimenzionalne analize nužno je da izvedena jednadžba bude homogena, odnosno svaki član jednadžbe mora imati jednaku jedinicu mjere. To je nužan, ali ne i dovoljan uvjet da jedna empirijska jednadžba bude ispravna. Ispravnost dimenzionalne analize potrebno je dokazati uz pomoć pokusa, a u ovom istraživanju dokazat će se na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja i terenskih mjerenja. Prilikom primjene dimenzionalne analize definirat će se veza između nezavisnih varijabli koje je moguće lako izmjeriti i/ili izračunati i zavisnih koje je potrebno izračunati, pa će tako biti:

- nezavisne hidrauličke varijable: srednja brzina toka U , srednja dubina toka h , Froudeov broj Fr , nagib energetske linije I_e , posmično naprezanje τ , turbulentna kinetička energija TKE , Reynoldsovo naprezanje RS i Shieldsov broj Θ
- nezavisne geometrijske varijable: širina stupa a , duljina stupa L , kut otklona u odnosu na tok α , karakteristični promjer riprapa d_R , karakteristična širina riprapa a_R , karakteristični nagib riprapa m
- zavisne varijable: dubina kaverne d_s , promjer kaverne r_s , udaljenost kaverne od riprapa L_s .

Za potrebe definiranja morfodinamičkog razvoja kaverne tijekom nailaska vodnog vala koristit će se valična analiza za analizu varijabilnosti karakteristika polja brzine i deformacija korita na različitim vremenskim skalama u frekvencijskoj i vremenskoj domeni. Ovaj pristup su već koristili istraživači za bolji opis morfodinamičkih procesa u riječnom koritu [27] i opis razvoja kaverne oko stupova mosta [28] koji će biti implementiran i u ovom istraživanju.

4 Rasprava

U Hrvatskoj i u Europi brojni su mostovi pri kraju svog uporabnog vijeka, dok je istovremeno pojava ekstremnih hidroloških događaja, kao što su poplave, pod utjecajem klimatskih promjena sve češća. Poplave utječu na hidromorfološke promjene u koritu rijeke i pojavu podlokavanja koje može narušiti sigurnost mostova. Tradicionalna mjerenja podlokavanja su samo djelomično učinkovita – ako se ne provode u uvjetima nailaska vodnog vala, postoji mogućnost da se kaverna zapuni nanosom nakon poplave i da izmjereni podaci podcijene stvarnu opasnost. Fokus većine dosadašnjih istraživanja bio je na određivanju veličine podlokavanja oko stupova mosta i izvedbi adekvatne zaštite, pristup za koji se u praksi pokazalo da ne predstavlja adekvatnu zaštitu od podlokavanja, već samo odbacuje kavernu nastalu podlokavanjem te često uzrokuje kontraefekt i veće podlokavanje nizvodno u odnosu na stanje bez riprapa. Budući da je dosadašnjim istraživanjem pokazano da se na temelju trenutačno dostupnih jednadžbi može pouzdano odrediti dubina podlokavanja ako se odabere prikladna jednadžba, hipoteza postavljena u ovom istraživanju glasi: ako se stvori baza podataka s dovoljno velikim rasponom hidrauličkih parametara, geometrija riprapa i rezultirajućih dubina kaverne, moguće je definirati empirijsku jednadžbu koja će dati pouzdaniju procjenu prostornog i vremenskog razvoja odbačene kaverne za odabrani hidrološki događaj.

Postavljena hipoteza planira se potvrditi stvaranjem baze podataka pomoću terenskih mjerenja i laboratorijskim ispitivanjem te numeričkim simulacijama koristeći hibridno modeliranje. Rezultat istraživanja bit će nomogrami – grafički prikazi ovisnosti dubine podlokavanja o karakteristikama polja brzine i geometriji riprapa – prikladni za upotrebu prilikom projektiranja. Ti će nomogrami omogućiti procjenu opasnosti od podlokavanja prilikom projektiranja mosta, ili rekonstrukcije u slučaju da se režim voda pod utjecajem klimatskih promjena pokaže opasan za konstrukciju, istraživačima, projektantima i agencijama koje gospodare mostovima na brz, pravovremen i pouzdan način. Doprinos predloženog istraživanja u odnosu na aktualno stanje područja ogleđa se u fokusiranju istraživanja na mostove oko kojih je već izvedena riprap zaštita od podlokavanja – postojećih građevina čija je stabilnost i s njom povezana sigurnost nepoznanica u hidrauličkom okolišu pod utjecajem klimatskih promjena. Važnost rješavanja navedenog problema je u činjenici da je podlo-

kavanje najčešći uzrok otkazivanja stabilnosti mostova i kao takav predstavlja važan parametar pri projektiranju ili procjeni stanja konstrukcije.

5 Zaključak

U ovom radu predstavljena je metodologija istraživanja za određivanje prostornog i vremenskog razvoja kaverne pri zadanim projektnim scenarijima kao što su poplave. Razvoj metodologije za procjenu razvoja kaverne temelji se na podacima o režimu voda i nanosa čime se omogućava procjena opasnosti uzimajući u obzir najvažnije utjecajne varijable. Znanstveni doprinos predloženog istraživanja u odnosu na aktualno stanje područja ogleda se u fokusiranju istraživanja isključivo na problem podlokavanja oko već izvedene riprap zaštite strukture mosta, a ne samo oko pojedinog stupa. Utjecaj predloženog projekta na struku očekuje se kroz razvoj pouzdanijih empirijskih jednadžbi koje su prilagođene za primjenu na velikim rijekama, a za što u trenutačnoj praksi ne postoje dovoljno pouzdane metode koje bi se mogle primijeniti u sustavima gospodarenja mostovima pri procjeni stanja konstrukcije. Pouzdanost dobivenih rezultata uvelike ovisi o kvaliteti ulaznih podataka korištenih u analizama. Kako bi se dobila kvalitetna baza podataka pogodna za istraživanje, primijenit će se pristup hibridnog modeliranja koji podrazumijeva komplementarno prikupljanje podataka eksperimentalnim fizičkim modelom i numeričkim simulacijama. Na ovaj način osigurano je nadopunjavanje svakog modela tako da se manjkavosti pojedinog modela odstrane prednostima drugog te se dosegne tražena pouzdanost ulaznih podataka.

Literatura

- [1] Lamb, R., Aspinall, W., Odbert, H., Wagener, T.: Vulnerability of bridges to scour: insights from an international expert elicitation workshop, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17 (2017) 8, pp. 1393-1409
- [2] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova, *Sabor hrvatskih graditelja 2012: Graditeljstvo - poluga razvoja*, Cavtat, Croatia, pp. 795-806, 2012
- [3] Kuspilić, N., Gilja, G.: Podvodni pregled mostova, *Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo*, Cavtat, Croatia, pp. 287-300, 2016
- [4] Abdulaj, R., Miković, N., Oskoruš, D., Vujnović, T.: Velike vode donjeg toka rijeke Save tijekom svibnja 2014., *Hrvatska vodoprivreda*, 207 (2014), pp. 14-17
- [5] Gilja, G., Ocvirk, E., Kuspilić, N.: Joint probability analysis of flood hazard on river confluences using bivariate copulas, *Gradevinar*, 70 (2018) 4, pp. 267-275

- [6] Kuspilić, N., Gilja, G.: Influence of watercourse flow on bridge safety, e-Zbornik: Electronic collection of papers of the Faculty of Civil Engineering, 8 (2018) 16, pp. 26-41
- [7] Melville, B.W., Coleman, S.E.: Bridge Scour, Water Resources Publications, 2000
- [8] Tabarestani, M.K., Zarrati, A.R.J.K.J.o.C.E.: Local scour calculation around bridge pier during flood event, 21 (2017) 4, pp. 1462-1472
- [9] Arneson L.A., Zevenbergen L.W. , Lagasse P.F. , P.E., C.: Evaluating Scour at Bridges, Federal Highway Administration (FHWA), pp. 71-73, 2012
- [10] Saha, R., Lee, O.S., Hong, H.S.: A Comprehensive Method of Calculating Maximum Bridge Scour Depth, Water, 10 (2018) 11, pp.
- [11] Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W., Girard, L.G.: Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board, Fort Collins, CO, pp. 284, 2007
- [12] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D.: Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography, 15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, Primošten, Croatia, pp. 176-183, 2017
- [13] Park, W.S., Hwang, H.J., Ahn, J.: Physical Modeling of Spatial and Temporal Development of Local Scour at the Downstream of Bed Protection for Low Froude Number, Water, 11 (2019) 5, pp.
- [14] Vonkeman, J.K., Basson, G.R.: Evaluation of empirical equations to predict bridge pier scour in a non-cohesive bed under clear-water conditions, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 61 (2019) 2, pp. 2-20
- [15] Ji, U., Yeo, W., Kang, J.: Subsidence of riprap protection without filters for different installation types of riprap around a pier in sands, Journal of Hydro-environment Research, 7 (2013) 1, pp. 41-49
- [16] Topczewski, Ł., Cieśla, J., Mikołajewski, P., Adamski, P., et al.: Monitoring of Scour Around Bridge Piers and Abutments, Transportation Research Procedia, 14 (2016) pp. 3963-3971
- [17] Briaud, J.-L., Hurlbaush, S., Chang, K.-A., Yao, C., et al.: Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology, Texas Department of Transportation, Texas, US, pp. 440, 2011
- [18] Prendergast, L.J., Gavin, K.: A review of bridge scour monitoring techniques, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (2014) 2, pp. 138-149
- [19] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F.: Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, 160 (2019) pp. 51-59

- [20] Guven, A., Gunal, M.: Hybrid modelling for simulation of scour and flow patterns in laboratory flumes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62 (2010) 3, pp. 291-312
- [21] Hung, C.-C., Yau, W.-G.: *Vulnerability evaluation of scoured bridges under floods*, 2017
- [22] Gilja, G., Kuspilić, N., Brckan, B.: Computer algorithm for analysis of bedform geometry, 13th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Bratislava, Slovakia, pp. 129-138, 2013
- [23] Baki, A.B.M., Z. Zhu, D., Rajaratnam, N.: *Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass*, 2014
- [24] Mohammed, Y.A., Saleh, Y.K., Ali, A.-A.M.: Experimental investigation of local scour around multi-vents bridge piers, *Alexandria Engineering Journal*, 54 (2015) 2, pp. 197-203
- [25] de Ruijsscher, T., Hoitink, A.J.F., Dinnissen, s., Vermeulen, B., et al.: *Application of A Line Laser Scanner for Bed Form Tracking in A Laboratory Flume*, 2018
- [26] Sheppard, D.M., Melville, B., Demir, H.: Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers, 140 (2014) 1, pp. 14-23
- [27] Singh, A., Lanzoni, S., Wilcock, P.R., Foufoula-Georgiou, E.: Multiscale statistical characterization of migrating bed forms in gravel and sand bed rivers, 47 (2011) 12
- [28] Sharma, A., Chavan, R., Kumar, B.: Multi-scale statistical characterization of migrating pier scour depth in non-uniform sand bed channel, *International Journal of River Basin Management*, 15 (2017) 3, pp. 265-276