

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA HIDRAULIČKOG SKOKA IZA PRELJEVA ŠIROKOG PRAGA

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HYDRAULIC JUMP CHARACTERISTICS BEHIND THE WIDE THRESHOLD SPILLWAY

Elvis Žic*, Gabriel Golja*

Sažetak

U radu je provedeno eksperimentalno određivanje pojave hidrauličkog skoka iza preljeva širokog praga unutar kojeg je dana hidraulička analiza ovisnosti promjene otvorenosti gornje i donje zapornice s vrijednostima spregnutih dubina, duljine vodnog skoka, Froudeovog broja, razine donje vode i ostalih fizikalnih veličina koje nastaju uslijed same pojave. Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja korišten je fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba. Ispitivanja su provedena za tri različite varijante ulaznih parametara pri različitom stupnju otvorenosti zapornica.

Ključne riječi: hidraulički skok, preljev širokog praga, spregnute dubine, duljina hidrauličkog skoka, Froudeov broj, brzina toka, eksperimentalno ispitivanje

Abstract

The paper presents an experimental determination of the occurrence of a hydraulic jump behind the spillway of a wide threshold, within which a hydraulic analysis of the dependence of the change in the opening of the upper and lower sluice gates with the values of conjugate depths, the length of the hydraulic jump, the Froude number, the level of the lower water and other physical quantities that arise as a result of the phenomenon itself is given. For the purposes of experimental testing, a physical model of a small hydraulic channel was used. Tests were performed for three different variants of input parameters at different degrees of sluice gates opening.

Key words: hydraulic jump, a wide threshold spillway, conjugate depth, hydraulic jump length, Froude number, flow velocity, experimental test

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: {elvis.zic@uniri.hr; ggolja@student.uniri.hr}

1. Uvod

Svrha ovoga rada je određivanje fizikalnih veličina kod pojave vodnog skoka iza preljeva širokog praga te usporedba sa dosadašnjim provedenim eksperimentalnim ispitivanjima. Nameće se hipoteza u radu kod koje je potrebno ispitati povećanje duljine vodnog skoka uslijed porasta razine gornje vode te smanjenje brzine toka uslijed povećanja razine donje vode. Promatrajući tok može se uočiti nagla promjena oblika slobodne površine koja nastaje zbog povećanja dubine vodotoka i smanjenja brzine toka u njemu. Takva nagla promjena nastaje uvijek pri prijelazu iz silovitog u miran tok i naziva se hidraulički ili vodni skok [1]. Za pojavu hidrauličkog (vodnog) skoka karakteristična je velika disipacija energije. Potencijalna energija vodotoka pretvara se u kinetičku energiju koja se disipira na kratkom potezu vodnog skoka [2]. Disipacija energije u vodnom skoku utječe na značajno smanjenje brzina i povećanje dubina u nizvodnoj dionici vodotoka (kanala), a to je povoljno za stabilizaciju nizvodnog korita. Problem nastaje ukoliko dolazi do pojave odbačenog vodnog skoka kada je dubina u nizvodnoj dionici vodotoka H_2 manja od druge spregnute dubine vodnog skoka h_2 (Slika 1). Pomicanje vodnog skoka nizvodno uzrokuje pojavu velikih brzina na uzvodnom području prije vodnog skoka koje ugrožavaju stabilnost vodotoka. Stoga je nužno osigurati da se vodni skok pojavljuje u obliku normalnog vodnog skoka ($h_2=H_2$) ili u obliku potopljenog vodnog skoka ($h_2<H_2$). Ne mogu li se osigurati takvi uvjeti, potrebno je izvođenje objekata koji će osigurati potapanje vodnog skoka, odnosno stabilizaciju. Takvi objekti mogu biti izgrađeni u obliku bučnica ili slapišta, udubljenja u slapištu, udarnog praga ili zida te udubljenja u slapištu s udarnim zidom na kraju udubljenja [3].

2. Dosadašnja eksperimentalna ispitivanja

U radu Hassanpour i sur. [4] provedeno je ispitivanje hidrauličkog skoka u pravokutnom poprečnom profilu kanala s hrapavim dnom, gdje su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja kako bi se ispitaio utjecaj geometrijskih i hidrauličkih parametara na disipaciju energije unutar hidrauličkog skoka s promjenom visine elemenata hrapavosti pri različitim protocima. Pokusi su provedeni u vodoravnom pravokutnom kanalu (bazenu) s postupnim povećanjem širine 0,5 m i duljine 10 m. Protok je mjeran ultrazvučnim mjerачem protoka modelom *Transit Time Clamp-on*. Uvjeti dotoka kontrolirani su vertikalnom zapornicom polukružnog zaobljenog oblika ($\emptyset = 0,2$ m), kao i nizvodni protok. Kao elementi hrapavosti koristili su se romboidi s dvije visine $r = 0,014$ m i $0,028$ m postavljeni u istoj razini kao uzvodno korito. Fizikalne veličine koje su se promatrale su duljina hidrauličkog skoka, omjer spregnutih dubina i

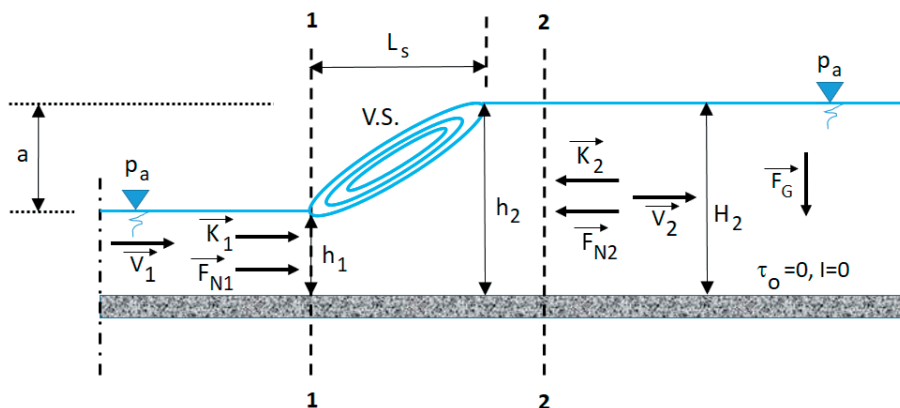
gubitak energije. Rezultati su pokazali da su elementi hrapavosti uzrokovali značajno smanjenje duljine hidrauličkog skoka te da pri visokim Froudeovim brojevima hidraulički skok na kanalu koji se postepeno širi postaje nestabilan. Omjer spregnutih dubina se povećavao povećanjem Froudeovog broja dotoka i omjera divergencije, a smanjivao kako se omjer elemenata hrapavosti povećavao. Relativni gubitak energije povećavao se prirastom visine elemenata hrapavosti za isti Froudeov broj, što je dokazano i u prijašnjim radovima [5], [6] i [7].

Slično eksperimentalno istraživanje hidrauličkog skoka proveli su Deshmukh i sur. [8], u kojem su promatrali na koji način hrapavost u obliku različitih elemenata/oblika utječe na spregnutu dubinu hidrauličkog skoka. Za potrebe ispitivanja koristio se žlijeb dimenzija širine 0,6 m i dužine 21 m pravokutnog oblika koji je postavljen u horizontalni položaj s mogućnosti promjene nagiba kanala. Za mjerenje izlaznog protoka mlaza korišten je elektromagnetski mjerac protoka. Za ohrapavljeno dno u eksperimentu poslužio je drobljeni kamen (5 različitih promjera). Ispitivanja su dokazala da uvođenjem hrapavog korita dolazi do smanjenja druge spregnute dubine, a uzrok smanjenja je posmična sila koja se razvija na razini korita zbog umjetno izvedenih neravnina na dnu žlijeba. Povećanje visine neravnina dna utjecalo je na smanjenje druge spregnute dubine. Dokazano je postojanje granične vrijednosti visine neravnina nakon koje daljnje povećanje visine nije više djelotvorno. Slične konstatacije dokazane su i u radovima [6], [9] i [10].

Kroz provedena ispitivanja Mirzaeia i Tootoonchia [11], Abdel-Mageeda [12], te Ferroa [13] razmatran je istovremeni utjecaj zasuna i pridnenih izbočina na hidraulički skok. Eksperimenti su provedeni u kanalu s tijelom od pleksiglasa duljine 5 m, širine i visine 17 cm pri varirajućim protocima od 10 do 37 l/minuti. Za mjerenje brzine toka korišten je trodimenzionalni mjerac brzine. Rezultati su pokazali da postavljanje izbočina doprinosi ubrzanju stvaranja ubranog hidrauličkog skoka kako bi se što prije dispirala značajna kinetička energija na dispoziciji hidrauličkog skoka ($Fr < 1$). Dokazano je da pomicanjem mjesta izbočine nizvodno od kanala za pozitivni nagib kanala mjesto formiranja hidrauličkog skoka ide nizvodno, a smanjenjem protoka i davanjem negativnog nagiba kanalu mjesto pojavljivanja hidrauličkog skoka pomiče se uzvodno od kanala.

3. Određivanje fizikalnih veličina kod pojave vodnog skoka iza preljeva širokog praga

Na Slici 1 prikazan je potpuni vodni skok u prizmatičnom koritu (sa stalnim padom i presjekom) i vanjske sile djelovanja koje će poslužiti pri određivanju značajnih fizikalnih veličina vodnog skoka. Za definiranje karakteristika potpunog vodnog skoka promatra se presjek ispred njega (presjek 1-1) koji označava početak skoka gdje postoji siloviti tok ($Fr > 1$) i presjek iza njega (2-2) koji označava kraj hidrauličkog skoka, gdje postoji vodotok s mirnim tečenjem ($Fr < 1$), [14].



Slika 1. Potpuni hidraulički skok u prizmatičnom koritu i vanjske sile djelovanja [14]

Dubina u presjeku 1-1 na početku hidrauličkog skoka naziva se prva spregnuta dubina h_1 , a dubina u presjeku 2-2 na kraju hidrauličkog skoka druga spregnuta dubina h_2 . Njihov odnos je važan pri definiranju tipova vodnog skoka. Teorem o promjeni količine gibanja govori da je projekcija prirasta količine gibanja sustava u jedinici vremena u određenom smjeru jednaka projekciji djelovanja vanjskih sila na isti smjer u sustavu. Iz te konstatacije slijedi jednadžba količine gibanja tekućine kroz vodotok u jedinici vremena u presjecima 1-1 i 2-2 (Slika 1):

$$\frac{d\vec{K}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho dV) \vec{v} + \int_A (\rho dQ) \vec{v} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i \quad (1)$$

Postavljanjem jednadžbe ravnoteže u skalarnom obliku vrijedi:

$$K_1 + F_{N1} = K_2 + F_{N2} \quad (2)$$

gdje su K_1 i K_2 količine gibanja mase vode u jedinici vremena kroz presjeke vodotoka, a F_{N1} i F_{N2} sile tlaka u promatranim presjecima. Promjenu količine gibanja uzrokuju vanjske sile tlaka F_{N1} i F_{N2} , težina F_G volumena

tekućine između dva presjeka i sile trenja F_T na vanjskoj površini. Sila teža F_G se može zanemariti zbog horizontalnog dna korita ($I = 0$), kao i sile trenja koje nemaju značajan utjecaj na maloj duljini vodnog skoka. Ukoliko se u presjecima uzme u obzir raspodjela tlaka po hidrostatičkom zakonu zbog toga što su početni i završni presjek uzeti pri lagano promjenljivom strujanju, dobivaju se izrazi za pojedine sile:

$$K_1 = \rho Q v_1 \quad K_2 = \rho Q v_2 \quad F_{N1} = \rho g h_{c1} A_1 \quad F_{N2} = \rho g h_{c2} A_2 \quad (3)$$

gdje Q označava protok, A_1 i A_2 protjecajne površine u presjecima, v_1 i v_2 srednje brzine toka u presjecima, h_{c1} i h_{c2} dubine na kojoj se nalaze težišta protjecajnih površina A_1 i A_2 , ρ gustoću mase vode i g ubrzanje polja sile teže. Uvrštavanjem jednadžbi (3) u izraz (2) dobije se jednadžba potpunog vodnog skoka:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 h_{c1} = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 h_{c2} \quad (4)$$

Uvođenjem oznake $\theta(h)$ u jednadžbu (4) dobije se funkcija vodnog skoka:

$$\frac{Q^2}{gA} + Ah_c = \theta(h) \quad (5)$$

Iz funkcije vodnog skoka slijedi da mora postojati njen minimum za određenu dubinu $0 < h < \infty$. Promotri li se funkcija skoka $\theta(h)$ u odnosu na specifičnu energiju E_{sp} , može se zaključiti da funkcije postižu svoj minimum za $h = h_{cr}$. Pri tome se može odrediti i iznos disipacije energije ΔE_{sp} kao razlika specifične energije za prvu spregnutu dubinu h_1 i specifične energije za drugu spregnutu dubinu h_2 . Visina vodnog skoka a dobiva se razlikom prve i druge spregnute dubine (Slika 1), tj. vrijedi $a = h_2 - h_1$. Promatrajući presjeke 1-1 i 2-2 na Slici 1, udaljenost ta dva presjeka daje duljinu vodnog skoka L_s koja je različita za različite tipove vodnog skoka. Najčešći izrazi za određivanje duljine potpunog vodnog skoka su izrazi po Smetani (1933.) kod kojeg vrijedi $L_s \approx 6(h_2 - h_1)$, izraz po Bradleyu i Peterki (1957.) kod kojeg je $L_s = 6,1 * h_2$, za $25 < Fr_1 < 200$, odnosno $L_s = h_2 * (1,1 + 2 * Fr_1 - 0,2 * Fr_1)$ za $2,25 < Fr_1 < 25$, te izraz po Silvesteru (1964.) kod kojeg vrijedi $L_s = 9,75 * h_1 (\sqrt{Fr_1} - 1)^{1,01}$. U gornjim izrazima Fr_1 predstavlja Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini.

Protok Q kroz poprečni presjek korita može teći različitim dubinama pri jednolikom strujanju. Za svaki protok postoji krivulja specifične energije H u odnosu na dubinu vode h . Iz krivulje specifične energije, ona se može izraziti kao specifična energija strujanja mjerena od dna korita. Ukupna specifična energija vodotoka određena je izrazom $H = h + \alpha \frac{v^2}{2g}$,

pri čemu se prvi dio jednadžbe odnosi na specifičnu potencijalnu energiju (h), a drugi član na specifičnu kinetičku energiju ($\alpha \frac{v^2}{2g}$). Veličina disipacije energije ΔH u normalnom vodnom skoku jednaka je razlici specifičnih energija H_s u spregnutim presjecima [2]. Uz uvjet da je Coriolisov broj $\alpha \approx 1$, slijedi izraz za određivanje disipacije energije ΔH na hidrauličkom skoku:

$$\Delta H = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - \frac{v_2^2}{2g} \quad (6)$$

dok jednadžba izražena u visinskom obliku glasi:

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \quad (7)$$

Froudeov broj Fr temelji se na omjeru brzine i duljine, a opisuje pojavu nastanka hidrauličkog skoka. Froudeov broj slijedi iz analitičkog kriterija za određivanje minimuma specifične energije, tj. vrijedi:

$$\frac{dH}{dh} = \frac{d}{dh} \left(h + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \right) = 0 \quad (8)$$

iz čega slijedi izraz:

$$1 - \alpha \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh} = 0 \quad \rightarrow \quad Fr = \alpha \frac{Q^2}{gA^3} B \quad (9)$$

gdje je A površina, a B širina za pravokutni poprečni presjek. Hidraulički skok nastaje kada je vrijednost Froudeovog broja približno jednaka jedinici ($Fr \approx 1$) jer se tada unutar vodnog skoka pojavljuje prijelaz između silovitog u miran tok.

4. Opis fizikalnog modela za eksperimentalno ispitivanje

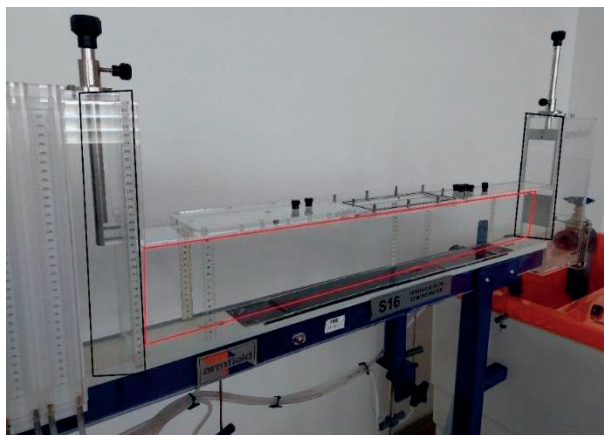
Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja u ovom se radu koristio fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba (Armfield S16 Hydraulic flow demonstrator), Slika 2a). Fizikalni model ima duljinu 1,13 m, širinu 0,73 m i visinu 1,0 m [15]. Sastoji se od dva dijela, od kojih prvi dio uključuje donji spremnik (250 l) koji se puni vodom i samousisnu centrifugalnu pumpu (snage 0,37 kW) ugrađenu u udubljenju unutar spremnika, te od drugog dijela koji čini sami fizikalni model. Unutar spremnika (Slika 2b) nalazi se umirujuća pregrada koja smanjuje turbulenciju vode i kuglica s utegom koja će u početku pokusa omogućiti volumetrijsko mjerenje protoka preko skale koja se nalazi na prednjoj strani spremnika. Korištenjem spremnika i dodatnog pribora može se postići maksimalni protok od 100 l/min. Unutar spremnika nalazi se i mali preljev koji osigurava maksimalni volumetrijski

kapacitet spremnika od 46 l. U gornjem spremniku fizikalnog modela nalazi se spužvica koja sprječava bučenje vode i osigurava miran tok na ulazu u radnu sekciju, te je postavljen i sigurnosni preljev koji sprječava prelijevanje vode [16].



Slika 2. a) Fizikalni model Armfield S16 Hydraulic flow demonstrator, b) otvoreni kanal: (1), pregrada (2), sigurnosni preljev (3), kuglica s utegom (4), spremnik za volumetrijsko određivanje protoka vode (5)

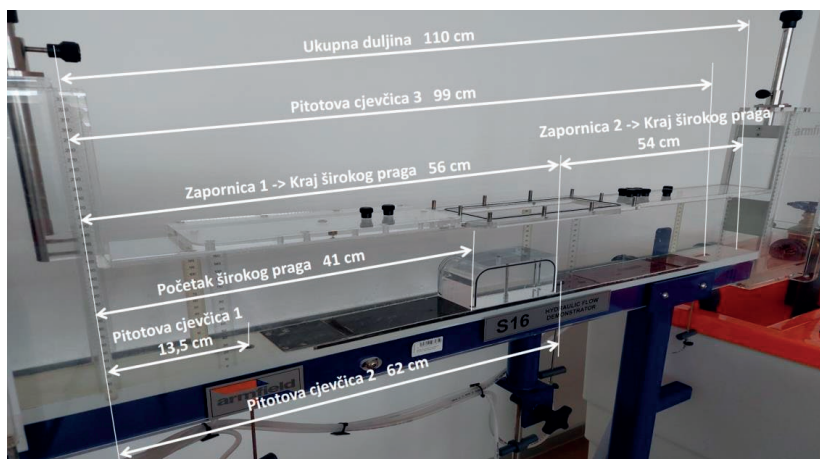
Unutar fizikalnog modela tri su važna elementa: ulazna pločasta zapornica, radna sekcija unutar koje se postavlja određeni hidrotehnički objekt (u ovom slučaju preljev sa širokim pragom) te još jedna izlazna pločasta zapornica koja može služiti kao zapornica ili kao preljev (Slika 3).



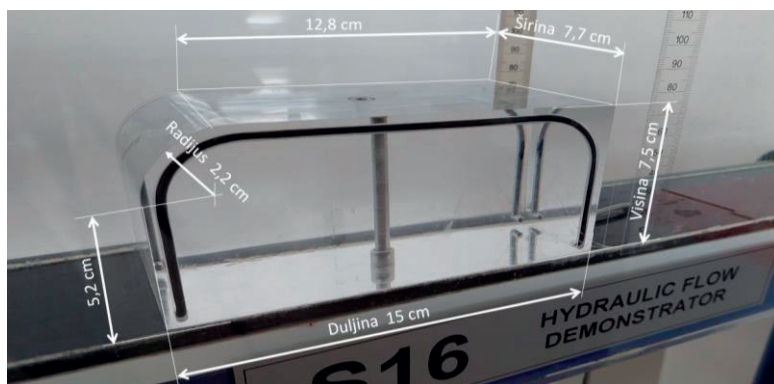
Slika 3. Pločaste zapornice (crni okviri) i radna sekcija (crveni okvir)

Karakteristični parametri preljeva su duljina preljeva b , širina krune s i visina brane ili praga sa strane gornje vode H_1 i donje vode H_2 . Preljev sa širokim pragom (krunom) je preljev koji nastaje kada je širina praga takva da se tok tekućine na samome pragu može ustaliti te se formira kao

karakteristično strujanje s paralelnim strujnicama. Za takve preljeve vrijedi odnos $2 < s/H < 10$, pri čemu je H preljevna visina ispred preljeva. Poželjno je da duljina širokog praga bude $s > (2\div 3)H$. Dubina na preljevu sa širokim pragom jednaka je $h = \frac{2}{3}H_0$, pri čemu je H_0 specifična preljevna visina. Koeficijent protoka na preljevu se često uzima kao $m = 0,385\varphi$, gdje je φ koeficijent brzine koji ovisi o otporu gibanja. Unutar radne sekcije hidrauličkog kanala (Slika 4) nalaze se tri Pitotove cjevčice koje se mogu postaviti na željenu visinu uz pomoć milimetarske skale. Pitotove cjevčice su preko fleksibilnog crijeva povezane sa piezometarskom harfom koja se sastoji od 6 piezometara s milimetarskim skalama, koje služe za mjerenje brzina (prije preljeva, nakon preljeva i na samom kraju radne sekcije). Dimenzije hidrauličkog kanala sa svim elementima i dimenzije preljeva širokog praga prikazane su na Slikama 4 i 5.



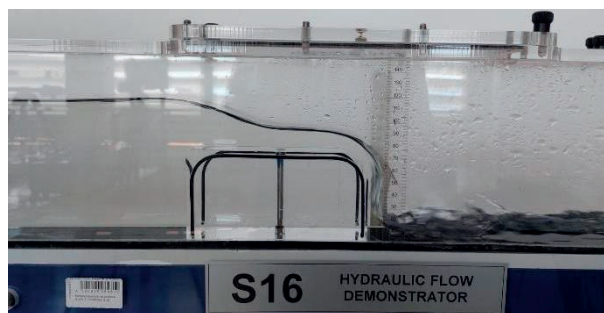
Slika 4. Dimenzije hidrauličkog kanala sa potrebnim dispozicijama Pitotovih cjevčica i zapornica na fizikalnom modelu



Slika 5. Dimenzije preljeva širokog praga korištenog u eksperimentima

5. Eksperimentalno ispitivanje i hidraulička analiza

Na samom početku cijeli fizikalni model se priključuje na napajanje vodom preko instalirane centrifugalne pumpe. Spremnik za cirkuliranje vode napuni se s otprilike 200 l vode. Prije samog mjerenja potrebno je pomoću kuglice s utegom koja se nalazi unutar spremnika volumetrijski odrediti protok u sustavu. Pomoću štoperice se mjeri period od $t=10$ sekundi, nakon kojeg se na volumetrijskoj skali koja se nalazi na prednjoj strani spremnika očitava volumen V . Protok koji struji kroz cjelokupni sustav fizikalnog modela dobiva se na temelju omjera volumena i vremena, $Q=V/t$ (m^3/s), (tzv. volumetrijsko mjerenje protoka ($Q=\frac{6,5\text{l}}{10\text{s}} = 0,65 \text{ l/s}$)). Nakon određivanja protoka se kroz pojedine simulacije kroz fizikalni model dobiva razina vode H koja zajedno sa širinom žlijeba b daje poprečnu površinu $A=H*b$ određenog dijela radne sekcije. Dijeljenjem protoka Q s poprečnom površinom A dobiva se brzina v . Da bi se dobila potrebna razina gornje vode, centrifugalna pumpa preko cijevi cirkulira vodu i dovodi je do gornjeg spremnika. Pomoću spužvice u gornjem spremniku osigurava se miran tok (disipacija kinetičke energije) na ulazu u radnu sekciju. Iza gornjeg spremnika kroz koji voda ulazi u model nalazi se ulazna pločasta zapornica ispod koje protječe voda i ulazi u mjerni dio radne sekcije pravokutnog poprečnog profila. Stupnjem otvorenosti zapornice formira se ulazna brzina i razina gornje vode. Unutar radne sekcije, na označenom mjestu ugrađuje se preljev sa širokim pragom. Na preljevu sa širokim pragom pojavljuje se kritični režim tečenja ($Fr=1$), a nakon njega tok prelazi u siloviti režim tečenja ($Fr>1$). Na nizvodnom pokosu praga formira se silovito tečenje koje se nastavlja i na dionici iza praga (Slika 6). Prijelaz iz silovitog u miran režim odvija se u obliku vodnog skoka. Podizanjem i spuštanjem izlazne pločaste zapornice reguliraju se druga spregnuta dubina i dubina donje vode čiji odnos određuje položaj vodnog skoka. Različitim stupnjem otvorenosti zapornice mogu se postići potopljeni, normalni ili odbačeni vodni skok.



Slika 6. Formiranje slobodne površine na preljevu širokog praga

Fizikalne veličine koje se mjere su prva i druga spregnuta dubina, razina donje vode, razina gornje vode, visina mlaza vode na kruni preljeva, poprečne površine na tri profila (početak, sredina, kraj), razina vode iza preljeva, duljina vodnog skoka, visina preljeva (zapornice) na kraju hidrauličkog žlijeba i brzina ispred širokog praga (neposredno iza, i na kraju dionice). Dubine, visine i razine vode očitavaju se na milimetarskim skalama koje su iscrtane na bočnim stjenkama modela ili se mjere ravnalom. Brzine toka se određuju pomoću tri Pitotove cjevčice koje su preko fleksibilnog crijeva povezane s piezometarskom harfom. Piezometarska harfa pokazuje razinu vode h u piezometru. Na temelju očitavanja razina vode h u piezometru dobiva se brzina toka v preko Torricelijevog izraza $v = \sqrt{2gh}$, gdje je g konstanta ubrzanja sile teže. Torricelijev izraz se može primijeniti samo kada se viskozni učinci mogu zanemariti. Iz dobivenih podataka provodi se određivanje Froudeovog broja Fr prema jednadžbi (9).

U nastavku rada provedene su tri varijante mjerenja i analiza fizikalnih veličina. Mjere se promjene prve i druge spregnute visine, duljina vodnog skoka, razine gornje i donje vode, visine mlaza vode na tri profila iznad preljeva širokog praga, razina vode neposredno iza preljeva širokog praga, te visine na piezometrima kod piezometarske harfe. U prvoj varijanti određene su navedene fizikalne veličine i parametri pri različitim visinama otvora gornje zapornice uz konstantnu visinu preljeva na kraju radne sekcije hidrauličkog žlijeba. Početni otvor gornje zapornice postavljen je na visinu od 10 mm, a visina preljeva na kraju hidrauličkog žlijeba na konstantnu visinu od 15 mm. Provodi se osam mjerenja te se za svako sljedeće mjerenje podiže visina gornje zapornice za 5 mm i pritom promatra pojava hidrauličkog skoka i njegove karakteristične veličine. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 1. U drugoj varijanti se uz konstantnu visinu otvora gornje zapornice na početku dionice regulira visina zapornice (prijašnji preljev – Varijanta 1) na kraju mjerne dionice. Otvor gornje zapornice postavljen je na visinu od 20 mm, a početna visina preljeva je postavljena na 11 mm. Provodi se sedam mjerenja te se za svako sljedeće mjerenje postavlja visina preljeva na vrijednosti 12, 13, 14, 15, 20, 25 mm i pritom promatraju promjene vrijednosti karakterističnih veličina uzduž hidrauličkog žlijeba i na formiranom vodnom skoku. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 2. U trećoj varijanti se, za razliku od varijante 1 i 2, uz konstantnu visinu otvora gornje zapornice na početku dionice regulirala razina otvora koji ima ulogu zapornice, a ne preljeva kao u prve dvije varijante. Otvor gornje zapornice postavljen je na visinu od 20 mm, a početna visina (otvor) zapornice na kraju hidrauličkog žlijeba postavljena je na 11 mm. Provodi se šest mjerenja te se za svako sljedeće mjerenje podiže visina (otvor) zapornice na kraju dionice. Vrijednosti

visine su redom 11, 12, 13, 14, 16 i 17 mm, a dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 3. Zbog malih vrijednosti razina vode u Pitotovim cjevčicama Froudeovi brojevi se ne razlikuju uveliko u vrijednostima (Tablica 4). Froudeovi brojevi na 2. profilu trebali bi biti najveći jer na tom mjestu dolazi do najmanje vrijednosti prve spregnute dubine.

Tablica 1: Mjerni podaci fizikalnih veličina - Varijanta 1

Redni broj	Gornji H_{otvor} zapornice [mm]	Razina gornje vode H_1 [mm]	Pitotova cjevčica 1 (PT1) [mm]	Brzina toka vode u PT1 [m/s]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 1, početak [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 2 [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 3, kraj [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
1.1	10,00	110,00	47,00	0,96	43,00	25,00	18,00	13,00	88,00
1.2	15,00	111,00	53,00	1,02	42,00	21,00	18,00	12,80	92,00
1.3	20,00	112,00	55,00	1,04	42,00	21,00	18,00	11,00	92,70
1.4	25,00	112,50	56,00	1,05	40,00	21,00	17,00	10,60	94,00
1.5	30,00	115,00	62,00	1,10	40,00	21,00	16,00	10,30	95,00
1.6	35,00	117,00	66,00	1,14	40,00	21,00	16,00	9,80	99,00
1.7	40,00	117,60	71,00	1,18	40,00	20,00	16,00	9,40	102,00
1.8	45,00	118,00	77,00	1,23	38,00	20,00	16,00	9,00	103,00

Redni broj	Brzina toka vode u PT2 [m/s]	Duljina vodnog skoka L [mm]	Prva spregnuta dubina h_1 [mm]	Druga spregnuta dubina h_2 [mm]	Pitotova cjevčica 3 (PT3) [mm]	Brzina toka vode u PT3 [m/s]	Razina donje vode H_2 [mm]	Visina preljeva na kraju hidrauličkog žlijeba [mm]
1.1	1,31	135,00	13,00	44,00	39,00	0,87	47,00	15,00
1.2	1,34	140,00	12,80	43,00	40,00	0,89	47,20	15,00
1.3	1,35	147,00	12,20	42,60	41,00	0,90	47,40	15,00
1.4	1,36	152,00	10,60	49,00	42,00	0,91	48,00	15,00
1.5	1,37	235,00	10,40	44,00	44,00	0,93	47,50	15,00
1.6	1,39	385,00	10,00	40,00	49,00	0,98	38,00	15,00
1.7	1,41	403,00	9,50	39,00	52,00	1,01	37,50	15,00
1.8	1,42	427,00	9,20	38,00	54,00	1,03	37,00	15,00

Tablica 2: Mjerni podaci fizikalnih veličina - Varijanta 2

Redni broj	Gornji H_{otvor} zapornice [mm]	Razina gornje vode H_1 [mm]	Pitotova cjevčica 1 (PT1) [mm]	Brzina toka vode u PT1 [m/s]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 1, početak [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 2 [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 3, kraj [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
2.1	20,00	115,80	37,70	0,860	42,00	20,00	18,00	10,00	119,30
2.2	20,00	115,55	37,30	0,855	42,00	20,00	18,00	9,70	107,20
2.3	20,00	115,00	36,00	0,840	42,00	22,00	17,00	9,40	101,30
2.4	20,00	114,30	35,70	0,837	42,00	21,00	18,00	9,50	94,90
2.5	20,00	114,00	35,10	0,830	42,00	20,00	18,00	9,80	94,50
2.6	20,00	113,80	34,30	0,820	42,00	19,00	16,00	23,00	94,00
2.7	20,00	113,30	31,80	0,790	42,00	22,00	18,00	36,00	93,00

Redni broj	Brzina toka vode u PT2 [m/s]	Duljina vodnog skoka L [mm]	Prva spregnuta dubina h_1 [mm]	Druga spregnuta dubina h_2 [mm]	Pitotova cjevčica 3 (PT3) [mm]	Brzina toka vode u PT3 [m/s]	Razina donje vode H_2 [mm]	Visina preljeva na kraju hidrauličkog žlijeba [mm]
2.1	1,530	456,00	13,00	36,00	43,80	0,927	35,00	11,00
2.2	1,450	443,00	11,00	38,00	38,20	0,866	37,00	12,00
2.3	1,410	267,00	10,50	42,00	38,00	0,863	41,00	13,00
2.4	1,365	175,00	9,70	47,00	37,80	0,861	46,00	14,00
2.5	1,362	142,00	10,10	47,00	37,00	0,852	48,00	15,00
2.6	1,358	potopljeni	-	-	35,00	0,829	52,00	20,00
2.7	1,351	potopljeni	-	-	34,00	0,817	58,00	25,00

Tablica 3: Mjerni podaci fizikalnih veličina - Varijanta 3

Redni broj	Gornji H_{otvor} zapornice [mm]	Razina gornje vode H_1 [mm]	Pitotova cjevčica 1 (PT1) [mm]	Brzina toka vode u PT1 [m/s]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 1, početak [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 2 [mm]	Visina mlaza vode na kruni preljeva, profil 3, kraj [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
3.1	20,00	118,40	34,50	0,823	42,00	21,00	18,00	66,00	94,00
3.2	20,00	118,00	33,40	0,810	41,00	19,00	17,00	58,00	91,00
3.3	20,00	116,20	32,20	0,795	42,00	21,00	18,00	43,00	88,00
3.4	20,00	115,00	31,50	0,786	42,00	20,00	17,00	40,00	75,00
3.5	20,00	113,50	31,00	0,780	42,00	22,00	15,00	11,00	66,00
3.6	20,00	113,00	30,00	0,767	42,00	20,00	16,00	10,60	65,00

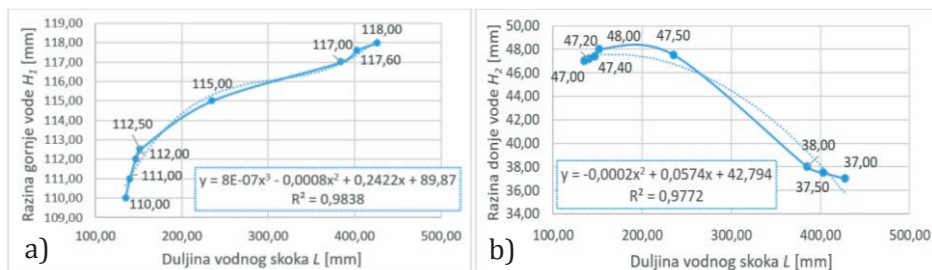
Redni broj	Brzina toka vode u PT2 [m/s]	Duljina vodnog skoka L [mm]	Prva spregnuta dubina h_1 [mm]	Druga spregnuta dubina h_2 [mm]	Pitotova cjevčica 3 (PT3) [mm]	Brzina toka vode u PT3 [m/s]	Razina donje vode H_2 [mm]	Otvor zapornice na kraju hidrauličkog žlijeba [mm]
3.1	1,358	potopljeni	-	-	55,00	1,039	81,00	11,00
3.2	1,336	potopljeni	-	-	54,00	1,029	75,00	12,00
3.3	1,314	potopljeni	-	-	50,00	0,990	65,00	13,00
3.4	1,213	potopljeni	-	-	48,00	0,970	61,00	14,00
3.5	1,138	195,00	11,30	44,00	38,00	0,863	43,00	16,00
3.6	1,129	347,00	11,00	39,00	36,00	0,840	38,00	17,00

Tablica 4. Izračun Froudeovih brojeva, Varijanta 1, 2 i 3

Froudeov broj na PT1			Froudeov broj na PT2			Froudeov broj na PT3		
Var.1	Var.2	Var.3	Var.1	Var.2	Var.3	Var.1	Var.2	Var.3
1,9988	1,9997	2,0013	1,9878	2,0002	1,9998	1,9783	1,9999	2,0008
2,0010	1,9978	2,0024	1,9895	1,9992	1,9994	2,0186	2,0012	1,9988
1,9905	1,9980	2,0008	1,9882	2,0006	2,0000	1,9959	1,9979	1,9982
2,0068	2,0003	1,9992	2,0057	2,0014	1,9998	2,0098	1,9991	1,9981
1,9894	2,0007	2,0006	2,0139	2,0010	2,0002	2,0037	1,9999	1,9979
2,0072	1,9983	1,9989	1,9894	1,9999	2,0010	1,9979	2,0016	1,9980
1,9991	2,0006	2,0013	1,9868	2,0005	1,9998	1,9997	2,0012	2,0008
2,0028	1,9997	2,0024	1,9955	2,0002	1,9994	2,0026	1,9999	1,9988

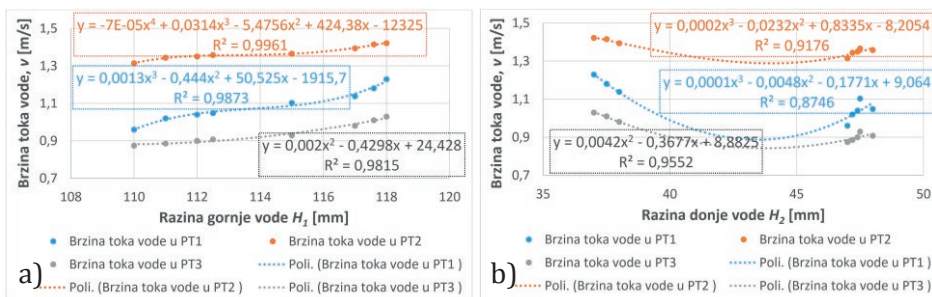
U nastavku su dane grafičke ovisnosti pojedinih izmjerenih fizikalnih veličine za sve tri varijante mjerenja. Na Slici 7 prikazana je grafička ovisnost promjene duljine vodnog skoka L_s o razini gornje H_1 i donje vode

H_2 za Varijantu 1. Na Slici 7a) može se vidjeti da duljina vodnog skoka raste s porastom razine gornje vode sve dok se ne postigne potopljeni vodni skok za kojeg se duljina vodnog skoka vrlo teško može odrediti, odnosno iznos duljine vodnog skoka je formalno „beskonačan“. Slika 7b) pokazuje kako se duljina vodnog skoka mijenja ovisno o razini donje vode. Povećanjem stupnja otvorenosti gornje zapornice razina donje vode će poprimiti veće vrijednost sve dok se ne postigne odbačeni vodni skok. Nakon toga dolazi do pada razine donje vode i rasta duljine vodnog skoka.



Slika 7. Grafički prikaz promjene duljine vodnog skoka u ovisnosti o a) promjeni razine gornje vode i b) promjeni razine donje vode (Varijanta 1)

Na Slici 8 prikazana je ovisnost razine gornje (lijevo) i donje vode (desno) o promjenama brzina toka vode na Pitotovim cjevčicama (PT1, PT2 i PT3), (Slika 4). Na slikama je vidljivo da s porastom razine gornje vode brzina na PT cijevima postepeno raste, dok s porastom razine donje vode najprije blago opada, a zatim blago raste.

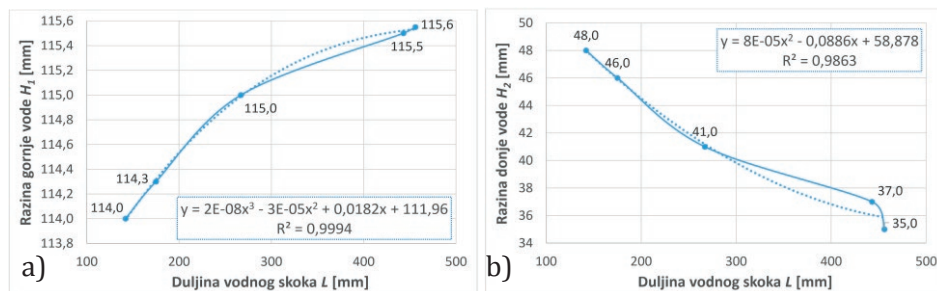


Slika 8. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode (a) i razine donje vode (b) o promjenama brzina toka vode na Pitotovim cjevčicama (Varijanta 1)

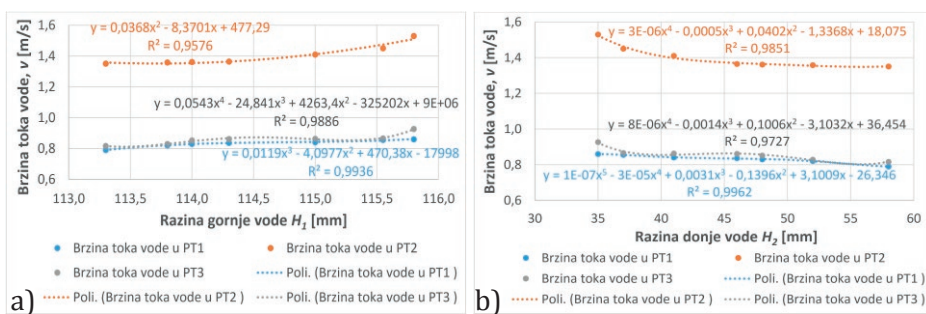
Kod Varijante 2 razmatrane su iste ovisnosti. U Varijanti 2 se u zadnjim mjerenjima pojavljuje potopljeni vodni skok, pa ti podaci nisu uzeti u obzir jer nisu mjerodavni kod određivanja duljine vodnog skoka. Na Slici 9 prikazano je da s porastom razine gornje vode raste duljina vodnog skoka (Slika 9a), dok sa opadanjem razine donje vode raste duljina vodnog skoka (Slika 9b). Na Slici 10 prikazana je ovisnost razine gornje (lijevo) i donje

vode (desno) o promjenama brzina na Pitotovim cjevčicama. Grafovi prikazuju da povećanje razine gornje vode utječe na postepeno povećanje brzine toka, dok povećanjem razine donje vode brzina toka lagano opada.

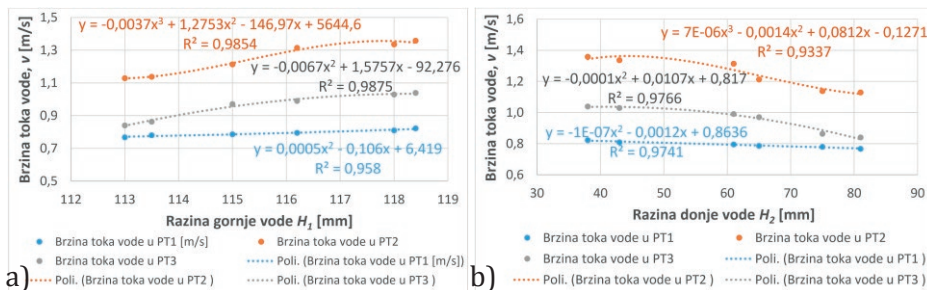
Za Varijantu 3 na Slici 11 prikazana je samo ovisnost razine gornje (lijevo) i donje vode (desno) o promjenama brzina na Pitotovim cjevčicama zato što nema dovoljno podataka o duljini vodnog skoka jer je u većini mjerenja bio postignut potopljeni vodni skok. Na grafovima je vidljivo da brzine rastu s povećanjem razine gornje vode (Slika 11a), a smanjuju se povećanjem razine donje vode (Slika 11b). Za sve tri varijante izračunava se vrijednost Froudeovog broja na mjestima Pitotovih cjevčica 1, 2 i 3 (Tablica 4). Vrijednosti Froudeovih brojeva na pojedinim poprečnim profilima neznatno variraju, a razlog tomu su male razlike u očitavanju vrijednosti razina vode u Pitotovim cijevčicama (izraženih u mm) na temelju kojih se određivala brzina toka na danom profilu.



Slika 9. Grafički prikaz promjene duljine vodnog skoka u ovisnosti o a) razini gornje vode i b) razini donje vode (Varijanta 2)



Slika 10. Prikaz ovisnosti razine gornje vode (a) i razine donje vode (b) o promjenama brzina toka vode na Pitotovim cjevčicama (Varijanta 2)



Slika 11. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode (a) i donje vode (b) o promjenama brzina toka vode na Pitotovim cjevčicama (Varijanta 3)

6. Zaključak

Kroz ovaj rad provedeno je eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva širokog praga, odnosno fizikalnih veličina koje se pojavljuju prilikom takvih pojava, te njihove međusobne ovisnosti. Iz tablica i grafičkih prikaza dokazano je da duljina vodnog skoka raste s porastom razine gornje vode, a smanjuje se porastom razine donje vode, čime je pretpostavljena hipoteza dokazana. Također je dokazano da brzine toka vode rastu s porastom razine gornje vode, a opadaju s porastom razine donje vode, a samim time su i Froudeovi brojevi najveći na mjestima gdje dolazi do najmanje dubine vodnog skoka (prva spregnuta dubina). Za buduća istraživanja u svrhu ovog rada mogu se izraditi različiti 3D modeli preljeva širokog praga te ih se može analizirati. U radu je korišten preliv široki prag sa zaobljenim ulazom, dok bi se za buduća hidraulička ispitivanja uz pomoć 3D printera mogli jednostavno izraditi preljevi sa skošenim ulaznim bridom (različitih dimenzija), s normalnim ulaznim bridom ili pak preliv s različitim zaobljenjem, te bi se mogao promatrati utjecaj takvih preljeva na pojavu vodnog skoka i pratećih fizikalnih veličina. Također se isti eksperiment može provesti za različite tipove preljeva kao što su oštrobriđni preliv, preliv praktičnog profila s pravolinijskim ili krivolinijskim obrisom, te usporediti tako dobivene rezultate. Kod budućih ispitivanja na prikazanom fizikalnom modelu poželjno je hidrodinamičke procese formiranja različitih oblika vodnog skoka snimati video kamerom te posljedično, preko određenog programa za grafičku vizualizaciju (npr. Photoshopom), jasnije odrediti vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina opetovanim ponavljanjem. Na taj način zasigurno bi se dobile još bolje ovisnosti pojedinih fizikalnih veličina koje su razmatrane u ovom radu. Veliki značaj radu bila bi dodatna izrada numeričkih modela kroz pojedine računalne programe (Ansys CFX, Ansys Fluent, OpenFoam i sl.) na temelju kojih bi se jasnije izvršila validacija i

verifikacija dobivenih podataka kroz razmatranje naglih promjenjivih nestacionarnih strujanja kroz izradu $k-\varepsilon$ ili $k-\omega$ turbulentnih modela.

Zahvala. Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH. Također je dio istraživačkog projekta „Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškim područjima“ (UNIRI-TEHNIC-18-54).

Literatura

- [1] Shaughnessy, E.J., Katzl. M., Schaffer, J.P. (2005) *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University.
- [2] Jović, V. (2006) *Osnove hidromehanike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Element, Zagreb.
- [3] Chanson, H., Carvalho, R.F. (2015) Hydraulic Jumps and Stilling Basins. *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*, CRC Press, Leiden, Netherlands, p. 168.
- [4] Hassanpour, N., Hosseinzadeh, A.D., Farsadizadeh, D., Gualtieri, C. (2017) An Experimental Study of Hydraulic Jump in a Gradually Expanding Rectangular Stilling Basin with Roughened Bed, *Water*, 9, 945, doi:10.3390/w9120945
- [5] Hager, W.H. (1992) *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Springer Science and Business Media, Vol. 8., Berlin, Germany.
- [6] Ead, S., Rajaratnam, N. (2002) Hydraulic Jumps on Corrugated Beds, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, pp. 656-663.
- [7] Bejestan, M.S., Neisi, K. (2009) A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin, *Asian Journal of Applied Sciences*, 2, 5, pp. 436-445.
- [8] Deshmukh, A. A., Sudharsan, N., Vasudeo, A. D., Ghare, A. D. (2019) Effect of Roughness on Sequent Depth in Hydraulic Jumps over Rough Bed, *Građevinar*, 71 (2), pp. 105-111, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2017.2017>
- [9] Abbaspour A., Dalir A., Farsadizadeh D., Sadraddini, A. (2009) Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics, *Journal of Hydro Environment Research*, 3, 2, pp. 109-117.
- [10] Ghorbani, B., Bazaz M. (2015) Assessment of Rough Bed Length Variations on Hydraulic Jump Features, *International Journal Inventive Engineering and Sciences*, 3 (2015), 9, pp. 14-20.
- [11] Mirzaei, H., Tootoonchi, H. (2020) Experimental and Numerical Modeling of the Simultaneous Effect of Sluice Gate and Bump on Hydraulic Jump, *Modeling Earth Systems and Environment*, No. 6, doi: 10.1007/s40808-020-00835-5.

- [12] Abdel-Mageed, N. (2015) Effect of Channel Slope on Hydraulic Jump Characteristics. *Phys. Sci. Int. J.*, 7(4), pp. 223-233.
- [13] Ferro, V. (2000) Simultaneous Flow over and under a Gate, *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, ASCE, 126(3), pp. 190-193.
- [14] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B. (2010) *Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanika*, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka
- [15] *S-16 Hydraulic Flow Demonstrator - Closed and Open Channel Flow* (2011), Instruction Manual, Amfield, April 2011.
- [16] Golja, G. (2022) *Ekperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva širokog praga*, Završni rad, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka