

UDK/UDC: 528.8.042:627.01

Prejeto/Received: 19.10.2017

Izvorni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 27.11.2017

FLUKTUACIJE VODNE GLADINE STOJEČEGA VALOVANJA NA SOTOČJU DVEH DEROČIH TOKOV

WATER SURFACE FLUCTUATIONS OF STANDING WAVES AT THE SUPERCRITICAL CONFLUENCE FLOW

Gašper Rak^{1,*}, Marko Hočevar², Franci Steinman¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2

² Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva cesta 6

Izvleček

Pri deročem toku se pogosto pojavi dvofazni tok, ki ga spremlja močno razgibana, nestacionarna vodna gladina. S klasičnimi merilnimi metodami določitev povprečnega poteka vodne gladine, posebno z večjo prostorsko ločljivostjo, praktično ni možna. Pri analizi sotočja dveh deročih tokov, kjer se oblikuje stoječe valovanje z veliko vertikalno dinamiko gladine, smo za meritve gladine uporabili lasersko skeniranje. Članek prikazuje, da je z obdelavo meritev te brezkontaktno merilne metode mogoče določiti tako srednji potek kot tudi fluktuacije vodne gladine. Rezultati širijo uporabo te merilne metode, ki prinaša pomembne informacije o lastnostih vodnega toka, na številna področja hidrotehnike. Prikazane so tokovne razmere na sotočju, kjer so bile iz izmerjene dinamike vodne gladine v merilnih prerezih za nabor 168 kombinacij dveh dotokov z visokimi vrednostmi Froudovih števil ($2 \leq Fr \leq 12$) določene ovojnice vertikalnih fluktuacij vodne gladine okoli srednje vrednosti. Povezovanje več merilnih prerezov je omogočilo izdelavo razgibane ploskve vodnih gladin z več vrhovi stoječega valovanja na območju sotočja. Zanje so bile razvite fenomenološke zveze med vhodnimi parametri tokov in srednjimi višinami ter fluktuacijami vodne gladine.

Ključne besede: sotočje, deroči tok, dvofazni tok, fluktuacije vodne gladine, lasersko skeniranje.

Abstract

Two-phase flow often occurs in supercritical flows, accompanied by a highly dynamic, non-stationary water surface. Determining the average water surface profile, especially with higher spatial resolution, is practically impossible using conventional measurement methods. In the analysis of supercritical confluence flow, where standing waves with high vertical dynamic of water surface are formed, laser scanning was used to measure the free-water surface. Average profile as well as fluctuations of water surface can be determined with processing of (processed) measurements of this non-contact measurement method, as presented in this paper. The results contribute to wider use of this measurement method, which provides important information on water flow properties to many fields of hydro-engineering. Flow conditions are shown at confluences, where measurements of water surface dynamics in measured cross-section for 168

* Stik / Correspondence: gasper.rak@fgg.uni-lj.si

© Rak G. et al.; Vsebinska tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Rak G. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

combinations of two flows with high values of Froude numbers ($2 < Fr < 12$) were used to determine the envelopes of vertical water surface fluctuation around mean value. The integration of several measured cross-sections enabled the construction of the undulating water surface with several peaks of standing waves in the confluence area. Phenomenological relations were developed between input flow parameters and mean water levels as well as fluctuations of water surface for areas of standing waves.

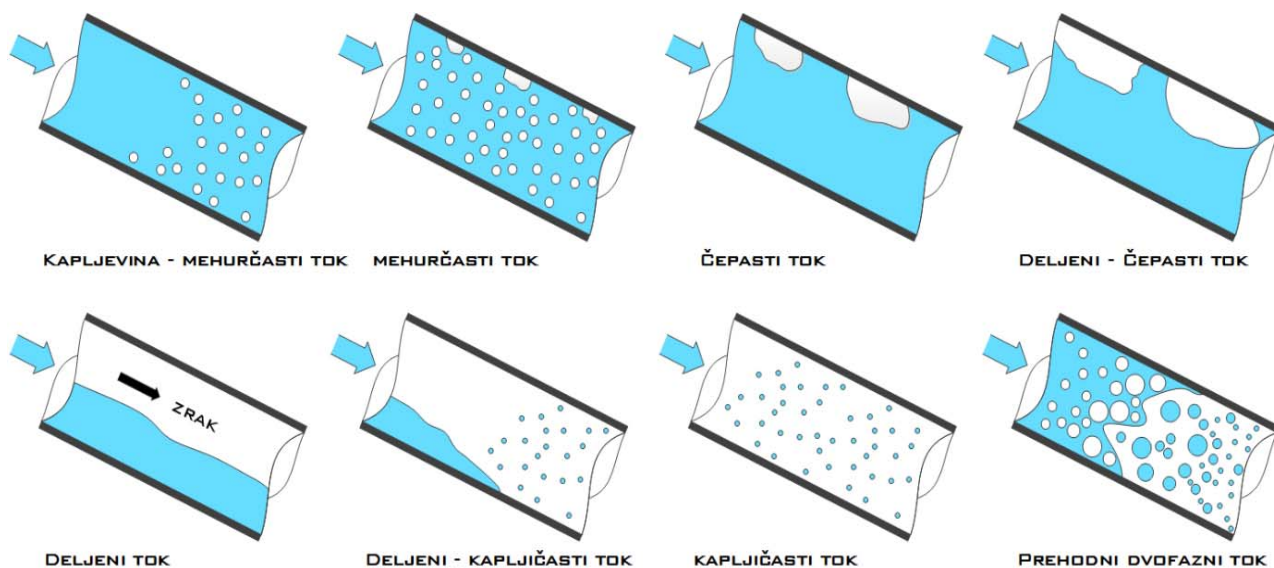
Keywords: confluence, supercritical flow, two-phase flow, fluctuations of water, laser scanning.

1. Uvod

Laminarni tok s prosto gladino v deročem režimu se v naravi pojavlja izjemno redko. Zaradi vpliva ostenja in napetosti na stiku vodnega telesa in ozračja se pojavljajo pulzacije hitrosti, kar privede do pojava turbulentnega toka. Pri pojavu motenj v deročem toku (npr. obtekanje mostnih opornikov, tok preko stopnje), na sotočju dveh ali več deročih dotokov ali zaradi vpliva tokovnih razmer na odseku dolvodno (npr. prehod iz deročega v mirni režim in pojav vodnega skoka), pa lahko prihaja do močnejše turbulentnega toka in porušitve zvezne vodne gladine ter posledično do vstopanja zraka v vodno telo in pojava dvofaznega toka. Pri tem turbulentne strižne napetosti presežejo površinske napetosti. Za cevovode, kjer je geometrija ostenja fiksna, so prikazane različne oblike dvofaznega toka (slika 1). V vodotokih z razgibanim ostenjem so pojavi še intenzivnejši.

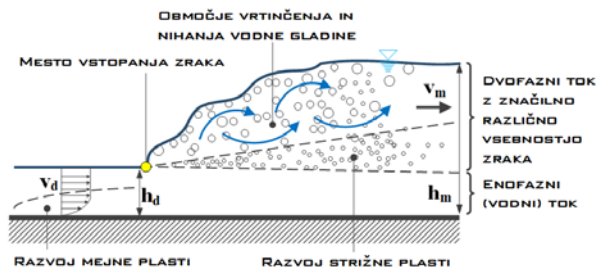
Lastnosti dvofaznih tokov in interakcija med vodo in zrakom pri toku vode s prosto gladino so bile v preteklosti raziskovane eksperimentalno, numerično in tudi teoretično (npr. Chanson, 1997; Murzyn in Chanson, 2007; Chanson, 2013; Pfister in Chanson, 2014). Pri močno razvitih dvofaznih tokovih, predvsem kjer se pojavljajo penjenje vodne gladine, škropljenje in prehodi med mehurčastim in kapljičastim tokom, je natančno zaznavanje ter določitev vodne gladine zelo težko oziroma celo nemogoče. Ob tem se pogosto pojavlja tudi izrazito nihanje gladine oziroma zgornjega sloja zmesi vode in zraka.

Med hidravličnimi pojavi, ki imajo zgoraj opisane lastnosti, se v praksi najpogosteje pojavlja vodni skok, in sicer kot razpenjeni krovni val na prehodu iz deročega v mirni tok. Topografijo njegove vodne gladine lahko razmeroma dobro opišemo že v dvodimenzijskem prostoru, saj je bil pogosto predmet raziskav v ravnem kanalu (slika 2).



Slika 1: Različni tipi dvofaznega toka v cevovodu. V vodotokih so procesi še intenzivnejši.

Figure 1: Different types of two-phase flow in pipeline. Processes are even more intense in open channels.



Slika 2: Dvofazni tok na primeru vodnega skoka in mesto vstopanja zraka (Murzyn in Chanson, 2008).

Figure 2: Two-phase flow in the hydraulic jump and the location of air entrainment (Murzyn and Chanson, 2008).

Chanson je z različnimi soavtorji opravil obsežne meritve o poteku vodne gladine, stopnji turbulentnosti in vsebnosti zračnega deleža v vodnem telesu vodnega skoka (Murzyn in Chanson, 2009; Chachereau in Chanson, 2011; Wang in Chanson, 2015). Skupaj z Murzyn (2009) sta izvedla tudi meritve fluktuacij vodne gladine vzdolž vodnega skoka in na podlagi meritev razvila enačbo za opis fluktuacij:

$$\frac{\eta'_{max}}{h_d} = 0,116 * (Fr - 1)^{1,235}$$

kjer je η'_{max} maksimalna višina fluktuacij vodne gladine, h_d in Fr pa globina vode oziroma Frouddovo število toka gorvodno od vodnega skoka. Po nam dostopni literaturi fluktuacije vodne gladine pri drugih podobnih hidravličnih pojavih še niso bile podrobneje obravnavane.

Poznavanje takšnih tokovnih razmer in merjenje njihovih lastnosti je pomembno, saj se z njimi srečujemo na različnih področjih, kot so gradbeništvo ter okoljsko, kemično in strojno inženirstvo. Zaznavanje gladine razpenjenega toka z običajno veliko vertikalno dinamiko, ki spremlja takšne pojave, je v praksi problem tudi zaradi omejenih sposobnosti klasičnih merilnih metod, ki bi se lahko uporabile za meritve vodne gladine. Najpogosteje uporabljene merilne naprave, kot so uporovne in tlačne sonde, piezometri, ostna merila in ultrazvočni merilniki, dajejo ustrezne rezultate le ob mirnih tokovnih razmerah. Hkrati so njihove slabosti predvsem v tem, da so praviloma točkovne in zato časovno zamudne pri določanju linijskega

ali ploskovnega poteka vodne gladine in niso primerne za merjenje razburkanih, razpenjenih vodnih gladin. Torej z njimi ni mogoče izvesti meritev z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo v časovno sprejemljivih okvirih ter tudi ne pri dvofaznem toku.

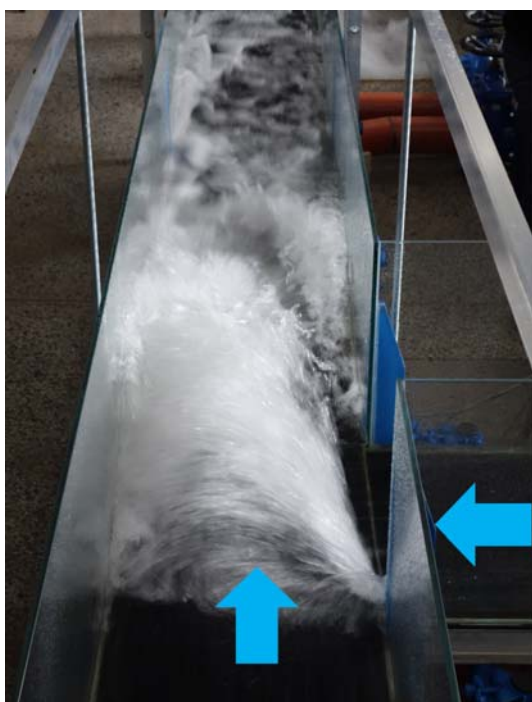
Tokovne razmere na sotočju

Poznavanje razmer na sotočjih ima široko uporabnost, saj se sotočja pojavljajo tako na vodotokih (naravna in umetna rečna korita, hudourniki itd.) kot tudi na številnih objektih in infrastrukturi (ribje steze, odvodnja površinskih voda z utrjenih površin itd.). Prav tako je poznavanje struktur vodnega toka izrednega pomena pri določanju varnostnega nadvišanja, ki ga je treba upoštevati pri načrtovanju vzdolžnih objektov ob vodotoku (npr. obrežne utrditve), in prečnih objektov, kot so prepusti in mostovi.

Pri tem niso pomembni le povprečni nivoji vodne gladine, temveč tudi njene vertikalne fluktuacije. Predvsem pri prepustih in mostnih odprtinah lahko kakšna motnja povzroči prehod iz deročega v mirni tok in s tem hitre popolne zapolnenosti pretočnega prereza, kar močno zmanjša pretočno sposobnost. Zaradi pomembnosti področja so bile tokovne razmere na sotočju v preteklih raziskavah pogosto obravnavane (Taylor, 1944; Behlke in Pritchett, 1966; Best, 1984; Hager, 1989a; Hager, 1989b; Schwalt in Hager 1995; Weber et al., 2001). Raziskovali so na primer tokovne razmere pri različnih hidravličnih in geometrijskih parametrih, določali hitrostna polja, območje mešanja tokov, tokovne vzorce na sotočjih in energijske izgube zaradi trenja in vrtnčenja. Z razvojem računalništva in visoko zmogljivih hidravličnih numeričnih modelov se je v zadnjih desetletjih veliko tudi numerično modeliralo (Bradbrook et al., 2000; Biron et al., 2004; Kesserwani et al., 2007; Ghostine et al., 2010).

Na sotočju se že pri mirnem režimu dotokov pojavljajo izrazite 3D tokovne razmere, vendar so vertikalne komponente hitrosti za velikostni razred manjše od horizontalnih in jih lahko zanemarimo, kar omogoča 2D-analizo mirnega toka. Pri deročem toku pa vertikalna komponenta hitrosti ni

zanemarljiva. Zaradi velike kinetične energije obeh dotokov se na njunem stiku pojavijo močna turbulenca, vrtinčenje toka in posledično izrazito turbulentni dvofazni tok s kompleksno tokovno sliko (slika 3). Pri tem se oblikuje stoječe valovanje z različnimi tipi dvofaznega toka (slika 1), ki ima veliko dinamiko fluktuacij. Z vstopanjem zraka v kompaktno vodno telo dotokov se v zgornjih slojih oblikuje mehurčast tok, pri večjih Froudovih številih pa tudi prehodni dvofazni tok – disperzni mehurčast tok v nižjih plasteh in kapljičast tok prek krone stoječega vala, ki se oblikuje vzdolž sotočja.



Slika 3: Sotočje dveh deročih dotokov.

Figure 3: Supercritical confluence flow.

Raziskovali smo tokovne razmere na sotočju dveh dotokov v deročem režimu kot primer hidravličnega pojava, ki ima vse lastnosti, ki navadno povzročajo težave v praksi. Stoječe valovanje s svojo višino bistveno presega povprečne vrednosti nivojev gladin dotokov, topografija gladine je kompleksna, hkrati pa se pojavlja njena velika vertikalna in horizontalna dinamika, kar vse pokaže prejšnja fotografija. Zaradi različnih oblik dvofaznega toka vzdolž sotočja je natančen potek gladine težko določljiv, zato je pri meritvah pomembno tudi, ali lahko

določimo ovojnico nihanja mešanice vode in zraka, kot prostor, ki je pod vplivom dinamike sotočja.

Ker klasične merilne metode tega ne omogočajo, smo preverili uporabnost laserskega skeniranja. Naše raziskave so pokazale, da lasersko skeniranje lahko uporabimo tudi za meritve vodne gladine pri hidravličnih pojavih s turbulentnim dvofaznim oz. razpenjenim tokom, torej prav v primerih, kjer druge merilne metode dajejo manj zanesljive rezultate, pogosto pa sploh niso uporabne (Rak et al., 2017a). V nadaljevanju je prikazano, da je z obdelavo surovega oblaka točk na podlagi jakosti odboja laserskega žarka vzdolž merilne linije mogoče določiti tako srednje vrednosti poteka vodne gladine kot tudi razpon fluktuacij gladine. Za sistematične meritve odbojev laserskega žarka z veliko frekvenco v številnih merilnih prerezih je bila razvita metodologija določevanja prostorskega poteka vodne gladine, srednjega poteka topografije stoječega valovanja in ovojnice maksimalnih in minimalnih vrednosti fluktuacij gladin. Z uporabo lastno razvite programske opreme in običajnih statističnih obdelav smo razvili fenomenološke zveze med dotočnimi geometrijskimi in hidravličnimi parametri tokov ter maksimalnimi višinami stojećih valov in fluktuacijami, ki se pojavljajo na sotočjih pri deročem toku. Nove fenomenološko izpeljane enačbe, ki opisujejo prečni in vzdolžni potek gladin ter tudi višino fluktuacij na mestu vrhov valovanja, prinašajo informacije o procesih in njihovih magnitudah, ki so pomembne za inženirsko prakso.

2. Eksperimentalno delo

2.1 Merilna postaja sotočja

Eksperimentalno delo smo opravili v hidravličnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Podroben opis sotočja z 90° kotom med osema glavnega kanala in stranskega dotoka je bil že podan v drugih člankih (npr. Rak et al., 2017a in Rak et al., 2017b), zato tu podajamo le glavne lastnosti. Dolžini dotokov z deročim tokom sta bili za glavni kanal in stranski kanal enaki, in sicer 1 m, da so bili na začetku

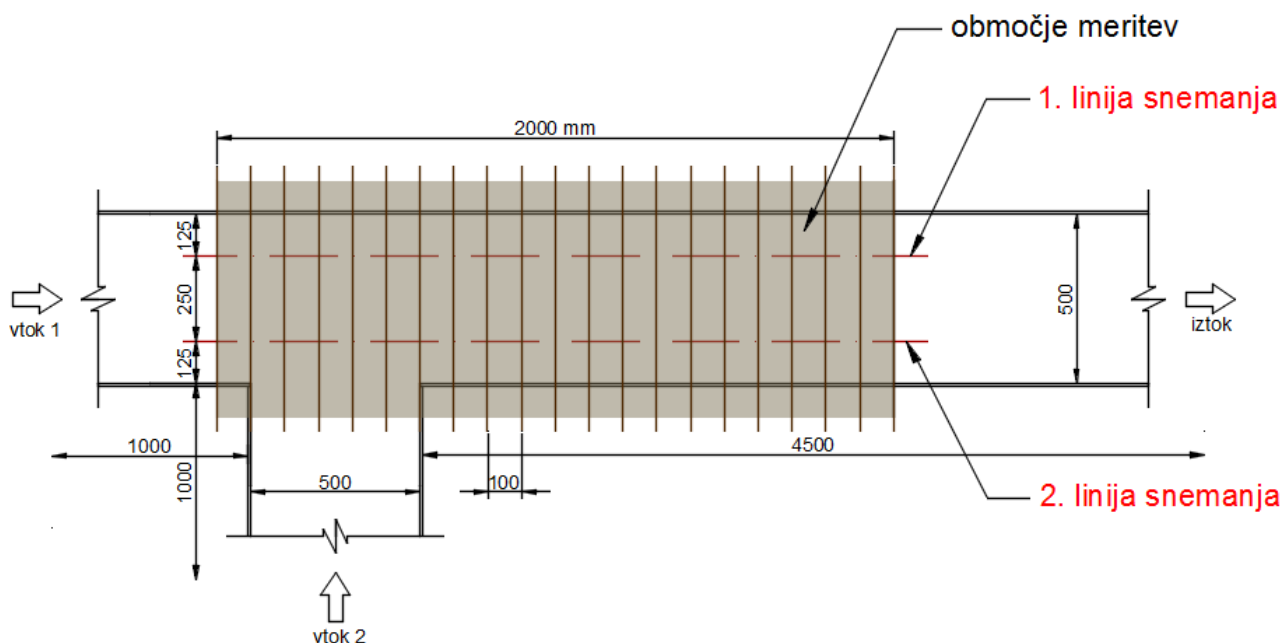
sotočja doseženi enaki dotočni pogoji. Dolžina glavnega odtočnega kanala, merjena dolvodno od sotočja, je bila 4,5 m. Celotno ostenje kanalov je bilo izdelano iz steklenih plošč z minimalnim številom stikov, da se je v največji meri zmanjšal vpliv hrapavosti na tokovne razmere. Dovod vode na posamezno vejo je bil urejen z ločenim cevovodom, opremljenim z zasunom in elektromagnetnim merilnikom pretoka. Vtok na model je bil izveden preko tlačne posode z možnostjo regulacije višine odprtja, s katero se je nastavljala globina deročega toka. Merilna oprema je bila montirana na okvirno konstrukcijo z merilnim mostom in s sistemom za natančno pozicioniranje merilne opreme, kar je omogočalo ponovljivost meritev v istem merilnem prerezu. Okvirna konstrukcija je bila ločeno pritrjena na podnožje modela, da bi bilo v čim večji meri preprečeno prenašanje vibracij s steklenega dela na merilno opremo.

2.2 Merilna oprema

Na sotočju pri deročem režimu vodnega toka se oblikuje kompleksna, nestacionarna topografija vodne gladine, zato je bil uporabljen 2D laserski

skener LMS 400 proizvajalca SICK, ki omogoča meritve vzdolž merilne linije z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo. Naprava namreč oddaja impulze laserske svetlobe s frekvenco do 175 kHz, sprejemnik pa beleži odboje z vodne gladine, mehurčkov, ostenja idr.

Meritev vodne gladine z laserskim skenerjem je razmeroma novo področje uporabe te merilne metode, zato je bilo treba pred izvedbo sistematičnih meritev topografije vodne gladine opraviti obsežno verifikacijo merilne metode. Postopek je opisan v članku (Rak et al., 2017a). Meritve topografije vzdolž sotočja v dolžini 2 m so bile izvedene v zaporednih prečnih prerezih na medsebojni razdalji 100 mm (slika 4), in to iz dveh položajev na vzdolžno vzporednih linijah. Tako so bili vpadni koti laserskega žarka na vodno gladino manjši, kar je povečalo število povratnih, tj. zabeleženih odbitih laserskih impulzov. Zaradi lokalno močno razgibane vodne gladine je bilo s snemanjem v dveh lokacijah posameznega prečnega prereza tudi preprečeno, da bi kakšna (previsna) mesta ostala »zakrita« laserskemu skenerju.



Slika 4: Shema sotočja z vrisanim območjem meritev in linijami prečnih prerezov.

Figure 4: A sketch of the confluence flow with measured area and lines of cross-sections.

2.3 Obdelava oblaka točk in izdelava mrežnih modelov topografije vodne gladine in ovojníc

Za branje podatkovnih nizov meritev iz skenerja, njihovo filtriranje, obdelavo, analizo, prikaz in shranjevanje smo morali izdelati lastno programsko kodo, za kar smo izbrali programsko okolje Matlab. Rezultate obdelav z ustreznimi algoritmi razmeroma obsežnih nizov podatkov v obliki oblakov točk smo tako lahko pripravili za prikaz poteka gladin v posameznih prečnih prerezih, z njihovim združevanjem pa so bili izdelani 3D mrežni modeli topografije in iz vrednotene numerične vrednosti glavnih značilnosti grebenov stoječih valov za vsako kombinacijo dotokov na sotočje.

Prečni potek vodne gladine v posameznem prerezu je bil zajet s 6000 skeni in 350 meritvami v posameznem skenu (kotna ločljivost skeniranja je bila 0,2°; kotni razpon meritev pa 70°). Kljub velikemu številu meritev pa je bilo, zaradi specifičnosti interakcije med laserskim žarkom in vodno/mehurčasto gladino (podrobneje opisano v Rak et al., 2017a), število povratnih signalov, ki jih zabeleži sprejemnik laserskega skenerja in predstavljajo rezultat uspešnih meritev, majhno. Znašalo je le okoli 5 % oddanih impulzov. Laserski skener torej pogosto ne prejme povratnega signala, zato so zabeleženi odboji naključno in nezvezno razporejeni. Potrebne so torej dodatne numerične obdelave, da bi lahko iz uspešnih meritev posameznega skena v prvem koraku v naprej določenih Y-koordinatah (os prečno na glavni kanal), s korakom 5 mm, z interpolacijo določili vrednosti točkovnih nivojev vodne gladine (Z-koordinata). Nato je bil z upoštevanjem vrednosti Z-koordinat vseh skenov v izbranih Y-koordinatah z vrednostjo mediane določen srednji potek vodne gladine, s standardno deviacijo pa tudi lastnosti nihanja vodne gladine. V zadnjem koraku so bili, na podlagi prečnega poteka vodne gladine v posameznem prerezu, izdelani še 3D mrežni modeli topografije in ovojníc nihanja vodne gladine (Rak et al., 2017b).

2.4 Filtriranje oblaka točk

Laserski skener pri sprejemu povratnega signala, poleg razdalje, določene iz potovalnega časa signala od naprave do merjene površine in nazaj, zabeleži tudi intenziteto prejetega signala. Ta je zabeležena z vrednostjo med 0 in 255 (8-bitni zapis, tj. 2^8) in nima merske enote. Zaradi sipanja svetlobe in disipacije energije pri potovanju skozi vodo ter odbojev na površinah, manjših od površine snopa svetlobnega signala (tj. odbije se le del svetlobnega žarka), je energija povratnega signala manjša od energije oddanega signala. Z analizo vrednosti jakosti intenzitete odbitega signala pri različnih stanjih vodnega telesa je treba določiti vrednost praga za filtriranje meritev. To je bilo opravljeno v postopku verifikacije merilne metode pri meritvah stoječe vode in v kontrolnih prerezih turbulentnega toka na sotočju z analizo niza posnetkov s hitro kamero. Postopek in rezultati so podrobno opisani v članku Rak et al., 2017a. Z izločanjem meritev z majhno jakostjo povratnega signala je bilo mogoče izločiti odboje od mehurčkov globlje v vodi in od manjših kapljic v zraku. Na ta način se je zmanjšal vpliv sicer uspešnih meritev (laserski skener je prejel povratni signal), ki pa ne predstavljajo odbojev od vodne gladine oziroma vrhnjega sloja mešanice vode in zraka.

Zaradi sipanja svetlobe na površini, ki jo laserski žarek zadene, se lahko pojavi več povratnih signalov. Uporabljeni laserski skener lahko za posamezni oddani signal prejme in zabeleži do tri povratne signale. Pri naših obdelavah je bil upoštevan le prvi signal. Drugi in tretji povratni signal praviloma izvirata iz odboja od več ploskev in je zanju iz vrednotena večja potovalna razdalja, kar bi se posledično v meritvah gladine odražalo kot nižja gladina oziroma izmerjena manjša globina vode.

2.5 Scenariji tokovnih razmer na sotočju

Zaradi različnih globlin, hitrosti idr. na dotočnih kanalih je mogoče nastaviti niz kombinacij kot nabor scenarijev raziskav. Izbiro parametrov narekujejo geometrijske lastnosti modela in hidravlične lastnosti preizkuševališča in laboratorijskega sistema. Z meritvami topografij na sotočju je bilo mogoče v nadaljevanju določiti

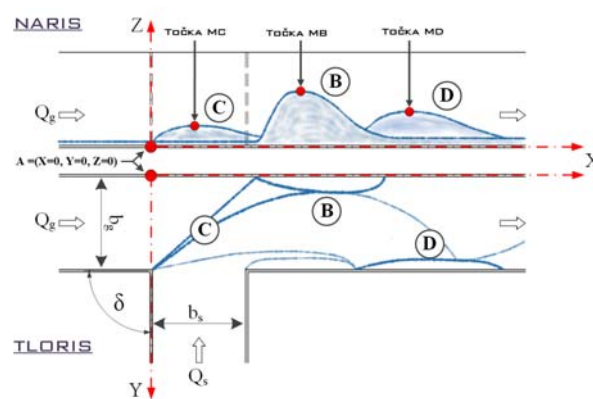
fenomenološke zveze med vhodnimi parametri in lastnostmi stoječega valovanja. Pri fiksni širini dotočnih kanalov so se kot geometrijski parameter na posamezni tlačni posodi spreminjale višine odprtja in s tem količina dotokov. Pri izbrani globini posameznega dotoka so se s pomočjo izmerjenega pretoka lahko določale še lastnosti toka med vtokom in sotočjem (hitrost in Froudovo število). Scenarije lahko razdelimo v tri sklope. V prvem so se lastnosti toka spreminjale pri enakih globinah obeh dotokov. Za zagotavljanje dovolj visokih Froudovih števil so bile pri tem izbrane globine dotokov med 10 in 30 mm. V drugem sklopu se je poleg tokovnih razmer obeh dotokov spreminjala globina stranskega dotoka v razmerju z višino toka v glavnem kanalu. Po analogiji z drugim sklopom se je v tretjem sklopu spreminjala globina toka po glavnem kanalu. Pri enakih lastnostih toka obeh dotokov (hitrost, Froudovo število) in njihovih različnih globinah je bilo mogoče analizirati vpliv razmerja gibalne količine dotokov na strukturo vodnega toka na sotočju. Vrednosti Froudovih števil obeh dotokov so se v vseh treh sklopih scenarijev gibale med 2 in 12. Skupno je bila izmerjena in analizirana topografija 168 scenarijev, tj. 168 kombinacij razmer v dveh dotokih na sotočju.

2.6 Razvoj enačb za opis razmer na sotočju

Za razvoj fenomenoloških zvez med vhodnimi, geometrijskimi in hidravličnimi parametri tokov ter maksimalnimi višinami stojećih valov in njihovimi fluktuacijami so bile za vsak scenarij iz vrednotene lastnosti vrhov stoječega valovanja (povprečna višina vrha vala in nihanje gladine okoli srednje vrednosti). Obravnavani so bili trije glavni stoječi valovi, in sicer: val C (krovni val na začetku sotočja), val B (val ob steni, nasprotni od smeri dotoka po stranskem kanalu) in val D (val na strani stranskega dotoka (kanala), nastal zaradi odboja vala B) (slika 5).

Z dimenzijsko analizo najvplivnejših geometrijskih in hidravličnih parametrov je bila poiskana zveza med vhodnimi parametri (zapisanimi v brezdimenzijski obliki) in izmerjenimi vrednostmi. Za iskanje fenomenoloških modelov, ki bi kazali najboljše ujemanje med merjenimi in izračunanimi

vrednostmi, so bili preverjeni različni regresijski modeli. Kot najprimernejši se je izkazal potenčni tip. Z upoštevanjem vrednosti vhodnih parametrov in izmerjenih vrednosti stoječega valovanja za posamezne scenarije je bil sestavljen sistem nelinearnih enačb. Nelinearne enačbe so bile z logaritmiranjem pretvorjene v linearne enačbe. Število obravnavanih scenarijev je bistveno presehalo število vplivnih parametrov, zato je bil sistem enačb predoločen. Reševanje predoločenega sistema enačb in določitev koeficientov ter eksponentov potenčnega zakona je potekalo z uporabo metode najmanjših kvadratov.



Slika 5: Analizirana območja stojećih valov na sotočju.

Figure 5: The analyzed standing waves at the confluence.

3. Rezultati in diskusija

Analiza uspešnih meritev z laserskim skenerjem pokaže, da je bilo z razvojem ustrezne metode in (lastnih) orodij mogoče določiti tako srednji potek vodne gladine kakor tudi nihanje oziroma fluktuacije vodne gladine.

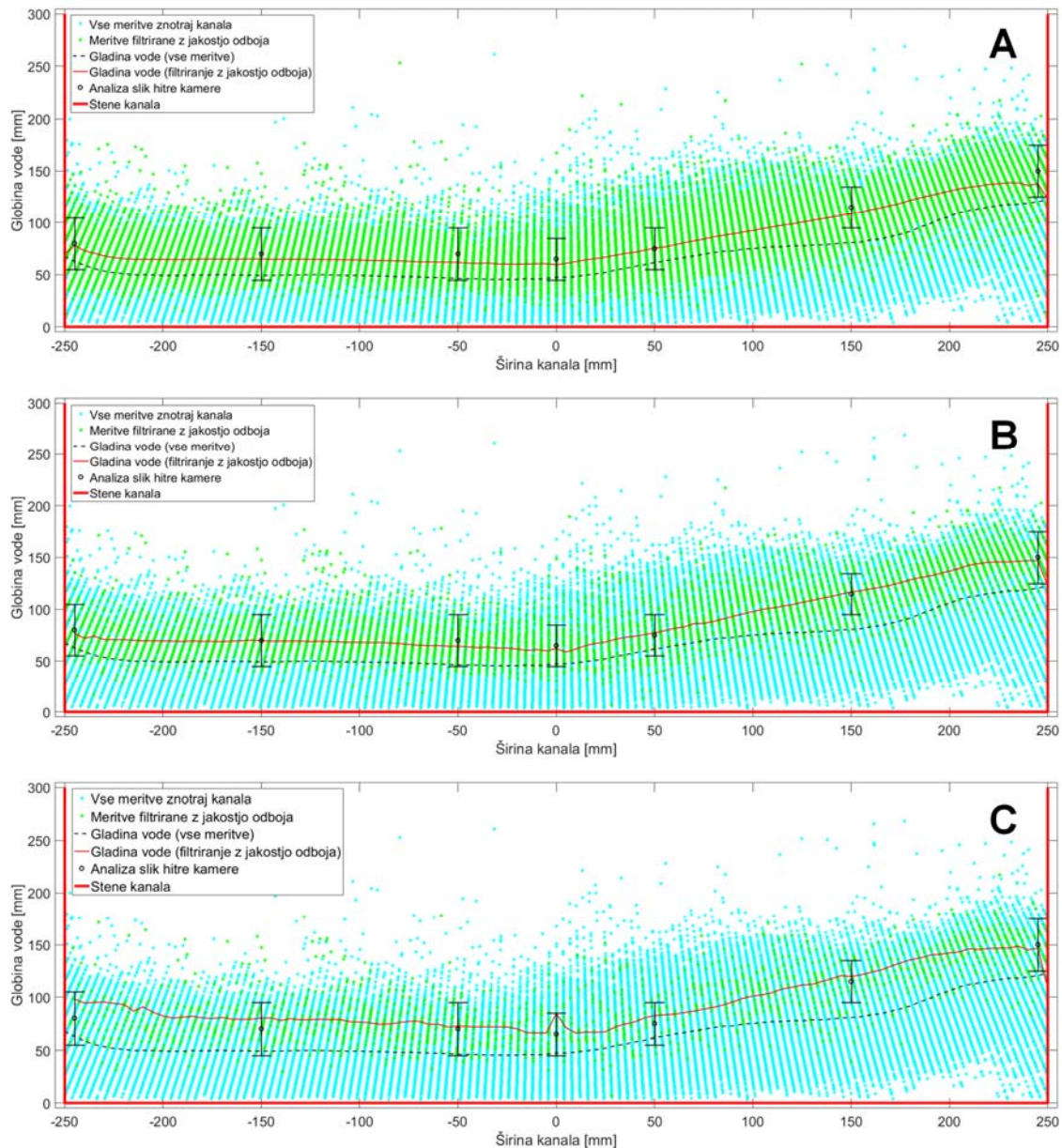
3.1 Oblak točk odbojev v območju nihanja gladine

Slika 6 prikazuje surov (turkizno obarvane točke) in filtrirani (zeleno obarvane točke) oblak točk, izmerjenih z laserskim skeniranjem, če jih filtriramo glede na tri izbrane vrednosti praga intenzitete povratnih signalov, in sicer: A – vrednost praga = 5, B – vrednost praga = 10 in C – vrednost praga = 20. Črna črtkana črta prikazuje srednji potek vodne gladine ob upoštevanju

celotnega oblaka točk znotraj kanala, rdeča črta pa srednji potek vodne gladine ob upoštevanju le filtriranega oblaka točk znotraj kanala.

S črnimi točkami z repki so prikazane lokalne srednje vrednosti nivoja gladine in njeno nihanje, določeno za nekaj točk, kjer je bila vzporedno opravljena tudi verifikacijska analiza sekvence slik hitre kamere. Pri analizi slik je bilo mogoče za

posamezno sliko vizualno kontrolirati vrednost, ki jo izvednoti programska koda (Rak et al., 2017a). Na ta način je bilo mogoče z večjo verodostojnostjo oceniti fluktuacije vodne gladine in rezultate primerjati z rezultati analize meritev z laserskim skenerjem.



Slika 6: Primerjava poteka gladine, določenega z analizo slik hitre kamere in z obdelavo oblaka točk laserskega skeniranja pri različnih vrednostih praga intenzitete povratnega signala.

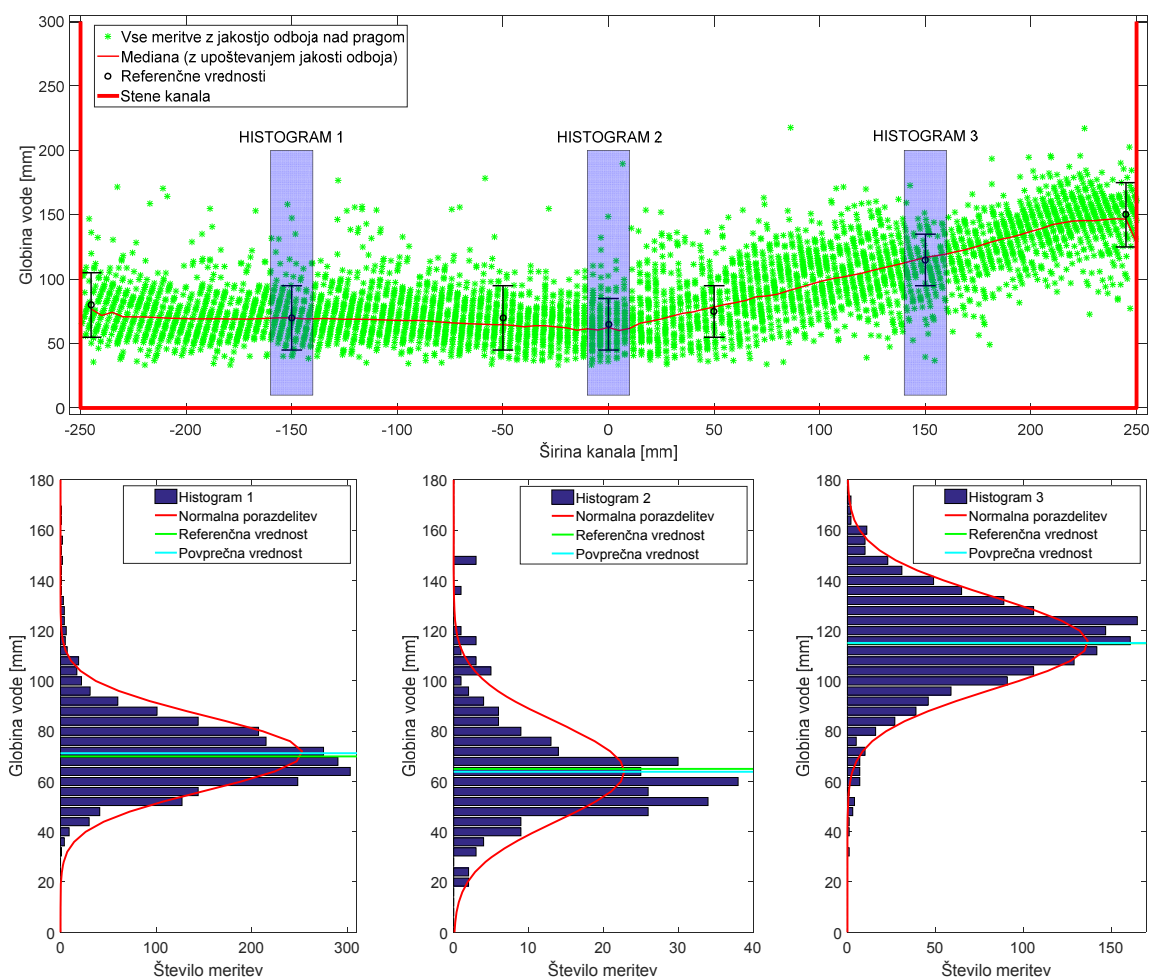
Figure 6: A comparison of free-water-surface profile determined through analysis of the image sequence recorded with a high-speed camera and with point cloud post-processing of laser scanning for different values of remission threshold.

Primerjava obeh metod pokaže, da je pri manjši vrednosti praga v filtriranem oblaku točk še vedno veliko odbojev od globlje potopljenih mehurčkov in kapljic škropljenja nad vodnim tokom, saj se točke z vrednostjo intenzitete odboja nahajajo tudi zunaj območja nihanja vodne gladine, ki je bilo zajeto z obdelavo slik hitre kamere. Ker so odboji laserskega žarka tako od kapljic nad gladino kot tudi od mehurčkov pod vodo, se povprečni potek gladine še vedno zelo dobro ujema z meritvami s hitro kamero.

Ob upoštevanju visoke vrednosti praga filtrirani oblak točk vsebuje vse manj točk, saj so odboji, ki ohranijo veliko energije, le redki (slika 6, C). Velika disipacija energije je posledica lastnosti interakcije laserskega žarka z vodo oziroma mešanice zraka in vode. Nad višjimi vrednostmi

praga (npr. 40) je bilo teh točk že premalo, da bi z njimi še lahko določili potek gladine.

Analiza intenzitete povratnih signalov, sprejetih v laserski skener, pokaže, da je treba analizirati, katera je primerna vrednost praga jakosti odboja, ki omogoča določitev tako srednjega poteka vodne gladine kot tudi nihanja oziroma fluktuacij vodne gladine. V postopku verifikacije razvite metode je bila kot najprimernejša vrednost določena vrednost praga 10. Iz slike 6, B lahko ugotovimo, da se srednji potek gladine zelo dobro ujema s srednjim potekom vodne gladine, določenim z analizo slik hitre kamere. Prav tako pa tudi pas filtriranih točk skoraj v celoti sovpada z ovojnico nihanja gladine iz analize slik hitre kamere.



Slika 7: Histogrami meritev vodne gladine v treh točkah, kjer so bile upoštevane točke za pas širine 20 mm, prečno na kanal (upoštevanih je bilo 3000 skenov gladine).

Figure 7: Histograms of measurements of water surface in three points, where the points from the slot with a width of 20 mm, transversal to the channel (3000 scans taken into account) were taken into account.

Na sliki 7 je prikazana analiza gostote lasersko izmerjenih točk v vertikalnih prerezih, kjer so bile opravljene tudi meritve s hitro kamero. Za preglednejši prikaz so podane le razmere v treh točkah, kjer so bile upoštevane točke za pas širine 20 mm in za oblak filtriranih točk. Referenčne vrednosti so bile določene z analizo slik hitre kamere.

Histogrami izvrednotenih vrednosti globin kažejo, da razporeditev izmerjenih vrednosti ustreza normalni porazdelitvi okoli določene srednje vrednosti gladine. Pri srednjem pasu meritev, neposredno pod laserskih skenerjem, se pojavlja nekoliko večje število izmer v ozkem pasu vrhnje plasti, pri levem in desnem pasu pa so izmere enakomerno razporejene okoli srednje vrednosti, kar lahko pripišemo turbulentni naravi pojava oziroma nihanju vodne gladine. Pri bolj oddaljenih točkah, tj. pri večjem vpadnem kotu meritev, je bilo namreč prodiranje svetlobnih signalov v vodo manjše kot neposredno pod merilnikom. V vseh treh pasovih je opaziti majhno število meritev z večjim odstopanjem (angl. outliers). Ker je bilo filtriranje oblaka točk izvedeno s fiksno vrednostjo praga jakosti odboja, namreč ni bilo mogoče povsem izločiti odbojev na potopljenih mehurčkih ali na večjih vodnih kapljicah, ki so se pojavljale nad oblikovano gladino ob škropljenju zaradi močno razpenjenega toka.

3.2 Ovojnice nihanja vodne gladine

Meritve so bile izvedene po posameznih prerezih vzdolž sotočja, zato zvezne, istočasne dinamike nihanja vodne gladine vzdolž sotočja ni bilo mogoče niti prikazati niti analizirati. Spektralna analiza fluktuacij bi bila sicer mogoča, vendar bi bile, zaradi neenotne oblike meritev, kar je posledica naključnosti manjkajočih zabeleženih odbojev, potrebne prevelike predpostavke in razmeroma obsežne nadaljnje analize. Vendar pa je bilo mogoče določiti fluktuacije vodne gladine na podlagi filtracije oblaka točk laserskega skeniranja in določiti ovojnico nihanja gladine. Na podlagi izmerjenih (spremenljivih) dotokov po obeh kanalih je bilo mogoče analizirati tudi, v kakšnem razponu se pojavi nihanje vodne gladine na

kritičnih (koničnih) lokacijah, da bi lahko zanje prilagodili ustrezne rešitve v praksi.

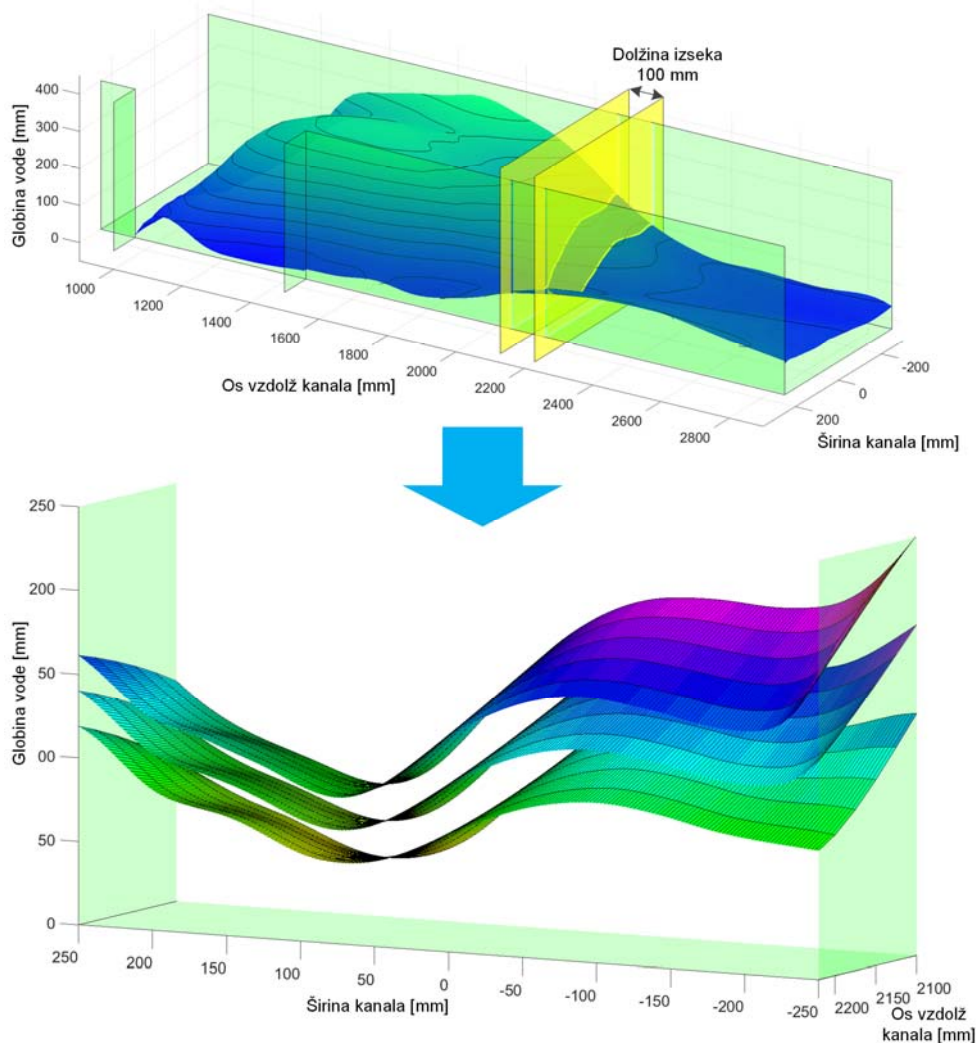
Prostorsko porazdelitev srednjega poteka gladine na sotočju in ovojnico nihanja vodne gladine lahko prikažemo s 3D mrežnimi modeli (slika 8).

Zgoraj je prikazana topografija vodne gladine stoječega valovanja vzdolž celotnega sotočja. Z rumenima ploskvama je označen 100 mm dolgi izsek, za katerega pa so spodaj prikazane ploskve za srednji potek gladine in obe izmerjeni ovojnicji njenega nihanja.

3.3 Enačbe za določitev vrhov stoječega valovanja in fluktuacij okoli srednje vrednosti

Zgornje fotografije in slike so že pokazale, da se na sotočju dotokov v deročem režimu pojavljajo strukture vodnega toka z zelo različnimi lastnostmi. Z analizo dejanskega stanja pri vseh scenarijih je bilo ugotovljeno, da je mogoče pojave vodnega toka na območju analiziranega sotočja razvrstiti v štiri glavne skupine: A – zajezitev na glavnem kanalu, na stranskem pa se pojavi ali zajezitev ali vodni skok pred sotočjem; B – vodni skok na glavnem kanalu pred sotočjem, na stranskem se pojavi ali vodni skok pred sotočjem ali zajezitev; C – sodček ali grbasti krovni val prek sotočja, pri čemer oba tokova ohranjata deroči režim; D – dušenje toka po glavnem kanalu, a se v njem ohranja deroči režim toka, v stranskem se pojavi zajezitev ali vodni skok pred sotočjem.

Zaradi raznolikosti teh skupin pojavov ni mogoče enoznačno zapisati integralnih povezav med vhodnimi parametri in glavnimi značilnostmi stoječega valovanja in je treba skupine obravnavati posamično. V nadaljevanju prikazujemo rezultate za skupino C, ki je najzanimivejša tako s stališča zahtevnosti hidravličnih raziskav kot tudi za reševanje problemov iz prakse. Stoječe valovanje pri teh procesih namreč lahko dosega višino, ki je tudi več kot desetkrat večja od globine dotekajočih tokov, pri tem pa se razvije izrazit dvofazni tok, ki se ohranja v deročem režimu vzdolž sotočja in na odseku dolvodno. Višine vrhov glavnih stoječih valov (slika 5) in fluktuacije vodne gladine na območju vrhov so odvisne od vhodnih parametrov.



Slika 8: Izsek stoječega vala v dolžini 100 mm (zgoraj) z vrisano povprečno gladino in ovojnica gladin z upoštevanjem izmerjenih fluktuacij (spodaj).

Figure 8: Section of a standing wave in a length of 100 mm (above) with a plot of the average free water surface and water surface envelopes by taking into account the measured fluctuations (below).

Analiza opravljenih meritev je omogočila zapis značilnosti vrhov valovanja v obliki fenomenoloških modelov, kar je novost v svetovnem merilu. Tu so podane le vertikalne značilnosti, tj. višina in fluktuacija teh konic, njihova veljavnost pa je (glede na obseg opravljenih meritev) omejena na primere, kjer je $Fr_g > 6$; $Fr_s > 3$; $b = b_g = b_s$; $\delta = 90^\circ$; razmerje gibalne količine toka po glavnem kanalu in skupne gibalne količine obeh dotokov pa je med 0,6 in 0,8. Nove enačbe so naslednje:

$$Z_{MC} = \frac{h_{MC}}{\bar{h}} = Fr_g * Fr_s^{1.4} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.6)} \quad (1)$$

- Fluktuacije vodne gladine na mestu maksimalne višine vala C

$$H'_{MC} = \frac{h'_{MC}}{\bar{h}} = 0.11 * Fr_g^{1.1} * Fr_s^{0.2} \quad (2)$$

- Dejansko stanje višine vode na mestu vrha vala C

- Povprečna višina vrha vala C

$$Z_{MC,dej} = Z_{MC} \pm H'_{MC} \quad (3)$$

- Povprečna višina vrha vala B

$$Z_{MB} = \frac{h_{MB}}{\bar{h}} = 1.1 * Fr_g^{0.9} * Fr_s^{1.5} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.6)} - 1 \quad (4)$$

- Fluktuacije vodne gladine na mestu maksimalne višine vala B

$$H'_{MB} = \frac{h'_{MB}}{\bar{h}} = 0.16 * Fr_g^{0.6} * Fr_s^{0.75} \quad (5)$$

- Dejansko stanje višine vode na mestu vrha vala B

$$Z_{MC,act} = Z_{MB} \pm H'_{MB} \quad (6)$$

- Povprečna višina vrha vala D

$$Z_{MD} = \frac{h_{MD}}{\bar{h}} = 2.3 * Fr_g^{0.7} * Fr_s^{0.8} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.55)} \quad (7)$$

- Fluktuacije vodne gladine na mestu maksimalne višine vala D

$$H'_{MD} = \frac{h'_{MD}}{\bar{h}} = 0.1 * Fr_g^{\frac{2}{3}} * Fr_s^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

- Dejansko stanje višine vode na mestu vrha vala D

$$Z_{MD,act} = Z_{MD} \pm H'_{MD} \quad (9)$$

4. Zaključek

Turbulentni dvofazni tokovi v praksi nastopajo razmeroma pogosto in na različnih področjih. Kljub pomembnosti takšnih hidravličnih pojavov so se v preteklosti meritve gladine izvajale razmeroma redko, saj so s klasičnimi merilnimi metodami težko izvedljive. V članku opisujemo

meritve gladin takšnih pojavov z uporabo laserskega skeniranja kot brezkontaktna merilna metode, ki omogoča meritve z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo. Metoda in potrebna orodja so bila razvita za zajem topografije vodne gladine na sotočju dveh dotokov z deročim režimom toka. Razvoj analize obdelave surovega oblaka točk, izmerjenih z laserskim skeniranjem, je dokazal, da je ta merilna metoda uporabna tako za meritve srednjega poteka vodne gladine izrazito turbulentnih dvofaznih tokov kot tudi fluktuacij razpenjenega toka. Podatek o fluktuacijah vodne gladine okoli srednje vrednosti prinaša za prakso veliko več sporočilnosti kot zgolj srednja vrednost.

Možnost uporabe laserskega skeniranja na novem področju je bila dokazana pri sistematičnih meritvah prostorske porazdelitve gladine na območju sotočja za 168 kombinacij parametrov dotokov. Z obdelavo izmerjenih oblakov točk so bile za vrhove stoječih valov pri vseh scenarijih določene srednje vrednosti višin in fluktuacije vodne gladine. Ti eksperimentalni rezultati so bili nadalje uporabljeni za razvoj fenomenoloških zvez med vhodnimi, geometrijskimi in hidravličnimi parametri dotokov ter značilnostmi (vrhov) stoječega valovanja in fluktuacij, ki se pojavljajo na sotočju pri deročem toku.

Simboli, oznake, osnovne in izpeljane veličine

Oznake glavnih stoječih valov:

- $C \rightarrow$ krovni val na območju sotočja
- $B \rightarrow$ val ob steni na nasprotni strani od dotoka po stranskem kanalu
- $D \rightarrow$ val na strani stranskega dotoka (kanala) (odboj vala B)

Indeksi:

- $g \rightarrow$ glavni kanal
- $s \rightarrow$ stranski kanal
- $M \rightarrow$ maksimalna vrednost (konica vala)

Osnovne veličine:

- $b = b_g = b_s = \rightarrow$ v našem primeru sta enaki širini obeh kanalov [m]

- $\bar{b} = (b_g * b_s)^{0,5} \rightarrow$ razmerje širin obeh kanalov [m]
- $h_g \rightarrow$ višina/globina dotekajočega toka v glavnem kanalu [m]
- $h_s \rightarrow$ višina/globina dotekajočega toka v stranskem kanalu [m]
- $v_g \rightarrow$ hitrost dotekajočega toka v glavnem kanalu [m/s]
- $v_s \rightarrow$ hitrost dotekajočega toka v stranskem kanalu [m/s]
- $Z \rightarrow$ vertikalna os (višina nad dnom kanala) [m]
- $h' \rightarrow$ višina fluktuacij [m]
- $H' \rightarrow$ brezdimenzijski zapis višine fluktuacije vodne gladine [-]

Izpeljane veličine:

- $\bar{h} = (h_g * h_s)^{0,5} \rightarrow$ karakteristična globina/višina na sotočju, izračunana iz lastnosti dotekajočih tokov [m]
- $Fr_g = \frac{v_g}{\sqrt{(g * h_g)}} \rightarrow$ Froudovo število dotekajočega toka v glavnem kanalu
- $Fr_s = \frac{v_s}{\sqrt{(g * h_s)}} \rightarrow$ Froudovo število dotekajočega toka v stranskem kanalu
- $f = \frac{Fr_g * Fr_s}{(Fr_g + Fr_s)} \rightarrow$ razmerje Froudovih števil dotekajočih tokov

Viri

Behlke, C. E., Pritchett, H. D. (1966). The design of supercritical channel junction. *Highway Research Record* **133**, 17–35.

Best, J., Reid, I. (1984). Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**, 1588–1594.

Biron, P. M., Ramamurthy, A. S., Han, S. (2004). Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *Journal of Hydraulic Engineering* **130**(3), 243–253.

Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S. (2000). Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resources Research* **36**(9): 2731–2746.

Chachereau, Y., Chanson, H. (2011). Free-surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps. *Experimental Thermal and Fluid Science* **35**, 896–909.

Chanson, H. (1997). Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows. London, Academic Press: 401 str.

Chanson, H. (2013). Hydraulics of Aerated Flows: Qui Pro Quo? *Journal of Hydraulic Research*, **51**(3), 223–243.

Chanson, H., Chachereau, Y. (2013). Scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jump with small inflow Froude number. *Experimental Thermal and Fluid Science* **45**(1), 234–242.

Ghostine, R., Mose, R., Vazquez, J., Ghenaïm, A., Gregoire, C. (2010). Two-dimensional simulation of subcritical flow at a combining junction: luxury or necessity? *Journal of Hydraulic Engineering* **136**(10), 799–805.

Hager, W. H. (1989a). Supercritical flow in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering* **115**(5), 595–616.

Hager, W. H. (1989b). Transitional flow in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering* **115**, 243–259.

Kesserwani, G., Ghostine, R., Vazquez, J., Ghenaïm, A., Mose, M. (2007). One-dimensional simulation of supercritical flow at a confluence by means of a nonlinear junction model applied with RKDG2 method. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* **57**, 1695–1708.

Murzyn, F., Chanson, H. (2007). Free surface, bubbly flow and turbulence measurements in hydraulic jumps. Report No. CH63/07. Brisbane, The University of Queensland, Division of Civil Engineering: 116 str.

Murzyn, F., Chanson, H. (2008). Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. *Experiments in Fluids* **45**(3), 513–521.

Murzyn, F., Chanson, H. (2009). Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental observations. *Experimental Thermal and Fluid Science* **33**, 1055–1064.

Pfister, M., Chanson, H. (2014). Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modelling. *Journal of Hydrodynamics* **26**(2), 291–298.

Rak, G., Hočevár, M., Steinman, F. (2017a). Measuring water surface topography using laser scanning. *Flow measurements and instrumentation* **56**. 35–44.

Rak, G., Hočevár, M., Steinman, F. (2017b). Construction of water surface topography using LIDAR data. *Journal of Mechanical Engineering* IN PRESS.

Schwalt, M., Hager, W. H. (1995). Experiments to supercritical junction flow. *Experiments in Fluids* **18**, 429–437.

Taylor, E. H. (1944). Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *Transactions of ASCE* **109**, 893–912.

Wang, H., Chanson, H. (2015). Experimental Study of Turbulent Fluctuations in Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering* **141**(7), doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001010.

Weber, L. J., Schumate, E. D., Mawer, N. (2001). Experiments on flow at a 90° open channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering* **127**, 340–350.